

Газогеохимическое исследование выбросов свалочного газа в верхних слоях полигона ТКО

А.В. Забелина, П.Ф. Агаханянц, О.И. Сергиенко, Н.С. Богданов*

Университет ИТМО,
РФ, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д.49, литер А

Адрес для переписки: *zabelina-eco@yandex.com*

Реферат. Рассматриваются результаты газогеохимического исследования свалочного газа в верхних слоях полигона твердых коммунальных отходов (ТКО), находящегося на этапе, близком к постэксплуатационному. Полигоны ТКО являются неорганизованными источниками свалочного газа, выбросы которых учитываются в зависимости от массы размещаемых отходов, за исключением двух последних лет, на основе известного расчетного метода. Традиционно выбросы свалочного газа контролируются по концентрациям в приземном слое атмосферного воздуха над полигоном ТКО. Однако выполненные исследования показали, что свалочные массы, размещенные в течение последних одного-двух лет, могут обладать способностью вырабатывать и накапливать свалочный газ, содержащий основные парниковые газы: метан и диоксид углерода. Приводятся результаты измерений объемной доли метана и диоксида углерода, а также определения корреляции между ними. При систематическом проведении газогеохимических исследований и увеличении набора данных возможно построение более точных статистических моделей и получение прогнозных оценок в зависимости от периода размещения отходов.

Сделан вывод о необходимости проведения ежегодного газогеохимического обследования полигонов ТКО мощностью выбросов более 50 тыс. т CO₂-экв. для уточнения расчетов выбросов парниковых газов.

Ключевые слова. Полигон ТКО, отходы, выбросы, парниковые газы, метан, диоксид углерода, газогеохимическое обследование.

Gas-geochemical survey of landfill gas emissions in the upper layers of the MSW landfill

A.V. Zabelina, P.F. Agahanyants, O.I. Sergienko, N.S. Bogdanov*

ITMO University,
49, Lit A, Kronverksky Prospekt, 197101, St. Petersburg, Russian Federation

Correspondence address: *zabelina-eco@yandex.com*

Abstract. The results of the gas-geochemical study of the upper layers of the disposed municipal solid waste landfill (MSW) at a stage close to the post-

operational stage are considered. MSW landfills are unorganized sources of landfill gas, whose emissions are accounted for depending on the mass of disposed waste, with the exception of the last two years of disposal, based on a known calculation method. Traditionally, landfill gas emissions are controlled by concentrations in the surface layer of the atmospheric layer above the landfill. However, the studies performed have shown that landfill sites located over the past one or two years may have the ability to produce and accumulate landfill gas containing the main greenhouse gases: methane and carbon dioxide. The results of measurements of volume shares of methane and carbon dioxide, as well as determination of correlation between them are given. With systematic gas-geochemical studies and an increasing data set it is possible to build more accurate statistical models and obtain predictive estimates depending on the period of waste disposal.

It is concluded that it is necessary to conduct an annual gas-geochemical survey of MSW landfills with an emission capacity of more than 50 thousand tons of CO₂-eq. to clarify calculations of greenhouse gas emissions.

Keywords. MSW landfill, emissions, greenhouse gases, methane, carbon dioxide.

Введение

В теле полигонов ТКО под действием микроорганизмов образуется свалочный газ – разновидность биогаза. Как правило, свалочный газ представляет собой не постоянную по составу смесь метана, углекислого газа, кислорода, азота, водорода, водяного пара, кроме того, в нем могут содержаться десятки соединений в следовых количествах. К парниковым газам в составе СГ относятся метан, углекислый газ, неметановые летучие органические соединения (НЛОС), закись азота (Приходько и др., 2018).

Метан (CH₄) – остаточный газ в атмосфере, который, наряду с диоксидом углерода (CO₂) играет важную роль в формировании парникового эффекта Земли. Современная средняя концентрация метана (0.1866% объемных) выше, чем достигалась за последние 800 тыс. лет¹). Метан – второй по доле и скорости роста парниковый газ после углекислого газа, его потенциал глобального потепления оценивается в 28-34 в 100-летней перспективе²).

Одним из основных источников образования метана является анаэробное разложение органических компонентов отходов на полигонах ТКО (Бажин, 2010).

На сегодняшний день проводится достаточно большое количество исследований антропогенных источников образования парниковых газов, однако их относительный вклад в глобальный баланс метана и диоксида углерода демонстрируют неопределенность в выявлении и количественной

¹) Climate Change 2023, Synthesis report, его потенциал глобального потепления оценивается в 28-34 в 100-летней перспективе [IPCC AR5 Fifth Assessment Report / IPCC], URL: <http://www.climatechange2013.org>

²) IPCC AR5 Fifth Assessment Report / IPCC. URL: <http://www.climatechange2013.org/>

оценке выбросов парниковых газов. Сложность также представляет прогнозирование будущих выбросов метана и диоксида углерода, которая обусловлена отсутствием достаточной нормативно-правовой и методической базы для работы с источниками выделения и поглощения парниковых газов в ряде стран, которые имеют такие источники.

