

УДК 551.510.42

## ЭМИССИЯ МЕТАНА НА КРУПНОМ ПОЛИГОНЕ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ “НОВОСЁЛКИ” (САНКТ-ПЕТЕРБУРГ) ПО ДАННЫМ МОБИЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИЗЕМНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ

© 2025 г. Д. В. Ионов<sup>1,\*</sup>, М. В. Макарова<sup>1</sup>, С. Ч. Фока<sup>1</sup>, И. М. Исаев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет, Санкт-Петербург, Россия

\*e-mail: d.ionov@spbu.ru

Поступила в редакцию 13.03.2025 г.

После доработки 13.08.2025 г.

Принята к публикации 26.08.2025 г.

Полигоны захоронения твердых бытовых отходов являются существенными источниками метана, относящегося к важнейшим парниковым газам. Ввиду непрерывного образования значительных объемов коммунальных отходов, в первую очередь, связанных с жизнедеятельностью населения мегаполисов, оценки эмиссии метана с территории крупных городских полигонов сохраняют актуальность. В настоящей работе эта задача решалась на основе сопряжения результатов прямых измерений концентрации метана с модельными расчетами. Представлены результаты мобильных измерений, выполненных вблизи полигона твердых бытовых отходов “Новосёлки” (Санкт-Петербург) в апреле 2021 и 2024 гг. Данные измерений обнаруживают локальные максимумы концентрации метана на участках маршрута с подветренной стороны полигона. Максимальные значения, регистрируемые с борта автомобиля в районе наблюдений, достигали ~9 ppmv, что существенно превышает фоновую приземную концентрацию метана, составляющую ~2 ppmv. Средние ночные и утренние пиковые концентрации (5.0 ppmv) заметно выше дневных и вечерних (2.3 ppmv). Численное моделирование воздушного распространения свалочного метана, выполненное с помощью дисперсионной модели с учетом характеристик стабильности атмосферы в период наблюдений, продемонстрировало качественное согласие расчетных приземных концентраций с экспериментальными данными. На основе сопоставления результатов измерений с данными моделирования шлейфа воздушного загрязнения с территории свалки, получены оценки эмиссии метана, составляющие  $640 \pm 190$  кг/ч в апреле 2021 г. и  $200 \pm 50$  кг/ч в апреле 2024 г. Наблюдаемое существенное снижение эмиссии с 2021 по 2024 г. согласуется с официальной информацией о закрытии мусорного полигона в 2018 г. и начале работ по укрытию и рекультивации полигона, продолжающихся до настоящего времени. Эмиссия с территории полигона твердых бытовых отходов “Новосёлки” может составлять ~7% суммарной антропогенной эмиссии метана с территории Санкт-Петербурга.

**Ключевые слова:** парниковые газы, метан, урбоэкосистемы, полигон твердых бытовых отходов, рекультивация свалок, моделирование атмосферного транспорта

DOI: 10.7868/S2658697525050074

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Метан является второй по вкладу в глобальный парниковый эффект атмосферной газовой составляющей (Семенов и др., 2018; Vadg et al., 1991; Reay and Smith, 2010). Рост его современного содержания в атмосфере во многом обусловлен антропогенной активностью. В частности будучи продуктом деятельности анаэробных

микроорганизмов, метан интенсивно образуется в местах захоронения твердых бытовых отходов (ТБО). Микробное разложение захороненного на полигонах ТБО органического вещества сопровождается образованием так называемого биогаза, более чем на половину состоящего из метана (Bingemer and Crutzen, 1987). По некоторым оценкам, глобальные годовые выбросы

метана с полигонов ТБО достигают десятков млн т и вместе с выбросами при утилизации прочих отходов (включая сточные воды) составляют ~12% всей годовой антропогенной эмиссии или ~7% суммарного поступления метана в атмосферу (Saunio et al., 2020). В крупных мегаполисах вклад бытовых свалок может достигать половины общегородских выбросов метана (Maasackers et al., 2022).

В России именно захоронение на полигонах является основным способом утилизации ТБО, что в отсутствие системы раздельного сбора мусора и его предварительной механической обработки несет угрозу окружающей среде и здоровью населения (Шилкина, 2020). Объем ежегодной эмиссии метана на полигонах и свалках ТБО Российской Федерации оценивается в ~1.1 млрд м<sup>3</sup> (~800 тыс. т) (Масликов, Федоров, 2006). Поскольку для полного разложения органического вещества, содержащегося в бытовых отходах, требуются десятилетия, такие полигоны в течение длительного времени остаются источниками метана. По некоторым данным, существующие неопределенности в оценках продолжительности этих процессов могут приводить к кратному (до 200%) занижению выбросов метана для отдельных свалок в расчетных инвентаризациях (Wang et al., 2024). Объективный мониторинг эмиссии метана осложняется ее высокой пространственной неоднородностью по поверхности полигонов, что может приводить к существенным ошибкам в оценках суммарного потока метана, получаемых на основе прямых измерений камерным методом (Rowe et al., 2011). Более репрезентативными в этом смысле являются микрометеорологические наблюдения методом измерений турбулентных пульсаций (Глаголев и др., 2021; Baldocchi, 2003; Morin, 2018). Однако ввиду высокой стоимости необходимого оборудования, для оценок эмиссии метана с территорий полигонов ТБО используется также микрометеорологический метод с привлечением обратного моделирования (Глаголев, 2010; Зинченко и др., 2003; Терентьева и др., 2017).

На северо-западной окраине Санкт-Петербурга, вблизи пос. Левашово расположен крупный полигон ТБО “Новосёлки”, начавший функционировать в 1972 г. и предназначенный для размещения преимущественно твердых коммунальных и, частично, производственных отходов. В 2017 г. руководство города приняло решение о прекращении приема мусора на полигон и начале работ по рекультивации свалки. В частности планировалось построить на полигоне станцию дегазации, призванную вдвое сократить выбросы, образующиеся в результате разложения органических отходов, а также

уменьшить высоту свалки на 10 м. Кроме того, за счет сжигания газа предполагалось обеспечить производство электроэнергии 48 млн кВт в год. Однако в дальнейшем строительство станции было приостановлено, а начиная с 2018 г. полигон начал принимать твердые отходы в рамках “обваловки” образовавшегося террикона. По официальной информации, используемые для этого отходы, представляют собой строительный мусор, либо переработанный компост и не представляют опасности. Вместе с тем позднее в 2020 г. были вскрыты факты<sup>1</sup> размещения на полигоне отходов, вывезенных с площадки завода по механизированной переработке бытовых отходов ГУП “МПБО-2” в Янино (Всеволожский р-он Ленинградской обл, восточная окраина Санкт-Петербурга). Согласно планам администрации города, рекультивация полигона “Новосёлки” и сопряженное с ней размещение укрывных переработанных отходов должно было завершиться к осени 2022 г., однако позднее этот срок был продлен до декабря 2023 г.<sup>2</sup> Общая площадь полигона в настоящее время составляет ~80 га.

В апреле 2021 и 2024 гг. осуществлялись специализированные измерительные кампании по исследованию потоков парниковых газов (CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub>) с территории Санкт-Петербурга, основанные на данных прямых измерений приземных концентраций, выполняемых с борта движущегося автомобиля (Макарова и др., 2024). Измерения проводились по замкнутому маршруту кольцевой автодороги (КАД), огибающему большую часть городских источников антропогенной эмиссии. Эти объезды были нацелены на оценку интегральных выбросов исследуемых газов с территории города методом баланса масс. Предварительный результат анализа данных измерений выявил устойчивый максимум приземной концентрации метана, заметно превышающий ее средний уровень на всем протяжении КАД и локализованный вблизи одного из крупнейших городских полигонов ТБО. Целью настоящей работы является идентификация источника эмиссии метана, ответственного за наблюдаемые экстремальные значения приземной концентрации и оценка его мощности на основе сопоставления результатов измерений с данными численного моделирования.

<sup>1</sup> Забытое слово “Новоселки”. Легендарный полигон отходов хоронят под отходами. <https://www.fontanka.ru/2020/09/01/69451995> (дата обращения 03.02.2025).

<sup>2</sup> Контракт на рекультивацию полигона “Новоселки” продлевают. Ссылаются на санкции. <https://www.fontanka.ru/2022/09/15/71657117> (дата обращения 03.02.2025).

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для измерений концентраций метана использовался газоанализатор Los Gatos Research (LGR/ABB) GGA-24EP, принцип работы которого основан на методе внеосевой интегральной внутрирезонаторной лазерной спектроскопии (Baer et al., 2002). Прибор обеспечивает точность регистрации концентраций основных парниковых газов ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и  $\text{H}_2\text{O}$ ) в соответствии с требованиями Всемирной Метеорологической Организации (ВМО). В частности погрешность измерений концентрации метана (стандартная ошибка среднего), осредненных за 20 с, составляет  $\sim 0.6$  ppbv. Высокая точность измерений обеспечивается регулярной калибровкой газоанализатора относительно рабочего стандарта (газовой смеси  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ ), подготовленного ФГБУ Главная геофизическая обсерватория имени А.И. Воейкова (Санкт-Петербург) с помощью первичного лабораторного стандарта из центральной калибровочной лаборатории ВМО. Использовались калибровочные смеси с концентрацией метана  $1958 \pm 4$  ppbv,  $2044 \pm 4$  ppbv и  $3413 \pm 4$  ppbv. Важной особенностью газоанализатора GGA-24EP является устойчивость к вибрациям, что позволяет успешно использовать его при измерениях с различных движущихся платформ. В настоящей работе GGA-24EP устанавливался в салоне легкового автомобиля. Конец воздухозаборной трубки газоанализатора монтировался на крыше, на высоте  $\sim 1.7$  м над дорожным полотном. Электропитание измерительной аппаратуры осуществлялось внешними аккумуляторными батареями, подключаемыми посредством инвертора 12V $\rightarrow$ 220V. Мобильные измерения приземных концентраций  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  на маршруте КАД выполнялись ежедневно с 15 по 18 апреля 2021 г. и с 17 по 19 апреля 2024 г.; всего было выполнено 11 круговых объездов. Как правило, объезды проводились дважды в сутки — ночью-утром и днем-вечером. Протяженность замкнутого кольцевого маршрута составляет  $\sim 140$  км, а среднее время его проезда  $\sim 2$  ч. Согласно данным наблюдений одной из метеорологической станций, расположенной в центральной части города (синоптический индекс 26063), в дни и сроки мобильных измерений преобладал легкий ветер (1–3 м/с) северо-восточного направления.

