

# РАСЧЕТ ИНТЕНСИВНОСТИ ЭМИССИИ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ НА ТЕРРИТОРИИ УРАЛЬСКОГО КАРБОНОВОГО ПОЛИГОНА МЕТОДОМ «ГИГАНТСКИХ КАМЕР»

А. В. Шевченко <sup>1</sup>, И. А. Юрков <sup>2</sup>, Ю. И. Маркелов <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Уральский федеральный университет (г. Екатеринбург, Россия)

<sup>2</sup> Институт промышленной экологии УрО РАН (г. Екатеринбург, Россия)

Оценивалась интенсивность эмиссии (ИЭ) диоксида углерода и метана на территории Коуровской астрономической обсерватории им. К. А. Бархатовой (КАО) с сентября 2021 г. по март 2022 г. Использованы результаты измерений концентраций в приземном слое атмосферы (ПСА), которые проводились с использованием газоанализатора Picarro G2401. Рассматривались периоды ночных накоплений диоксида углерода и метана в штилевых условиях. На основе измеренных концентраций, метеоданных и расчетных значений высоты ПСА были проведены расчеты интенсивности эмиссии с использованием метода «гигантских камер» (ночных эмиссий). Средняя за период наблюдения интенсивность эмиссии диоксида углерода и метана составило  $3\,560 \pm 1\,700$  и  $16 \pm 6$  т/(км<sup>2</sup>·год) соответственно. Полученные результаты были сопоставлены с результатами аналогичных исследований, проведенных, в частности, в Екатеринбурге. Значения интенсивности эмиссии CO<sub>2</sub> для КАО и Екатеринбурга существенно различаются, в то время как для CH<sub>4</sub> остаются малоразличными в пределах неопределенности. Также выявлены особенности сезонной зависимости интенсивности эмиссии для обеих территорий.

**Ключевые слова:** парниковые газы; CO<sub>2</sub>; CH<sub>4</sub>; поток; эмиссия; интенсивность.

## 1. Введение

Диоксид углерода и метан (CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub>) – одни из самых изучаемых углеродсодержащих парниковых газов (ПГ). В современном мире крайне важно проводить оценку интенсивности эмиссии (ИЭ) с территории крупных городских густонаселенных центров, т. к. вклад в выбросы углекислого газа и метана в атмосферу огромен [3]. Особый интерес представляет сравнение ИЭ парниковых газов городской территории, т. е. подверженной сильному антропогенному влиянию, и фоновой – с наименьшим влиянием деятельности человека на окружающую среду. Такое сравнение позволяет отследить динамику изменения ИЭ на обеих территориях и сделать выводы о вкладе антропогенных источников в ИЭ ПГ.

Получение новых данных об ИЭ CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> важно для уточнения вкладов этих газов в состав атмосферы той или иной территории, это позволит выбрать более эффективные меры по снижению антропогенных выбросов, а также определить источники, формирующие ночные потоки примесей [5], и сформировать базу

данных для рассмотрения каждого показателя ИЭ и получения репрезентативных выводов.

Существует две основные группы методов измерения потоков парниковых газов: камерные и микрометеорологические методы [2]. Камерные методы – наиболее доступны в применении, но обладают существенным недостатком: камера позволяет измерить поток с площади, равной размеру камеры. Этого недостатка лишены микрометеорологические методы, позволяющие оценить поток с большой площади. Их рационально использовать для исследований в региональном и глобальном масштабе [1]. Один из них – метод «гигантских камер» [5, 7, 9].

В ИПЭ УрО РАН ведутся работы по мониторингу парниковых газов с помощью прибора Picarro G2401, в котором используется высокочувствительная CRDS-спектроскопия, основанная на измерении времени затухания лазерного излучения в резонаторе. В результате ранее выполненных измерений на о. Белом были получены данные о повышении концентрации CO<sub>2</sub> (на 3.1 ppm в год) в приземной атмосфере в летний период 2015–2017 гг. [1]. Также были оценены потоки углеродсодержащих газов для г. Екатеринбурга за двухлетний период – 2018–2019 гг. [6].

В 2021 г. были начаты исследования на карбоновом полигоне «Урал-Карбон», расположенном на территории КАО. Цель исследований заключается в разработке и опробовании различных методик расчетов и оценок количественных характеристик выбросов и поглощения ПГ [4]. Одно из направлений исследований – оценка потоков ПГ для ландшафтов «Урал-Карбон».

Цель настоящей работы – расчет ИЭ CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> по данным измерений их концентраций в приземном слое атмосферы (ПСА) на территории Коуровской астрономической обсерватории им. К. А. Бархатовой (КАО) с сентября 2021 г. по март 2022 г. с использованием метода «гигантских камер» и сравнение ИЭ в КАО со значениями, полученными в аналогичных исследованиях.