Показано, что метан, как и диоксид углерода, являются важными элементами глобального углеродного цикла (Heilig, 1994). Благодаря химической реакции окисления метан при участии солнечного света способен доокисляться до оксида углерода (CO) и диоксида углерода (CO₂) с поглощением гидроксильной группы (ОН).

Важность использования биогазового потенциала полигонов ТКО для получения энергии, с одной стороны, и снижения выбросов парниковых газов, с другой стороны, отмечают многие зарубежные (Munawarl и др., 2019), (Lair et al., 2024) и отечественные исследователи (Верещак, Тихонова, 2022).

Измерение состава и интенсивности потока свалочного газа проводится в рамках газогеохимических обследований. Такой тип исследований широко применяется при проведении геологоразведки с целью поиска углеводородов и других газообразных веществ. В СССР подобные исследования также проводились с целью поиска месторождений нефти и природного газа (Zheng et al., 2022). Также газогеохимические обследования проводятся с целью выявить наиболее пожароопасные зоны в теле полигона ТКО или в поверхностном слое тела полигона ТКО для высоконагружаемых полигонов высотой более 20-ти метров с длительным периодом эксплуатации (более 15-ти лет) (Чусов и др., 2015).

Ряд российских исследователей показал возможность применения газогеохимического обследования на полигонах ТКО для изучения распределения состава свалочного газа, оценки энергетического потенциала и последующего выбора оптимального и эффективного решения для дегазации. В частности, в работе Масликова И.В., А.Н. Чусова и др. (2015) обосновывается использование газогеохимии с целью последующего районирования поверхности тела полигона ТКО по степени наличия метана в составе свалочного газа на глубине отбора для воспроизводства электрической и тепловой энергии. Исследования проводились для выявления перспективных участков для создания газосборной системы. Также газогеохимические обследования применялись на этапе эксплуатации полигона, близком к завершающему, в составе комплексных изысканий для разработки проекта рекультивации (Масликов и др., 2012).

На каждом объекте размещения соотношение выбросов метана и диоксида углерода может отличаться в зависимости от срока эксплуатации полигонов, состава отходов, технологии размещения, климатических параметров и активности окислительных процессов при участии микроорганизмов.

Понимание распределения эмиссий метана и его принудительная откачка с утилизацией и одновременной закачкой в тело полигона очищенного фильтрата позволят сократить время технического этапа рекультивации, за счет ускорения процессов биоразложения органической фракции отходов (Балакин и др., 2017).

Важность постэксплуатационного этапа жизненного цикла полигона захоронения отходов отмечается в работах Слюсарь Н.Н., поскольку обслуживание объектов размещения после их вывода из эксплуатации требует выбора технологических и организационных мероприятий для оценивания продолжительности эмиссии свалочного газа и минимизации накопленного экологического ущерба (Слюсарь, 2019). Зонирование газопродуктивных участков полигона важно и для целей противопожарной безопасности, в том числе при проведении рекультивационных работ (Слюсарь, 2013).

В соответствии с требованиями законодательства, концентрации компонентов свалочного газа в приземном слое атмосферного воздуха над полигоном ТКО контролируются ежеквартально с целью проверки соответствия концентраций нормируемых компонентов ПДК³⁾. Размещение постов наблюдения предполагает наличие одной точки контроля на теле полигона ТКО, на границе земельного участка, на котором расположен полигон и на границе санитарно-защитной зоны с преобладающим направлением ветра в течение года. Перечень анализируемых компонентов установлен действующей нормативной документацией и включает: метан, аммиак, дигидросульфид, окись углерода, бензол, трихлорметан, четыреххлористый углерод, хлорбензол. Количество постов наблюдения и перечень параметров могут быть расширены для полигонов ТКО по результатам прохождения Государственной экологической экспертизы.

В соответствии с утвержденной Методикой расчета выбросов от объектов размещения отходов (далее – Методика), годовые валовые выбросы от полигонов ТКО определяются только расчетным методом без проведения инструментальных исследований. Полигоны ТКО относятся преимущественно к объектам первой категории негативного воздействия, для которых в обязательном порядке разрабатывается комплексное экологическое разрешение (далее – КЭР). Разработка КЭР для полигонов ТКО предполагает только расчетные метод определения нормативов выбросов от секций складирования отходов⁴⁾. В соответствии с п. 2 Методики, расчет выбросов свалочного газа делается на основании общего количества отходов, размещенных за весь период эксплуатации объекта, за исключением отходов, завезенных в последние два года приема⁵⁾.

³⁾ Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28 января 2021 года № 3 “Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 2.1.3684-21 “Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий”. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573536177>

⁴⁾ Приказ Минприроды России от 22.10.2021 г. № 780 “Об утверждении формы заявки на получение комплексного экологического разрешения и формы комплексного экологического разрешения”. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=487138>

⁵⁾ Методика расчета количественных характеристик выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от полигонов твердых бытовых и промышленных отходов. М.: НПП “Экопром” АКХ им. К.Д. Памфилова, 2004. - 21 с.

