

ЭКОЛОГИЯ ГОРОДА

УДК 628.474.764

Научная статья

Михаил Владимирович Оводков

руководитель научно-методического центра экологического моделирования, прогнозирования и оценок, ВНИИ «Экология». Россия, 117628, Москва, 36 км МКАД, двлд. 1, стр. 4

Наиль Александрович Давлекаев✉

аспирант каф. безопасности жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Россия, 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1;
e-mail: davlekaev.na@yandex.ru

Валерий Николаевич Азаров

д-р техн. наук, проф, зав. каф. безопасности жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Россия, 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ ОТ ПОЛИГОНОВ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ (ОБЗОР)

Россия является одним из крупнейших в мире эмитентов парниковых газов. Все более актуальными становятся задачи смягчения последствий изменения климата, в основе которых лежат реализуемые мероприятия по снижению эмиссии парниковых газов. Отходы, в том числе твердые коммунальные (ТКО), давно уже превратились в угрозу экологической безопасности Российской Федерации. Анализ статистических данных показывает, что объемы отходов ТКО из года в год растут и в значительной мере зависят от масштабов городов и численности населения. На города приходится более 70 % выбросов парниковых газов, и они вносят основной вклад в климатический кризис. Полигоны захоронения ТКО являются третьим по величине антропогенным ис-

точником атмосферного метана, поэтому важное значение имеет изучение образования метана в условиях полигона твердых бытовых отходов и его зависимость от различных факторов. Статья посвящена обзору и сравнительному анализу функциональных возможностей наиболее известных расчетных методик, применяемых для моделирования выбросов парниковых газов от объектов размещения отходов. Сравнительный анализ таких методик позволил определить их преимущества и недостатки, а также возможности взаимной замены параметров. Параметры методик взаимозаменяемы и могут быть уточнены для каждого конкретного полигона ТКО. Точность расчетного прогнозирования зависит от полноты учета всех влияющих на процесс факторов (климатических условий, морфологического состава отходов, типа полигона, наличия очагов возгораний и др.). В результате исследования установлено, что для разработки научно обоснованной методики оценки выбросов парниковых газов от объектов размещения отходов необходимо проведение дополнительных комплексных исследований, в частности дополнение перечня отходов, рассматриваемых в методике IPCC, другими видами отходов в соответствии с Федеральным классификационным каталогом отходов, определение требуемых параметров для этих видов отходов, а также уточнение параметров модели для возможности использования ее в расчетах выбросов от конкретного объекта размещения отходов.

Ключевые слова: твердые коммунальные отходы, эмиссия, парниковые газы, биогаз, полигоны, метан, органический углерод, модель, методика.

Для цитирования: Оводков М. В., Давлекаев Н. А., Азаров В. Н. Актуальные проблемы моделирования выбросов парниковых газов от полигонов твердых бытовых отходов (обзор) // Социология города. 2024. № 2. С. 94—107.

DOI: 10.35211/19943520_2024_2_94

Введение

Изменение климата — глобальная экологическая проблема, которая, по оценкам большинства ученых, носит антропогенный характер. Россия является одним из крупнейших в мире эмитентов парниковых газов (ПГ), находясь на 4-м месте после США, Китая и Индии. Исследование китайского Университета Сунь Ятсена (Wei T., Wu J., Chen S., 2021) показало, что на 25 мегаполисов приходится 52 % выбросов городских ПГ в мире. Одним из них является Москва. В своей статье ученые из Китая впервые задокументировали уровни выбросов ПГ в 167 городах из 53 стран мира. Исследователи объяснили, что даже несмотря на то, что города покрывают лишь около 2 % общей площади поверхности Земли, они вносят основной вклад в климатический кризис. «В настоящее время более 50 % мирового населения проживает в городах, — сказал автор статьи и исследователь управления городской окружающей средой доктор Шаоцин Чен из Университета Сунь Ятсена в Гуанчжоу. — На города приходится более 70 % выбросов ПГ, и они несут большую ответственность за декарбонизацию мировой экономики»¹. Ученые об-

¹ Mr. Jingles. Больше половины выбросов городских парниковых газов в мире производят всего 25 мегаполисов. URL: https://fishki.net/3839979-bolyshe-poloviny-vybrosov-gorodskih-parnikovyh-gazov-v-mire-proizvodjat-vsego-25-megapolisov.html&utm_source=share_link_button (дата обращения: 13.02.2024).

