

Дистанционные спектрометрические измерения атмосферного содержания двуокиси азота вблизи городских ТЭЦ

Д.В. Ионов[✉], М.В. Макарова*

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

Поступила в редакцию 29.03.2024;
после доработки 20.05.2024;
принята к печати 16.08.2024

Функционирование тепловых электростанций сопровождается выбросом в атмосферу различных загрязняющих веществ, включая окислы азота. В настоящей работе представлены результаты спектрометрических измерений атмосферного содержания NO_2 , выполненных на кольцевых маршрутах, огибающих крупные городские ТЭЦ Санкт-Петербурга. Пространственная изменчивость тропосферного содержания NO_2 в окрестностях ТЭЦ, определяемая из экспериментальных данных методом DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy), демонстрирует повышенные значения с подветренной стороны от дымовых труб. Пространственные распределения, наблюдаемые в данных мобильных DOAS-измерений, подтверждаются результатами численных расчетов поля содержания NO_2 , выполненных с использованием модели HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectories) с учетом априорной информации об объемах эмиссии NO_x основными городскими ТЭЦ. Приближенные оценки эмиссии NO_x двумя крупнейшими ТЭЦ Санкт-Петербурга на основе расчетов суммарного потока молекул NO_2 через замкнутый контур маршрута DOAS-измерений составили $\sim 2\div 3$ тыс. т в год. Полученные экспериментальные данные важны для определения доли ТЭЦ в антропогенном загрязнении атмосферы.

Ключевые слова: окислы азота, двуокись азота, дифференциальная спектроскопия, DOAS, мобильные измерения, антропогенная эмиссия, ТЭЦ, NO_x , NO_2 ; nitrogen oxides, nitrogen dioxide, differential spectroscopy, DOAS, mobile measurements, anthropogenic emission, thermal power plant, NO_x , NO_2 .

Введение

Содержание двуокиси азота (NO_2) в городской воздушной среде является одним из важных индикаторов качества воздуха. Вместе с окисью азота (NO) эта радиационно и химически активная газовая составляющая [1] в высоких концентрациях представляет прямую угрозу здоровью человека [2, 3]. Присутствие окислов азота ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$) в тропосфере определяет условия генерации озона (O_3) и создает условия формирования вторичного атмосферного аэрозоля [1]. Антропогенная эмиссия NO_x связана с работой автотранспорта и различных промышленных установок, а также с производством энергии и тепла [2]. Как следствие, крупные города и промышленные центры представляют собой наиболее мощные источники NO_x , а необходимые меры по снижению антропогенной нагрузки на окружающую среду опираются, в частности, на достоверные данные об интенсивности соответствующих эмиссий.

Оценки эмиссии NO_x с территории мегаполиса могут быть получены как в результате формальной инвентаризации (кадастра) источников, так и на основе анализа экспериментальных данных о содержании NO_x в атмосфере и его пространственно-временных вариациях. В частности, атмосферное содержание NO_2 можно определить из дистанционных спектроскопических измерений рассеянного солнечного излучения методом DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy [4]), используя полосы молекулярного поглощения NO_2 в видимой области спектра. Суммарная концентрация NO_x рассчитывается при этом исходя из заданного (или независимо измеренного) соотношения NO_2 и NO в загрязненном воздухе. Результаты DOAS-измерений, реализуемых с мобильных платформ, движущихся по кольцевым маршрутам, которые огибают исследуемые источники, использовались для экспериментальных оценок антропогенной эмиссии NO_x в различных густонаселенных и промышленных регионах мира — Германии, Франции, Китае, Индии, Канаде, Мексике, Уругвае, Румынии [5–22]. Мобильные кольцевые DOAS-измерения атмосферного содержания NO_2 неоднократно выполнялись

* Дмитрий Викторович Ионов (d.ionov@spbu.ru);
Мария Владимировна Макарова (m.makarova@spbu.ru).

и вокруг Санкт-Петербурга (в 2012, 2014–2016 и 2019 гг.), что позволило оценить интегральную эмиссию NO_x с территории второго по численности населения мегаполиса России [23–27].

Во множестве мобильных экспериментов, выполнявшихся нами ранее в окрестностях Санкт-Петербурга, выявлены локальные максимумы атмосферного содержания NO_2 на маршруте на фоне интегрального шлейфа основных городских загрязнений. Такие максимумы были отнесены к эмиссиям городских теплоэлектроцентралей (ТЭЦ), расположенных с наветренной стороны от соответствующих участков маршрута [26]. Воздушное загрязнение, связанное с выбросами ТЭЦ, регистрировалось также и по данным мобильных FTIR- (Fourier Transform InfraRed) измерений содержания CO_2 , CH_4 и CO , выполнявшихся в Санкт-Петербурге в рамках Международной измерительной кампании ЕММЕ (Emission Monitoring Mobile Experiment) [28] в 2019 г. Повышенные концентрации NO_2 и CO по данным прямых высотных измерений (~250 м) на Останкинской телевизионной башне в Москве [29] были отнесены авторами к выбросам городских ТЭЦ в отопительный сезон.

Актуальность настоящей работы состоит не только в демонстрации возможности независимого подтверждения достоверности данных инвентаризационных (кадастровых) оценок городских антропогенных эмиссий. Представленные примеры измерений и их анализ выявляют существенную роль городских ТЭЦ в формировании интегрального шлейфа городских загрязнений и указывают на необходимость учета этих мощных локальных источников при интерпретации данных дистанционных измерений и регионального численного моделирования.

Цель настоящей работы – интерпретация новых результатов специализированных мобильных DOAS-измерений атмосферного содержания NO_2 на кольцевых маршрутах, огибающих отдельные городские ТЭЦ, с оценкой эмитируемых ими объемов NO_x .

