

ПРИРОДНО-АНТРОПОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ОХРАНА ПРИРОДЫ

УДК 504.064.2

DOI: 10.18384/2712-7621-2023-3-59-79

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОБЪЕКТОВ РАЗМЕЩЕНИЯ ОТХОДОВ НА ВОЗДУШНУЮ СРЕДУ (НА ПРИМЕРЕ ПОЛИГОНОВ ТКО ВОРОНЕЖСКОЙ ОБЛАСТИ)

Ашихмина Т. В.

Воронежский государственный технический университет, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия
Октября, д. 84, Российская Федерация; e-mail: tv_ashikhmina@bk.ru

Поступила в редакцию 10.07.2023

После доработки 10.09.2023

Принята к публикации 15.09.2023

Аннотация

Цель. Исследование возможности применения моделирования процессов воздействия системы «полигон ТКО – окружающая среда» на воздушную среду для оценки и разработки решений по минимизации такого воздействия.

Процедура и методы. В работе использованы системный подход к моделированию процессов взаимодействия объектов размещения отходов с окружающей средой, расчёт и моделирование газо-эмиссионных процессов на основе: значений удельного выхода биогаза за период его активной стабилизированной генерации при метановом брожении и периода полного сбраживания органической части отходов с учётом температурных условий района расположения объекта; ежегодных данных о количестве накопленных отходов на объектах; значений скорости и направления ветра, степени вертикальной устойчивости атмосферы согласно средним многолетним данным наблюдений ближайших к объектам метеостанций.

Результаты. Метод моделирования позволил проанализировать объёмы и динамику газо-эмиссионных процессов разновозрастных объектов размещения твёрдых коммунальных отходов, оценить и спрогнозировать их экологическое влияние.

Теоретическая и/или практическая значимость. Метод моделирования газо-эмиссионных процессов в системе «полигон ТКО – окружающая среда» рекомендуется для оптимизации эко-безопасного управления системой на всех этапах её жизненного цикла, а также в случае горения отходов.

© СС ВУ Ашихмина Т. В., 2023.

Ключевые слова: система «полигон ТКО – окружающая среда», объект размещения отходов, моделирование эмиссии полигона ТКО, экологическое влияние, горение отходов, зона токсического задымления

MODELING OF THE IMPACT OF WASTE DISPOSAL FACILITIES ON THE AIR ENVIRONMENT (USING THE EXAMPLE OF LANDFILLS OF THE VORONEZH REGION)

T. Ashikhmina

Voronezh State Technical University; ul. 20 letiya Oktyabrya 84, Voronezh 39400620, Russian Federation; e-mail: tv_ashikhmina@bk.ru

Received 10.07.2023

Revised 10.09.2023

Accepted 15.09.2023

Abstract

Aim. Investigation of the possibility of using modeling of the processes of the impact of the “landfill MSW – environment” system on the air environment to assess and develop solutions to minimize such impacts.

Methodology. The research uses: a systematic approach to modeling the processes of interaction of waste disposal facilities with the environment, calculation and modeling of gas emission processes based on: the values of the specific yield of biogas during the period of its active stabilized generation during methane fermentation and the period of complete fermentation of the organic part of the waste, taking into account the temperature conditions of the area of the object location; annual data on the amount of accumulated waste at the facilities; values of wind speed and direction, the degree of vertical stability of the atmosphere according to the average long-term data of observations of weather stations closest to the objects.

Results. The method of informational, including retrospective, modeling makes it possible to analyze the volumes and dynamics of gas-emission processes of different-age municipal solid waste disposal facilities, to assess and predict their environmental impact.

Research implications. The method of modeling gas emission processes in the MSW landfill – environment system is recommended to optimize eco-safe control of the system at all stages of its life cycle, as well as in case of waste burning.

Keywords: MSW landfill – environment system, modeling, MSW landfill emissions, environmental impact, waste gorenje, toxic smoke zone

Введение

Длительное размещение твёрдых коммунальных отходов на полигонах в природных условиях сопровождается эмиссиями продуктов трансформации отходов в окружающую среду, оказывающими влияние на качественные и количественные параметры геосфер

Земли [1; 4; 11; 16; 20]. Существенную часть эмиссионных процессов составляют выбросы биогаза, содержащего газообразные продукты разложения отходов, а также выбросы продуктов горения отходов во время пожаров на полигонах. Интенсивность и масштабы газо-эмиссионных процессов на

полигонах ТКО определяются динамикой внешних факторов, имеющих естественное и антропогенное происхождение, а также внутренними физико-химическими и биохимическими процессами [15].

Используемые в настоящее время модели и прогнозы образования биогаза и оценки его эмиссии с территорий объектов размещения ТКО учитывают влияние основных факторов, определяющих характер и временные параметры процессов трансформации отходов, количество и скорость выделения метана как основного компонента биогаза. Необходимые для моделирования параметры устанавливаются расчётными, статистическими и экспериментальными исследованиями [6]. Для построения моделей используются методы математического и имитационного (наглядного отображения в виде графиков и карт параметров, характеризующих объект исследования) моделирования [5; 7; 12].

Сложность и разнообразие методов моделирования и прогнозирования газо-эмиссионных процессов полигонов ТКО затрудняют их практическое применение и оперативное получение информации в случае горения отходов на объекте.

Перечисленные аспекты подчёркивают актуальность разработки доступных и практически применимых методов моделирования и прогнозирования масштабов газообразных эмиссий объектов размещения отходов, находящихся на разных этапах их жизненного цикла.

Целью работы является исследование возможности моделирования процессов воздействия системы «полигон ТКО – окружающая среда» на воздуш-

ную среду для оценки и разработки решений по минимизации такого воздействия. Задачи:

1. оценить основные параметры выхода биогаза для объектов исследования;
2. рассчитать ежегодные объёмы биогаза на протяжении всего периода существования полигонов ТКО, находящихся в разных геоэкологических условиях;
3. проанализировать динамику выхода биогаза относительно динамики массы накопленных отходов;
4. произвести расчёт выбросов загрязняющих веществ при горении отходов на объектах, а также глубину зоны токсического задымления;
5. сделать визуализацию и анализ расчётных зон токсического задымления;
6. проанализировать возможности развития и практического применения предлагаемых методологических подходов.

В качестве объектов размещения отходов рассмотрены полигоны твёрдых коммунальных отходов как специальные сооружения, устройство и эксплуатация которых регламентируются федеральными стандартами.

Основной предложенного метода моделирования газовых эмиссий полигонов ТКО послужили:

- методологический подход к применению информационного моделирования для описания и анализа сложных природно-технических систем, согласно которому показателем состояния системы «полигон ТКО – окружающая среда» служат «выходы» – эмиссии продуктов трансформации отходов в окружающую среду [1; 2; 17; 18; 19; 21];

– методологический подход к оценке и прогнозированию объёмов и динамики выхода биогаза [6].

В основе работы лежит ретроспективный методологический подход к информационному моделированию процессов взаимодействия полигонов ТКО с окружающей средой, который предполагает воспроизведение динамики и объёмов газовых эмиссий на закрытом и длительно эксплуатирующихся объектах за весь период их существования.

В процессе моделирования был сделан ряд допущений:

1. ежегодное поступление отходов на полигоны принято равномерным в соответствии с проектными значениями¹;

2. закрытие полигона рассматривается как прекращение поступления отходов на объект без учёта последующей рекультивации;

3. расчёты выбросов загрязняющих веществ во время пожаров на полигонах произведены для 10% от общей массы отходов, накопленных в настоящее время, – максимального объёма очагового горения отходов согласно литературным данным [8];

4. моделирование зоны токсического задымления при пожарах на полигонах г. Воронежа производилось для суммарного количества отходов;

5. прогнозные расчёты основаны на экстраполяции 30-летней динамики температуры воздуха в районе расположения объектов².