наружили, что города с высоким уровнем выбросов ПГ есть как в развитых, так и в развивающихся странах.

Формирование основ климатической политики России началось с принятия Климатической доктрины в 2009 г. и продолжилось в 2023 г. с утверждением новой Климатической доктрины Российской Федерации². Доктрина акцентирует внимание на двух направлениях в реализации климатической политики: смягчении последствий изменения климата и адаптации к ним. Выделяются тренды в смягчении последствий изменения климата, в основе которых лежат реализуемые мероприятия по снижению эмиссии ПГ. Подчеркивается необходимость использования в промышленности и сельском хозяйстве климатически нейтральных технологий для достижения поставленной цели по обеспечению углеродной нейтральности российской экономики к 2060 г. (Веселова, 2023: 86). Данные задачи, как видится, обуславливают необходимость совершенствования расчетных методов оценки выбросов ПГ в различных отраслях хозяйственной деятельности. Отходы, в том числе твердые коммунальные (ТКО), давно уже превратились в угрозу экологической безопасности Российской Федерации. Так, по данным Минприроды России, ежегодно в России образуется около 60 млн т ТКО, каждый год — на 3 % больше. Перерабатывается всего 5—7 % отходов, остальное захоранивается. На территории Российской Федерации расположено около 15 тыс. только санкционированных объектов размещения отходов (ОРО), занимающих площадь примерно 4 млн га. Ежегодно из сельхозоборота под складирование отходов выводится 300—400 тыс. га³.

Именно поэтому в части обращения ТКО в последнее время отмечено столько законодательных и технологических нововведений: это введение территориальных схем в области обращения с отходами, региональных операторов по обращению с отходами, расширенной ответственности производителей товаров и упаковки, создание условий для отдельного сбора ТКО. Одновременно ведется системная поэтапная информатизация отрасли обращения с ТКО, российским экологическим оператором создана федеральная государственная информационная система учета твердых коммунальных отходов.

Вместе с этим анализ статистических данных показывает, что объемы отходов ТКО из года в год растут и в значительной мере зависят от масштабов городов и численности населения (Калюжина, Самарская, 2014: 1). В связи с высокими темпами урбанизации происходит увеличение нагрузки на места временного накопления отходов, рост объема отходов за счет упаковочного материала, отсутствие в большинстве мест селективного сбора и сортировки отходов от населения, несвоевременный вывоз ТКО (Стёпкин, Гайдукова, 2018: 694).

² Указ Президента Российской Федерации от 26 октября 2023 № 812 «Об утверждении Климатической доктрины Российской Федерации». URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/49910> (дата обращения: 13.02.2024).

³ Об утверждении Стратегии развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 25.01.2018 № 84-р.

В России на сегодняшний день нет комплексной методологии, позволяющей рассчитать объемы выбросов ПГ от различных объектов размещения ТКО. Это в значительной степени объясняется несовершенством статистических данных в области обращения с отходами. Таким образом, разработка научно-методических основ моделирования выбросов ПГ от полигонов ТКО является весьма актуальной и многоплановой задачей.

Цель статьи — сравнительный анализ математических моделей количественного определения объемов выбросов ПГ от полигонов ТКО.