## 2. Материалы и методы

Непрерывные измерения концентраций CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> в ПСА проводятся на территории КАО, расположенной близ с. Слобода, в районе г. Первоуральска (57°04' с. ш., 59°55' в. д., 267 м над уровнем моря). Расстояние от КАО до г. Екатеринбурга составляет примерно 70 км, до Первоуральска 30 км, до Билимбая 19 км, до Новоуткинска 6 км. На территории поселка Слобода, рядом с которым находится карбоновый полигон «Урал-Карбон», проводится вырубка леса и его хранение. Ближайшее промышленное предприятие – Новоуткинский литейно-механический завод.

Для проведения измерений концентрации газов в КАО установлен газоанализатор Picarro G2401, который работает по принципу лазерной спектроскопии – поглощении энергии ИК-лазера малыми молекулами при характеристичных длинах волн при давлении ниже атмосферного. Средняя частота измерения – 3 Гц. Технические характеристики прибора представлены в табл. 1.

Таблица 1. Некоторые характеристики газоанализатора Picarro G2401

Параметр Picarro G2401	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> O
1	2	3	4	5
Точность (5 сек)	< 15 ppb	< 50 ppb	< 1 ppb	< 30 ppm
Точность (5 мин)	1,5 ppb	20 ppb	0,5 ppb	5 ppm

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5
Точность (60 мин)	1 ppb	10 ppb	0,3 ppb	N/A
Диапазон измерений	0–5 ppm	0–1 000 ppm	0–20 ppm	0–7 об. V % H <sub>2</sub> O

Примечание. V – это объемный процент: отношение объема воды к общему объему анализируемой смеси.

Калибровка газоанализатора осуществляется каждый месяц с использованием поверочных газовых смесей российского производства. Прибор установлен в первой половине сентября 2021 г. при организации полигона «Урал-Карбон», и с этого времени ведутся непрерывные измерения.

Суть метода «гигантских камер», использованного для оценки интенсивности эмиссий, заключается в анализе случаев ночного накопления примеси в условиях штиля, когда значительно уменьшается вертикальное перемешивание, что создает аналог камеры, которой накрыт ПСА. А при смене устойчивой стратификации на неустойчивую возникает интенсивное перемешивание, и «камера» проветривается [2].

При допущении, что изменение концентрации газов в ПСА обусловлено только эмиссией источников, ИЭ рассчитывается по формуле, используемой в работе [7]:

$$I = \frac{M \cdot P \cdot h \cdot (C_1 - C_2)}{T \cdot R \cdot \Delta_t \cdot k}, \quad (1)$$

где  $I$  – интенсивность эмиссии газа,  $мкг/(м^2 \cdot ч)$ ;  
 $M$  – молярная масса газа,  $г/моль$ ;  
 $P$  – атмосферное давление,  $Па$ ;  
 $h$  – высота приземного слоя атмосферы,  $м$ ;  
 $C_1$  – концентрация газа в начале периода накопления,  $ppm$ ;  
 $C_2$  – концентрация газа в конце периода накопления,  $ppm$ ;  
 $T$  – температура воздуха,  $К$ ;  
 $R$  – универсальная газовая постоянная ( $Дж/(моль \cdot К)$ );  
 $\Delta_t$  – разница во времени между началом и окончанием периода накопления, т. е. время накопления примеси,  $ч$ ;  
 $k$  – безразмерный коэффициент, зависящий от формы профиля концентрации газа в ПСА.

Анализ включал в себя первичную и статистическую обработку данных о концентрациях парниковых газов и данных с метеорологической станции с ультразвуковым датчиком скорости и направлением ветра Gill Wind Sonic. Высота ПСА рассчитывалась по методике Air Resources Laboratory NOAA с применением метеополей из базы GDAS (Global Data Assimilation System) [3]. Коэффициент  $k$ , соответствующий линейному градиенту концентрации в ПСА, принимался равным 2 на основе результатов работы [5].

Расчет неопределенностей проводился в соответствии с ГОСТ [6]. Расчет суммарной неопределенности расчетных значений ИЭ произведен по следующей формуле:

$$U_c = \sqrt{(\delta I / \delta h \cdot U_h)^2 + (\delta I / \delta C_1 \cdot U_{C_1})^2 + (\delta I / \delta C_2 \cdot U_{C_2})^2}, \quad (2)$$

где  $U_c$  – суммарная неопределенность расчетного значения интенсивности эмиссии,  $мкг/(м^2 \cdot ч)$ ;  
 $\delta I / \delta C_1, \delta I / \delta C_2, \delta I / \delta h$  – частные производные интенсивности эмиссии, рассчитываемой по формуле (1) для концентрации, высоты приграничного слоя атмосферы соответственно,  $U_{C_1}, U_{C_2}, U_h$  – суммарные неопределенности для концентрации, высоты ПСА соответственно,  $ppm, м$ .

Суммарные неопределенности  $U_{C_1}, U_{C_2}, U_h$  рассчитывались по формуле:

$$U_{C_i} = \sqrt{U_{a_i}^2 + U_{b_i}^2}, \quad (3)$$

где  $U_a$  – неопределенность по типу А;  
 $U_b$  – неопределенность по типу В;  
 $i$  –  $C_2, C_1, h$ .

