

ГЕОЭКОЛОГИЯ/GEOECOLOGY

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.161.24>

ПРИМЕНЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТВЕРДЫМИ КОММУНАЛЬНЫМИ ОТХОДАМИ

Научная статья

Массеров Д.А.^{1,*}, Кирюшин А.В.², Вавилин Н.А.³, Храмова А.А.⁴, Кирюхин В.О.⁵, Шиляев И.И.⁶

¹ ORCID : 0000-0002-5076-2818;

² ORCID : 0000-0001-7999-5669;

1, 2, 3, 4, 5, 6 Национальный исследовательский Мордовский государственный университет, Саранск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (masserow[at]yandex.ru)

Аннотация

Статья представляет собой обзор современных методов применения технологий дистанционного зондирования (ДЗ) и географических информационных систем (ГИС) в сфере управления твердыми коммунальными отходами (ТКО). Рассматриваются ключевые проблемы, связанные с ростом объёмов отходов, неэффективностью их сбора и утилизации, а также необходимостью соблюдения экологических и санитарных норм. Особое внимание уделяется возможностям ГИС и ДЗ для оптимизации процессов сбора, транспортировки, размещения объектов инфраструктуры и выбора мест для полигонов. Описаны методы многокритериального анализа, интеграции данных GPS, RFID и GSM, а также примеры внедрения таких систем в российских регионах. Подчёркивается роль ГИС в повышении прозрачности, экономической эффективности и экологической безопасности управления отходами. Статья также затрагивает нормативно-правовые аспекты и перспективы цифровизации отрасли в рамках национального проекта «Экологическое благополучие».

Ключевые слова: дистанционное зондирование, географическая информационная система, твердые коммунальные отходы, управление отходами, оптимизация сбора, полигоны ТКО, пространственный анализ, многокритериальный анализ, умный город, территориальное планирование.

APPLICATION OF REMOTE SENSING AND GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS FOR SOLID MUNICIPAL WASTE MANAGEMENT

Research article

Masserov D.A.^{1,*}, Kiryushin A.V.², Vavilin N.A.³, Khramova A.A.⁴, Kiryukhin V.O.⁵, Shilyaev I.I.⁶

¹ ORCID : 0000-0002-5076-2818;

² ORCID : 0000-0001-7999-5669;

1, 2, 3, 4, 5, 6 National Research Mordovia State University, Saransk, Russian Federation

* Corresponding author (masserow[at]yandex.ru)

Abstract

This article presents an overview of modern methods of applying remote sensing (RS) and geographic information systems (GIS) technologies in the field of solid municipal waste (SMW) management. It examines key issues related to the growth in waste volumes, the inefficiency of waste collection and disposal, and the necessity of complying with environmental and sanitary standards. Particular attention is paid to the potential of GIS and RS for optimising the processes of collection, transportation, infrastructure placement and landfill site selection. Methods of multi-criteria analysis and integration of GPS, RFID and GSM data are described, along with examples of the implementation of such systems in Russian regions. The role of GIS in improving the transparency, economic efficiency and environmental safety of waste management is emphasised. The paper also touches upon the regulatory and legal aspects and prospects for the digitalisation of the industry within the framework of the national project "Environmental Well-being".

Keywords: remote sensing, geographic information system, solid municipal waste, waste management, collection optimisation, solid waste landfills, spatial analysis, multi-criteria analysis, smart city, spatial planning.

Введение

С быстрым ростом населения мира, промышленной революцией и ростом потребления товаров, количество, образующихся ТКО увеличивается в геометрической прогрессии. Это предполагает разработку новых подходов для управления процессов, связанных с обращением с ТКО. С научной точки зрения, управление отходами требует рассмотрения и типа места их происхождения. Проблемы, связанные с управлением ТКО в современном мире, сложны из-за разнообразных источников, растущего количества и различного состава отходов. Многие виды деятельности включены в управление ТКО от их образования до окончательной утилизации. Соответствующие виды деятельности можно сгруппировать в несколько функциональных элементов: образование отходов и их разделение у источника, переработка и повторное использование, сбор и хранение, передача и транспортировка, восстановление и утилизация.

Сбор и транспортировка ТКО составляют примерно 80–90% от общего бюджета управления системой обращения с ТКО в странах с низким уровнем дохода, в то время как эффективность сбора остается ниже 50%. В странах с высоким уровнем дохода эффективность сбора составляет больше чем 90%, а расходы на сбор составляют <10% от общего бюджета управления отходами [1]. Поэтому оптимизация маршрутов и наличие мест для мусорных контейнеров критически важно в странах с низким уровнем дохода. Сбор отходов в России имеет свои особенности:

сезонные и суточные колебания объемов их образования; обширность территорий муниципальных образований и низкая плотность населения; высокие затраты на содержание и эксплуатацию специализированного транспорта; дефицит кадров и рост затрат на оплату труда; отсутствие стратегического территориального планирования и недостаточное использование современных инструментов управления (таких как ГИС) на муниципальном уровне.