Для оценки потенциального вклада эмиссии мусорного полигона в пространственную вариацию приземной концентрации  $\text{CH}_4$ , наблюдаемую в данных мобильных измерений, было проведено моделирование распространения соответствующего воздушного загрязнения с использованием дисперсионной модели HYSPLIT [HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated

Trajectories, (Stein et al., 2015)] в оффлайн версии. Ранее HYSPLIT успешно использовалась авторами для оценок суммарной городской эмиссии окислов азота,  $\text{NO}_x$  (Ionov et al., 2022) и углекислого газа,  $\text{CO}_2$  (Ionov et al., 2021), а также эмиссий  $\text{NO}_x$  отдельными ТЭЦ Санкт-Петербурга (Ионов, Макарова, 2024). Расчетная область модели имеет протяженность  $0.2^\circ$  широты и  $0.5^\circ$  долготы с горизонтальным размером ячейки  $0.01^\circ \times 0.02^\circ$  (широта  $\times$  долгота) или  $\sim 1$  км  $\times$  1 км. Априорная эмиссия метана была задана 10 эквидистантными и равнозначными источниками, равномерно распределенными по территории полигона на высотах от 10 м до 50 м над ур. м., что соответствует локальному рельефу свалки. Трехмерная схема террикона ТБО представлена на рис. 1. Цифровая модель рельефа (DEM, Digital Elevation Model) сформирована средствами процедур Gizmo в программной среде IGOR Pro, WaveMetrics, Inc.<sup>3</sup> на основе альтиметрических данных ресурса Google Earth<sup>4</sup>.

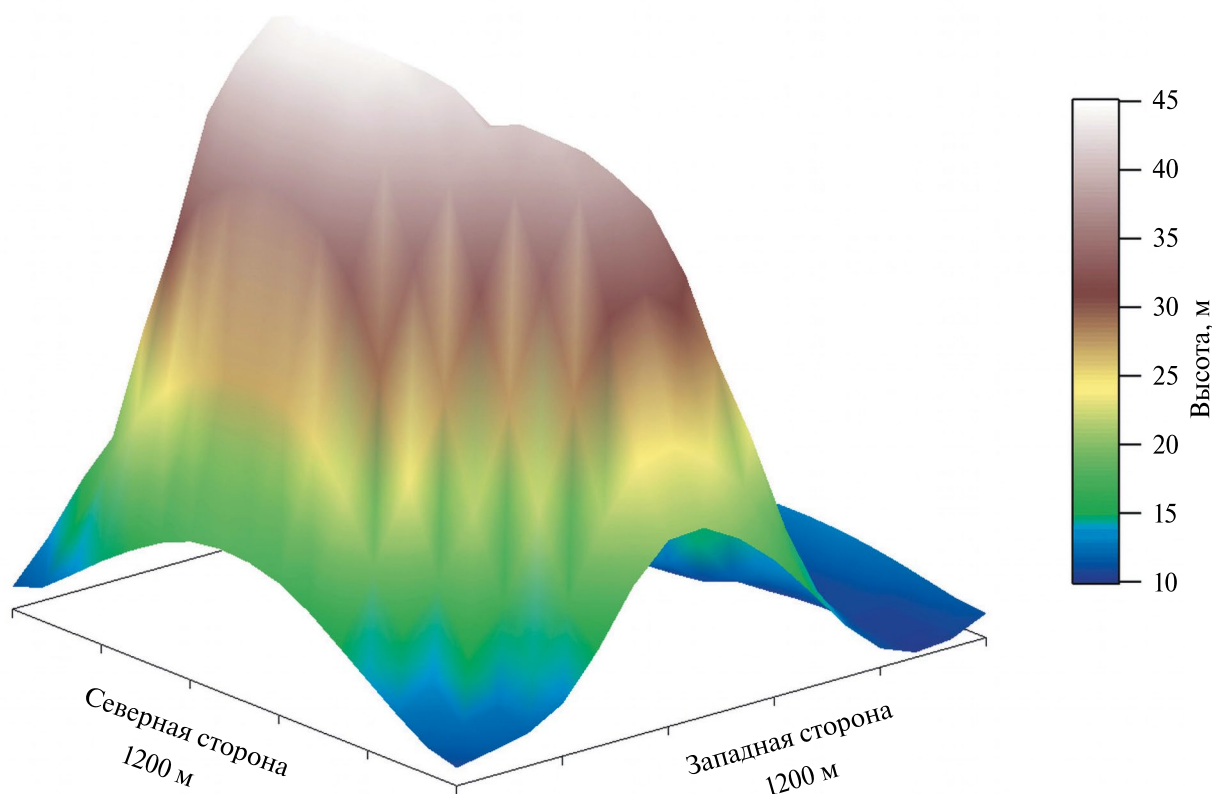
Суммарная площадь модельных источников задана равной общей площади полигона ( $\sim 8 \times 10^5$  м<sup>2</sup>), а их суммарная интенсивность  $3.75 \times 10^{28}$  молекул/ч. Этому уровню эмиссии, выбранному в качестве первого приближения, соответствует удельный поток метана  $F_0 = 1.25$  г/(м<sup>2</sup>·ч), что достаточно близко к средней оценке, полученной для потока  $\text{CH}_4$  с поверхности полигона “Новоселки” в 2001 г.,  $\sim 1$  г/(м<sup>2</sup>·ч) (Зинченко и др., 2003). С помощью дисперсионного блока модели, сконфигурированной для рассматриваемой территории, выполнялись расчеты поля концентрации  $\text{CH}_4$  в приземном слое атмосферы (0–45 м) с вертикальной сеткой из 10-ти 5-метровых слоев, для учета возможной неоднородности эмиссии метана по высоте. Временное разрешение модельных расчетов полей концентрации  $\text{CH}_4$  — 15 мин.

Тестовые модельные расчеты полей концентрации метана в окрестностях полигона, выполненные с использованием глобальных данных GFS (Global Forecast System)<sup>5</sup> в качестве входной метеорологической информации, выявили значительные расхождения между результатами моделирования и экспериментальными данными. Расчетные концентрации оказались на порядок ниже измеренных на маршруте, причем для ночных и утренних измерений расхождения существенно возраста-

<sup>3</sup> IGOR Pro, WaveMetrics, Inc. <http://www.wavemetrics.com> (дата обращения 03.02.2025).

<sup>4</sup> Google Earth. <http://earth.google.com> (дата обращения 03.02.2025).

<sup>5</sup> NCEP Global Forecast System (GFS) quarter-degree archive (June 2019 — present). <https://www.ready.noaa.gov/data/archives/gfs0p25> (дата обращения 03.02.2025).



**Рис. 1.** Трехмерная схема полигона ТБО “Новоселки”, построенная на основе альтиметрических данных ресурса Google Earth (<http://earth.google.com>) средствами процедур Gizmo в программной среде IGOR Pro, WaveMetrics, Inc. (<http://www.wavemetrics.com>).

ли, по сравнению с дневными и вечерними. Для выявления причин наблюдаемого занижения концентрации метана моделью была выполнена серия дополнительных тестовых расчетов, с варьируемыми параметрами HYSPLIT и входной метеорологической информации. В частности варьировался способ описания процесса рассеяния примеси (в форме отдельных частиц или их распределения) и его параметризация по вертикали/горизонтали (например, в форме гауссовой или прямоугольной функции распределения), общее количество эмитируемых частиц/распределений и их максимальное число в модели, величина лагранжева вертикального временного масштаба турбулентности для стабильных и нестабильных состояний атмосферы, методы расчета вертикального/горизонтального турбулентных потоков, методы определения стабильности в пограничном слое и расчета вертикального профиля перемешивания в нем, а также способы расчета высоты пограничного слоя. Тесты показали, что основным фактором, определяющим уровень рассчитанных в шлейфе полигона концентраций метана, являются входные данные о направлении и скорости приземного ветра. Согласно различным источникам

глобальных метеорологических данных — GFS, GDAS<sup>6</sup>, ERA5<sup>7</sup>, используемых в качестве входных для расчетов HYSPLIT, скорость приземного ветра в дни и сроки мобильных измерений составляла  $4 \div 6$  м/с. При этом, по данным прямых метеорологических наблюдений на ряде городских станций<sup>8</sup>, регистрируемая в эти дни скорость приземного ветра была существенно ниже, 1–3 м/с. Истинное направление приземного ветра в районе мобильных измерений возможно также отличалось от представленного в глобальных метеорологических данных (расчетное направление смещения шлейфа  $\text{CH}_4$  от места расположения свалки расходилось с ожидаемым из данных мобильных измерений, особенно в период ночных и утренних наблюдений).

