

УДК 551.510.42

## Оценки эмиссий и поглощения CO<sub>2</sub> водной поверхностью вблизи мегаполиса Санкт-Петербурга

Г.М. Неробелов, Ю.М. Тимофеев\*

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

Поступила в редакцию 30.03.2021 г.

Проведена оценка эмиссий и поглощения CO<sub>2</sub> водной поверхностью Финского залива по данным судовых измерений SOCOM в марте-апреле 2019 г. с целью определения возможного влияния водной поверхности на оценки антропогенных эмиссий Санкт-Петербурга. Обнаружено, что в марте 2019 г. поверхность Финского залива была источником CO<sub>2</sub>, а в апреле она поглощала CO<sub>2</sub>. Удельные эмиссии и поглощение CO<sub>2</sub> водной поверхностью Финского залива в среднем существенно (на один-два порядка) меньше антропогенных эмиссий Санкт-Петербурга. Вклад поверхности Финского залива в содержание CO<sub>2</sub> в воздушных массах, проходящих над заливом в марте-апреле 2019 г., в среднем оказался мал по сравнению с вкладом Санкт-Петербурга (менее 1% от вклада города) по результатам измерений EMME (Emission Monitoring Mobile Experiment) и данным об эмиссиях ODIAC. При экстремальных значениях скорости ветра над водной поверхностью и разницы парциальных давлений CO<sub>2</sub> в воде и воздухе вклад Финского залива в содержание CO<sub>2</sub> в воздушных массах может достигать почти 3% от антропогенного вклада Санкт-Петербурга.

*Ключевые слова:* эмиссии и поглощение CO<sub>2</sub>, водная поверхность, Финский залив, SOCOM, EMME, ODIAC; CO<sub>2</sub> emissions and absorption, sea surface, the Gulf of Finland, SOCOM, EMME, ODIAC.

### Введение

Сжигание ископаемого топлива в крупных городах является главным источником антропогенного углекислого газа (CO<sub>2</sub>), играющего важную роль в формировании радиационного баланса Земли [1]. Владение информацией об эмиссиях газа позволяет выполнять принятые международные обязательства по сокращению выбросов.

Выделяют два основных подхода к оценке антропогенных эмиссий CO<sub>2</sub>. Первый – инвентаризационный подход – основан на расчете выбросов газа с территорий стран/регионов/городов по данным о количестве используемого ископаемого топлива, работе энергетических предприятий и предприятий по производству цемента и др. Однако точность метода может существенно отличаться для разных стран и в зависимости от пространственного разрешения [2, 3]. Второй подход включает в себя методы, основанные на высокоточных измерениях содержания CO<sub>2</sub> в атмосфере, и используется для оценки инвентаризационных данных. Например, для ряда городов применяется наземный дифференциальный метод, основанный на синхронных спектроскопических измерениях спектров солнечного излучения однотипной аппара-

турой в наветренной и подветренной частях города. При правильном выборе точек измерений в наветренной части определяется содержание CO<sub>2</sub> без влияния мегаполиса (фоновое содержание), тогда как измерения в подветренной части характеризуют воздушную массу, загрязненную антропогенными эмиссиями при прохождении через территорию города [4–6]. Существенным преимуществом дифференциального подхода является высокая точность измерений антропогенного вклада в эмиссии CO<sub>2</sub>. Так, например, при значении среднего антропогенного вклада Санкт-Петербурга в 1–4 ppm (в величинах отношений смеси для сухой атмосферы) случайные погрешности измерений могут составлять 0,1 ppm (0,025% по отношению к среднему значению в 400 ppm) [6].

