

Интернет-журнал «Отходы и ресурсы» <https://resources.today>
Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling

2025, Том 12, № 1 / 2025, Vol. 12, Iss. 1 <https://resources.today/issue-1-2025.html>

URL статьи: <https://resources.today/PDF/16ECOR126.pdf>

DOI: 10.15862/16ECOR126 (<https://doi.org/10.15862/16ECOR126>)

5.2.3. Региональная и отраслевая экономика (экономические науки)

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Авраменко, А. А. Оценка преимуществ использования беспилотных летательных аппаратов для мониторинга объектов твердых коммунальных отходов как элемента экономики замкнутого цикла / А. А. Авраменко, В. П. Хомяков, Т. Б. Усманов // Отходы и ресурсы. — 2025. — Т. 12. — № 1. — URL: <https://resources.today/PDF/16ECOR126.pdf> DOI: 10.15862/16ECOR126.

For citation:

Avramenko A.A., Khomyakov V.P., Usmanov T.B. Assessment of the advantages of using unmanned aerial vehicles for monitoring municipal solid waste facilities as an element of a closed-loop economy. *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*. 2025;12(1): 16ECOR126. Available at: <https://resources.today/PDF/16ECOR126.pdf>. DOI: 10.15862/16ECOR126. (In Russ., abstract in Eng.).

Авторы выражают благодарность Институту экологии и природопользования Казанского федерального университета за возможность выполнения исследований, а также за предоставленное оборудование и консультации

УДК 502.33+504.03

Авраменко Андрей Алексеевич

ФГАОУ ВО «Московский государственный институт международных отношений (университет) Министерства иностранных дел Российской Федерации», Москва, Россия
Доцент кафедры «Международных комплексных проблем природопользования и экологии»
Кандидат экономических наук, доцент
E-mail: a.avramenko@my.mgimo.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5862-5466>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=254398
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57211265068>

Хомяков Владимир Петрович

ФГАОУ ВО «Московский государственный институт международных отношений (университет) Министерства иностранных дел Российской Федерации», Москва, Россия
E-mail: v.hamster04@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3022-6257>

Усманов Тимур Булатович

ФГАОУ ВО «Московский государственный институт международных отношений (университет) Министерства иностранных дел Российской Федерации», Москва, Россия
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3923-684X>

**Оценка преимуществ использования
беспилотных летательных аппаратов для мониторинга
объектов твердых коммунальных отходов как элемента
экономики замкнутого цикла**

Аннотация. Экономика замкнутого цикла предполагает ответственное обращение с отходами. Снижение роста накопления производственных и твердых коммунальных отходов, а также сокращение площади занимаемых отходами земель — актуальные вызовы современности. В России и за рубежом выработана устойчивая нормативно-правовая база в сфере обращения с отходами, для ее соблюдения требуется развитие надежных систем обеспечения контроля. В этих целях все шире применяются приемы наблюдения и обработки дистанционных данных, в том числе полученных с помощью беспилотных летательных аппаратов. На примере исследования двух полигонов твердых коммунальных отходов и одной особо охраняемой природной территории Республики Татарстан авторами представлены аргументы в пользу применения таких технологий. В статье обсуждаются достоинства и ограничения данных, полученных с помощью беспилотных летательных аппаратов для выявления нарушений режима эксплуатации лицензионного участка полигона твердых коммунальных отходов и в контроле образования несанкционированных свалок. При обработке материалов фотосъемки территории полигонов обнаружен ряд несоответствий фактических характеристик полигонов заявленным, в том числе: захламленность прилегающих участков, превышение площади захоронения, нарушение геометрических характеристик свалочного тела. При выполнении ежегодной фотосъемки особо охраняемой природной территории обнаружены и зафиксированы нарушения режима охраны, связанные с периодическими захоронениями на территории строительного мусора, которые спустя год уже перестают визуализироваться на снимках. Необходима организация регулярного и оперативного наблюдения территорий полигонов твердых коммунальных отходов и своевременная регистрация нарушений в границах охраняемых территорий. Указанные мероприятия способствуют цивилизованному решению проблемы утилизации и захоронения твердых коммунальных отходов и позволяют приблизиться к достижению экономики замкнутого цикла.

Ключевые слова: обращение с отходами; экологический мониторинг; беспилотные летательные аппараты; твердые коммунальные отходы; полигон твердых коммунальных отходов; несанкционированные свалки; особо охраняемая природная территория

Введение

Актуальность исследования. Одной из основных проблем современности является перепроизводство и чрезмерное потребление ресурсов, что ведёт за собой образование большого количества производственных и твердых коммунальных отходов (ТКО). По оценкам группы Всемирного банка ожидается, что к 2050 году объем ежегодного производства ТКО вырастет до 3,40 млрд т [1]. Самым простым и наиболее популярным способом утилизации ТКО является вывоз отходов на полигоны [2]. Нарушение правил их эксплуатации представляет угрозу для природы и человека. К ряду серьезных экологических проблем также приводит рост числа и площади несанкционированных свалок.

