

Научная статья  
УДК 502.3/7, 004.94

## **ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ПОЛИГОНОВ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ**

**Габриэль Павел Олегович;**

✉ **Ивахнюк Григорий Константинович.**

**Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург, Россия.**

**Сай Анна Романовна.**

**Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия**

✉ *fireside@inbox.ru*

*Аннотация.* Целью работы является исследование возможностей и функций существующих систем мониторинга состояния полигонов твердых коммунальных отходов.

В данной статье рассмотрены существующие системы мониторинга состояния полигонов твердых коммунальных отходов, позволяющие определить наличие возгораний, сейсмической активности, повышение температуры в теле полигона и/или прогнозировать дальнейшее развитие ситуации при отклонении параметров от приемлемых для функционирования полигона значений.

Научная новизна исследования состоит в актуализации данных о системах мониторинга состояния полигонов твердых коммунальных отходов с учетом иностранных решений и выявлении вектора развития отечественных продуктов на рынке.

Посредством анализа систем мониторинга были выявлены и описаны их основные функции, принцип работы и отличительные черты. Исследование показало преимущественное наличие иностранных компонентов в большинстве рассмотренных систем мониторинга.

*Ключевые слова:* система мониторинга, полигон твердых коммунальных отходов, экологическая безопасность

**Для цитирования:** Габриэль П.О., Ивахнюк Г.К., Сай А.Р. Обзор существующих систем мониторинга состояния полигонов твердых коммунальных отходов // Проблемы управления рисками в техносфере. 2023. № 2 (66). С. 214–224.

Scientific article

## **OVERVIEW OF EXISTING SYSTEMS FOR MONITORING THE STATE OF MUNICIPAL SOLID WASTE LANDFILLS**

**Gabriel Pavel O.;**

✉ **Ivakhnyuk Grigory K.**

**Saint-Petersburg state technological institute (technical university), Saint-Petersburg, Russia.**

**Say Anna R.**

**Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia**

✉ *fireside@inbox.ru*

*Abstract.* The aim of the work is to study the capabilities and functions of existing systems for monitoring the state of municipal solid waste landfills.

This article discusses the existing systems for monitoring the state of municipal solid waste landfills, which make it possible to determine the presence of fires, seismic activity, an increase

© Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2023

in temperature in the body of the landfill, and/or predict the further development of the situation if the parameters deviate from values acceptable for the functioning of the landfill.

The scientific novelty of the study lies in the actualization of approaches to monitoring the state of municipal solid waste landfills, taking into account foreign solutions and identifying the vector for the development of domestic products on the market.

Through the analysis of monitoring systems, their main functions, principle of operation and distinctive features were identified and described. The study shows the predominant presence of foreign components in most of the monitoring systems considered.

*Keywords:* monitoring system, municipal solid waste landfill, environmental safety

**For citation:** Gabriel P.O., Ivakhnyuk G.K., Say A.R. Overview of existing systems for monitoring the state of municipal solid waste landfills // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2023. № 2 (66). P. 214–224.

## Введение

По данным Федеральной службы государственной статистики в 2005 г. в Российской Федерации зафиксировано образование порядка 3 000 млн т отходов, в 2015 г. – 5 060 млн т. За 10 лет показатель вырос на 69 %. В 2020 г., по официальной информации Росприроднадзора, доля отходов, направленных на захоронение, составляет 74,7 % [1]. Согласно Стратегии развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 г. одна из основных причин отставания Российской Федерации в реализации процессов обработки и дальнейшей утилизации отходов – отсутствие организованной эффективной системы раздельного сбора отходов [2]. Все это применимо, в том числе, к твердым коммунальным отходам (ТКО), попадающим на полигоны ТКО.

Хранение ТКО на полигонах является одним из наиболее распространенных методов утилизации отходов во многих развитых и развивающихся странах. Основная доля ТКО состоит из пищевых отходов, составляющих 40–85 % от общего количества (в пересчете на сырую массу). Большая проблема в таком хранении мусора состоит в том, что внутри полигонов ТКО при окислении свалочных тел образуется свалочный газ [3]. Также в ходе таких реакций повышается температура отходов и возможность их самовозгорания с последующим выделением опасных и ядовитых соединений, опасных не только для здоровья человека, но также животных и растений [4–8].

Так, в 2011 г. произошел пожар на полигоне отходов на Волхонском шоссе в Ленинградской обл. В воздух попали такие ядовитые вещества, как диоксид азота и диоксин, которые могут привести к поражениям дыхательных путей [5, 6, 9]. В 2016 г. произошло возгорание на Грибовичской свалке под г. Львовом. Проведенная после тушения экспертиза показала, что причиной возникновения пожара стало самовозгорание из-за несоблюдения технологических норм. Три человека погибли при устранении очага возгорания [10]. Также 31 августа 2022 г. поступило сообщение о возгорании на полигоне ТКО в пос. Круглово Калининградской обл. на площади около 1 тыс. м<sup>2</sup>. Возгорание было полностью ликвидировано, пострадавших нет [11].