В марте и апреле 2019 г. подобные измерения общего содержания CO<sub>2</sub> были проведены с помощью двух мобильных Фурье-спектрометров Bruker EM27/SUN в районе мегаполиса Санкт-Петербурга (Россия) в рамках Emission Monitoring Mobile Experiment (EMME). На рис. 1 показаны парные точки измерений EMME 2019 (соединены белыми линиями), а также антропогенные эмиссии CO<sub>2</sub> Санкт-Петербурга согласно данным ODIAC высокого пространственного разрешения (~ 0,008° по широте и долготе, или ~ 0,4 км<sup>2</sup> для территории Санкт-Петербурга) за 2018 г. (наиболее актуальные) [7]. Измерения позволили оценить удельные (на км<sup>2</sup>) [6] и интегральные (по всей площади) выбросы с территории города [8].

\* Георгий Максимович Неробелов (akulishe95@mail.ru); Юрий Михайлович Тимофеев (y.timofeev@spbu.ru).

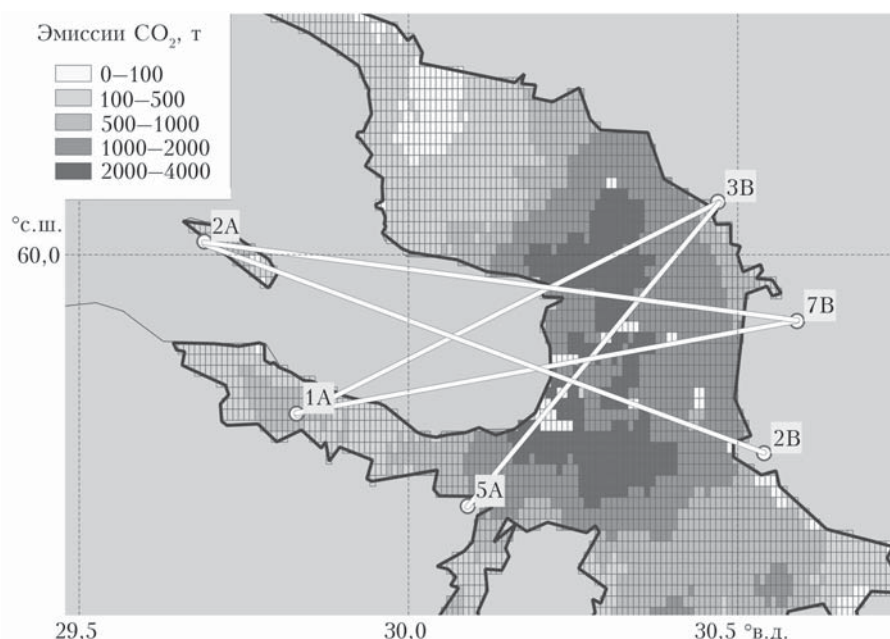


Рис. 1. Позиции и трассы измерений эксперимента EMME 2019 и антропогенные эмиссии  $\text{CO}_2$  с территории Санкт-Петербурга по данным ODIAC за март 2018 г.

Подобные оценки эмиссий  $\text{CO}_2$  с территории города по синхронным измерениям в районе Санкт-Петербурга имеют некоторые особенности, так как отдельные точки измерений, как видно из рис. 1, были разделены водной поверхностью Финского залива (Балтийское море).

Известно, что водная поверхность может как выделять, так и поглощать  $\text{CO}_2$  в зависимости от состояния атмосферы и водной среды [9]. В связи с этим представляет интерес количественная оценка возможного вклада водной поверхности в погрешности определения антропогенных эмиссий  $\text{CO}_2$  с территории мегаполиса Санкт-Петербурга. Подобные исследования могут быть важны и для других мегаполисов, расположенных вблизи больших водных объектов (например, Нью-Йорк, Чикаго, Ливерпуль, Копенгаген и т.д.).

Целями настоящей работы являются оценка эмиссий и поглощения  $\text{CO}_2$  водной поверхностью Финского залива по данным судовых измерений за март-апрель 2019 г., а также анализ возможного влияния эмиссий и поглощения  $\text{CO}_2$  водной поверхностью на оценки антропогенных эмиссий газа с территории Санкт-Петербурга дифференциальным методом.