Контроль за соответствием лицензированного полигона ТКО требованиям законодательства достигается за счет мониторинговых наблюдений.¹ Необходим также и мониторинг природных объектов: он позволяет бороться с несанкционированными свалками, способствуя их выявлению и ликвидации.

Одним из основных источников данных для экологического мониторинга полигонов ТКО и несанкционированных свалок являются материалы дистанционного зондирования —

¹ Пространственное агентство «Иннотер». Мониторинг полигонов ТКО и обнаружение стихийных свалок по данным космической съемки. — Режим доступа: URL <https://innoter.com/articles/monitoring-poligonov-tko-i-obnaruzhenie-stikhiynykh-musorosvalok-po-dannym-kosmicheskoy-semki/> (дата обращения: 30.09.2024).

наблюдения поверхности Земли из космоса, с летательных аппаратов и т. п.² В мировой практике экологических исследований с недавнего времени все более широко стали использовать беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Применение БПЛА имеет ряд преимуществ перед другими дистанционными методами: снимки отличаются высокой детальностью и открывают множество возможностей для оперативного контроля антропогенных воздействий и нарушений, а сами БПЛА сравнительно недороги, мобильны и эффективны. Ежегодное повторение съемки дает возможность сравнивать данные многолетних мониторинговых наблюдений, сопоставлять серии снимков и созданных карт, отслеживать и количественно оценивать динамические изменения на изучаемых объектах³.

Объект исследования: лицензированные полигоны ТКО и несанкционированные свалки отходов, в пределах территорий естественных экологических систем и природно-антропогенных объектов.

Предмет исследования: мониторинг состояния полигонов ТКО, идентификация и характеристика несанкционированных свалок.

Цель исследования: рассмотрение преимуществ экологического мониторинга с помощью БПЛА на примере организации наблюдения за лицензированными полигонами ТКО и несанкционированными свалками.

Задачи исследования:

1. Выполнение фотосъемки объектов с помощью БПЛА, преобразование снимков и создание цифровых карт.
2. Обзор документации по эксплуатации полигонов ТКО.
3. Сравнительная оценка характеристик лицензированных полигонов, полученных при помощи дистанционной съемки в Республике Татарстан.
4. Выявление несанкционированных свалок в пределах территорий естественных экосистем и природно-антропогенных объектов.

Обращение с ТКО и циклическая экономика

Экономика замкнутого цикла (ЭЗЦ) или циклическая экономика определяется как экономическая модель эффективного использования ресурсов через создание замкнутых циклов производства продукции и сокращение использования первичных ресурсов [3; 4], предотвращение образования отходов и их повторное использование и переработку [5]. Развитые страны обладают богатым опытом устойчивого обращения с отходами: раздельный сбор и сортировка ТКО, переработка отсортированных отходов в заводских условиях, сжигание и последующее захоронение несортируемых отходов [2; 6]. В Европейском Союзе функционирует развитая нормативно-правовая база в сфере обращения с отходами, законодательно закрепляющая перечисленные направления.⁴

² Кашкин, В.Б. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений: Учебное пособие / В.Б. Кашкин, А.И. Сухинин. — М.: Логос, 2001. — 264 с.

³ Лабутина И.А., Использование данных дистанционного зондирования для мониторинга экосистем ООПТ. Методическое пособие / Лабутина И.А., Балдина Е.А. — М.: 2011. — 90 с.

⁴ Директива Европейского Парламента и Совета Европейского Союза 2008/98/ЕС от 19.11.2008 об отходах и отмене ряда директив. — Режим доступа: URL: <https://wecoop.eu/wp-content/uploads/2020/04/Директива-Европейского-Парламента-и-Совета-Европейского-Союза-200898ЕС.pdf> (дата обращения: 20.08.2024).

Россия активно развивает нормативную базу устойчивого обращения с отходами [7]. Основополагающим нормативным документом, регулирующим деятельность по обращению с отходами, является Федеральный закон от 24.06.1998 № 89-ФЗ(24) «Об отходах производства и потребления», который постоянно перерабатывается и актуализируется. Приоритетными направлениями государственной политики в области обращения с отходами является комплексная переработка материально-сырьевых ресурсов, вовлечение отходов в хозяйственный оборот, международное сотрудничество, максимальное использование исходных сырья и материалов, предотвращение и сокращение образования отходов, их обработка и утилизация.⁵ Тем не менее за совершенствованием правовой базы стоит удручающая статистика: ежегодно в России образуется 48 млн т ТКО (по состоянию на 2021 г.), а перерабатывается лишь 46 %.⁶ По состоянию на 2018 год (более актуальной информации в открытых источниках не обнаружено) полигоны ТКО, являясь специально оборудованными сооружениями, предназначенными для размещения отходов, занимали площадь 4 млн га. К 2022 г. в России насчитывалось более 4 тыс. санкционированных полигонов ТКО.⁷ Кроме того, ежегодно под новые санкционированные объекты отводится до 0,4 млн га.⁸

