«Оптика атмосферы и океана», **36**, № 11 (2023)
DOI: 10.15372/AOO20231109

УДК 551.510.42

Анализ концентраций углеродсодержащих газов на станции атмосферного мониторинга СПбГУ

С.Ч. Фока[✉], **М.В. Макарова, А.В. Поберовский, Д.В. Ионов, Е.В. Абакумов***

Санкт-Петербургский государственный университет
199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9

Поступила в редакцию 16.02.2023 г.;
после доработки 13.09.2023 г.;
принята к печати 4.10.2023 г.

С целью исследования временных вариаций концентраций углеродсодержащих газов, а также выявления влияющих на них факторов был проведен анализ локальных измерений концентраций CO_2, CH_4 (январь 2013 г. – январь 2020 г.) и CO (январь 2013 г. – январь 2019 г.) в атмосферном воздухе на станции мониторинга СПбГУ. В анализе учитывались тренд и сезонные осцилляции. Линейные тренды CO_2, CH_4 и CO, которые составили 2,42 ppm/год (0,60%); 8,6 ppb/год (0,49%); –3,8 ppb/год (–2,2%) соответственно, хорошо согласуются с независимыми оценками как глобальных/фоновых изменений, так и изменений на урбанизированных территориях. Анализ эмиссионного соотношения CO/CO_2 подтвердил, что доминирующим антропогенным источником, влияющим на состав атмосферного воздуха в районе станции мониторинга СПбГУ, является автотранспорт. Результаты, представленные в работе, могут быть использованы для валидации атмосферных моделей, а также для независимых оценок потоков парниковых газов.

Ключевые слова: диоксид углерода, метан, монооксид углерода, гармонический анализ, CCGCRV, тренды, эмиссионные соотношения CO/CO_2; carbon dioxide, methane, carbon monoxide, harmonic analysis, CCGCRV, trend, CO/CO_2 emission ratio.

Введение

Одной из причин изменения климата на Земле является увеличение концентраций в атмосферном воздухе термодинамически активных газов, таких как диоксид углерода (CO_2) и метан (CH_4) [1, 2]. Содержание CO_2 в атмосфере зависит от процессов газообмена между различными резервуарами углерода (атмосферой, континентальной экосистемой, гидросферой и литосферой) и некоторыми химическими реакциями, в которых CO_2 – конечный продукт. Такие процессы и реакции образуют глобальный биогеохимический цикл углерода, где кроме CO_2 участвует целый ряд углеродсодержащих газов, в том числе CH_4 и монооксид углерода (CO) [1, 3]. Метан – второй по значимости парниковый газ, потенциал глобального потепления которого в 28 раз больше, чем CO_2 [1]; CO – ядовитый химически активный газ, который при фотохимическом окислении может приводить как к разрушению, так и к образованию тропосферного озона, а также регулирует окислительную способность атмосферы путем реакций с радикалом OH, как и метан [3]. Кроме того, CO часто используется как индикатор происхождения воздушных масс при изучении воздействия антропогенных и природных источников (пожары) на состав атмосферы [2, 3].

В настоящее время на территории России мониторинг атмосферных концентраций парниковых газов осуществляется следующими организациями: 1) Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова (ст. Воейково, Териберка, Тикси, Новый порт) [4]; 2) Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН (в рамках JR-STATION (Japan-Russia Siberian Tall Tower Inland Observation Network)) [5, 6]; 3) Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН в составе ФИЦ «Красноярский научный центр СО РАН» (обсерватория ZOTTO в Красноярском крае) [4, 7, 8]; 4) НПО «Тайфун» (г. Обнинск) [9–11]; 5) Институт глобального климата и экологии им. академика Ю.А. Израэля (Приокско-Террасный биосферный заповедник) [7]; 6) ГПБУ «Мосэкомониторинг» [12].

Большая часть представленных выше станций характеризуется тем, что они находятся на большом удалении от промышленных источников, поэтому измерения концентраций CO_2, CH_4, CO на станции

* Стефани Чарльзовна Фока (s.foka@spbu.ru); Мария Владимировна Макарова (m.makarova@spbu.ru); Анатолий Васильевич Поберовский (a.poberovsky@spbu.ru); Дмитрий Викторович Ионов (d.ionov@spbu.ru); Евгений Васильевич Абакумов (e.abakumov@spbu.ru).

атмосферного мониторинга СПбГУ, расположенной в 35 км на юго-запад от центра Санкт-Петербурга, представляют особый интерес, так как до 70% глобальных антропогенных выбросов приходится именно на мегаполисы [13]. Кроме того, такой мониторинг является одним из важнейших элементов успешного функционирования национальной сети карбоновых полигонов [14], поскольку позволяет сделать независимые оценки потоков парниковых газов [15]. Предполагается, что станция СПбГУ, расположенная на границе Ленинградской области и Санкт-Петербурга, будет входить в состав планируемого карбонового полигона «Ладога» [16].

Цель настоящей работы – анализ результатов измерений концентраций углеродсодержащих газов CO_2, CH_4 (январь 2013 г. – январь 2020 г.) и CO (январь 2013 г. – январь 2019 г.) для изучения их временной изменчивости.

