

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ  
И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.510.41

**Характеристика выбросов парниковых газов  
с территории Санкт-Петербургской агломерации  
по результатам мобильных измерительных  
кампаний ЕММЕ 2019 и 2020 гг.**

**М.В. Макарова<sup>✉1</sup>, С.Ч. Фока<sup>1</sup>, Д.В. Ионов<sup>1</sup>, В.С. Косцов<sup>1</sup>,  
В.М. Ивахов<sup>2</sup>, Н.Н. Парамонова<sup>2\*</sup>**

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет  
199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9

<sup>2</sup> Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова  
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7

Поступила в редакцию 22.03.2024;  
после доработки 02.05.2024;  
принята к печати 04.06.2024

Санкт-Петербург – второй по численности населения город Российской Федерации и четвертый в Европе. Согласно официальной статистике в городе постоянно проживают ~5,6 млн человек. С целью получения экспериментальных оценок выбросов парниковых газов с территории Санкт-Петербургской агломерации был разработан оригинальный комплексный подход, реализованный в рамках измерительных кампаний ЕММЕ (Emission Monitoring Mobile Experiment) 2019 и 2020 гг. Проведено обобщение результатов мобильных экспериментов 2019 и 2020 гг. Показано, что период «март – начало мая», выбранный для проведения кампаний ЕММЕ, является оптимальным для оценок выбросов CO<sub>2</sub>. Средние значения антропогенных добавок, обусловленных выбросами с территории Санкт-Петербурга, для средних концентраций CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> в толще атмосферы составили ~1,07 ppmv и ~6,61 ppbv соответственно. Экспериментальные оценки удельных потоков парниковых газов на территории Санкт-Петербургской агломерации – 72 кг·км<sup>-2</sup>·год<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub> и 198 т·км<sup>-2</sup>·год<sup>-1</sup> CH<sub>4</sub> по результатам шестидневной кампании 2020 г.; 80 кг·км<sup>-2</sup>·год<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub> и 161 т·км<sup>-2</sup>·год<sup>-1</sup> CH<sub>4</sub> для 15 дней кампаний 2019 и 2020 гг. Эмиссионные соотношения CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> и CO/CO<sub>2</sub> для Санкт-Петербурга в марте – начале мая 2020 г. составили в среднем 6,4 и 5,7 ppbv/ppmv соответственно. Карантинные ограничения (COVID-19) повлияли на структуру выбросов Санкт-Петербурга: резкое снижение транспортной активности привело к значительному уменьшению выбросов CO от автотранспорта.

*Ключевые слова:* наземное дистанционное зондирование, портативные Фурье-спектрометры, мобильные эксперименты, парниковые газы, антропогенные эмиссии, дисперсионное моделирование; ground-based remote sensing, portable FTIR-spectrometers, mobile experiment, greenhouse gas, anthropogenic emission, megacity, dispersion simulation.

## Введение

Метан (CH<sub>4</sub>) и двуокись углерода (CO<sub>2</sub>) – долгоживущие атмосферные парниковые газы, которые, согласно современным представлениям, ответственны за ~82% радиационного форсинга [1]. Точная количественная оценка антропогенных вы-

бросов этих газов необходима как для исследования механизмов и факторов, определяющих влияние состава атмосферы на климат, экосистемы и здоровье человека, так и для разработки и контроля соблюдения международных соглашений и норм в области охраны окружающей среды и климата [2].

На долю урбанизированных территорий приходится более 70% глобальных выбросов CO<sub>2</sub>, связанных с выработкой энергии. Суммарные антропогенные эмиссии CO<sub>2</sub> с территории развитых стран в настоящее время оценены с хорошей точностью, поскольку национальные выбросы определяются объемом используемого ископаемого топлива. В отличие от CO<sub>2</sub>, оценка выбросов CH<sub>4</sub> даже в масштабах

\* Мария Владимировна Макарова (m.makarova@spbu.ru); Стефани Чарльзовна Фока (s.foka@spbu.ru); Дмитрий Викторович Ионов (d.ionov@spbu.ru); Владимир Станиславович Косцов (v.kostsov@spbu.ru); Виктор Михайлович Ивахов (ivakhoov@mail.ru); Нина Николаевна Парамонова (nina-paramonova@mail.ru).

отдельно взятой страны представляет более сложную задачу из-за специфики источников метана. Данные о выбросах парниковых газов в региональных и локальных масштабах характеризуются существенно более низким уровнем достоверности [2]. Особый интерес представляют экспериментальные методы оценки выбросов парниковых газов крупнейшими мегаполисами [3–8].

Город Санкт-Петербург – крупный мегаполис, который занимает второе место в Российской Федерации и четвертое в Европе по численности населения (~5,6 млн человек). В рамках измерительных кампаний ЕММЕ (Emission Monitoring Mobile Experiment), проведенных в 2019 и 2020 гг., нами был предложен и реализован оригинальный комплексный подход к оценке выбросов парниковых газов с территории Санкт-Петербургской агломерации [9, 10]. В настоящей работе, основная цель которой – количественно охарактеризовать выбросы парниковых газов с территории Санкт-Петербурга, проведено обобщение результатов двух кампаний ЕММЕ-2019 и ЕММЕ-2020 гг. Представлены ранее неопубликованные результаты, включающие:

- оценки влияния выбросов  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  с территории Санкт-Петербурга на их среднюю концентрацию в атмосфере ( $X_{\text{CO}_2}$  и  $X_{\text{CH}_4}$ ) (антропогенные добавки  $\Delta X_{\text{CO}_2}$  и  $\Delta X_{\text{CH}_4}$ );

- экспериментальные оценки потоков  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  на территории Санкт-Петербургской агломерации, полученные по результатам ЕММЕ-2020, в сравнении с кампанией 2019 г.;

- эмиссионные соотношения  $\text{CO}/\text{CO}_2$  ( $ER_{\text{CO}/\text{CO}_2}$ ) и  $\text{CH}_4/\text{CO}_2$  ( $ER_{\text{CH}_4/\text{CO}_2}$ ), характеризующие структуру выбросов Санкт-Петербурга (по данным ЕММЕ-2020);

- анализ влияния карантинных ограничений (во время пандемии COVID-19) на структуру выбросов парниковых газов.

## 1. Мобильные эксперименты и методики обработки данных

Основой наших исследований являлись:

- данные мобильных измерительных кампаний ЕММЕ-2019 и ЕММЕ-2020, которые проводились в один и тот же период, с марта по начало мая;

- результаты траекторных и дисперсионных расчетов с использованием модели HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectories) [11, 12].

### 1.1. Измерительная кампания ЕММЕ-2019

Ключевая аппаратура кампании 2019 г. – два портативных FTIR-спектрометра (Fourier-Transform Infrared) Bruker EM27/SUN, которые применялись для наземных измерений общего содержания  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}$  с подветренной и наветренной сторон города. Спектрометры Bruker EM27/SUN используются для измерений на сети станций COCCON (Collaborative Carbon Column Observing Network) [13], что позволяет осуществлять мониторинг средних объемных концентраций  $\text{CO}_2$  ( $X_{\text{CO}_2}$ ) и  $\text{CH}_4$  ( $X_{\text{CH}_4}$ ) в атмосфере с высокой точностью, составляющей 1 ppbv для  $X_{\text{CO}_2}$  и <5 ppbv для  $X_{text{CH}_4}$ . Такая точность сопоставима с точностью наблюдательной сети TCCON (Total Carbon Column Observing Network).

Схема мобильного эксперимента ЕММЕ представлена на рис. 1. Планирование выездных измерений проводилось накануне вечером и включало определение оптимального местоположения FTIR-спектрометров EM27/SUN исходя из прогнозов погоды в сочетании с численным моделированием переноса загрязнений в районе города на основе дисперсионных расчетов с использованием модели HYSPLIT.

