УДК 551.510.42

# СРАВНЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИЗМЕРЕНИЙ СОДЕРЖАНИЯ СО<sub>2</sub> В АТМОСФЕРЕ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

© 2023 г. Г. М. Неробелов<sup>а, b, \*</sup>, Ю. М. Тимофеев<sup>а</sup>, С. П. Смышляев<sup>с</sup>, С. Ч. Фока<sup>а</sup>, Х. Х. Имхасин<sup>а</sup>

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

<sup>b</sup>СПб ФИЦ РАН — Научно-исследовательский центр экологической безопасности Российской академии наук,

ул. Корпусная, 18, Санкт-Петербург, 187110 Россия

<sup>с</sup>Российский государственный гидрометеорологический университет,

Малоохтинский проспект, 98, Санкт-Петербург, 195196 Россия

\**e-mail: akulishe95@mail.ru* Поступила в редакцию 07.12.2022 г.

После доработки 21.12.2022 г.

Принята к публикации 11.01.2023 г.

Из-за увеличения содержания СО<sub>2</sub> в земной атмосфере, значительный вклад в которое вносят антропогенные эмиссии мегаполисов, требуется повышать качество их оценок. Современные экспериментальные методы оценки антропогенных эмиссий углекислого газа основаны на решении обратной задачи при помощи высокоточных измерений содержания СО<sub>2</sub> и численных моделей газового состава атмосферы. Качество подобных моделей значительно определяет погрешности оценок эмиссий. Поэтому для определения факторов, влияющих на погрешность оценки эмиссий, требуется проводить валидацию численных моделей переноса СО<sub>2</sub>. В текущей работе на примере российского мегаполиса Санкт-Петербурга за период с января 2019 по март 2020 гг. сравниваются временные изменения среднего отношения смеси CO<sub>2</sub> в столбе атмосферы от поверхности Земли до ~70-75 км (XCO<sub>2</sub>), полученные с помощью модели WRF-Chem и измеренные Фурье-спектрометром Bruker EM27/SUN. В ходе исследования было выяснено, что модель WRF-Chem хорошо повторяет измеренное временное изменение ХСО<sub>2</sub> в районе Санкт-Петербурга за период более года (коэффициент корреляции ~0.95). Однако, при задании химических граничных условий на основе данных CarbonTracker v2022-1, модель заметно завышает измеренные XCO<sub>2</sub> почти в течение всего периода исследования — средняя разность достигает 4.2 ppm (1%) со стандартным отклонением 1.9 ppm (0.5%). Коррекция граничных условий на основе анализа влияния направлений ветра на ХСО<sub>2</sub> позволяет почти в два раза минимизировать среднюю разность между результатами измерений и моделирования. При этом, значения XCO<sub>2</sub> на основе измерений и моделирования с нескорректированными граничными условиями имеют меньшие различия в вегетационный период, что, вероятно, говорит о компенсации средней разности ошибками в расчете биогенного вклада. Таким образом, причиной сохраняющейся средней разности между данными измерений и моделирования могут быть ошибки в химических граничных условиях для верхней тропосферы, а также в оценке биогенного вклада на содержание СО<sub>2</sub>.

**Ключевые слова:** XCO<sub>2</sub> в Санкт-Петербурге, антропогенные эмиссии CO<sub>2</sub>, WRF-Chem, дистанционные измерения, Bruker EM27/SUN, CarbonTracker **DOI:** 10.31857/S0002351523020050, **EDN:** HPGBSF

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

Антропогенные эмиссии  $CO_2$  с территорий мегаполисов вносят значительный вклад в рост содержания этого газа в земной атмосфере [Masson-Delmotte, 2021]. Мегаполис Санкт-Петербург один из крупнейших промышленных центров России (по данным правительства Санкт-Петербурга [Комитет по экономической политике и стратегическому планированию Санкт-Петербурга, 2022]), город с населением в несколько миллионов человек и площадью ~1400 км<sup>2</sup>. На территории мегаполиса расположено около десяти ТЭЦ, большое количество промышленных предприятий и разнообразных видов транспорта. Таким образом, Санкт-Петербург должен представлять из себя крупный антропогенный источник  $CO_2$ . Качественная оценка эмиссий крупных городов (не только Санкт-Петербурга) является значимой задачей, например, для определения суммарного ежегодного вклада России в содержание CO<sub>2</sub> и, таким образом, во влияние страны на изменения климата Земли.

Существующие подходы оценки эмиссий СО<sub>2</sub> нужлаются в совершенствовании. Например. традиционные инвентаризационные методы могут приводить к большим погрешностям – до 50% и более [Bovensmann, 2010; Oda, 2019]. Сегодня активно исследуются экспериментальные подходы оценки антропогенных эмиссий парниковых газов, а в частности СО2. Одним из таких является наземный дистанционный метод измерений пространственно-временной вариации общего содержания (ОС) СО<sub>2</sub> с помощью мобильных и взаимокалиброванных листанционных измерений. В качестве измерительных приборов могут быть использованы Фурье-спектрометры Bruker EM27/SUN, которые уже несколько лет активно используются в схожих исследованиях [Наse, 2015; Vogel, 2015].

Метод оценки антропогенных эмиссий СО<sub>2</sub> при помоши измерений основан на соотнесении измеренного содержания газа с источниками при помощи современных численных моделей динамики газового состава атмосферы высокого пространственного разрешения и алгоритмов решения обратных задач (пример см. в [Zheng, 2019]). Причем в работе [Timofeyev, 2022] отмечается, что дистанционный подход к определению антропогенных эмиссий СО<sub>2</sub> представляет из себя последовательность решения двух обратных задач – атмосферной оптики и атмосферного переноса. Как для всех некорректных в классическом смысле обратных задач, погрешности их решений значительно определяются качеством используемой априорной информации и прямого оператора. В случае обратной задачи атмосферной оптики прямым оператором является хорошо валидированная модель переноса радиации в атмосфере, а в случае обратной задачи атмосферного переноса модель динамики газового состава атмосферы. Прямой оператор обратной задачи атмосферного переноса очень сложен, так как должен учитывать множество динамических атмосферных процессов, взаимодействующих друг с другом и априорную информацию (источники и стоки CO<sub>2</sub>), имеющую погрешности. В работах [Timofeyev, 2019; Ionov, 2021] оцениваются суммарные антропогенные эмиссии СО2 с территории Санкт-Петербурга на основе экспериментального метода. Исследования показывают, что различия в используемых моделях атмосферного переноса приводят к разностям между оценками эмиссий до 30% и более. Как показано в работах [Houweling, 2010; Peylin, 2013] использование разных численных

моделей динамики газового состава атмосферы может приводить к более существенным различиям в оценках антропогенных и естественных эмиссий  $CO_2 - \sim 50\%$  и более. Соответственно точность экспериментальных оценок антропогенных эмиссий углекислого газа с территории мегаполиса в существенной степени зависит не только от качества измерений антропогенного вклада города в содержание  $CO_2$ , но и от используемой численной модели атмосферного переноса и априорной информации.