Целью управления ТКО является обеспечение снижения или устранения загрязнения воздуха, почвы и воды от образования отходов, а также максимально возможное по времени их переработка и утилизация. Ответственность за организацию деятельности по обращению с твердыми коммунальными отходами в Российской Федерации регулируется федеральным законодательством, а непосредственное исполнение данных обязанностей возложено на региональных операторов по обращению с ТКО, которые осуществляют свою деятельность на основании соглашений, заключенных с уполномоченными органами исполнительной власти субъектов РФ.

Органы местного самоуправления выполняют функции контроля за соблюдением правил благоустройства на соответствующих территориях, включая содержание контейнерных площадок, однако не являются основными субъектами ответственности по обращению с отходами.

Существующий несистематизированный подход к сбору и вывозу ТКО приводит к неэффективному их использованию. Для развития систем управления ТКОв передовых в этом отношении регионах РФ были внедрены различные политики и технологии, такие как: предотвращение отходов в точке образования, повторное использование и переработка, компостирование, сжигание и санитарное захоронение [2]. Например, в Татарстане используются инновационные технологии и инструменты, такие как ДЗ, географическая информационная система методы математической оптимизации для эффективного распределения и использования отходов [2]. ДЗ используется для зондирования поверхности Земли, ее окружающей среды и ее ресурсов без физического контакта с ней. ДЗ может обеспечить синоптический вид большой территории с возможностью повторного покрытия. ГИС можно использовать для сбора, хранения и восстановления пространственных данных, которые затем можно преобразовать, проанализировать и отобразить для различных приложений.

ГИС могут эффективно использоваться в управлении твердыми коммунальными отходами, позволяя снижать временные и материальные затраты управления твердыми отходами на каждом этапе и оценивать, внедрять лучшие практики управления с различными альтернативами.

Целью настоящей работы является обобщение результатов применения технологий ГИС и дистанционного зондирования в сфере управления твердыми коммунальными отходами.

Методы и принципы исследования

Методологическую основу настоящего исследования составил комплексный междисциплинарный подход, интегрирующий методы пространственного анализа, системного подхода и сравнительного правового анализа. Исследование базировалось на всестороннем анализе научной литературы, включавшем как оригинальные исследования, так и обзорные статьи, опубликованные на русском и английском языках в рецензируемых отечественных и зарубежных изданиях, с акцентом на работы, посвященные применению геоинформационных технологий и методов дистанционного зондирования Земли в сфере управления твердыми коммунальными отходами. Нормативно-правовая база исследования включила актуальные законодательные и подзаконные акты, действующие на момент проведения исследования, в частности Федеральный закон от 24.06.1998 № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления», Постановление Правительства РФ от 07.03.2025 № 293 «О порядке обращения с твердыми коммунальными отходами» [3], а также требования Санитарных правил и норм (СанПиН 2.1.3684-21) [4]. Сравнительный анализ эффективности применения ГИС-технологий проводился с учетом международного опыта [1], [5], [6].

Основные результаты

1. Применение модулей сетевого анализа (например, ArcGISNetworkAnalyst) позволит определять оптимальные маршруты сбора отходов на основе критериев времени и расстояния. Это снизит эксплуатационные расходы, сократит протяженность маршрутов и улучшит эффективность логистики. Использование GPS, RFID и GSM технологий обеспечит мониторинг заполнения контейнеров, местоположения мусоровозов и других параметров в реальном времени.

2. ГИС в сочетании с методами MCDM позволит проводить пространственный анализ для выбора оптимальных мест под полигоны ТКО, мусороперегрузочные станции и контейнерные площадки. Учитываются такие факторы, как тип почвы, гидрология, удаленность от жилых зон, транспортная доступность и экологические ограничения.

3. Реализация пилотных проектов показала эффективность ГИС-технологий для снижения затрат, повышения прозрачности управления и улучшения экологической ситуации. Например, в Башкортостане применение ГИС позволило оптимизировать маршруты транспортировки и снизить нагрузку на полигоны.

4. Использование ГИС и ДЗ обеспечивает выполнение нормативов (СанПиН, Федеральный закон №89-ФЗ) по размещению объектов ТКО. Разработанные подходы соответствуют целям национального проекта «Экологическое благополучие» и способствуют переходу к умному городскому хозяйству.