## 1. Эмиссии и поглощение $\text{CO}_2$ водной поверхностью

Динамика глобального бюджета углекислого газа рассматривается многими исследователями, а труды обобщаются в ежегодных публикациях (см., например, [10]). По различным оценкам, океаны поглощают 1,5–3,0 Гт углерода в год [11, 12].

Расчетные и измеренные значения эмиссий и поглощения  $\text{CO}_2$  водной поверхностью Балтийского моря показывают, что они способны меняться в широком диапазоне (от  $-400 \cdot 10^{19}$  до  $400 \times 10^{19}$  мол.  $\text{м}^{-2} \text{ч}^{-1}$ ) в зависимости от состояния атмосферы и водного объекта [13]. Похожие исследования описаны в [9, 14, 15]. Приведенные величины эмиссий и поглощения  $\text{CO}_2$  показывают, что значения могут отличаться практически на два порядка. Согласно [13] для некоторых частей Балтийского моря сезонная изменчивость приводит к тому, что с апреля по сентябрь водная поверхность поглощает  $\text{CO}_2$ , что может привести к занижению оценок антропогенных эмиссий, а с октября по март является его источником, что может стать причиной завышенной оценки выбросов города на трассах, проходящих над водным объектом.

## 2. Методология и данные

Для оценки эмиссий с водной поверхности и поглощения ею  $\text{CO}_2$  мы использовали метод, предложенный [13, 16, 17]. Мы применили параметризацию этих процессов

$$F = 0,251U^2 \left( \frac{Sc}{660} \right)^{-0,5} K_0 (e_{\text{sea}} - e_{\text{air}}), \quad (1)$$

где  $F$  – удельные эмиссия или поглощение  $\text{CO}_2$  водной поверхностью;  $U$  – скорость ветра у поверхности, м/с;  $Sc$  – коэффициент Шмидта, зависящий от температуры водной поверхности;  $K_0$  – коэффициент растворимости, зависящий от температуры водной поверхности и солёности;  $e_{\text{sea}}$  и  $e_{\text{air}}$  –

парциальное давление газа в воде и в воздухе над ее поверхностью. В [17] приведены данные для расчета  $S_c$  и  $K_0$ .

Для оценки эмиссий и поглощения  $\text{CO}_2$  поверхностью Финского залива мы воспользовались данными судовых измерений SOCOM [18] о парциальном давлении  $\text{CO}_2$  в воде. Измерения проводятся в периоды морских экспедиций, в рамках которых специально оборудованные суда перемещаются по различным крупным водным объектам. Кроме парциального давления  $\text{CO}_2$  в воде объектами судовых измерений являются температура водной поверхности и соленость, атмосферное давление и другие параметры. Мы использовали данные морской экспедиции, проходящей наиболее близко к территории Санкт-Петербурга (западная часть Финского залива). Парциальное давление  $\text{CO}_2$  в атмосферном воздухе было рассчитано на основе спектроскопических измерений ИК Фурье-спектрометром (ИКФС) Bruker 125HR в Петергофе на базе СПбГУ [19]. Информация о скорости ветра за каждый час конкретного дня была получена с финской измерительной станции, расположенной на острове в средней части Финского залива на удалении ~ 20 км от материка (Lovisa Orregrund, 60,27° с.ш. и 26,45° в.д.) [20].

Эмиссия и поглощение водной поверхностью зависят от многих характеристик водной среды и атмосферы. Для оценки наиболее значимых параметров, влияющих на удельные эмиссии и поглощение  $\text{CO}_2$  поверхностью Финского залива, была рассчитана чувствительность эмиссии и поглощения газа к изменению входных параметров. Оказалось, что вклад водной поверхности в содержание  $\text{CO}_2$  в наибольшей степени определяется скоростью ветра у поверхности и разностью парциальных давлений  $\text{CO}_2$  в атмосферном воздухе и воде. Вариация скорости ветра над поверхностью воды от 1 до 10 м/с и изменение разности парциального давления  $\text{CO}_2$  в воде и воздухе от 0 до 300 мкратм

атмосфер (далее мкратм) увеличивают поглощение и эмиссии  $\text{CO}_2$  почти на два порядка. Наименьший вклад вносят вариации температуры поверхности и соленость воды.