Для отслеживания и контроля размещенных отходов существуют специальные системы.

## Аналитическая часть

Один из существующих видов систем мониторинга состояния полигонов ТКО позволяет производить точный весовой контроль попадающего на полигон мусора, что позволяет более точно прогнозировать поведение отходов при построении математической

модели полигона. Все это дает большую вероятность предотвращения возникновения возгораний [12].

Такие системы позволяют регистрировать весь транспорт, выезжающий и въезжающий на территорию полигона через контрольно-пропускной пункт, а также автоматизировать учет поступающих отходов и вывоз вторичного сырья на автовесах.

В 2020 г. авторами статьи «Autonomous safety system for MSW landfills» была предложена концепция комплексной системы мониторинга (КСМ) состояния полигонов отходов для минимизации экологических рисков [13].

Основные задачи такой системы комплексного мониторинга полигона:

- своевременное обнаружение превышения критических уровней опасных паров метана (CH<sub>4</sub>), двуокиси углерода (CO<sub>2</sub>), а также метанола, бензина, толуола и этанола;
- контроль внутренних деформаций полигона, таких как оползни и просадки;
- контроль радиационной обстановки на его территории;
- контроль состояния периметра полигона;
- возможность работы в автономном режиме и передача информации по беспроводной линии связи с центром сбора данных в соответствии с установленными правилами;
- построение динамической карты опасных происшествий в районе полигона.

В результате создается подробная база данных зарегистрированных событий. Блок-схема работы системы представлена на рис. 1.



Рис. 1. Блок-схема работы КСМ [13]

Составляющие системы мониторинга:

1) подсистема газоанализаторов представляет собой распределенную сеть газоанализаторов различных типов, способных обнаружить концентрации опасных паров с заданной точностью. Устройство каждого датчика должно обеспечивать корректную работу датчика в тяжелых погодных условиях. Энергоснабжение датчиков поступает от автономного источника питания;

2) подсистема геофизических датчиков (сеть сейсмических датчиков). Инклинометрический комплекс почвенного контроля обеспечивает мониторинг состояния, позволяет оценить состояние фундамента зданий и сооружений на территории полигона ТКО. Комплекс обеспечивает автоматическую работу и беспроводную передачу данных. Энергоснабжение датчиков обеспечивается от батарей, топливных элементов или комбинированных электростанций;

3) подсистема мониторинга внешнего периметра предназначена для наблюдения за деятельностью на территории полигона;

4) подсистема передачи данных собирает информацию из датчиков разных типов. Передача данных осуществляется на основе беспроводных технологий (LoRaWAN). В соответствии с концепцией LoRaWAN каждый модем оснащен батареей, что гарантирует до восьми лет работы модема без подзарядки аккумулятора;

5) подсистема анализа и прогнозирования динамики состояния полигона. Эта подсистема предназначена для решения задачи краткосрочного прогноза состояния полигона на основе набора данных, собираемых с подсистем газоанализаторов и геотехнических датчиков, а также исходных данных о геофизической структуре полигона. На рис. 2 представлена общая схема подсистемы анализа и прогноза параметров полигона отходов.