Данные очищены от аномальных значений концентраций ПГ за исследуемый период, которые могли быть обусловлены нежелательными антропогенными источниками ПГ, попавшими в эффективную зону измерения их концентраций (дизельный генератор, сжигание отходов и т. д.).

### 3. Результаты

За исследуемый период, с сентября 2021 г. по март 2022 г., зафиксировано 206 случаев ночного накопления  $CO_2$  и 195  $CH_4$ . Среднее время накопления парниковых газов составило около 3,5 ч для  $CO_2$  и 3 ч для  $CH_4$ . Если принять скорость ветра равной 1 м/с, то можно оценить размер площади, источники которой формировали ночные потоки примесей. Для  $CO_2$  – 12 км, а для  $CH_4$  – 10 км. В данные радиусы не попадают ближайшие крупные города и промышленные объекты (Первоуральск и Екатеринбург).

Полученные среднегодовые значения для  $CO_2$  и  $CH_4$  (табл. 2) составили  $3\,560 \pm 1\,700$  и  $16 \pm 6$  т/(км<sup>2</sup>·год) соответственно. На рис. 1 представлены зависимости ИЭ этих газов от времени.

Таблица 2. ИЭ  $CO_2$  и  $CH_4$  в среднем за месяц по результатам измерений их концентраций в КАО

	Интенсивность эмиссии в ср. за месяц, т/(км <sup>2</sup> ·год)			
	ИЭ <sub>CO2</sub>	U <sub>CCO2</sub>	ИЭ <sub>CH4</sub>	U <sub>CCH4</sub>
1	2	3	4	5
Сентябрь 2021	8 080	±3 640	31	±11
Октябрь 2021	5 075	±2 570	25	±11
Ноябрь 2021	2 760	±1 360	26	±9

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5
Декабрь 2021	3 580	±1 710	12	±6
Январь 2022	2 075	±1 115	6	±3
Февраль 2022	1 085	±620	4	±2
Март 2022	2 265	±940	6	±3
Среднее за период:	3 560	±1 710	16	±6

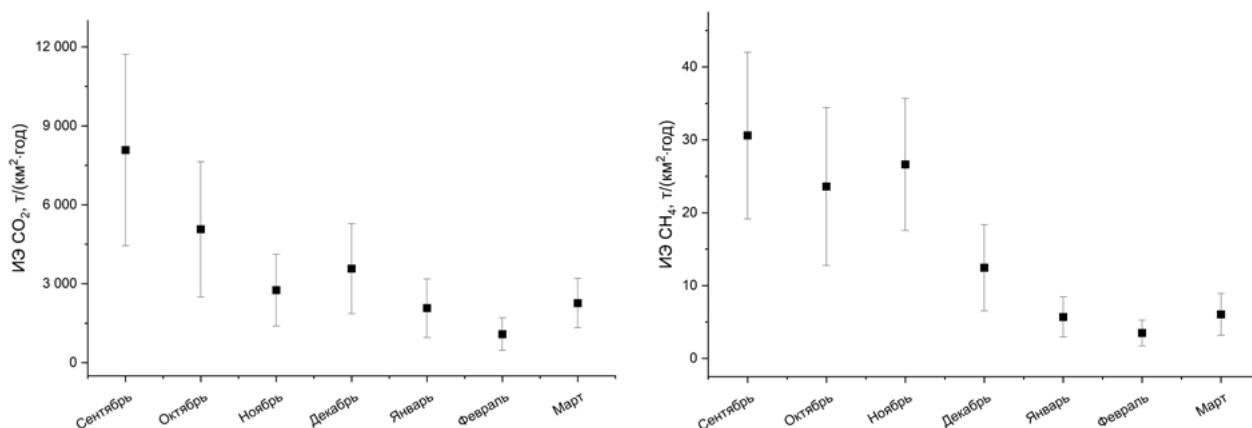


Рис. 1. Зависимости ИЭ CO<sub>2</sub> (1) и CH<sub>4</sub> (2) от времени на территории КАО (с неопределенностью расчетного значения интенсивности эмиссии)

Анализируя результаты, полученные за сентябрь 2021 г. – март 2022 г. на территории КАО (табл. 2, рис. 1), можно отметить уменьшение значений ИЭ с сентября по февраль по обоим газам. По CO<sub>2</sub> интенсивность эмиссии снизилась на 87 % (с 8 080 в сентябре до 1 085 т/(км<sup>2</sup>·год) в феврале). В марте ИЭ возросла на 52 % по сравнению со значениями февраля (с 1 085 до 2 265 т/(км<sup>2</sup>·год)). Те же тренды прослеживаются и с CH<sub>4</sub>. С сентября по февраль ИЭ CH<sub>4</sub> снизилась на 89 % (с 31 в сентябре до 4 (т/км<sup>2</sup>·год) в феврале), а в марте возросла на 42 % (с 4 до 6 (т/км<sup>2</sup>·год)).