Данное положение может привести к искажению фактических выбросов для высоконагружаемых полигонов, поскольку отходы, захороненные 15-20 лет назад от начала эксплуатации полигона, находящиеся в основании тела полигона в анаэробной зоне с высокой плотностью 1.09 т/м³ свалочных масс⁶⁾, не способны к дальнейшему генерированию свалочного газа в тех же объемах, которые соответствуют расчетным показателям для заданного количества отходов.

Применение только расчетного метода на основе утвержденной Методики расчета количественных характеристик выбросов от полигонов приводит к завышению платы за НВОС, отвлекает финансовые ресурсы от инвестирования в проекты, направленные на внедрение наилучших доступных технологий (ИТС НДТ 17-2021, 2021; ИТС НДТ 22.1-2021б, 2021), включая внедрение систем автоматического контроля (САК) выбросов полигонов ТКО.

Федеральным законом № 296-ФЗ “Об ограничении выбросов парниковых газов”⁷⁾ и Приказом МПР № 371 “Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов”⁸⁾, которые устанавливают требования вести учет и формировать отчетность о парниковых газах по всем объектам в организации, если суммарный объем парниковых газов составляет более 5% от количества всех выбросов организации и/или не менее 50 000 тонн CO₂-эквивалента в год. Таким образом, первичной проблемой, связанной с управлением парниковыми газами на предприятии, становится подготовка обоснования о необходимости или отсутствии необходимости выполнения расчетов образования парниковых газов.

В России, несмотря на относительное снижение численности населения за последние двадцать лет, отмечается рост количества отходов, размещаемых на полигонах ТКО, что связано с увеличением темпов и объемов потребления товаров и услуг (Говор, 2017). В настоящее время около 200 объектов размещения отходов находятся в стадии, близкой к завершению эксплуатации⁹⁾. Очевидно, что в качестве эффективной меры увеличения вместимости полигонов ТКО и продления срока их эксплуатации, а также снижения выбросов парниковых газов может служить активная дегазация с обезвреживанием свалочного газа путем факельного сжигания или утилизации путем сжигания с целью воспроизводства энергии.

6) Отчет о выполненных работах по определению объемно-плотностных характеристик полигона твердых бытовых и строительных отходов. СПб: ООО “БЕРГ-проект”, 2024. - 63 с.

7) Федеральный закон “Об ограничении выбросов парниковых газов” от 02.07.2021 г. № 296-ФЗ. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_388992/?ysclid=m8li2wbr1137246924

8) Приказ Минприроды России от 27.05.2022 г. № 371 “Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов”. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_423207/21f18637d63cb2c6cb6e7ebeaf62bf1-4815739a/

9) Экология. Национальный проект “Экология”. Архив 2019-24 года. URL: <https://национальныепроекты.рф/projects/ekologiya/>

Данные мониторинга парниковых газов в теле полигона ТКО и на его поверхности могут быть использованы как для оценки выбросов непосредственно от сектора захоронения отходов в Российской Федерации на региональном и федеральном уровнях, так и в рамках отчетности по Рамочной Конвенции ООН об изменении климата¹⁰⁾. Следует также отметить, что результаты комплексной качественной и количественной оценки парниковых газов в теле полигона ТКО могут служить исходными данными и основанием для планирования и реализации климатических проектов, зарегистрированных в Реестре углеродных единиц Российской Федерации. По состоянию на февраль 2025 года в Реестре углеродных единиц зарегистрировано 50 климатических проектов, однако проекты, связанные с активной дегазацией на полигонах ТКО отсутствуют¹¹⁾.

Целью исследования является анализ и обсуждение результатов газогеохимического исследования объемных долей метана и диоксида углерода в свалочном газе в верхних слоях полигона ТКО.

Методы и материалы

Исследования проводились в поверхностном слое свалочных масс высоконагружаемого полигона ТКО, расположенного в Северо-западном регионе Российской Федерации. Объект размещения отходов характеризуется высокой нагруженностью и стадией эксплуатации, близкой к завершению. Основным видом отходов, размещаемых на полигоне – сортированные и несортированные ТКО. Исследования содержания объемной доли метана и диоксида углерода проводились на участках размещения несортированных ТКО. Площадь исследуемой карты полигона составила 5.7 га. Усредненный состав отходов на полигоне ТКО, по данным морфологических исследований за 2024 год, представлен в табл. 1.

Газогеохимическое обследование территории полигона ТКО проводилось аккредитованной лабораторией методом поверхностной шпуровой съемки, отработанной и действующей карт полигона с установкой постов наблюдения, отбором проб воздуха из шпуров портативным электрохимическим газоанализатором марки Geotech GA5000 и последующим определением объемной доли компонентов метана и диоксида углерода.