Обсуждение

ГИС можно комбинировать с глобальной системой позиционирования (GPS) и ДЗ для регистрации пространственных данных и непосредственного использования этих данных для анализа и картографического представления. ГИС доказала свою большую полезность в сокращении времени и высокой экономической эффективности. ГИС применяется в различных областях, таких как городское планирование, транспорт, охрана и управление природными ресурсами, лесное хозяйство, борьба со стихийными бедствиями, здравоохранение, экологическое моделирование и проектирование. Помимо этого, ГИС успешно применяется в различных областях управления твердыми отходами. ГИС может использоваться на каждом этапе процесса, то есть от их образования до

утилизации. Наиболее распространенными приложениями ГИС в управление ТКО являются размещение объектов управления отходами и их утилизации, а также оптимизация сбора и транспортировки отходов [7]. Более того, ГИС эффективно применяется для определения местоположения пунктов приёма вторсырья, оптимизации управления твердыми коммунальными отходами в районах и оценки темпов образования ТКО с учётом местных демографических и социально-экономических данных. Использование ДЗ в сочетании с ГИС позволяет лицам, принимающим решения, оптимизировать управление городскими отходами за счёт повышения эффективности и увеличения экономической отдачи или экономии.

В недавние годы, управление огромным массивом ТКО стали серьёзной проблемой, и в этом отношении ГИС оказалась настоящим спасением для планировщиков. Данные о распределении населения и объёмов ТКО, образующихся в конкретном районе, регионе вносятся в ГИС. Затем все слои накладываются друг на друга на исследуемую территорию для последующего анализа. Анализ слоёв позволяет выявить области с повышенным образованием твёрдых коммунальных отходов, классифицировать их по категориям и применить соответствующие меры. Таким образом, ДЗ и ГИС могут использоваться для идентификации и классификации территорий по уровню образования твёрдых коммунальных отходов и определения мест их захоронения.

Данные ДЗ для целей управления ТКО могут быть получены из различных источников, среди которых можно выделить: космическую съемку, пилотируемую аэросъемку, съемку с беспилотных летательных аппаратов и др.

Космоснимки позволяют охватить значительные площади от 25 км², позволяя одновременно мониторить крупные районы. Спутники регулярно передают свежие снимки, что позволяет обеспечить актуальность данных. Все это делает космические снимки прекрасным инструментом наблюдения за появлением и развитием несанкционированных свалок и оптимизации сбора и транспортировки отходов. Данная съемка имеет и ряд недостатков. Среди них выделяются зависимость от погодных явлений, которые могут помешать четко видеть исследуемые объекты, и низкое разрешение некоторых спутников не позволит идентифицировать мелкие объекты (контейнеры, небольшие свалки).

Альтернативой получения данных при помощи космических спутников может служить применение пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов. Они охватывают меньшие территории, но обладают, в среднем, более высоким разрешением получаемого изображения, что позволяет различить мелкие элементы, такие как отдельные контейнеры или небольшие скопления мусора. В то же время необходимо отметить дороговизну применения пилотируемых средств, зависимость летательных аппаратов от погодных условий, ограничение радиуса полёта возможностями антенн и мощностью передающего устройства, что ограничивает использование в отдаленных районах (для беспилотных летательных аппаратов).

Временное хранение ТКО после их образования и правильная сортировка являются важной частью эффективного плана управления отходами. Размещение контейнеров должно быть выполнено правильно, чтобы облегчить сбор и транспортировку ТКО. Для размещения баков в районах с эффективной транспортной системой применяются различные методы ГИС.

Согласно актуальным требованиям российского законодательства, расстояние от контейнерных площадок до жилых домов должно составлять не менее 20 м (для соблюдения санитарных норм) и не более 100 м (для обеспечения доступности). Максимальное расстояние между контейнерами не регламентируется напрямую, но их размещение должно соответствовать нормативам накопления ТКО и территориальной схеме обращения с отходами, утвержденной в субъекте РФ [8], [9].

Тематические карты и атрибутивные данные содержатся в ГИС, а вычисления выполняются с помощью алгоритма ArcMacroLanguage (AML) на основе ГИС.

Нами предложен процесс определения оптимальных мест для мусоросортировочных комплексов на основе топографии и анализа дорожной сети, который иллюстрирует рисунок 1. Этап 1 включает в себя подготовку тематических карт с оцифровкой, охватом зданий и составлением баз данных. Этап 2 включает в себя разработку программ на основе ГИС для оптимизации местоположения и число мусорных баков. Коррекция карты в ArcGIS можно подготовить данные о линейных, кластерных или ядерных типах поселений и измерить общий объём отходов, образующихся на этой территории. С помощью программного обеспечения, координаты и данные о поселениях, метод средневзвешенного центра можно использовать для извлечения альтернативных местоположений мусорных баков.