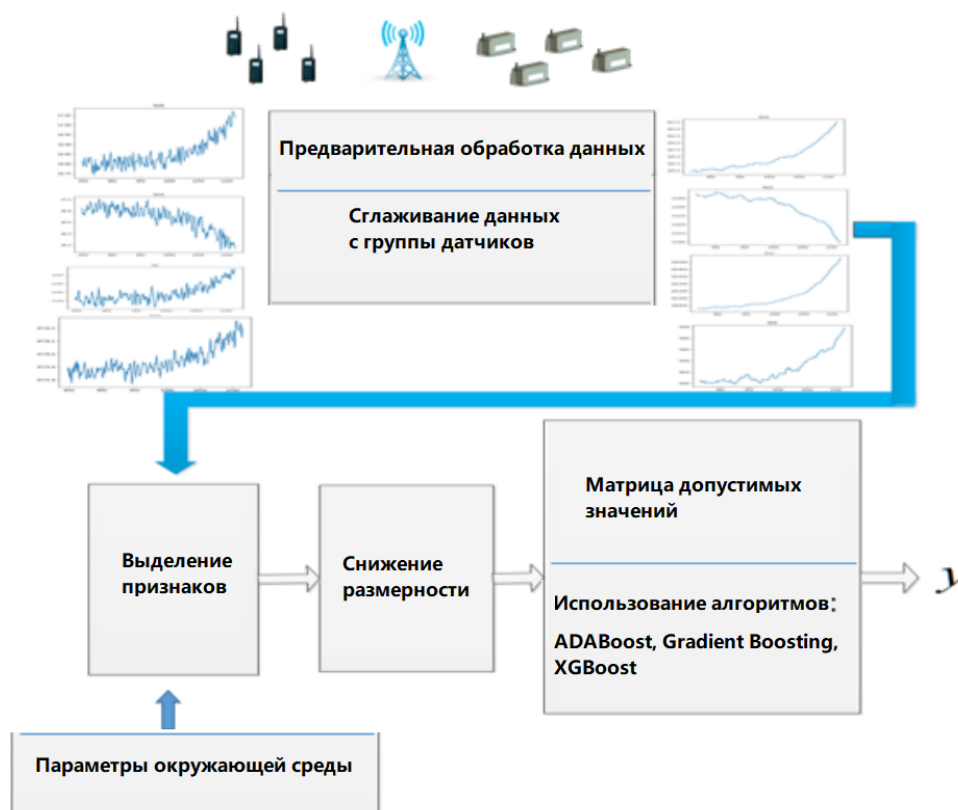


Рис. 2. Структурная схема подсистемы анализа и прогноза параметров полигона отходов [13]

На первом этапе работы подсистемы обрабатываются данные, полученные от всех датчиков в подсистемах, включая камеры видеонаблюдения (рис. 3). После этого происходит вычисление средних значений за период мониторинга (для каждого датчика свой временной интервал снятия показаний). Авторы предлагают использовать скользящее среднее для сглаживания числовых рядов и упрощения дальнейшего анализа данных. После этого происходит выделение признаков – процедура отбрасывания мало влияющих на общую динамику данных перед дальнейшим анализом на основе машинного обучения. Затем происходит сравнение обработанных чисел с заданными граничными значениями параметров и идентификацией закономерностей с помощью группы математических моделей и инструментов искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения.

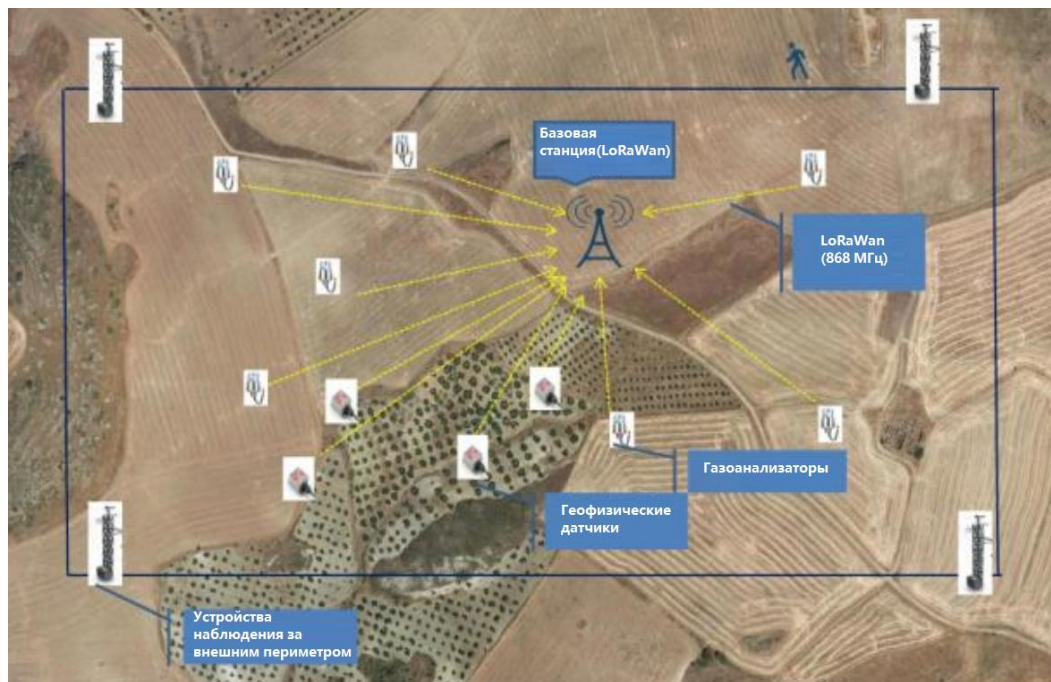


Рис. 3. Схема передачи информации с датчиков [13]

Такая система имеет ряд достоинств: быстрота реагирования на изменение погодных условий, контроль сейсмической ситуации, мониторинг внешней территории. Передача информации с датчиков по стандарту LoRaWan обеспечивает высокую энергетическую автономность системы по сравнению с другими стандартами передачи информации.