Фиксация координат точек пробоотбора на местности осуществлялась при помощи GPS-навигатора, далее выполнялась оценка условий измерений и препятствующих факторов: экстремальных температур, осадков, радиопомех, источников ионизирующего излучения.

Исследования проводились в 23 точках отбора проб (рис. 1) при следующих метеорологических параметрах: температура атмосферного воздуха 24.5°C, направление ветра – восточный, скорость ветра 1 м/с, атмосферное давление 766 мм рт. ст., относительная влажность воздуха 38%.

¹⁰⁾ Парижское соглашение. Организация Объединенных Наций. 2015. - 32 с.

¹¹⁾ Реестр углеродных единиц. URL: <https://carbonreg.ru/ru/projects/>

Таблица 1. Усредненный состав отходов, размещаемых на полигоне ТКО в 2024 г., %

Table 1. Average waste composition at the landfill in 2024, %

Наименование компонента	Морфологический состав, %
Пищевые и растительные остатки	24.50
Древесная фракция	1.35
Макулатура (бумага и картон)	17.73
Отсев ≤ 8 мм (с преимущественным содержанием кремния диоксида)	23.95
Полимеры в смеси	16.65
Металлы	1.90
Многокомпонентная тара и упаковка	4.30
Стеклобой	3.41
Текстиль, кожа	2.21
Прочее	4.00
Итого	100

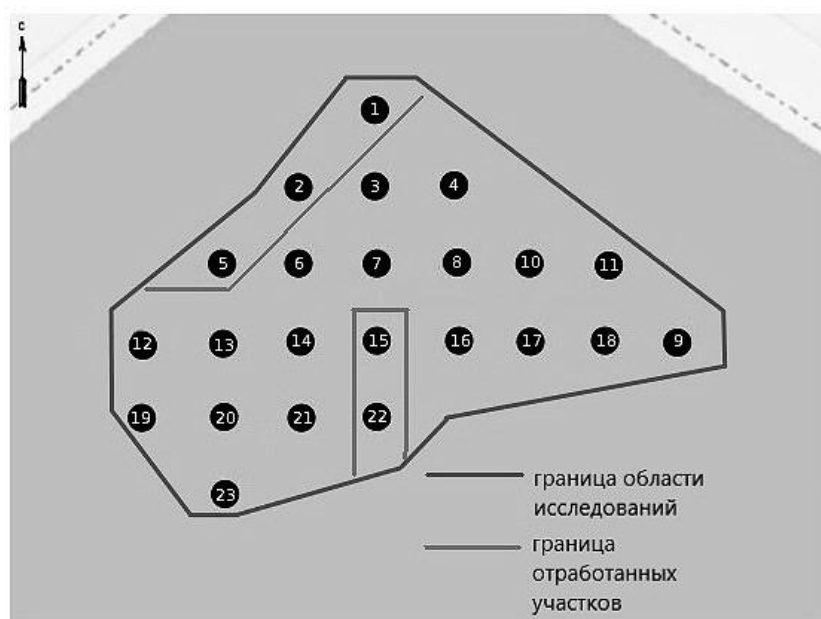


Рисунок 1. Схема расположения точек газогеохимического исследования

Figure 1. Layout of gas geochemical survey points

Забивка шпуров осуществлялась на глубину 0.8 м, что соответствует глубине последнего года размещения отходов для отработанной карты полигона. Точки 1, 2, 5, 15, 22 находятся на изолированной отработанной карте, остальные точки – на открытой рабочей карте полигона. Система дегазации отсутствует.

Результаты и дискуссия

По результатам газогеохимического исследования свалочного газа в слое отходов на глубине до 0.8 м от поверхности тела полигона было выявлено наличие метана с объемной долей от 0 до 61% и углерода диоксида с объемной долей от 0 до 11.81% (рис. 2).

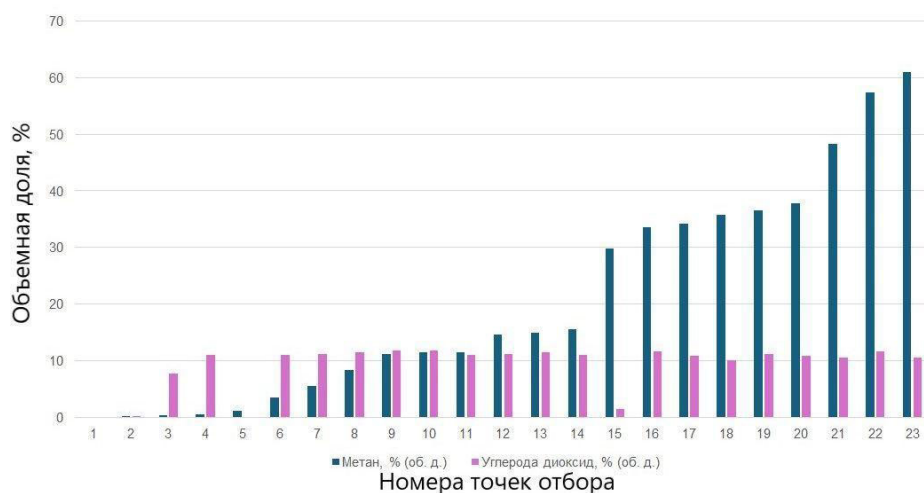


Рисунок 2. Ранжированные результаты замеров концентраций метана и диоксида углерода при газогеохимическом исследовании полигона ТКО

Figure 2. Ranked results of methane and carbon dioxide concentrations measured during the gas geochemical study of the landfill

Наиболее низкие концентрации метана отмечались в точках, расположенных в северо-западной части объекта и ближе к краям пробоотборной площадки. Связи между концентрацией метана и тем, действует ли карта или является изолированной, не выявлено.