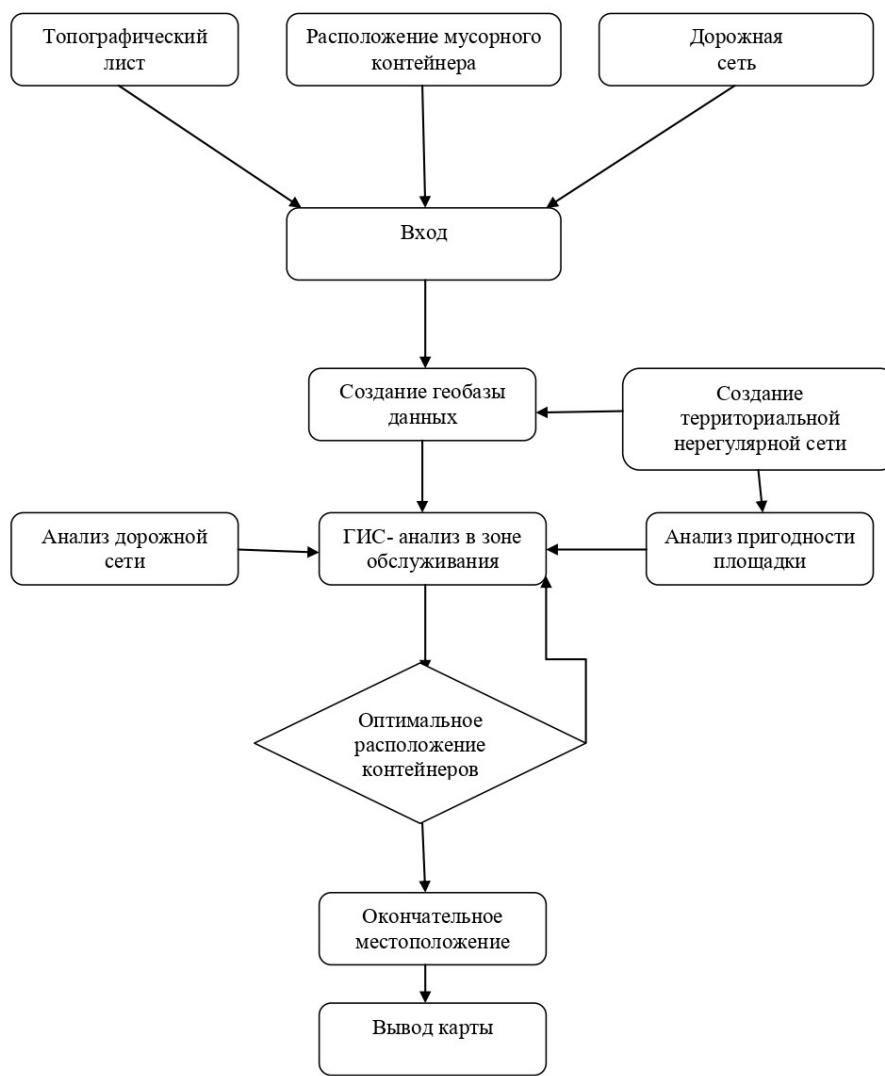


Рисунок 1 - Схема определения оптимального расположения мусорных контейнеров
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.161.24.1>

ГИС может быть использована для определения оптимальных маршрутов сбора ТКО с помощью сетевого анализа. На первом этапе все вспомогательные данные собираются из различных источников. Затем модуль NETWORK (ESRI 1995) программного обеспечения Arc/InfoGIS используется для проведения сетевого пространственного анализа, включающего в себя маршрутизацию, направления движения, анализ прилегающих центров обслуживания и зон обслуживания. ArcGISNetworkAnalyst помогает пользователям динамически моделировать реалистичные условия сети, включая ограничения скорости, поворотов и движения. С помощью модуля NetworkAnalyst пользователи могут определять наиболее эффективные маршруты движения, находить ближайший сервисный центр или транспортное средство, составлять маршруты обьезда и определять зоны обслуживания [10].

Оптимальный маршрут сбора отходов был разработан с помощью NetworkAnalyst на основе двух критериев: расстояния и времени. Оптимальные маршруты были определены с помощью ГИС и потребовали меньше времени, а

следовательно, были более экономичны. Программный анализ был прост для понимания и выполнялся гораздо быстрее по сравнению с ручным анализом [11].

Для мониторинга и управления системой в режиме реального времени отечественными специалистами была разработана модель с использованием технологий радиочастотной идентификации (RFID), GPS-трекинга, ГИС и мобильной связи (GSM) [11].

В данной модели RFID-считыватель, установленный на мусоровозе, фиксирует данные с меток на контейнерах. Это позволяет в автоматическом режиме получать информацию о местоположении контейнеров, дате и времени сбора, массе отходов и степени их заполнения [11]. Эта технология предоставляет оператору в режиме реального времени данные о статусе контейнерной площадки, ходе работы мусоровоза и других ключевых параметрах, что необходимо для эффективного управления и мониторинга процесса сбора ТКО. Подобные системы начинают внедряться в рамках создания «умного» городского хозяйства в крупных городах России (например, Москва, Казань) в соответствии с целями национального проекта «Экологическое благополучие».