Проанализирована зависимость ИЭ CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> от значений температуры и атмосферного давления (табл. 3 и 4). При температуре (Т) ниже 0 °С количество периодов накопления почти в два раза больше, чем при Т выше 0 °С. При этом средняя ИЭ CO<sub>2</sub> при Т > 0 °С на 3 400 ± 1 600 т/(км<sup>2</sup>·год) больше (с 95 %-м доверительным интервалом), чем при Т < 0 °С и Р < 100 кПа. Для CH<sub>4</sub> средняя ИЭ при Т > 0 °С на 22 ± 7 т/(км<sup>2</sup>·год) больше, чем при Т < 0 °С и Р < 100 кПа.

Таблица 3. Зависимость ИЭ CO<sub>2</sub> от значений температуры и атмосферного давления

CO <sub>2</sub>	Р > 100 кПа		Р < 100 кПа	
	ИЭ CO <sub>2</sub> , т/(км <sup>2</sup> ·год)	Кол-во периодов накопления, шт.	ИЭ CO <sub>2</sub> , т/(км <sup>2</sup> ·год)	Кол-во периодов накопления, шт.
Т > 0 °С	5 700 ± 1 500	71	–	0
Т < 0 °С	4 200 ± 1 150	67	2 300 ± 550	68

Таблица 4. Зависимость ИЭ CH<sub>4</sub> от значений температуры и атмосферного давления

CH <sub>4</sub>	P > 100 кПа		P < 100 кПа	
	ИЭ CO <sub>2</sub> , т/(км <sup>2</sup> ·год)	Кол-во периодов накопления, шт.	ИЭ CO <sub>2</sub> , т/(км <sup>2</sup> ·год)	Кол-во периодов накопления, шт.
T > 0 °C	27 ± 7	52	14 ± 12	7
T < 0 °C	17 ± 5	87	5 ± 1	49

#### 4. Обсуждение

Анализ результатов мониторинговых измерений парниковых газов с применением метода ночных эмиссий позволил оценить средние значения ИЭ этих газов за исследуемый период, изменение ИЭ в течение времени. На наш взгляд, КАО может выступить в роли фоновой, не нарушенной территории для сравнения с крупными городами и промышленными центрами, имеющими большое количество источников выбросов парниковых газов в атмосферу. На этой территории практически отсутствует вклад антропогенных источников в концентрации парниковых газов. Можно провести сравнение ИЭ на территории полигона «Урал-Карбон» с ИЭ, полученными на территориях с большим уровнем антропогенной нагрузки.

Из данных табл. 3 и 4 видно, что ИЭ CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> тесно связана со значениями T и P. Условиями для высокой ИЭ CO<sub>2</sub> являются температура выше 0 °C и атмосферное давление выше 100 кПа. Наименьшее значение ИЭ наблюдается в обратных условиях. Различия в средних значениях ИЭ при разных условиях достигают 147 % для CO<sub>2</sub> и 440 % для CH<sub>4</sub>. Из данных табл. 2 и 3 можно предположить, что с этим связана выявленная сезонная зависимость ИЭ этих газов.

Для сравнения полученных результатов расчетных потоков парниковых газов были проанализированы другие подобные исследования. В табл. 5 представлены значения ИЭ углеродосодержащих газов в разных городах, основанные на результатах исследований [5, 7, 9–12]. Результаты, полученные тем же методом, что и в настоящей работе, выделены звездочкой [5, 7, 9]. Следует отметить, что метод ночных эмиссий – упрощенный, он является скорее оценочным и редко используется исследователями [5]. Результаты, полученные в работах [9–12], рассчитаны с помощью метода Eddy Covariance, поэтому сходимость этих результатов с остальными работами низкая.

Полученные в разных работах значения ИЭ характеризуются сильным разбросом. Это может быть объяснено выбранным методом исследования. Eddy Covariance – достаточно точный метод расчетов, требовательный к техническим возможностям оборудования. Так как в работах [5, 7, 9] использовался тот же метод, что и в настоящей работе, заметна лучшая сходимость результатов этих исследований.

Рассматривая показатели ИЭ CO<sub>2</sub> в табл. 5, можно заметить, что в настоящем исследовании значение ИЭ CO<sub>2</sub> наименьшее из представленных и составляет 3 560 т/км<sup>2</sup>·год, что почти в половину меньше, чем в Екатеринбурге, Кракове и Петергофе. Это может быть объяснено наименьшим влиянием антропогенных факторов на условия окружающей среды, чем в остальных населенных пунктах с нарушенным землепользованием и наличием большого количества источников выбросов парниковых газов, т. к. население с. Слобода составляет всего 319 человек (2010 г.),

а измерения проводились на окраине, вне основной части села. Для сравнения: население в Петергофе на момент исследования [5] – 76 827 человек (2015 г.), в Кракове [9] – 756 441 человек (2008 г.), в Екатеринбурге [7] – 1 526 903 (2019 г.).

В случае сравнения ИЭ  $\text{CH}_4$  в КАО наблюдаются очень близкие значения с работами [7, 9]. На их фоне выделяется значение ИЭ  $\text{CH}_4$  в Петергофе [5] –  $44 \text{ т/км}^2 \cdot \text{год}$ , которое почти в три раза выше показателей в остальных исследованиях ( $44 \text{ т/км}^2 \cdot \text{год}$  против около  $15 \text{ т/км}^2 \cdot \text{год}$ ). Это может быть обусловлено территориальными особенностями расположения Петергофа, так как он находится в прибрежной полосе Финского залива, которая покрыта множеством низинных болот [5].