Объекты и методы исследования

Как известно, полигоны ТКО являются весьма производительными источниками выбросов ПГ в атмосферу. При анаэробном разложении органической фракции отходов происходит выделение биогаза (свалочного газа — СГ). Он состоит из больших количеств метана (CH_4) и углекислого газа (CO_2), являющихся ПГ, негативно влияющих на климат. Свалки и полигоны ТКО обеспечивают порядка 11 % общего количества ПГ, поступившего из антропогенных источников ежегодно. Несмотря на то, что CO_2 и CH_4 образуются на полигонах ТКО примерно в эквивалентных количествах, метан вызывает большее беспокойство. Это связано с его значительным вкладом в «парниковый эффект», поскольку метан аккумулирует энергию инфракрасного излучения в 30 раз эффективнее углекислоты. Метан присутствует в атмосфере в достаточно низких концентрациях (1,58—1,68 ppm), однако его атмосферное содержание ежегодно возрастает в среднем на 1 % (Каллистова, 2007: 13). Полигоны захоронения ТКО являются третьим по величине антропогенным источником атмосферного метана. Их вклад в глобальную эмиссию этого ПГ оценивается в 35—73 млн т/год, что составляет 10—20 % от антропогенной и 6—12 % общей глобальной эмиссии метана (Джамалова, 2014: 1). Годовая эмиссия метана с полигонов твердых бытовых отходов (ТБО) в России оценивается в 1,1 млрд м^3 . Важное значение имеет изучение образования метана в условиях полигона ТБО, и это образование определяется интенсивностью процессов разложения органического вещества в анаэробной зоне полигона и микробного окисления метана в аэробном слое покрывающей свалочное тело почвы. Средняя эмиссия метана тем выше, чем моложе участок полигона и чем слабее окисляющая активность метанотрофной микробной популяции (Каллистова, Глаголев, Шнырев и др., 2006).

Модели газообразования описывают динамику образования СГ во времени в зависимости от состава и графика захоронения отходов. В работе Е. П. Волынкиной (Волынкина, Домнин, 2014: 63) представлены наиболее известные модели, опробованные в различных странах:

- модель IPCC, разработанная Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК IPCC) (Руководящие принципы..., 2006);
- модель LandGEM (Landfill Emission Gas Model — LandGEM), разработанная Агентством защиты окружающей среды США (Landfill..., 2005);
- Восточноевропейская модель (2013).

С использованием программы LandGEM (3.02) и модифицированной модели треугольного метода (МТМ) исследователями из Индии В. Das, Т. Hazra (Das, Hazra, 2021) произведены оценка и сравнение выбросов СГ (LFG) с неконтролируемой свалки, расположенной в Дхапе, Калькутта, Индия. Подсчи-

тано, что выброс метана колеблется от 10,87 до 24,01 мм³ в год и от 28,36 до 44,23 мм³ в год с использованием модели LandGEM и МТМ соответственно за период 2010—2030 гг.

В статье Jean Agustin Velásquez Piñas (Piñas, Venturini, Lora и др., 2016), описывается, как в одном из муниципалитетов Бразилии для оценки параметров были использованы модели LandGEM (EPA) и биогаз (Cetesb), которые показали аналогичные результаты во время сравнения, имеющие всего 5 % расхождения.

При учете эмиссии биогаза на территории Российской Федерации используют методические указания и руководства по количественному определению объема выбросов ПГ, а также методические указания по количественному определению объема косвенных энергетических выбросов ПГ, описанные в приказах Минприроды России⁴. Основой количественного определения является методика расчета выбросов ПГ при захоронении отходов, утвержденная приказом Минприроды России № 371⁵, основанная на модели IPCC (МГЭИК).

Также в нашей стране при проведении расчетов выбросов ПГ отечественные исследователи часто используют методику, разработанную ОАО «АКХ им. К. Д. Памфилова» (Абрамов, Санников, Русаков и др., 2004).

Сравнительный анализ математических моделей

В работе (Волынкина, Домнин, 2014: 63) проведен достаточно полный сравнительный анализ математических моделей, откуда видно, что все они представляют собой экспоненциальные уравнения реакции первого порядка, но учитывают различные влияющие на процесс метанообразования факторы. При этом модели IPCC рассчитывают динамику образования метана, а Восточноевропейская – в целом СГ (LFG – Landfill Gas). В отличие от них модель LandGEM позволяет проводить расчет эмиссии не только метана, но и диоксида углерода, неметановых органических компонент (НМОС).

Отмечено, что значения константы реакций k значительно меняются от модели к модели. Если в модели IPCC даны только минимальные и максимальные значения, то в LandGEM-модели предлагается уже 5 значений в зависимости от типа полигона, а в Восточноевропейской — 20 в зависимости от категории отходов и климата. В Восточноевропейской модели коэффициент k зависит уже от типа климата и типа отходов.