Для решения задач переработки и утилизации отходов авторами была разработана веб-система поддержки принятия решений (рис.2).

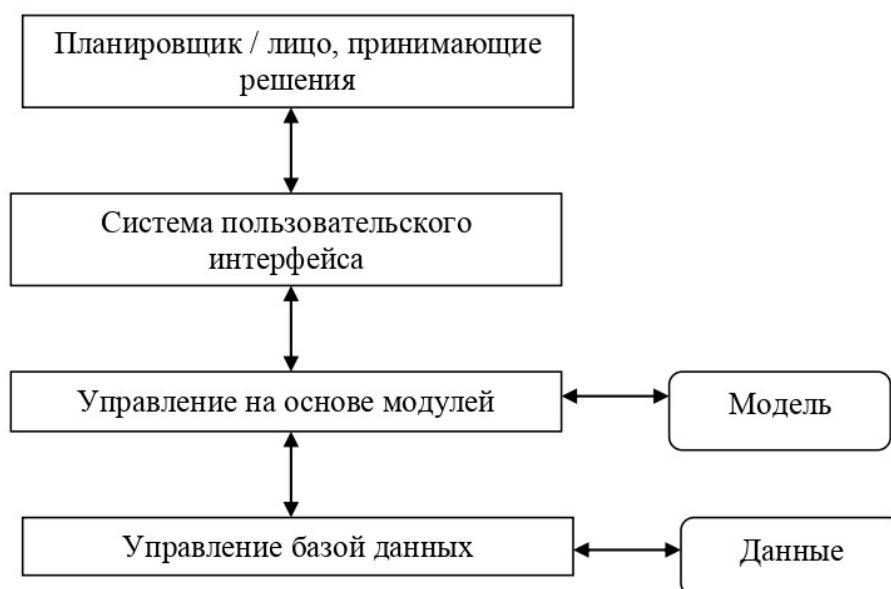


Рисунок 2 - Архитектура компьютерной функциональности ГИС
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.161.24.2>

ГИС вместе с математическими программами и компьютерной системой управления базами данных можно использовать для изучения различных стратегий сбора твердых отходов в разных ситуациях.

Аналитическое моделирование и дискретно-событийное моделирование применялись для оценки различных политик планирования и маршрутизации с использованием данных в реальном времени. Исследования показали, что динамическое планирование и маршрутизация, в отличие от статического подхода с фиксированными маршрутами, позволяют снизить эксплуатационные расходы, сократить протяженность и время маршрутов, а также уменьшить время обслуживания.

Для цифровизации и повышения эффективности этой сферы в России была создана Федеральная государственная информационная система учета ТКО (ФГИС УТКО) [12]. Ее ключевые функции включают: создание электронного реестра — система содержит электронную модель федеральной схемы обращения с ТКО, территориальную информацию со всех этапов; мониторинг и контроль: контейнерными площадками, количеством и источниками образования отходов, объектами обращения с отходами, движением мусоровозов, подключенными к системе, работой систем весового контроля.

Независимо от способа обращения с ТКО, окончательное захоронение остаточных отходов должно осуществляться на полигонах. Выбор места для захоронения отходов — сложный процесс, в котором необходимо учитывать геологические, гидрологические, землепользование, уязвимые территории, правила зонирования, качество воздуха, экологические и геотехнические параметры, а также государственные нормативные акты [6]. Полигон должен обладать достаточной вместимостью для размещения всего объема отходов, подлежащего захоронению в течение 20–25 лет.

Наиболее важными моментами, которые следует учитывать при размещении полигона в соответствии с федеральным законодательством, в частности Федеральным законом № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления» [13], а также требованиями Санитарных правил и норм (СанПиН 2.1.3684-21 «Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических

(профилактических) мероприятий». Вышеуказанные условия будут различаться в зависимости от места распределения населения, метеорологических, геологических и гидрологических условий.

Для выбора подходящего места для полигона используются многокритериальный анализ решений (MCDM) и анализ наложения с использованием ГИС [5]. Создаются и интегрируются различные тематические слои для получения такой информации, как тип почвы, схема дренажа, геология, топография, структура, а также сеть и застроенная территория, для определения оптимальных мест для полигона [2]. Для определения точных координат выбранных мест для полигона используется GPS. На основе предварительного скрининга с помощью ГИС и окончательной оценки с помощью нечеткого MCDM выбирается наиболее подходящее место для нового полигона.

Другие преимущества использования ГИС при размещении полигонов включают выбор метода зонирования территории на основе заданных критерии: разделение зон и буферизация; проведение сценарного анализа («что-если») для оценки потенциальных последствий роста населения, изменения морфологического состава отходов и территориального развития города, а также для мониторинга значимости различных нормируемых показателей (например, расчетной санитарно-защитной зоны) в соответствии с российскими нормативами; управление и корреляция больших объемов сложных географических данных; графическое представление результатов.