В связи с этим актуальна проблема анализа возможностей моделей динамики газового состава атмосферы представлять пространственновременное изменение содержания CO<sub>2</sub>, в особенности в районе мегаполисов. В работе [Nerobelov, 2021] для анализа качества численной модели используются локальные измерения приземного отношения смеси СО2 в Санкт-Петербурге, но анализ сравнений указывает на недостатки данного подхода. Приземные измерения СО<sub>2</sub> сильно зависят от локальных процессов и закономерностей, которые обычно имеют более высокие погрешности при моделировании [Maksvutov, 2021: Martin, 2019]. В свою очередь модельное среднее отношение смеси газа в слое от поверхности Земли до верхней границы модели (ХСО<sub>2</sub>) имеет меньшую погрешность относительно измерений. Это связано с тем, что данная величина менее зависима от локальных особенностей области исследования. Кроме того, XCO<sub>2</sub> характеризует все факторы, влияющие на содержание СО<sub>2</sub> в рассматриваемом слое атмосферы (например, источники и стоки, горизонтальный и вертикальный перенос). Поэтому анализ соответствия между данными измерений и моделирования ОС СО<sub>2</sub> или ХСО<sub>2</sub> более информативен, чем содержание газа на определенной высоте в малом объеме воздуха.

Анализ моделирования XCO<sub>2</sub> высокого пространственного разрешения проделан для многих городов Земли (см. [Buchwitz, 2005; Callewaert, 2022; Zhao, 2019]). Однако, для территории мегаполиса Санкт-Петербурга и прилегающей к нему территории подобные исследования за период более года ранее не проводились.

В исследовании [Zhao, 2019] приведены результаты сопоставления  $XCO_2$  в Берлине, Германия в 2014 г., полученные на основе измерений серией ИК Фурье-спектрометров Bruker EM27/SUN и моделирования WRF-GHG. В среднем разность между измерениями и моделированием составила 1–2 ppm. При этом, в этой же работе, а также в ряде других [Ionov, 2021; Makarova, 2021] показано, что антропогенный вклад города в содержание  $CO_2$ , измеренный при помощи парных высокоточных спектрометров, находится в диапазоне

от менее ~0.5 до 5 ррт. Данная характеристика имеет почти прямую связь с антропогенными эмиссиями СО<sub>2</sub> с территории города. Суть парных измерений заключается в возможности исключения всех основных влияющих факторов на содержание СО<sub>2</sub>, кроме антропогенных выбросов с территории исследуемого города или иного объекта. При таком подходе, учитывая, что модель качественно представляет атмосферный перенос. достаточно варьировать только априорные антропогенные эмиссии города до тех пор, пока результаты моделирования не станут наилучшим образом согласовываться с измерениями. Скорректированные априорные эмиссии будут являться решением обратной задачи атмосферного переноса. Однако, если доступны измерения содержания CO<sub>2</sub> лишь одним прибором, то при моделировании важно корректно учитывать и иные влияющие факторы (т.е. перенос СО<sub>2</sub> с границ области моделирования, биогенный вклад и др.). Поэтому при таком подходе достаточная погрешность моделирования динамики СО<sub>2</sub> в атмосфере зависит от величины антропогенного вклада. Например, если вклад 5 ррт, то с погрешностью моделирования 1 ррт погрешность скорректированных антропогенных эмиссий СО<sub>2</sub> составит 20%. Если вклад 1 ррт, то при той же погрешности моделирования погрешность апостериорных эмиссий составит 100%. Опираясь на диапазон антропогенного вклада Санкт-Петербурга из работ [Ionov, 2021; Makarova, 2021], можно сказать, что для оценки антропогенных эмиссий города с использованием только одного измерительного прибора погрешность моделирования должна быть около 0.5-1 ppm (0.1-0.2%) и ниже.

Целью данного исследования является адаптация численной модели прогноза погоды и состава атмосферы высокого пространственного разрешения WRF-Chem и валидация результатов моделирования XCO<sub>2</sub> в районе Санкт-Петербурга за период с января 2019 по март 2020 гг. при помощи комплексных измерений состава и состояния атмосферы.

## 2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Исследование проводится для российского мегаполиса Санкт-Петербурга и его окрестностей. Измерения XCO<sub>2</sub> и приземных скорости и направления ветра проводятся в Петергофе (западная часть Санкт-Петербурга), тогда как аэрологические измерения вертикального профиля ветра — в п. Воейково (на востоке от Санкт-Петербурга, Ленинградская область). Оба населенных пункта удалены друг от друга примерно на 50 км и в целом имеют схожие географические условия — расположены в слабо урбанизированной области с не плотным автомобильным движением. Воейково и Петергоф окружены преимущественно смешанным лесом, лугами и полями, не имеют на территории крупных точечных источников газа (ТЭЦ, промышленные предприятия).

## 2.1. Экспериментальные данные

#### Измерения параметров ветра

Для валидации модели WRF-Chem в исследовании используются данные измерений ХСО<sub>2</sub>, а также важнейших метеорологических параметров, характеризующих атмосферный перенос – приземные скорость и направление ветра, вертикальный профиль параметров ветра. В Петергофе на базе физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ) проводятся регулярные измерения приземных параметров ветра при помощи прибора Weather station WXT536 на высоте ~18-20 м. Погрешности лля скорости и направления ветра составляют 3% и  $3^{\circ}$ , соответственно (при скорости ветра 10 м/с, см. https://www.campbellsci.com.au/wxt536). Данные доступны с интервалом в 10 минут. Аэрологические измерения вертикального распределения метеорологических параметров взяты с сайта http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html. Данные измерения выполняются при помощи запуска метеозондов с измерительной станции в п. Воейково. В исследовании используются измеренные вертикальные профили скорости, направления ветра и температуры воздуха за два доступных срока – 0 и 12 ч UTC. Вертикальный предел измерений достигает ~30 км над поверхностью Земли.

## Измерения ХСО2

В настоящей работе используются данные измерений ХСО<sub>2</sub>, полученные с помощью откалиб-ИК Фурье-спектрометра рованного Bruker EM27/SUN. Измерения данным прибором проводились в Петергофе в период с 01.2019 по 03.2020 гг. в рамках проведения международной программы мобильных и стационарных измерений CO<sub>2</sub> EMME (Emission Monitoring Mobile Experiment) [Ionov, 2021; Makarova, 2021; Alberti, 2022]. Данный прибор измеряет спектры прямого солнечного излучения в инфракрасном (ИК) диапазоне 4000-12000 см<sup>-1</sup> со спектральным разрешением 0.5 см<sup>-1</sup>. Для интерпретации спектров используется алгоритм, описанный в работе [Frey, 2019], при этом ХСО2 рассчитывается, как среднее содержание углекислого газа в слое от поверхности Земли до высоты 75 км. Исследования показали, что систематическая и случайная погрешности восстановления ХСО2 при помощи измерений Вruker EM27/SUN могут достигать ~0.5% и 0.025– 0.075%, соответственно [Frey, 2019; Gisi, 2012; Frey, 2015]. Данные измерений XCO<sub>2</sub> в Петергофе доступны с шагом ~1 минута, однако имеют большие пропуски, как в течение дней, так и всего периода исследования, что связано преимущественно с погодными условиями (доступно 83 дня измерений за период более года).