### 3. Анализ результатов

#### 3.1. Численные оценки удельных эмиссий и поглощения $\text{CO}_2$ поверхностью Финского залива

Эмиссии и поглощение  $\text{CO}_2$  были рассчитаны по данным SOCOM для марта и апреля 2019 г. (период проведения измерительной кампании ЕММЕ). На рис. 2 представлены среднечасовые значения эмиссии и поглощения  $\text{CO}_2$  поверхностью Финского залива за весь период измерений.

Из рис. 2 видно, что в марте 2019 г. исследуемая часть Финского залива выступала в роли источника  $\text{CO}_2$ , тогда как в апреле водная поверхность поглощала  $\text{CO}_2$ . На это повлияла разность парциального давления  $\text{CO}_2$  в воде и воздухе: в марте она была положительной ( $e_{\text{CO}_2\text{sea}} > e_{\text{CO}_2\text{air}}$ ), а в апреле – отрицательной ( $e_{\text{CO}_2\text{sea}} < e_{\text{CO}_2\text{air}}$ ). В зависимости от направления ветра вдоль трассы, соединяющей точки парных измерений, влияние водной поверхности могло увеличивать или занижать рассчитанный антропогенный выброс города. Значения удельного поглощения  $\text{CO}_2$  в апреле 2019 г. в среднем почти в 2 раза больше по модулю, чем эмиссии в марте. Максимальное поглощение  $\text{CO}_2$  наблюдается 28 апреля и достигает более  $2 \times 10^{21}$  мол.  $\text{м}^{-2} \text{ч}^{-1}$ . Максимальный удельный выброс  $\text{CO}_2$  водной поверхностью более чем в 2 раза меньше по модулю максимального удельного поглощения (9 марта,  $\sim 8 \cdot 10^{20}$  мол.  $\text{м}^{-2} \text{ч}^{-1}$ ). Наибольшие значения эмиссии и поглощения  $\text{CO}_2$  в эти дни были вызваны высокой скоростью ветра (7–10 м/с) при средней скорости в остальные дни ~ 5 м/с и относительно большой разницей парциальных давлений  $\text{CO}_2$  в воде и воздухе (в среднем ~ 300 мкратм).

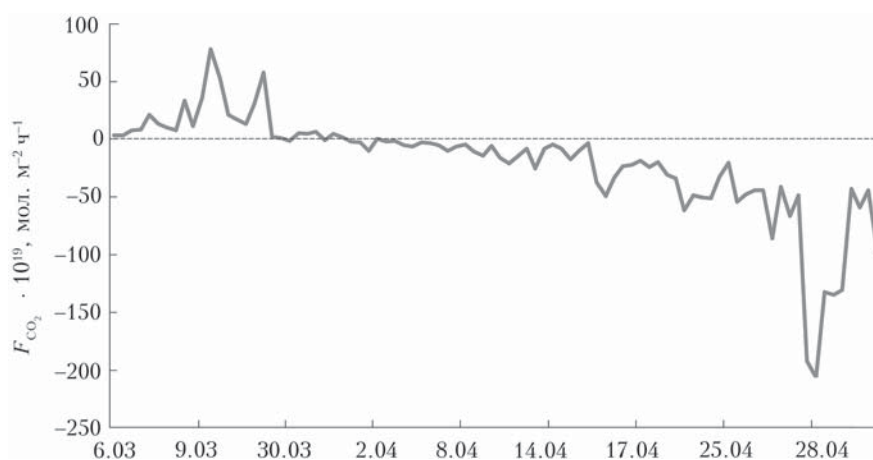


Рис. 2. Среднечасовые значения эмиссий и поглощения  $\text{CO}_2$  ( $F$ ) поверхностью Финского залива за период март–апрель 2019 г.

