

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2026, Том 18, № 2 / 2026, Vol. 18, Iss. 2 <https://esj.today/issue-2-2026.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/44ECVN226.pdf>

5.2.6. Менеджмент (экономические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Ковтуненко, М. Г. Управление твёрдыми коммунальными отходами: инновационные подходы к сортировке и переработке (анализ промышленных кейсов внедрения искусственного интеллекта и роботизации) / М. Г. Ковтуненко, Н. С. Иванюта, А. М. Хелая, Е. М. Новоторцева // Вестник евразийской науки. — 2026. — Т. 18. — № 2. — URL: <https://esj.today/PDF/44ECVN226.pdf>.

For citation:

Kovtunen M.G., Ivaniuta N.S., Khelaya A.M., Novotortseva E.M. Municipal solid waste management: innovative approaches to sorting and recycling (analysis of industrial cases of artificial intelligence and robotics implementation). *The Eurasian Scientific Journal*. 2026;18(2): 44ECVN226. Available at: <https://esj.today/PDF/44ECVN226.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 502/504

Ковтуненко Марина Георгиевна

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», Краснодар, Россия
Доцент кафедры «Технологии, организации, экономики строительства и управления недвижимостью»

Кандидат экономических наук, доцент

E-mail: dimarin@list.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=554452

Иванюта Николай Сергеевич

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», Краснодар, Россия

E-mail: ni22051990@gmail.com

Хелая Аврора Михайловна

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», Краснодар, Россия

E-mail: helaavrrora@gmail.com

Новоторцева Евгения Максимовна

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», Краснодар, Россия

E-mail: novotorceva23eva@gmail.com

**Управление твёрдыми коммунальными отходами:
инновационные подходы к сортировке и переработке
(анализ промышленных кейсов внедрения искусственного
интеллекта и роботизации)**

Аннотация. В статье представлен аналитический обзор и систематизация опыта внедрения технологий искусственного интеллекта и роботизации в процессы сортировки и мониторинга твердых коммунальных отходов в Российской Федерации. Авторами обоснована актуальность перехода от экстенсивного полигонного захоронения к экономике замкнутого цикла и необходимость повышения глубины извлечения вторичных материальных ресурсов. Целью работы является компаративный анализ эффективности различных технологических платформ сортировки на основе искусственного интеллекта и выявление системных ограничений их применения. Методологической основой исследования выбран метод кейс-стади. Авторами проанализированы пять репрезентативных промышленных кейсов. В работе выявлено, что точность нейросетевых алгоритмов распознавания фракций достигает 95–98 %, а применение

беспилотных летательных аппаратов позволяет сократить время инвентаризации объектов размещения отходов в двадцать раз по сравнению с ручными проверками. Авторами определены ключевые эксплуатационные барьеры, снижающие эффективность технологий в реальных производственных условиях: низкое качество предварительной подготовки сырья, проявляющееся в высокой степени загрязненности, деформации и взаимном перекрытии объектов на конвейерной ленте, а также оптическая неразличимость некоторых видов полимеров в инфракрасном спектре. В статье обоснована экономическая целесообразность внедрения систем искусственного интеллекта преимущественно на участках досортировки остаточных фракций и сформулированы критерии масштабируемости данных технологических решений для региональных операторов по обращению с отходами.

Ключевые слова: твердые коммунальные отходы; искусственный интеллект; машинное зрение; роботизация сортировки; дроновый мониторинг; экономика замкнутого цикла; вторичные материальные ресурсы; региональный оператор; кейс-стади; управление отходами

Введение

Трансформация системы обращения с твердыми коммунальными отходами (ТКО) является одним из приоритетов государственной экологической политики Российской Федерации, что закреплено в целях национального развития и федеральном проекте «Экономика замкнутого цикла», утвержденном Правительством Российской Федерации в 2022 году¹ Стратегической целью отрасли определён переход от линейной модели «добыча — производство — захоронение» к циклической модели, предполагающей максимальное вовлечение вторичных материальных ресурсов в хозяйственный оборот и снижение полигонного захоронения к 2030 году в два раза [1].