Расчёты объёмов эмиссий биогаза проведены по действующей методике [10], суть которой заключается в определении общего количества биогаза, выделившегося за период с начала эксплуатации полигона до момента расчёта согласно объёму размещённых отходов, удельному выходу биогаза за период его активной стабилизированной генерации при метановом брожении и периода полного сбраживания органической части отходов с учётом температурных условий района расположения объекта. Методика учитывает время отсутствия газовой эмиссии – первые 2 года с момента поступления отходов на полигон.

В соответствии с целями и задачами исследования расчёт ежегодных объёмов биогаза проводился для каждого полигона в тёплый период года с учётом ежегодного поступления отходов на объект, а также температурных параметров атмосферы.

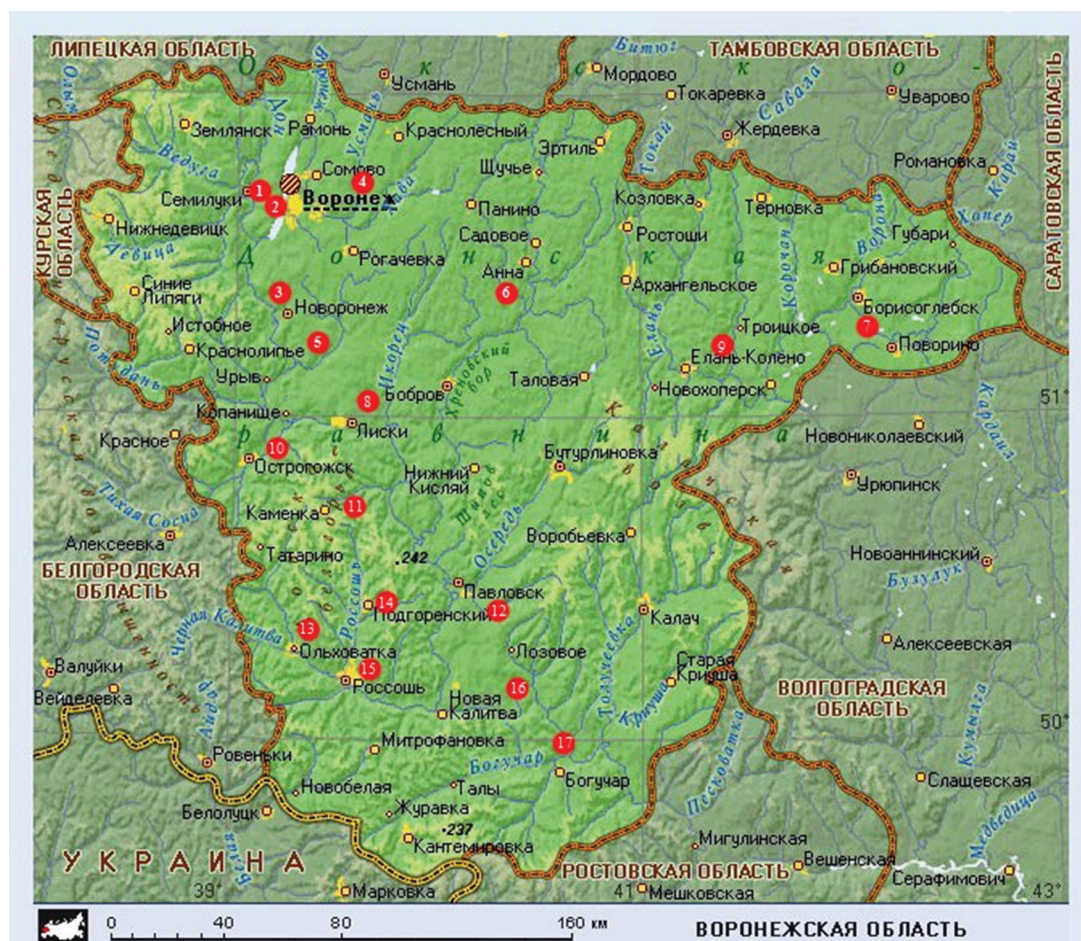
Графическое построение моделей динамики образования биогаза выполнено в программе «Microsoft Excel», моделирование зоны токсического задымления при горении отходов выполнено в программе «GoogleEarthProSetup».

Моделирование газо-эмиссионных процессов на полигонах ТКО

В настоящее время в Воронежской области эксплуатируются 17 полигонов твёрдых коммунальных отходов (рис. 1) [13].

¹ Территориальная схема обращения с отходами на территории Воронежской области, утв. Приказом Департамента жилищно-коммунального хозяйства и энергетики Воронежской области от 26 декабря 2022 года № 319 [Электронный ресурс]. URL: <https://pravo.govvrn.ru/content/приказ-департамента-жилищно-коммунального-хозяйства-и-энергетики-воронежской-области-от-441> (дата обращения: 30.05.2023).

² World Meteorological Organization [сайт]. URL: <https://community.wmo.int> (дата обращения: 25.05.2023).



Условные обозначения:

- | | | |
|-----------------------------------|------------------------------|------------------------------------|
| 1 – Семилукский р-н, с. Девица; | 8 – Лисинский р-н; | 14 – Подгоренский р-н; |
| 2 – Семилукский р-н; | 9 – Новохоперский р-н; | 15 – Россошанский р-н; |
| 3 – г.о. Нововоронеж; | 10 – г. Острогожск 1 очередь | 16 – Верхнеамонский р-н; |
| 4 – Новоусманский р-н; | 1 секция; | 17 – Богучарский р-н; |
| 5 – п. Давыдовка (Лисинский р-н); | 11 – Каменский р-н; | |
| 6 – Аннинский р-н; | 12 – Павловский р-н; | |
| 7 – Борисоглебский г.о.; | 13 – Ольховатский р-н; | |
| | | – закрытый полигон ТКО г. Воронежа |

Рис. 1 / Fig. 1. Полигоны ТКО на территории Воронежской области / Landfills of MSW on the territory of the Voronezh region

Источник: составлено автором

Для проведения исследований были выбраны 4 объекта размещения отходов, находящихся на разных стадиях жизненного цикла и в различных геоэкологических условиях (табл. 1, рис. 2–4).

Анализ температурных условий районов расположения выбранных объектов позволил выделить основные параметры протекания газо-эмиссионных процессов (табл. 2).

Таблица 1 / Table 1

Характеристика геоэкологических условий объектов исследования / Characteristics of geoeological conditions of research objects

Объект	Действующий/ Недействующий, сроки эксплуатации, площадь	Особенности рельефа	Инженерно- геологические условия	Средне- годовые тем- пературы воздуха, °С (среднее за период существова- ния объ- екта)	Сумма тем- ператур за теплый пе- риод года (выше 0°С, среднее за период суще- ствования объекта)
Полигон в Семилук- ском р-не (полигон I)	Не действует, 1991– 2011 гг., площадь 82 000 м ²	Водораздел рек Дон – Де- вица – поло- говолнистая равнина, расчленённая густой ов- ражно-балоч- ной сетью	Преобладают пески, глины и суглинки па- леогена, мела верхнемелового возраста. Про- является карст, флювиальные, оползневые про- цессы. Многие балки являются фильтрующи- ми. Подземные воды защищены плохо.	7,6	88 897
Полигон в Семилук- ском р-не (полигон II)	Действующий, 1 очередь – сроки эксплуатации но- ябрь 2011–2018 гг., площадь 10 8767 м ² , 2 очередь – сро- ки эксплуатации 2019 г. – настоящее время, площадь 142 890 м ²				
Полигон ТКО в Лискинс- ком р-не (полигон III)	Действующий, 2005 г. – настоящее время, площадь 11,7 га	Надпоймен- ная терраса р. Дон, овраг	Преобладают пески древне- аллювиальные четвертичного возраста. Актив- ные флювиаль- ные процессы. Подземные воды защищены очень плохо	8,0	90 851
Полигон ТКО в Рос- со-шанском р-не (поли- гон IV)	Действующий, 1987 г. – настоящее время, площадь 14,35 га	Левобереж- ный склон долины р. Чёрная Ка- литва, балка	Преобладают мела верхнемел- ового возраста. Проявляется карст, флювиаль- ные процессы. Многие балки являются филь- трующими. Под- земные воды за- щищены плохо	8,6	10 8291

Источник: составлено автором на основе [3]



Условные обозначения:

I – Полигон I; II-1 – Полигон II первая очередь; II-2 – Полигон II вторая очередь.