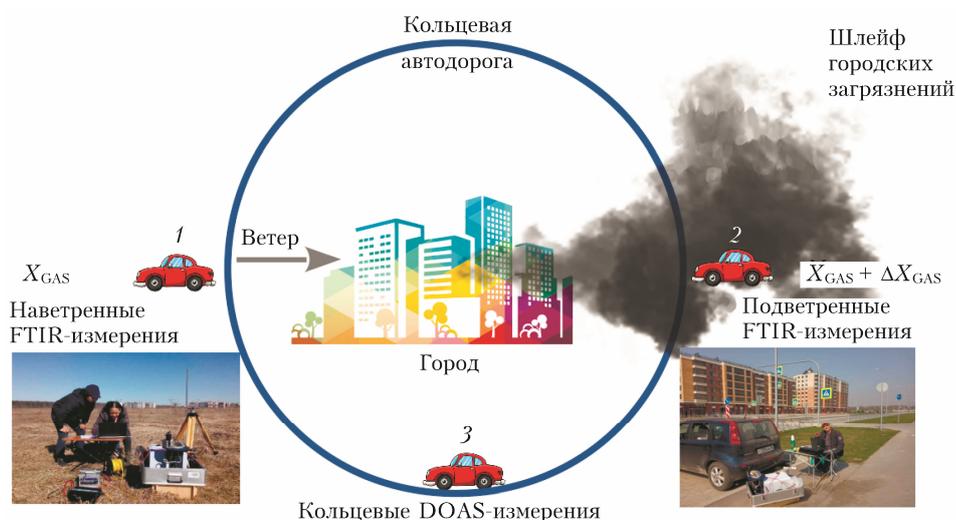


Рис. 1. Схема мобильных экспериментов ЕММЕ: 1 и 2 – FTIR-спектрометры, расположенные с наветренной и подветренной сторон города; 3 – дифракционный спектрометр, осуществляющий DOAS-измерения тропосферного содержания  $\text{NO}_2$  по замкнутому маршруту вдоль КАД

Кампания ЕММЕ-2019 также включала в себя мобильные DOAS-измерения тропосферного содержания NO<sub>2</sub> по замкнутому маршруту вдоль кольцевой автодороги (КАД) вокруг Санкт-Петербурга. В зависимости от фактического положения шлейфа NO<sub>2</sub>, регистрируемого посредством мобильных DOAS-измерений, в режиме реального времени принималось решение о необходимости корректировки мест установки FTIR-спектрометров EM27/SUN.

### 1.2. Измерительная кампания ЕММЕ-2020

Эксперимент был продолжен в 2020 г., при этом его концепция была в целом сохранена, поскольку анализ результатов 2019 г. показал ее успешность. Основное отличие ЕММЕ-2020 от кампании 2019 г. состоит в использовании только одного FTIR-спектрометра EM27/SUN. Аппаратура во время регистрации спектров находилась в автомобиле, что существенно повысило оперативность измерений – экипаж не тратил время на погрузку и разгрузку оборудования. В 2020 г. содержания CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> и CO с наветренной и подветренной сторон мегаполиса (вне шлейфа загрязнений и непосредственно в шлейфе) измерялись последовательно. Отметим, что в случае использования одного спектрометра не требуется проведение взаимокалибровки аппаратуры, как в случае с двумя FTIR-спектрометрами, что также можно рассматривать как преимущество. Вторая половина измерительной кампании 2020 г. проходила в условиях карантинных ограничительных мер в связи с пандемией COVID-19, введенных в Санкт-Петербурге 28 марта 2020 г. В связи с этим анализ результатов ЕММЕ-2020 представлял дополнительный интерес.

### 1.3. Обработка данных измерительных кампаний

Как при обработке данных измерительных кампаний, так и при дальнейшем совместном анализе результатов ЕММЕ с привлечением траекторных и дисперсионных расчетов с использованием модели HYSPLIT мы придерживались методологии, изложенной в работе [9]. Она включает в себя три основных этапа:

1. Определение средней концентрации ( $X$ ) и общего содержания ( $TC$ ) CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> и CO в атмосфере по результатам FTIR-измерений (спектры прямого солнечного излучения) с помощью программного обеспечения PROFFAST, разработанного для международной измерительной сети COCCON [13].

2. Расчет антропогенных добавок  $\Delta X_{CO_2}$ ,  $\Delta X_{CH_4}$  и  $\Delta X_{CO}$  за счет выбросов с территории Санкт-Петербурга как разности между средними за серию измерений концентрациями  $X_{CO_2}$ ,  $X_{CH_4}$  и  $X_{CO}$  в подветренной и наветренной точках (см. рис. 1). Аналогично вычисляются антропогенные добавки  $\Delta TC_{CO_2}$ ,  $\Delta TC_{CH_4}$  и  $\Delta TC_{CO}$ .

3. Сбор и анализ метеорологических данных в даты проведения мобильных экспериментов и последующее дисперсионное и траекторное моделирование эволюции шлейфа загрязнений Санкт-Петербурга с использованием данных GDAS (Global Data Assimilation System, NCEP GFS model).

### 1.4. Определение потоков методом баланса масс

При оценке интенсивности эмиссии (удельных потоков) CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> с территории Санкт-Петербургской агломерации по результатам наблюдательных кампаний 2019 и 2020 гг. был применен метод баланса масс в виде боксовой модели [9]. В нашем случае для  $j$ -го дня измерительной кампании среднее по территории значение потока исследуемого газа с единицы площади,  $кг \cdot м^{-2} \cdot с^{-1}$ , определяется формулой

$$F_j = \frac{\Delta TC_j V_j \mu}{L_j N_A}, \quad (1)$$

$\Delta TC_j$  – среднее значение антропогенной добавки в общее содержание газа за счет выбросов с территории Санкт-Петербурга,  $молек. \cdot м^{-2}$ ;  $V_j$  – средняя скорость ветра за период проведения измерений на уровне середины дневной высоты пограничного слоя в день наблюдений,  $м \cdot с^{-1}$ ;  $L_j$  – длина пути, которую воздух проходит над территорией Санкт-Петербургской агломерации,  $м$ ;  $N_A$  – число Авогадро,  $молек. \cdot моль^{-1}$ ;  $\mu$  – молярная масса исследуемого газа (CO<sub>2</sub> или CH<sub>4</sub>),  $кг \cdot моль^{-1}$ .

Для получения потока  $F_j$  используются антропогенные добавки  $\Delta TC_j$  для каждого дня кампании, значения скорости ветра  $V_j$  и расстояния  $L_j$ . Погрешность (оценка сверху) определения величины  $F_j$  вычислялась по формуле [9]:

$$\delta F_j = \delta V_j + \delta L_j + \delta \Delta TC_j. \quad (2)$$

Здесь  $\delta V$  – относительная неопределенность (изменение) скорости ветра во время FTIR-измерений, оцененная с использованием метеорологических данных HYSPLIT;  $\delta L$  – относительная неопределенность длины пути, которую воздух проходит над территорией Санкт-Петербургской агломерации;  $\delta \Delta TC$  – относительная неопределенность (изменение)  $\Delta TC$  за дневную серию измерений.

*Оценка эмиссионных соотношений.* Одной из часто используемых величин, характеризующих структуру выбросов исследуемого источника, являются эмиссионные соотношения  $ER_{GAS/CO_2}$  [3, 9]:

$$ER_{GAS/CO_2} = \frac{F_{GAS} \mu_{CO_2}}{F_{CO_2} \mu_{GAS}} = \frac{\Delta TC_{GAS}}{\Delta TC_{CO_2}} = \frac{\Delta X_{GAS}}{\Delta X_{CO_2}}, \quad (3)$$

где GAS – малый газовый компонент атмосферы, в нашем случае это CO или CH<sub>4</sub>;  $F_{GAS}$  – поток CO или CH<sub>4</sub> от исследуемого источника;  $F_{CO_2}$  – поток CO<sub>2</sub> от исследуемого источника;  $\mu_{GAS}$  – молярная масса CO ( $0,028 кг \cdot моль^{-1}$ ) или CH<sub>4</sub>

(0,016 кг·моль<sup>-1</sup>);  $\mu_{\text{CO}_2}$  – молярная масса CO<sub>2</sub> (0,044 кг·моль<sup>-1</sup>).

Таблица 1

**Дата, время (местное), географические координаты и буквенное обозначение (соответствующее рис. 2) точек проведения наветренных и подветренных измерений в течение кампании ЕММЕ-2020**

Дата	Время измерений	Координаты (обозначение точки)
<i>Наветренные точки</i>		
22.03	10:38–11:55	60,11° с.ш., 30,48° в.д. (1А)
23.03	12:55–14:33	59,93° с.ш., 29,64° в.д. (2А)
27.03	10:35–11:51	59,88° с.ш., 29,83° в.д. (3А)
05.04	12:44–13:43	59,82° с.ш., 29,96° в.д. (4А)
08.04	14:58–16:46	59,89° с.ш., 29,89° в.д. (5А)
01.05	18:01–19:03	59,73° с.ш., 30,25° в.д. (6А)
<i>Подветренные точки</i>		
22.03	15:55–17:16	59,81° с.ш., 30,14° в.д. (1Б)
23.03	16:24–18:02	59,90° с.ш., 30,52° в.д. (2Б)
27.03	13:24–14:12	59,94° с.ш., 30,60° в.д. (3Б)
	14:34–15:15	59,96° с.ш., 30,60° в.д. (3В)
05.04	10:53–11:48	59,83° с.ш., 30,52° в.д. (4-5Б)
08.04	11:09–13:43	59,83° с.ш., 30,52° в.д. (4-5Б)
01.05	13:22–14:27	60,05° с.ш., 30,06° в.д. (6Б)
	15:10–16:11	60,03° с.ш., 30,00° в.д. (6В)

## 2. Результаты и обсуждение

В 2019 г. выездные измерения проводились в течение 11 дней, в 2020 г. – в течение шести. При этом первые три дня кампании ЕММЕ-2020 – 22, 23 и 27 марта – пришлись на докарантинный период, остальные наблюдения (5, 8 апреля и 1 мая) осуществлялись уже в условиях карантинных мер, введенных в Санкт-Петербурге 28 марта 2020 г. в связи с пандемией COVID-19. Информация о месте и времени проведения наветренных и подветренных мобильных измерений в течение шести дней в 2020 г. приведена в табл. 1. Все точки, где велись измерения, имеют обозначение, состоящее из цифры и буквы (у всех наветренных точек после номера идет буква А, например 3А; буквой Б обозначаются подветренные точки, а буквой В – вторая из подветренных точек в те дни, когда их было две). На рис. 2 приведена карта, где отмечено расположение измерительных точек кампании ЕММЕ-2020.