Все модели учитывают морфологический состав отходов при расчете потенциала метанообразования L_0 , но в модели IPCC потенциал метанообразования рассчитывается по эмпирической формуле, а в остальных моделях принимается в зависимости от типа полигона (в LandGEM) или типа отходов (в Восточноевропейской).

⁴ Об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе: Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 06.06.2017 № 273.

⁵ Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ № 371 от 27.05.2022.

При расчете параметра L_0 предлагается использовать известные данные о морфологическом составе отходов. При отсутствии таких данных в Восточноевропейской модели используется по умолчанию имеющаяся в базе данных информация для разных стран, но такой метод имеет значительную неточность, особенно в условиях старых закрывающихся свалок, по следующим причинам:

- морфологический состав отходов, захораниваемых в разные периоды эксплуатации свалки, был различным и неизвестен;
- в период закрытия свалки и создания системы дегазации органические отходы уже разложились, причем в различной степени в зависимости от конкретных условий;
- начальное состояние захороненных отходов в период создания системы дегазации совершенно не соответствует морфологическому составу исходных отходов, направляемых на захоронение в этот период. В связи с этим для достижения наиболее точного модельного прогнозирования образования СГ на старых закрывающихся свалках целесообразно использовать в расчетах L_0 данные о фактическом состоянии захороненных отходов (свалочном грунте), включая их фактический морфологический состав и степень разложения органических компонентов.

Во всех моделях присутствует поправочный коэффициент метанообразования, численные значения которого различаются, но всегда зависят от глубины свалки и от типа управления свалкой. В Восточноевропейской модели шире, чем в остальных моделях, рассмотрена зависимость этого коэффициента от глубины свалки.

Восточноевропейская модель включает в себя структуры модели IPCC и допускает возможность расчета объемов образования СГ по собственным данным о климате и составе отходов. В целом Восточноевропейская модель основана на LandGEM, но содержит некоторые элементы модели IPCC. Необходимо отметить, что LandGEM, Восточноевропейская и модель IPCC были разработаны для климатических условий и высоких стандартов захоронения отходов западных стран. Применение моделей в странах с другим составом отходов, неразвитой системой управления ТБО может приводить к существенным погрешностям. В связи с этим требуется учитывать такие нехарактерные для западных полигонов факторы, как окисление метана на открытых свалках, влияние возгораний и др.

Модель LandGEM представлена в виде программы LandGEM (3.02), реализуемой на базе MS Excel. Модель разрабатывалась для полигонов США и на основе данных о них. Она рекомендуется для оценки загрязнения воздуха вблизи полигонов, для проведения инвентаризации эмиссии ПГ и для оценки энергетического потенциала всей массы отходов. Первичной рассчитываемой величиной программы LandGEM является образование метана, эмиссия диоксида углерода и других газов в атмосферу рассчитывается исходя из задаваемого состава биогаза и коэффициента окисления метана. Расчетная модель содержит ряд параметров, значения которых зависят от состава отходов и условий их разложения для конкретных условий. В программе LandGEM предусмотрен расчет среднегодовых значений образования и эмиссии газов. В своих исследованиях ученые (Сафранов, Приходько, Шанина, 2017; Приходько, Сафранов, Шанина, 2018) продолжили сравнение наиболее известных

математических моделей и провели их адаптацию на региональном уровне. Было выявлено, что для получения более точных результатов расчета эмиссии метана на региональном уровне следует использовать значения параметра k , которые максимально соответствуют условиям его образования — климатическим особенностям и морфологическому составу отходов в местах захоронения. В модели LandGEM параметр k используется в качестве множителя, тогда как в других моделях он используется как показатель степени. Кроме того, в данной модели значения параметров k и L_0 не зависят от морфологического состава ТБО, а для всей массы отходов принимаются одинаковые значения данных параметров в зависимости от типа полигона. Для уточнения параметров модели на региональном и национальном уровнях необходимо определение значений параметра k на основе климатического районирования территории, что значительно повысит точность расчетов.