<sup>6</sup> NCEP Global Data Assimilation System (GDAS) one-degree archive (Dec 2004 — present). <https://www.ready.noaa.gov/data/archives/gdas1> (дата обращения 03.02.2025).

<sup>7</sup> European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) Reanalysis v5 (ERA5). <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5> (дата обращения 03.02.2025).

<sup>8</sup> [http://rp5.ru/Архив\\_погоды\\_в\\_Санкт-Петербурге](http://rp5.ru/Архив_погоды_в_Санкт-Петербурге) (дата обращения 03.02.2025).

Чтобы согласовать входные данные о направлении и скорости ветра с результатами измерений, использовалась функция HYSPLIT по формированию пользовательских полей метеорологических данных, “Create Single Station Meteorology File”. В этом случае необходимые данные генерируются на основе пользовательской информации о направлении и скорости приземного ветра, высоты пограничного слоя и категории стабильности атмосферы (см. ниже), представленной для одной географической точки и нескольких временных сроков. В настоящей работе в качестве такой точки использованы координаты условного центра полигона ТБО ( $60.072^\circ$  с.ш.,  $30.163^\circ$  в.д.). Высота пограничного слоя задана по глобальным данным GFS. Категории стабильности атмосферы, согласно классификации (Pasquill, 1961), определялись исходя из информации о приземном вертикальном градиенте температуры, используя эмпирические градации, представленные в (Woodward, 1998). Вертикальный профиль температуры также заимствовался из данных GFS. Искомый класс стабильности характеризуется числом от 1 (нестабильно) до 7 (стабильно); число 4 соответствует нейтральной атмосфере. В качестве направления приземного ветра в начальном приближении использовался азимут из центра полигона на точку максимальной концентрации  $\text{CH}_4$ , регистрируемой на трассе; затем этот угол корректировался исходя из начального расчета HYSPLIT так, чтобы рассчитанный максимум территориально совпадал с измеренным.

В качестве скорости приземного ветра использовались архивные данные метеорологических измерений на ближайшей городской станции<sup>8</sup>. Все указанные выше параметры были заданы для 8-ми сроков каждого дня мобильных измерений (00:00, 03:00, 06:00, 09:00, 12:00, 15:00, 18:00 и 21:00).

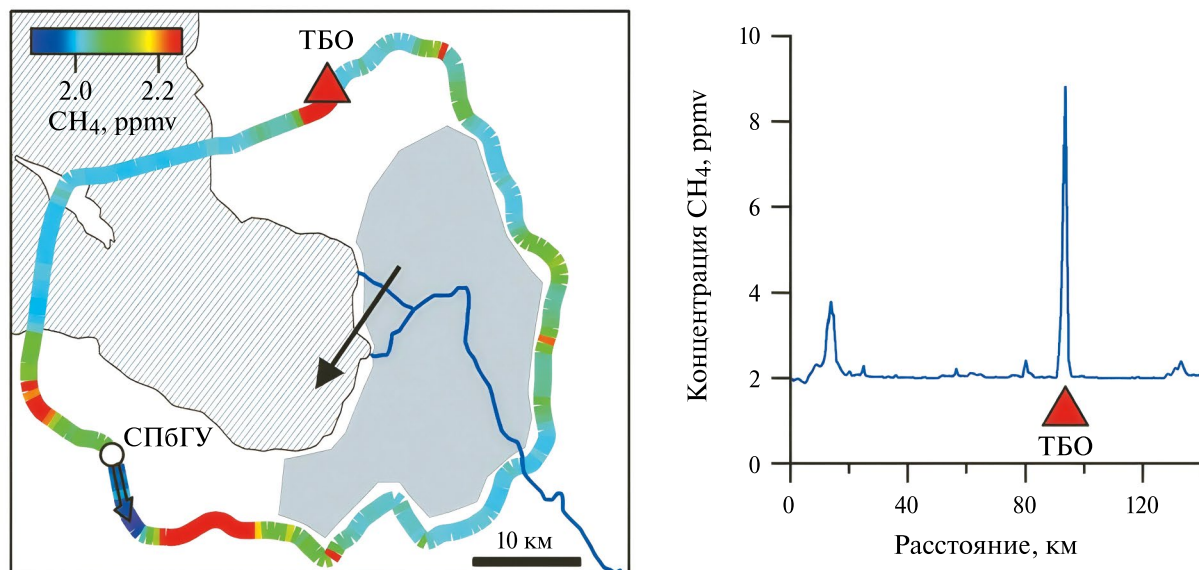
В табл. 1 приведены значения используемых параметров на ближайшие ко времени измерений сроки: 03:00 и 15:00 в 2021 г. и 00:00 и 12:00 в 2024 г. (время UTC). На основе этой информации средствами HYSPLIT формировался файл ежечасных метеоданных в пространственном домене  $250 \times 250$  км с горизонтальным разрешением  $10 \times 10$  км, центрированный относительно полигона. Вертикальная сетка генерируемых метеоданных представлена 15 уровнями на высотах от 50 до 5000 м.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Пример кольцевого маршрута измерений с распределением зарегистрированных концентраций метана утром 18 апреля 2021 г. представлен на рис. 2. Каждый объезд начинался из точки расположения наблюдательной станции СПбГУ в Петергофе (юго-западная окраина города, обозначена на карте как “СПбГУ”), с движением по КАД на восток, огибая большую часть городской застройки с востока и севера, пересекая затем на западе по дамбе акваторию Невской губы Финского залива с севера на юг, возвращаясь к началу маршрута. В целом про-

**Таблица 1.** Основные параметры, использованные для формирования входных метеорологических данных HYSPLIT в сроки мобильных измерений

Дата, время (UTC)	Направление ветра, градусы	Скорость ветра, м/с	Высота пограничного слоя, м	Категория стабильности атмосферы
15.04.2021 15:00	34	1	919	4
16.04.2021 03:00	80	1	332	5
17.04.2021 03:00	76	1	233	5
17.04.2021 15:00	69	2	675	5
18.04.2021 03:00	46	1	195	5
18.04.2021 15:00	69	2	950	4
17.04.2024 00:00	48	1	450	4
17.04.2024 12:00	35	2	1044	4
18.04.2024 00:00	40	1	546	4
18.04.2024 12:00	90	1	1231	2
19.04.2024 00:00	51	1	621	5



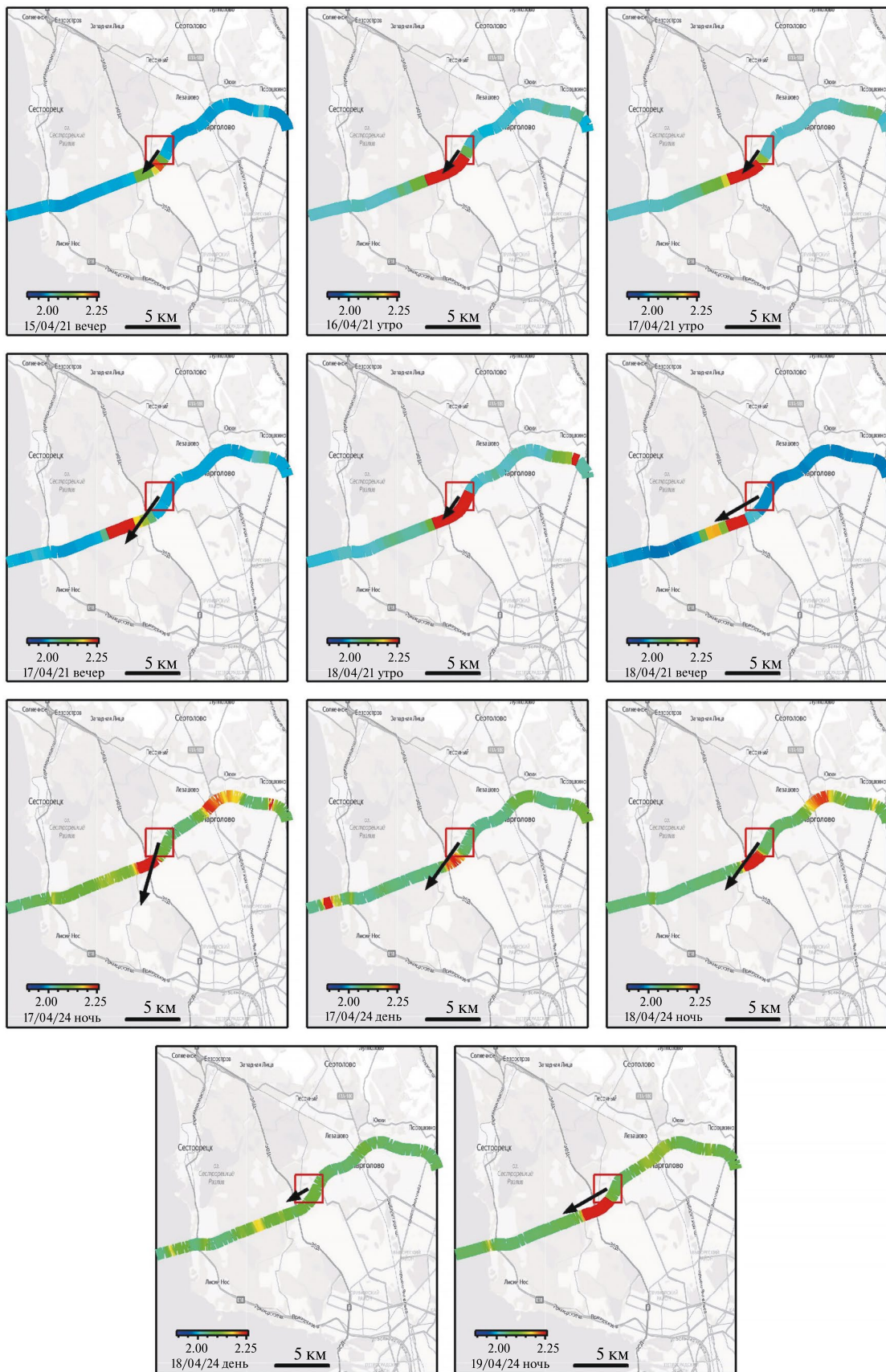
**Рис. 2.** Карта маршрута кольцевых мобильных измерений вокруг Санкт-Петербурга утром 18 апреля 2021 г. (слева). *Примечания.* Цветовая палитра отображает измеренную концентрацию метана в точках маршрута (от 1.90 до 2.25 ppmv). Обозначены точка начала и завершения маршрута (“СПБГУ”) с указанием направления движения, полигон захоронения отходов (“ТБО”), направление приземного ветра на срок наблюдений 06:00 (черная стрелка). Справа представлено распределение концентрации  $\text{CH}_4$  по всей протяженности маршрута (~0–140 км). На графике отмечена ближайшая к полигону точка маршрута (“ТБО”, ~95 км).