Рис. 2 / Fig. 2. Расположение полигонов ТКО г. Воронежа / Location of landfills of MSW of Voronezh

Источник: составлено автором с помощью программы «GoogleEarthProSetup»



Рис. 3 / Fig. 3. Расположение полигона ТКО г. Лиски (полигон III) / Location of the MSW landfill of the city of Liski (polygon III)

Источник: составлено автором с помощью программы «GoogleEarthProSetup»

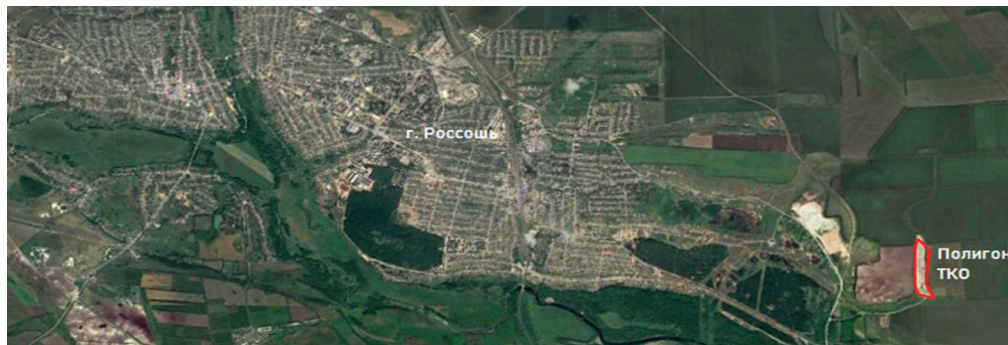


Рис. 4 / Fig. 4. Расположение полигона ТКО г. Россошь (полигон IV) / Location of the MSW landfill in Rossosh (polygon IV)

Источник: составлено автором с помощью программы «GoogleEarthProSetup»

Таблица 2 / Table 2

**Параметры газо-эмиссионных процессов на выборочных полигонах ТКО /
Conditions of gas-emission processes at selected landfills of MSW**

Объект исследования	Период полного сбраживания органической части отходов, годы	Ежегодный выход биогаза от 1 т отходов
полигон I полигон II	18	9,46 кг
полигон III	17,7	9,6 кг
полигон IV	17,3	9,84 кг

Источник: подсчитано автором

Согласно проведённым расчётам по мере повышения температурных показателей в районе расположения объекта происходит увеличение удельного выхода биогаза от 1 т отходов и сокращается период полного сбраживания органической части отходов.

В настоящем исследовании проведено моделирование эмиссий биогаза полигонов ТКО, находящихся на разных этапах существования. Проведено ретроспективное моделирование для закрытого объекта за период 1994–2022 гг., а также для действующих объектов за длительный период их эксплуатации. Графические модели динамики

формирования биогаза на исследуемых полигонах представлены на рисунках 5–8.

Графическое построение динамики накопления отходов и соответствующего ежегодного выхода биогаза показало, что объём выделяющегося биогаза на полигоне I увеличивался по мере роста объёма отходов и достиг максимума через 17 лет от начала эксплуатации полигона. Этот показатель составил 25 838 тыс. м³ и оставался стабильным в течение нескольких лет, в этот период поступление отходов на полигон было прекращено, что повлекло за собой снижение объёмов

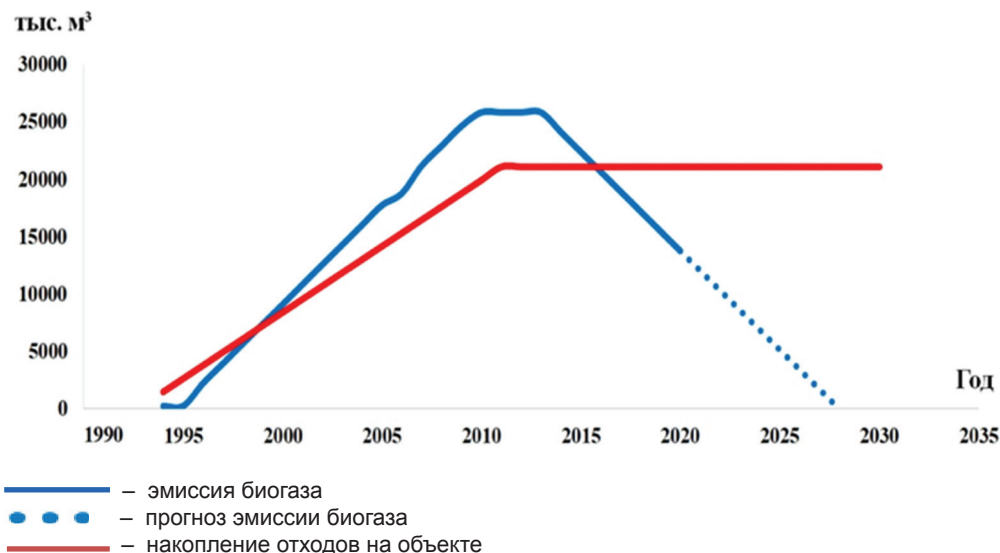


Рис. 5 / Fig. 5. Динамика накопления отходов и образования биогаза на полигоне I / Dynamics of waste accumulation and biogas formation at the Landfill

Источник: составлено автором на основе произведённых расчётов по [10]

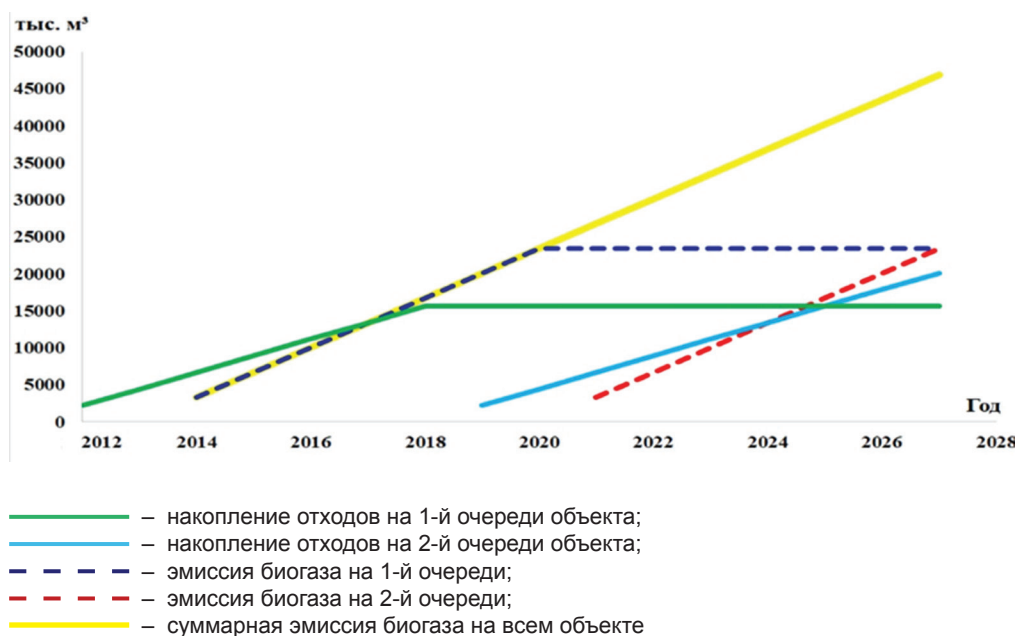


Рис. 6 / Fig. 6 Динамика накопления отходов и образования биогаза на полигоне II / Dynamics of waste accumulation and biogas formation at Landfill II

Источник: составлено автором на основе произведённых расчётов по [10]