Методы MCDM формируются параллельно с ГИС и служат важными инструментами для лиц, принимающих решения [5]. В последнее время сочетание методов MCDM с ГИС используется для разработки картографических наложений, расширенного анализа пригодности участков и оптимизации систем управления твердыми отходами [5].

Системы поддержки принятия решений (СППР) — это компьютерные информационные системы, предназначенные для поиска решений проблем. Применение СППР повышает эффективность процесса принятия решений, особенно при обработке больших объемов данных. Интегрированные с ГИС модели СППР могут использоваться для оптимизации методов сбора, транспортировки, переработки и утилизации твердых отходов.

СППР представляют собой особый класс компьютеризированных информационных систем, обеспечивающих структурированную и логическую основу для принятия решений. В этих системах может быть собрана любая информация, включая необработанные данные, документы, личные знания и/или бизнес-модели, для решения проблем и предложения подходящих решений. Фундаментальная структура СППР состоит из трёх компонентов: управления базой данных, управления базой моделей и пользовательского интерфейса.

Для проектирования систем сбора ТКО в России мы в своих предыдущих исследованиях предлагали использовать многоцелевой подход к принятию решений, учитывающий экономические, экологические, технические и социальные аспекты [14]. Метод основан на многоцелевом лексикографическом программировании целей с учетом различных альтернатив. В другом исследовании были разработаны системы поддержки принятия решений на основе ГИС для выбора места для санитарного полигона [7]. В данном исследовании рассматривались комплексное землепользование, геология и геоморфология, дренаж, уклон местности, почва, сток, характеристики проницаемости, осадка и несущая способность пластов, потенциал грунтовых вод, подверженность эрозии и отсутствие разломов и трещин. Оценка вышеуказанных факторов и их атрибутов проводилась с использованием четырёх моделей многокритериальной оценки (MCE), а именно: аналитического иерархического процесса (AHP), коэффициента важности факторов (FIC), искусственных нейронных сетей (ANN) и метода Дельфи. Наилучший возможный участок был найден путём сравнения всех моделей. Этот метод был успешно использован в Башкортостане [15].

В сфере управления твердыми коммунальными отходами в мире разработано и используется несколько СППР. Необходимо усовершенствовать СППР, чтобы сделать их удобными для пользователя и адаптировать к управлению твердыми отходами в соответствии с нормативными и социальными требованиями России.

В последнее время муниципальные власти используют ГИС-приложения в качестве систем поддержки принятия решений для эффективного сбора и транспортировки отходов, сокращения расхода топлива и разработки рабочих программ для рабочих и транспортных средств. ГИС-приложения используются для анализа существующих карт и данных. ГИС-приложения используются для получения информации о статических и динамических параметрах муниципальных отходов и оптимизации систем маршрутизации сбора.

В регионах России, таких как Башкортостан и Мордовия, ГИС уже используются для управления отходами. Например, в Башкортостане ГИС помогает оптимизировать маршруты транспортировки отходов, снижая затраты и улучшая экологическую ситуацию.