Таблица 5. Сравнение ИЭ  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  в разных населенных пунктах

№	Город, страна	Период, годы	Ссылка	ИЭ $\text{CO}_2$	$U_c \text{ CO}_2$	ИЭ $\text{CH}_4$	$U_c \text{ CH}_4$
1	КАО, РФ*	09.2021–03.2022	[н. р.]	3 560	1 710	16	6
2	Екатеринбург, РФ*	2018–2019	[7]	7 475	2 530	17	6
3	Краков, Польша*	2005–2009	[9]	6 241	360	14	1
4	Петергоф, РФ*	2014–2015	[5]	6 100	4 000	44	27
5	Пекин, Китай	01.2006–12.2009	[10]	18 000	–	–	–
6	Лондон, Великобритания	2012–2014	[11]	39 100	2 400	72	3
7	Базель, Швейцария	2006	[12]	4 165	–	–	–

\* Исследование проведено с использованием метода «гигантских камер».

Далее более подробно сравним результаты настоящей работы с результатами исследования в Екатеринбурге [7]. На рис. 2 представлена динамика значений ИЭ углекислого газа и метана в КАО и Екатеринбурге по месяцам. Тренд на снижение ИЭ  $\text{CO}_2$  в холодный период прослеживается и для Екатеринбурга. Также в Екатеринбурге ИЭ  $\text{CH}_4$  держится примерно на одном уровне весь период исследований и снижается лишь в одном месяце – феврале, но уже в марте возрастает почти в два раза, достигая максимального значения за весь период исследований. Вероятно, это связано с тем, что  $\text{CH}_4$  образуется прежде всего в результате деятельности бактерий-метаногенов и, в отличие от КАО, в Екатеринбурге происходит более позднее промерзание почвы, формирование постоянного плотного снежного покрова. Также в городе больше источников выбросов  $\text{CH}_4$  в зимний период времени: автотранспорт на газовом топливе, продувочные свечи газопроводов, свалки, очистные сооружения и т. д. Наибольшее изменение ИЭ в Екатеринбурге (пришлось на декабрь – февраль и составило  $8,18 \pm 5,98 \text{ т/км}^2 \cdot \text{год}$ ). В КАО это значение составило  $23,14 \pm 5,98 \text{ т/км}^2 \cdot \text{год}$  в период ноябрь – февраль. Тренд на повышение ИЭ  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  в марте по сравнению со значениями в феврале прослеживается для обоих населенных пунктов.

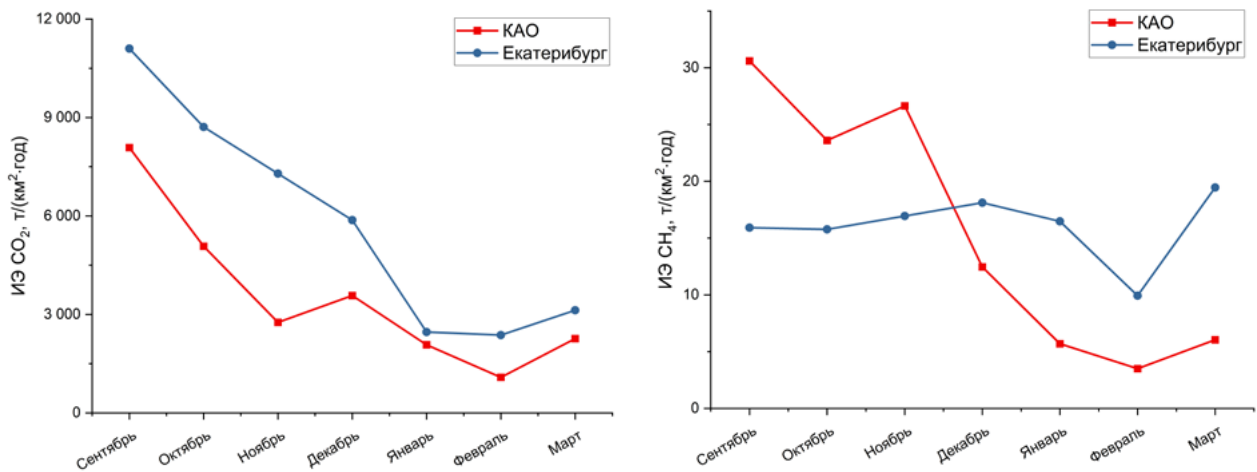


Рис. 2. Динамика значений ИЭ углекислого газа и метана в КАО и Екатеринбурге по месяцам

На рис. 3 представлены значения ИЭ CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> в КАО и Екатеринбурге за один период времени – с сентября 2021 г. по март 2022 г. Для CH<sub>4</sub> разница несущественна. Для CO<sub>2</sub> разница больше. Это объясняется тем, что Екатеринбург – крупный город, имеющий множество промышленных объектов, большое количество автотранспорта, котельных и других антропогенных источников выбросов парниковых газов.