Измерения  $XCO_2$  в Санкт-Петербурге с помощью наземного спектроскопического метода начаты на базе СПбГУ в 2009 году при помощи стационарного ИК Фурье спектрометра Bruker 125HR [Timofeyev, 2016]. Однако, Анализ измерений [Тимофеев, 2019] указывает на наличие систематических различий по сравнению с независимыми измерениями (данными сети измерений Total Carbon Column Observing Network или TCCON) [Barthlott, 2015]. Поэтому в исследовании используются измерения кампании EMME мобильным откалиброванным спектрометром. В работе измеренные и модельные значения  $XCO_2$ даны в единицах ppm (particles per million) относительно количества молекул сухого воздуха.

#### 2.2. Численная модель WRF-Chem

#### Описание численного эксперимента

В исследовании используется численная модель прогноза погоды и состава атмосферы высокого пространственного разрешения WRF-Chem версии 4.1.2 [Skamarock, 2019; Grell, 2005; Beck, 2011]. Модель способна представлять динамику инертных, активных газовых примесей и аэрозолей в слое тропосферы и нижней стратосферы (до ~20 км) под воздействием переноса, физических процессов и химических реакций. Основной динамического ядра модели является система уравнений гидро- и термодинамики, при помощи которой определяются следующие важные компоненты для моделирования атмосферного переноса - горизонтальные и вертикальные скорости переноса, атмосферное давление, температура воздуха и подстилающей поверхности, перенос влаги и примесей. Более сложные и мелкомасштабные физические процессы (процессы пограничного и приземного слоев, коротковолновая и длинноволновая радиация, конвекция и развитие кучевой облачности, микрофизика облачности и др.) решаются при помощи параметризации на подсеточном масштабе.

Численные эксперименты по переносу  $CO_2$ выполнялись на вложенных сетках (всего 4 области) — рис. 1. Внешняя область d01 покрывает территорию 800 × 800 км<sup>2</sup> с пространственным разрешением 8 км. В неё входят часть Северо-Запада России (Ленинградская область в центре),

юг Финляндии, Эстония и Латвия. Область d02 вложена в d01 и имеет размер  $\sim 320 \times 320 \text{ кm}^2 \text{ с}$ пространственным разрешением 4 км. Наконец, две внутренние области d03 и d04 с размерами  $\sim 110 \times 110 \text{ км}^2$  и разрешением 2 км. Область d03 покрывает Санкт-Петербург, а d04 – Хельсинки. Моделирование для территории Хельсинки выполнено в рамках иной задачи и в данной работе рассматриваться не будет. Однако результаты моделирования с территории Хельсинки в процессе расчета внедряется на более грубую область моделирования – d01, корректируя результаты эксперимента, поэтому ее нельзя не упомянуть. Численный эксперимент проводится на 25 гибридных вертикальных уровнях (сигма и изобарическая система координат) с верхней границей на высоте 50 гПа (~18–20 км). В данном численном эксперименте кроме динамического учтены три фактора, влияющие на изменение содержания СО<sub>2</sub> на области моделирования — химические граничные условия, антропогенные источники и биогенное поглощение и выделение СО<sub>2</sub>, о которых вкратце указано далее. Результаты моделирования WRF-Chem доступны с временным шагом в 10 минут, что позволяет почти максимально задействовать для валидации модели данные измерений ХСО<sub>2</sub> и приземного ветра.

325

#### Начальные и граничные условия

В качестве метеорологических начальных (НУ) и граничных условий (ГУ) используются данные анализа ERA5 с горизонтальным пространственным разрешением 0.25° и вертикальным распределением на 137 гибридных уровнях от поверхности Земли до примерно 80 км [Hersbach, 2020; Hersbach, 2018]. Данные ERA5 получены на основе численного моделирования атмосферных процессов моделью Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) Integrated Forecast System (IFS) и ассимиляции метеорологических измерений методом 4DVar. Данные включают такие метеорологические параметры, как атмосферное давление, скорость и направление ветра, температура воздуха, массовая доля водяного пара и геопотенциал. В текущем исследовании метеорологические ГУ задаются через каждые 6 часов в течение всего периода моделирования. В работе [Nerobelov, 2021], в качестве метеорологичеких начальных и граничных условий используются данные Global Forecast System или GFS (https://www.ncei.noaa.gov/products/weather-climatemodels/global-forecast). Однако, проведя серию экспериментов (sensitive experiments) за выборочные дни периода март-апрель 2019 г. с двумя разными НУ и ГУ, было показано, что для территории Санкт-Петербурга за исследуемый период



**Рис. 1.** Области моделирования WRF-Chem; красной и зеленой точками выделены положения городов Санкт-Петербург и Хельсинки, соответственно.

результаты моделирования приземного отношения смеси CO<sub>2</sub> имеют немного лучшее согласие с измерениями при использовании ERA5.

В качестве химических ГУ используются данные CarbonTracker — Near-Real Time v.2022-1 (CT-NRT.v2022-1). Набор данных CarbonTracker предоставлен сотрудниками NOAA ESRL, Боулдер, Колорадо, США и доступен на сайте http:// саrbontracker.noaa.gov. Данные представлены в виде отношения смеси CO<sub>2</sub> на 35 вертикальных гибридных уровнях до высоты примерно 200 км с грубым пространственным разрешением в 2 × 3° через каждые 6 ч [Jacobson, 2020]. Данные CT- NRT.v2022-1 получены при помощи численного моделирования переноса CO<sub>2</sub> глобальной моделью атмосферного переноса TM5 и ассимиляции локальных измерений газа (наземных, мачтовых, корабельных и самолётных, см. https://gml.noaa. gov/ccgg/carbontracker/CT2019B/).

## Априорные источники и стоки СО2

Для задания антропогенных эмиссий  $CO_2$  за 2019 г. используется инвентаризационная база данных ODIAC (Open-source Data Inventory for Anthropogenic  $CO_2$ ) с пространственным разрешением в среднем ~1 км<sup>2</sup> для всей поверхности Земли (~0.43 км<sup>2</sup> для территории исследования) [Tomohiro, 2015]. Отметим, что при задании априорных антропогенных источников CO<sub>2</sub> по данным ODIAC за 2019 г. мы вынесли на второй, третий и четвертый вертикальные модельные уровни (слой примерно от 50 до 200 м над поверхностью Земли) эмиссии газа, которые явно соответствовали положению ТЭЦ в Санкт-Петербурге и Хельсинки (https://openinframap.org). Так, высота труб ТЭЦ в этих городах может варьироваться от менее сотни до около 180 м.

В исследовании [Timofeyev, 2020] при помощи решения обратной задачи и простейшего предположения об атмосферном переносе показано, что интегральные антропогенные эмиссии СО<sub>2</sub> с территории Санкт-Петербурга за 2018 г. на основе базы данных ODIAC и инвентаризации администрации города могут быть завышены в ~2 раза (31.2 против 65.4 Мт/год). В работе [Timofevev, 2022] приводятся уточненные оценки интегральных антропогенных эмиссий СО2 Санкт-Петербурга, которые находятся в диапазоне 51.9-72.0 Мт/год, при этом систематические погрешности расчета могут достигать 25% и более. В текущей работе интегральные антропогенные эмиссии СО<sub>2</sub> с территории города по данным ODIAC составляют около 49.1 Мт/год, что близко к нашим последним оценкам.