Несмотря на ввод значительных мощностей по обработке отходов, узким местом отрасли остаётся качество сепарации смешанного потока и объективность контроля за состоянием полигонов. Ручной труд на конвейерных лентах мусоросортировочных комплексов характеризуется высокой текучестью кадров, низкой производительностью труда и влиянием человеческого фактора на чистоту отбираемых фракций. Согласно исследованиям [2; 3] производительность ручной сортировки составляет в среднем 800–1200 килограммов на человека в смену, при этом точность отбора целевых компонентов не превышает 60–70 % [4, с. 99]. Дополнительными негативными факторами выступают высокий уровень профессиональных заболеваний среди сортировщиков (заболевания дыхательной системы, кожные патологии, травмы от острых фрагментов) и значительные затраты региональных операторов на обеспечение персонала средствами индивидуальной защиты и проведение медицинских осмотров [5].

В ответ на данные вызовы в 2024–2025 годах в российских регионах зафиксирован переход от единичных экспериментов к промышленному внедрению систем технического зрения, адаптивной робототехники и беспилотного мониторинга. Технологии искусственного интеллекта (ИИ) позволяют автоматизировать процессы распознавания морфологического состава отходов, классификации фракций по типам полимеров и цветовой гамме, а также оперативного выявления нарушений при эксплуатации объектов размещения [6; 7]. Однако, как показывает анализ отраслевых публикаций [8; 9], большинство материалов носит презентационный характер, констатируя факт установки оборудования без глубокого анализа эксплуатационных ограничений и сравнительных характеристик различных технологических платформ.

¹ Постановление Правительства Российской Федерации от 30.09.2022 № 1740 «Об утверждении паспорта федерального проекта "Экономика замкнутого цикла"». — Режим доступа URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202210050024> (дата обращения: 10.05.2026).

Цель исследования — восполнить данный пробел посредством систематизации и компаративного анализа эффективности инновационных подходов к сортировке и мониторингу ТКО на основе ИИ. Для достижения цели поставлены следующие задачи: (1) классифицировать типы внедряемых роботизированных решений по конструктивным и алгоритмическим признакам; (2) провести сравнительный анализ кейсов внедрения искусственного интеллекта в различных регионах Российской Федерации; (3) выявить системные ограничения, снижающие эффективность технологий в реальных производственных условиях; (4) оценить экономическую эффективность и потенциал цифровизации объектов размещения отходов на примере полигона в хуторе Копанском Краснодарского края.

Материалы и методы исследования

Методология и дизайн исследования

Исследование выполнено в жанре аналитического обзора с применением методологии кейс-стади, что позволяет детально изучить современную практику внедрения технологий в реальных производственных условиях, выявить как типовые паттерны успеха, так и специфические барьеры. Метод кейс-стади широко применяется в исследованиях по экономике природопользования и оценке эффективности технологических инноваций в сфере обращения с отходами [10].

Критерии отбора кейсов

Для обеспечения репрезентативности выборки в анализ были включены объекты, различающиеся по технологической архитектуре, географическому положению и стадии жизненного цикла внедрения ИИ. Отбор производился на основе следующих критериев: (1) наличие подтверждённой информации о промышленном внедрении технологии (стадия пилотного проекта или полномасштабной эксплуатации); (2) доступность технических параметров и эксплуатационных характеристик в открытых источниках; (3) релевантность для целей тиражирования опыта в масштабах отрасли.

В итоговую выборку вошли пять кейсов, характеристики которых представлены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристика объектов исследования

Номер кейса	Локация	Тип технологии	Год запуска	Ключевая особенность
Кейс 1	Тюмень	Робот-сортировщик с вакуумным захватом	2025	Пилотный проект Тюменского экологического объединения
Кейс 2	Комплекс по переработке отходов «Север» (Московская область)	Портальный робот с маятниковым захватом	2024–2025	Разработка резидента Инновационного научно-технологического центра «Сириус»
Кейс 3	Глазов (Удмуртская Республика)	Оптический сортировщик на основе ИИ	2024	Единственный в стране отечественный сепаратор объёмных пластиков
Кейс 4	68 субъектов в Российской Федерации	Дроновый мониторинг полигонов	2022–2025	Федеральная система с нейросетевым анализом нарушений
Кейс 5	Хутор Копанской (Краснодарский край)	Полигон с перспективой цифровизации	Объект на стадии реконструкции (завершение 2026 г.)	Информация о внедрении ИИ отсутствует, высокий потенциал