Материалы и методы исследования

Станция атмосферного мониторинга находится в зданиях физического факультета СПбГУ в Старом Петергофе (59,88° с.ш., 29,83° в.д., 40 м н.у.м.) (Ресурсный центр СПбГУ «Геомодель») [17]. Она располагается на расстоянии 3 км от Финского залива на террасированной равнине между берегом Финского залива и Балтийско-Ладожским уступом [18]. Основные антропогенные источники CO_2, CH_4 и CO вблизи станции – газораспределительные системы, жилые массивы, транспорт и очистные сооружения; естественные источники – долгомошные и сфагновые еловые леса (CO_2 и CO), заболоченная местность (CH_4) [18, 19]. На территории преобладают юго-юго-западные – западо-юго-западные ветры (30%) (рис. 1). Центральная часть города, расположенная к востоку от станции, является самым мощным антропогенным источником, однако восточные ветры, приносящие воздушные массы из города, наблюдаются реже (20%). Штилевые условия на станции довольно редки, скорость ветра менее 1 м/с встречается в 8% случаев. Большую часть времени скорость ветра превышает 1 м/с: от 1 до 3 м/с – 55%, от 3 до 5 м/с – 29%, выше 5 м/с – 8% (рис. 1) [20]. Высокие концентрации анализируемых газов наблюдаются при штилевых и близких к штилевым условиях: > 450 ppm для CO_2; > 4 ppm для CH_4; > 350 ppb для CO.

Стационарные локальные измерения CO_2, CH_4 и CO в атмосферном воздухе осуществляются газоанализаторами Los Gatos Research GGA 24r-EP и Los Gatos Research CO 23r, работа которых основана на методе внеосевой интегральной внутрирезонаторной лазерной спектроскопии [21]. Они удовлетворяют требованиям Всемирной метеорологической организации (ВМО), их случайные погрешности, осредненные за 5–100 с, составляют 150–50 ppb для CO_2 и 1–0,3 ppb для CH_4; 0,15–0,05 ppb для CO при усреднении 1–180 с [15]. Высокая точность получаемых данных обеспечивается еженедельной калибровкой газоанализаторов относительно рабо-

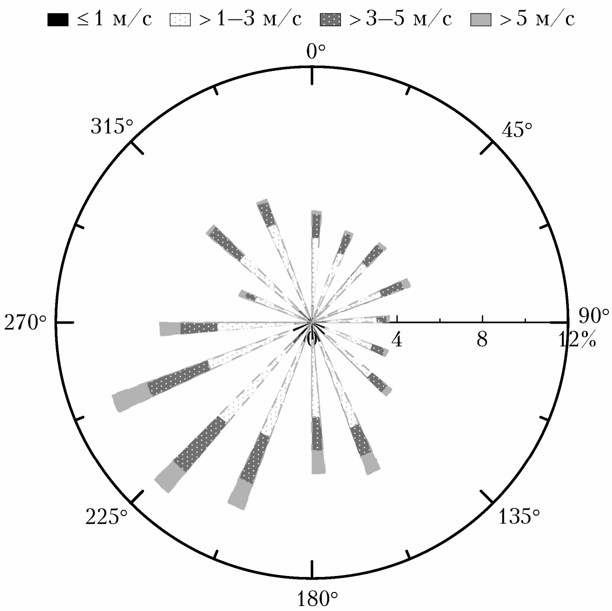

Рис. 1. Роза ветров для станции атмосферного мониторинга СПбГУ

чего стандарта, подготовленного ФГБУ «ГГО» с помощью первичного лабораторного стандарта из центральной калибровочной лаборатории ВМО.

Результаты и обсуждение

Временная изменчивость концентраций газов по данным локальных измерений

Непрерывные локальные измерения приземных концентраций CO_2, CH_4 и CO проводились с помощью газоанализаторов начиная с января 2013 г. В нашей ранней работе [22] был представлен анализ концентраций всех трех газов с января 2013 г. по январь 2019 г., в настоящей работе анализируются концентрации CO_2, CH_4 с января 2013 г. по январь 2020 г. (шесть полных лет) и концентрации CO с января 2013 г. по январь 2019 г. (пять полных лет) с учетом сезонных осцилляций.

При анализе многолетних тенденций часто используются концентрации исследуемых газов в периоды дневных минимумов, когда обычно наблюдается развитый пограничный слой атмосферы, воздух в котором хорошо перемешан и влияние локальных источников сведено к минимуму [23]. Для каждой наблюдательной станции период дневных минимумов индивидуален и зависит от ее географического местоположения. Приведем примеры таких периодов для различных станций: 1) с 15:00 до 17:00 по местному времени, Канада [24]; 2) с 13:00 до 16:00, Япония [25]; 3) с 13:00 до 17:00, Западная Сибирь [6]; 4) с 12:00 до 17:00, Франция [26].

Наиболее подходящим газом для определения периода дневных минимумов для ст. СПбГУ является метан, интенсивность источников и стоков которого, по сравнению с CO_2 и CO, в меньшей степени подвержена суточным вариациям. На дневную изменчивость концентраций CO_2 (в летнее время) существенным образом влияют процессы фотосинтеза и дыхания экосистем, а суточный ход концентрации CO определяется антропогенными источниками. С учетом результатов работы [27] нами рассматривались суточные вариации концентраций CH_4 в теплые сезоны (май – сентябрь) с 2013 по 2019 г. Было установлено, что в течение всех шести лет измерений дневной минимум концентраций CH_4 наблюдался в период с 15:00 до 20:00. Полученный результат совпадает с временным интервалом, определенным для ст. Воейково (59,95° с.ш., 30,70° в.д.) в 1995–2000 гг. [23].