Содержание диоксида углерода практически постоянно на уровне 10-12% от объема свалочного газа за исключением точек 1, 2, 5, 15, 22, которые находятся на отработанной карте.

Результаты газогеохимического исследования полигона были аппроксимированы с помощью сплайн-интерполяции после соответствующей очистки данных¹²⁾. Для сглаживания был применен метод сплайновой интерполяции, реализованный с помощью платформы Матлаб¹³⁾. Визуализация результатов была осуществлена с помощью метода построения тепловой карты (рис. 3).

¹²⁾ Оптимальная аппроксимация сплайнами. Электронный ресурс. URL: <https://habr.com/ru/articles/314218/> (дата обращения 24.03.2025)

¹³⁾ Spline Interpolation with Specified Endpoint Slopes. Электронный ресурс. URL: <https://nl.mathworks.com/help/matlab/ref/spline.html?requestedDomain=> (дата обращения 24.03.2025).

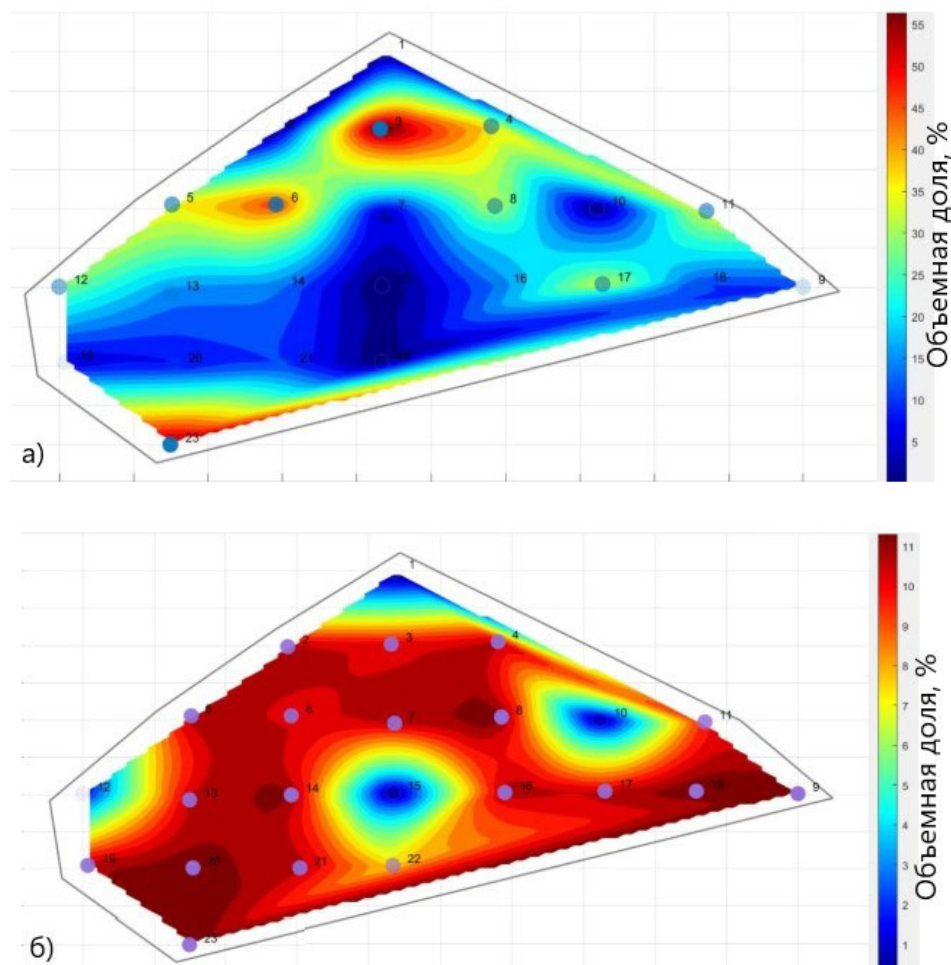


Рисунок 3. Изменение объемных долей метана (а) и диоксида углерода (б) в зоне исследования на полигоне ТКО

Figure 3. Changes in the volume shares of methane (a) and carbon dioxide (b) in the study area at the landfill

Однородность распределения CO_2 может быть связана с высокой растворимостью углекислого газа в воде, в то время как на исследуемом полигоне отходы обладают высокой влажностью и образуется много фильтрата. Вариабельность концентраций метана можно объяснить его низкой относительной плотностью по сравнению с воздухом. При наличии трещин в массе отходов концентрации метана падают, так как он поднимается вверх и перемешивается с воздухом; при отсутствии трещин концентрации метана достигают высоких значений.