странственное распределение концентрации метана, наблюдаемое по данным мобильных измерений 18 апреля 2021 г., согласуется с направлением приземного северо-восточного ветра (1 м/с) по ближайшему ко времени измерений сроку метеонаблюдений (6:00). Участки повышенной приземной концентрации метана (до ~4 ppmv), регистрируемые в юго-западной части КАД, связаны, очевидно, с выносом воздушного загрязнения городскими источниками (см. рис. 2). Однако существенно более высокие концентрации метана, до ~9 ppmv, обнаруживаются в северной части (~95-й км маршрута) и локализуются вблизи крупного полигона ТБО “Новосёлки” с подветренной от него стороны. За редким исключением, отмеченные локальные максимумы были обнаружены по данным всех объездов.

Участки маршрутов мобильных измерений, выполненных вблизи полигона ТБО в апреле 2021 и в апреле 2024 г., представлены на рис. 3. Движение по маршрутам осуществлялось с востока на запад, по направлению к берегу Финского залива (расположение мусорного полигона “Новосёлки” отмечено на карте красным прямоугольником). На большей части маршрутов по данным измерений 2024 г. наблюдаются несколько более высокие приземные концентрации по сравнению с результатами измерений 2021 г. (в среднем на ~50 ppbv). За одним исключением (днем 18 апреля 2024 г.), все серии измерений демонстрируют резкое локальное

возрастание приземной концентрации метана с подветренной стороны, к юго-западу от полигона “Новосёлки”, на удалении ~1 ÷ 4 км. В отличие от 2021 г., в результатах измерений апреля 2024 г. наряду с основным максимумом приземной концентрации  $\text{CH}_4$  вблизи ТБО, регистрировалось также несколько дополнительных локальных максимумов на других участках маршрута (рис. 3). Следует отметить также, что погодные условия в дни мобильных измерений 2024 г. характеризовались периодическими осадками (морось, дождь, дождь со снегом, снег), в то время как в дни измерений 2021 г. осадков не наблюдалось.

Как можно видеть из табл. 1, в рассматриваемые сроки скорость приземного ветра составляла 1–2 м/с с преобладающим направлением восток-северо-восток, и нейтральным (класс 4) либо слабо стабильным (класс 5) состоянием атмосферы. Исключение составляет 12:00 18 апреля 2024 г., когда атмосфера была умеренно нестабильна (класс 2), что проявилось также в максимальной высоте пограничного слоя (1231 м). В результатах мобильных измерений, выполнявшихся в этот срок, отсутствует характерный пик, связанный с эмиссией метана с территории полигона, что объясняется интенсивным рассеянием (вертикальным перемешиванием) соответствующего воздушного загрязнения; кроме того, восточный ветер (см. табл. 1) приводит к смещению шлейфа загрязнения в западном направлении от полигона, вне маршрута измерений.



**Рис. 3.** Карты маршрутов мобильных измерений приземной концентрации  $\text{CH}_4$  вблизи полигона ТБО “Новосёлки” в апреле 2021 и в апреле 2024 гг.

*Примечания.* Цветовая палитра отображает измеренную концентрацию  $\text{CH}_4$  в точках маршрута ( $1.90 \div 2.25$  ppmv). Красным прямоугольником обозначено расположение центральной части полигона. Черные стрелки обозначают направление приземного ветра по данным метеонаблюдений в центральной части Санкт-Петербурга.

На рис. 4 представлены карты пространственного распределения приземной концентрации метана в окрестностях полигона ТБО, рассчитанного с помощью модели HYSPLIT для периодов утренних и вечерних мобильных измерений в 2021 и 2024 гг. Фоновая приземная концентрация метана была задана на уровне 2 ppmv в 2021 г. и 2.05 ppmv в 2024 г. Результаты расчетов были линейно масштабированы к данным мобильных измерений (см. ниже). В целом участки маршрута с зарегистрированными в измерениях пиковыми концентрациями  $\text{CH}_4$  совпадают с рассчитанным положением шлейфа полигона ТБО. По данным моделирования, в ночные и утренние часы поле метана характеризуется существенно более высокими значениями концентрации большей пространственной протяженности, чем в дневное и вечернее время.

## ОБСУЖДЕНИЕ

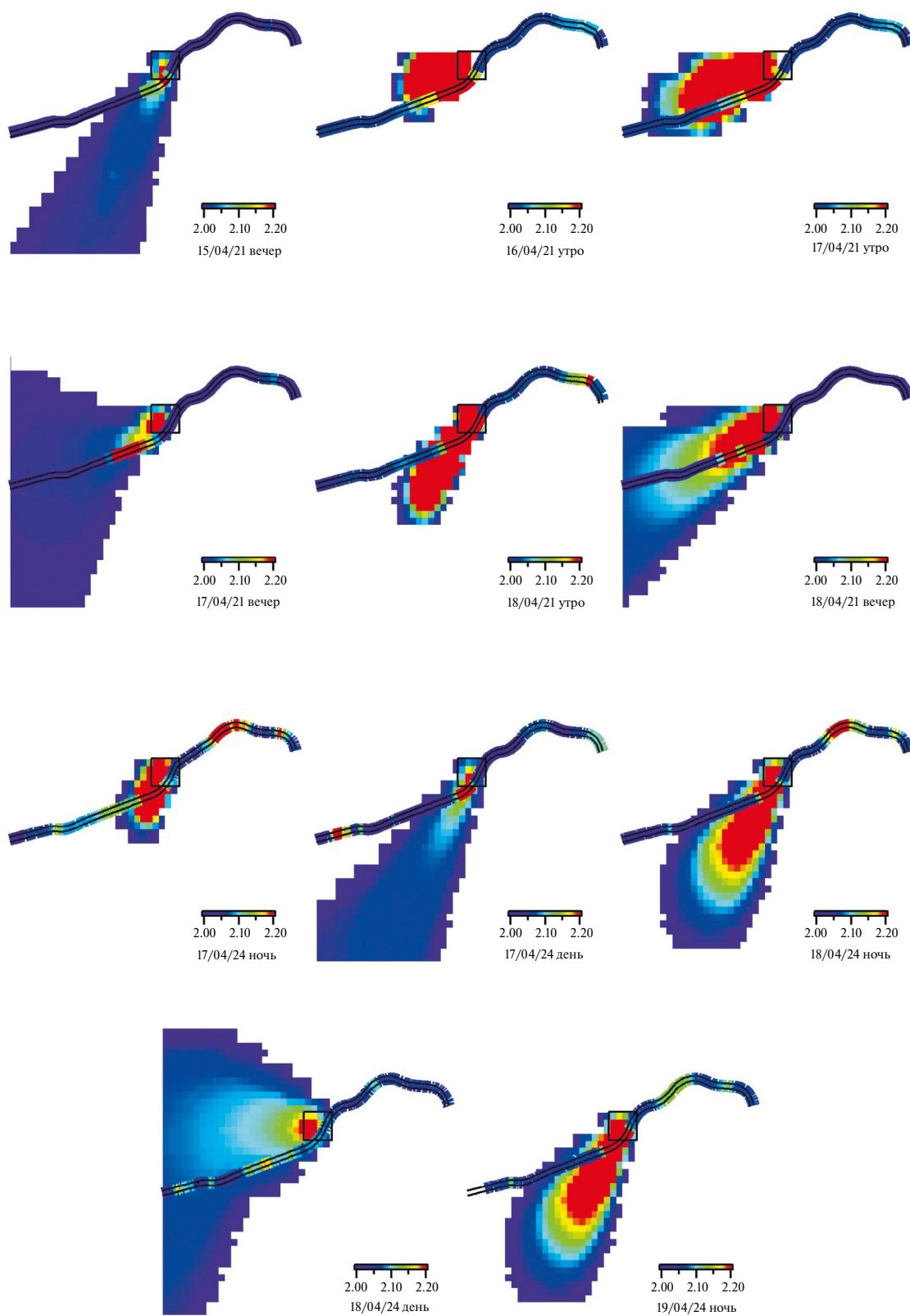
Для согласования с данными измерений рассчитанные с помощью HYSPLIT концентрации были нормированы таким образом, чтобы их максимальные значения совпадали с максимумами в соответствующей серии мобильных наблюдений. На рис. 5 представлена приземная концентрация  $\text{CH}_4$  по данным мобильных измерений и нормированным результатам моделирования в сроки измерений в точках маршрута. Используемые коэффициенты нормировки (масштабирования)  $K_n$  рассчитывались как  $K_n = C_{\text{изм}}/C_{\text{счет}}$ , где  $C_{\text{изм}}$  и  $C_{\text{счет}}$  — максимальная измеренная и расчетная концентрации соответственно. Значения коэффициентов  $K_n$ , приведенные в табл. 2, характеризуют степень соответствия априорной величины эмиссии метана с территории полигона, заданной в HYSPLIT, экспериментальным данным. Сильная изменчивость коэффициента отражает, по-видимому, как погрешность моделирования измеряемой приземной концентрации, так и изменчивость самой эмиссии с поверхности полигона. Погрешности моделирования могут быть связаны с несоответствием используемых в модели метеорологических данных реальным погодным условиям. Причины изменчивости эмиссии могут состоять в вариациях атмосферного давления и скорости приземного ветра (Терентьева и др., 2017; Czepiel et al., 1996; Scheutz et al., 2009). В табл. 2 приведены также средние значения коэффициента и их погрешность, рассчитанные отдельно для измерений 2021 и 2024 гг.