Среди недостатков можно отметить малый объем передачи информации по стандарту LoRaWan. Более того, на данный момент нет технологий, позволяющих передавать видеосигнал с помощью этой технологии. Мониторинг внешнего периметра, таким образом, должен осуществляться с помощью других стандартов передачи информации.

Для мониторинга состояния полигона существует портативная система непрерывного мониторинга выбросов полигонов LGR (Los Gatos Research) Landfill Continuous Emissions Monitoring System (LCEMS). Система состоит из газоанализатора и ПК с программным обеспечением, предназначенным для анализа результатов. Благодаря защищенному корпусу, на анализатор не влияют погодные условия, что обеспечивает непрерывный мониторинг выбросов на полигонах. Есть возможность использования функции удаленного доступа к прибору через Интернет, для того чтобы:

- скачивать данные;
- провести диагностику работы прибора;
- вносить оперативные изменения в любое время.

ПК (ОС Linux) с жестким диском на 40 ГБ является неотъемлемым компонентом системы. Данные могут быть отправлены в регистратор данных в режиме реального времени через цифровой (RS232), аналоговый выход или выход Ethernet. LCEMS может быть использован для мониторинга таких газов, как: метан ( $\text{CH}_4$ ), ацетилен ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ), диоксид углерода ( $\text{CO}_2$ ) [14]. Продукт использует газоанализаторы сторонних производителей, количество анализируемых газов определяется заказчиком системы. Один из предлагаемых вариантов – полупроводниковый газоанализатор Sauermann Si-CD3 с гибким зондом, измеряющий концентрации метана с точностью до 1 ppm или 0,001 об. д. % и погрешностью полной шкалы, составляющей 20 %. Диапазон измерений газоанализатора варьируется от 0 до 10 000 ppm или от 0 до 1 об. д. %.

Преимущества:

- 17 кг, 70 Вт;

- концентрации нескольких газов могут измеряться одновременно при подключении нескольких датчиков к системе;
- все полученные результаты всегда доступны для просмотра;
- подходит для исследования почвы, контроля соответствия требованиям по выбросам, обнаружения утечек;
- работает напрямую от источника тока.

Среди недостатков можно отметить низкую вариативность системы: кроме анализа и мониторинга концентрации указанных газов, нет возможности добавления других функций.

Другое решение на этапе размещения отходов на полигоне – интеллектуальная тепловизионная камера, которая позволяет контролировать территорию полигона даже при отсутствии людей [15]. Данную систему необходимо использовать в совокупности с другими методами мониторинга, поскольку она не несет в себе важных функций контроля и мониторинга, такую как, например, мониторинг температуры внутри тела полигона.

Система SCS RMC (Remote Monitoring and Control) использует интернет вещей (IoT). Это решение, обеспечивающее удаленный просмотр, анализ и управление оборудованием и системами, критически важными для производства и безопасной эксплуатации оборудования [16].

Получив предупреждение, авторизованные пользователи могут войти в веб-приложение SCS RMC, чтобы быстро определить значимость предупреждения и принять обоснованное решение, например, вызов специалиста для помощи в устранении неполадок.

Система SCS RMC может быть использована для мониторинга, контроля и анализа тенденций в режиме реального времени с устройств, с доступом в интернет, таких как смартфон, планшет или ноутбук.

Мониторинг полигонов может быть также осуществлен с помощью веб-сетей, дронов и дополненной реальности [17]. Помимо отображения данных и индикации состояния программное обеспечение также позволяет операторам полигона удаленно включать и выключать авторизованные в системе устройства, отменять сигналы тревоги и т.д. Модель полигона может быть дополнена 3D-изображениями, полученными с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Изображения и 3D-модель также могут быть просмотрены на гарнитуре дополненной реальности (AR), которая позволяет операторам использовать любое авторизованное мобильное устройство для удаленного просмотра всего объекта из любого места (изображение 3D-модели показано на рис. 6). Модель была создана с помощью изображений, полученных на квадрокоптере DJI Phantom 4 с дальностью полета до 5 км и возможностью снимать видео в разрешении 4096\*2160.



Рис. 6. 3D Модель, созданная при помощи квадрокоптера [17]

Достоинства включают в себя:

- возможность предоставлять доступ отдельно взятым лицам или группам к данным в системе;
- настраиваемая периодичность сбора данных, входящих в систему устройств;
- возможность создания информационной 3D-модели.