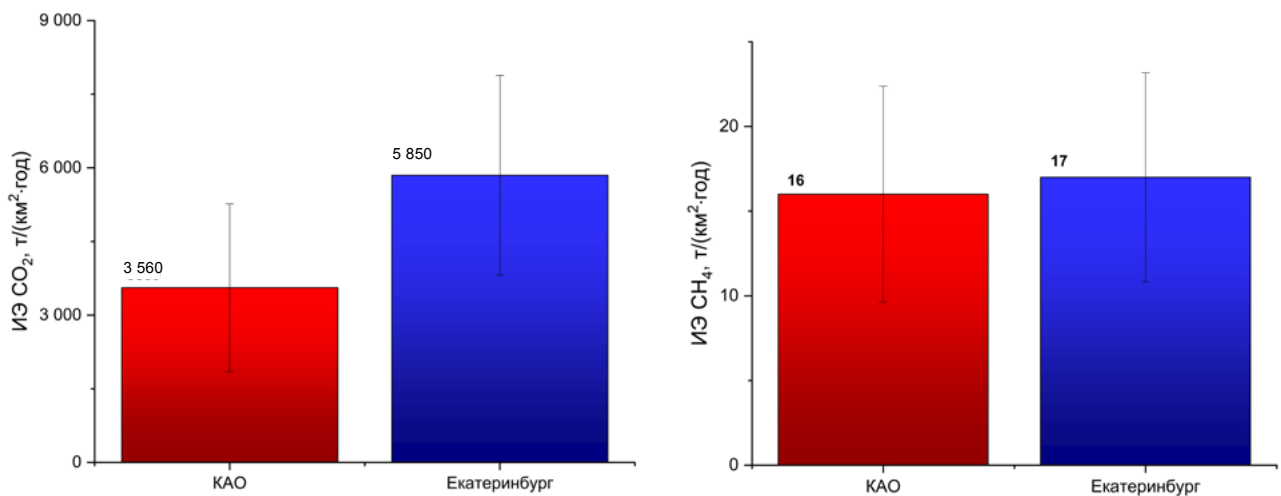


Рис. 3. Значения ИЭ CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> в КАО и Екатеринбурге за исследованный период (с неопределенностью расчетного значения ИЭ)

Рассчитанный бюджет неопределенностей показал, что наибольший вклад вносит неопределенность значения высоты ПСА – в пределах 30–90 %. Вклады остальных параметров распределились следующим образом: C<sub>2</sub> – 10–30 %; C<sub>1</sub> – 3–20 %. Исходя из рассчитанного бюджета, для перехода от оценочных значений к более точным необходимо применять более точные методы, например, Eddy Covariance.

## 5. Выводы

Таким образом, анализ случаев ночного накопления CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> в ПСА, проведенный в данной работе, показал следующее:



1. Среднегодовые значения интенсивности эмиссии  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  для сентября 2021 г. – марта 2022 г., полученные для Коуровской астрономической обсерватории им. К. А. Бархатовой, составили  $3\,560 \pm 1\,710$  и  $16 \pm 6$  т/(км<sup>2</sup>·год) соответственно. Данные оценки ИЭ могут быть использованы для территории в радиусе 12 км для  $\text{CO}_2$  и 10 км для  $\text{CH}_4$  от измерительной станции на территории КАО.
2. Выявлены различия в ИЭ  $\text{CO}_2$  на территории КАО и Екатеринбурга за исследованный период: в городе ИЭ диоксида углерода больше, чем на фоновой территории примерно на 60 %. Также найдены различия в сезонной динамике ИЭ  $\text{CH}_4$ . В городе ИЭ метана характеризуется более стабильными сезонными значениями. Наибольшее изменение ИЭ в Екатеринбурге в период декабрь – февраль составило  $8 \pm 5$  т/(км<sup>2</sup>·год). В КАО это значение составило  $23 \pm 5$  т/(км<sup>2</sup>·год) в период ноябрь – февраль. Наибольшая ИЭ наблюдалась при  $T > 0$  °С и  $P > 100$  кПа.
3. Выявлена сезонная зависимость ИЭ  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ , характеризующаяся максимальными значениями в сентябре:  $8\,080 \pm 3\,640$  т/(км<sup>2</sup>·год) для  $\text{CO}_2$  и  $31 \pm 11$  т/(км<sup>2</sup>·год) для  $\text{CH}_4$  и минимальными в феврале:  $1\,085 \pm 620$  т/(км<sup>2</sup>·год) для  $\text{CO}_2$  и  $4 \pm 2$  т/(км<sup>2</sup>·год) для  $\text{CH}_4$ .
4. Полученные в работе оценки ИЭ для  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  для КАО могут быть использованы для сравнения с аналогичными независимыми литературными данными, сделанными для фоновых ненарушенных территорий и для территорий с высоким уровнем антропогенных загрязнений.
5. Расчет бюджета неопределенности показал, что в дальнейшем, для перехода от оценочных значений интенсивности эмиссии к более точным, следует использовать другие методы, например, Eddy Covariance.