Полученные средние значения коэффициента масштабирования  $K_n$  составили  $0.64 \pm 0.19$  в апреле 2021 г. и  $0.20 \pm 0.05$  в апреле 2024 г. Исходя из заданного в HYSPLIT удельного потока метана с территории полигона ( $F_0 = 1.25 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ),

экспериментальные оценки этой величины ( $F = F_0 \times K_n$ ) составят  $0.80 \pm 0.24 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  в апреле 2021 г. и  $0.25 \pm 0.06 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  в апреле 2024 г. С учетом площади полигона ( $8 \times 10^5 \text{ м}^2$ ), величину суммарного потока метана можно оценить как  $640 \pm 190 \text{ кг}/\text{ч}$  в апреле 2021 г. и  $200 \pm 50 \text{ кг}/\text{ч}$  в апреле 2024 г. Несмотря на значительные погрешности этих двух оценок, наблюдаемое между ними расхождение является статистически значимым [непараметрический критерий Вилкоксона (Wilcoxon, 1992),  $P = 0.0381$ ].

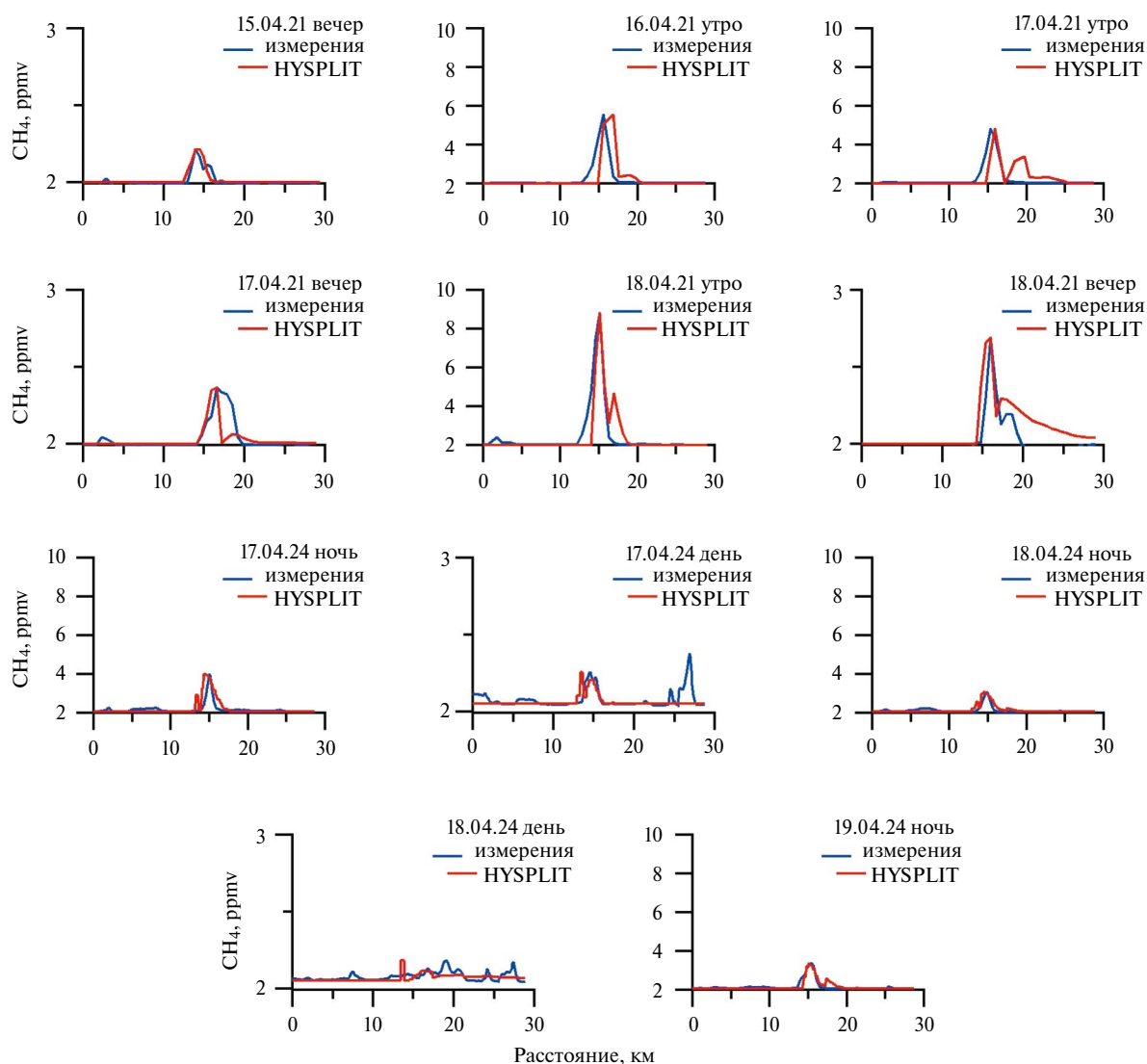
Существующие оценки удельного потока метана с территорий полигонов ТБО, полученные различными авторами, сильно разнятся. Приводимые в некоторых работах значения составляют от  $0.1 \div 0.7 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  и  $0.1 \div 1.4 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  на нескольких полигонах Московской области (Каллистова и др., 2006; Ножевникова, 1995), до  $1.3 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  на полигонах в Швеции (Borjesson et al., 2000),  $0.3 \div 2.6 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ , Нидерландах (Hensen, Scharff, 2001) и  $1.6 \div 2.8 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  на полигонах Финляндии (Lohila et al., 2007), до  $1.9 \div 4.5 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  и  $0.3 \div 5.8 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  на российских полигонах в Сургуте и Ханты-Мансийске соответственно (Терентьева и др., 2017). Такую большую изменчивость оценок связывают с различиями в объемах и составе захораниваемых отходов, “возрасте” полигонов, расположении измерительных площадок на вершине или у подножия залежи (в случае камерных измерений), а также во времени года наблюдений. В целом эмиссия метана заметно снижается уже через несколько лет после закрытия полигона, и наиболее низкие значения удельного потока получены именно для таких закрытых объектов (Каллистова и др., 2006). Оценки, полученные в настоящей работе, также близки по величине к типичным удельным потокам “возрастных” полигонов.

Поскольку полученные здесь оценки эмиссии в существенной мере основаны на результатах численного моделирования воздушного переноса газовой примеси, нельзя обойти вниманием потенциальный вклад ошибок модели в погрешность искомых потоков метана. Как и для ряда других дисперсионных моделей класса “лагранжевых” [например, STILT (Lin et al., 2003) или FLEXPART (Brioude et al., 2013)], в используемых расчетах HYSPLIT критическое значение имеет адекватная параметризация вертикального перемешивания в пограничном слое атмосферы. В частности в работе Karion et al. (2019), посвященной подробному сравнительному анализу ансамбля из нескольких метеорологических и дисперсионных моделей в сопоставлении с данными самолетных измерений концентрации метана в шлейфе антропогенного загрязнения, отмечена решающая роль



**Рис. 4.** Шлейфы приземной концентрации  $\text{CH}_4$  в окрестностях полигона ТБО “Новосёлки” (центр эмиссии — черный квадрат) во время проведения мобильных измерений в 2021 и 2024 гг., по расчетам модели HYSPLIT с адаптированной локальной метеорологией.

*Примечание:* на карте также представлены результаты мобильных измерений на участке КАД, выполненные в это же время суток.



**Рис. 5.** Приземная концентрация  $\text{CH}_4$  на маршрутах мобильных измерений в апреле 2021 г. и в апреле 2024 г. Графики содержат сопоставление вариаций концентрации (ppmv) на указанном маршруте по данным мобильных измерений и результатам моделирования (HYSPLIT) в сроки измерений в точках маршрута. Модельные расчеты приведены к результатам измерений с использованием коэффициентов масштабирования, приведенных в табл. 2.