Удельная антропогенная эмиссия  $\text{CO}_2$  по данным [6, 8] определялись с помощью простой боксовой модели и составляла  $\sim 7,3\text{--}13,3 \cdot 10^{22}$  мол.  $\text{м}^{-2}$   $\text{ч}^{-1}$ . Процентное отношение рассчитанных удельных эмиссии и поглощения  $\text{CO}_2$  поверхностью Финского залива за март–апрель 2019 г. к средним удельным антропогенным эмиссиям мегаполиса Санкт-Петербурга, полученным в исследованиях [6, 8], достигает 1,7–3%. Ранее было показано, что изменчивость скорости ветра и разность парциального давления  $\text{CO}_2$  в наибольшей степени определяют динамику эмиссий и поглощения  $\text{CO}_2$  водной поверхностью. По данным ERA5 [21], среднемесячная скорость ветра над поверхностью Финского залива за указанный период изменялась от 3,5 до 7 м/с, что могло бы вызвать увеличение эмиссии и поглощения  $\text{CO}_2$  водной поверхностью в 4 раза. Анализ измеренной приземной скорости ветра на территории Финского залива в периоды отсутствия облачности (т.е. в потенциально пригодные для измерения солнечного излучения дни) показал, что скорость ветра более 10 м/с в большинстве случаев наблюдалась в сентябре–марте, июне–июле. В некоторые из дней скорость ветра превышала 18 м/с. Подобное значение скорости ветра над водной поверхностью при разнице парциальных давлений  $\text{CO}_2$  в водной среде и воздухе  $\sim 300$  мкатм могло привести к значениям эмиссий и поглощения, которые составили бы 5–9% от удельных антропогенных эмиссий  $\text{CO}_2$  Санкт-Петербурга.

### 3.2. Вклад эмиссий и поглощения $\text{CO}_2$ поверхностью Финского залива в оценки антропогенных выбросов Санкт-Петербурга

Далее с помощью одномерной боксовой модели был проведен расчет вклада эмиссий и поглощения  $\text{CO}_2$  водной поверхностью в антропогенные выбросы газа с территории Санкт-Петербурга на трассах, соединяющих точки измерений ЕММЕ (рис. 1):

$$\Delta T C_{\text{CO}_2} = \frac{F_a(x)L}{\bar{V}}, \quad (2)$$

где  $F_a(x)$  – удельные эмиссия/поглощение  $\text{CO}_2$  на трассе;  $L$  – длина трассы над водной поверхностью;  $\Delta T C_{\text{CO}_2}$  – данные расчетов (для водной поверхности) и измерений разницы полного содержания  $\text{CO}_2$  в атмосферном столбе между наветренной и подветренной позициями измерений города (ЕММЕ 2019);  $\bar{V}$  – средняя скорость ветра за период измерения в конкретный день. Скорость ветра определялась по данным модели HYSPLIT [6] на высоте около середины пограничного слоя, осредненным за день. Для сопоставления использова-

лись данные шести дней измерений ЕММЕ из [6]: 21, 27 марта и 1, 3, 6, 24 апреля 2019 г.

Расчет показал, что вклад Финского залива в оценки антропогенных эмиссий  $\text{CO}_2$  с территории Санкт-Петербурга в целом очень мал. Так,  $\Delta T C_{\text{CO}_2}$  над водной поверхностью на основе измерений SOCOM составлял  $\sim 0,02\text{--}0,67\%$  от антропогенного вклада Санкт-Петербурга по данным исследования [8] и  $0,02\text{--}0,34\%$  – по данным [6]. Наибольшие значения были зафиксированы 24 апреля, на что повлияли относительно большая длина трассы над водной поверхностью ( $\sim 32$  км) и высокие значения удельной эмиссии водной среды в этот период (см. рис. 2), обусловленные высокой скоростью ветра.