Реализация в России моделей ЭЗЦ предполагает активное участие государственных и муниципальных структур, ответственных за утилизацию отходов, в интенсификации мер по контролю за соблюдением требований в отношении эксплуатации полигонов ТКО, их соответствия проектным планам и заявленным характеристикам в целях минимизации ущерба окружающей среде. Основной задачей природоохранной деятельности в этом направлении является оценка остаточной емкости полигонов ТКО, которая, с учетом массы ТКО, поступающей на захоронение, и степенью ее уплотнения при складировании, определяет срок эксплуатации полигона. В связи с этим, с целью предотвращения нарушения норм захоронения и эколого-эпидемиологического загрязнения проводится определение фактических геометрических параметров массива захоронения ТКО на полигоне [8].

Осложняющим фактом проблемы утилизации и захоронения ТКО в России является также наличие большого числа несанкционированных свалок на территориях, не предназначенных для размещения отходов. Правительство и субъекты РФ предпринимают действия по их ликвидации, однако на конец 2022 года на территории РФ число нелегальных свалок достигает 13 000.⁹ Появление таких свалок связано с отсутствием налаженной системы сбора, транспортировки и переработки отходов и слабой координацией взаимодействия участников процесса сбора отходов [9].

⁵ Федеральный закон от 24.06.1998 N 89-ФЗ (ред. от 04.08.2023) "Об отходах производства и потребления" (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.10.2023). — Режим доступа: URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_19109/ (дата обращения: 15.10.2024).

⁶ Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2021 году». — Режим доступа: URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii_v_2021/ (дата обращения: 15.10.2024).

⁷ Государственный реестр объектов размещения отходов. Сайт Федеральной службы по надзору в сфере природопользования (РОСПРИРОДНАДЗОР). — Режим доступа: URL: <https://rpn.gov.ru/opendata/7703381225-groro> (дата обращения: 15.10.2024).

⁸ Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 25.01.2018 г. № 84-р. — Режим доступа: URL: <http://static.government.ru/media/files/y8PMkQGZLfY7jhn6QMruaKoferAowzJ.pdf> (дата обращения: 15.10.2024).

⁹ Количество несанкционированных свалок отходов на территории субъекта Российской Федерации по состоянию на конец отчетного периода — 2022. Сайт ЕМИСС — Государственная Статистика. — Режим доступа: URL: <https://fedstat.ru/indicator/60978> (дата обращения: 15.10.2024).

Российская Федерация ставит амбициозные цели — увеличить к 2030 г. долю утилизированных (переработанных) отходов до 86 %, что позволит стране стать ближе к ЭЗЦ и устойчивой политике в области обращения с отходами. В этой связи важно наладить систему мониторинга и выявления нарушений норм эксплуатации полигонов ТКО для обеспечения их соответствия санитарно-эпидемиологическим требованиям, а также обеспечить оперативное выявление и устранение с несанкционированных свалок

Система мониторинга полигонов ТКО и обеспечение выявления несанкционированных свалок достигается различными методами. Эффективным, но уже ставшим традиционным способом проведения перечисленных мероприятий является использование данных дистанционного зондирования Земли, полученных из космоса в сочетании с выборочным наземным контролем [10]. Помимо этого, перспективным и сравнительно более оперативным методом наблюдения в отношении мониторинга полигонов ТКО становится получение данных с БПЛА [11; 12].

Использование беспилотных аппаратов в российских и зарубежных практико-ориентированных исследованиях

БПЛА представляют широкий спектр возможностей исследователям и народному хозяйству [13], в том числе и для исследования объектов ТКО [12]. Направления использования БПЛА за рубежом крайне разнообразны: так, например, группа исследователей из Китая предлагает инновационный метод автоматической проверки состояния линий электропередач с использованием БПЛА [14]. Беспилотники используются в Африке для борьбы с незаконной охотой на носорогов и слонов [15] путем выявления актов таковых действий и обеспечивая контроль за численностью популяций. Исследователи из Университета Ланкастера и Университета Миссури использовали БПЛА для изучения разных типов овражной эрозии [16]. Сотрудники Национального Тайваньского Университета Океанографии представили метод выявления и мониторинга дрейфующих «мусорных островов» в труднодоступных океанических пространствах и прибрежных зонах с использованием БПЛА [17].

Опыт отечественного использования БПЛА также достаточно богат. БПЛА эффективно используются для исследования и локализации очагов поражения хвойных лесов насекомыми-вредителями [18]. Беспилотники применяются для мониторинга состояния берегов водоемов и оценки интенсивности проявления экзогенных геологических процессов вблизи них [19]. В сельском хозяйстве целевыми возможностями применения БПЛА становятся инвентаризация и охрана сельхозугодий, создание электронных карт полей [20]. Помимо научной и научно-хозяйственной сферы БПЛА интересны и представителям бизнеса. Компания «Skyeermar»¹⁰ предоставляет услуги сбора любых необходимых данных с использованием беспилотников и последующий их анализ.