Для анализа было необходимо провести предварительную обработку результатов измерений. На первом этапе осуществлялась фильтрация данных от случайных промахов, далее рассчитывались дневные медианные и минимальные концентрации CO_2, CH_4 и CO с 15:00 до 20:00 по местному времени. Еще раз подчеркнем, что целесообразность использования единого для всех газов анализируемого периода обусловлена тем, что в этом случае регистрируемые концентрации относятся к одним и тем же воздушным массам/метеорологическим условиям.

Годовые вариации концентраций

Размах годовых дневных медианных и минимальных вариаций концентраций CO_2 (вариант А, табл. 1) составил 27–33 ppm, CH_4 – 36–79 ppb, CO – 63–110 ppb. Сравнив полученные значения А и размах годовых вариаций суточных медианных и минимальных концентраций [22] (вариант Б, табл. 1), легко заметить, что разброс значений Б для некоторых газов больше, чем значений А.

Разницу между А и Б можно объяснить несколькими причинами: 1) величины А получены при изучении фоновых значений с 15:00 до 20:00, когда воздух хорошо перемешан и влияние источников сведено к минимуму; 2) в случае Б рассматривались не только фоновые, а все результаты измерений, например в январе 2016 г., когда из-за низких температур и штилевых условий наблюдались высокие концентрации всех трех газов [22]. Таким образом, значения Б отражают также влияние антропогенных источников.

Для CO_2 значения А и Б сопоставимы как между собой, так и со значениями в других точках: Тикси [4], Обнинск [9], Польша [28], северо-запад Франции (СЗФ) [26], Западная Сибирь [5]. Для CH_4 разница между А и Б существенна, значения Б могут в шесть раз превышать значения А. При этом размах годовых вариаций (Б) на нашей станции сопоставим с размахом годовых вариаций в Обнинске [10], Западной Сибири, на СЗФ и в Польше. Для CO разница также заметна: значения Б могут быть примерно в два раза больше, чем А. Полученные значения размаха годовых вариаций А сопоставимы со значениями для Обнинска [11], СЗФ [26], но меньше в 1,5–2 раза значений для Польши [28].

Анализ трендов концентраций газов

Анализ трендов концентраций на станции СПбГУ был представлен в работе [22], где анализируются данные за 2013–2018 гг. для CO_2, CH_4 и за 2013–2017 гг. – для CO (табл. 2).

Таблица 1

Размах годовых вариаций концентраций CO_2, CH_4 и CO

Газ	А	Б [22]	Тикси, 2010–2017 гг. [4]	Западная Сибирь, 2001–2008 гг. [5]	Обнинск, 1998–2014 гг. [9, 10, 11]	СЗФ, 2011–2018 гг. [26]	Польша, 2005–2008 гг. [28]
CO_2, ppm	27–33	19,6–37,4	34,4–47,6	22–24	22	21	21–25
CH_4, ppb	36–79	24–248	–	100–250	112	70	64–88
CO, ppb	63–110	76–186	–	–	102	80–90	130–200

Таблица 2

Линейные тренды суточных и дневных медианных и минимальных концентраций CO_2, CH_4 и CO и их стандартные ошибки

Газ, ед. измерения	Линейный тренд 2013–2018 гг. (CO_2, CH_4), 2013–2017 гг. (CO) [22]		Линейный тренд + сезонные осцилляции 2013–2019 гг. (CO_2, CH_4), 2013–2017 гг. (CO)				NOAA global [32, 33], Global [34]	СЗФ 2011–2018 гг. [26]	Москва 2005–2014 гг. [12]	РФ 07.2010–06.2018 гг. [35]
			Метод ЛС		Метод CCGCRV					
	мед	мин	мед	мин	мед	мин				
CO_2, ppm/год	2,43	–	$2{,}37 \pm 0{,}12$ (0,59%)	$2{,}34 \pm 0{,}12$ (0,58%)	$2{,}42 \pm 0{,}05$ (0,60%)	$2{,}36 \pm 0{,}05$ (0,59%)	2,47	2,35	–	–
CH_4, ppb/год	9,6	8,8	$8{,}6 \pm 0{,}6$ (0,49%)	$8{,}8 \pm 0{,}5$ (0,50%)	$8{,}6 \pm 0{,}4$ (0,49%)	$8{,}8 \pm 0{,}3$ (0,51%)	8,7	8,85	–	–
CO, ppb/год	–6,0	–3,2	$-3{,}6 \pm 0{,}9$ (–2,1%)	$-1{,}4 \pm 0{,}5$ (–0,5%)	$-3{,}8 \pm 0{,}2$ (–2,2%)	$-1{,}0 \pm 0{,}2$ (–0,3%)	–1,1%	–0,22	–3,6%	–0,66%

Примечание. В скобках указана скорость роста концентрации.

В отличие от настоящей работы, в статье [22] были представлены полные массивы данных (суточные медианные и минимальные), а сам анализ трендов проводился более простым методом (линейная регрессия без учета гармонических функций). В этой работе анализировались дневные медианные и минимальные значения CO_2, CH_4 за 2013–2019 гг. и CO за 2013–2017 гг. Кроме того, для анализа длительных наблюдений использовались тренд и сезонные осцилляции.