Разработано авторами

Источниковая база и методы сбора данных

Сбор данных осуществлялся методом контент-анализа открытых источников, включая официальные пресс-релизы и техническую документацию Публично-правовой компании «Российский экологический оператор»; данные региональных операторов (Акционерное общество «Мусороуборочная компания», Тюменское экологическое объединение); публикации в отраслевых и академических изданиях, индексируемых в Российском индексе научного цитирования и перечне Высшей аттестационной комиссии; верифицированные новостные материалы федеральных и региональных средств массовой информации [11]. Для обеспечения объективности сравнения были разработаны следующие оценочные критерии: точность распознавания фракций (в %); производительность (единиц в минуту или тонн в сутки); количество распознаваемых классов материалов; адаптивность к морфологическому составу отходов; наличие системных ограничений; экономическая эффективность (срок окупаемости, сокращение операционных затрат).

Результаты исследования

1. Компаративный анализ технологий сортировки с применением ИИ.

В ходе исследования были проанализированы три пилотных проекта внедрения интеллектуальной сортировки, каждый из которых представляет отдельную технологическую ветвь развития отрасли.

Кейс 1. Тюменская область. На мусоросортировочном заводе Тюменского экологического объединения внедрён роботизированный комплекс, оснащённый камерой высокого разрешения, нейросетью и системой вакуумного захвата.² Ключевые показатели: точность распознавания полиэтилентерефталата и полиэтилена низкого давления составляет 95 % (с прогнозом дообучения до 100 %), скорость перенастройки под новую фракцию — 20–30 минут, производительность завода — до 1500 тонн ТКО в сутки. Робот эффективно сепарирует пластиковую тару по цветовой гамме (голубой, прозрачный, зелёный, коричневый), что критически важно для получения качественной вторичной гранулы и повышения её рыночной стоимости на 15–20 % [12].

Кейс 2. Московская область (комплекс по переработке отходов «Север»). Резидент Инновационного научно-технологического центра «Сириус» (компания «Система 1») внедрил робота принципиально иной кинематической схемы — порталная конструкция с маятниковым захватом.³ Данное решение расширяет зону охвата конвейера и позволяет классифицировать до 54 типов материалов, включая алюминий, стеклобой и различные виды пластика. В настоящий момент робот используется для извлечения алюминиевой банки, с перспективой перехода на сепарацию многослойной упаковки и аэрозольных баллонов. Отличительной чертой кейса является робот-ориентированность: устройство безопасно функционирует в одной зоне с персоналом, что соответствует современным требованиям охраны труда.

Кейс 3. Удмуртская Республика (город Глазов). На мусоросортировочной станции Общества с ограниченной ответственностью «Строй-инвест» запущен единственный в стране оптический сортировщик отечественного производства на основе ИИ.⁴

² ИИ-робот приступил к сортировке отходов в Тюмени. — Режим доступа URL: <https://it.reo.ru/news/obrashchenie-s-tko/ii-robot-pristupil-k-sortirovke-otkhodov-v-tyumeni/> (дата обращения: 10.05.2026).

³ Компания из Сириуса внедрила собственную разработку на промышленном предприятии. — Режим доступа URL: <https://sirius.gov.ru/tpost/kompaniya-iz-siriusa-vnedrila-sobstvennyu-razrabotku-na-promyshlennom-predpriyatii> (дата обращения: 10.05.2026).

⁴ На мусоросортировочной станции в Глазове запустили искусственный интеллект. — Режим доступа URL: http://www.udmtv.ru/news/na_musorosortirovochnoy_stantsii_v_glazove_zapustili_iskusstvennyy_intellekt/ (дата обращения: 10.05.2026).

Ключевая специализация — отбор объёмных пластиков из смешанного потока. Производительность комплекса достигает 793 714 единиц вторсырья в сутки, а доля отбора вторичного сырья составляет до 73 % [13].

Важным преимуществом является не только высокая скорость, но и создание замкнутой цепочки сбыта: отобранный пластик поставляется на предприятия в Иваново (производство технических тканей) и Калугу (производство изделий из вторичных полимеров). Данный кейс демонстрирует эффективность импортозамещения в сегменте оборудования для сортировки — стоимость отечественного оптического сепаратора на 30–40 % ниже зарубежных аналогов при сопоставимых технических характеристиках [7].

Сравнительный анализ технических параметров трёх кейсов представлен в таблице 2.