Для учета биогенных источников и стоков CO<sub>2</sub> растениями в результате фотосинтеза в исследовании применяется модель VPRM (Vegetation Photosynthesis and Respiration Model) [Mahadevan, 2008], которая является частью используемой версии WRF-Chem. Расчет биогенного вклада выполняется параллельно с работой WRF-Chem.

В работе [Nerobelov, 2021] показано, что возможный вклад водной поверхности Финского залива в содержание  $CO_2$  очень мал по отношению к антропогенному (1–3%), поэтому в текущем исследовании данный фактор не учитывается, как и вклад от лесных пожаров.

## 2.3. Проблема учета всего слоя атмосферы

Модель WRF-Chem описывает слой атмосферы до высоты около 20 км или 50 гПа, тогда как измерения общего содержания газа проводятся в атмосферном столбе от поверхности Земли до высоты 75 км. Соответственно, не учет слоя выше 20 км при оценке  $XCO_2$  по данным моделирования может привести к дополнительному вкладу в разность между данными измерений и WRF-Chem. В ряде исследований авторы использовали различные пути для учета данного фактора. Например, в работе [Callewaert, 2022] вместо ОС СО<sub>2</sub> во

всем столбе брался интеграл по восстановленному профилю содержания газа примерно до высоты 20 км.

Для того, чтобы учесть вклад атмосферного слоя выше 50 гПа в общее содержание  $CO_2$  на основе данных WRF-Chem, мы используем информацию из реанализа службы Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) версии v21r2, который получен при помощи объединения численного моделирования атмосферного переноса и спутниковых измерений [Chevallier, 2010]. Данные представляют из себя пространственно-временное распределение содержания  $CO_2$  в слое от поверхности Земли до примерно 70 км на 39 вертикальных уровнях с пространственным разрешением 1.9 и 3.8° и временным шагом в 3 ч.

Сопоставление  $XCO_2$  на основе реанализа CAMS в слое атмосферы 0–70 км с данными измерений Bruker EM27SUN в слое 0–75 км за период 01.2019-03.2020 гг. указывает на то, что данные реанализа в среднем завышают измеренные значения на 2.2 ppm (~0.5%). Несмотря на то, что нам не известно, какой слой атмосферы вносит наибольший вклад в эту разность, мы уменьшили на ~0.5% привлекаемые данные CAMS в слое выше 20 км.

Влияние водяного пара в атмосфере на вариацию  $CO_2$  во всем атмосферном столбе учтено при расчете  $XCO_2$  благодаря учету общего содержания водяного пара на основе наземных спектроскопических измерений прибором Bruker 125HR в Петергофе [Timofeyev, 2016].

## 2.4. Адаптация численной модели WRF-Chem

Временные вариации XCO<sub>2</sub> по данным CarbonTracker, которые используются в исследовании в качестве химических ГУ, и измерениям Bruker EM27/SUN хорошо соответствуют друг другу (рис. 2). Так, данные CarbonTracker, доступные через каждые 3 часа, и осредненные за 3 ч измерения в Петергофе за период 01.2019-03.2020 гг., имеют высокий коэффициент корреляции с измерениями (KK = 0.93). Однако, данные моделирования за большую часть периода заметно завышают измеренные значения ХСО2 и имеют среднюю разность (СР) в 3.3 ррт. При этом отметим малое стандартное отклонение разности (СОР) – ~1.3 ррт. Такая высокая средняя разность при малом стандартном отклонении вероятно вызвана постоянным источником ошибок, например, неточностями в априорных антропогенных эмиссиях базы данных CarbonTracker для территории Санкт-Петербурга и окрестностей.

Анализ вариации направления приземного ветра и XCO<sub>2</sub> на основе калиброванных измере-



**Рис. 2.** Временной ряд XCO<sub>2</sub> в районе Санкт-Петербурга за 01.2019–03.2020 гг. на основе измерений Bruker EM27/SUN (Петергоф) и моделирования CarbonTracker; внизу приведена разность между данными.

ний прибором Bruker EM27/SUN в Петергофе позволяет скорректировать химические ГУ при моделировании WRF-Chem. Для этого отобраны измерения за временные периоды при направлениях ветра, которые соответствуют наименьшему антропогенному и биогенному вкладам на динамику измеряемого  $XCO_2$ . В таком случае основным влияющим фактором на  $XCO_2$  в области измерений будет CO<sub>2</sub>, переносимый с удаленных территорий (например, с территорий, расположенных за границами области моделирования). Подобные исследования проводились ранее на основе спектроскопических измерений  $XCO_2$  стационарным Фурье-спектрометром Bruker IFS125HR [Никитенко, 2021].

На рис. 3 приведены отобранные (14 из 128 пар) значения  $XCO_2$  на основе измерений Bruker EM27/SUN и данных CarbonTracker в Петергофе за период с минимальным биогенным влиянием (середина осени по начало весны 2019—2020 гг.) и с направлениями приземного ветра, которые соответствую переносу воздуха со сторон, противоположных положению Санкт-Петербурга относительно Петергофа (260–310°). Также на рис. 3 приводится разность между дан-

ными измерений и моделирования. Разности между данными часто составляют около 1-2 ppm, иногда достигая 3-4 ррт (январь 2020 г.). СР составляет около 1.8 при СОР 1.4 ррт, данные моделирования CarbonTracker в основном завышают измерения ХСО2 в Петергофе. Отметим, что наибольшая разность наблюдается при близких к западным направлениям приземного ветра (260-270°), а минимальная – при близких к северо-западным (280–300°). Завышенная разность в январе 2020 г. соответствует направлениям переноса преимущественно с запада и возможно обусловлена ошибками в априорных антропогенных эмиссиях, например, на территории г. Петергофа, Ломоносова, пространственное распределение которых очевидно не может быть учтено при моделировании в данных CarbonTracker (из-за грубого пространственного разрешения). В свою очередь перенос с северо-западных направлений соответствует перемещению воздушных масс с противоположного берега Финского залива, где, согласно данным об антропогенных эмиссиях CO<sub>2</sub> ODIAC, эмиссии газа значительно меньше (в 4 и более раз), чем с территории Санкт-Петербурга и Петергофа.



**Рис. 3.** Временной ряд XCO<sub>2</sub> при условиях малого влияния биогенного фактора и антропогенного воздействия Санкт-Петербурга по данным измерений Bruker EM27/SUN и моделирования CarbonTracker в Петергофе за период с середины осени по начало весны 2019–2020 гг.; внизу приведена разность между данными.

Мы полагаем, что значения  $XCO_2$ , приведенные на рис. 3, характеризуют общее содержание  $CO_2$  в Петергофе, обусловленное в первую очередь переносом воздуха с границ области моделирования (территория области нанесена на рис. 1). Анализ показывает, что данные CarbonTracker на границах области моделирования завышены относительно реального содержания  $CO_2$  почти во все рассмотренные дни, что является обоснованием для проведения коррекции этих данных перед использованием в качестве химических ГУ.

#### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В исследовании проведено два численных эксперимента, в одном из которых химические ГУ заданы из нескорректированных данных Carbon-Tracker, а в другом были уменьшены на ~0.4%.