Материалы и методы исследования

Исследование выполнено в рамках работ по оценке остаточной емкости лицензированных полигонов ТКО, организованных по распоряжению Росприроднадзора. Для проведения исследования использовались проектные данные о полигонах ТКО в Республике Татарстан (РТ): информация о характеристиках лицензированных полигонов и правил их

¹⁰ Официальный сайт компании «Skyeermar». — Режим доступа: URL: <https://skyeermar.com/ru> (дата обращения: 15.08.2024).

эксплуатации, заявленных в официальных документах.¹¹ Информация о фактическом состоянии полигонов ТКО получена с использованием БПЛА: территорию полигонов снимали в соответствии с полетным заданием в приложении Drone Deploy, установленном на обычном смартфоне, используемом для управления беспилотником (рис. 1 а). При проведении съемки использовался бытовой мультироторный беспилотник DJI Phantom 4 (рис. 1 б), поскольку для мониторинга полигонов ТКО или выявления несанкционированных свалок не требуется специального дорогостоящего профессионального оборудования. Кроме модельной линейки DJI Phantom, к наиболее доступным относятся дроны модели DJI Mavic. Более детальная съемка предполагает использование камер более высокого качества, но для их поднятия в воздух требуются промышленные БПЛА (DJI Matrice 300 RTK). Наиболее специализированными беспилотниками являются модели российского производителя GeoScan, снимки с которых позволяют строить цифровые модели даже с учетом растительности — модель «Геодезия 401».

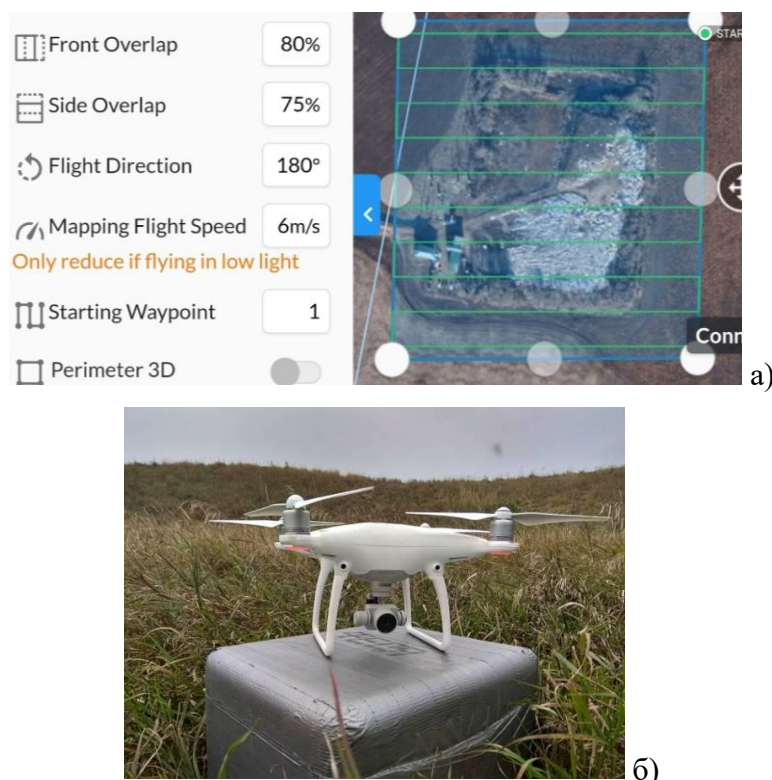


Рисунок 1. (а) Полетное задание для полигона, составленное в приложении Drone Deploy (составлено авторами); (б) Мультироторный БПЛА DJI Phantom 4 (фото авторов)

Динамика появления и зарастания несанкционированных свалок рассматривалась по материалам четырех лет регулярных наземных наблюдений и съемки с БПЛА территории памятника природы «Ильинская балка» Зеленодольского района Республики Татарстан, выполненной по аналогичной методике.¹²

Высокоточные карты изучаемых объектов (ортофотопланы), создавались с помощью преобразования снимков в программе Agisoft Photoscan в следующем порядке: анализ и

¹¹ Территориальная схема в области обращения с отходами, в том числе с твердыми коммунальными отходами, Республики Татарстан. — Режим доступа: URL: <https://minstroy.tatarstan.ru/regionalnie-npa-2808717.htm> (дата обращения: 15.08.2024).

¹² Хомяков В.П. Мониторинг ООПТ «Ильинская Балка»: результаты 4-х лет наблюдений / В.П. Хомяков // VII Всероссийская (с международным участием) научная конференция учащихся имени Н.И. Лобачевского (8–11 классы). Казань, 2022. — С. 89–90.