Результаты, представленные в ряде работ, показывают, что для других станций исследователи привлекали различный набор гармоник [9–11, 29]. В [29] учитывались годовая и полугодовая гармоники, в [9–11] – либо все полученные гармоники (от 3- до 126-месячной), либо только часть в зависимости от того, какие характеристики анализировались (минимальные, сглаженные фоновые или сезонные).

С целью оценки тренда концентраций CO_2, CH_4 и CO была проведена интерполяция рядов данных газов с учетом результатов гармонического анализа методом Ломба–Скаргла (ЛС) [30], в результате которого было получено, что наиболее значима годовая гармоника. Формула для аппроксимации рядов имеет вид

$$y(t) = A + Bt + C\cos(2\pi f_1 t) + D\sin(2\pi f_1 t), \qquad (1)$$

где t – время, дни; $A + Bt$ – линейный тренд; f_1 – частота (годовая гармоника); C, D – константы для каждой рассматриваемой частоты осцилляции.

Коэффициенты A, B, C и D в уравнении (1) определялись методом наименьших квадратов (МНК) [29]. Так, B – это наклон линейного тренда для анализируемых рядов концентраций CO_2, CH_4 и CO.

Поскольку в работе использовались совместно методы ЛС и МНК, то далее будем упоминать их как метод ЛС.

Для сравнения мы приводим данные программы CCGCRV [4, 26], в которой реализован метод Thoning et al. [31] (далее метод CCGCRV) (см. табл. 2).

Углекислый газ. Для оценки трендов концентрации CO_2 рассматривались массивы медианных и минимальных дневных значений концентрации CO_2 (таким же образом рассматривались CO и CH_4). По методу ЛС скорость роста медианных дневных концентраций CO_2 на ст. СПбГУ в 2013–2019 гг. составила $2{,}37 \pm 0{,}12$ ppm/год (0,59%/год), минимальных – $2{,}34 \pm 0{,}12$ ppm/год (0,58%/год); по методу CCGCRV – медианных – $2{,}42 \pm 0{,}05$ ppm/год (0,60%/год), минимальных – $2{,}36 \pm 0{,}05$ ppm/год (0,59%/год) (рис. 2, табл. 2). В обоих случаях мы получили, что скорость роста медианных значений больше скорости роста минимальных значений, что, предположительно, объясняется более быстрым увеличением интенсивности локальных и мезомасштабных источников в районе ст. СПбГУ по сравнению с региональными и глобальными источниками. При этом скорость роста в этот же период в глобальном масштабе (среднее значение для станций NOAA, табл. 2) составила 2,47 ppm/год [32], что сопоставимо с полученными нами медианными значениями, а скорость роста, полученная на СЗФ за 2011–2018 гг. (табл. 2), сопоставима с минимальными значениями на станции – 2,35 ppm/год [26].

Метан. По методу ЛС скорость роста медианных значений CH_4 на нашей станции составила $8{,}6 \pm 0{,}6$ ppb/год (0,49%/год), минимальных – $8{,}8 \pm 0{,}5$ ppb/год (0,50%/год); по методу CCGCRV – медианных – $8{,}6 \pm 0{,}4$ ppb/год (0,49%/год), минимальных – $8{,}8 \pm 0{,}3$ ppb/год (0,51%/год) (рис. 2, табл. 2). В обоих случаях скорость роста минимальных значений больше скорости роста медианных значений, что, предположительно, объясняется более быстрым увеличением интенсивности региональных и глобальных источников. Тренд минимальных значений хорошо сопоставим как с изменениями концентрации метана в глобальном масштабе – по данным сети NOAA концентрация метана изменялась со скоростью 8,7 ppb/год [33], так и с результатами, полученными на СЗФ, где тренд CH_4 составил 8,85 ppb/год [26].

Монооксид углерода. Скорость изменения концентрации CO за весь период (2013–2017 гг.) отрицательная: по методу ЛС она составила $-3{,}6 \pm 0{,}9$ ppb/год (–2,1%/год) для медианных; $-1{,}4 \pm 0{,}5$ ppb/год (–0,5%/год) для минимальных значений (рис. 2, табл. 2); по методу CCGCRV – $-3{,}8 \pm 0{,}2$ ppb/год (–2,2%/год) для медианных, $-1{,}0 \pm 0{,}2$ ppb/год (0,3%/год) для минимальных значений (рис. 2, табл. 2). Оба метода дали близкие результаты, при этом тренд разности медианных и минимальных значений составил –2,2 ppb/год (ЛС) и –2,8 ppb/год (CCGCRV), что свидетельствует о постепенном понижении уровня загрязнения городской атмосферы монооксидом углерода, связанным с обновлением автопарка в Санкт-Петербурге. Изменение минимальных значений сопоставимо с изменением концентрации газа в глобальном масштабе (Global), –1,1%/год (2002–2011 гг.) [34], а также с изменением концентрации CO в России с июля 2010 по июнь 2018 г. (РФ, табл. 2), тренд которой составил –0,66%/год [35]. Несмотря на хорошее согласие наших результатов по CO_2 и CH_4 с данными станции во Франции, тренд минимальных значений CO на ст. СПбГУ более выражен, тогда как на ст. СЗФ тренд концентрации CO составил –0,22 ppb/год [26]. Тренд CO по медианным значениям близок к результатам, полученным в Москве за 2005–2014 гг. (см. табл. 2), –3,6%/год [12].