## 6. Благодарности

Работа частично выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания FEUZ-2021-00147.

## 7. Список литературы

1. Антонов, К. Л. Некоторые итоги мониторинга парниковых газов в арктическом регионе России / К. Л. Антонов, В. А. Поддубный, Ю. И. Маркелов [и др.] // Арктика: экология и экономика. – 2018. – № 1(29). – С. 56–67. – DOI 10.25283/2223-4594-2018-1-56-67.
2. Глаголев, М. В. Измерение потоков парниковых газов в болотных экосистемах / М. В. Глаголев, И. В. Филиппов. – Ханты-Мансийск: Югорский государственный университет, 2011.
3. Епихина, А. С. Инновационные методы мониторинга парниковых газов представительных ландшафтов мегаполиса / А. С. Епихина, М. М. Визирская, В. И. Весенев [и др.] // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агронимия и животноводство. – 2012. – № 5. – С. 1–2.
4. Карбоновый полигон «Урал-Карбон», URL: <https://carbon-polygons.ru/polygons/ural-karbon>.
5. Макарова, М. В. Оценка ночных эмиссий углеродсодержащих газов в пригородах Санкт-Петербурга / М. В. Макарова, Д. К. Арабаджян, С. Ч. Фока [и др.] // Метеорология и гидрология. – 2018. – № 7. – С. 36–44.

6. ГОСТ Р 54500.3-2011 Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008. Руководство по выражению неопределенности измерения = Uncertainty of measurement. Part 3. Guide to the expression of uncertainty in measurement: национальный стандарт Российской Федерации: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 16 ноября 2011 г. № 555-СТ: введен впервые: подготовлен Федеральным государственным унитарным предприятием «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева» (ФГУП «ВНИИМ») и Автономной некоммерческой организацией «Научно-исследовательский центр контроля и диагностики технических систем» (АНО «НИЦ КД») на основе международного документа Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008 «Неопределенность измерения. Ч. 3. Руководство по выражению неопределенности измерения» [ISO/IEC Guide 98-3:2008 «Uncertainty of measurement. Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM: 1995)»].
7. Юрков, И. А. Оценка ночных эмиссий парниковых газов в городе Екатеринбург за 2018–2019 гг. / И. А. Юрков, С. К. Джолумбетов, Е. А. Гуляев // Метеорология и гидрология. – 2021. – № 11. – С. 64–72.
8. Archived Meteorology. – URL: <http://ready.arl.noaa.gov/READYamet.php>.
9. Zimnoch, M. Assessing surface fluxes of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> in urban environment: A reconnaissance study in Krakow, Southern Poland / M. Zimnoch, J. Godlowska, J. M. Necki and K. Rozanski // Tellus B. – 2010. – Vol. 62, No. 5. – P. 573–580. – DOI: 10.1111/j.1600-0889.2010.00489.x.
10. Liu, H. Z. Four-year (2006–2009) eddy covariance measurements of CO<sub>2</sub> flux over an urban area in Beijing / H. Z. Liu, J. W. Feng, L. Jarvi, and T. Vesala // Atmos. Chem. and Phys. – 2012. – Vol. 12. – P. 7881–7892. – DOI: 10.5194/acp-12-7881-2012.
11. Helfter, C. Spatial and temporal variability of urban fluxes of methane, carbon monoxide and carbon dioxide above London, UK / C. Helfter, A. H. Tremper, C. H. Halios, S. Kotthaus, A. Bjorkegren, C. S. B. Grimmond, J. F. Barlow, and E. Nemitz // Atmos. Chem. and Phys. Discuss. – 2016. – Vol. 16. – P. 10543–10557. – DOI: 10.5194/acp-2016-216.
12. Vogt, R. Temporal dynamics of CO<sub>2</sub> fluxes and profiles over a Central European city / R. Vogt, A. Christen, M. W. Rotach, M. Roth, and A. N. V. Satyanarayana // Theor. and Appl. Climatol. – 2006. – Vol. 84. – P. 117–126. – DOI: 10.1007/s00704-005-0149-9.

## Сведения об авторах:

**Шевченко Андрей Викторович**, студент, Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия. Эл. почта: a.shevchenko98@yandex.ru

**Юрков Игорь Анатольевич**, м. н. с. лаборатории «Эколого-климатических проблем Арктики» Института промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия.

**Маркелов Юрий Иванович**, канд. физ.-мат. н., заведующий лабораторией «Эколого-климатических проблем Арктики» Института промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия.

