

## ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Успенского Александра Борисовича на диссертацию Неробелова Георгия Максимовича на тему «Оценки антропогенных эмиссий CO<sub>2</sub> мегаполиса Санкт-Петербурга на основе численного моделирования», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.18. Науки об атмосфере и климате.

Диссертация Неробелова Г.М. посвящена получению количественных оценок антропогенных эмиссий диоксида углерода (CO<sub>2</sub>) в атмосферу российского мегаполиса Санкт-Петербурга. С учетом проведенного анализа отечественного и зарубежного опыта численного моделирования переноса атмосферных газов и использования измерений содержания CO<sub>2</sub> автором разработана новая методика оценивания антропогенных эмиссий CO<sub>2</sub> на территории Санкт-Петербурга по наземным спектроскопическим измерениям содержания CO<sub>2</sub> с использованием трехмерной численной модели атмосферного переноса и априорной информации.

Актуальность представленной диссертационной работы определяется тем, что CO<sub>2</sub> является основным парниковым газом. Контроль содержания и источников/стоков CO<sub>2</sub> необходим (особенно оценка антропогенных эмиссий в мегаполисах) для выполнения международных соглашений по снижению выбросов парниковых газов в атмосферу.

Диссертация состоит из Введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 170 наименований и 2-х приложений. Общий объем диссертации составляет 144 страницы. Диссертация содержит 21 рисунок и 9 таблиц.

**Во Введении** приведены общие сведения об атмосферном CO<sub>2</sub> как основном антропогенном парниковом газе и влиянии его эмиссий на радиационный баланс планеты и климатические изменения. Обозначена цель и дано обоснование актуальности выполненных исследований – оценка антропогенных эмиссий CO<sub>2</sub> Санкт-Петербурга на основе наземных спектроскопических измерений, априорных данных и численных моделей атмосферного переноса. Определен круг решаемых задач; отмечены новизна и практическая значимость результатов. Перечислены научные результаты и положения, выносимые на защиту. Приведены сведения о личном вкладе автора, достоверности и апробации результатов исследований.

**В первой главе** диссертации, носящий обзорный характер, рассмотрена роль антропогенного CO<sub>2</sub> в изменениях климата, описаны основные источники и стоки CO<sub>2</sub>, в том числе, за счет антропогенной активности. Выполнен критический анализ современных методов и средств мониторинга пространственно-временных вариаций содержания CO<sub>2</sub> в атмосфере. Представлено описание существующих систем измерений содержания CO<sub>2</sub>, включая глобальные и региональные наземные сети локальных и дистанционных измерений содержания CO<sub>2</sub>, а также мачтовые, самолетные и спутниковые измерения. Наряду с зарубежными описаны также регулярные наземные наблюдения содержания на территории России. Наряду с описанным средств и измерительных систем содержания CO<sub>2</sub> обсуждаются численные модели атмосферного переноса и динамики состава атмосферы различного пространственного разрешения и



разного уровня сложности, используемые для мониторинга CO<sub>2</sub> и оценки антропогенных эмиссий этого газа.

Отдельный раздел главы 1 посвящен обзору современных методик определения антропогенных эмиссий CO<sub>2</sub>, а также анализу их преимуществ и недостатков. Рассмотрены т.н. инвентаризационный подход, который широко применяется на практике для контроля эмиссий CO<sub>2</sub> на национальном уровне (для территории страны, крупных агломераций), и подход, основанный на численном моделировании атмосферного переноса с привлечением высокоточных измерений содержания CO<sub>2</sub> и его пространственно-временных вариаций.

Представленный обзор можно считать исчерпывающим, хотя вне поля зрения автора остались локальные (точечные) мачтовые измерения потоков парниковых газов с помощью техники “eddy covariance” или «метода турбулентных пульсаций» в русскоязычной литературе. Существующая глобальная сеть FLUXNET включает около 200 мачт/вышек для измерения приповерхностных потоков CO<sub>2</sub>, краткое описание которой было бы уместным в диссертации (учитывая заявленную цель – оценку антропогенных эмиссий CO<sub>2</sub> в районе мегаполиса). Кроме того, отсутствует описание популярного в настоящее время статистического подхода, состоящего в «масштабировании» точечных измерений потоков с помощью алгоритмов машинного обучения или построении регрессионных оценок потоков углерода и чистого экосистемного обмена в терминах GPP, Resp и NEE (хотя соответствующая терминология используется в Приложениях А, В). Отсутствие перечисленных материалов можно, по-видимому, объяснить большим объемом публикаций по теме диссертации, использованных автором при подготовке обзора.

Во **второй главе** диссертации изложены результаты исследований по оценке антропогенных эмиссий CO<sub>2</sub> на территории Санкт-Петербурга с помощью одномерной боксовой модели атмосферного переноса и наземных спектроскопических измерений общего содержания (ОС) CO<sub>2</sub> в атмосфере. Обсуждаются условия применимости боксовой модели, ее преимущества и недостатки. Рассмотрен связанный с реализацией боксовой модели т.н. дифференциальный спектроскопический метод определения ОС диоксида углерода и других газов в атмосфере, состоящий в парных измерениях ОС в наветренной и подветренной сторонах мегаполиса с помощью взаимокалиброванных мобильных спектрометров. Указанный метод практически реализован в международной кампании проведения мобильных спектроскопических измерений ЕММЕ (Emission Monitoring Mobile Experiment) на территории Санкт-Петербурга. Результаты измерений ЕММЕ в период 2019 г. использованы диссертантом совместно с априорной информацией из инвентаризационной базы данных (БД) ODIAC для оценок с помощью боксовой модели суммарных антропогенных эмиссий CO<sub>2</sub> на территории Санкт-Петербурга. Выполнен детальный анализ систематических погрешностей полученных оценок и факторов, на нее влияющих. Изложение материала в главе 2 достаточно ясное, но при этом неясно, зачем в начале главы (стр. 35 – 37) помещены общие сведения о некорректных обратных задачах – одномерная боксовая модель атмосферного переноса очевидно не относится к некорректным задачам.