Недостатками можно считать: отсутствие некоторых функций, таких как анализ и мониторинг концентрации газов; сложность взаимодействия между различными компонентами системы. В системе также нет функции прогнозирования состояния тела полигона. Для получения информации удаленно требуется наличие выхода системы в интернет.

На Российском рынке присутствует решение (ООО «Авиационные роботы») для создания цифровых ортофотопланов для таких объектов, как полигоны ТКО [18]. Используются материалы фотографической съемки при помощи БПЛА с применением камеры высокой четкости в качестве полезной нагрузки, что позволяет детально изучить поверхность полигона и любого инженерного сооружения на прилегающих территориях [19, 20]. Изображение модели, созданной на базе снимков с БПЛА, представлено на рис. 7. Такая система является вспомогательной и должна быть использована совместно с основной системой мониторинга состояния полигона ТКО. В качестве БПЛА используется комплекс LA500 RTK (Франция). Такой аппарат может преодолевать до 25 км без подзарядки, в качестве полезной нагрузки используется фотоаппарат Sony a6000 (разрешение видеосъемки до 1080 p) и приемник GPS/GLONASS сигнала. Для построения моделей также может быть использован беспилотный комплекс Supercam S350 (Россия). Протяженность маршрута – до 360 км, разрешение видео составляет 720 p. У аппаратного комплекса есть возможность дополнительной установки тепловизора.

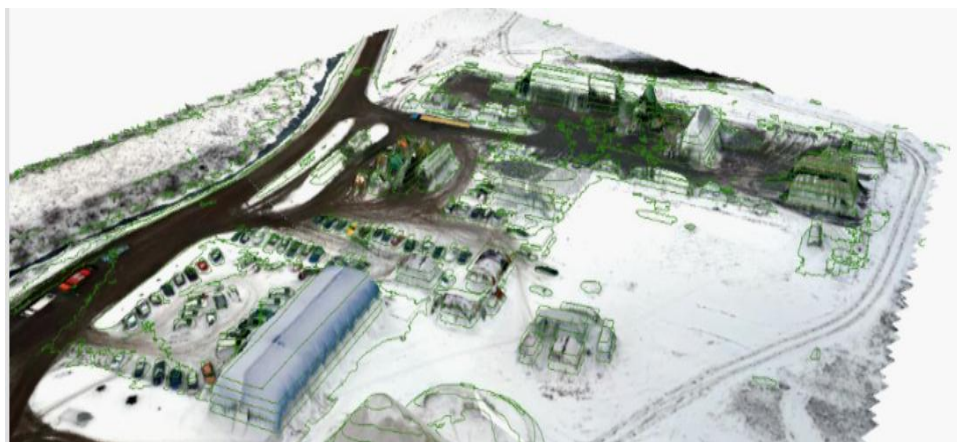


Рис. 7. 3D модель полигона, созданная с использованием БПЛА ООО «Авиационные роботы» [18]

SnifferDRONE представляет собой беспилотную авиационную систему (БАС), обеспечивающую работу по определению концентрации газов на промышленных объектах, в частности на полигонах ТКО. Метод определения газообразного метана для наземных применений называется «Мониторинг выбросов с поверхности» (SEM) [21–25]. SnifferDRONE оснащен детектором метана на борту БПЛА (мультикоптер). Шланг для сбора газа с утяжеленной насадкой для впуска воздуха подвешен к мультикоптеру для сбора проб газа над поверхностью земли во время полетов. Мультикоптер с газоанализатором изображен на рис. 8. Модель БПЛА не раскрывается.

К достоинствам системы можно отнести высокую автономность, отсутствие требований к наличию связи, возможность забора анализов из любого места над поверхностью полигона.

Среди недостатков выделяется зависимость системы от погодных условий.



Рис. 8. БПЛА SnifferDRONE, оснащенный детектором метана [23]

### Заключение

Результаты исследования показали, что вектор развития систем мониторинга полигона ТКО направлен на снижение участия человека в этом процессе и исключение человеческого фактора при получении данных о состоянии объекта. Ключевое решение о вмешательстве в работу объекта мониторинга тем не менее все равно остается за человеком.

Теоретическая значимость результатов исследования состоит в раскрытии потенциала развития технологий мониторинга для применения на объектах размещения отходов. Полученные результаты позволяют создать такую систему мониторинга, которая могла бы включать в себя все необходимые функции и характеристики для достаточного контроля состояния полигона ТКО.