График на рис. 4 демонстрирует взаимосвязь между содержанием метана и углекислого газа.

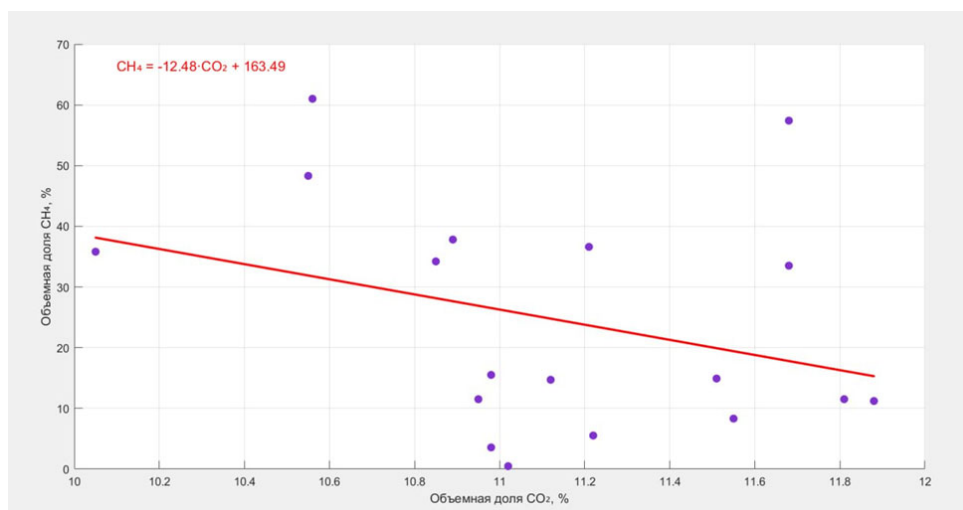


Рисунок 4. Корреляция между объемными долями метана и диоксида углерода

Figure 4. Correlation between volume shares of methane and carbon dioxide

При допущении линейной регрессии, коэффициент корреляции равен $r = -0.32$, т.е. связь можно рассматривать, как слабую отрицательную. Физически данная закономерность может быть объяснена условиями в верхнем слое тела полигона. Как углекислый газ, так и метан являются продуктами разложения органического вещества в составе ТКО. В более аэрируемых условиях формируется меньше метана, который частично доокисляется до угарного газа или углекислого газа, а в анаэробных условиях формируется больше метана. Тление отходов в теле полигона можно исключить, поскольку в этом случае концентрация углекислого газа не демонстрировала бы постоянство.

Выполненные исследования подтверждают достаточно высокие концентрации метана в верхних слоях полигона ТКО, которые варьируют в среднем от 50% об. до максимального 61% об. Однако область применения результатов проведенных газогеохимических исследований не ограничивается только определением участков с высоким метанообразованием, что важно для оценки биогазового потенциала и разработки климатических проектов на полигонах ТКО, но может быть расширена с учетом необходимости оценки валовых выбросов метана за последние годы размещения отходов на полигонах, находящихся на этапах эксплуатации, близких к завершению. Целесообразно проводить газогеохимическую оценку выбросов метана и диоксида углерода как основных компонентов свалочного газа также и на этапе рекультивации с целью обоснования срока ее завершения.

При систематическом проведении газогеохимических исследований и увеличении диапазона наблюдаемых данных построение регрессии позволит точнее моделировать взаимосвязи между метаном и диоксидом углерода в составе свалочного газа и оценивать углеродный след полигона и его биогазовый потенциал. При увеличении наблюдений появится возможность построе-

ния более точных статистических моделей и обучение моделей машинного обучения.

Заключение

При разложении свалочных масс в теле полигона протекают процессы образования метана и диоксида углерода. В верхнем слое свалочных масс на высоконагружаемом полигоне наблюдалась постоянная концентрация углекислого газа на уровне 10-12% объемных (за исключением изолированных участков полигона, где концентрация CO_2 резко падает), в то время как концентрация метана варьировала значительно, от 0 до 61% объемных. Между концентрациями углекислого газа и метана имеется слабая отрицательная корреляция, которую можно объяснить окислительными условиями в верхних слоях тела полигона.

Проведение газогеохимического обследования полигонов ТКО на этапах, близких к постэксплуатационному и на этапе рекультивации, необходимо для определения мест наибольших концентраций метана, с целью максимально эффективной дегазации объекта размещения, а также возможности использования метана для выработки энергии в рамках реализации климатического проекта.