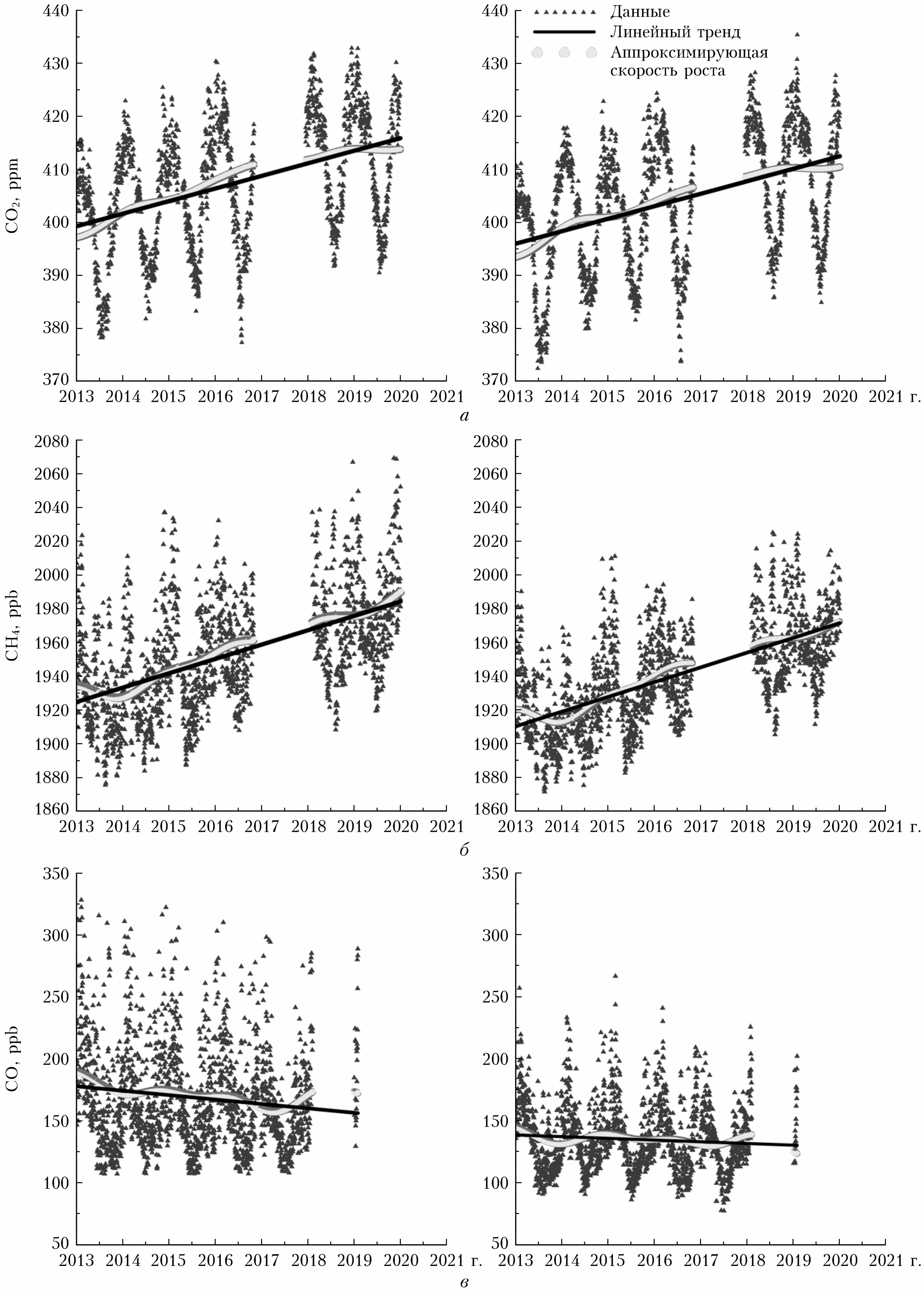

Рис. 2. Медианные (левый столбик) и минимальные дневные (правый столбик) концентрации CO_2 (*а*), CH_4 (*б*) с января 2013 г. по январь 2020 г. и CO (в) с января 2013 г. по январь 2019 г.; их тренды с учетом осцилляции; аппроксимирующая функция скорости роста

Эмиссионное соотношение CO/CO_2

Один из способов определения типа источников, характерных для местности, — расчет эмиссионного соотношения r. Это возможно в том случае, если рассматриваются газы с общими источниками, например CO и CO_2. Для нахождения величины r использовалось отношение измеренных превышений концентрации CO (ΔCO, ppb) и CO_2 (ΔCO_2, ppm) относительно фонового уровня:

$$r = \Delta CO/\Delta CO_2. \quad (2)$$

По причине того, что в теплое время года существенное влияние на концентрации газов, кроме антропогенных источников, могут оказывать и естественные источники, мы рассматривали лишь массив данных за зимний период, для которого характерно доминирующее влияние антропогенных эмиссий. При рассмотрении массива данных за несколько лет (2013–2019 гг.) среднее $r_{CO/CO_2} = 6{,}5 \pm \pm 1{,}4$ ppb/ppm.