Заключение

Увеличение количества образующихся ТКО в сочетании с низкой эффективностью сбора приводит к возникновению неблагоприятных условий и опасностей для здоровья. Применение ДЗ и ГИС в управлении твердыми коммунальными отходами зарекомендовало себя как эффективные и действенные инструменты для улучшения сбора отходов в городских районах. ГИС способна обрабатывать как пространственные, так и непространственные данные и в сочетании с GPS может использоваться для проектирования успешных систем сбора твердых коммунальных отходов. ДЗ и ГИС могут предоставить предпочтительные или оптимальные короткие маршруты, которые являются недорогими и эффективными. ГИС — это динамичный метод минимизации эксплуатационных расходов и регулярного обновления информации, что делает мониторинг и управление городским пространством более своевременным и реалистичным.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Xi C. Optimizing rural waste management: Leveraging high-resolution remote sensing and GIS for efficient collection and routing. / C. Xi, Y. Jieyu, H. Zhiyong et al. // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. — 2024. — № 135. — DOI: 10.1016/j.jag.2024.104219
2. Шакирова Ю.А. Территориальная структура размещения полигонов твердых коммунальных отходов в Республике Татарстан. / Ю.А. Шакирова, Е.В. Графский, Я.Д. Холов // Вестник Московского университета. — 2025. — № 3. — С. 32–44. — DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.80.3.3
3. Российская Федерация. Постановление Правительства РФ от 07.03.2025 О порядке обращения с твердыми коммунальными отходами №293. — 2025. — URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202503140040?index=2> (дата обращения: 16.09.25).
4. СанПиН 2.1.3684-21. Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организаций и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий. — Введ. 2025-09-16. — Москва, 2021. — 75 с.
5. Tesfaldet S. Solid waste disposal site selection using GIS and the Analytic Hierarchy Process model: a case study conducted in Gimba Town, Northeastern Ethiopia. / S. Tesfaldet, T. Degfie, A. Endalkachew // Sec. Waste Management. — 2025. — № 6. — DOI: 10.3389/frsus.2025.1528851
6. Armanuos A.M. Landfill site selection using MCDM methods and GIS in the central part of the Nile Delta, Egypt / A.M. Armanuos, K.A. Elgaafary, T.A. Gado // Environ Monit Assess. — 2023. — № 195. — DOI: 10.1007/s10661-023-11946-8.
7. Майманова Е.А. Использование ГИС-технологий для выбора мест размещения полигонов ТКО / Е.А. Майманова, И.И. Бочкарёва // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2021. — № 6. — DOI: 10.33764/2618-981X-2021-4-2-124-126.
8. Территориальная схема обращения с отходами Республики Мордовия // Официальный портал органов государственной власти Республики Мордовия. — 2024. — URL: <https://e-mordovia.ru/gosudarstvennaya-vlast-rm/ministerstva-i-vedomstva/ministerstvo-gkhrm/obrashchenie-s-tverdymi-kommunalnymi-otkhodami/>. (дата обращения: 17.09.25)
9. Территориальные схемы обращения с отходами попадут в единую систему // Ведомости. Устойчивое развитие. — 2025. — URL: <https://www.vedomosti.ru/esg/regulation/news/2025/07/10/1123426-territorialnie-shemi-obrascheniya-s-otkhodami-popadut-v-edinuyu-sistemu>. (дата обращения: 15.09.25)
10. Петров С.А. Использование ГИС-технологий в процессе комплексного регулирования твердыми коммунальными отходами. / С.А. Петров // Московский экономический журнал. — 2020. — № 2.
11. Татаренко В.И. Использование геоинформационных систем и технологий в мониторинге состояния объектов размещения твердых коммунальных отходов в Российской Федерации. / В.И. Татаренко, О.В. Усикова // Вестник СГУГИТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). — 2022. — № 4. — С. 170–176. — DOI: 10.33764/2411-1759-2022-27-4-169-176
12. Федеральная государственная информационная система учета твердых коммунальных отходов // Российский экологический оператор. — 2023. — URL: <https://utko.mnr.gov.ru/> (дата обращения: 16.09.25).
13. Российская Федерация. Законы. Об отходах производства и потребления : федер. закон : [принят Государственной Думой 1998-05-22]. — 1998. — URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_19109/ (дата обращения: 16.09.25).
14. Массеров Д.А. Оценка состояния системы обращения с твердыми коммунальными отходами в России. / Д.А. Массеров, А.В. Кирюшин, Д.А. Вавилин и др. // Международный научно-исследовательский журнал. — 2024. — № 5. — DOI: 10.60797/IRJ.2024.143.27
15. Христодуло О.И. Алгоритм комплексирования маршрутов для разработки электронной модели территориальной схемы обращения с отходами. / О.И. Христодуло, А.Х. Абдуллин, Г.Ф. Багаманшина // Программные продукты и системы. — 2020. — № 1. — DOI: 10.15827/0236-235X.129.076-083

Список литературы на английском языке / References in English

1. Xi C. Optimizing rural waste management: Leveraging high-resolution remote sensing and GIS for efficient collection and routing. / C. Xi, Y. Jieyu, H. Zhiyong et al. // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. — 2024. — № 135. — DOI: 10.1016/j.jag.2024.104219
2. Shakirova Yu.A. Territorial'naya struktura razmeshheniya poligonov tverdy'x kommunal'ny'x otxodov v Respublike Tatarstan [Territorial structure of the location of municipal solid waste landfills in the Republic of Tatarstan]. / Yu.A. Shakirova, E.V. Grafskij, Ya.D. Xolov // Bulletin of Moscow University. — 2025. — № 3. — P. 32–44. — DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.80.3.3 [in Russian]

3. Russian Federation. Postanovlenie Pravitelstva RF ot 07.03.2025 O poryadke obrashcheniya s tverdymi kommunalnimi otkhodami №293 [Decree of the Government of the Russian Federation of 03/07/2025 On the procedure for handling solid municipal waste №293]. — 2025. — URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202503140040?index=2> (accessed: 15.09.25) [in Russian]

4. SanPiN 2.1.3684-21. Sanitarno-epidemiologicheskie trebovaniya k soderzhaniyu territorii gorodskikh i selskikh poselenii, k vodnym obektam, pitevoi vode i pitevomu vodosnabzheniyu, atmosfernomu vozdukhу, pochvam, zhilim pomeshcheniyam, ekspluatatsii proizvodstvennikh, obshchestvennikh pomeshchenii, organizatsii i provedeniyu sanitarno-protivoepidemicheskikh (profilakticheskikh) meropriyatiy [SanPiN 2.1.3684-21. Sanitary and epidemiological requirements for the maintenance of territories of urban and rural settlements, for water bodies, drinking water and drinking water supply, atmospheric air, soils, residential premises, operation of industrial and public premises, organization and implementation of sanitary and anti-epidemic (preventive) measures]. — Introduced 2025-09-16. — Moscow, 2021. — 75 p. [in Russian]