Для полигонов мощностью выбросов более 50 тыс. т CO_2 -эквивалента целесообразно проводить газогеохимические исследования ежегодно для уточнения расчетов выбросов парниковых газов, что позволит оценить валовые выбросы метана за последние годы размещения отходов на полигонах и обоснованно рассчитать плату за негативное воздействие на окружающую среду.

Список литературы

Бажин, Н.М. (2010) *Метан в окружающей среде: аналит. обзор*, Учреждение Рос. акад. Наук, Гос. публич. науч.-техн. б-ка Сиб. отделения РАН, вып. 93, Новосибирск, ГПНТБ СО РАН, 56 с.

Балакин, В.А., Труфманова, Е.В., Старых, Ю.Ю. (2017) Газогеохимические исследования для целей рекультивации полигонов, *Твердые бытовые отходы*, № 5, с. 22-25.

Верещак, Е.В., Тихонова, И.О. (2022) Оценка возможности снижения выбросов парниковых газов от отходов, размещаемых на полигоне ТКО, *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXIII, № 1-2, с. 38-48.

Говор, И.Л. (2017) Мониторинг выбросов парниковых газов в результате обращения с отходами и стоками на территории Российской Федерации, *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*, т. XXVIII, № 1, с. 18-40.

Масликов, В.И., Чусов, А.Н., Молодцов, Д.В., Рыжакова, М.Г. (2012) Зональное определение эмиссий биогаза на полигоне ТБО для оценки геоэко-

логического состояния и обоснования управления процессами разложения отходов при рекультивации, *Научно-технические ведомости СПбГУ. Наука и образование*, № 1-2, с. 260-265.

Приходько В.Ю., Сафранов, Т.А., Шанина, Т.П. (2018) Определение эмиссии парниковых газов из мест захоронения твердых бытовых отходов, *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*, т. XXIX, № 1, с. 32-47.

Чусов, А.Н., Масликов, В.И., Молодцов Д.В., Жажков, В.В., Рябухин, О.А. (2015) Оценка зонального распределения метана на полигонах ТБО северных регионов для его использования местной энергетикой, *Инженерно-строительный журнал*, № 6, с. 44-55.

Слюсарь, Н.Н. (2019) *Теория, методы и технологии обеспечения геоэкологической безопасности полигонов захоронения твердых коммунальных отходов на постэксплуатационном этапе*, Автореферат дисс. д-ра техн. наук, Пермь, ПНИПУ, 32 с.

Слюсарь, Н.Н. (2013) Развитие системы строительства и эксплуатации объектов захоронения ТБО, *Экология и промышленность России*, 10, с. 31-36.

ИТС НДТ 17-2021 (2021) *Размещение отходов производства и потребления*, М., Стандартинформ, 171 с.

ИТС НДТ 22.1-2021 (2021) *Общие принципы производственного экологического контроля и его метрологического обеспечения*, М., Стандартинформ, 172 с.

Heilig, G.H. (1994) The Greenhouse Gas Methane (CH₄): Sources and Sinks, the Impact of Population Growth, Possible Interventions, *Population and Environment: A Journal of Interdisciplinary Studies*, vol. 16, no. 2, bd. 27, pp. 109-137.

Munawarl, E., Emalyal, N., Puspa, Hayatil A., Yunardil, Hakim L. (2019) Analysis of the potential of landfill gas as an alternative for electrical energy source, *MATEC Web of Conferences*, vol. 268, 06004, pp 1-6.

Lair, A., Mansuy, M., Romand, C., Oberti, O. (2024) Enhancing landfill efficiency to drive greenhouse gas reduction: A comprehensive study on best practices and policy recommendations, *Waste Management & Research*, vol. 42 (10), pp. 889-900.

Zheng, G., Martinelli, G., Wang, Y. et al. (2022) Notes for a History of Gas Geochemistry, *Journal of Earth Science*, vol. 33 (6), pp. 1614-1623.

References

Bazhin, N.M. (2010) Metan v okruzhayushchey srede: analiticheskiy obzor [Methane in the environment: analytical review], *Uchrezhdeniye Rossiyskoy akademii nauk GPNTB SO RAN* [Institution of the Russian Academy of Sciences State Public Scientific and Technical Library of the Siberian Branch of the Russian

Academy of Sciences], issue 93, State Public Scientific and Technical Library of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia, 56 p.

Balakin, V.A., Trufmanova, E.V., Sarykh, Yu.Yu. (2017) Gazogeo-khimicheskiye issledovaniya dlya tseley rekul'tivatsii poligonov [Gas geochemical studies for the purposes of landfill reclamation], *Tverdyye bytovyye otkhody* [Municipal Solid Waste], no. 5, pp. 22-25.

Vereshchak, E.V., Tikhonova, I.O. (2022) Otsenka vozmozhnostey snizheniya vybrosov parnikovykh gazov iz otkhodov, razmeshchayemykh na poligonakh TKO [Assessment of the possibility of reducing greenhouse gas emissions from waste placed at a solid municipal waste landfill], *Ekologicheskii monitoring i modelirovaniye ekosistem*, vol. XXXIII, no. 1-2, pp. 38-48.