### Список источников

1. Сведения об образовании, обработке, утилизации, обезвреживании, размещении отходов производства и потребления по форме 2-ТП (отходы) за 2021 год, систематизированные по федеральным округам и субъектам Российской Федерации // Федеральная служба по надзору в сфере природопользования. URL: [https://rpn.gov.ru/upload/iblock/91c/sgrb1qoore78zgrjsd3710vjggpejibz/2TP-\\_otkhody\\_-\\_Razdel-1\\_-\\_Po-federalnym-okrugam-i-Subektam-RF.xlsx](https://rpn.gov.ru/upload/iblock/91c/sgrb1qoore78zgrjsd3710vjggpejibz/2TP-_otkhody_-_Razdel-1_-_Po-federalnym-okrugam-i-Subektam-RF.xlsx) (дата обращения: 01.09.2022).
2. Об утверждении Стратегии развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года: распоряжение Правительства Российской Федерации от 25 янв. 2018 г. № 84-р. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
3. Войтенко О.В., Сай А.Р. Некоторые вопросы пожарной безопасности на полигонах твердых коммунальных отходов // XXIX Междунар. науч.-практ. конф. «Eurasia Science»: сб. статей. Ч. 1. М.: Научно-издательский центр «Актуальность.РФ», 2020. С. 65–67.
4. Liang-Tong Zhan. Biochemical, hydrological and mechanical behaviors of high food waste content MSW landfill: Liquid-gas interactions observed from a large-scale experiment // Waste management. 2017. Vol. 68. P. 307–318.
5. Zhaowen Chenga, Zhongtao Sun. The identification and health risk assessment of odor emissions from waste landfilling and composting // Science of the total environment. 2019. Vol. 649. P. 1038–1044.
6. Paglietti F., Malinconico S. Classification and management of asbestos-containing waste: European legislation and the Italian experience // Waste management. 2016. Vol. 50. P. 130–150.



7. Jibran M., Zuberia S., Ali Shazia F. Greenhouse effect reduction by recovering energy from waste landfills in Pakistan // *Renewable and sustainable energy reviews*. 2015. Vol. 44. P. 117–131.
8. Сай А.Р. Влияние показателей пожароопасности отдельных морфологических компонентов смеси твердых коммунальных отходов на уточнение класса их опасности // *Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России»*. 2022. № 1. С. 195–203.
9. На выходных свалка на Волхонском шоссе полностью догорела // *Канонер*. URL: <http://kanoner.com/2011/11/14/29122/> (дата обращения: 08.09.2022).
10. Пожар на свалке под Львовом локализован 9 июня 2016 г. // *Интерфакс*. URL: <https://www.interfax.ru/world/512791/> (дата обращения: 08.09.2022).
11. В Калининградской области ликвидировали пожар на мусорном полигоне // *ТАСС*. URL: [https://tass.ru/proisshestiya/15616351?utm\\_source=fedpress.ru&utm\\_medium=referral&utm\\_campaign=fedpress.ru&utm\\_referrer=fedpress.ru](https://tass.ru/proisshestiya/15616351?utm_source=fedpress.ru&utm_medium=referral&utm_campaign=fedpress.ru&utm_referrer=fedpress.ru) (дата обращения: 08.09.2022).
12. Весовой учет для полигонов ТБО // *Малленом Системс*. URL: <https://www.mallenom.ru/resheniya/po-otrasliam/avtomarshalvesovaya-dlya-poligonov-tbo/> (дата обращения: 08.09.2022).
13. Autonomous safety system for MSW landfills / A. Titov [et al.] // *E3S Web of Conferences*. 2020. № 161 (53): 01043.
14. Landfill continuous emissions monitoring system (LCEMS) // *Los gatos research*. URL: <http://www.lgrinc.com/applications/landfill-emissions-monitoring.php> (дата обращения: 08.09.2022).
15. How to prevent landfill fires through early detection? // *Wastack*. URL: <https://www.wastack.com/post/how-to-prevent-landfill-fires-through-early-detection> (дата обращения: 08.09.2022).
16. Daniel H Cusworth. Using remote sensing to detect, validate, and quantify methane emissions from California solid waste operations // *Environmental research letters*. 2020. Vol. 15 (5). № 5.
17. Landfill monitoring with web-based networking, drones and AR // *Control*. URL: <https://www.controlglobal.com/articles/2020/landfill-monitoring-with-web-based-networking-drones-and-ar/> (дата обращения: 08.09.2022).
18. Беспилотник и полигоны ТБО // *ООО «Авиационные роботы»*. URL: <http://aviarobots.ru/service/bespilotnik-i-poligony-tbo/> (дата обращения: 08.09.2022).
19. Muleya M. Photogrammetry based analysis for the risks associated with landfilling in developing countries: case study Chunga landfill, Lusaka, Zambia: thesis submitted in (partial) fulfilment of the master of science degree. Auckland, New Zealand: Auckland university of technology, 2020. 124 p.
20. Unmanned aerial vehicles for operational monitoring of landfills / T. Filkin [et al.] // *Drones*. 2021. № 5 (4): 125.
21. De Wet A. Discovering and characterizing abandoned waste disposal sites using LIDAR and aerial imagery // *Environ. Eng. Geosci*. 2016. № 22. P. 113–130.
22. Analysis of landfills with historic airphotos / T. Erb [et al.] // *Photogramm. Eng. Remote Sens*. 1981. № 47. P. 1363–1369.
23. SnifferDRONE. The industry's best available technology for detecting land-based methane leaks and quantifying emissions // *SNIFFER ROBOTICS, LLC*. URL: <https://www.snifferrobotics.com/snifferdrone> (дата обращения: 08.09.2022).
24. Bolton N. Using drones for landfill mapping // *MSW Management*. 2020. URL: <https://www.mswmanagement.com/landfills/article/13028889/using-drones-for-landfill-mapping> (дата обращения: 08.09.2022).
25. Council uses drone to inform landfill management plan // *Waste management review*. 2016.