Максимальные значения удельного поглощения  $\text{CO}_2$  поверхностью залива по данным SOCOM наблюдались 28 апреля 2019 г. при скорости ветра  $\sim 10$  м/с (более  $2 \cdot 10^{21}$  мол.  $\text{м}^{-2}$   $\text{ч}^{-1}$ ). Если предположить, что в этот день проводились измерения на трассе с наибольшей длиной над водной поверхностью (2А–2В,  $\sim 30$  км), то вклад измерений вдоль такой трассы над территорией залива составил бы 0,9–1,6% от оценки городского вклада в содержание  $\text{CO}_2$ . При скорости ветра  $\sim 18$  м/с (наблюдалась в определенные периоды 2019 г. над Финским заливом) и разнице парциальных давлений  $\text{CO}_2$  в воде и воздухе более 300 мкатм (может наблюдаться, например, весной–летом [13])  $\Delta T C_{\text{CO}_2}$  с трассы 2А–2В над поверхностью Финского залива мог бы достигнуть в среднем  $\sim 1,4\text{--}2,7\%$  от антропогенного вклада Санкт-Петербурга по данным [6, 8]. Только при подобных условиях вклад поверхности Финского залива может быть близок к инструментальной погрешности приборов ЕММЕ.

### Заключение

В настоящем исследовании была проведена оценка эмиссий и поглощения  $\text{CO}_2$  водной поверхностью Финского залива в марте–апреле 2019 г. (период измерений программы ЕММЕ – 2019 г.) по данным судовых измерений SOCOM для определения их возможного влияния на оценки антропогенных эмиссий Санкт-Петербурга. Можно сделать следующие основные выводы.

1. Удельные эмиссии и поглощение  $\text{CO}_2$  водной поверхностью Финского залива в среднем существенно меньше (на один-два порядка) антропогенных эмиссий Санкт-Петербурга. Наибольшие вариации удельных эмиссий и поглощения водной поверхностью обусловлены вариациями скорости ветра у поверхности, а также разницей парциальных давлений  $\text{CO}_2$  в атмосферном воздухе и воде. При изменении скорости ветра от 1 до 10 м/с и разницы парциальных давлений от 0 до 300 мкатм удельные эмиссии и поглощения углекислого газа способны изменяться почти в 100 раз.

2. Оценки удельных эмиссий и поглощения CO<sub>2</sub> поверхностью Финского залива по данным измерений SOCOM за март-апрель 2019 г. в среднем составляют 1,7–3% от удельных антропогенных эмиссий мегаполиса Санкт-Петербурга. Однако при экстремальных значениях скорости ветра и разницы парциальных давлений CO<sub>2</sub> (более 18 м/с и 300 мкатм) соотношение эмиссий и поглощения CO<sub>2</sub> водной поверхностью к городским эмиссиям газа может составлять 5–9%.

3. Вклад поверхности Финского залива в марте-апреле 2019 г. для трасс измерений эксперимента ЕММЕ, проходящих над заливом, в среднем оказался мал по сравнению с вкладом Санкт-Петербурга: 0,02–0,34% и 0,02–0,7% по данным исследований [6] и [8] соответственно. Для экстремальных значений скорости ветра над поверхностью воды и разницы парциальных давлений CO<sub>2</sub> в воде и воздухе вклад водной поверхности в содержание CO<sub>2</sub> в воздушной массе, проходящей над ней, может достигать почти 3% от антропогенного вклада Санкт-Петербурга. Наши расчеты показали, что лишь при подобных экстремальных условиях вклад поверхности Финского залива в содержание CO<sub>2</sub> может быть близок к инструментальной погрешности измерительных приборов ЕММЕ.