Отметим особенности конкретных дней измерений кампании 2020 г.:

– 27 марта – последний рабочий день перед введением карантинных коронавирусных ограничений, когда транспортная активность в Санкт-Петербурге была экстремально высокой. В этот день измерения в шлейфе загрязнений были сделаны дважды, обе точки (3Б и 3В) располагались по периметру кольцевой автодороги, расстояние между ними составляло ~2 км. Точка 3Б находилась на подветренной границе территории завода по механизированной переработке бытовых отходов (СПб ГУП «Завод МПБО-2», далее – ЗМПБО);

– 1 мая подветренные измерения проводились в двух точках: 6Б и 6В.

На рис. 3 и 4 представлены серии FTIR-измерений  $X_{\text{CO}_2}$  и  $X_{\text{CH}_4}$  с наветренной и подветренной сторон города 22 марта (точки 1А и 1Б), 27 марта (точки 3А, 3Б и 3В) и 8 апреля (точки 5А и 4-5Б) 2020 г. Обращает на себя внимание, что выбросы ЗМПБО (рис. 3, б и 4, б) оказывают существенное влияние на среднюю концентрацию  $X_{\text{CO}_2}$  и  $X_{\text{CH}_4}$ .

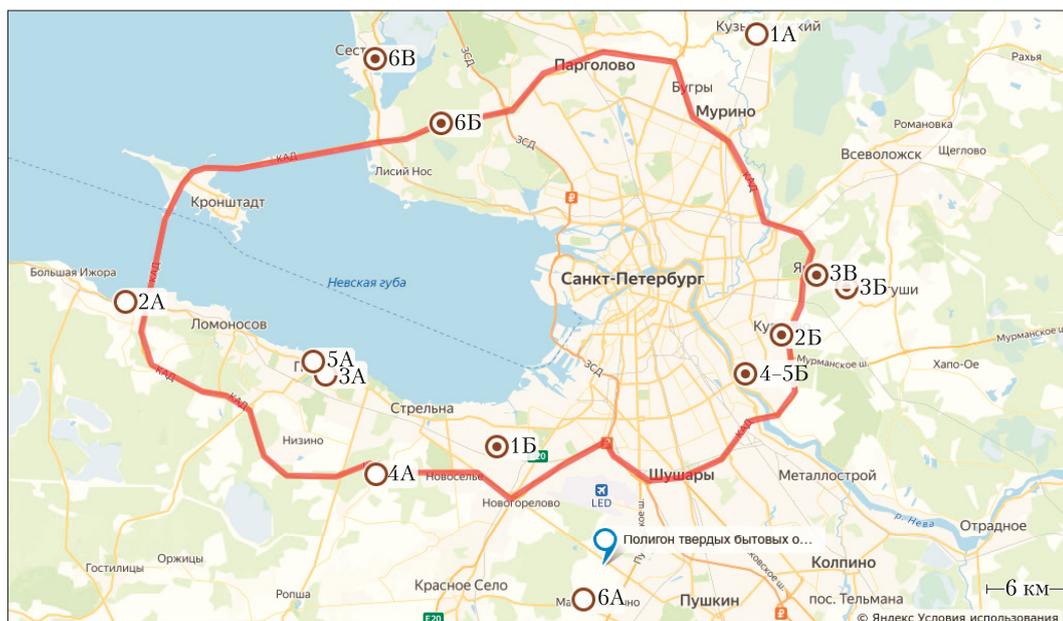


Рис. 2. Расположение измерительных точек в течение кампании ЕММЕ-2020: пустые кружки – места наветренных измерений; кружки с точкой – измерения в шлейфе городских загрязнений

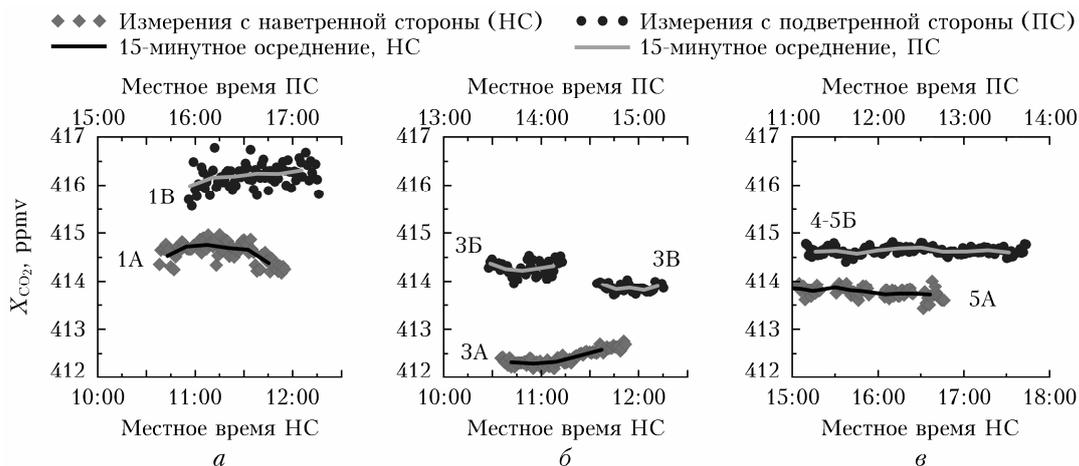


Рис. 3. Результаты FTIR-измерений  $X_{CO_2}$  с наветренной и подветренной сторон г. Санкт-Петербурга 22 марта (а), 27 марта (б) и 8 апреля (в) 2020 г.

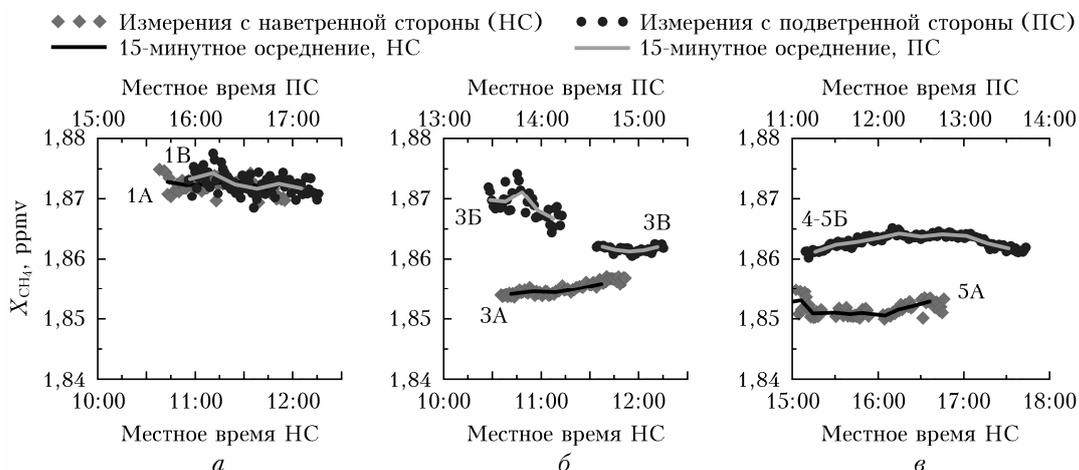


Рис. 4. Результаты FTIR-измерений  $X_{CH_4}$  с наветренной и подветренной сторон г. Санкт-Петербурга 22 марта (а), 27 марта (б) и 8 апреля (в) 2020 г.

### 2.1. Оценка влияния выбросов с территории Санкт-Петербурга на среднюю концентрацию парниковых газов в атмосфере

Выбросы углекислого газа и метана из крупных источников загрязнения атмосферы, таких как города, крупные промышленные предприятия, ТЭЦ, предприятия по переработке твердых бытовых и промышленных отходов и др., могут быть охарактеризованы антропогенной добавкой  $\Delta X_{CO_2}$  и  $\Delta X_{CH_4}$ , зависящей от интенсивности этих выбросов. Значения  $\Delta X_{CO_2}$  и  $\Delta X_{CH_4}$  для Санкт-Петербурга, полученные по результатам измерительных кампаний 2019 и 2020 гг., представлены в табл. 2. Как уже отмечалось выше, эти добавки вычислялись как разница между значениями  $X_{CO_2}$  и  $X_{CH_4}$ , зарегистрированными в шлейфе загрязнений мегаполиса и вне шлейфа. Так, например, для серий измерений 22 марта и 8 апреля 2020 г. (см. рис. 3, а, в и 4, а, в) среднесуточные значения антропогенных добавок, обусловленных выбросами с территории Санкт-Петербурга,

составили  $\Delta X_{CO_2} = 1,58$  ppmv,  $\Delta X_{CH_4} = 0,3$  ppbv и  $\Delta X_{CO_2} = 0,85$  ppmv,  $\Delta X_{CH_4} = 11,1$  ppbv соответственно.