отбраковка снимков, построение фотопланов, построение облака точек, построение цифровой модели рельефа и собственно, ортофотоплана. Дешифрирование ортофотопланов выполнялось в программе MapInfo Professional: по координатам определялись границы полигонов и свалок, зоны их складирования, вычислялась фактическая площадь захоронения для сопоставления с проектными данными. В случае выявления спонтанно появившихся свалок на природной территории оценивалась также скорость их зарастания. В программе Surfer выполнен анализ цифровых моделей полигонов, построены поперечные профили захоронений для выявления текущей высоты складирования, вычисления соотношения откосов и объёмов полигонов.

Результаты и их обсуждение

В целях оценки соответствия полигонов ТКО требованиям их эксплуатации проведен сравнительный анализ материалов съемки и проектной документации по двум полигонам ТКО РТ, расположенным в разных муниципальных районах (данные о точном географическом положении являются конфиденциальной информацией).

На обоих полигонах, исходя из полученных данных (рис. 2), отсутствует пересыпка грунтов. Помимо этого, отмечается общая захламленность территории. Два фактора в совокупности приводят к выдуванию отходов за пределы полигонов, что хорошо заметно на полигоне № 2.



Рисунок 2. Выдувание отходов за пределы полигона № 2 (фото авторов)

Тем не менее, характер нарушений на полигонах отличается. Так, на полигоне № 1 выявлены лишь незначительные нарушения границ заявленного землеотвода, на момент обследования фактическая площадь зоны захоронения полигона составила 10,6 га (рис. 3 а) и не превышает проектную в 15,3 га, однако серьезной проблемой является несанкционированная свалка за территорией полигона (рис. 3 б), площадь которой составила 0,54 га.

Изучение материалов по полигону № 2 показало значительные нарушения требований эксплуатации: фактическая площадь зоны захоронения полигона составила 2,48 га, в то время как проектная площадь заявлялась лишь в пределах 1,59 га (рис. 4 а). К нарушению геометрии полигона можно отнести несоответствие откосов холма складирования проекту, что приводит к ссыпанию с него отходов и увеличению площади захоронения, а также общему увеличению захламленности территории (рис. 4 б). Остаточная вместимость полигона № 2 составляет 14 % от проектной ($12\,306\text{ м}^3$), что говорит о его переполненности. Об этом также свидетельствует превышение запланированной высоты холма захоронения, которая доходит до 11 м, в то время как должна составлять 9,9 м. Перечисленные нарушения несут комплексный характер, что приводит к приближению зоны захоронения к границе полигона. В связи с близостью объекта к природным и сельскохозяйственным объектам может быть нанесен ущерб окружающей среде и человеку.

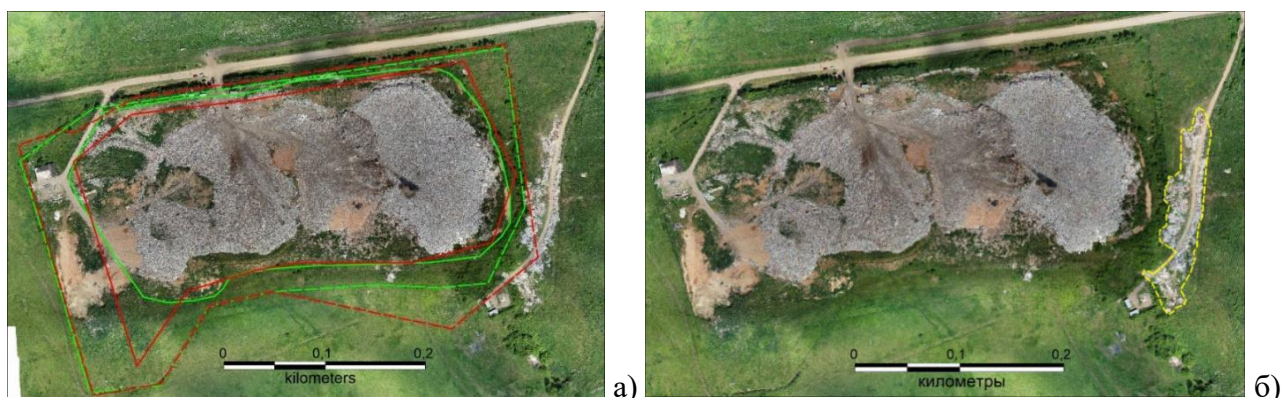


Рисунок 3. Полигон № 1. (а) Ортофотоплан. Границы проектного (красная линия) и фактического (зеленая линия) захоронения ТКО. (б) Желтой пунктирной линией отмечена несанкционированная свалка ТКО за пределами землеотвода (фото авторов)