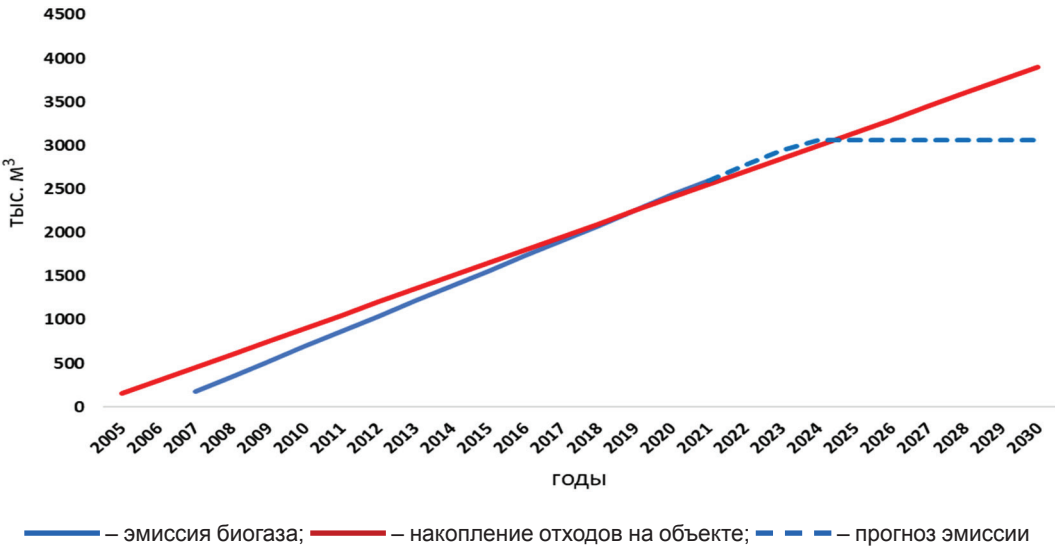


Рис. 7 / Fig. 7. Динамика накопления отходов и образования биогаза на полигоне III / Dynamics of waste accumulation and biogas formation at Landfill III

Источник: составлено автором на основе произведённых расчётов по [10]

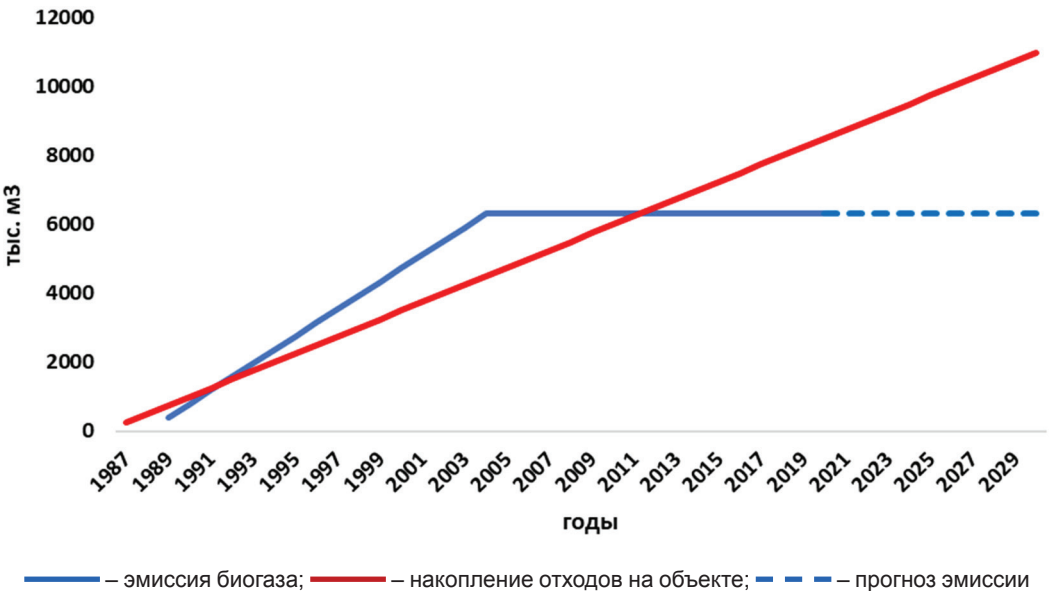


Рис. 8 / Fig. 8. Динамика накопления отходов и образования биогаза на полигоне IV / Dynamics of waste accumulation and biogas formation at Landfill IV

Источник: составлено автором на основе произведённых расчётов по [10]

выделяющегося биогаза. Полученная информационная модель динамики газо-эмиссионных процессов на полигоне I применена для описания и прогнозирования масштабов выбросов биогаза на подобном объекте, находящемся в аналогичных геоэкологических условиях, – полигона II, эксплуатация которого началась одновременно с закрытием первого объекта.

Заполнение проектной ёмкости 1 очереди полигона II произошло за 7 лет и сопровождалось интенсивной газовой эмиссией, которая продолжается и в настоящее время, т. к. период активного образования биогаза ещё не завершён. Согласно расчётам, максимальный его объём на 1 очереди полигона II составляет 23 453 тыс. м³. На основании газо-эмиссионной модели первого объекта и экстраполяции 30-летней динамики климатических параметров можно прогнозировать сохранение максимального объёма выбросов в течение 12 лет, после чего выход биогаза будет снижаться и полностью прекратится ориентировочно к 2037 г.

Вторая очередь полигона II начала заполняться отходами в 2019 г. Прогнозируется начало эмиссии биогаза с 2022 г. и её ежегодный рост по мере накопления отходов. Предполагается заполнение проектной ёмкости очереди к 2027 г., образование биогаза достигнет максимума к 2029 г. и будет продолжаться ещё примерно 20 лет.

Произведённые расчёты эмиссии биогаза на полигоне III показали, что в настоящее время объёмы выбросов растут по мере накопления отходов. Однако примерно к 2024 г. этот процесс стабилизируется на объёме более 3 000 м³/год биогаза. Прогнозные рас-

чёты позволяют отметить, что дальнейшее накопление отходов на объекте не приведёт к увеличению ежегодных объёмов выбросов биогаза, таким образом, эмиссия биогаза в атмосферу приобретает стабильное значение. Постепенное снижение этого процесса возможно при условии прекращения поступления отходов на полигон.

Полигон IV отличается длительным периодом эксплуатации. Согласно произведённым расчётам период полного сбраживания органической части отходов составляет 17,3 лет, в течение которых происходит рост объёма ежегодной эмиссии биогаза в соответствии с накоплением отходов на объекте. По окончании периода выброс биогаза стабилизируется на объёме более 6 000 м³. Дальнейший рост количества отходов, согласно проектным значениям, не приводит к увеличению объёма эмиссии. Постепенное снижение этого процесса возможно также при условии прекращения поступления отходов на полигон.

Таким образом, проведённое моделирование и прогнозирование газо-эмиссионных процессов на полигонах ТКО позволяет сделать вывод, что объёмы выделившегося биогаза определяются количеством отходов, накопленных на объектах. Так, период непрерывного поступления в атмосферу биогаза от объектов размещения ТКО г. Воронежа составляет почти 30 лет, а общий период газо-эмиссионных процессов составит порядка 60 лет. Открытие 3 очереди полигона II продлит этот срок ещё на несколько десятилетий. Суммарный объём биогаза, выделившегося на объектах с начала их эксплуатации по настоящее время, составляет примерно 480 604 тыс. м³.

Полигоны ТКО г. Лиски и г. Россоши к настоящему времени уже сформировали значительный объём биогаза и продолжают оставаться постоянными источниками его поступления в атмосферу. Газо-эмиссионные процессы на этих объектах будут стабильно активными на протяжении всего периода их эксплуатации.

Таким образом, действующие полигоны ТКО можно сравнить с техногенными месторождениями горючего газа. Стабилизация объёмов эмиссии биогаза происходит по истечении периода полного сбраживания органической части отходов. После закрытия этих объектов эмиссия биогаза прекратится постепенно, также за период полного сбраживания органической части отходов.

Исследуемые полигоны имеют высокий суммарный потенциал опасности по уровню воздействия на воздушную среду на всех этапах жизненного цикла, что обуславливает необходимость устройства систем дегазации, сбора и утилизации биогаза, как на действующих объектах, так и на закрытых, в т. ч. для компенсации энергодефицита новых отходоперерабатывающих производств в контексте формирования территориальной схемы их размещения относительно полигонов ТКО [9].