Для Санкт-Петербурга средние значения  $\Delta X_{CO_2}$  и  $\Delta X_{CH_4}$ , полученные по объединенным результатам кампаний ЕММЕ 2019 и 2020 гг., составляют  $\sim 1,07$  ppmv и  $\sim 6,6$  ppbv соответственно. Максимальные единичные значения антропогенных добавок  $\Delta X_{CO_2}$  и  $\Delta X_{CH_4}$  были зафиксированы:

– 25 апреля 2019 г., когда в Санкт-Петербурге наблюдались высокие уровни загрязнений [9], обусловленные погодными условиями, близкими к штилевому. В этот день пиковые значения  $\Delta X_{CO_2}$  и  $\Delta X_{CH_4}$  достигали 4,46 ppmv и 51,7 ppbv соответственно;

– 27 марта 2020 г. при измерениях, проходивших на подветренной границе ЗМПБО (см. рис. 3, б и 4, б), максимальные разовые значения  $\Delta X_{CO_2}$  и  $\Delta X_{CH_4}$  составили 2,07 ppmv и 16,9 ppbv соответственно.

Эксперимент 27 марта 2020 г. позволил определить антропогенные добавки, связанные не только с выбросами Санкт-Петербурга в целом, но также

Максимальные, средние и медианные значения  $\Delta X_{CO_2}$  и  $\Delta X_{CH_4}$ , а также их стандартные отклонения  $\sigma$  для Санкт-Петербурга в сравнении с результатами для ряда европейских, азиатских и американских городов (литературные данные)

Город	Год	Население, млн чел.	$\Delta X_{CO_2}$ , ppmv				$\Delta X_{CH_4}$ , ppbv				Источник
			Максимум	Среднее	Медиана	$\pm \sigma$	Максимум	Среднее	Медиана	$\pm \sigma$	
Санкт-Петербург	2019	5,4	4,46	1,04	0,83	0,81	52	6,2	3,4	10	Настоящая работа
	2020		2,07	1,13	1,01	0,44	17	8,0	8,2	4,6	
	2019–2020		4,46	1,07	0,89	0,71	52	6,6	4,1	9,2	
Токио	2016	38,1	9,5	–	–	–	–	–	–	[6]	
Пекин	2020–2021	21,9	10	3,46	–	2,35	–	–	–	[4]	
Берлин	2014	3,4	< 1,0	–	–	–	~ 1,0	–	–	[8]	
Париж	2015	2,7	–	1,0–1,5	–	–	–	–	–	[7]	
Мюнхен	2017	1,5	6	–	–	–	22	–	–	[15]	
Сан-Франциско	2016	0,87	–	3	–	–	–	25	–	[16]	
Бостон	2017	0,69	–	0,5	–	–	–	3	–	[16]	
Пасадина	2015	0,14	< 3	–	–	–	< 20	–	–	[17]	

Примечание. Информация о населении городов дана на период проведения измерительных кампаний.

значения  $\Delta X_{CO_2}$  и  $\Delta X_{CH_4}$ , характеризующие эмиссии парниковых газов с территории ЗМПБО в районе Янино. В этот день загрязнения измерялись в шлейфе в двух точках вдоль кольцевой автодороги на расстоянии ~2 км друг от друга. Первая серия измерений в точке ЗБ была сделана на подветренной границе ЗМПБО, таким образом в дополнение к выбросам Санкт-Петербурга регистрировался шлейф ЗМПБО (см. рис. 5). Средние значения антропогенных добавок в точке ЗБ составили:  $\Delta X_{CO_2} = 1,88$  ppmv и  $\Delta X_{CH_4} = 13,8$  ppbv. Вторая точка ЗВ находилась вне действия выбросов ЗМПБО, и мы полагали, что в этом случае полученные средние значения  $\Delta X_{CO_2} = 1,45$  ppmv и  $\Delta X_{CH_4} = 6,6$  ppbv относятся исключительно к городским выбросам. Таким образом, разница между антропогенными добавками для точек ЗБ и ЗВ, составившая 0,43 ppmv для  $CO_2$  и 7,2 ppbv для  $CH_4$ , нами рассматривается как оценка вклада ЗМПБО в измеренные значения  $X_{CO_2}$  и  $X_{CH_4}$ . Отметим, что при измерениях в непосредственной близости от территории ЗМПБО влияние данного предприятия по переработке отходов на значения  $X_{CH_4}$  (7,2 ppbv) становится сопоставимо с влиянием всей городской агломерации (6,6 ppbv). Для  $X_{CO_2}$  вклад ЗМПБО при такой геометрии эксперимента также существен – 0,43 ppmv, что составляет около половины от среднего значения  $\Delta X_{CO_2}$  для Санкт-Петербурга (1,07 ppmv).

В табл. 2 представлены литературные данные об экспериментальных оценках антропогенных добавок  $\Delta X_{CO_2}$  и  $\Delta X_{CH_4}$  для ряда крупных европейских, азиатских и американских городов. Они получены в результате измерительных кампаний, использующих аналогичную аппаратуру – FTIR-спектрометры Bruker EM27/SUN. Сравнительный анализ данных в табл. 2 показывает, что значения  $\Delta X_{CO_2}$  и  $\Delta X_{CH_4}$  для Санкт-Петербурга:

– сопоставимы с результатами для Мюнхена, Парижа и Пасадины при том, что население Санкт-

Петербурга значительно превышает население этих городов;

– в два-три раза выше аналогичных значений, зарегистрированных для менее населенных Берлина и Бостона;

– в два-три раза ниже результатов для Пекина, Большого Токио и Сан-Франциско.

Обращают на себя внимание высокие значения эмиссий для городов США, особенно Пасадины и Сан-Франциско: антропогенные добавки, приведенные для них в литературе, сопоставимы с аналогичными значениями для городов, население которых в 25–40 раз больше населения вышеупомянутых американских городов.

В работе [14] значения  $\Delta X_{CH_4}$  над территориями крупнейших городов мира были оценены по результатам измерений спутниковой аппаратуры TROPOMI. Максимальные значения антропогенной добавки составили 22,5 и 21,1 ppbv для Карачи (Пакистан) и Даки (Бангладеш). Для Санкт-Петербурга спутниковые значения  $\Delta X_{CH_4}$  зарегистрированы на уровне 3,8 ppbv, что примерно в два раза ниже полученных нами средних оценок  $\Delta X_{CH_4}$  (6,2–8,0 ppbv). Отметим, что для Москвы (население ~13 млн человек), согласно работе [14],  $\Delta X_{CH_4} = 3,1$  ppbv, что меньше, чем для Санкт-Петербурга с населением ~5,4 млн человек.

## 2.2. Оценка выбросов парниковых газов с территории Санкт-Петербурга

Как уже отмечалось, при определении потоков парниковых газов с территории Санкт-Петербурга мы следовали методике, примененной нами при анализе результатов кампании 2019 г. [9]. В качестве источника данных о скорости и направлении ветра была выбрана дисперсионная модель HYSPLIT – система моделирования траекторий воз-

душных масс и процессов рассеивания в атмосфере (<https://www.arl.noaa.gov/hysplit/>). При расчете  $V_j$  используются данные на высотном уровне, соответствующем середине дневной высоты пограничного слоя. Далее эти данные усредняются за период мобильных FTIR-измерений в  $j$ -й день.

Длина пути, которую воздух проходит над территорией Санкт-Петербургской агломерации, зависит от географического положения подветренной точки в  $j$ -й день кампании и среднего направления ветра за время мобильных измерений. При расчете эффективной длины пути  $L_j$  была использована классификация землепользования для Санкт-Петербурга и близлежащих территорий с разрешением 25 м, разработанная при анализе кампании 2019 г. (подробнее см. [9]);  $L_j$  рассчитывалась как сумма элементарных путей через «урбанизированные» пиксели, обозначающие жилую застройку, промышленные зоны и автомобильные дороги. Пиксели, содержащие водоемы, болота и парки/леса, не включались в расчет  $L_j$ . Согласно разработанной классификации землепользования урбанизированная площадь Санкт-Петербургской агломерации составляет 984 км<sup>2</sup>, в то время как полная площадь Санкт-Петербурга по официальным данным – 1439 км<sup>2</sup>.

В табл. 3 приведены средние оценки удельных потоков углекислого газа и метана с территории Санкт-Петербургской агломерации, полученные в ходе двух кампаний 2019 и 2020 гг., а также литературные данные об удельных потоках для Санкт-Петербурга и других крупных городов мира. Видно, что экспериментальные значения  $F_{CO_2}$  по результатам ЕММЕ-2020 примерно на 20% ниже, чем для 2019 г., а для  $F_{CH_4}$  – на ~40% выше, однако такие различия в величине потоков лежат в пределах их неопределенности.