## 3.1. Моделирование скорости и направления ветра

Анализ показал, что модель WRF-Chem адекватно представляет основные направления и скорости приземного ветра в Петергофе. СР составляют -1.7 м/с и 38.2°. СОР составляют 1.5 м/с и 29.3°. Проблема с завышением скорости ветра по данным моделирования WRF-Chem обсуждалась многими учеными и вероятно связана со сложностями моделирования максимальной скорости ветра в течение дня (см., например, [Mues, 2018; Li, 2021]). Отмечено, что модель WRF (и, соответственно, WRF-Chem) представляет перенос воздуха у поверхности Земли хуже при условиях малой скорости ветра (ночью, в холодное время года). Возможно завышение приземной скорости ветра при моделировании обусловлены близостью Санкт-Петербурга к крупному водному объекту – Финскому заливу Балтийского моря, который способствует формированию локальных циркуляций в пограничном слое Земли на горизонтальных масштабах, меньше пространственного разрешения численного эксперимента [Miller, 2003]. Кроме того, еще один достаточно крупный водный объект вблизи Петергофа – Ладожское озеро — может оказывать дополнительное влияние на локальные циркуляции воздуха. КК между данными моделирования и измерениями скоро-



**Рис. 4.** Временные ряды  $XCO_2$  на основе измерений Bruker EM27/SUN и моделирования WRF-Chem с оригинальными (orig. BC) и уменьшенными (rd. BC) химическими ГУ за 01.2019–03.2020 гг, а также их разности (шкала справа).

сти и направления ветра составляют 0.76 и 0.80, соответственно. Схожие оценки различий параметров приземного ветра по данным моделирования WRF и измерений получены в работах [Callewaert, 2022; Lauvaux, 2013].

В среднем модель WRF-Chem хорошо представляет вертикальное распределение скорости и направления ветра в тропосфере, а также температуры воздуха. Лучшее соответствие наблюдается для температуры воздуха с  $CP - 0.6^{\circ}C$  (1.7%), СОР - 3.4°С (9.7%) и КК 0.99. В свою очередь высотное распределение направления ветра имеет самый низкий КК (0.84). СР и СОР для направления ветра составляют 12.7 и 31.0°, а для скорости ветра – 1.1 и 5.4 м/с. В отличие от приземного ветра, скорость в верхней тропосфере может достигать более 40-50 м/с и обычно находится в диапазоне значений ~20 м/с, что объясняет большую величину СОР (5.4 м/с). КК для скорости ветра составляет 0.9. Стоит отметить, что при анализе согласия моделирования и измерений вертикального профиля ветра данные на всех вертикальных слоях рассматривались совместно. Это вероятно сглаживает различия между результатами измерений и моделирования на конкретных уровнях тропосферы и приводит к относительно хорошему соответствию.

Анализируя только параметры ветра, можно сказать, что модель WRF-Chem должна адекватно представлять динамику углекислого газа с высоким пространственным разрешением как у поверхности Земли, так и на различных высотах. Причем хорошее соответствие вертикального профиля температуры воздуха между данными модели и аэрологическими измерениями должен указывать на возможности адекватного моделирования не только горизонтального, но и вертикального переноса в атмосфере.

## 3.2. Моделирование ХСО<sub>2</sub> в Петергофе

На рис. 4 и в табл. 1 приведены результаты сопоставления  $XCO_2$  в Петергофе за 01.2019— 03.2020 гг. на основе данных измерений прибором Bruker EM27/SUN и моделирования WRF-Chem для исходных химических ГУ по данным CarbonTracker (orig. BC) и скорректированных на основе анализа влияния направления ветра на измерения  $XCO_2$  (red. BC).

Характер временного изменения XCO<sub>2</sub> по данным моделирования WRF-Chem схож с измерен-

**Таблица 1.** Статистические характеристики расхождения среднечасового XCO<sub>2</sub> по данным WRF-Chem и измерениям в Петергофе за период 01.2019 г.–03.2020 г.; значения в % даны относительно среднего XCO<sub>2</sub> на основе измерений; CO – стандартное отклонение, CP – средняя разность, COP – стандартное отклонение разности, KK – коэффициент корреляции

Данные	Среднее/СО, ррт	CP/COP, ppm (%)	КК
<b>Bruker EM27/SUN</b> – WRF-Chem orig. BC	<b>408.4/3.4</b> 412.7/4.8	-4.2/1.9 (-1.0/0.5)	0.95
Bruker EM27/SUN – WRF-Chem red. BC	<b>408.4/3.4</b> 410.9/4.8	-2.5/1.9 (-0.6/0.5)	0.95

ным, имея КК ~0.95. Модель хорошо представляет уменьшение содержания СО<sub>2</sub> в начале вегетационного периода (май), его окончание (август) и последующее увеличение (до ноября). Основной сезонный ход задается через химические граничные условия (пример на рис. 2), тогда как местные особенности биогенного вклада в вегетационный период воспроизводятся при помощи расчета модели VPRM. СР и СОР между данными моделирования с оригинальными химическими ГУ и измерениями составляют 4.2 и 1.9 ррт (-1.0 и 0.5%). В периоды февраль – июнь 2019 года и ноябрь-март 2020 года модель с учетом оригинальных хим. ГУ заметно превышает данные измерений (до 2-6 ррт). Наблюдающаяся разность в ХСО<sub>2</sub> по данным измерений и моделирования имеет систематический характер и может быть вызвана завышенными химическими ГУ, а также эпизодически ошибками в оценке биогенного вклала

Анализ приземного направления и скорости ветра в Петергофе по данным измерений и моделирования WRF-Chem показал, что в некоторых случаях повышенные разности ХСО2 между данными измерений и моделированием совпадают с ошибками в моделировании приземного ветра. Обращает на себя внимание то, что в промежуток с июля по октябрь 2019 г. (приходится на вегетационный период) ХСО2 по данным измерений сближается с данными модели WRF-Chem на основе оригинальных химических ГУ. Учитывая, что основная разность между ХСО2 на основе моделирования и измерений имеет систематический характер, то очевидно, что коррекция систематики приведет к увеличенным разностям в данный период. Это может говорить о том, что биогенный вклад переоценен при моделировании.

Уменьшение содержания CO<sub>2</sub> в химических ГУ привело к соответствующему изменению средней разности между данными моделирования и измерениями XCO<sub>2</sub> (с примерно –4.2 до –2.5 ррт или с 1.0 до 0.6%). Диапазон различий между данными моделирования со скорректиро-

ванными химическим ГУ и измерениями составляет от ~0 до 7 ррт. При этом СОР и КК почти не изменились (около 1.9 ppm и 0.95, соответственно) (табл. 1). Однако, уменьшив хим. ГУ примерно на 0.4% все еще наблюдается очевидная систематическая разность. Как и предполагалось, коррекция привела к увеличению разности в период с август-сентябрь в среднем с -0.5 до 1.2 ppm. В исследовании [Callewaert, 2022] ХСО<sub>2</sub> на основе моделирования WRF-Chem и измерений Bruker 125HR в районе г. Сен-Дени (Франция, о. Реюнион, Индийский океан) за период более года имеют СР и СОР около -0.37 и 0.75 ррт, соответственно при КК 0.9. В работе [Zhao, 2019] похожие исследования проводились в Берлине (Германия) с использованием серии мобильных  $\Phi$ урье-спектрометров Bruker EM27/SUN, CP составляют 1-2 ррт, что близко к оценкам различий в районе Санкт-Петербурга.