Несмотря на незначительное влияние вклада водной поверхности в оценки эмиссий CO<sub>2</sub> с территории Санкт-Петербурга в марте-апреле 2019 г., учет эмиссий и поглощения CO<sub>2</sub> крупными водными объектами может быть важен при моделировании переноса данного газа в областях, граничащих с крупными водоемами. В особенности это может быть важно при решении обратной задачи по определению эмиссий CO<sub>2</sub> с территории городов с использованием различных измерений и моделей атмосферного переноса.

1. *World Energy Outlook 2008* [Электронный ресурс]. URL: <https://iea.org/reports/world-energy-outlook-2008> (last access: 25.02.2021)
2. *Andres R.J., Boden T.A., Breon F.-M., Ciais P., Davis S., Erickson D., Gregg J.S., Jacobson A., Marland G., Miller J., Oda T., Olivier J.G.J., Raupach M.R., Rayner P., Treanton K.* A synthesis of carbon dioxide emissions from fossil-fuel combustion // *Biogeosci.* 2012. V. 9. P. 1845–1871.
3. *Bergamaschi P., Danila A., Weiss R.F., Ciais P., Thompson R.L., Brunner D., Levin I., Meijer Y., Chevallier F., Janssens-Maenhout G., Bovensmann H., Crisp D., Basu S., Dlugokencky E., Engelen R., Gerbig C., Günther D., Hammer S., Henne S., Houweling S., Karstens U., Kort E., Maione M., Manning A.J., Miller J., Montzka S., Pandey S., Peters W., Peylin P., Pinty B., Ramonet M., Reimann S., Röckmann T., Schmidt M., Strogies M., Sussams J., Tarasova O., van Aardenne J., Vermeulen A.T., Vogel F.* Atmospheric monitoring and inverse modelling for verification of greenhouse gas inventories // JRC Science for policy report. Luxembourg, 2018. DOI: 10.2760/759928, JRC111789.
4. *Frey M., Hase F., Blumenstock T., Groß J., Kiel M., Mengistu Tsidu G., Schäfer K., Sha K.M., Orphal J.*

Calibration and instrumental line shape characterization of a set of portable FTIR spectrometers for detecting greenhouse gas emissions // *Atmos. Meas. Tech.* 2015. V. 8. P. 3047–3057.

5. *Hase F., Frey M., Blumenstock T., Groß J., Kiel M., Kohlhepp R., Mengistu Tsidu G., Schäfer K., Sha K.M., 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.
6. *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., Poberovskii A.V., Timofeyev Y.M., Paramonova N.N., Volkova K.Yu., Zaitsev N.A., Biryukov E.Yu., 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.
7. *Oda T., Maksyutov S.* A very high-resolution (1 km × 1 km) global fossil fuel CO<sub>2</sub> emission inventory derived using a point source database and satellite observations of nighttime lights // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. V. 11. P. 543–556.
8. *Тимофеев Ю.М., Неробелов Г.М., Виролайнен Я.А., Пoberовский А.В., Фока С.Ч.* Оценки антропогенных эмиссий CO<sub>2</sub> мегаполиса Санкт-Петербурга // Докл. РАН. Науки о Земле. 2020. Т. 494, № 1. С. 93–96.
9. *Takahashi T., Sutherland S.C., Sweeney C., Poisson A., Metzlb N., Tilbrook B., Bates N., Wanninkhofe R., Feely R.A., Sabine C., Olafsson J., Nojiri Y.* Global sea-air CO<sub>2</sub> flux based on climatological surface ocean pCO<sub>2</sub>, and seasonal biological and temperature effects // *Deep-Sea Res. II.* 2002. V. 49. P. 1601–1622.
10. *Crowell S., Baker D., Schuh A., Basu S., Jacobson A.R., Chevallier F., Liu J., Deng F., Feng L., McKain K., Chatterjee A., Miller J.B., Stephens B.B., Eldering A., Crisp D., Schimel D., Nassar R., O'Dell Ch.W., Oda T., Sweeney C., Palmer P.I., Jones D.B.A.* The 2015–2016 carbon cycle as seen from CO-2 and the global in situ network // *Atmos. Chem. Phys.* 2019. V. 19. P. 9797–9831.
11. *Park G.-H., Wanninkhof R., Doney S.C., Takahashi T., Lee K., Feely R.A., Sabine C., Tricanes J., Lima I.* Variability of global air-sea CO<sub>2</sub> fluxes over the last three decades // *Tellus.* 2010. V. 62B, N 5. P. 352–368.
12. URL: <https://public.wmo.int/en/resources/bulletin/annual-global-carbon-budget> (last access: 25.03.2021).
13. *Wesslander K.* The Carbon Dioxide System in the Baltic Sea Surface Waters: Doctoral thesis. University of Gothenburg, Department of Earth Sciences, 2011. 30 p.
14. *Schneider B., Gülzow W., Sadkowiak B., Rehder G.* Detecting sinks and sources of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> by ferry box-based measurements in the Baltic Sea: Three case studies // *J. Marine Sys.* 2014. V. 140 A. P. 13–25.
15. *Monteiro T., Kerr R., Machado E.d.C.* Seasonal variability of net sea-air CO<sub>2</sub> fluxes in a coastal region of the northern Antarctic Peninsula // *Sci. Rep.* 2020. V. 10. P. 14875.
16. *Humborg Ch., Geibel M.C., Sun X., McCrackin M., Mörth C.M., Stranne Ch., Jakobsson M., Gustafsson B., Sokolov A., Norkko A., Norkko J.* High emissions of carbon dioxide and methane from the coastal