В информационно-аналитической записке [18], размещенной на экологическом портале Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности Санкт-Петербурга, приведена следующая официальная информация о выбросах CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> с территории

Санкт-Петербурга: «Суммарные выбросы парниковых газов по Санкт-Петербургу за 2018 г. в единицах CO<sub>2</sub>-экв. составили 34831,256 тыс. т, из них: CO<sub>2</sub> – 32922,337 тыс. т CO<sub>2</sub>-экв., CH<sub>4</sub> – 848,397 тыс. т CO<sub>2</sub>-экв...». Для сравнения с нашими оценками потоков официальные данные по интегральным эмиссиям были переведены из тонн CO<sub>2</sub>-экв. в тонны, затем разделены на площадь урбанизированной территории Санкт-Петербурга (984 км<sup>2</sup>). Видно, что результаты экспериментов 2019–2020 гг. (оценки top-down) выше официальных данных (оценки bottom-up) в ~2–3 раза для CO<sub>2</sub> и в ~5 раз для CH<sub>4</sub>. Исследования [9, 10] показали, что вне зависимости от применяемых методов оценки эмиссии CO<sub>2</sub> с территории Санкт-Петербурга по результатам кампаний ЕММЕ существенно выше, чем данные официальной инвентаризации. Анализ литературных источников показывает, что приводимые различными авторами оценки эмиссий парниковых газов могут различаться для одной и той же территории более чем на порядок. Особенно велика эта неопределенность в оценках выбросов метана в атмосферу. Например, для Санкт-Петербурга значение  $F_{CH_4}$  варьирует в пределах от ~34 т · км<sup>-2</sup> · год<sup>-1</sup> [18] до ~600 т · км<sup>-2</sup> · год<sup>-1</sup> [14].

Открытые источники информации, содержащие детальные систематические данные о выбросах парниковых газов, пока относительно немногочисленны. В этой связи интерес представляет проект Carbon Monitor Cities (<https://cities.carbonmonitor.org/> [19]), где приводятся данные о ежедневных выбросах CO<sub>2</sub> крупными городами мира, в том числе и Санкт-Петербургом. Эта информация была использована нами, чтобы экстраполировать значения  $F_{CO_2}$ , полученные для конкретных дат кампаний ЕММЕ-2019 и ЕММЕ-2020, на весь период 2019–2020 гг. На рис. 5 представлен временной ход суточных выбросов CO<sub>2</sub> с территории Санкт-Петербурга за 2019–2020 гг., куда включены следующие основные категории выбросов: авиация, транспорт, энергетика, промышленность, население (<https://cities.carbonmonitor.org/> [19]). Рассчитав по данным Carbon Monitor

Таблица 3

Удельные потоки CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub>  $F_{GAS}$ , кг · км<sup>-2</sup> · год<sup>-1</sup>, с оценкой их изменчивости ( $\pm \sigma$ ) с территории Санкт-Петербургской агломерации, полученные в ходе кампаний 2019 и 2020 гг., и литературные данные для Санкт-Петербурга и крупных городов мира

Газ	ЕММЕ-2020	ЕММЕ-2019 и ЕММЕ-2020	Литературные данные		
	6 дней	15 дней	ЕММЕ-2019	Санкт-Петербург	Другие города
CO <sub>2</sub>	72 ± 24	80 ± 27	89 ± 28 [9]	33 [18]; 40 (2019) и 39 (2020) (Carbon Monitor Cities, [19]); 25–66 (EDGAR, [20]); 6 (пригороды, [21])	Лондон: 64–144 [24]; Берлин: 28,3 [5]; Токио: 44,3 [6]; Пекин: ~18 [25]; Сеул: 4–60 [26]
CH <sub>4</sub>	198 ± 152	161 ± 110	135 ± 68 [9]	34 [18]; 95–215 (EDGAR, [20]); 600 [14]; 110 [22]; 44 (пригороды, [21]); 32 (пригороды, [23])	Лондон: 66 [27]; Краков: 7–28 [28]; Минск: 1050 [14]; Лос-Анджелес: 410 [14]; Москва: 132 [14]; Токио: 62 [14]; Карачи: 370 [14]

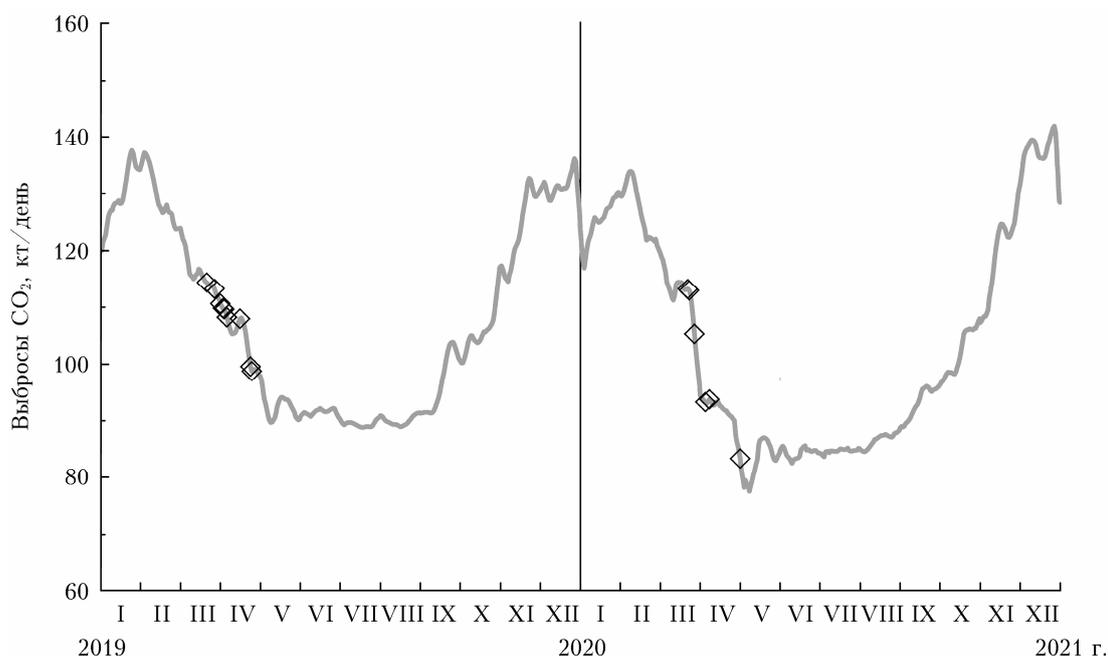


Рис. 5. Временной ход суточных выбросов  $\text{CO}_2$  с территории Санкт-Петербурга за 2019–2020 гг. по данным Carbon Monitor Cities (<https://cities.carbonmonitor.org/> [19]); ромбами обозначены даты проведения мобильных измерений в рамках кампании ЕММЕ 2019 и 2020 гг.

Cities средние суточные выбросы  $\text{CO}_2$  по девяти дням кампании 2019 г. ( $E_{\text{ЕММЕ\_CO}_2}$ ,  $\text{кг} \cdot \text{день}^{-1}$ ), а также среднее значение суточных выбросов  $\text{CO}_2$  ( $E_{\text{ann\_CO}_2}$ ,  $\text{кг} \cdot \text{день}^{-1}$ ) за весь период 2019 г. и используя пропорцию (4), можно получить искомое среднегодовое значение потока  $F_{\text{ann\_CO}_2}$  за 2019 г. с территории Санкт-Петербурга:

$$\frac{F_{\text{ann\_CO}_2}}{F_{\text{CO}_2}} = \frac{E_{\text{ann\_CO}_2}}{E_{\text{ЕММЕ\_CO}_2}}. \quad (4)$$

Аналогичным образом можно вычислить среднее значение потока  $F_{\text{ann\_CO}_2}$  за 2020 г.

Значения  $E_{\text{ann\_CO}_2}$ ,  $E_{\text{ЕММЕ\_CO}_2}$  и их отношение  $E_{\text{ann\_CO}_2}/E_{\text{ЕММЕ\_CO}_2}$ , рассчитанные по данным Carbon Monitor Cities, составили:

– для 2019 г. –  $108,3 \pm 16,6$ ;  $108,0 \pm 5,4$   $\text{кг}/\text{день}$  и 1,003 соответственно;

– для 2020 г. –  $103,8 \pm 19,0$ ;  $100,3 \pm 12,1$   $\text{кг}/\text{день}$  и 1,035 соответственно.