## References

1. Svedeniya ob obrazovanii, obrabotke, utilizacii, obezvrezhivanii, razmeshchenii othodov proizvodstva i potrebleniya po forme 2-TP (othody) za 2021 god, sistematizirovannye po federal'nym okrugam i sub"ektam Rossijskoj Federacii // Federal'naya sluzhba po nadzoru v sfere prirodnopol'zovaniya.  
URL: [https://rpn.gov.ru/upload/iblock/91c/sgrblqoore78zgrjsd3710vjggpejibz/2TP-\\_otkhody\\_-\\_Razdel-1\\_-\\_Po-federalnym-okrugam-i-Subektam-RF.xlsx](https://rpn.gov.ru/upload/iblock/91c/sgrblqoore78zgrjsd3710vjggpejibz/2TP-_otkhody_-_Razdel-1_-_Po-federalnym-okrugam-i-Subektam-RF.xlsx) (data obrashcheniya: 01.09.2022).
2. Ob utverzhdenii Strategii razvitiya promyshlennosti po obrabotke, utilizacii i obezvrezhivaniyu othodov proizvodstva i potrebleniya na period do 2030 goda: rasporyazhenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 25 yanv. 2018 g. № 84-r. Dostup iz sprav.-pravovoj sistemy «Konsul'tantPlyus».
3. Vojtenok O.V., Saj A.R. Nekotorye voprosy pozharnoj bezopasnosti na poligonah tverdyh kommunal'nyh othodov // XXIX Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Eurasia Science»: sb. statej. Ch. 1. M.: Nauchno-izdatel'skij centr «Aktual'nost'.RF, 2020. S. 65–67.
4. Liang-Tong Zhan. Biochemical, hydrological and mechanical behaviors of high food waste content MSW landfill: Liquid-gas interactions observed from a large-scale experiment // Waste management. 2017. Vol. 68. P. 307–318.
5. Zhaowen Chenga, Zhongtao Sun. The identification and health risk assessment of odor emissions from waste landfilling and composting // Science of the total environment. 2019. Vol. 649. P. 1038–1044.
6. Paglietti F., Malinconico S. Classification and management of asbestos-containing waste: European legislation and the Italian experience // Waste management. 2016. Vol. 50. P. 130–150.
7. Jibrán M., Zuberia S., Ali Shazia F. Greenhouse effect reduction by recovering energy from waste landfills in Pakistan // Renewable and sustainable energy reviews. 2015. Vol. 44. P. 117–131.
8. Saj A.R. Vliyanie pokazatelej pozharoopasnosti otdel'nyh morfologicheskikh komponentov smesi tverdyh kommunal'nyh othodov na utocnenie klassa ih opasnosti // Nauch.-analit. zhurn. «Vestnik S.-Peterb. un-ta GPS MCHS Rossii». 2022. № 1. S. 195–203.
9. Na vyhodnyh svalka na Volhonskom shosse polnost'yu dogorela // Kanoner. URL: <http://kanoner.com/2011/11/14/29122/> (data obrashcheniya: 08.09.2022).
10. Pozhar na svalke pod L'vovom lokalizovan 9 iyunya 2016 g. // Interfaks. URL: <https://www.interfax.ru/world/512791/> (data obrashcheniya: 08.09.2022).
11. V Kaliningradskoj oblasti likvidirovali pozhar na musornom poligone // TASS. URL: [https://tass.ru/proisshestviya/15616351?utm\\_source=fedpress.ru&utm\\_medium=referral&utm\\_campaign=fedpress.ru&utm\\_referrer=fedpress.ru](https://tass.ru/proisshestviya/15616351?utm_source=fedpress.ru&utm_medium=referral&utm_campaign=fedpress.ru&utm_referrer=fedpress.ru) (data obrashcheniya: 08.09.2022).
12. Vesovoj uchet dlya poligonov TBO // «Mallenom Systems». URL: <https://www.mallenom.ru/resheniya/po-otrasliam/avtomarshalvesovaya-dlya-poligonov-tbo/> (data obrashcheniya: 08.09.2022).
13. Autonomous safety system for MSW landfills / A. Titov [et al.] // E3S Web of Conferences. 2020. № 161 (53): 01043.
14. Landfill continuous emissions monitoring system (LCEMS) // Los gatos research. URL: <http://www.lgrinc.com/applications/landfill-emissions-monitoring.php> (data obrashcheniya: 08.09.2022).
15. How to prevent landfill fires through early detection? // Wastack. URL: <https://www.wastack.com/post/how-to-prevent-landfill-fires-through-early-detection> (data obrashcheniya: 08.09.2022).
16. Daniel H Cusworth. Using remote sensing to detect, validate, and quantify methane emissions from California solid waste operations // Environmental research letters. 2020. Vol. 15 (5). № 5.
17. Landfill monitoring with web-based networking, drones and AR // Control. URL: <https://www.controlglobal.com/articles/2020/landfill-monitoring-with-web-based-networking-drones-and-ar/> (data obrashcheniya: 08.09.2022).