Биогаз, формирующийся на полигонах ТКО является также пожароопасным фактором, создающим условия для горения отходов, во время которого происходит залповый выброс разнообразных токсичных веществ¹ (табл. 2).

Рассмотрим глубину зоны токсического задымления (параметр, используемый в прогнозировании зоны токсического воздействия²) по 3 ком-

понентам (оксиду углерода, сернистому ангидриду, оксиду азота) при горении отходов на объектах исследования (табл. 3, рис. 9–11).

Произведённые расчёты показали, что максимальное распространение характерно для оксида углерода, глубина задымления составляет от 60 км до почти 300 км. Визуализация расчётных зон токсического задымления при горении отходов на полигонах, проведённая по компоненту СО, имеющего максимальную глубину рассеивания, позволяет наглядно оценить территорию, которая может быть подвержена воздействию загрязняющих веществ от сгорания отходов.

С помощью пространственного моделирования зон токсического задымления при пожарах на объектах исследования определено значительное количество населённых пунктов, попадающих в расчётную, потенциально возможную зону токсичных выбросов. Максимальная зона рассеивания распространяется за пределы области.

Для детализации зон токсического задымления при горении отходов необходим учёт метеорологических параметров – направления и скорости ветра в районе расположения полигона. Для прогнозных расчётов возможной зоны токсического задымления при горении отходов на проектируемом объекте необходимо использовать данные многолетних метеорологических наблюдений, в т. ч. розу ветров, в районе предполагаемого строительства. Для оперативных расчётов во время пожара на полигоне необходимо использовать метеорологические параметры в период развития данной ситуации.

Таблица 2 / Table 2

Выброс веществ (в т. ч. загрязняющих) в атмосферу в результате сгорания отходов на выборочных полигонах ТКО, т / Release of substances (including pollutants) into the atmosphere as a result of waste combustion at selective landfills of MSW, t

Объект	Выброс веществ в атмосферу						
	CO	H ₂	H ₂ S	SO ₂	NO _x	Твёрдые частицы	Сажа
полигон I	8 315	951	184	262	255	487	23
полигон II	85 324	9 758	1 882	2 689	2 612	4 994	238
полигон III	5 053	578	112	159	155	296	14
полигон IV	55 137	6 306	1 216	1 738	1 688	3 227	154

Источник: подсчитано автором¹

Таблица 3 / Table 3

Расчётная глубина зоны токсического задымления при горении отходов на выборочных полигонах ТКО, м / The estimated depth of the toxic smoke zone during the combustion of waste at selected landfills of MSW, m

Полигон ТКО, расстояние до ближайшего н. п.	Глубина зоны задымления по веществу, м		
	CO	SO ₂	NO
полигон I, 1 600 м	57 696	16 517	3 561
полигон II, 2 000 м	272 450	78 005	16 796
полигон III, 1 500 м	65 708	18 794	4 056
полигон IV, 2 670 м	188 263	53 909	11 606

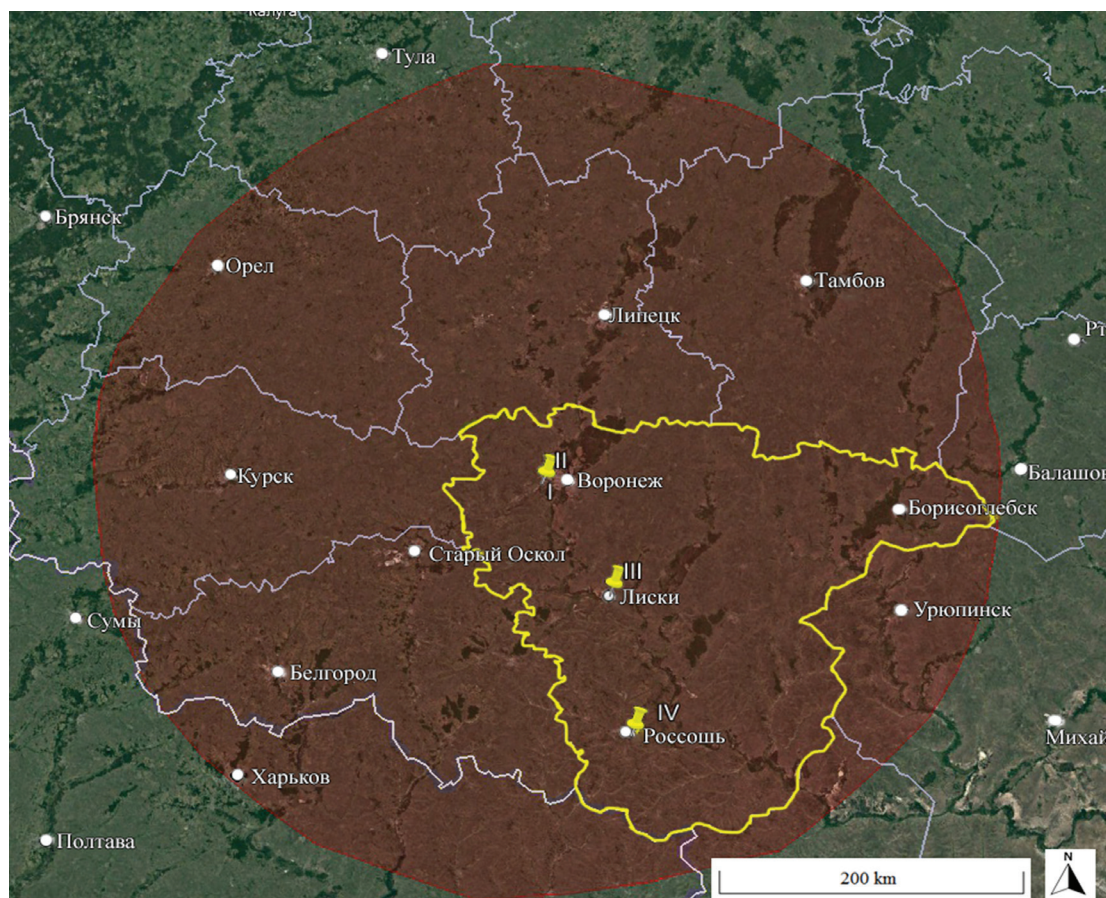
Источник: подсчитано автором по [14]

Необходимо отметить, что расчёт зоны токсического задымления для весьма ограниченного набора компонентов, которые предлагаются в использованной методике, существенно сужает возможности оценки воздействия горения отходов на окружающую среду. В связи с этим требуется доработка методики расчёта глубины

зон токсического задымления для всех известных компонентов дымовых газов, образующихся во время горения отходов. Разработка программного комплекса для рассмотренных расчётов позволит более точно и оперативно осуществлять прогнозирование экологического воздействия пожаров на полигонах ТКО.

¹ Временные рекомендации по расчёту выбросов вредных веществ в атмосферу в результате сгорания на полигонах твёрдых бытовых отходов и размера предъявляемого иска за загрязнение атмосферного воздуха», утв. Минприроды РФ 02.11.92 [Электронный ресурс]. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=15444> (дата обращения: 30.05.2023).