- Baltic Sea at the end of a summer heat wave // *Front. Mar. Sci.* 2019. V. 6. P. 493. DOI: 10.3389/fmars.2019.00493.
17. *Wanninkhof R.* Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean revisited // *Limnol. Oceanogr. Methods.* 2014. V. 12. P. 351–362.
18. URL: <http://www.bgc-jena.mpg.de/SOCOM/> (last access: 25.03.2021).
19. *Timofeyev Yu., Virolainen Ya., Makarova M., Poberovskiy A., Polyakov A., Ionov D., Osipov S., Imhasin H.* Ground-based spectroscopic measurements of atmospheric gas composition near Saint Petersburg (Russia) // *J. Mol. Spectrosc.* 2016. V. 323. P. 2–14.
20. URL: <https://en.ilmatietaenlaitos.fi/download-observations> (last access: 25.03.2021).
21. *Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Biavati G., Horányi A., Muñoz Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Rozum I., Schepers D., Simmons A., Soci C., Dee D., Thépaut J.-N.* ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). 2018 DOI: 10.24381/cds.adbb2d47.

*G.M. Nerobelov, Yu.M. Timofeyev.* **Estimates of CO<sub>2</sub> exchange over the water surface near the St. Petersburg metropolitan area.**

Air–sea CO<sub>2</sub> exchange over the Gulf of Finland according to SOCOM ship measurements during March and April 2019 have been assessed to determine the possible impact of the water surface on estimates of St. Petersburg anthropogenic emissions. It was found that the surface of the Gulf of Finland is a source of CO<sub>2</sub> in March and a sink in April 2019. CO<sub>2</sub> fluxes per unit area of the water surface of the Gulf of Finland were on average significantly smaller (by 1–2 orders) than the anthropogenic emissions of St. Petersburg. Contribution of the Gulf of Finland surface to CO<sub>2</sub> content of air masses passing over the water surface in March–April 2019 was small on average in comparison with the contribution of St. Petersburg according to EMME (Emission Monitoring Mobile Experiment) measurements and ODIAC data (less than 1% of the cities contribution). For extreme wind speeds above the water surface and differences in the partial CO<sub>2</sub> pressure in water and air, the contribution of the Gulf of Finland to the CO<sub>2</sub> content of the air masses can reach almost 3% in relation to the anthropogenic contribution of St. Petersburg.