параметров вертикального перемешивания в достижении наилучшего согласия расчетов с экспериментом. В среднем более высокие значения ночных и утренних коэффициентов масштабирования (нормировки) HYSPLIT по сравнению с дневными и вечерними, полученные в настоящей работе (см. табл. 2), могут указывать на переоценку интенсивности вертикального перемешивания. В условиях ночной стабильной атмосферы с низким пограничным слоем такая переоценка приводит к большему занижению расчетных концентраций (завышению эмиссии), чем днем, в условиях с интенсивной конвекцией и высоким пограничным слоем.

Таким образом, с учетом этого недостатка модели, полученные нами оценки эмиссии метана, могут быть систематически завышены.

Следует также отметить некоторое ограничение самого подхода, состоящего в масштабировании величины априорной эмиссии (inventory scaling method). Его недостатком является равноценное обобщение результатов всех измерений, независимо от степени их согласия с расчетами модели (как можно видеть на рис. 5, это согласие для разных дней измерений существенно отличается). В этом смысле методы обращения (решения обратной задачи) на основе байесовского или вариационного подходов могут быть предпочтительнее, поскольку в них учитываются погрешности модели: расчеты, ближе согласующиеся с данными измерений определяют решение с большим весом (Karion et al., 2019). Как поиск оптимальной параметризации вертикального перемешивания в HYSPLIT, так и реализация методов байесовского или вариационного об-

**Таблица 2.** Коэффициенты масштабирования, нормирующие максимальную приземную концентрацию метана, рассчитанную HYSPLIT, к максимуму концентрации в результатах мобильных измерений

Дата и время маршрута	Коэффициент масштабирования	Средний коэффициент
15.04.2021, вечер	0.230	0.64 ± 0.19
16.04.2021, утро	1.318	
17.04.2021, утро	0.810	
17.04.2021, вечер	0.181	
18.04.2021, утро	0.672	
18.04.2021, вечер	0.611	
17.04.2024, ночь	0.343	0.20 ± 0.05*
17.04.2024, день	0.175	
18.04.2024, ночь	0.155	
18.04.2024, день	0.086	
19.04.2024, ночь	0.140	

*Примечание:* \* — в расчете среднего исключены измерения днем 18 апреля 2024 г.

ращения выходят за рамки настоящей работы, но могут послужить в дальнейшем важным шагом по уточнению полученных в ней оценок эмиссии.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Измерения, выполненные с помощью газоанализатора, находящегося на борту автомобиля, движущегося по кольцевому маршруту вблизи крупного полигона ТБО, выявили резкое возрастание приземной концентрации метана с подветренной стороны полигона. Несколько серий таких мобильных наблюдений, выполненных в апреле 2021 г. и апреле 2024 г., показали устойчивое локальное возмущение поля приземной концентрации метана в окрестностях мусорного полигона. Результаты моделирования воздушного распространения метана с поверхности свалки, выполненного с помощью дисперсионной модели HYSPLIT, качественно согласуются с данными мобильных измерений. Используя сопоставление расчетных приземных концентраций с экспериментально измеренными, получены оценки суммарного потока метана с территории полигона, составившие 640 кг/ч в апреле 2021 г. и 200 кг/ч в апреле 2024 г. Удельный поток составил 0.80 г/(м<sup>2</sup>·ч) в апреле 2021 г. и 0.25 г/(м<sup>2</sup>·ч) в апреле 2024 г, что ожидаемо

ниже оценки, полученной другими авторами в 2001 г., ~1 г/(м<sup>2</sup>·ч) (Зинченко и др., 2003).

Полученные экспериментальные данные показывают, что крупный городской полигон захоронения ТБО, начавший работу в 1972 г. и официально закрытый в 2017 г., но продолжавший, по некоторым данным, эпизодически принимать мусор, как минимум, до 2020 г., остается заметным источником эмиссии метана в настоящее время. В частности, если принять полученные в этой работе оценки эмиссии за постоянную среднегодовую величину, суммарный выброс метана с рассматриваемого полигона за 2021 г. составил бы около 6 тыс. т. Согласно опубликованным данным официальной инвентаризации Санкт-Петербурга (Серебрицкий, 2018), общий антропогенный выброс метана с его территории согласно последней оценке проведенной в 2015 г. составил около 88 тыс. т. Таким образом, даже один закрытый полигон ТБО может вносить около 7% в суммарную городскую эмиссию метана.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-00033, <https://rscf.ru/project/24-27-00033/>.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Измерения проведены с использованием оборудования ресурсного центра Научного парка СПбГУ “Геомодель”. Авторы выражают благодарность Национальному управлению океанических и атмосферных исследований США (NOAA Air Resources Laboratory) за предоставление модели переноса и рассеивания HYSPLIT. Авторы также благодарят анонимных рецензентов за внимание к нашей работе и замечания, позволившие исправить ряд неточностей и улучшить окончательный вид статьи.

## FUNDING

The study was supported by the grant from the Russian Science Foundation no. 24-27-00033, <https://rscf.ru/project/24-27-00033/>.

## ACKNOWLEDGEMENTS

Experimental data were acquired using the scientific equipment of “Geomodel” research centre of St. Petersburg State University. The authors gratefully acknowledge the NOAA Air Resources Laboratory (ARL) for the provision of the HYSPLIT transport and dispersion model used in this publication. The authors also thank

the anonymous reviewers for their attention to our work and comments, which allowed us to correct inaccuracies and improve the final version of the manuscript.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Глаголев М.В.* К методу “обратной задачи” для определения поверхностной плотности потока газа из почвы // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. 2010. Т. 1. № 1. С. 17–36.
- Глаголев М.В., Коцюрбенко О.Р., Сабреков А.Ф., Литти Ю.В., Терентьева И.Е.* Обзор методов определения микробной продукции и эмиссии метана в почвах // Микробиология. 2021. Т. 90. № 1. С. 3–21.  
<https://doi.org/10.31857/S0026365621010055>
- Зинченко А.В., Решетников А.И., Парамонова Н.Н., Привалов В.И., Титов В.С., Казакова К.В., Кацнельсон Б.П.* Исследование эмиссии метана и диоксида углерода на полигонах захоронения твердых бытовых отходов в окрестностях Санкт-Петербурга // Прикладная метеорология. Тр. Научно-исслед. центра дистанционного зондирования атмосферы (филиала ГГО). 2003. Вып. 4 (552). С. 126–138.
- Ионов Д.В., Макарова М.В.* Дистанционные спектрометрические измерения атмосферного содержания двуоксида азота вблизи городских ТЭЦ // Оптика атмосферы и океана. 2024. Т. 37. № 10. С. 841–848.  
<https://doi.org/10.15372/AOO20241005>
- Каллистова А.Ю., Глаголев М.В., Шнырев Н.А., Кеврина М.В., Некрасова В.К., Чистотин М.В., Фаустова Е.В., Серебряная М.И., Ножевникова А.Н.* Эмиссия метана с поверхности полигона захоронения твердых бытовых отходов (ТБО) в зависимости от возраста полигона и от сезона // Экологическая химия. 2006. Т. 15. № 1. С. 13–21.
- Макарова М.В., Фока С.Ч., Ионов Д.В.* Экспериментальное исследование потоков парниковых газов для урбоэкосистемы Санкт-петербургской агломерации: матер. Конф.: Форум естественных наук — 2024 (5–6 декабря 2024 г., Санкт-Петербург). <https://e-science.expoforum.ru/ru/>
- Масликов В.И., Федоров М.П.* Природно-технические системы в энергетике // Изв. РАН. Энергетика. 2006. № 5. С. 7–16.
- Ножевникова А.Н.* Мусорные залежи — “метановые бомбы” планеты // Природа. 1995. № 6. С. 25–34.
- Семенов С.М., Говор И.Л., Уварова Н.Е.* Роль метана в современном изменении климата. М.: Ин-т глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля, 2018. 106 с.
- Серебрицкий И.А.* Доклад об экологической ситуации в Санкт-Петербурге в 2017 году. СПб.: ООО “Сезам-принт”, 2018. 158 с.
- Терентьева И.Е., Сабреков А.Ф., Глаголев М.В., Коцюрбенко О.Р.* Эмиссия метана из полигонов захоронения твердых бытовых отходов // Метеорология и гидрология. 2017. № 5. С. 80–90.
- Шилкина С.В.* Мировые тенденции управления отходами и анализ ситуации в России // Отходы и ресурсы. 2020. Т. 7. № 5.  
<https://doi.org/10.15862/05ECOR120>
- Badr O., Probert S.D., O’Callaghan P.W.* Atmospheric methane: Its contribution to global warming // Appl. Energy. 1991. Vol. 40. № 4. P. 273–313.  
[https://doi.org/10.1016/0306-2619\(91\)90021-O](https://doi.org/10.1016/0306-2619(91)90021-O)
- Baer D.S., Paul J.B., Gupta M., O’Keefe A.* Sensitive absorption measurements in the near-infrared region using off-axis integrated-cavity-output spectroscopy // Appl. Phys. B: Lasers Opt. 2002. Vol. 75. № 2. P. 261–265.  
<https://doi.org/10.1007/s00340-002-0971-z>
- Baldocchi D.D.* Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: Past, present and future // Global Change Biol. 2003. Vol. 9. № 4. P. 479–492.  
<https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00629.x>
- Bingemer H.G., Crutzen P.J.* The production of methane from solid wastes // J. Geophys. Res. 1987. Vol. 92. № D2. P. 2181–2187.  
<https://doi.org/10.1029/JD092iD02p02181>
- Borjesson G., Danielsson A., Svensson B.H.* Methane fluxes from a Swedish landfill determined by geostatistical treatment of static chamber measurements // Environ. Sci. Technol. 2000. Vol. 34. P. 4044–4050.  
<https://doi.org/10.1021/es991350s>
- Brioude J., Arnold D., Stohl A., Cassiani M., Morton D., Seibert P., Angevine W., Evan S., Dingwell A., Fast J.D., Easter R.C., Pisso I., Burkhardt J., Wotawa G.* The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART-WRF version 3.1 // Geosci. Model Dev. 2013. Vol. 6. № 6. P. 1889–1904.  
<https://doi.org/10.5194/gmd-6-1889-2013>
- Czepiel P.M., Mosher B., Harriss R.C., Shorter J.H., McManus J.B., Kolb C.E., Allwine E., Lamb B.K.* Landfill methane emissions measured by enclosure and atmospheric tracer methods // J. Geophys. Res.: Atmospheres. 1996. Vol. 101. № D11. P. 16711–16719.  
<https://doi.org/10.1029/96jd00864>