Анализируя вклад каждого фактора в общее содержание СО<sub>2</sub> (перенос с границ, антропогенный и биогенный источники), а также вертикальные профили газа на основе моделирования WRF-Chem и данных CarbonTracker, мы выяснили, что оставшаяся средняя разность (2.5 ppm или 0.6%) вероятно связана с ошибками в химических ГУ (коррекция проводилась с помощью зимних измерений), а также в некорректном задании ГУ в слое верхней тропосферы. Согласно независимым исследованиям [Frey, 2019; Gisi, 2012; Frey, 20151 разность измерений средняя Bruker EM27/SUN может достигать ~0.5% или 2 ppm, соответственно действительное значение СР между данными измерений и моделирования в районе Санкт-Петербурга может находиться в диапазоне 0.5-4.5 ppm.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследованы возможности численной модели прогноза погоды и состава атмосферы WRF-Chem представлять динамику содержания CO<sub>2</sub> на территории российского мегаполиса Санкт-Петербурга за период более года. В ходе исследования было выявлено следующее:

1. Численная модель прогноза погоды и состава атмосферы WRF-Chem адекватно представляет состояние приземного ветра в районе Санкт-Петербурга за период более года, а также вертикального профиля данного параметра. Значительные ошибки при моделировании ветра у поверхности Земли могут быть связаны со сложностью представления местных метеорологических особенностей в районе Санкт-Петербурга (например, локальных атмосферных циркуляций между Финским заливом и сушей). Полученные разности близки к результатам независимых исследований.

2. Среднее отношение смеси  $CO_2$  в слое от поверхности Земли до примерно 70 км (XCO<sub>2</sub>) по данным моделирования WRF-Chem с использованием химических граничных условий на основе неизмененных данных CarbonTracker v-2022-1 значительно превышают измерения откалиброванного Фурье-спектрометра Bruker EM27/SUN в большей части периода исследования. При этом наблюдающаяся разность имеет систематический характер и составляет 4.2 ppm или 1% при стандартном отклонении 1.9 ppm или 0.5%. Однако, результаты моделирования демонстрируют хорошее соответствие в характере временного изменения XCO<sub>2</sub> в районе Санкт-Петербурга относительно измерений с коэффициентом корреляции ~0.95.

3. Анализа направлений ветра и измерений ХСО2 в Петергофе позволяет обоснованно уменьшить среднюю разность между результатами измерений и моделирования WRF-Chem с 4.2 до 2.5 ppm. Тем не менее, между данными моделирования и измерениями ХСО2 остается относительно большая средняя разность, имеющая выраженный систематический характер. Вероятной причиной оставшейся разности могут быть (1) ошибки в задании химических граничных условий, которые были скорректированы при использовании преимушественно зимних измерений ХСО<sub>2</sub>, (2) в задании химических граничных условий в слое верхней тропосферы и нижней стратосферы, (3) а также ошибки в учете биогенного вклада.

4. Сравнения результатов измерений и моделирования XCO<sub>2</sub> в вегетационный период указывают на то, что биогенный вклад может быть переоценен при моделировании. Вероятно, требуется адаптировать модель биогенного вклада VPRM для территории Санкт-Петербурга на основании дополнительных исследований.

5. Различия между XCO<sub>2</sub> на основе измерений и моделирования в районе Санкт-Петербурга немного больше, чем полученные в независимых исследованиях для городов, например, Сен-Дени (Франция, о. Реюнион) (на 1.5–2 ppm) и Берлина (Германия) (на 0.5–1 ppm).

## 5. БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в лаборатории "Исследование Озонного слоя и верхней атмосферы" Санкт-Петербургского государственного университета и было финансово поддержано Министерством науки и высшего образования Российской Федерании по соглашению 075-15-2021-583. Мы благодарим Франка Хазе, Томаса Блюменштока и Карлоса Альберти из Karlsruhe Institute of Technology (Карлсруэ, Германия) за предоставление измерительного прибора Bruker EM27/SUN и помощь в проведении измерений общего содержания СО<sub>2</sub> в Петергофе. Также мы выражаем благодарность научной команде NOAA ESRL за свободный доступ к данным CarbonTracker. Мы благодарим коллег из Max Planck Institute for Biogeochemistry (Йена, Германия) за помощь в запуске модели VPRM.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Alberti Carlos, Qiansi Tu, Frank Hase, Maria V. Makarova, Konstantin Gribanov, Stefani C. Foka, Vyacheslav Zakharov, Thomas Blumenstock, Michael Buchwitz, Christopher Diekmann, Benjamin Ertl, Matthias M. Frey, Hamud Kh. Imhasin, Dmitry V. Ionov, Farahnaz Khosrawi, Sergey I. Osipov, Maximilian Reuter, Matthias Schneider, Thorsten Warneke. Investigation of spaceborne trace gas products over St Petersburg and Yekaterinburg, Russia, by using COllaborative Column Carbon Observing Network (COCCON) observations // Atmos. Meas. Tech. 2022. V. 15. P. 2199–2229. https://doi.org/10.5194/amt-15-2199-2022
- Barthlott S., Schneider M., Hase F., Wiegele A., Christner E., González Y., Blumenstock T., Dohe S., García O.E., Sepúlveda E., Strong K., Mendonca J., Weaver D., Palm M., Deutscher N.M., Warneke T., Notholt J., Lejeune B., Mahieu E., Jones N., Griffith D.W.T., Velazco V.A., Smale D., Robinson J., Kivi R., Heikkinen P., Raffalski U. Using XCO<sub>2</sub> retrievals for assessing the long-term consistency of NDACC/FTIR data sets // Atmos. Meas. Tech. 2015. V. 8. P. 1555–1573. https://doi.org/10.5194/amt-8-1555-2015
- Beck V., Koch T., Kretschmer R., Marshall J., Ahmadov R., Gerbig C., Pillai D., Heimann M. The WRF Greenhouse Gas Model (WRF-GHG) // Technical Report No. 25. 2011. Max Planck Institute for Biogeochemistry, Jena, Germany.
- Bovensmann H., Buchwitz M., Burrows J.P., Reuter M., Krings T., Gerilowski K., Schneising O., Heymann J., Tretner A., Erzinger J. A remote sensing technique for global monitoring of power plant CO<sub>2</sub> emissions from space and related applications // Atmos. Meas. Tech. 2010. V. 3. P. 781–811.
- Buchwitz M., de Beek R., Burrows J.P., Bovensmann H., Warneke T., Nothol J., Meirink J.F., Goede A.P.H., Ber-

gamaschi P., Korner S., Heimann M., Schulz A. Atmospheric methane and carbon dioxide from SCIA-MACHY satellite data: initial comparison with chemistry and transport models // Atmos. Chem. Phys. 2005. V. 5. P. 941–962, www.atmos-chem-phys.org/acp/5/941.