Ранее в работе [15] был проведен анализ эмиссионного соотношения r для ст. СПбГУ по эпизодам ночного накопления. Результат, полученный в настоящей работе, сравним с данными, опубликованными в вышеупомянутой статье (r = 8–24) [15]. Значения r для станции СПбГУ соответствуют эмиссионным соотношениям, характерным для выбросов автотранспорта (5,68–10,84) [36]. Они также аналогичны величинам, полученным при антропогенных загрязнениях, например зимой в Индианаполисе (7 ± 1) [37], Швейцарии (7,3 ± 0,1) [38] и Сеуле (9,1) [39]. Таким образом, наши результаты подтверждают, что автотранспорт является доминирующим антропогенным источником, влияющим на состав атмосферного воздуха в районе станции мониторинга СПбГУ. Полученные данные применяются при оценке эмиссий углеродсодержащих газов с территории Санкт-Петербурга.

Заключение

В настоящей работе проведен анализ результатов измерений концентрации углеродсодержащих газов CO_2, CH_4 с января 2013 г. по январь 2020 г. и CO с января 2013 г. по январь 2019 г. на станции атмосферного мониторинга СПбГУ. Анализ дневных медианных и минимальных значений с учетом сезонных осцилляций в виде одной годовой гармоники позволил улучшить точность полученных величин. Размах годовых вариаций концентраций CO_2 составил 27–33 ppm, CH_4 — 36–79 ppb, CO — 63–110 ppb. По методу ЛС медианные значения их линейных трендов составили: 2,37 ± 0,12 ppm/год, 8,6 ± 0,6 ppb/год, –3,6 ± 0,9 ppb/год соответственно, а минимальные значения линейных трендов — 2,34 ± 0,12 ppm/год, 8,8 ± 0,5 ppb/год, –1,4 ± ± 0,5 ppb/год соответственно. Медианные значения линейных трендов CO_2, CH_4 и CO, найденные методом CCGCRV, составили 2,42 ± 0,05 ppm/год, 8,6 ± 0,4 ppb/год, –3,8 ± 0,2 ppb/год соответственно, а их минимальные значения — 2,36 ± ± 0,05 ppm/год, 8,8 ± 0,3 ppb/год, –1,0 ± 0,2 ppb/год соответственно. Все оценки трендов, полученные методами ЛС и CCGCRV, сопоставимы в пределах погрешности. Линейные тренды для станции атмосферного мониторинга СПбГУ с учетом погрешности сопоставимы со значениями трендов, представленными в литературе, как глобальных/фоновых изменений, так и изменений на урбанизированных территориях.

Среднее значение эмиссионного соотношения r_{CO/CO_2}, оцененное по измерениям CO и CO_2 в зимнее время (январь 2013 г. — январь 2019 г.), составило 6,5 ± 1,4 ppb/ppm. Анализ этого соотношения подтвердил, что доминирующим антропогенным источником, влияющим на состав атмосферного воздуха в районе станции мониторинга СПбГУ, является автотранспорт.

Финансирование. Измерения выполнены на оборудовании РЦ СПбГУ «Геомодель». Исследования проведены при финансовой поддержке СПбГУ (грант № GZ_MDF_2023-1, ID pure 101662710).

Список литературы

1. *Hodnebrog Ø., Aamaas B., Fuglestvedt J.S., Marston G., Myhre G., Nielsen C.J., Sandstad M., Shine K.P., Wallington T.J.* Updated global warming potentials and radiative efficiencies of halocarbons and other weak atmospheric absorbers // Rev. Geophys. 2020. V. 58. P. e2019RG000691.
2. *WMO* Greenhouse Gas Bulletin. No. 17, 25 October 2021 [Electronic resource]. URL: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10904 (last access: 29.11.2022).
3. *Sun Y., Yin H., Cheng Y., Zhang Q., Zheng B., Notholt J., Lu X., Liu C., Tian Y., Liu J.* Quantifying variability, source, and transport of CO in the urban areas over the Himalayas and Tibetan Plateau // Atmos. Chem. Phys. 2021. V. 21. P. 9201–9222.
4. *Ивахов В.М., Парамонова Н.Н., Привалов В.И., Зинченко А.В., Лоскутова М.А., Макштас А.П., Кустов В.Ю., Лаурила Т., Аурела М., Асми Э.* Атмосферная концентрация диоксида углерода на станциях Тикси и Мыс Баранова в 2010–2017 гг. // Метеорол. и гидрол. 2019. № 4. С. 110–121.
5. *Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Inoue G., Максютов Ш.Ш., Machida T., Фофонов А.В.* Пространственная и временная изменчивость концентрации CO_2 и CH_4 в приземном слое воздуха на территории Западной Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 2. С. 183–192; *Arshinov M.Yu., Belan B.D., Davydov D.K., Inouye G., Maksyutov Sh., Machida T., Fofonov A.V.* Vertical distribution of greenhouse gases above Western Siberia by the long-term measurement data // Atmos. Ocean. Opt. 2009. V. 22, N 3. P. 316–324.
6. *Sasakawa M., Machida T., Tsuda N., Arshinov M., Davydov D., Fofonov A., Krasnov O.* Aircraft and tower measurements of CO_2 concentration in the planetary boundary layer and the lower free troposphere over southern taiga in West Siberia: Long-term records from 2002 to 2011 // J. Geophys. Res.: Atmos. 2013. V. 118, N 16. P. 9489–9498.