Таблица 2

Сравнение технических параметров кейсов сортировки с ИИ

Параметр	Кейс 1 (Тюмень)	Кейс 2 (КПО «Север»)	Кейс 3 (Глазов)
Принцип работы	Вакуумный захват, нейросеть	Маятниковый захват, машинное зрение	Оптическая сепарация, искусственный интеллект
Точность (доля отбора)	95 %	До 80 % (алюминиевая банка)	73 % (объёмные пластики)
Количество фракций	5–6 (полиэтилентерефталат, полиэтилен низкого давления по цветам)	До 54 типов материалов	Объёмные пластики
Производительность	46–60 захватов в минуту	50–65 захватов в минуту	Около 794 тыс. единиц в сутки
Ключевое ограничение	Чувствительность к перекрытию объектов	Требуется предварительной подготовки потока	Специализация только на объёмных объектах

Разработана авторами

2. Системные ограничения внедрения ИИ в процессы сортировки ТКО.

Проведённый анализ позволил выявить ряд эксплуатационных барьеров, которые ранее фрагментарно освещались в научной литературе [6, с. 9]:

Проблема загрязнённого сырья.

Заявленная точность нейросетей в 95–98 % достигается на относительно чистой и недеформированной упаковке. В условиях конвейера, где полиэтилентерефталатная бутылка может быть сплюснута, покрыта слоем органических загрязнений или частично перекрыта другим предметом (окклюзия), точность идентификации падает на 15–20 % [14]. Нейросеть испытывает трудности с распознаванием объекта по неполному силуэту в условиях высокой скученности отходов. Решением данной проблемы является дообучение моделей на специфических наборах данных, собранных непосредственно на производственных линиях.

Оптическая неразличимость полимеров.

В инфракрасном диапазоне некоторые марки полипропилена и полиэтилена высокой плотности имеют схожие спектральные сигнатуры. Это провоцирует ложные срабатывания при сортировке смеси пластиковой тары, что критично для получения чистоты товарной партии вторсырья. Перспективным направлением является применение гиперспектральных камер и мультисенсорных систем, сочетающих инфракрасные и визуальные датчики [15].

Экономическая целесообразность.

Анализ кейсов показывает, что роботизированная ячейка наиболее эффективна не на пиковых нагрузках конвейера, а на этапе досортировки остаточных фракций, где поток уже разрежен после грохотов и баллистических сепараторов. Установка робота на входном потоке экономически не оправдана из-за высокой плотности материала и недостаточной скорости захвата. Оптимальной конфигурацией является размещение 2–3 роботизированных ячеек на линии досортировки производительностью 100–150 тыс. т в год [4].

3. Экономическая эффективность роботизации сортировочных процессов.

Для оценки экономической целесообразности внедрения роботизированных систем авторами проведено моделирование операционных затрат при ручной и автоматизированной сортировке. Результаты расчётов, выполненных на основе авторского анализа конъюнктуры рынка, открытых данных об уровне оплаты труда в отрасли и коммерческих предложений производителей оборудования, представлены в таблице 3.

Таблица 3

Сравнительный анализ затрат на сортировку (на одну линию производительностью 100 тыс. т в год)

Статья затрат	Ручная сортировка (6 сортировщиков)	Роботизированная ячейка (2 робота)
Капитальные затраты (единовременно), млн руб.	0 руб.	25–30
Фонд оплаты труда (в год), млн руб.	4,8–5,5	0,8–1,0 (оператор)
Средства индивидуальной защиты и медицинские осмотры (в год), млн руб.	0,6–0,8	0,1
Техническое обслуживание (в год), млн руб.	0,1	0,5–0,7
Итого операционных затрат в год, млн руб.	5,5–6,4	1,4–1,8
Срок окупаемости капитальных вложений, год	—	5–7

Составлено авторами на основе моделирования⁵

Как следует из результатов моделирования, представленных в таблице 3, годовая экономия операционных затрат при замене шести сортировщиков на две роботизированные ячейки составляет 4,0–4,5 млн рублей. Полученный срок окупаемости капитальных вложений (25–30 млн руб.) находится в диапазоне 5–7 лет, что соответствует инвестиционным горизонтам, характерным для проектов региональных операторов [5]. При этом важно отметить, что, помимо прямой экономии, роботизация обеспечивает дополнительные нефинансовые выгоды: повышение стабильности качества сортировки, снижение зависимости от кадрового дефицита, улучшение условий труда и сокращение производственного травматизма [2].