18. *Bespilotnik i poligony TBO // OOO «Aviacionnye roboty»*. URL: <http://aviarobots.ru/service/bespilotnik-i-poligony-tbo/> (data obrashcheniya: 08.09.2022).
19. Muleya M. *Photogrammetry based analysis for the risks associated with landfilling in developing countries: case study Chunga landfill, Lusaka, Zambia: thesis submitted in (partial) fulfilment of the master of science degree*. Auckland, New Zealand: Auckland university of technology, 2020. 124 p.
20. *Unmanned aerial vehicles for operational monitoring of landfills / T. Filkin [et al.] // Drones*. 2021. № 5 (4): 125.
21. De Wet A. *Discovering and characterizing abandoned waste disposal sites using LIDAR and aerial imagery // Environ. Eng. Geosci*. 2016. № 22. P. 113–130.
22. *Analysis of landfills with historic airphotos / T. Erb [et al.] // Photogramm. Eng. Remote Sens*. 1981. № 47. P. 1363–1369.
23. *SnifferDRONE. The industry's best available technology for detecting land-based methane leaks and quantifying emissions // SNIFFER ROBOTICS, LLC*. URL: <https://www.snifferrobotics.com/snifferdrone> (data obrashcheniya: 08.09.2022).
24. Bolton N. *Using drones for landfill mapping // MSW Management*. 2020. URL: <https://www.mswmanagement.com/landfills/article/13028889/using-drones-for-landfill-mapping> (data obrashcheniya: 08.09.2022).
25. *Council uses drone to inform landfill management plan // Waste management review*. 2016.

**Информация о статье:**

Статья поступила в редакцию: 08.02.2023; одобрена после рецензирования: 24.04.2023; принята к публикации: 13.06.2023

**The information about article:**

The article was submitted to the editorial office: 08.02.2023; approved after review: 24.04.2023; accepted for publication: 13.06.2023

*Сведения об авторах:*

**Габриэль Павел Олегович**, аспирант кафедры инженерной защиты окружающей среды Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета) (190013, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 24-26/49, лит. А), e-mail: [pavel-gabriel@mail.ru](mailto:pavel-gabriel@mail.ru)

**Ивахнюк Григорий Константинович**, заведующий кафедрой инженерной защиты окружающей среды Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета) (190013, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 24-26/49, лит. А), доктор химических наук, профессор, e-mail: [fireside@inbox.ru](mailto:fireside@inbox.ru)

**Сай Анна Романовна**, преподаватель кафедры надзорной деятельности Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: [a-novik@mail.ru](mailto:a-novik@mail.ru)

*Information about the authors:*

**Gabriel Pavel O.**, postgraduate student of the department of environmental engineering of the Saint-Petersburg state technological institute (technical university) (190013, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 24-26/49, lit. A), e-mail: [pavel-gabriel@mail.ru](mailto:pavel-gabriel@mail.ru)

**Ivakhnyuk Grigory K.**, head of the department of environmental engineering of the Saint-Petersburg state technological institute (technical university) (190013, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 24-26/49, lit. A), doctor of chemical sciences, professor, e-mail: [fireside@inbox.ru](mailto:fireside@inbox.ru)

**Say Anna R.**, lecturer of the department of supervisory activities of the Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), e-mail: [a-novik@mail.ru](mailto:a-novik@mail.ru)