- Hensen A., Scharff H.* Methane emission estimates from landfills obtained with dynamic plume measurements // *Water, Air, & Soil Pollution: Focus* 1. 2001. P. 455–464.  
<https://doi.org/10.1023/A:1013162129012>
- Ionov D.V., Makarova M.V., Hase F., Foka S.C., Kostsov V.S., Alberti C., Blumenstock T., Warneke T., Virolainen Y.A.* The CO<sub>2</sub> integral emission by the megacity of St. Petersburg as quantified from ground-based FTIR measurements combined with dispersion modelling // *Atmos. Chem. Phys.* 2021. Vol. 21. P. 10939–10963.  
<https://doi.org/10.5194/acp-21-10939-2021>
- Ionov D.V., Makarova M.V., Kostsov V.S., Foka S.C.* Assessment of the NO<sub>x</sub> integral emission from the St. Petersburg megacity by means of mobile DOAS measurements combined with dispersion modelling // *Atmospheric Pollution Res.* 2022. Vol. 13. № 12.  
<https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101598>
- Karion A., Lauvaux T., Lopez Coto I., Sweeney C., Mueller K., Gourdji S., Angevine W., Barkley Z., Deng A., Andrews A., Stein A., Whetstone J.* Intercomparison of atmospheric trace gas dispersion models: Barnett Shale case study // *Atmos. Chem. Phys.* 2019. Vol. 19. P. 2561–2576.  
<https://doi.org/10.5194/acp-19-2561-2019>
- Lin J.C., Gerbi C., Wofsy S.C., Andrews A.E., Daube B.C., Davis K.J., Grainger C.A.* A near-field tool for simulating the upstream influence of atmospheric observations: The Stochastic Time-Inverted Lagrangian Transport (STILT) model // *J. Geophys. Res.: Atmospheres*. 2003. Vol. 108. № D16.  
<https://doi.org/10.1029/2002JD003161>
- Lohila A., Laurila T., Tuovinen J.-P., Aurela M., Hatakka J., Thum T., Pihlatie M., Rinne J., Vesala T.* Micrometeorological measurements of methane and carbon dioxide fluxes at a municipal landfill // *Environ. Sci. Technol.* 2007. № 8. Vol. 41. P. 2717–2722.  
<https://doi.org/10.1021/es061631h>
- Maasakkers J.D., Varon D.J., Elfarsdottir A., McKeever J., Jervis D., Mahapatra G., Pandey S., Lorente A., Borsdorff T., Foorthuis L.R., Schuit B.J., Tol P., van Kempen T.A., van Hees R., Aben I.* Using satellites to uncover large methane emissions from landfills // *Sci. Advances*. 2022. Vol. 8. № 32.  
<https://doi.org/10.1126/sciadv.abn9683>
- Morin T.H.* Advances in the eddy covariance approach to CH<sub>4</sub> monitoring over two and a half decades // *J. Geophys. Res.: Biogeosciences*. 2018. Vol. 124. P. 453–460.  
<https://doi.org/10.1029/2018jg004796>
- Pasquill F.* The estimation of the dispersion of windborne material // *Meteorological Magazine*. 1961. № 90. P. 33–49.
- Reay D., Smith P.* Methane and climate change. London: Routledge, 2010. 272 p.
- Rower I.U., Geck C., Gebert J., Pfeiffer E.-M.* Spatial variability of soil gas concentration and methane oxidation capacity in landfill covers // *Waste Management*. 2011. Vol. 31. № 5. P. 926–934.  
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.09.011>
- Saunois M., et al.* The Global Methane Budget 2000–2017 // *Earth Syst. Sci. Data*. 2020. Vol. 12. P. 1561–1623.  
<https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>
- Scheutz C., Kjeldsen P., Bogner J.E., De Visscher A., Gebert J., Hilger H.A., Huber-Humer M., Spokas K.* Microbial methane oxidation processes and technologies for mitigation of landfill gas emissions // *Waste Management & Res.* 2009. Vol. 27. № 5. P. 409–455.  
<https://doi.org/10.1177/0734242X09339325>
- Stein A.F., Draxler R.R., Rolph G.D., Stunder B.J.B., Cohen M.D., Ngan F.* NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2015. Vol. 96. P. 2059–2077.  
<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>
- Wang Y., Fang M., Lou Z., He H., Guo Y., Pi X., Wang Y., Yin K., Fei X.* Methane emissions from landfills differentially underestimated worldwide // *Nat. Sustain.* 2024. Vol. 7. P. 496–507.  
<https://doi.org/10.1038/s41893-024-01307-9>
- Wilcoxon F.* Individual Comparisons by Ranking Methods. In: *Breakthroughs in Statistics*. Springer Series in Statistics / S. Kotz, N.L. Johnson (Eds.). NY: Springer, 1992. P. 196–202.  
[https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4380-9\\_16](https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4380-9_16)
- Woodward J.L.* Atmospheric Stability Classification Schemes (Appendix A), Estimating the Flammable Mass of a Vapor Cloud // *American Institute of Chemical Engineers*. 1998. 336 p.  
<https://doi.org/10.1002/9780470935361>

# The Methane Emission from the Large Solid Waste Landfill “Novosyolki” (St. Petersburg, Russia) Based on Mobile Measurements of Ground-Level Concentrations

D. V. Ionov<sup>a,\*</sup>, M. V. Makarova<sup>a</sup>, S. C. Foka<sup>a</sup>, and I. M. Isaev<sup>b</sup>

<sup>a</sup>St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

<sup>b</sup>St. Petersburg Electrotechnical University “LETI”, St. Petersburg, Russia

\*e-mail: d.ionov@spbu.ru

Landfills for solid municipal waste are considerable sources of methane, which is one of the principal greenhouse gases. Due to the continuous formation of significant amounts of municipal waste, primarily related to the life of the population of megacities, estimates of methane emissions from the territory of large urban landfills remain relevant. In this paper, the problem is solved based on the coupling of the results of direct measurements of methane concentration with model calculations. The results of mobile measurements carried out near the “Novosyolki” municipal solid waste landfill (St. Petersburg, Russia) in April 2021 and 2024 are presented. The measurement data reveal local maxima of methane concentration in the route sections downwind of the landfill. The maximum values of CH<sub>4</sub> concentrations recorded from a vehicle in this observation area reached ~9 ppmv, which significantly exceeds the background ground-level of ~2 ppmv. Average night and morning peak concentrations (5.0 ppmv) are noticeably higher than day and evening ones (2.3 ppmv). Numerical modeling of landfill gas aerial distribution, performed using a dispersion model taking into account the characteristics of atmospheric stability during the observation period, demonstrated qualitative agreement between the calculated ground-level methane concentrations and experimental data. Based on a comparison of the measurement results with the modeling data of the air pollution plume from the landfill territory, methane emission estimates were obtained amounting to 640 ± 190 kg CH<sub>4</sub>/hr in April 2021 and 200 ± 50 kg CH<sub>4</sub>/hr in April 2024. The observed significant decrease in emissions from 2021 to 2024 is consistent with the official information on the closure of the landfill in 2018 and the start of landfill cover and reclamation work, which continues to this day. Emissions from the territory of “Novosyolki” landfill can amount up to ~7% of the total anthropogenic methane emissions from the territory of St. Petersburg.

**Keywords:** greenhouse gases, methane, urban ecosystems, landfill of solid household waste, restoration, atmospheric transport modeling

## REFERENCES

- Badr O., Probert S.D., O’Callaghan P.W. Atmospheric methane: Its contribution to global warming. *Appl. Energy*, 1991, vol. 40, no. 4, pp. 273–313.  
[https://doi.org/10.1016/0306-2619\(91\)90021-0](https://doi.org/10.1016/0306-2619(91)90021-0)
- Baer D.S., Paul J.B., Gupta M., O’Keefe A. Sensitive absorption measurements in the near-infrared region using off-axis integrated-cavity-output spectroscopy. *Appl. Phys. B: Lasers Opt.*, 2002, vol. 75, no. 2, pp. 261–265.  
<https://doi.org/10.1007/s00340-002-0971-z>
- Baldocchi D.D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: Past, present and future. *Glo. Change Biol.*, 2003, vol. 9, no. 4, pp. 479–492.  
<https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00629.x>
- Bingemer H.G., Crutzen P.J. The production of methane from solid wastes. *J. Geophys. Res.*, 1987, vol. 92, no. D2, pp. 2181–2187.  
<https://doi.org/10.1029/JD092iD02p02181>
- Borjesson G., Danielsson A., Svensson B.H. Methane fluxes from a Swedish landfill determined by geostatistical treatment of static chamber measurements. *Environ. Sci. Technol.*, 2000, vol. 34, no. 18, pp. 4044–4050.  
<https://doi.org/10.1021/es991350s>
- Brioude J., Arnold D., Stohl A., Cassiani M., Morton D., Seibert P., Angevine W., Evan S., Dingwell A., Fast J.D., Easter R.C., Pisso I., Burkhardt J., Wotawa G. The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART-WRF version 3.1. *Geosci. Model Dev.*, 2013, vol. 6, no. 6, pp. 1889–1904.  
<https://doi.org/10.5194/gmd-6-1889-2013>
- Czepiel P.M., Mosher B., Harriss R.C., Shorter J.H., McManus J.B., Kolb C.E., Allwine E., Lamb B.K. Landfill methane emissions measured by enclosure and atmospheric tracer methods. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 1996, vol. 101, no. D11, pp. 16711–16719.  
<https://doi.org/10.1029/96jd00864>
- Glagolev M.V. Inverse modelling method for the determination of the gas flux from the soil. *Dinam. Okr. Sredy Glob. Izmen. Klimat.*, 2010, vol. 1, no. 1, pp. 17–36. (In Russ.).