4. Инновации в мониторинге: федеральная система дронного контроля

Отдельным вектором цифровизации отрасли является применение беспилотных авиационных систем и нейросетей для контроля за объектами размещения ТКО. С 2022 по 2025 год Российский экологический оператор провёл масштабную инспекцию полигонов с использованием искусственного интеллекта, в ходе которой было обследовано 582 объекта в 68 субъектах Российской Федерации, построено 597 цифровых двойников полигонов, выявлено более 7500 нарушений природоохранного законодательства.⁶

⁵ Расчёты выполнены авторами на основе моделирования. Исходные данные для моделирования получены из открытых источников: сведения о среднемесячной номинальной начисленной заработной плате работников организаций по виду экономической деятельности «Водоснабжение; водоотведение, организация сбора и утилизации отходов, деятельность по ликвидации загрязнений» за 2024 г. (последний доступный годовой отчёт на момент подготовки статьи). — Росстат. — URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/zp_2024.pdf (дата обращения: 10.05.2026).

Информация о технических характеристиках и ориентировочной стоимости роботизированных систем сортировки отходов на основе данных из открытых каталогов производителей, например: ООО «Экомаш». — URL: <https://ecomg.ru/> (раздел «Роботы для сортировки мусора»).

ООО «Нетмус». — URL: <https://netmus.ru/> (раздел «Оборудование для сортировки отходов») (дата обращения: 10.05.2026).

⁶ Российский экологический оператор выявил более 7 500 нарушений на полигонах с помощью беспилотников и нейросетей. — Режим доступа URL: <https://reo.ru/tpost/fntps2831-reo-viyavil-bolee-7-500-narushenii-na-po> (дата обращения: 10.05.2026).

Нейросетевые алгоритмы автоматически детектируют 10 видов нарушений, включая разлёт фракций за границы участка, отсутствие обводных каналов, ограждений, весового контроля, контрольно-пропускных пунктов, а также тление, возгорания и массовое скопление птиц (с подсчётом особей). Ключевым экономическим эффектом является сокращение времени инвентаризации в 20 раз вместо трёх месяцев ручного обхода — пять дней автоматизированного анализа.⁷ Применение дронного мониторинга позволяет региональным операторам своевременно выявлять нарушения и минимизировать экологические риски, а надзорным органам — формировать объективную доказательную базу для применения мер административного воздействия.

5. Анализ потенциала цифровизации полигона в хуторе Копанском (Краснодарский край)

Полигон в хуторе Копанском, эксплуатируемый Акционерным обществом «Мусороуборочная компания», обслуживает город Краснодар и Динской район.⁸

Анализ текущего состояния объекта показывает, что, несмотря на масштабную модернизацию инженерной инфраструктуры, информация о внедрении технологий сортировки с применением искусственного интеллекта или дронного мониторинга на данном объекте в открытых источниках отсутствует. Это позволяет классифицировать полигон в Копанском как объект переходного типа с высоким потенциалом цифровой трансформации.

Учитывая близость к крупной городской агломерации и значительный объём входящего потока, можно спрогнозировать, что внедрение даже одной роботизированной ячейки на линиях досортировки позволит увеличить извлечение вторичных материальных ресурсов на 5–7 %. Данный прогноз основывается на экстраполяции результатов аналогичных проектов, в частности, тюменского кейса [12]. При годовом объёме поступления на полигон в Копанском в 650 тысяч тонн указанный прирост эффективности эквивалентен дополнительному отбору от 32 до 45 тысяч тонн вторичного сырья ежегодно. Оценка потенциального дополнительного дохода регионального оператора выполнена авторами на основе открытых данных о рыночной стоимости вторичных фракций. Согласно отраслевым обзорам, цены на различные виды перерабатываемого пластика и другого вторсырья в 2024–2025 годах находились в широком диапазоне: от 15 до 35 тысяч рублей за тонну.⁹ Исходя из этого, дополнительный доход регионального оператора может составить от 480 миллионов до 1,5 миллиарда рублей в год.

Кроме того, интеграция в федеральную систему дронного мониторинга Российского экологического оператора позволила бы в оперативном режиме контролировать соблюдение границ размещения отходов, что особенно актуально в контексте многолетних жалоб жителей соседних населённых пунктов на разнос фракций и неприятные запахи.¹⁰ Автоматический мониторинг эмиссий и границ полигона создаёт объективную доказательную базу соблюдения экологических норм и способствует повышению социальной приемлемости объекта.