Таким образом, среднегодовое значение потока  $F_{\text{ann\_CO}_2}$  для 2019 и 2020 гг. составило 89 и 75  $\text{кг} \cdot \text{км}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$  соответственно. Отношение  $E_{\text{ann\_CO}_2}/E_{\text{ЕММЕ\_CO}_2}$  характеризует близость значений интенсивности эмиссии в период кампании  $E_{\text{ЕММЕ\_CO}_2}$  к среднегодовым значениям  $E_{\text{ann\_CO}_2}$ . Для Санкт-Петербурга, по данным Carbon Monitor Cities, величины  $E_{\text{ЕММЕ\_CO}_2}$  и  $E_{\text{ann\_CO}_2}$  для 2019 г. отличаются на 0,3%, для 2020 г. – на 3,5%. Следовательно, период «март – начало мая», выбранный нами для проведения кампаний ЕММЕ в 2019 и 2020 гг., был удачен, поскольку значения  $F_{\text{CO}_2}$ , получаемые для данного периода, могут служить достаточно точ-

ной оценкой среднегодового потока  $F_{\text{ann\_CO}_2}$  с территории Санкт-Петербургской агломерации.

### 2.3. Анализ эмиссионных соотношений $\text{CH}_4/\text{CO}_2$ и $\text{CO}/\text{CO}_2$ для Санкт-Петербурга по результатам ЕММЕ-2020

Эмиссионные соотношения  $\text{CH}_4/\text{CO}_2$  и  $\text{CO}/\text{CO}_2$ , рассчитанные для Санкт-Петербурга с использованием формулы (3), в марте – начале мая 2020 г. составили  $ER_{\text{CH}_4/\text{CO}_2} = 6,4$   $\text{ppbv/ppmv}$  и  $ER_{\text{CO}/\text{CO}_2} = 5,7$   $\text{ppbv/ppmv}$  (табл. 4), что в среднем соответствует уровню 2019 г. [9].

Анализ, проведенный отдельно для трех дней кампании до введения карантина COVID-19 и трех дней во время карантина, показал, что ограничения, введенные 28 марта 2020 г., привели к изменениям структуры выбросов в Санкт-Петербурге. Во время карантина эмиссионное соотношение  $\text{CO}/\text{CO}_2$  упало примерно в два раза по сравнению с докарантинным периодом (с 6,6 до 3,2  $\text{ppbv/ppmv}$ ) (табл. 4). В качестве основной причины предполагается резкое уменьшение транспортной активности в карантинный период, которое привело к существенно большему сокращению выбросов  $\text{CO}$  от автотранспорта по сравнению с  $\text{CO}_2$ .

В последний рабочий день перед введением карантинных ограничительных мер, 27 марта, наблюдалась экстремально высокая загруженность автодорог Санкт-Петербурга. Значение  $ER_{\text{CO}/\text{CO}_2}$  возросло до  $\sim 7,9$   $\text{ppbv/ppmv}$ , что, по нашему мнению,

Таблица 4

Эмиссионные соотношения  $ER_{CO/CO_2}$  и  $ER_{CH_4/CO_2}$ , ppb/ppm, для Санкт-Петербурга, полученные в ходе кампаний 2019 и 2020 гг. ( $r$  – коэффициент корреляции между массивами синхронных значений  $\Delta X_{CO_2}$  и  $\Delta X_{CH_4}$  и  $\Delta X_{CO_2}$  и  $\Delta X_{CO}$ ), и литературные данные для Санкт-Петербурга и крупных городов мира

Эмиссионное соотношение	ЕММЕ-2020	Литературные данные	
		Санкт-Петербург	Другие города
$ER_{CH_4/CO_2}$	6,4 ( $r = 0,87$ )	2,8 [18]; 6,8 (ЕММЕ-2019 [9]); 7,8* (Фока, частное сообщение)	Пасадина: 6,65–9,96 [17]; Лондон: 3,9–6,9 [27]; Сан-Франциско: ~ 8,3 [16]; Мюнхен: ~ 3,7 [15]
$ER_{CO/CO_2}$	5,7 ( $r = 0,92$ ); 6,6 ( $r = 0,96$ ) – до карантина; 3,2 ( $r = 0,90$ ) – во время карантина	19,3 [18, 31]; 5,9 (ЕММЕ-2019 [9]); 6,6 [32]; 5,8–42 [21]	Лондон: 1,92–6,6 [27]; Индианаполис: 6–9 [33]; Сеул: 8,4 [30]; Токио: 10,4 [30]; Пекин: 43–48 [30]

\* Результаты локальных измерений концентрации  $CH_4$  и  $CO_2$  на станции атмосферного мониторинга СПбГУ за период 2013–2018 гг.

связано с резким увеличением объемов выбросов  $CO$  автотранспортом и в меньшей степени – с изменениями эмиссии  $CO_2$ .

Результаты измерений 27 марта 2020 г. в двух подветренных точках ЗБ и ЗВ также позволили оценить эмиссионное соотношение  $CH_4/CO_2$ , характерное для атмосферных выбросов ЗМПБО:  $ER_{CH_4/CO_2} = \sim 17$  ppbv/ppmv, что в  $\sim 2,5$  раза выше средних значений  $ER_{CH_4/CO_2}$ , зарегистрированных в шлейфе Санкт-Петербурга в течение кампаний 2019 и 2020 гг. В работе [29] представлены экспериментальные оценки выбросов  $CH_4$  и  $CO_2$  на трех крупных полигонах захоронения твердых бытовых отходов в окрестностях Санкт-Петербурга (Горелово, Северная Самарка и Новоселки). Результаты этого исследования, основанные на измерениях концентрации газов в приземном слое атмосферы по периметру полигонов, показывают, что диапазон значений  $ER_{CH_4/CO_2}$  для этих полигонов может составлять от  $\sim 150$  до  $\sim 780$  ppbv/ppmv. Самые высокие значения  $\sim 780$  ppbv/ppmv получены для свалки в Горелово, возраст которой на момент эксперимента (2001 г.) составлял около 30 лет. Здесь необходимо подчеркнуть, что современные предприятия по механизированной переработке бытовых отходов, каким является ЗМПБО, существенно отличаются от крупных старых полигонов по захоронению твердых бытовых отходов, где отходы накапливались не одно десятилетие при практически полном отсутствии технологических процессов сортировки и переработки.

Средние значения  $ER_{CH_4/CO_2}$  и  $ER_{CO/CO_2}$  для Санкт-Петербурга, полученные по данным ЕММЕ-2020, согласуются как с результатами наших более ранних исследований (см. предпоследний столбец табл. 4), так и с оценками  $ER_{CH_4/CO_2}$  и  $ER_{CO/CO_2}$  для крупнейших городов мира (см. последний столбец табл. 4). В то же время имеется значительное расхождение результатов экспериментов с эмиссионными соотношениями, полученными по официальным

данным о выбросах Санкт-Петербурга ( $ER_{CH_4/CO_2} = 2,8$  ppbv/ppmv и  $ER_{CO/CO_2} = 19,3$  ppbv/ppmv), что может свидетельствовать о несогласованности официальных данных о выбросах  $CO_2$ ,  $CH_4$  и  $CO$  в атмосферу.

Согласно выводам, сделанным в работе [30], соотношение  $ER_{CO/CO_2}$  является характерным не только для определенного исследуемого мегаполиса, но также может быть экстраполировано на структуру выбросов для всей страны в целом. Авторы [30] отмечают, что более низкие значения соотношения  $ER_{CO/CO_2} < 14$  ppbv/ppmv наблюдаются для развитых мировых экономик (например, ФРГ и Великобритания), в то время как более высокие  $ER_{CO/CO_2} > 17$  ppbv/ppmv – для мегаполисов в развивающихся странах (например, Индия, Китай, Аргентина и др.). По данным [30], в число городов с наименьшими значениями  $ER_{CO/CO_2}$  в пределах  $\sim 5,3$ – $8,4$  ppbv/ppmv вошли Сеул, Москва, Лондон, Эссен. Полученные нами средние оценки  $ER_{CO/CO_2} = 5,7$ – $5,9$  ppbv/ppmv для Санкт-Петербурга по результатам измерительных кампаний ЕММЕ 2019 и 2020 гг., лежат в указанном диапазоне наименьших значений  $ER_{CO/CO_2}$ , характерных для развитых мировых экономик.

## Заключение

С целью получения экспериментальных оценок выбросов парниковых газов с территории Санкт-Петербургской агломерации был предложен оригинальный комплексный подход, основанный на измерениях общего содержания  $CH_4$  и  $CO_2$  с наветренной и подветренной сторон города. Его реализация при проведении мобильных измерительных кампаний ЕММЕ 2019 и 2020 позволила получить следующие результаты:

1. Средние значения антропогенных добавок  $\Delta X_{CO_2}$  и  $\Delta X_{CH_4}$ , обусловленных выбросами с территории Санкт-Петербурга, составили  $\sim 1,07$  ppmv

и ~6,61 ppbv соответственно. Максимальные единичные значения  $\Delta X_{\text{CO}_2}$  и  $\Delta X_{\text{CH}_4}$  были получены:

– 25 апреля 2019 г., когда в Санкт-Петербурге наблюдались высокие уровни загрязнений, вызванные близкими к штилевым погодными условиями. Пиковые значения  $\Delta X_{\text{CO}_2} = 4,46$  ppmv и  $\Delta X_{\text{CH}_4} = 51,7$  ppbv;

– 27 марта 2020 г. в измерениях на подветренной границе ЗМПБО, когда максимальные разовые  $\Delta X_{\text{CO}_2}$  и  $\Delta X_{\text{CH}_4}$  составили 2,07 ppmv и 16,9 ppbv соответственно.