- Callewaert S., Brioude J., Langerock B., Duflot V., Fonteyn D., Müller J.-F., Metzger J.-M., Hermans C., Kumps N., Mahieu E., Mazière M. Analysis of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and CO surface and column concentrations observed at Reunion Island by assessing WRF-Chem simulations // Atmos. Chem. Phys. 2022. V. 22. P. 7763-7792. https://doi.org/10.5194/acp-22-7763-2022
- Chevallier F. et al. CO2 surface fluxes at grid point scale estimated from a global 21 year reanalysis of atmospheric measurements // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. D21307. https://doi.org/10.1029/2010JD013887
- Frey M., Hase F., Blumenstock T., Groß J., Kiel M., Mengistu Tsidu G., Schäfer K., Sha M.K., 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.

https://doi.org/10.5194/amt-8-3047-2015

- Frev 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. https://doi.org/10.5194/amt-12-1513-2019
- Gisi M., Hase F., Dohe S., Blumenstock T., Simon A., Keens A. XCO<sub>2</sub>-measurements with a tabletop FTS using solar absorption spectroscopy // Atmos. Meas. Tech. 2012. V. 5. P. 2969–2980.

https://doi.org/10.5194/amt-5-2969-2012

- Grell G.A., Peckham S.E., Schmitz R., McKeen S.A., Frost G., Skamarock W.C., Eder B. Fully coupled 'online' chemistry in the WRF model // Atmos. Environ. 2005. V. 39. P. 6957-6976.
- 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. https://doi.org/10.5194/amt-8-3059-2015
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis // Q J R Meteorol Soc. 2020. V. 146. P. 1999-2049.

https://doi.org/10.1002/qj.3803

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 1959 to present // Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). 2018. (Accessed on 14-APR-2021).

https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47

Houweling S., Aben I., Breon F.-M., Chevallier F., Deutscher N., Engelen R., Gerbig C., Griffith D., Hun-

ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА

gershoefer K., Macatangay R., Marshall J., Notholt J., Peters W., Serrar S. The importance of transport model uncertainties for the estimation of CO<sub>2</sub> sources and sinks using satellite measurements // Atmos. Chem. Phys. 2010, V. 10, P. 9981-9992, www.atmos-chemphys.net/10/9981/2010/.

https://doi.org/10.5194/acp-10-9981-2010

- Ionov D.V., Makarova M.V., Hase F., Foka S.C., Kostsov V.S., Alberti C., Blumenstock T., Warneke T., Virolainen Ya.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. Physics. 2021. V. 21. № 14. P. 10939–10963. https://doi.org/10.5194/acp-21-10939-2021
- Jacobson A.R., Schuldt K.N., Miller J.B., Tans P., Andrews A., Mund J., Aalto T., Bakwin P., Bergamaschi P., Biraud S.C., Chen H., Colomb A., Conil S., Cristofanelli P., Davis K., Delmotte M., DiGangi J.P., Dlugokencky E., Emmenegger L., Fischer M.L., Hatakka J., Heliasz M., Hermanssen O., Holst J., Jaffe D., Karion A., Keronen P., Kominkova K., Kubistin D., Laurent O., Laurila T., Lee J., Lehner I., Leuenberger M., Lindauer M., Löfvenius M.O., Lopez M., Mammarella I., Manca G., Marek M.V., Marklund P., Martin M.Y., McKain K., Miller C.E., Mölder M., Myhre C.L., Pichon J.M., Plass-Dölmer C., Ramonet M., Scheeren B., Schumacher M., Sloop C.D., Steinbacher M., Sweeney C., Thoning K., Tørseth K., Turnbull J., Viner B., Vitkova G., Wekker S.D., Weyrauch D., Worthy D. CarbonTracker Near-Real Time, CT-NRT.v2020-1 // NOAA Earth System Research Laboratory, Global Monitoring Division. 2020. https://doi.org/10.25925/RCHH-MS75
- Lauvaux T., Miles N.L., Richardson S.J., Deng A., Stauffer D.R., Davis K.J., Jacobson G., Rella C., Calonder G., DeCola P.L. Urban Emissions of CO2 from Davos, Switzerland: The First Real-Time Monitoring System Using an Atmospheric Inversion Technique // J. Applied Meteorology and Climatology. 2013. V. 52(12). P. 2654-2668. https://doi.org/10.1175/JAMC-D-13-038.1
- Li H.D., Claremar B., Wu L.C., Hallgren C., Körnich H., Ivanell S., Sahlée E. A sensitivity study of the WRF model in offshore wind modeling over the Baltic Sea // Geosci. Front. 2021. V. 12. P. 101229. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101229
- Makarova M.V., Alberti C., Ionov D.V., Hase F., Foka S.C., Blumenstock T., Warneke T., Virolainen Ya.A., Kostsov V.S., Frey M., Poberovskii A.V., Timofeyev Yu.M., Paramon-ova 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. https://doi.org/10.5194/amt-14-1047-2021
- Maksyutov S., Oda T., Saito M., Janardanan R., Belikov D., Kaiser J.W., Zhuravlev R., Ganshin A., Valsala V.K., Andrews A., Chmura L., Dlugokencky E., Haszpra L., Langenfelds R.L., Machida T., Nakazawa T., Ramonet M., Sweeney C., Worthy D. Technical note: A high-resolution inverse modelling technique for estimating surface CO2 fluxes based on the NIES-TM-FLEXPART cou-

2023

Nº 3 том 59

pled transport model and its adjoint // Atmos. Chem. Phys. 2021. V. 21. P. 1245–1266.

https://doi.org/10.5194/acp-21-1245-2021

- Mahadevan P., Wofsy S.C., Matross D.M., Xiao X., Dunn A.L., Lin J.C., Gerbig C., Munger J.W., Chow V.Y., Gottlieb E.W. A satellite-based biosphere parameterization for net ecosystem CO2exchange: Vegetation Photosynthesis and Respiration Model (VPRM) // Global Biogeochem. Cycles. 2008. V. 22. GB2005. https://doi.org/10.1029/2006GB002735
- Martin, Cory R., Ning Zeng, Anna Karion, Kimberly Mueller, Subhomoy Ghosh, Israel Lopez-Coto, Kevin Robert Gurney, Oda T., Kuldeep R. Prasad, Yuqiong Liu, Russell R. Dickerson, James R. Whetstone. Investigating sources of variability and error in simulations of carbon dioxide in an urban region // Atmospheric Environment. 2019. V. 199. P. 55–69.
- Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A., Connors S.L., Péan C., Berger S., Caud N., Chen Y., Goldfarb L., Gomis M.I., Huang M., Leitzell K., Lonnoy E., Matthews J.B.R., Maycock T.K., Waterfield T., Yelekçi O., Yu R., Zhou B. (eds.). IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change // Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2021. 2391 p.

https://doi.org/10.1017/9781009157896

*Miller S.T.K., Keim B.D., Talbot R.W., Mao H.* Sea breeze: Structure, forecasting, and impacts // Rev. Geophys. 2003. V. 41. P. 1011. https://doi.org/10.1000/2002P.G000124

https://doi.org/10.1029/2003RG000124

Mues A., Lauer A., Lupascu A., Rupakheti M., Kuik F., Lawrence M.G. WRF and WRF-Chem v3.5.1 simulations of meteorology and black carbon concentrations in the Kathmandu Valley // Geosci. Model Dev. 2018. V. 11. P. 2067–2091.

https://doi.org/10.5194/gmd-11-2067-2018

Nerobelov G.M., Timofeyev Y.M. Estimates of CO<sub>2</sub> Emissions and Uptake by the Water Surface near St. Petersburg Megalopolis // Atmos Ocean Opt. 2021. V. 34. P. 422–427.