Согласно действующей методике из Приказа Минприроды России от 27.05.2022 № 371 для количественной оценки перехода углерода, содержащегося в отходах, в метан использована методика на основе метода затухания (разложения) первого порядка (ЗПП), учитывающего медленное разложение органических компонентов отходов с выделением CH_4 на протяжении нескольких десятилетий, в том числе на закрытых ОРО (Руководящие принципы..., 2006).

Метод ЗПП, базирующийся на модели анаэробной деструкции органического вещества с образованием соответствующих продуктов разложения, позволяет дать оценку количества углерода в отходах, размещенных на ОРО, а также скорости и эффективности процесса биологического разложения содержащих углерод органических веществ. Считается, что такому разложению подвергается только органическое вещество с углеродом биологического происхождения, т. е. все виды пластика, синтетики и других веществ, содержащих органику с углеродом ископаемого происхождения, в этих условиях считают неразложимыми. Под углеродом ископаемого происхождения понимается углерод, полученный из ископаемого топлива или другого ископаемого источника. Углерод биологического (биогенного) разложения — это углерод, поступивший из биогенных (растительных или животных) источников за исключением ископаемого углерода.

Часть органического вещества в захороненных на ОРО в разные годы отходах, которая каждый год разлагается на CH_4 и CO_2 , описывается экспоненциальной функцией, т. е. количество образующегося за год CH_4 соответствует не количеству захороненных в этот период отходов, а общему количеству органического вещества, оставшегося неразложившимся к этому году на ОРО. В модели также учтено окисление образованного метана в верхних слоях ОРО и его возможное извлечение с целью сжигания для получения энергии и тепла или в факельной установке.

Различаются подходы 3 уровней. Методика оценки выбросов ПГ на всех уровнях одинакова и отличается только возможностью использования национальных исходных данных, коэффициентов и параметров.

Уровень 1: принцип оценки основан на методе ЗПП, в основном использующем значения данных, коэффициентов и параметров методики (Там же, 2006).

Уровень 2: использует метод ЗПП и значения некоторых параметров, коэффициентов в соответствии с Руководящими принципами национальной инвентаризации ПГ (Там же, 2006), однако также предполагается наличие достоверных данных по размещению отходов на конкретном ОРО в настоящее и прошедшее время.

Уровень 3: основан на использовании достоверных данных по размещению отходов на конкретном ОРО в настоящее и прошедшее время, а также использование либо метода ЗПП (Там же, 2006), либо других методик для расчета при условии, что они позволяют получить такую же точность, как и метод ЗПП.

Как видно из табл. 1:

1. Модели в основном разработаны для климатических условий и стандартов захоронения отходов западных стран, при других условиях имеется большая погрешность, что характерно для Land GEM Model.

2. Точность расчета обусловлена корректностью данных о морфологическом составе.

3. Метод МГЭИК дает приемлемую годовую оценку реальных выбросов, только если количество и состав отходов меняются медленно с течением времени, в иных случаях имеются значительные неточности.

4. Наиболее соответствующей требованиям в области учета ПГ в РФ является методика из Приказа Минприроды России от 27.05.2022 № 371. Однако она требует уточнений и корректировки, так как параметры и коэффициенты определены на основе данных 2000—2006 гг., динамика накопления отходов, изменение морфологического состава и ряд других показателей не учитываются. Для получения приемлемых результатов необходимы данные об удалении отходов за период не менее 50 лет.

Заключение

Проведенный в рамках настоящей статьи анализ расчетных моделей выбросов ПГ показал, что для количественной оценки перехода углерода, содержащегося в отходах, в метан и другие ПГ наиболее часто применяется модель IPCC, предложенная Межправительственной группой экспертов по изменению климата (Intergovernmental Panel on Climate Change). Она предусматривает возможность использовать национальные методики расчета на втором и третьем уровне. Использовать применимые к конкретным странам методы можно только в том случае, если они показывают достоверность не менее, чем методика IPCC. Точность расчетного прогнозирования зависит от полноты учета всех влияющих на процесс факторов (климатических условий, морфологического состава отходов, типа полигона, наличия очагов возгораний и др.). Так как модели разработаны для климатических условий и стандартов захоронения отходов западных стран, применение моделей в странах с другим составом отходов, неразвитой системой управления ТБО может приводить к существенным погрешностям.