- Glagolev M.V., Kotsyurbenko O.R., Sabrekov A.F., Litti Y.V., Terentieva I.E. Methodologies for measuring microbial methane production and emission from soils — a review. *Microbiol.*, 2021, vol. 90, no. 1, pp. 3–23.  
<https://doi.org/10.1134/S0026261721010057>
- Hensen A., Scharff H. Methane emission estimates from landfills obtained with dynamic plume measurements. *Water Air Soil Poll.*, 2001, vol. 1, pp. 455–464.  
<https://doi.org/10.1023/A:1013162129012>
- Ionov D.V., Makarova M.V. Remote spectrometric measurements of atmospheric nitrogen dioxide near urban thermal power plants. *Atmos. Ocean Opt.*, 2025, vol. 38, pp. 51–58.  
<https://doi.org/10.1134/S1024856024701288>
- Ionov D.V., Makarova M.V., Hase F., Foka S.C., Kostsov V.S., Alberti C., Blumenstock T., Warneke T., Virolainen Y.A. The CO<sub>2</sub> integral emission by the megacity of St. Petersburg as quantified from ground-based FTIR measurements combined with dispersion modelling. *Atmos. Chem. Phys.*, 2021, vol. 21, no. 14, pp. 10939–10963.  
<https://doi.org/10.5194/acp-21-10939-2021>
- Ionov D.V., Makarova M.V., Kostsov V.S., Foka S.C. Assessment of the NO<sub>x</sub> integral emission from the St. Petersburg megacity by means of mobile DOAS measurements combined with dispersion modelling. *Atmos. Pollut. Res.*, 2022, vol. 13, no. 12.  
<https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101598>
- Kallistova A.Yu., Glagolev M.V., Shnyrev N.A., Kevbrina M.V., Nekrasova V.K., Chistotin M.V., Faustova E.V., Nozhevnikova A.N. Methane emission from the surface of the municipal solid waste landfill. *Ekol. Khim.*, 2006, no. 1, no. 15, pp. 13–21. (In Russ.).
- Karion A., Lauvaux T., Lopez Coto I., Sweeney C., Mueller K., Gourdji S., Angevine W., Barkley Z., Deng A., Andrews A., Stein A., Whetstone J. Intercomparison of atmospheric trace gas dispersion models: Barnett Shale case study. *Atmos. Chem. Phys.*, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 2561–2576.  
<https://doi.org/10.5194/acp-19-2561-2019>
- Lin J.C., Gerbi C., Wofsy S.C., Andrews A.E., Daube B.C., Davis K.J., Grainger C.A. A near-field tool for simulating the upstream influence of atmospheric observations: The Stochastic Time-Inverted Lagrangian Transport (STILT) model. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2003, vol. 108, no. D16.  
<https://doi.org/10.1029/2002JD003161>
- Lohila A., Laurila T., Tuovinen J.-P., Aurela M., Hatakka J., Thum T., Pihlatie M., Rinne J., Vesala T. Micrometeorological measurements of methane and carbon dioxide fluxes at a municipal landfill. *Environ. Sci. Technol.*, 2007, vol. 41, no. 8, pp. 2717–2722.  
<https://doi.org/10.1021/es061631h>
- Maasackers J.D., Varon D.J., Elfarsdottir A., McKeever J., Jervis D., Mahapatra G., Pandey S., Lorente A., Borsdorff T., Foorhuis L.R., Schuit B.J., Tol P., van Kempen T.A., van Hees R., Aben I. Using satellites to uncover large methane emissions from landfills. *Sci. Adv.*, 2022, vol. 8, no. 32.  
<https://doi.org/10.1126/sciadv.abn9683>
- Makarova M.V., Foka S.C., Ionov D.V. An experimental study of greenhouse gas flows for the urban ecosystem of the St. Petersburg agglomeration. In *Materialy konferentsii: Forum estestvennykh nauk — 2024, 5–6 dekabrya 2024 g.* [Conf. Proc.: Natural Sciences Forum — 2024, December 5–6, 2024]. St. Petersburg, 2024. Available at: <https://e-science.expoforum.ru/ru/> (accessed: 20.08.2025). (In Russ.).
- Maslikov V.I., Fedorov M.P. Nature-technical energy systems. *Izv. Akad. Nauk, Energ.*, 2006, no. 5, pp. 7–16. (In Russ.).
- Morin T.H. Advances in the eddy covariance approach to CH<sub>4</sub> monitoring over two and a half decades. *J. Geophys. Res.: Biogeosci.*, 2018, vol. 124, no. 3, pp. 453–460.  
<https://doi.org/10.1029/2018jg004796>
- Nozhevnikova A.N. Musornyye zalezhi — “metanovyye bomby” planety. *Priroda*, 1995, no. 6, pp. 25–34. (In Russ.).
- Pasquill F. The estimation of the dispersion of windborne material. *Meteorol. Mag.*, 1961, no. 90, pp. 33–49.
- Reay D., Smith P. *Methane and climate change*. London: Routledge, 2010. 272 p.
- Rower I.U., Geck C., Gebert J., Pfeiffer E.-M. Spatial variability of soil gas concentration and methane oxidation capacity in landfill covers. *Waste Manage.*, 2011, vol. 31, no. 5, pp. 926–934.  
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.09.013>
- Saunois M., et al. The Global Methane Budget 2000–2017. *Earth Syst. Sci. Data*, 2020, vol. 12, no. 3, pp. 1561–1623.  
<https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>
- Scheutz C., Kjeldsen P., Bogner J.E., De Visscher A., Gebert J., Hilger H.A., Huber-Humer M., Spokas K. Microbial methane oxidation processes and technologies for mitigation of landfill gas emissions. *Waste Manage. Res.*, 2009, vol. 27, no. 5, pp. 409–455.  
<https://doi.org/10.1177/0734242X09339325>
- Semenov S.M., Govor I.L., Uvarova N.E. *Rol' metana v sovremennom izmenenii klimata* [The role of Methane in the Modern Climate Change]. Moscow, 2018. 106 p.
- Serebriiskii I.A. *Doklad ob ekologicheskoi situatsii v Sankt-Peterburge v 2017 godu* [Report on the Environmental Situation in St. Petersburg in 2017]. St. Petersburg, 2018. 158 p.
- Shilkina S.V. Global trends in waste management and analysis of the situation in Russia. *Resour. Conserv. Recycl.*, 2020, vol. 7, no. 1.  
<https://doi.org/10.15862/05ECOR120>

- Stein A.F., Draxler R.R., Rolph G.D., Stunder B.J.B., Cohen M.D., Ngan. F. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2015, vol. 96, no. 12, pp. 2059–2077.  
<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>
- Terent'eva I.E., Glagolev M.V., Sabrekov A.F., Kotsyurbenko O.R. Methane emission from municipal solid waste landfills. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2017, vol. 42, pp. 327–334.  
<https://doi.org/10.3103/S1068373917050089>
- Wang Y., Fang M., Lou Z., He H., Guo Y., Pi X., Wang Y., Yin K., Fei X. Methane emissions from landfills differentially underestimated worldwide. *Nat. Sustain.*, 2024, vol. 7, pp. 496–507.  
<https://doi.org/10.1038/s41893-024-01307-9>
- Wilcoxon F. Individual Comparisons by Ranking Methods. In *Breakthroughs in Statistics*. Kotz S., Johnson N.L., Eds. New York: Springer, 1992, pp. 196–202.  
[https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4380-9\\_16](https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4380-9_16)
- Woodward J.L. *Atmospheric Stability Classification Schemes (Appendix A), Estimating the Flammable Mass of a Vapor Cloud*. American Institute of Chemical Engineers, 1998. 336 p.  
<https://doi.org/10.1002/9780470935361>
- Zinchenko A.V., Reshetnikov A.I., Paramonova N.N., Privalov V.I., Titov V.S., Kazakova K.V., Katsnelson B.P. A study of methane and carbon dioxide emissions at solid waste landfills in the vicinity of St. Petersburg. In *Prikladnaya meteorologiya. Trudy Nauchno-issledovatel'skogo tsentra distantsionnogo zondirovaniya atmosfery (filiala GGO), №4* [Applied Meteorology. Proc. of the Research Center for Remote Sensing of the Atmosphere (Branch of the Main Geophysical Observatory)], 2003, pp. 126–138. (In Russ.).