7. *Доклад* об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год. URL: https://cc.voeikovmgo.ru/images/sobytiya/2022/03/doklad_klimat2021.pdf (дата обращения: 29.11.2022).
8. *Urban A.V., Prokushkin A.S., Korets M.A., Panov A.V., Gerbig Ch., Heimann M.* Influence of the underlying surface on greenhouse gas concentrations in the atmosphere over Central Siberia // Geo. Nat. Resour. 2019. V. 40. P. 221–229.
9. *Арефьев В.Н., Каменоградский Н.Е., Кашин Ф.В., Шилкин А.В.* Фоновая составляющая концентрации двуокиси углерода в приземном воздухе (станция мониторинга «Обнинск») // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50, № 6. С. 655–662.
10. *Арефьев В.Н., Акименко Р.М., Кашин Ф.В., Упэнэк Л.Б.* Фоновая составляющая концентрации метана в приземном воздухе (станция мониторинга «Обнинск» // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52, № 1. С. 42–50.
11. *Кашин Ф.В., Арефьев В.Н., Сизов Н.И., Акименко Р.М., Упэнэк Л.Б.* Фоновая составляющая окиси углерода в приземном воздухе (станция мониторинга «Обнинск») // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52, № 3. С. 281–287.
12. *Elansky N.F., Kouznetsov R.D., Verevkin Y.M., Ponomarev N.A., Rakitin V.S., Shilkin A.V., Semutnikova E.G., Zakharova P.V.* Time variations in the concentration of pollutants in the atmosphere over Moscow and estimation of their emissions // IOP Conference Series: Earth Environ. Sci. 2019. V. 231, N 1. P. 012014.
13. *UN-Habitat* [Electronic resource]. URL: https://unhabitat.org/sites/default/files/2020/06/ndc_guide_19062020.pdf (last access: 29.11.2022).
14. *Карбоновые* полигоны Российской Федерации [Electronic resource]. URL: https://carbon-polygons.ru/ (дата обращения: 29.11.2022).
15. *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 углеродосодержащих газов в пригородах Санкт-Петербурга // Метеорол. и гидрол. 2018. № 7. С. 36–44.
16. *Makarova M.V., Abakumov E.V., Shevchenko E.V., Paramonova N.N., Pakhomova N.A. Lvova N.V., Vetrova M.A., Foka S.C., Guzov I.N., Ivakhov V.M., Ionov D.V., Khoroshavin A.V., Kostsov V.S., Mikushev S.V., Mikhailov E.F., Pavlovsky A.A., Titov V.O.* From carbon polygon to carbon farm: The potential and ways of developing the sequestration carbon industry in the Leningrad Region and St. Petersburg // Vestnik of Saint Petersburg University. 2023. Earth Sciences. V. 68, N 1. P. 82–102.
17. *Санкт-Петербургский* государственный университет, научный парк ГЕОМОДЕЛЬ: [Electronic resource]. URL: https://researchpark.spbu.ru/equipment-geomodel-rus/1274-geomodel-izmereniye-klimaticheskih-parametrov-atmosferi-rus (дата обращения: 3.04.2023).
18. *АТЛАС* Ленинградской области / гл. ред. Д.А. Субетто. СПб.: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2022. 112 с.
19. *Foka S.C., Makarova M.V., Ionov D.V., Poberovskiy A.V., Paramonova N.N., Ivakhov V.M.* Evaluation of methane emission intensities for agglomeration territory of Saint-Petersburg // Proc. SPIE. 2020. V. 11560, 115602N.
20. *WMO* International Greenhouse Gas Monitoring Symposium – Poster Session: [Electronic resource]. URL: https://filecloud.wmo.int/share/s/U8__ZsYTQFKoH8O1yqF0OA (last access: 3.04.2023).
21. *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. V. 75, N 2. P. 261–265.
22. *Фока С.Ч., Макарова М.В., Поберовский А.В., Тимофеев Ю.М.* Временные вариации концентрации CO_2, CH_4 и CO в пригороде Санкт-Петербурга (Петергоф) // Оптика атмосф. и океана. 2019. Т. 32, № 10. С. 860–866.
23. *Макарова М.В., Поберовский А.В., Яговкина С.В., Кароль И.Л., Лагун В.Е., Парамонова Н.Н., Решетников А.И., Привалов В.И.* Исследование процессов формирования поля метана в атмосфере Северо-Западного региона Российской Федерации // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2006. Т. 42, № 2. С. 237–249.
24. *Higuchi K., Worthy D., Chan D., Shashkov A.* Regional source/sink impact on the diurnal, seasonal and inter-annual variations in atmospheric CO_2 at a boreal forest site in Canada // Tellus B. 2003. V. 55. P. 115–125.
25. *Inoue H.Y., Matsueda H.* Measurements of atmospheric CO_2 from a meteorological tower in Tsukuba, Japan // Tellus. 2001. V. 53B, N 3. P. 205–219.
26. *Conil S., Helle J., Langrene L., Laurent O., Delmotte M., Ramonet M.* Continuous atmospheric CO_2, CH_4, and CO measurements at the Observatoire Pérenne de l'Environnement (OPE) station in France from 2011 to 2018 // Atmos. Meas. Tech. 2019. V. 12. P. 6361–6383.
27. *Арабаджян Д.К., Парамонова Н.Н., Макарова М.В., Поберовский А.В.* Анализ временной изменчивости концентрации метана в атмосфере по данным наземных наблюдений // Вестник Санкт-Петербургского университета. Физика и химия. 2015. Т. 2 (60), № 3. С. 204–215.
28. *Popa M.E., Gloor M., Manning A.C., Jordan A., Schultz U., Haensel F., Seifert T., Heimann M.* Measurements of greenhouse gases and related tracers at Bialystok tall tower station in Poland // Atmos. Meas. Tech. 2010. V. 3. P. 407–427.
29. *Apadula F., Cassardo C., Ferrarese S., Heltai D., Lanza A.* Thirty years of atmospheric CO_2 observations at the Plateau Rosa Station, Italy // Atmosphere. 2019. V. 10, N 7. P. 418.
30. *Scargle J.D.* Studies in astronomical time series analysis. I – Modeling random processes in the time domain // Astrophys. J. Suppl. Ser. 1981. V. 45. P. 1–71.
31. *Thoning K.W., Tans P.P., Komhyr W.D.* Atmospheric carbon dioxide at Mauna Loa Observatory. 2. Analysis of the NOAA GMCC Data, 1974–1985 // J. Geophys. Res. 1989. V. 94, N D6. P. 8549–8565.
32. *Dlugokencky E., Tans P.* Trends in Atmospheric Carbon Dioxide // NOAA/ESRL [Electronic resource]. URL: https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/gl_gr.html (last access: 3.04.2023).
33. NOAA/ESRL [Electronic resource]. URL: https://gml.noaa.gov/ccgg/trends_ch4/ (last access: 3.04.2023).
34. *Yin Y., Chevallier F., Ciais P., Broquet G., Fortems-Cheiney A., Pison I., Saunois M.* Decadal trends in global CO emissions as seen by MOPITT // Atmos. Chem. Phys. 2015. V. 15, N 23. P. 13433–13451.
35. *Buchholz R.R., Worden H.M., Park M., Francis G., Deeter M.N., Edwards D.P., Kulawik S.S.* Air pollution trends measured from Terra: CO and AOD over industrial, fire-prone, and background regions // Rem. Sens. Environ. 2021. V. 256. P. 112275.
36. *Ammoura L., Xueref-Remy I., Gros V., Baudic A., Bonsang B., Petit J.-E., Perrussel O., Bonnaire N.,*