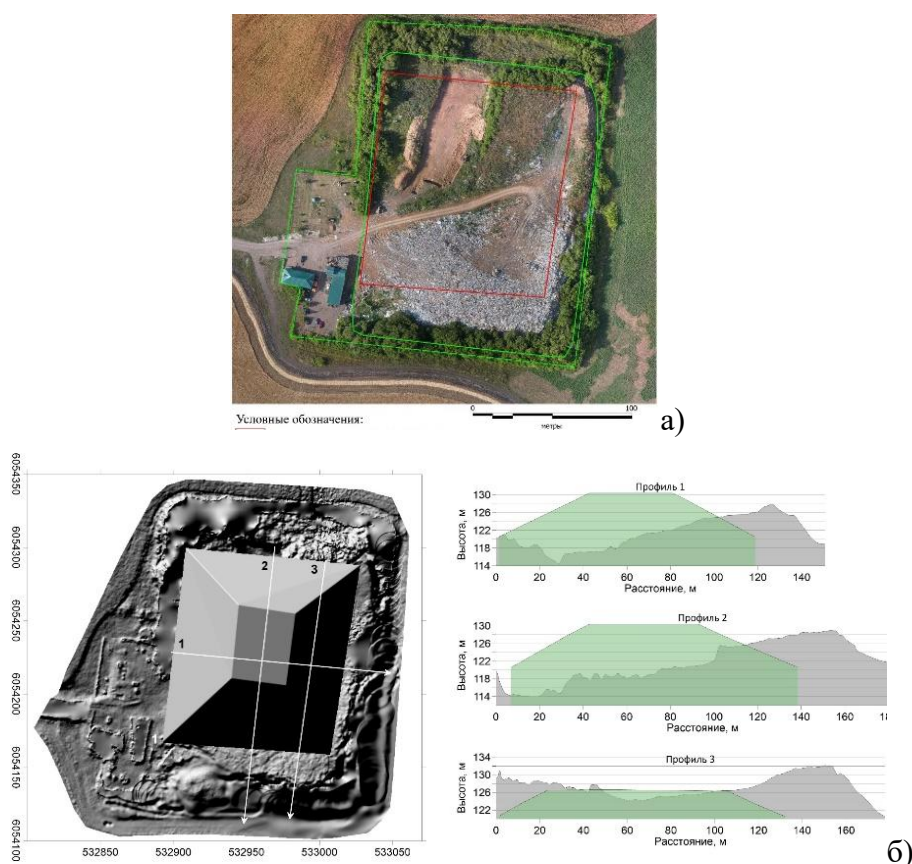


Рисунок 4. Полигон № 2. (а) Границы проектного (красная линия) и фактического (зеленая линия) захоронения ТКО. Расхождение границ отражает значительные нарушения нормы землеотвода. (б) Цифровая модель полигона и построенные по основным осям захоронения профили (серые фигуры), отражающие рельеф его поверхности. Светло-зеленым куполом отмечается проектная форма захоронения, что демонстрирует отклонение от нормы формирования свалочного тела (фото авторов)

Динамика появления и зарастания несанкционированных свалок, организованных в нарушение режима охраны особо охраняемой природной территории (ООПТ), рассмотрена в ходе изучения экосистем памятника природы «Ильинская балка». В первый год наблюдений в 2018 г. были обнаружены 8 свежих свалок строительных отходов площадью от 11 до 22 м² каждая, суммарной площадью 133 м² (рис. 5).



Рисунок 5. Территория памятника природы «Ильинская балка». Несанкционированные свалки строительных отходов (фото авторов)



2018 г.



2019 г.



2020 г.



2021 г.

Рисунок 6. Изменения облика несанкционированных свалок в течении 4 лет (фото авторов)

Уже на второй год наблюдений свалки стали плохо различимы, а к 2022 г. полностью заросли. На третий год наблюдений появилось новое скопление отходов, которое также стало менее заметным на следующий год. Динамика изменения внешнего облика свалок по материалам съемки разных лет представлена на рисунке 6. Материалы выполненных наблюдений демонстрируют важность проведения регулярного мониторинга малых охраняемых территорий для своевременного выявления нарушений. Небольшие по размерам несанкционированные свалки быстро зарастают и перестают визуализироваться на снимках.

Заключение и выводы

Мониторинг, выполняемый с помощью БПЛА, в сравнении с другими методами дистанционного зондирования, позволяет получать детальные планы местности, благодаря которым становится возможным выполнять контроль обращения с отходами: выявлять фактическое состояние полигонов ТКО и его соответствие проектной документации, определять расположение несанкционированных свалок и т. п. Данные мероприятия способствуют решению проблемы утилизации и захоронения ТКО в России и позволяют приблизиться к достижению экономики замкнутого цикла. По итогам выполненной работы можно сделать следующие выводы:

1. Использование материалов, полученных с помощью БПЛА, обеспечило эффективное выявление нарушений требований эксплуатации полигонов ТКО.
2. Ведение регулярного мониторинга ООПТ с помощью БПЛА позволило обнаружить систематическое нарушение охранного режима в форме захоронения строительных отходов.
3. Использование БПЛА для обнаружения несанкционированных свалок имеет ряд ограничений, связанных со скоростью зарастания захоронений. Небольшие по площади свалки перестают визуализироваться на крупномасштабных снимках уже спустя год после появления. Это подчеркивает важность регулярного проведения наблюдений для своевременной регистрации нарушений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kaza S. What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050 / S. Kaza, L.C. Yao, P. Bhada-Tata, F. Van Woerden. — Washington, DC: World Bank, 2018. — URL: <http://hdl.handle.net/10986/30317> (дата обращения: 24.02.2025).
2. Пластинина Ю.В. Реализация принципов циркулярной экономики при региональном обращении с твердыми коммунальными отходами (ТКО) в Российской Федерации / Ю.В. Пластинина, Л.М. Теслюк, Н.В. Дукмасова // Инновационное развитие экономики. — 2018. — № 5. — С. 129–139. — URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_36468350_16661507.pdf (дата обращения: 24.02.2025). — EDN: UDRMYF.
3. Morseletto P. Targets for a circular economy / P. Morseletto — DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.104553. // Resources, Conservation and Recycling. — 2020. — Т. 153. — С. 104553. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344919304598> (дата обращения: 24.02.2025).

4. Babbitt C.W. Closing the loop on circular economy research: from theory to practice and back again / C.W. Babbitt, G. Gaustad, A. Fisher [et al.] — DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.04.012. // Resources, Conservation and Recycling. — 2018. — Т. 135. — С. 1–2. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344918301496> (дата обращения: 24.02.2025).
5. Luttenberger L.R. Waste management challenges in transition to circular economy — Case of Croatia / L.R. Luttenberger — DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120495. // Journal of Cleaner Production. — 2020. — Т. 256. — С. 120495. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620305424> (дата обращения: 24.02.2025).
6. Сухоруков А.И. Актуальные подходы к развитию экономики замкнутого цикла в сфере обращения с твердыми коммунальными отходами / А.И. Сухоруков, Е.А. Захарова // Вестник Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова. — 2021. — Т. 18, № 5(119). — С. 33–44. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/aktualnye-podhody-k-razvitiyu-ekonomiki-zamknutogo-tsikla-v-sfere-obrascheniya-s-tverdymi-kommunalnymi-othodami> (дата обращения: 24.02.2025).
7. Колесник Г.В. Концепция обращения с отходами производства и потребления на основе экономики замкнутого цикла / Г.В. Колесник, И.А. Меркулина — DOI: 10.24891/ni.15.11.1984. // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. — 2019. — Т. 15, № 11(380). — С. 1984–2000. — URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_41301606_89032571.pdf (дата обращения: 24.02.2025). — EDN: JEXASM.
8. Бельдеева Л.Н. Экологически безопасное обращение с отходами: монография / Л.Н. Бельдеева, Ю.С. Лазуткина, Л.Ф. Комарова. — 4-е изд., перераб. и доп. — Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2013. — 147 с.
9. Романова Е.А. Региональные особенности несанкционированных свалок твердых бытовых отходов Ульяновской области / Е.А. Романова, В.Н. Намазова // Вестник АГАУ. — 2008. — № 7. — С. 50–55. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/regionalnye-osobennosti-nesanktsionirovannyh-svalok-tverdyh-bytovyh-othodov-ulyanovskoy-oblasti> (дата обращения: 24.02.2025).
10. Семенова М.В. Современные методы мониторинга экологического состояния территории / М.В. Семенова, О.Е. Архипова — DOI: 10.23885/2500-123X-2019-2-4-92-97 // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Геоинформационные технологии и космический мониторинг. — 2019. — № 4. — С. 92–97 — URL: <https://app.amanote.com/v4.2.1/research/note-taking?resourceId=BqKV4nMBKQvf0BhiYrXA> (дата обращения: 24.02.2025).
11. Ступин В.П. Применение БПЛА при картографическом мониторинге мест размещения ТКО / В.П. Ступин, Ш.Р. Охунов, С.А. Радченко // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2022. — № 1. — С. 242–247. — URL: <https://geosib.sgugit.ru/upload/geosibir/sborniki/2022/tom-1/242-247.pdf> (дата обращения: 24.02.2025).
12. Ахметзянова Л.Г. Применение дистанционного метода контроля, основанного на использовании данных БПЛА, для оценки остаточной емкости полигона отходов / Л.Г. Ахметзянова, Б.М. Усманов, А.М. Гафуров [и др.] // Геополитика и экогеодинамика регионов. — 2022. — Т. 8, № 4. — С. 94–103. — URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_50136247_65999734.pdf (дата обращения: 24.02.2025). — EDN: QLWIJO.