Govor, I.L. (2017) Monitoring vybrosov parnikovykh gazov v rezul'tate obrashcheniya s otkhodami i stokami na territorii Rossiyskoy Federatsii [Monitoring of greenhouse gas emissions from waste and wastewater management in the Russian Federation], *Problemy ekologicheskogo Diptikha i modelirovaniya ekosistem*, vol. XXVIII, no. 1, pp. 18-40.

Maslikov, V.I., Chusov, A.N., Molodtsov, D.V., Ryzhakova, M.G. (2012) Zonal'noye opredeleniye vklyucheniya biogaza na poligone TBO dlya otsenki geoekologicheskogo sostoyaniya i obosnovaniya upravleniya protsessami razlozheniya otkhodov pri rekul'tivatsii [Zonal determination of biogas emissions at a solid waste landfill to assess the geoecological state and justify the management of waste decomposition processes during reclamation], *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbGU. Nauka i obrazovaniye* [Scientific and Technical Bulletin of St. Petersburg State University. Science and Education], no. 1-2, pp. 260-265.

Prikhodko V.Yu., Safranov, T.A., Shanina, T.P. (2018) Opredeleniye vybrosov parnikovykh gazov s poligonov tverdykh kommunal'nykh otkhodov [Determination of greenhouse gas emissions from solid municipal waste disposal sites], *Problemy monitoringa okruzhayushchey sredy i modelirovaniya ekosistem*, vol. XXIX, no. 1, pp. 32-47.

Chusov, A.N., Maslikov, V.I., Molodtsov, D.V., Zhazhkov, V.V., Ryabukhin, O.A. (2015) Otsenka zonal'nogo raspredeleniya metana na poligonakh TBO severnykh regionov dlya yego ispol'zovaniya mestnoy energetikoy [Assessment of the zonal distribution of methane at solid municipal waste landfills in the northern regions for its use by local energy], *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal*, no. 6, pp. 44-55.

Slyusar, N.N. (2019) *Teoriya, metody i tekhnologii obespecheniya geoekologicheskoy bezopasnosti poligonov zakhoroneniya tyazhelykh kommunal'nykh otkhodov na postekspluatatsionnom etape* [Theory, methods and technologies for ensuring geoecological safety of solid municipal waste landfills at the post-operational stage], Extended abstract of Doctor's thesis, PNRPU, Perm, Russia, 32 p.

Slyusar, N.N. (2013) Razvitiye sistemy stroitel'stva i ekspluatatsii ob'yektov zakhoroneniya TBO [Development of the system of construction and operation of solid municipal waste disposal facilities], *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, vol. 10, pp. 31-36.

ITS NDT 17-2021 (2021) *Razmeshcheniye otkhodov proizvodstva i potrebleniya* [Placement of production and consumption waste], Standartinform, Moscow, Russia, 171 p.

ITS NDT 22.1-2021 (2021) *Obshchiye printsipy proizvodstvenno-ekologicheskogo kontrolya i yego metrologicheskogo obespecheniya* [General principles of industrial environmental control and its metrological support], Standartinform, Moscow, Russia, 172 p.

Heilig, G.H. (1994) The Greenhouse Gas Methane (CH₄): Sources and Sinks, the Impact of Population Growth, Possible Interventions, *Population and Environment: A Journal of Interdisciplinary Studies*, vol. 16, no. 2, bd. 27, pp. 109-137.

Munawarl, E., Emalyal, N., Puspa, Hayatil A., Yunardil, Hakim L. (2019) Analysis of the potential of landfill gas as an alternative for electrical energy source, *MATEC Web of Conferences*, vol. 268, 06004, pp 1-6.

Lair, A., Mansuy, M., Romand, C., Oberti, O. (2024) Enhancing landfill efficiency to drive greenhouse gas reduction: A comprehensive study on best practices and policy recommendations, *Waste Management & Research*, vol. 42 (10), pp. 889-900.

Zheng, G., Martinelli, G., Wang, Y. et al. (2022) Notes for a History of Gas Geochemistry, *Journal of Earth Science*, vol. 33 (6), pp. 1614-1623.

Статья поступила в редакцию (Received): 26.03.2022.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 21.04.2021.

Для цитирования / For citation:

Забелина, А.В., Агаханянц, П.Ф., Сергиенко, О.И., Богданов, Н.С. (2025) Газогеохимическое исследование выбросов свалочного газа в верхних слоях полигона ТКО, *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXVI, № 1-2, с. 32-45, doi:10.24412/2782-3237-2025-1-2-32-45.

Zabelina, A.V., Agahanyants, P.F., Sergienko, O.I., Bogdanov, N.S. (2025) Gas-geochemical survey of landfill gas emissions in the upper layers of the MSW landfill, *Environmental Monitoring and Ecosystem Modelling*, vol. XXXVI, no. 1-2, pp. 32-45, doi:10.24412/2782-3237-2025-1-2-32-45.