⁷ Дроны с ИИ в 20 раз ускорили инвентаризацию полигонов — Российский экологический оператор. — Режим доступа URL: <https://reo.ru/tpost/amrzym0yx1-reo-primenenie-dronov-pri-inventarizatsi> (дата обращения: 10.05.2026).

⁸ Реконструкция полигона в Копанском завершится в 2026 году // РБК Краснодар. — 2026. — 9 февраля. — Режим доступа URL: <https://kuban.rbc.ru/krasnodar/freenews/698b05f19a794792af287dfd> (дата обращения: 10.05.2026).

⁹ Индекс цен на вторичные полимеры в России / Plastinfo.ru. — Режим доступа URL: <https://plastinfo.ru/prices/secoundary/> (дата обращения: 10.05.2026).

¹⁰ ЭкоВахта и местные активисты посетили полигон ТКО возле хутора Копанской // Экологическая Вахта по Северному Кавказу. — 2020. — 19 июня. — Режим доступа URL: <http://www.ewnc.org/node/28144> (дата обращения: 10.05.2026).

Обсуждение

Полученные результаты демонстрируют, что российский рынок технологий обращения с ТКО переходит от стадии экспериментов к стадии промышленной апробации. Сравнение кейсов Тюмени и комплекса по переработке отходов «Север» показывает дивергенцию технологических стратегий: тюменский подход ориентирован на высокоточный отбор монопотоков пластика, тогда как решение из Инновационного научно-технологического центра «Сириус» стремится к универсальности (до 54 фракций). В свою очередь, кейс Глазова подтверждает экономическую эффективность использования отечественного программного обеспечения и оборудования, что является критически важным в условиях необходимости достижения технологического суверенитета [7].

Выявленные ограничения (окклюзия, загрязнённость, оптическая схожесть полимеров) указывают на то, что ключевым драйвером повышения эффективности в ближайшие годы станет не столько совершенствование архитектуры нейросетей, сколько качество предварительной подготовки потока и внедрение систем технического зрения, работающих в мультиспектральном диапазоне. Данный вывод коррелирует с результатами исследований, согласно которым комплексный подход к модернизации сортировочной инфраструктуры (предварительная обработка потока + интеллектуальная сепарация) обеспечивает синергетический эффект, превышающий сумму эффектов от отдельных мероприятий [9, с. 182].

Особого внимания заслуживает экономический аспект масштабирования технологий. Проведённые расчёты показывают, что при текущем уровне цен на оборудование и фонда оплаты труда срок окупаемости роботизированных ячеек составляет 5–7 лет. Для ускорения окупаемости целесообразно применение механизмов государственной поддержки, включая субсидирование процентной ставки по инвестиционным кредитам, налоговые льготы для региональных операторов, внедряющих наилучшие доступные технологии, и софинансирование пилотных проектов в рамках федерального проекта «Экономика замкнутого цикла» [4].

Внедрение технологий ИИ на таких объектах, как полигон в Копанском, может стать драйвером не только экономической эффективности, но и социальной приемлемости объекта. Автоматический мониторинг границ и эмиссий создаёт объективную доказательную базу соблюдения экологических норм, что особенно важно для объектов, расположенных вблизи крупных жилых массивов. Кроме того, цифровизация процессов обращения с отходами способствует повышению прозрачности отрасли и формированию доверия со стороны населения к деятельности региональных операторов [13, с. 195].

Заключение

Проведённый анализ позволяет сделать следующие выводы:

1. Происходит дифференциация рынка решений на основе искусственного интеллекта для сортировки ТКО: от узкоспециализированных высокоточных систем отбора полиэтилентерефталата до универсальных роботов-манипуляторов и средств дрона мониторинга. Каждый тип решения имеет свою нишу применения в зависимости от морфологического состава входящего потока и экономических параметров объекта.
2. Точность нейросетей в промышленных условиях снижается из-за окклюзии и загрязнения сырья, что требует их дообучения на специализированных датасетах. Дополнительным фактором, снижающим эффективность, является оптическая неразличимость некоторых полимеров в инфракрасном спектре.