² СП 165.1325800.2014. Свод правил. Инженерно-технические мероприятия по гражданской обороне. Актуализированная редакция СНиП 2.01.51-90 [Электронный ресурс]. URL: https://mchs.gov.ru/uploads/document/2022-03_16/eb0d3ffe4276aa9eb8b1c1109109483b.pdf (дата обращения: 30.05.2023)



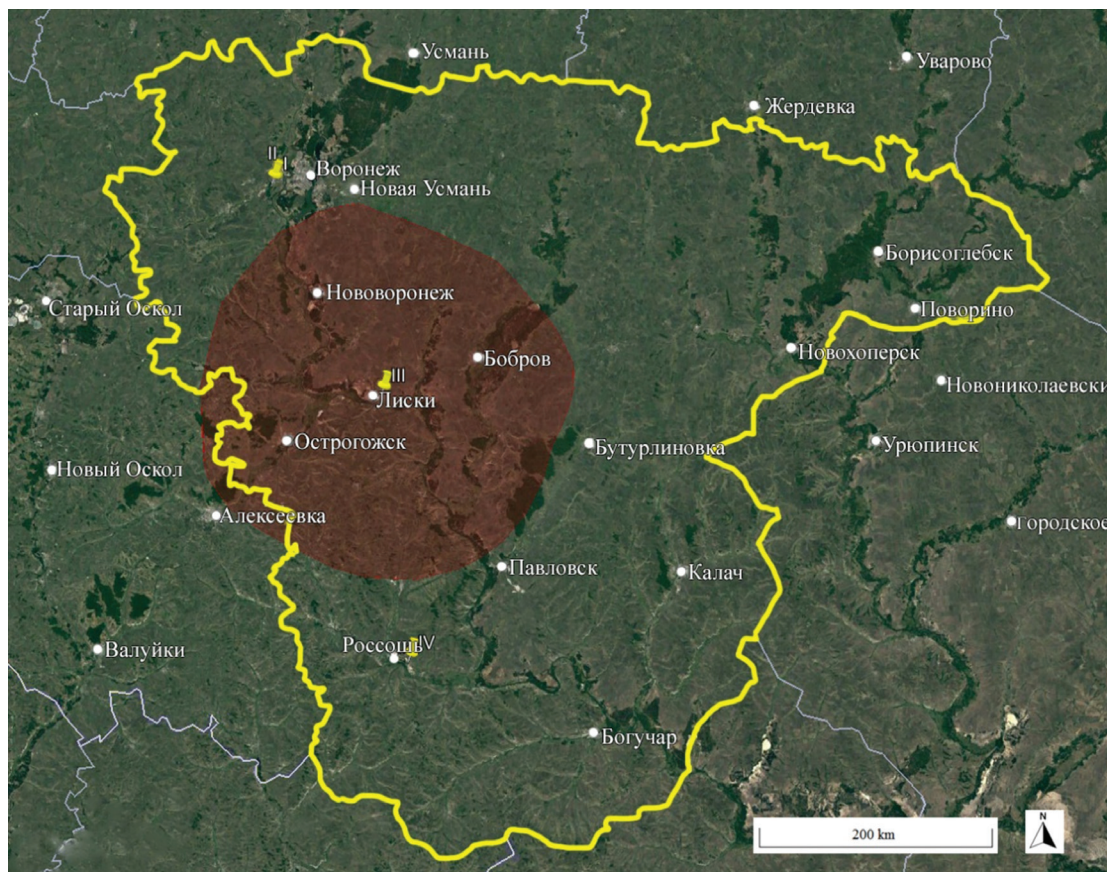
— граница Воронежской области

I, II, III, IV — исследуемые полигоны ТКО

— зона возможного распространения продуктов горения отходов

Рис. 9 / Fig. 9. Расчётная зона токсического задымления при горении отходов на полигонах ТКО г. Воронежа (согласно значениям скорости и направления ветра, степени вертикальной устойчивости атмосферы, взятым по средним многолетним данным наблюдений метеостанции г. Воронежа) / The estimated zone of toxic smoke during the burning of waste at landfills of the Voronezh MSW (according to the values of wind speed and direction, the degree of vertical stability of the atmosphere, taken from the average long-term observation data of the Voronezh weather station)

Источник: составлено автором



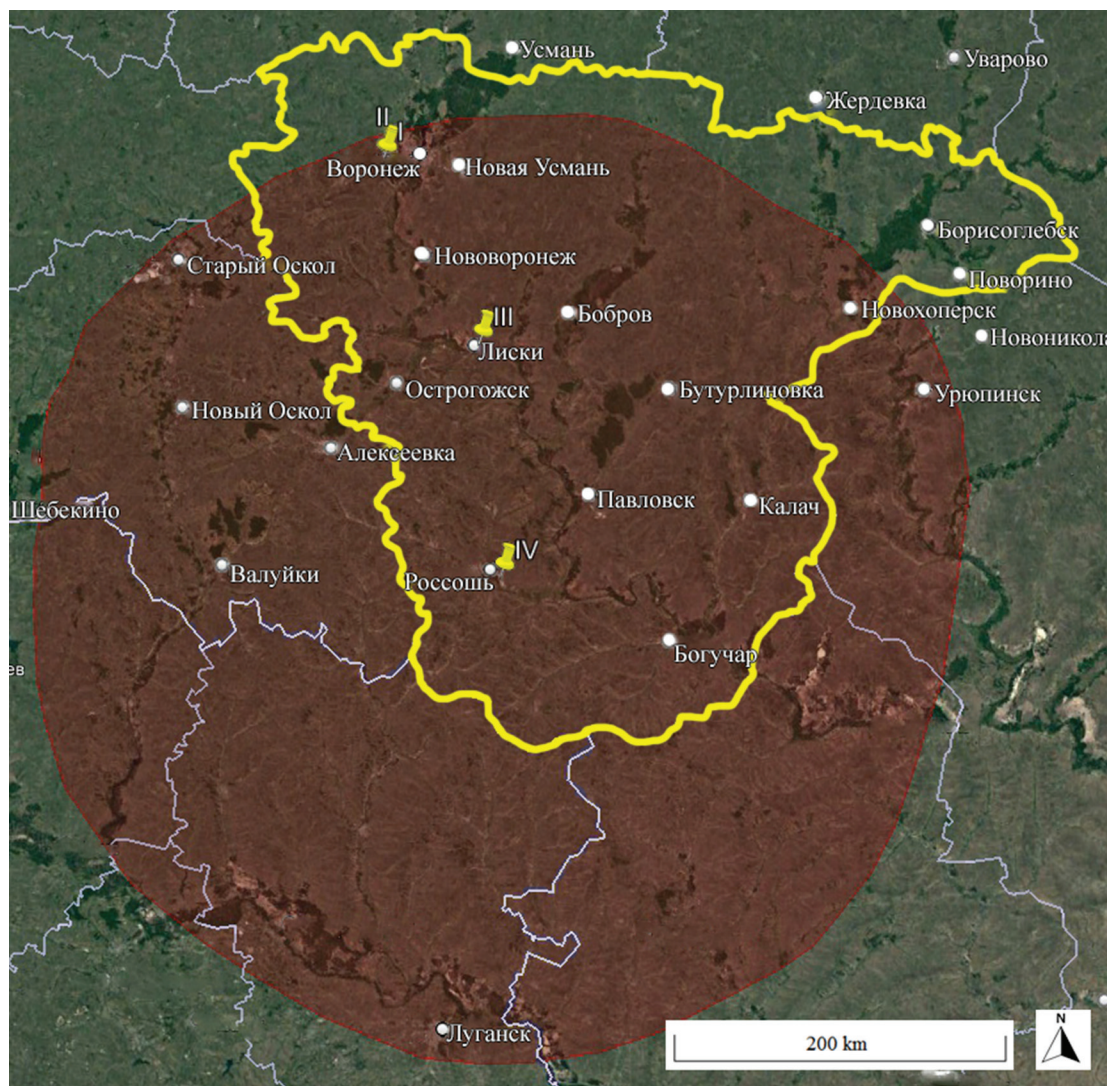
— граница Воронежской области

I, II, III, IV — исследуемые полигоны ТКО

— зона возможного распространения продуктов горения отходов

Рис. 10 / Fig. 10. Расчётная зона токсического задымления при горении отходов на полигоне ТКО г. Лиски (согласно значениям скорости и направления ветра, степени вертикальной устойчивости атмосферы, взятым по средним многолетним данным наблюдений метеостанции г. Лиски) / The estimated zone of toxic smoke during the burning of waste at the landfill MSW Liski (according to the values of wind speed and direction, the degree of vertical stability of the atmosphere, taken from the average long-term observation data of the Liski meteorological station)

Источник: составлено автором



— граница Воронежской области

I, II, III, IV — исследуемые полигоны ТКО

— зона возможного распространения продуктов горения отходов

Рис. 11 / Fig. 11. Расчётная зона токсического задымления при горении отходов на полигоне ТКО г. Россосшь (согласно значениям скорости и направления ветра, степени вертикальной устойчивости атмосферы, взятым по средним многолетним данным наблюдений ближайшей метеостанции г. Богучар) / The estimated zone of toxic smoke during the burning of waste at the landfill MSW Rossosh (according to the values of wind speed and direction, the degree of vertical stability of the atmosphere, taken from the average long-term observation data of the nearest weather station in Boguchar)

Источник: составлено автором

Применение предлагаемого подхода к моделированию и прогнозированию зоны токсического задымления при горении отходов позволит пространственно скорректировать и детализировать систему экологического мониторинга.