В России основой количественного определения является методика из Приказа Минприроды России от 27.05.2022 № 371, основанная на модели IPCC. В качестве национальной методики 2 и 3-го уровня предлагается использовать положения методики, разработанной ОАО «АКХ им. К. Д. Памфилова» (Абрамов, Санников, Русаков и др., 2004).

Для разработки научно обоснованной методики оценки выбросов ПГ от ОРО необходимо проведение дополнительных комплексных исследований, в частности дополнение перечня отходов, рассматриваемых в методике IPCC, другими видами отходов в соответствии с Федеральным классификационным каталогом отходов, определение требуемых параметров для этих видов отходов, а также уточнение параметров модели для возможности использования ее в расчетах выбросов от конкретного ОРО. Обязательным является также определение сопоставимой достоверности расчетов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Абрамов Н. Ф., Санников Э. С., Русаков Н. В., Миляев М. Б., Халевин Р. Г., Лифанов А. В. и др. Методика расчета количественных характеристик выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от полигонов твердых бытовых и промышленных отходов / ОАО «АКХ им. К. Д. Памфилова». 2004. 20 с.

Веселова Д. Н. Политика России в сфере смягчения последствий изменения климата // Дискурс-Пи. 2023. Т. 20. № 2. С. 86—105. DOI: 10.17506/18179568_2023_20_2_86

Волынкина Е. П., Домнин К. И. Математическая модель для прогнозных расчетов образования и извлечения свалочного газа на закрытых свалках ТБО // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2014. № 3(9). С. 62—70.

Джамалова Г. А. Эмиссия токсичного и взрывоопасного биогаза полигонами твердых коммунальных отходов // Известия СПбГТИ(ТУ). 2014. № 12. С. 92—95.

Каллистова А. Ю. Аэробное окисление метана в покрывающей почве полигона твердых бытовых отходов: дисс... канд. биол. наук. М., 2007. 141 с.

Каллистова А. Ю., Глаголев М. В., Шнырев Н. А., Кевбрина М. В., Некрасова В. К., Чистотин М. В. и др. Эмиссия метана с поверхности полигона захоронения твердых бытовых отходов (ТБО) в зависимости от возраста полигона и от времени года // Экологическая химия. 2006. Т. 15. № 1. С. 13—21.

Калюжина Е. А., Самарская Н. С. Экологические особенности воздействия полигонов твердых бытовых отходов на состояние окружающей среды в районах их расположения // Инженерный вестник Дона. 2014. № 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskie-osobennosti-vozdeystviya-poligonov-tverdyh-bytovykh-othodov-na-sostoyanie-okruzhayuschey-sredy-v-rayonah-ih> (ссылка активна: 16.06.2024).

Приходько В. Ю., Сафранов Т. А., Шанина Т. П. Определение эмиссии парниковых газов из мест захоронения твердых бытовых отходов // ПЭММЭ. 2018. Т. XXIX. № 1. С. 32—47. DOI: 10.21513/0207-2564-2018-1-32-47

Руководящие принципы национальной инвентаризации парниковых газов МГЭИК, 2006. Т. 5. Отходы. URL: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/vol5.html> (дата обращения: 04.11.2023).

Сафранов Т. А., Приходько В. Ю., Шанина Т. П. Определение эмиссии парниковых газов из мест захоронения твердых бытовых отходов: критический анализ методик и адаптация к условиям Одесской области // Visnyk Odes'koho derzhavnogo universytetu. 2017. № 21. С. 5—14.

Стёпкин Ю. И., Гайдюкова Е. П. Оценка и управление риском при обращении с отходами // Гигиена и санитария. 2018. № 97(8). С. 693—698. DOI: 10.47470/0016-9900-2018-97-8-693-698

Das B., Hazra T. Quantification of Landfill Gas Emission and Energy Recovery Potential: A Comparative Assessment of LandGEM and MTM Model for Kolkata. Springer Nature Switzerland AG 2021. 2021. Pp. 55—67.

Landfil Ver. 3.02: User's Guide. U.S. EPA. Washington: U.S. EPA. 2. 2005. p. 48
URL: <https://www3.epa.gov/ttnecat1/dir1/landgem-v302-guide.pdf> (accessed: 07.10.2023).