# CALCULATION OF THE INTENSITY OF GREENHOUSE GAS EMISSIONS IN THE TERRITORY OF THE URAL CARBONIC POLYGON BY THE «GIANT CAMERA» METHOD

A. V. Shevchenko <sup>1</sup>, I. A. Yurkov <sup>2</sup>, Y. I. Markelov <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

<sup>2</sup> Institute of Industrial Ecology, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

*The emission intensities of carbon dioxide and methane were estimated on the territory of the Kourovskaya Astronomical Observatory. K. A. Barkhatova (KAO) for the period сентябрь 2021 – март 2022. The results of measurements of concentrations in the surface layer of the atmosphere were used, which were carried out using a Picarro G2401 gas analyzer. The periods of night accumulations of carbon dioxide and methane in calm conditions were considered. Based on the measured concentrations, meteorological data, and calculated in the surface layer of the atmosphere heights, the emission intensity was calculated using the “giant chamber” method (night emissions). The average intensities of carbon dioxide and methane emissions over the observation period were  $3560 \pm 1700$  and  $16 \pm 6$  t/(km<sup>2</sup> · year), respectively. The results obtained were compared with the results of similar studies, in Yekaterinburg. The values of CO<sub>2</sub> emission intensity for KAO and Yekaterinburg differ significantly, while for methane they remain slightly different within the uncertainty. Peculiarities of the seasonal dependence of the emission intensity for both territories were also revealed.*

**Key words:** greenhouse gases; CO<sub>2</sub>; CH<sub>4</sub>; flow; emission; intensity.

## References

1. Antonov, K. L. Some results of greenhouse gas monitoring in the Arctic region of Russia / K. L. Antonov, V. A. Poddubny, Yu. I. Markelov [et al.] // *Arktika: ecology and economy*. – 2018. – No. 1 (29). – P. 56–67. – DOI 10.25283/2223-4594-2018-1-56-67.
2. Glagolev, M. V. Measurement of greenhouse gas flows in bog ecosystems / M. V. Glagolev, I. V. Filippov. – Khanty-Mansiysk: Yugra State University, 2011.
3. Epikhina, A. S. Innovative methods for monitoring greenhouse gases of representative landscapes of a megalopolis / A. S. Epikhina, M. M. Vizirskaya, V. I. Vesenev [et al.] // *Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: Agronomy and animal husbandry*. – 2012. – No. 5. – P. 1–2.
4. Carbon polygon «Ural-Carbon». – URL: <https://carbon-polygons.ru/polygons/ural-karbon>.
5. Makarova, M. V. Estimation of night emissions of carbon-containing gases in the suburbs of St. Petersburg / M. V. Makarova, D. K. Arabadzhyan, S. Ch. Foka [et al.] // *Meteorology and Hydrology*. – 2018. – No. 7. – P. 36–44.

6. GOST R 54500.3-2011 Guide ISO/IEC 98-3:2008. Guidance on Expressing Uncertainty of Measurement = Uncertainty of measurement. Part 3. Guide to the expression of uncertainty in measurement: national standard of the Russian Federation: approved and put into effect by the Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated November 16, 2011 No. 555-ST: introduced for the first time: prepared by the Federal State University – container enterprise «All-Russian Research Institute of Metrology named after D. I. Mendeleev» (FGUP «VNIIM») and the Autonomous Non-Commercial Organization «Research Center for Control and Diagnostics of Technical Systems» (ANO «NITs KD») on the basis of international document ISO/IEC Guide 98-3:2008 Uncertainty of measurement. Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM: 1995)].
7. *Yurkov, I. A.* Estimation of night greenhouse gas emissions in the city of Yekaterinburg for 2018–2019 / I. A. Yurkov, S. K. Dzholumbetov, E. A. Gulyaev // *Meteorology and Hydrology*. – 2021. – No. 11. – P. 64–72.
8. Archived Meteorology, URL: <http://ready.arl.noaa.gov/READYamet.php>.
9. *Zimnoch, M.* Assessing surface fluxes of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> in urban environment: A reconnaissance study in Krakow, Southern Poland / M. Zimnoch, J. Godlowska, J. M. Necki and K. Rozanski // *Tellus B*. – 2010. – Vol. 62, No. 5. – P. 573–580. – DOI: 10.1111/j.1600-0889.2010.00489.x.
10. *Liu, H. Z.* Four-year (2006–2009) eddy covariance measurements of CO<sub>2</sub> flux over an urban area in Beijing / H. Z. Liu, J. W. Feng, L. Jarvi, and T. Vesala // *Atmos. Chem. and Phys.* – 2012. – Vol. 12. – P. 7881–7892. – DOI: 10.5194/acp-12-7881-2012.
11. *Helffter, C.* Spatial and temporal variability of urban fluxes of methane, carbon monoxide and carbon dioxide above London, UK / C. Helffter, A. H. Tremper, C. H. Halios, S. Kotthaus, A. Bjarkegren, C. S. B. Grimmond, J. F. Barlow, and E. Nemitz // *Atmos. Chem. and Phys. Discuss.* – 2016. – Vol. 16. – P. 10543–10557. – DOI: 10.5194/acp-2016-216.
12. *Vogt, R.* Temporal dynamics of CO<sub>2</sub> fluxes and profiles over a Central European city / R. Vogt, A. Christen, M. W. Rotach, M. Roth, and A. N. V. Satyanarayana // *Theor. and Appl. Climatol.* – 2006. – Vol. 84. – P. 117–126. – DOI: 10.1007/s00704-005-0149-9.