3. Экономическая эффективность роботизации максимальна на участках досортировки. Годовая экономия затрат при замене шести сотрудников на две роботизированные ячейки может достигать 4,5 млн руб. при сроке окупаемости 5–7 лет. Для полигона в Копанском прогнозируемый прирост выборки вторсырья может составить до 45 тыс. т ежегодно.
4. Масштабирование федеральной системы дронного мониторинга на все региональные полигоны является условием для создания прозрачной системы обращения с ТКО.

Перспективы дальнейших исследований связаны с разработкой гибридных рабочих мест «человек + робот», созданием отраслевых стандартов обучения нейросетей с учётом региональной специфики морфологического состава отходов, а также оценкой влияния цифровизации на достижение целевых показателей федерального проекта «Экономика замкнутого цикла».

ЛИТЕРАТУРА

1. Тихонова Т.В. Оценка цифровой трансформации системы обращения с твердыми коммунальными отходами. Региональный аспект / Т.В. Тихонова // Известия Коми научного центра УрО РАН. — 2025. — № 4. — С. 82–92. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-tsifrovoy-transformatsii-sistemy-obrascheniya-s-verdymi-kommunalnymi-othodami-regionalnyy-aspekt> (дата обращения: 10.05.2026).
2. Буторов Н.С. Реализация реформы обращения с твердыми коммунальными отходами на территории Чувашской Республики: проблемы и перспективы / Н.С. Буторов, Д.А. Петров, И.В. Никонорова // Международный научно-исследовательский журнал. — 2025. — № 11(161). — URL: <https://research-journal.org/archive/11-161-2025-november/10.60797/IRJ.2025.161.26> (дата обращения: 10.05.2026).
3. Епишов А.П. Экономика замкнутого цикла: проблемы и пути решения на современном этапе / А.П. Епишов, С.В. Завьялов, М.А. Коваленко, С.Е. Жура // Вестник Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова. — 2025. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekonomika-zamknutogo-tsikla-problemy-i-puti-resheniya-na-sovremennom-etape> (дата обращения: 10.05.2026).
4. Трофимова Н.Н. Экономика замкнутого цикла и устойчивое развитие / Н.Н. Трофимова // Этносоциум. — 2022. — № 12(174)- С. 50–56. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekonomika-zamknutogo-tsikla-i-ustoychivoe-razvitie/viewer> (дата обращения: 10.05.2026).
5. Хасанова Л.Н. Разработка системы автоматической сортировки мусора на основе Arduino / Л.Н. Хасанова, П.Н. Скуратова, С.А. Мусина // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2025. — Т. 336, № 2. — С. 66–78. — URL: <https://earchive.tpu.ru/handle/11683/85126> (дата обращения: 10.05.2026).
6. Шкарупета Е.В. Цифровая циркулярная экономика: концепция, модель, стратегии, фреймворк, технологии / Е.В. Шкарупета, Е.А. Ильина // Организатор производства. — 2022. — Т. 30, № 4. — С. 9–17. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovaya-tsirkulyarnaya-ekonomika-kontseptsiya-model-strategii-freymvork-tehnologii> (дата обращения: 10.05.2026).