Sciare J., Chevallier F. Atmospheric measurements of ratios between CO_2 and co-emitted species from traffic: A tunnel study in the Paris megacity //Atmos. Chem. Phys. 2014. V. 14. P. 12871–12882.
37. *Turnbull J.C., Sweeney C., Karion A., Newberger T., Lehman S.J., Tans P.P., Davis K.J., Lauvaux T., Miles N.L., Richardson S.J., Cambaliza M.O., Shepson P.B., Gurney K., Patarasuk R., Razlivanov I.* Toward quantification and source sector identification of fossil fuel CO_2 emissions from an urban area: Results from the INFLUX experiment // J. Geophys. Res. Atmos. 2015. V. 120. P. 292–312.
38. *Berhanu T.A., Szidat S., Brunner D., Satar E., Schanda R., Nyfeler P., Battaglia M., Steinbacher M., Hammer S., Leuenberger M.* Estimation of the fossil fuel component in atmospheric CO_2 based on radiocarbon measurements at the Beromünster tall tower, Switzerland // Atmos. Chem. Phys. 2017. V. 17. P. 10753–10766.
39. *Sim S., Jeong S., Park H., Park C., Kwak K.H., Lee S.B., Kim C.L., Lee S., Cgang J., Kang H., Woo J.H.* Co-benefit potential of urban CO_2 and air quality monitoring: A study on the first mobile campaign and building monitoring experiments in Seoul during the winter // Atmos. Pollut. Res. 2020. V. 11. DOI: 10.1016/j.apr.2020.08.009.

S.Ch. Foka, M.V. Makarova, A.V. Poberovsky, D.V. Ionov, E.V. Abakumov. **Analysis of mixing ratios of greenhouse carbon-containing gases at the atmospheric monitoring station of St. Petersburg State University.**

In order to study temporal variations in the mixing ratios of greenhouse carbon-containing gases and factors influencing them, local measurements of CO_2, CH_4 (January 2013 – January 2020), and CO (January 2013 – January 2019) mixing ratios in atmospheric air at the St. Petersburg State University station are analyzed. For this analysis, the trend and seasonal oscillations are taken into account. Linear trends for CO_2, CH_4, and CO, which are 2.42 ppm/year (0.60%), 8.6 ppb/year (0.49%), and –3.8 ppb/year (–2.2%), respectively, are in a good agreement with independent estimates for both global/background changes and changes in urban area. The analysis of the CO/CO_2 emission ratio confirmed that motor vehicles are the dominant anthropogenic source affecting the composition of atmospheric air in the area of the St. Petersburg State University monitoring station. The results presented in this work can be used for validation of atmospheric models, as well as for independent estimations of greenhouse gas fluxes.