13. Алексеенко Н.А. Опыт использования беспилотных летательных аппаратов в биогеографических исследованиях на территории заповедника "Белогорье" / Н.А. Алексеенко, А.А. Медведев, И.А. Карпенко — DOI: 10.24057/2414-9179-2014-1-20-70-81. // Материалы Международной конференции "ИнтерКарто. ИнтерГИС". — 2014. — № 20. — С. 70–81. — URL: <http://intercarto.msu.ru/jour/article.php?articleId=46> (дата обращения: 24.02.2025).
14. Zhang Y. Automatic Power Line Inspection Using UAV Images / Y. Zhang, X. Yuan, W. Li [et al.] — DOI: 10.3390/rs9080824. // Remote Sensing. — 2017. — Т. 9, № 8. — С. 824 — URL: <https://www.mdpi.com/2072-4292/9/8/824> (дата обращения: 24.02.2025).
15. Humle T. Biology's drones: Undermined by fear / T. Humle, R. Duffy, D.L. Roberts [et al.] — DOI: 10.1126/science.344.6190.1351-a. // Science. — 2014. — Т. 344, № 6190. — С. 1351 — URL: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.344.6190.1351-a> (дата обращения: 24.02.2025).
16. Cândido B.M. Sediment source and volume of soil erosion in a gully system using UAV photogrammetry / B.M. Cândido, M.R. James, J.N. Quinton [et al.] — DOI: 10.36783/18069657rbcs20200076. // Revista Brasileira de Ciência do Solo. — 2020. — Т. 44. — С. 114. — URL: https://www.researchgate.net/publication/345741348_Sediment_source_and_volume_of_soil_erosion_in_a_gully_system_using_UAV_photogrammetry (дата обращения: 24.02.2025).
17. Liao Y.-H. Real-Time UAV Trash Monitoring System / Y.-H. Liao, J.-G. Juang — DOI: 10.3390/app12041838. // Applied Sciences. — 2022. — Т. 12, № 4. — С. 1838. — URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/4/1838> (дата обращения: 24.02.2025).
18. Акимов Р.Е. БПЛА для мониторинга состояния леса / Р.Е. Акимов, А.Г. Усынина, Я.Ю. Петров [и др.] // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. — 2019. — Т. 3. — С. 877–879. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/bpla-dlya-monitoringa-sostoyaniya-lesa> (дата обращения: 24.02.2025).
19. Косолапов А.Е. Исследование морфологических и морфометрических особенностей берегов Цимлянского водохранилища с использованием беспилотных летательных аппаратов и ГИС-технологий / А.Е. Косолапов, Г.И. Скрипка, Л.А. Беспалова [и др.] // Аридные экосистемы. — 2018. — Т. 2, № 3(76). — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-morfologicheskikh-i-morfometricheskikh-osobennostey-beregov-tsimlyanskogo-vodохранилища-s-ispolzovaniem-bespilotnyh> (дата обращения: 24.02.2025).
20. Зубарев Ю.Н. Использование беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве / Ю.Н. Зубарев, Д.С. Фомин, А.Н. Чашин [и др.] // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. — 2019. — № 2. — С. 47–51. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov-v-selskom-hozyai-stve> (дата обращения: 24.02.2025).

Avramenko Andrey Alekseevich

MGIMO University, Moscow, Russia

E-mail: a.avramenko@my.mgimo.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5862-5466>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=254398

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57211265068>

Khomyakov Vladimir Petrovich

MGIMO University, Moscow, Russia

E-mail: v.hamster04@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3022-6257>

Usmanov Timur Bulatovich

MGIMO University, Moscow, Russia

E-mail: timurandia@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3923-684X>

Assessment of the advantages of using unmanned aerial vehicles for monitoring municipal solid waste facilities as an element of a closed-loop economy

Abstract. A closed-loop economy involves responsible waste management. Reducing the accumulation of industrial and municipal solid waste, as well as reducing the area of land occupied by waste, are current challenges of our time. A stable regulatory framework in the field of waste management has been developed in Russia and abroad, and the development of reliable control systems is required to comply with it. To this end, techniques for monitoring and processing remote data, including those obtained using unmanned aerial vehicles, are increasingly being used. Using the example of a study of two municipal solid waste landfills and one protected area situated in the Republic of Tatarstan, the authors present arguments in favor of using such technologies. The article discusses the advantages and limitations of data obtained using unmanned aerial vehicles to detect violations of the operating regime of a licensed site of a municipal solid waste landfill and to control the formation of unauthorized landfills. When processing the materials of photographing the landfill territory, a number of inconsistencies between the actual characteristics of the landfills and the declared ones were found, including: cluttering of adjacent areas, exaggeration of the burial area, violation of the geometric characteristics of the landfill body. During the annual photographing of the protected area, violations of the security regime related to periodic burials of construction debris on the territory were discovered and recorded, which after a year cease to be visualized in the images. It is necessary to organize regular and operational monitoring of the territories of municipal solid waste landfills and timely registration of violations within the boundaries of protected areas. These measures contribute to a civilized solution to the problem of municipal solid waste disposal and burial and allow us to get closer to achieving a closed-cycle economy.

Keywords: waste management; environmental monitoring; unmanned aerial vehicles; municipal solid waste; municipal solid waste landfill; unauthorized landfills; specially protected natural area