Заключение

Предложенный методологический подход к моделированию влияния объектов размещения отходов на воздушную среду включает 2 составляющие:

1. расчёт и графическое отображение динамики объёмов биогаза, образующегося на протяжении жизненного цикла полигонов ТКО, в т. ч. на недействующем в настоящее время объекте;
2. расчёт количества, а также расчёт и визуализация пространственного распространения загрязняющих веществ, образующихся при горении отходов на полигонах.

Проведённое исследование позволяет сделать следующие выводы:

- образование и выделение в атмосферу газообразного продукта трансформации отходов (биогаза) происходит на протяжении всего периода эксплуатации полигонов ТКО, находящихся в разных геоэкологических условиях, а также в течение длительного времени в постэксплуатационный период;
- объёмы биогаза и временные периоды его формирования определяются количеством размещённых на полигоне отходов, температурными параметрами атмосферы в районе расположения объекта;
- по истечении периода полного сбраживания органической части отходов происходит стабилизация объёмов

ёмов эмиссии биогаза; после закрытия этих объектов эмиссия биогаза прекращается постепенно, также за период полного сбраживания органической части отходов;

- массы загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферу в результате сгорания отходов на выборочных полигонах ТКО, определяются количеством накопленных отходов и, соответственно, возрастом объекта;

- глубина зоны токсического задымления определяется для отдельных компонентов и зависит от их свойств и характеристик;

- визуализация расчётных зон токсического задымления позволяет определить зону потенциального воздействия компонентов дымовых газов для каждого исследуемого объекта;

- предлагаемый подход к моделированию влияния объектов размещения отходов на воздушную среду позволяет определить газовый потенциал разновозрастных полигонов ТКО, что актуально для разработки систем сбора и утилизации биогаза на проектируемых, действующих и закрытых объектах;

- предлагаемый подход к моделированию и прогнозированию воздействия горения отходов на воздушную среду позволяет оценить количественные и пространственные масштабы этого процесса по некоторым компонентам дымовых газов, что актуально для разработки систем экологического мониторинга при пожарах на полигонах ТКО;

- развитие предложенных методологических подходов заключается в создании программных комплексов для ускорения и упрощения процедуры расчётов и моделирования; для более полной оценки воздействия

токсического задымления необходимо расширение расчётного перечня компонентов, присутствующих в дымовых газах.

Таким образом, адаптация методологии информационного, в т. ч. ретроспективного, моделирования к системе «полигон ТКО – окружающая среда» позволяет наглядно продемонстрировать, оценить и спрогнозировать динамику газо-эмиссионных процессов.

На основе полученных данных можно выработать рекомендации по минимизации экологического воздействия системы «полигон ТКО – окружающая среда» на любом этапе её существования, что позволяет оптимизировать процесс управления такой системой, определяя приоритетные направления разработки организационно-технических мероприятий по обеспечению её экологической безопасности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ основных тенденций развития системы обращения с отходами в России: проблемы и перспективы / Ю. М. Жукова, С. Н. Никулина, О. В. Яковлева, Е. А. Чериканова // Экология и промышленность России. 2020. № 24. С. 66–71.
2. Арманд А. Д. Информационные модели природных комплексов. М.: Наука, 1975. 125 с.
3. Ашихмина Т. В. Геоэкологический анализ состояния окружающей среды и природоохранные рекомендации в районе расположения полигонов ТБО Воронежской области: дис. ... канд. геогр. наук. М., 2014. 136 с.
4. Ашихмина Т. В., Каверина Н. В., Куприенко П. С. Анализ негативных экологических последствий эксплуатации полигона твёрдых коммунальных отходов г. Воронежа на разных этапах его жизненного цикла // Региональные геосистемы. 2020. Т. 44. № 3. С. 343–358.
5. Батракова Г. М., Бояршинов М. Г., Горемыкин В. Д. Моделирование переноса и рассеивания в атмосферном воздухе метана, эмитированного с территории захоронения твёрдых бытовых отходов // Вестник Воронежского университета. Геология. 2005. № 1. С. 256–262.
6. Вайсман Я. И., Вайсман О. Я., Максимова С. В. Управление метаногенезом на полигонах твёрдых бытовых отходов. Пермь, Книжный мир, 2003. 231 с.
7. Еланцева Е. Н., Серeda Т. Г., Костарев С. Н. Моделирование процессов управления качеством окружающей среды в зоне воздействия полигонов захоронения отходов // Современные наукоемкие технологии. 2018. № 6. С. 69–76.
8. Итышев И. К., Потапова С. О. О проблемах пожарной безопасности твёрдых бытовых отходов и мест их хранения // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. 2018. Т. 1. С. 292–300.
9. Медведков А. А., Полищук М. И., Никитин Б. В. Размещение новых производств по переработке отходов в регионе // Твёрдые бытовые отходы. 2020. № 12. С. 52–56.
10. Методика расчёта количественных характеристик выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от полигонов твёрдых бытовых и промышленных отходов / Н. Ф. Абрамов, Э. С. Санников, Н. В. Русаков, М. Б. Миляев, Р. Г. Халевин, А. В. Лифанов, Н. С. Буренин и др. М., 2004. 21 с.
11. Мочалова Л. А., Гриненко Д. А., Юрак В. В. Система обращения с твёрдыми коммунальными отходами: зарубежный и отечественный опыт // Известия Уральского государственного горного университета. 2017. № 3. С. 97–101.
12. Обратное моделирование как метод измерения эмиссии метана из полигонов ТБО: сравнение различных подходов / А. Ф. Сабреков, И. Е. Терентьева, М. В. Плаголев,

- О. Р. Коцюрбенко // Математическое моделирование в экологии: мат-лы конф. / под ред. П. Я. Рабарника, Д. О. Логофета. Пущино, 2017. С. 187–188.
13. Оптимизация системы ресурсосберегающего обращения со строительными отходами в Воронежской области как фактор снижения антропогенной нагрузки на окружающую среду / Т. В. Ашихмина, С. Н. Золотухин, П. С. Купrienko, В. А. Помогалов // Наука, технологии, общество: экологический инжиниринг в интересах устойчивого развития территорий: сб. науч. трудов. Вып. 6. Красноярск, 2022. С. 694–703.
14. Храпцов Б. А., Болотских Т. Г., Юрьев А. М. Прогнозирование чрезвычайных ситуаций природного характера. Белгород, 2006. 25 с.
15. Ashikhmina T. V. A systematic approach to modeling complex processes of interaction between waste disposal facilities and the environment in the ecological safety of antropogenic geoeological systems managemen // Учёные записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология. 2021. Т. 7. № 2. С. 291–306.
16. Dregulo A. M., Bobylev N. G. Integrated Assessment of Groundwater Pollution from the Landfill of Sewage Sludge // Journal of Ecological Engineering Volume. 2021. № 22. Iss. 1. P. 68–75.
17. Matei I. V., Ungureanu L. Survey on integrated modelling applied in environmental engineering and management // Environmental engineering and management journal. 2014. № 13. P. 1027–1038.
18. Ping Tang, Youcai Zhao, Dan Liu. A laboratory study on stabilization criteria of semi-aerobic landfill // Waste Management & Research. 2009. № 26. P. 566–572.
19. Spatio-dynamic Modelling of Environmental Safety of the Russian Federation Regions / V. Glinskiy, L. Serga, M. Khvan, K. Zaykov // Procedia Manufacturing. 2017. № 8. P. 315–322.
20. Strizhenok A. V., Ivanov A. V. Monitoring of Air Pollution in the Area Affected by the Storage of Primary Oil Refining Waste // Journal of Ecological Engineering. 2021. Vol. 22. Iss. 1. P. 60–67.
21. The role of aerobic activity on refuse temperature rise: II. Experimental and numerical modelling / S. Lanini, D. Houi, O. A. Ju6rez, X. Lefebvre // Waste Management & Research. 2001. № 19. P. 58–69.