Piñas J. A. V., Venturini O. J., Lora E. E. S., de Oliveira M. A., Roalcaba O. D. C.
Aterros sanitários para geração de energia elétrica a partir da produção de biogás no Brasil: comparação dos modelos LandGEM (EPA) e Biogás (Cetesb) // Revista Brasileira de Estudos de População. 2016. No. 33(1). P. 175—188.

Wei T., Wu J., Chen S. Keeping Track of Greenhouse Gas Emission Reduction Progress and Targets in 167 Cities Worldwide // Frontiers in Sustainable Cities. 2021. No. 3. 696381. Pp. 1—13.

Research article

Mikhail V. Ovodkov

Head of the Scientific and Methodological Center for Environmental Modeling, Forecasting and Assessments, VNIH "Ecology". Bldg. 4, vlad. 1, 36 km MKAD, Moscow, 117628, Russia

Nail' A. Davlekaev✉

Postgraduate student of Life Safety in Construction and Municipal Economy Department, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russia;
e-mail: davlekaev.na@yandex.ru

Valery N. Azarov

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Life Safety in Construction and Municipal Economy Department, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russia

ACTUAL PROBLEMS OF MODELING GREENHOUSE GAS EMISSIONS FROM MUNICIPAL SOLID WASTE LANDFILLS (REVIEW)

Abstract. Because Russia is one of the world's largest emitters of greenhouse gases. The tasks of mitigating the effects of climate change, which are based on ongoing measures to reduce greenhouse gas emissions, are becoming increasingly urgent. Waste, including municipal solid waste (MSW), has long become a problem that poses a threat to the environmental safety of the Russian Federation. Analysis of statistical data shows that the volume of MSW waste is growing from year to year and largely depends on the scale of cities and population. Cities account for more than 70 % of greenhouse gas emissions, and they are the main contributor to the climate crisis. MSW landfills are the third largest anthropogenic source of atmospheric methane. Therefore, it is important to study the formation of methane in the conditions of landfill and its dependence on various factors. This article is devoted to a review and comparative analysis of the functional capabilities of the most well-known calculation methods used to model greenhouse gas emissions from waste disposal facilities. A comparative analysis of such techniques made it possible to determine their advantages and disadvantages, as well as the possibility of mutual substitution of parameters. The parameters of the methods are interchangeable and can be specified for each specific MSW landfill. The accuracy of the calculated prediction depends on the completeness of accounting for all factors affecting the process (climatic conditions, morphological composition of waste, type of landfill, the presence of fires, etc.). As a result of the study, it was found that in order to develop a scientifically sound methodology for estimating greenhouse gas emissions from waste disposal facilities, additional comprehensive studies are necessary. In partic-

ular, supplementing the list of wastes considered in the IPCC methodology with other types of waste in accordance with the Federal Waste Classification Catalog, determining the required parameters for these types of waste, as well as clarifying the parameters of the model for the possibility of using it in calculating emissions from a specific waste disposal facility.

Key words: solid municipal waste, emission, greenhouse gases, biogas, landfills, methane, organic carbon, model, methodology.

For citation: Ovodkov M. V., Davlekaev N. A., Azarov V. N. (2024) Actual problems of modeling greenhouse gas emissions from municipal solid waste landfills (Review). *Sotsiologiya Goroda* [Urban Sociology], no. 2, pp. 94—107 (in Russian). DOI: 10.35211/19943520_2024_2_94