2. Средние значения эмиссионных соотношений  $\text{CH}_4/\text{CO}_2$  и  $\text{CO}/\text{CO}_2$  для Санкт-Петербурга в марте-апреле 2020 г. составили 6,4 и 5,7 ppbv/ppmv, что в целом соответствует уровню 2019 г.

3. Карантинные ограничения (COVID-19), введенные 28 марта 2020 г., оказали влияние на структуру выбросов Санкт-Петербурга. Значения  $ER_{\text{CO}_2/\text{CO}_2}$  упали приблизительно в два раза (с 6,6 до 3,2 ppbv/ppmv) по сравнению с докарантинным периодом. Основная причина – резкое снижение транспортной активности, что привело к значительному уменьшению выбросов CO.

4. Экспериментальные (top-down) оценки средних удельных потоков парниковых газов для территории Санкт-Петербургской агломерации составили:  
–  $F_{\text{CO}_2} = 72 \pm 24$  кт · км<sup>-2</sup> · год<sup>-1</sup> и  $F_{\text{CH}_4} = 198 \pm 152$  т · км<sup>-2</sup> · год<sup>-1</sup> для ЕММЕ-2020;

–  $F_{\text{CO}_2} = 80 \pm 27$  кт · км<sup>-2</sup> · год<sup>-1</sup> и  $F_{\text{CH}_4} = 161 \pm 110$  т · км<sup>-2</sup> · год<sup>-1</sup> для ЕММЕ-2019 и 2020.

5. Экспериментальные оценки потоков  $F_{\text{CO}_2}$  и  $F_{\text{CH}_4}$  существенно выше официальных кадастровых данных о выбросах CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> с территории Санкт-Петербурга. Имеется также значительное расхождение экспериментальных значений  $ER_{\text{CH}_4/\text{CO}_2}$  и  $ER_{\text{CO}/\text{CO}_2}$  с эмиссионными соотношениями, полученными по официальным данным о выбросах Санкт-Петербурга, что может свидетельствовать о несогласованности официальных данных о выбросах CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> и CO в атмосферу.

6. Период «март – начало мая», выбранный для проведения кампаний ЕММЕ, является оптимальным: оценки потока CO<sub>2</sub> ( $F_{\text{CO}_2}$ ) за данный период могут служить достаточно точной оценкой среднегодового потока  $F_{\text{ann\_CO}_2}$  с территории Санкт-Петербургской агломерации. Согласно данным Carbon Monitor Cities погрешность оценки среднегодового потока  $F_{\text{ann\_CO}_2}$  при таком подходе не превышает 3,5% для 2019–2020 гг.

**Благодарности.** В измерительных кампаниях ЕММЕ было задействовано оборудование РЦ «Гео-модель» Научного парка СПбГУ.

Авторы благодарят А.В. Поберовского, Я.А. Виrolайнен, К.А. Шпак, Н.А. Зайцева, Е. Бирюкова, К. Альберти, Ф. Хаза за участие в измерительных кампаниях 2019 и 2020 гг. Авторы выражают благодарность NOAA ARL за предоставление модели переноса и рассеяния HYSPLIT и веб-сайта READY (<http://www.ready.noaa.gov>).

**Финансирование.** Исследование выполнено при поддержке РФФИ (грант № 24-27-00033, <https://rscf.ru/project/24-27-00033/>).

## Список литературы

1. WMO. Greenhouse Gas Bulletin. No. 18. 26 October 2022. URL: <https://library.wmo.int/idurl/4/58743> (last access: 22.02.2024).
2. Ciais P., Crisp D., Gon H.V.D., Engelen R., Heimann M., Janssens-Maenhout G., Rayner P., Scholze M. Towards a European Operational Observing System to Monitor Fossil CO<sub>2</sub> Emissions – Final Report from the Expert Group. European Commission, 2015. URL: [https://www.copernicus.eu/sites/default/files/2019-09/CO2\\_Blue\\_report\\_2015.pdf](https://www.copernicus.eu/sites/default/files/2019-09/CO2_Blue_report_2015.pdf) (last access: 22.02.2024).
3. Babenhauserheide A., Hase F., Morino I. Net CO<sub>2</sub> fossil fuel emissions of Tokyo estimated directly from measurements of the Tsukuba TCCON site and radiosondes // Atmos. Meas. Tech. 2020. V. 13. P. 2697–2710. URL: <https://doi.org/10.5194/amt-13-2697-2020>.
4. Che K., Cai Zh., Liu Y., Wu L., Yang D., Chen Y., Meng X., Zhou M., Wang J., Yao L., Wang P. Lagrangian inversion of anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions from Beijing using differential column measurements // Environ. Res. Lett. 2022. V. 17, N 7. 075001. DOI: 10.1088/1748-9326/ac7477.
5. Hase F., Frey M., Blumenstock T., Groß J., Kiel M., Kohlhepp R., Mengistu Tsidu G., Schäfer K., Sha M.K., Orphal J. Application of portable FTIR spectrometers for detecting greenhouse gas emissions of the major city Berlin // Atmos. Meas. Tech. 2015. V. 8. P. 3059–3068. URL: <https://doi.org/10.5194/amt-8-3059-2015>.
6. Ohyama H., Frey M.M., Morino I., Shiomi K., Nishihashi M., Miyauchi T., Yamada H., Saito M., Wakasa M., Blumenstock T., Hase F. Anthropogenic CO<sub>2</sub> emission estimates in the Tokyo metropolitan area from ground-based CO<sub>2</sub> column observations // Atmos. Chem. Phys. 2023. V. 23. P. 15097–15119.
7. Vogel F.R., Frey M., Staufner J., Hase F., Broquet G., Xueref-Remy I., Chevallier F., Ciais P., Sha M.K., Chelin P., Jeseck P., Janssen C., Té Y., Groß J., Blumenstock T., Tu Q., Orphal J. XCO<sub>2</sub> in an emission hotspot region: The COCCON Paris campaign 2015 // Atmos. Chem. Phys. 2019. V. 19. P. 3271–3285.
8. Zhao X., Marshall J., Hachinger S., Gerbig C., Frey M., Hase F., Chen J. Analysis of total column CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> measurements in Berlin with WRF-GHG // Atmos. Chem. Phys. 2019. V. 19. P. 11279–11302.
9. Makarova M.V., Alberti C., Ionov D.V., Hase F., Foka S.C., Blumenstock T., Warneke T., Virolainen Y.A., Kostsov V.S., Frey M., Poborovskii A.V., Timofeyev Y.M., Paramonova N.N., Volkova K.A., Zaitsev N.A., Biryukov E.Y., Osipov S.I., Makarov B.K., Polyakov A.V., Ivakhov V.M., Imhasin H.Kh., Mikhailov E.F. Emission Monitoring Mobile Experiment (EMME): An overview and first results of the St. Petersburg megacity campaign 2019 // Atmos. Meas. Tech. 2021. V. 14. P. 1047–1073.
10. 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. V. 21. P. 10939–10963.