REFERENCES

1. Zhukova Yu. M., Nikulina S. N., Yakovleva O. V., Cherikanova E. A. [Analysis of the main trends in the development of the waste management system in Russia: problems and prospects]. In: *Ekologiya i promyshlennost Rossii* [Ecology and industry of Russia], 2020, no. 24, pp. 66–71.
2. Armand A. D. *Informatsionnyye modeli vneshnego vida kompleksov* [Information models of natural complexes]. Moscow, Nauka Publ., 1975. 125 p.
3. Ashikhmina T. V. *Geoekologicheskii analiz sostoyaniya okruzhayushchey sredy i prirodookhrannyye rekomendatsii v rayone raspolozheniya poligonov TBO Voronezhskoy oblasti: dis. ... kand. geogr. nauk* [Geoecological analysis of the state of the environment and environmental recommendations in the area of solid waste landfills in the Voronezh region: Cand. Sci thesis in Geogrefical Sciences]. Moscow, 2014. 136 p.
4. Ashikhmina T. V., Kaverina N. V., Kuprienko P. S. [Analysis of the negative environmental consequences of the operation of the municipal solid waste landfill in Voronezh at different stages of its life cycle]. In: *Regionalnyye geosistemy* [Regional Geosystems], 2020, vol. 44, no. 3, pp. 343–358.
5. Batrakova G. M., Boyarshinov M. G., Goremykin V. D. [Modeling the transfer and dispersion of methane emitted from the territory of solid waste disposal in the atmospheric air]. In:

- Vestnik Voronezhskogo universiteta. Geologiya* [Bulletin of Voronezh University. Geology], 2005, no. 1, pp. 256–262.
6. Vaisman Ya. I., Vaisman O. Ya., Maksimova S. V. *Upravleniye metanogenezom na poligonakh tvordykh otkhodov* [Management of methanogenesis at solid waste landfills]. Perm, Knizhnyy mir Publ., 2003. 231 p.
 7. Elantseva E. N., Sereda T. G., Kostarev S. N. [Modeling of environmental quality management processes in the impact zone of waste disposal sites]. In: *Sovremennyye naukoemkiye tekhnologii* [Modern science-intensive technologies], 2018, no. 6, pp. 69–76.
 8. Ityshev I. K., Potapova S. O. [About the problems of fire safety of solid household waste and their storage places]. In: *Pozharnaya bezopasnost: problemy i perspektivy* [Fire safety: problems and prospects], 2018, vol. 1, pp. 292–300.
 9. Medvedkov A. A., Polishchuk M. I., Nikitin B. V. [Placement of new waste processing plants in the region]. In: *Tvordyye bytovyye otkhody* [Solid household waste], 2020, no. 12, pp. 52–56.
 10. Abramov N. F., Sannikov E. S., Rusakov N. V., Milyaev M. B., Khalevin R. G., Lifanov A. V., Burenin N. S., et al. *Metodika rascheta kolichestvennykh kharakteristik zagryaznyayushchikh veshchestv v okruzhayushchey srede ot poligonov tvordykh posetiteley i promyshlennyykh otkhodov* [Methodology for calculating the quantitative characteristics of emissions of pollutants into the atmosphere from landfills of solid household and industrial waste]. Moscow, 2004. 21 p.
 11. Mochalova L. A., Grinenko D. A., Yurak V. V. [Municipal solid waste management system: foreign and domestic experience]. In: *Izvestiya Ural'skogo sluzhashchego gornogo universiteta* [News of the Ural State Mining University], 2017, no. 3, pp. 97–101.
 12. Sabrekov A. F., Terentyeva I. E., Glagolev M. V., Kotsyurbenko O. R. [Inverse modeling as a method for measuring methane emissions from solid waste landfills: comparison of different approaches]. In: Rabarnik P. Ya., Logofeta D. O., eds. *Matematicheskoye modelirovaniye v ekologii* [Mathematical modeling in ecology]. Pushchino, 2017, pp. 187–188.
 13. Ashikhmina T. V., Zolotukhin S. N., Kuprienko P. S., Pomogalov V. A. [Optimization of the system of resource-saving management of construction waste in the Voronezh region as a factor in reducing anthropogenic load on the environment]. In: *Nauka, tekhnologii, obshchestvo: Ekologicheskyy inzhiniring v neozhidannom razvitii territoriy* [Science, technology, society: environmental engineering in the interests of sustainable development of territories: collection. scientific works Vol. 6.]. Krasnoyarsk, 2022. pp. 694–703.
 14. Khrantsov B. A., Bolotskikh T. G., Yuryev A. M. *Prognozirovaniye vozniknoveniya situatsiy prirodnogo kharaktera* [Forecasting natural emergency situations]. Belgorod, 2006. 25 p.
 15. Ashikhmina T. V. A systematic approach to modeling complex processes of interaction between waste disposal facilities and the environment in the ecological safety of antropogenic geoeological systems managemen. In: *Uchonyye zapiski Krymskogo federalnogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya* [Scientific notes of the Crimean Federal University named after V. I. Vernadsky. Geography. Geology], 2021, vol. 7, no 2, pp. 291–306.
 16. Dregulo A. M., Bobylev N. G. Integrated Assessment of Groundwater Pollution from the Landfill of Sewage Sludge. In: *Journal of Ecological Engineering Volume*, 2021, no. 22, iss. 1, pp. 68–75.
 17. Matei I. V., Ungureanu L. Survey on integrated modelling applied in environmental engineering and management. In: *Environmental engineering and management journal*, 2014, no. 13, pp. 1027–1038.
 18. Ping Tang, Youcai Zhao, Dan Liu. A laboratory study on stabilization criteria of semi-aerobic landfill. In: *Waste Management & Research*, 2009, no 26, pp. 566–572.

19. Glinskiy V., Serga L., Khvan M., Zaykov K. Spatio-dynamic Modelling of Environmental Safety of the Russian Federation Regions. In: *Procedia Manufacturing*, 2017, no. 8, pp. 315–322.
20. Strizhenok A. V., Ivanov A. V. Monitoring of Air Pollution in the Area Affected by the Storage of Primary Oil Refining Waste. In: *Journal of Ecological Engineering*, 2021, vol. 22, iss. 1, pp. 60–67.
21. Lanini S., Houi D., Juárez O. A., Lefebvre X. The role of aerobic activity on refuse temperature rise: II. Experimental and numerical modeling. In: *Waste Management & Research*, 2001, no. 19, pp. 58–69.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Ашихмина Татьяна Валентиновна – кандидат географических наук, доцент кафедры техносферной и пожарной безопасности факультета инженерных систем и сооружений, Воронежский государственный технический университет;
e-mail: tv_ashikhmina@bk.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Tatiana V. Ashikhmina – PhD (Geography), Assoc. Prof., Department of Technosphere and Fire Safety, Faculty of Engineering Systems and Structures, Voronezh State Technical University;
e-mail: tv_ashikhmina@bk.ru

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Ашихмина Т. В. Моделирование влияния объектов размещения отходов на воздушную среду (на примере полигонов ТКО Воронежской области) // Географическая среда и живые системы. 2023. № 3. С. 59–79.
DOI: 10.18384/2712-7621-2023-3-59-79

FOR CITATION

Ashikhmina T. V. Modeling of the impact of waste disposal facilities on the air environment (using the example of landfills of the Voronezh region). In: *Geographical Environment and Living Systems*, 2023, no. 3, pp. 59–79.
DOI: 10.18384/2712-7621-2023-3-59-79