https://doi.org/10.1134/S1024856021050158

Nerobelov G., Timofeyev Y., Smyshlyaev S., Foka S., Mammarella I., Virolainen Y. Validation of WRF-Chem Model and CAMS Performance in Estimating Near-Surface Atmospheric CO<sub>2</sub> Mixing Ratio in the Area of Saint Petersburg (Russia) // Atmosphere. 2021. V. 12. № 3. P. 387.

https://doi.org/10.3390/atmos12030387

Oda T., Bun R., Kinakh V., Topylko P., Halushchak M., Marland G., Lauvaux T., Jonas M., Maksyutov S., Nahorski Z., Lesiv M., Danylo O., Horabik-Pyzel J. Errors and uncertainties in a gridded carbon dioxide emissions inventory // Mitig Adapt Strateg Glob Change. 2019. V. 24. P. 1007–1050.

https://doi.org/10.1007/s11027-019-09877-2

Peylin P., Law R.M., Gurney K.R., Chevallier F., Jacobson A.R., Maki T., Niwa Y., Patra P.K., Peters W., Rayner P.J., Rödenbeck C., van der Laan-Luijkx I.T., Zhang X. Global atmospheric carbon budget: results from an ensemble of atmospheric CO<sub>2</sub> inversions // Biogeosciences. 2013. V. 10. P. 6699–6720. https://doi.org/10.5194/bg-10-6699-2013

- Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Liu Z., Berner J., Wang W., Powers J.G., Duda M.G., Barker D., Huang X.-Yu. A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4.1 (No. NCAR/TN-556+STR) // https://doi.org/10.5065/1dfh-6p97
- *Timofeyev Y.M., Nerobelov G.M. Poberovskii A.V.* Experimental Estimates of Integral Anthropogenic CO2 Emissions in the City of St. Petersburg // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2022. V. 58. P. 237245. https://doi.org/10.1134/S0001433822030100
- Timofeyev Y.M., Nerobelov G.M., Virolainen Y.A., Poberovskii A.V., Foka S.C. Estimates of CO<sub>2</sub> Anthropogenic Emission from the Megacity St. Petersburg // Dokl. Earth Sc. 2020. V. 494. P. 753756. https://doi.org/10.1134/S1028334X20090184
- Timofeyev Yu., Virolainen Ya., Makarova M., Poberovsky A., Polyakov A., Ionov D., Osipov S., Imhasin H. Groundbased spectroscopic measurements of atmospheric gas composition near Saint Petersburg (Russia) // J. Mol. Spectr. 2016. V. 323. P. 2–14. https://doi.org/10.1016/j.jms.2015.12.007
- *Tomohiro O., Maksyutov S.* ODIAC Fossil Fuel CO<sub>2</sub> Emissions Dataset (Version name: ODIAC2020b) // Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies. 2015. https://doi.org/10.17595/20170411.001
- Vogel F.R., Frey M., Staufer 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 hot-spot region: the COCCON Paris campaign 2015 // Atmos. Chem. Phys. 2019. V. 19. P. 3271–3285. https://doi.org/10.5194/acp-19-3271-2019
- 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. https://doi.org/10.5194/acp-19-11279-2019
- Zheng T., Nassar R., Baxter M. Estimating power plant CO2 emission using OCO-2 XCO<sub>2</sub> and high resolution WRF-Chem simulations // Environ. Res. Lett. 2019. V. 14. P. 085001.
- Комитет по экономической политике и стратегическому планированию Санкт-Петербурга https:// cedipt.gov.spb.ru/media/uploads/userfiles/2022/11/11/ СПРАВКА\_ЧП\_январь-сентябрь\_2022.pdf, 2022.
- Никитенко А.А., Неробелов Г.М., Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В. Анализ наземных спектроскопических измерений содержаний СО<sub>2</sub> в Петергофе // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 6. С. 265– 272.
- Тимофеев Ю.М., Березин И.А., Виролайнен Я.А., Макарова М.В., Поляков А.В., Поберовский А.В., Филиппов Н.Н., Фока С.Ч. Пространственно-временные вариации содержания СО2 по данным спутниковых и наземных измерений вблизи Санкт-Петербурга // Изв. РАН, ФАО. 2019. Т. 55. № 1. С. 65–72.

## Comparison of CO<sub>2</sub> Content in the Atmosphere of St. Petersburg According to Numerical Modelling and Observations

G. M. Nerobelov<sup>1, 2, \*</sup>, Yu. M. Timofeyev<sup>1</sup>, S. P. Smyshlyaev<sup>3</sup>, S. Ch. Foka<sup>1</sup>, and H. H. Imhasin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Saint-Petersburg State University, University Emb., 7/9, Saint-Petersburg, 199034 Russia <sup>2</sup>SPC RAS – Scientific Research Centre for Ecological Safety, Russian Academy of Sciences,

Korpusnaya st., 18, Saint-Petersburg, 187110 Russia

<sup>3</sup>Russian State Hydrometeorological University, Malookhtinskiy Prospekt, 98, Saint-Petersburg, 195196 Russia \*e-mail: akulishe95@mail.ru

Due to the increase in CO<sub>2</sub> content in the Earth's atmosphere, which is highly dependent on anthropogenic emissions of CO<sub>2</sub>, quality of emission estimation should be improved. Advanced experiment-based methods of the CO<sub>2</sub> anthropogenic emission estimation are built on solution of an inverse problem using highly-accurate measurements of  $CO_2$  content and numerical models of transport and chemistry in the atmosphere. The accuracy of such models greatly determines errors of the emission estimations. In a current study temporal variations of column-average  $CO_2$  content in an atmospheric layer from surface to the height of ~70–75 km (XCO<sub>2</sub>) in the Russian megapolis of St. Petersburg during Jan 2019–Mar 2020 simulated by WRF-Chem model and measured by IR Fourier-transform spectrometer Bruker EM27/SUN are compared. The research has demonstrated that the WRF-Chem model simulates well the observed temporal variation of XCO<sub>2</sub> in the area of St. Petersburg (correlation coefficient of ~0.95). However, using CarbonTracker v2022-1 data as chemical boundary conditions, the model overestimates XCO<sub>2</sub> relative to the observations significantly during almost the whole period of investigation – systematic difference and standard deviation of the difference are 4.2 and 1.9 ppm (1 and 0.5%). A correction of the chemical boundary conditions which is based on analysis of a relation between near-surface wind direction and XCO<sub>2</sub> variation notably decreases the systematic difference between the modelled and observed data (almost by a factor of 2). The XCO<sub>2</sub> variation by the observations and modelling with uncorrected chemical boundary conditions are in a better agreement during vegetation season. Probably this is related to the compensation of the systematic difference by inaccuracies in estimated biogenic contribution. Hence, the reason of the still existing mean difference between the modelled and observed data can be inaccuracies in setting chemical boundary conditions for upper troposphere and in estimating how biosphere influences CO<sub>2</sub> content.

**Keywords:** XCO<sub>2</sub> in Saint-Petersburg, anthropogenic emissions of CO<sub>2</sub>, WRF-Chem, remote measurements, Bruker EE27/SUN, CarbonTracker