REFERENCES

- Abramov N. F., Sannikov E. S., Rusakov N. V., Milyaev M. B., Khalevin R. G., Lifanov A. V. et al. (2004) *Metodika rascheta kolichestvennykh kharakteristik vybrosov zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosferu ot poligonov tverdykh bytovykh i promyshlennykh otkhodov* [Methodology for calculating the quantitative characteristics of pollutant emissions in atmosphere from landfills of solid household and industrial waste]. JSC “AKH im. K.D. Pamfilova”. 20 p. (in Russian).
- Das B., Hazra T. (2021) *Quantification of Landfill Gas Emission and Energy Recovery Potential: A Comparative Assessment of LandGEM and MTM Model for Kolkata*. Springer Nature Switzerland AG 2021. Pp. 55—67.
- IPCC National Greenhouse Gas Inventory Guidelines, 2006. Vol. 5. Waste. (2006). URL: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/vol5.html> (accessed: 04.11.2023) (in Russian).
- Jamalova G. A. (2014) Emission of toxic and explosive biogas from landfills of solid municipal waste. *Izvestiya SPbGTI(TU)* [News of St. Petersburg State Technical University], no. 12, pp. 92—95 (in Russian).
- Kallistova A. Yu. *Aerobnoe okislenie metana v pokryvayushchei pochve poligona tverdykh bytovykh otkhodov* [Aerobic oxidation of methane in the covering soil of a solid waste landfill. Diss... Cand. Biol. Sci.]. Moscow, 2007. 141 p. (in Russian).
- Kallistova A. Yu., Glagolev M. V., Shnyrev N. A., Kevbrina M. V., Nekrasova V. K., Chistotin M. V. et al. (2006) *Emission of methane from the surface of a landfill for municipal solid waste (MSW) depending on the age of the landfill and the time of year. Ekologicheskaya khimiya* [Ecological chemistry], vol. 15, no. 1, pp. 13—21 (in Russian).
- Kalyuzhina E. A., Samarskaya N. S. (2014) Ecological features of the impact of solid waste landfills on the state of the environment in the areas of their location. *Inzhenernyi vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], no. 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskie-osobennosti-vozdeystviya-poligonov-tverdyh-bytovyh-othodov-na-sostoyanie-okruzhayushchey-sredy-v-rayonah-ih> (accessed: 16.06.2024) (in Russian).
- Landfil Ver. 3.02: User`s Guide. U.S. EPA. Washington: U.S. EPA. 2. 2005. p. 48. URL: <https://www3.epa.gov/ttnecat1/dir1/landgem-v302-guide.pdf> (accessed: 07.10.2023).
- Piñas J. A. V., Venturini O. J., Lora E. E. S., de Oliveira M. A., Roalcaba O. D. C. (2016) Aterros sanitários para geração de energia elétrica a partir da produção de biogás no Brasil: comparação dos modelos LandGEM (EPA) e Biogás (Cetesb). *Revista Brasileira de Estudos de População*, no. 33(1), pp. 175—188.
- Prihodko V. Yu., Safranov T. A., Shanina T. P. (2018) Determination of greenhouse gas emissions from solid waste disposal sites. *PEMME*, vol. XXIX, no. 1, pp. 32—47. DOI: 10.21513/0207-2564-2018-1-32-47
- Safranov T. A., Prihodko V. Yu., Shanina T. P. (2017) Determination of greenhouse gas emissions from solid waste disposal sites: critical analysis of methods and adaptation to the

conditions of the Odessa region. *Visnyk Odes'koho derzhavnoho universytetu*, no. 21, pp. 5—14 (in Russian).

Stepkin Yu. I., Gaydukova E. P. (2018) Risk assessment and management in the waste treatment. *Gigiena i sanitariya* [Hygiene and Sanitation], no. 97(8), pp. 693—698 (in Russian). DOI: 10.47470/0016-9900-2018-97-8-693-698

Veselova D. N. (2023). Russia's Policy in the Field of Climate Change Mitigation. *Discourse-P*, vol. 20, no. 2, pp. 86—105 (in Russian). DOI: 10.17506/18179568_2023_20_2_86

Volynkina E. P., Domnin K. I. (2014) Mathematical model for predictive calculations of the formation and extraction of landfill gas in closed solid waste landfills. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta* [Bulletin of the Siberian State Industrial University], no. 3(9), pp. 62—70 (in Russian).

Wei T., Wu J., Chen S. (2021) Keeping Track of Greenhouse Gas Emission Reduction Progress and Targets in 167 Cities Worldwide. *Frontiers in Sustainable Cities*, no. 3, 696381, pp. 1—13.

Поступила в редакцию 16.05.2024

Received 16.05.2024

Принята в печать 20.06.2024

Accepted for publication 20.06.2024