**Главы 3 и 4**, основные в рецензируемой работе, посвящены решению основной задачи диссертации (оценка антропогенных эмиссий  $\text{CO}_2$  в Санкт-Петербурге) с помощью трехмерной численной модели прогноза погоды и состава атмосферы высокого пространственного разрешения WRF-Chem. Указанная модель по точности описания атмосферного переноса намного превосходит более простые боксовые модели.

Содержание главы 3 составляет анализ возможности модели WRF-Chem адекватно описывать пространственно-временные вариации ОС  $\text{CO}_2$  на территории Санкт-Петербурга за годовой период времени. Для этого выполнена валидация результатов моделирования путем их сравнения с данными измерений состояния атмосферы и содержания  $\text{CO}_2$  на территории Санкт-Петербурга и южной части Финляндии, а также с независимыми модельными оценками (модели CAMS и Carbon Tracker). Дано описание измерений приземной концентрации и ОС  $\text{CO}_2$  (в терминах  $\text{XCO}_2$  – среднего отношения смеси в сухой атмосфере), проводимых в г. Петергофе (вблизи Санкт-Петербурга) и г. Хельсинки (Финляндия), включая оценки измерительных погрешностей, а также сопутствующих метеорологических наблюдений. Рассмотрены адаптация модели WRF-Chem к области исследований (Санкт-Петербург, Хельсинки и прилегающие территории) и результаты численного эксперимента с адаптированной моделью за период январь 2019 – март 2020 г.г. Детально проанализированы антропогенные эмиссии  $\text{CO}_2$  (по данным БД ODIAС), биогенные потоки и другие источники/стоки  $\text{CO}_2$ . Отдельный раздел главы 3 посвящен анализу соответствия достигнутых погрешностей моделирования с помощью WRF-Chem современным требованиям по точности оценки антропогенных эмиссий  $\text{CO}_2$  на различных временных масштабах (от суток до несколько лет).

К основным результатам и выводам исследований главы 3 можно отнести установленную пригодность адаптированной модели WRF-Chem для описания годовых вариаций  $\text{CO}_2$  в атмосфере над Санкт-Петербургом, с погрешностями, позволяющими детектировать антропогенные эмиссии этого газа.

В **главе 4** адаптированная модель WRF-Chem и парные спектроскопические измерения общего содержания  $\text{CO}_2$  использованы для численных экспериментов по оценке суммарных антропогенных эмиссий  $\text{CO}_2$  на территории Санкт-Петербурга за 2019 г. Выполнены детальный анализ погрешностей полученных оценок и их сравнение с независимыми оценками, полученными с помощью инвентаризационной методики (БД ODIAС) или с помощью других численных моделей, а также с экспериментальными данными (кампания EMME).

В **заключении** перечислены основные результаты исследований диссертанта.

**Научная новизна** представленных результатов состоит в разработке новой методики и получении с ее помощью количественных оценок антропогенных эмиссий  $\text{CO}_2$  на территории Санкт-Петербурга за 2019 г. Новым является детальный анализ систематических и случайных погрешностей оценок  $\text{CO}_2$  и их зависимость от пространственного покрытия области исследования данными измерений, а также от используемой априорной информации.

Как следует из текста диссертации, личный вклад соискателя в эти разработки достаточно велик. Основные результаты работы опубликованы в высокорейтинговых российских и

зарубежных журналах, а также докладывались на различных российских и международных конференциях.

**Теоретическая и практическая значимость работы** заключается в том, что предложенная методика позволяет получать оценки антропогенных эмиссий CO<sub>2</sub> на территории Санкт-Петербурга с помощью адаптированной численной модели WRF-Chem по данным наземных спектроскопических измерений содержания CO<sub>2</sub> в атмосфере. Как следует из сравнения с независимыми оценками эмиссий, предложенную методику целесообразно использовать (при наличии измерений содержания CO<sub>2</sub> в атмосфере) в качестве альтернативы к традиционному инвентаризационному подходу.

**Существенные недостатки в диссертации отсутствуют.** Изложение материала достаточно ясное, диссертация написана хорошим литературным языком. Имеется несколько редакционных замечаний, отмеченных выше, которые не влияют на высокую оценку диссертационной работы соискателя.

Диссертация Неробелова Георгия Максимовича на тему: «Оценки антропогенных эмиссий CO<sub>2</sub> мегаполиса Санкт-Петербурга на основе численного моделирования» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель Неробелов Георгий Максимович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.18. Науки об атмосфере и климате. Нарушения пунктов 9 и 11 указанного Порядка в диссертации не обнаружены.

Член диссертационного совета

Д. ф.-м. н., профессор,

гл. научн. сотр. ФГБУ «НИЦ «Планета»  Успенский А.Б.

123242, Москва, Большой Предтеченский пер., д. 7, ФГБУ «НИЦ «Планета»;

e-mail: [uspensky@planet.iitp.ru](mailto:uspensky@planet.iitp.ru)

11 апреля 2024г.

Подпись А. Б. Успенского заверяю

Ученый секретарь ФГБУ «НИЦ «Планета»



Кашницкая М. А.