7. Башкатов Д.А. Подходы к применению искусственного интеллекта для сортировки твердых отходов в России / Д.А. Башкатов, Р.А. Русинов, Л.А. Полулях // Международный научно-исследовательский журнал . — 2025. — № 1(151) — С. 1–8. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/podhody-k-primeneniyu-iskusstvennogo-intellekta-dlya-sortirovki-tverdyh-othodov-v-rossii/viewer> (дата обращения: 03.06.2026).
8. Смирнов Е.Ф. Робот-сортировщик мусора SorTТech с искусственным интеллектом / Е.Ф. Смирнов // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых — СПб.: Университет ИТМО, 2025. — URL: <https://kmu.itmo.ru/digests/article/15822> (дата обращения: 10.05.2026).
9. Журавлева А.Н. Сравнительный анализ методов переработки и обезвреживания ТКО / А.Н. Журавлева // Управление техносферой. — 2025. — Т. 8, вып. 2. — С. 172–188. — DOI: 10.35634/UdSU.2025.94.35.003. — URL: <https://technosphere-ing.ru/ru/technosphere/issue/30/3003> (дата обращения: 10.05.2026).
10. Роштова А.С. Разработка концепции умной системы сбора и переработки отходов в Чебоксарах с использованием ИИ для оптимизации маршрутов мусоровозов и повышения эффективности сортировки отходов / А.С. Роштова // Актуальные вопросы экономики, права и социологии: материалы III Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. (Чебоксары, 23 окт. 2025 г.). — Чебоксары: ИД «Среда», 2025. — С. 366–371. — URL: https://phsreda.com/ru/article/151083/discussion_platform (дата обращения: 10.05.2026).
11. Яббарова Р.И. Экономика замкнутого цикла в сфере обращения с твердыми коммунальными отходами: основные факторы и критерии оценки эффективности / Р.И. Яббарова // Юг России: экология, развитие. — 2025. — Т. 20, № 1. — С. 195–203. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekonomika-zamknutogo-tsikla-v-sfere-obrascheniya-s-tverdymi-kommunalnymi-othodami-osnovnye-factory-i-kriterii-otsenki-effektivnosti> (дата обращения: 10.05.2026).
12. Чашин М.Р. Эколого-экономическая оценка обращения с твердыми коммунальными отходами на примере крупных городов России / М.Р. Чашин, Е.Р. Магарил // Journal of Applied Economic Research. — 2025. — Т. 24, № 4. — С. 1343–1370. URL: https://journalaer.ru/fileadmin/user_upload/site_15934/2025/08_CHashchin_M_agaril.pdf (дата обращения: 10.05.2026).
13. Данилов-Данильян В.И. Глобальная экологическая проблема и устойчивое развитие // Вестник Московского университета. Серия 6. Экономика. — 2019. — № 4. — С. 8–23. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/globalnaya-ekologicheskaya-problema-i-ustoychivoe-razvitie/viewer> (дата обращения: 10.05.2026).
14. Зеленая экономика и цели устойчивого развития для России: коллективная монография / под научной редакцией С.Н. Бобылёва, П.А. Кирюшина, О.В. Кудрявцевой. — Москва: Экономический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, 2019. — 284 с. — URL: https://lk.msu.ru/uploads/attachments/attachment_1808_1584613826.pdf?ysclid=mpvflsphpt821389365 (дата обращения: 10.05.2026).
15. Прокашев В.А. Возможности улучшения применения компьютерного зрения в сортировке твёрдых коммунальных отходов / В.А. Прокашев. — DOI: 10.15862/04INOR224. // Отходы и ресурсы. — 2024. — Т. 11. — № 2. — URL: <https://resources.today/PDF/04INOR224.pdf> (дата обращения: 10.05.2026).

Kovtunenkov Marina Georgievna

Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia

E-mail: dimarin@list.ru

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=554452

Ivaniuta Nikolai Sergeevich

Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia

E-mail: ni22051990@gmail.com

Khelaya Avrora Mikhailovna

Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia

E-mail: helaavvrora@gmail.com

Novotortseva Evgeniia Maksimovna

Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia

E-mail: novortseva23eva@gmail.com

Municipal solid waste management: innovative approaches to sorting and recycling (analysis of industrial cases of artificial intelligence and robotics implementation)

Abstract. This article presents an analytical review and systematization of the experience of implementing artificial intelligence and robotic technologies in the sorting and monitoring of municipal solid waste in the Russian Federation. The authors substantiate the relevance of the transition from extensive landfill disposal to a closed-loop economy and the need to increase the recovery of secondary material resources. The aim of the study is to comparatively analyze the effectiveness of various AI-based sorting technologies and identify systemic limitations in their application. The methodological basis of the study is a case study. The authors analyzed five representative industrial cases. The study found that the accuracy of neural network algorithms for fraction recognition reaches 95–98 percent, and the use of unmanned aerial vehicles reduces the inventory time at waste disposal sites by twenty times compared to manual inspections. The authors identified key operational barriers that reduce the effectiveness of these technologies in real-world production conditions: poor raw material pretreatment, manifested by high levels of contamination, deformation, and overlapping of objects on the conveyor belt, as well as the optical indistinguishability of some polymers in the infrared spectrum. The article substantiates the economic feasibility of implementing artificial intelligence systems primarily in residual fraction sorting areas and formulates scalability criteria for these technological solutions for regional waste management operators.

Keywords: municipal solid waste; artificial intelligence; machine vision; robotic sorting; drone monitoring; circular economy; secondary material resources; regional operator; case study; waste management