11. Draxler R.R., Hess G.D. An overview of the HYSPLIT\_4 modelling system for trajectories, dispersion, and deposition // *Aust. Meteor. Mag.* 1998. V. 47. P. 295–308.
12. 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.* V. 96. P. 2059–2077.
13. Frey M., Sha M.K., Hase F., Kiel M., Blumenstock T., Harig R., Surawicz G., Deutscher N.M., Shiomi K., Franklin J.E., Bösch H., Chen J., Grutter M., Ohyama H., Sun Y., Butz A., Mengistu Tsidu G., Ene D., Wunch D., Cao Z., Garcia O., Ramonet M., Vogel F., Orphal J. Building the Collaborative Carbon Column Observing Network (COCCON): Long-term stability and ensemble performance of the EM27/SUN Fourier transform spectrometer // *Atmos. Meas. Tech.* 2019. V. 12. P. 1513–1530.
14. de Foy B., Schauer J.J., Lorente A., Borsdorff T. Investigating high methane emissions from urban areas detected by TROPOMI and their association with untreated wastewater // *Environ. Res. Lett.* 2023. V. 18. 044004. DOI: 10.1088/1748-9326/acc118.
15. Chen J., Dietrich F., Franklin J.E., Jones T.S., André B., Luther A., Kleinschek R., Hase F., Wenig M., Ye S., Nouri A., Frey M., Knote C., Alberti C., Wofsy S. Mesoscale column network for assessing GHG and NO<sub>x</sub> emissions in Munich // *EGU General Assembly Conference Abstracts*. 2018. V. 20.
16. Franklin J.E., Jones T.S., Chen J., Parker H., Hedelius J., Wennberg P., Dubey M.K., Cohen Ron C., Gupta A., Sargent M., Davis K.J., Mielke L., Fischer M., Wofsy S. A three-dimensional observation network for determining urban emissions of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> // 2017 North American Carbon Program, North Bethesda, MD, USA, 2017. URL: [https://www.nacarbon.org/meeting\\_2017/abs\\_and\\_discussions/mtg2017\\_ab\\_searchab\\_id161.html](https://www.nacarbon.org/meeting_2017/abs_and_discussions/mtg2017_ab_searchab_id161.html) (last access: 22.02.2024).
17. Chen J., Viatte C., Hedelius J.K., Jones T., Franklin J.E., Parker H., Gottlieb E.W., Wennberg P.O., Dubey M.K., Wofsy S.C. Differential column measurements using compact solar-tracking spectrometers // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16. P. 8479–8498. DOI: 10.5194/acp-16-8479-2016.
18. Серебрицкий И.А. Опыт Санкт-Петербурга в вопросах управления адаптацией к изменениям климата и смягчения антропогенного воздействия на климатическую систему: информационно-аналитическая записка // *Экологический портал Санкт-Петербурга*. СПб., 2024. URL: <https://www.infoeco.ru/index.php?id=8780>.
19. Huo D., Huang X., Dou X., Ciais P., Li Y., Deng Z., Wang Y., Cui D., Benkhelifa F., Sun T., Zhu B., Roest G., Gurney K.R., Ke P., Guo R., Lu C., Lin X., Lovell A., Appleby K., DeCola P.L., Steven J., Davis S.J., Liu Z. Carbon Monitor Cities near-real-time daily estimates of CO<sub>2</sub> emissions from 1500 cities worldwide // *Sci Data*. 2022. V. 9. P. 533. DOI: 10.1038/s41597-022-01657-z.
20. Crippa M., Solazzo E., Huang G., Guizzardi D., Koffi E., Muntean M., Schieberle C., Friedrich R., Janssens-Maenhout G. High resolution temporal profiles in the Emissions Database for Global Atmospheric Research // *Sci Data*. 2020. V. 7. P. 121. DOI: 10.1038/s41597-020-0462-2.
21. Макарова М.В., Арабаджян Д.К., Фока С.Ч., Парамонова Н.Н., Поберовский А.В., Тимофеев Ю.М., Панкратова Н.В., Ракитин В.С. Оценка ночных эмиссий углеродсодержащих газов в пригородах Санкт-Петербурга // *Метеорол. и гидрол.* 2018. № 7. С. 36–44.
22. Макарова М.В., Поберовский А.В., Ягвокина С.В., Кароль И.Л., Лагун В.Е., Парамонова Н.Н., Решетников А.И., Привалов В.И. Исследования процессов формирования поля метана в атмосфере Северо-Западного региона Российской Федерации // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана*. 2006. Т. 42, № 2. С. 237–249.
23. Zinchenko A.V., Paramonova N.N., Privalov V.I., Reshetnikov A.I. Estimation of methane emissions in the St. Petersburg, Russia, region: An atmospheric nocturnal boundary layer budget approach // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107, N D20. P. 4416. DOI: 10.1029/2001JD001369.
24. Font A., Grimmond C.S.B., Kotthaus S., Morgun J.-A., Stockdale C., O'Connor E., Priestman M., Barratt B. Daytime CO<sub>2</sub> urban surface fluxes from airborne measurements, eddy-covariance observations and emissions inventory in Greater London // *Environ. Pollut.* 2015. V. 196. P. 98–106. DOI: 10.1016/j.envpol.2014.10.001.
25. Cheng X.L., Liu X.M., Liu Y.J., Hu F. Characteristics of CO<sub>2</sub> concentration and flux in the Beijing urban area // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2018. V. 123. P. 1785–1801. DOI: 10.1002/2017JD027409.
26. Park C., Jeong S., Park M.S., Yun J., Lee S.-S., Park S.-H. Spatiotemporal variations in urban CO<sub>2</sub> flux with land-use types in Seoul // *Carbon Balance Manag.* 2022. V. 17, N 3. DOI: 10.1186/s13021-022-00206-w.
27. O'Shea S.J., Allen G., Fleming Z.L., Bauguitte S.J.-B., Percival C.J., Gallagher M.W., Lee J., Helfter C., Nemitz E. Area fluxes of carbon dioxide, methane, and carbon monoxide derived from airborne measurements around Greater London: A case study during summer 2012 // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2014. V. 119. P. 4940–4952. DOI: 10.1002/2013JD021269.
28. Zimnoch M., Godłowska J., Necki J.M., Rozanski K. Assessing surface fluxes of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> in urban environment: A reconnaissance study in Krakow, Southern Poland // *Tellus B*. 2010. V. 62. P. 573–580. DOI: 10.1111/j.1600-0889.2010.00489.x.
29. Зинченко А.В., Решетников А.И., Парамонова Н.Н., Привалов В.И., Тимов 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. Труды Научно-исследовательского центра дистанционного зондирования атмосферы (филиала ГГО)*. 2002. Вып. 4. № 552. С. 126–138.
30. Silva S.J., Arellano A.F., Worden H.M. Toward anthropogenic combustion emission constraints from space-based analysis of urban CO<sub>2</sub>/CO sensitivity // *Geophys. Res. Lett.* 2013. V. 40 P. 4971–4976. DOI: 10.1002/grl.50954.
31. Комитет по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности. Доклад об экологической ситуации в Санкт-Петербурге в 2021 году. СПб., 2022. URL: [https://www.gov.spb.ru/static/writable/ckeditor/uploads/2022/06/27/05/%D0%94%D0%BE%D0%BA%D0%BB%D0%B0%D0%B4\\_2022\\_%D1%81%D0%BE%D0%B1%D1%80%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D0%B9.pdf](https://www.gov.spb.ru/static/writable/ckeditor/uploads/2022/06/27/05/%D0%94%D0%BE%D0%BA%D0%BB%D0%B0%D0%B4_2022_%D1%81%D0%BE%D0%B1%D1%80%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D0%B9.pdf) (дата обращения: 22.02.2024).
32. Фока С.Ч., Макарова М.В., Поберовский А.В., Ионов Д.В., Абакумов Е.В. Анализ концентраций углеродсодержащих газов на станции атмосферного мониторинга СПбГУ // *Оптика атмосф. и океана*. 2023. Т. 36, № 11. С. 934–941. DOI: 10.15372/AOO20231109; Foka S.Ch., Makarova M.V., Pobеровsky A.V., Ionov D.V., Abakumov E.V. Analysis of mixing ratios

- of greenhouse carbon-containing gases at the atmospheric monitoring station of St. Petersburg State University // Atmos. Ocean. Opt. 2024. V. 37, N 1. P. 74–81.
33. *Turnbull J., Sweeney C., Karion A., Newberger T., Tans P., Lehman S., Davis K.J., Miles N.L., Richardson S.J., Lauvaux T., Cambaliza M.O., Shepson P., Gurney K., Patarasuk R., Zondervan A.* Towards quantification and source sector identification of fossil fuel CO<sub>2</sub> emissions from an urban area: Results from the INFLUX experiment // J. Geophys. Res.: Atmos. 2015. V. 120. P. 292–312. DOI: 10.1002/2014JD022555.

*M.V. Makarova, S.C. Foka, D.V. Ionov, V.S. Kostsov, V.M. Ivakhov, N.N. Paramonova.* **Characterizing greenhouse gas emissions from the territory of the St. Petersburg agglomeration by the results of the mobile observational campaigns EMME-2019 and EMME-2020.**

St. Petersburg is the second most populous city in the Russian Federation and the fourth in Europe. According to official statistics, ~5.6 million people live in the city permanently. In order to experimentally estimate greenhouse gas emissions from the territory of the St. Petersburg agglomeration, an original combined approach was developed and implemented during EMME-2019 and EMME-2020 observational campaigns. The paper summarizes the results of mobile experiments in 2019 and 2020. It is shown that the period “March – early May”, chosen for the EMME campaigns, is optimal for estimating CO<sub>2</sub> emissions. It was found that the average values of anthropogenic additives caused by emissions from the territory of St. Petersburg are ~1.07 ppmv and ~6.61 ppbv for CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub>, respectively. Experimental estimates of specific greenhouse gas fluxes for the territory of the St. Petersburg agglomeration amounted to 72 kt · km<sup>-2</sup> · year<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub> and 198 t · km<sup>-2</sup> · year<sup>-1</sup> CH<sub>4</sub> for six days of 2020 campaign; 80 kt · km<sup>-2</sup> · year<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub> and 161 t · km<sup>-2</sup> · year<sup>-1</sup> CH<sub>4</sub> for 15 days of campaigns 2019 and 2020. The CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> and CO/CO<sub>2</sub> emission ratios for St. Petersburg in March – early May 2020 averaged 6.4 and 5.7 ppbv/ppmv, respectively. Quarantine restrictions (COVID-19) affected the emission structure of St. Petersburg: a sharp decrease in transport activity led to a significant decrease in CO emissions from motor vehicles.