5. Tesfaldet S. Solid waste disposal site selection using GIS and the Analytic Hierarchy Process model: a case study conducted in Gimba Town, Northeastern Ethiopia. / S. Tesfaldet, T. Degfie, A. Endalkachew // Sec. Waste Management. — 2025. — № 6. — DOI: 10.3389/frsus.2025.1528851

6. Armanuos A.M. Landfill site selection using MCDM methods and GIS in the central part of the Nile Delta, Egypt / A.M. Armanuos, K.A. Elgaafary, T.A. Gado // Environ Monit Assess. — 2023. — № 195. — DOI: 10.1007/s10661-023-11946-8.

7. Maimanova Ye.A. Ispolzovanie GIS-tehnologii dlya vibora mest razmeshcheniya poligonov TKO [Using GIS technologies to select locations for MSW landfills] / Ye.A. Maimanova, I.I. Bochkareva // Interekspo Geo-Sibir [Interexpo Geo-Siberia]. — 2021. — № 6. — DOI: 10.33764/2618-981X-2021-4-2-124-126. [in Russian]

8. Territorial'naya sxema obrashcheniya s otxodami Respubliki Mordoviya [Territorial waste management scheme of the Republic of Mordovia] // Official portal of government authorities of the Republic of Mordovia. — 2024. — URL: <https://e-mordovia.ru/gosudarstvennaya-vlast-rm/ministerstva-i-vedomstva/ministerstvo-gkhrm/obrashchenie-s-tverdymi-kommunalnymi-otkhodami/>. (accessed: 17.09.25) [in Russian]

9. Territorial'ny'e sxemy' obrashcheniya s otxodami popadut v edinuyu sistemу [Territorial waste management schemes will be included in a single system] // Gazette. Sustainable development. — 2025. — URL: <https://www.vedomosti.ru/esg/regulation/news/2025/07/10/1123426-territorialnie-shemi-obrascheniya-s-otkhodami-popadut-v-edinuyu-sistemу>. (accessed: 15.09.25) [in Russian]

10. Petrov S.A. Ispol'zovanie GIS-tehnologij v processe kompleksnogo regulirovaniya tverdy'mi kommunal'ny'mi otxodami [The use of GIS technologies in the process of integrated management of municipal solid waste]. / S.A. Petrov // Moscow Economic Journal. — 2020. — № 2. [in Russian]

11. Tatarenko V.I. Ispol'zovanie geoinformacionny'x sistem i texnologij v monitoringe sostoyaniya ob'ektorov razmeshcheniya tverdy'x kommunal'ny'x otxodov v Rossiskoj Federacii [Use of geographic information systems and technologies in monitoring the condition of municipal solid waste disposal sites in the Russian Federation]. / V.I. Tatarenko, O.V. Usikova // Bulletin of SGUGiT (Siberian State University of Geosystems and Technologies). — 2022. — № 4. — P. 170–176. — DOI: 10.33764/2411-1759-2022-27-4-169-176 [in Russian]

12. Federalnaya gosudarstvennaya informatsionnaya sistema ucheta tverdikh kommunalnikh otkhodov [Federal State Information System for Accounting for Solid Municipal Waste] // Russian environmental operator. — 2023. — URL: <https://utko.mnr.gov.ru/> (accessed: 16.09.25). [in Russian]

13. Russian Federation. Laws. Ob otkhodakh proizvodstva i potrebleniya [On Production and Consumption Waste] : Federal Law : [accepted by State Duma 1998-05-22]. — 1998. — URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_19109/ (accessed: 16.09.25). [in Russian]

14. Masserov D.A. Ocenna sostoyaniya sistemy' obrashcheniya s tverdy'mi kommunal'ny'mi otxodami v Rossii [Assessment of the state of the municipal solid waste management system in Russia]. / D.A. Masserov, A.V. Kiryushin, D.A. Vavilin et al. // International Research Journal. — 2024. — № 5. — DOI: 10.60797/IRJ.2024.143.27 [in Russian]

15. Xristodulo O.I. Algoritm kompleksirovaniya marshrutov dlya razrabotki e'lektronnoj modeli territorial'noj sxemy' obrashcheniya s otxodami [Algorithm for integrating routes for developing an electronic model of a territorial waste management scheme]. / O.I. Xristodulo, A.X. Abdullin, G.F. Bagamanshina // Software products and systems. — 2020. — № 1. — DOI: 10.15827/0236-235X.129.076-083 [in Russian]