Материалы и методы

Рассматриваемых в работе данные получены из дистанционных измерений спектральной аппаратуры, аналогичной используемой нами ранее при DOAS-измерениях тропосферного содержания NO_2 в окрестностях Санкт-Петербурга [23, 30]. Во время экспериментов осуществлялась непрерывная автоматизированная регистрация спектров рассеянного из зенита видимого солнечного излучения с борта движущегося по маршруту автомобиля. Для измерений использовался спектральный комплекс на базе компактного коммерческого USB-спектрометра OceanOptics HR4000. Регистрируемое излучение направлялось гибким оптоволоконным световодом на входную щель спектрометра с голографической дифракционной решеткой и многоэлементным фотоприемником типа ПЗС из 3648 элементов. На конце входной части световода, фиксируемой

вертикально в зенит, устанавливалась линза, ограничивающая поле зрения прибора в пределах 3° . Рабочая область спектра ~400–610 нм; среднее спектральное разрешение в области спектроскопических измерений содержания NO_2 (428–515 нм) ~0,6 нм. Помимо NO_2 , интерпретация регистрируемых в DOAS-измерениях спектров дифференциального поглощения [4] включала учет молекулярного поглощения озона, водяного пара и димера кислорода $\text{O}_2\text{--O}_2$ (O_4). В расчете искомого тропосферного содержания NO_2 (вблизи источников эмиссии определяемого загрязнением пограничного слоя атмосферы) исключалась (вычиталась) стратосферная составляющая общего вертикального содержания NO_2 , заимствованная из данных спутниковых измерений прибора OMI (Ozone Monitoring Experiment, спутник AURA [<http://avdc.gsfc.nasa.gov>]), выполняемых в день мобильного эксперимента в ближайшей к центру Санкт-Петербурга точке (среднее удаление ~24 км). Более детально характеристики мобильной аппаратуры и особенности методики обработки экспериментальных данных представлены в [23]. Суммарная погрешность DOAS-измерений тропосферного содержания NO_2 обусловлена как погрешностью исходных спектроскопических измерений, так и естественной изменчивостью состояния атмосферы (например, вариации вертикального распределения NO_2 и аэрозоля), в безоблачных условиях достигает ~20%, или $\sim 1,2 \cdot 10^{15}$ молек./см² [30, 31].

Всего было выполнено три специализированных мобильных эксперимента с круговым объездом двух городских ТЭЦ: 28.03.2016 г. и 16.03.2017 г. выполнялся объезд Северной ТЭЦ, а 19.04.2023 г. – Южной. Выбор ТЭЦ обусловлен их расположением на периферии города с возможностью кругового объезда точек выброса (дымовых труб) по относительно короткому и простому маршруту с низкой транспортной загруженностью, что позволяет рассчитывать на успешное детектирование эмиссий отдельных ТЭЦ на фоне интегрального городского шлейфа воздушных загрязнений. С учетом сложной и изменчивой дорожной обстановки, а также ввиду приоритета безоблачных условий наблюдений задача оптимального выбора времени и района измерений существенно ограничивает количество потенциальных объектов и экспериментов. Среди пяти городских ТЭЦ, вклады эмиссии которых были ранее нами отмечены в результатах других измерительных кампаний (см. введение), Северная ТЭЦ делит второе место с Правобережной ТЭЦ как по объемам выработки тепловой и электроэнергии, так и по суммарному расходу условного топлива; что же касается Южной ТЭЦ, то она лидирует среди всех городских теплоэлектроцентралей по обоим показателям (см. материалы Комитета по энергетике и инженерному обеспечению Администрации Санкт-Петербурга, <https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/ingen>).

Все мобильные DOAS-измерения проводились в середине дня, около 13:00 по местному времени. Общая информация об измерениях представлена

в табл. 1, там же приведены основные параметры, характеризующие метеорологические условия наблюдений – направление и скорость приземного ветра. Протяженность кольцевых маршрутов составляла ~20 км, а продолжительность их проезда со средней скоростью ~30÷60 км/ч – около получаса. За время проезда регистрировалось ~50÷70 осредненных серий спектральных измерений. Каждая из таких серий состоит из ~450 индивидуальных спектров, зарегистрированных в течение 30 с движения по маршруту (среднее время интегрирования спектрометра ~70 мс). Эксперименты выполнялись в будние дни (понедельник, среда и четверг) в условиях ясной либо малооблачной погоды.

Согласно данным наблюдений на одной из метеорологических станций, расположенных в центральной части города (синоптический индекс станции – 26063), в дни и сроки мобильных измерений преобладал легкий приземный ветер (2–3 м/с) переменных направлений: юго-западный 28.03.2016 г., западно-юго-западный 16.03.2017 г. и северо-северо-восточный 19.04.2023 г. Учитывая высоту дымовых труб рассматриваемых ТЭЦ (около 150 м) и вероятное влияние окружающей городской застройки на достоверность наземных метеорологических наблюдений приповерхностного ветра, в качестве основной информации о поле ветра в районах измерений и его временной изменчивости использовались данные глобального реанализа, NCEP GDAS, <http://www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/gdas>. Средняя скорость и направление ветра с оценками их неопределенностей, рассчитанные на основе данных NCEP GDAS,

интерполированных к координатам ТЭЦ, высотному уровню (150 м) и времени измерений (~13:00), представлены в табл. 1. Если направление ветра примерно соответствует данным указанным выше поверхностных метеорологических наблюдений, то его скорость на высоте 150 м над поверхностью ожидаемо их превышает (от ~4 м/с 28.03.2016 г. до ~7 м/с 19.04.2023 г.).

Схемы выполненных объездов и результаты самих измерений тропосферного содержания NO₂ в точках маршрутов мобильных экспериментов можно видеть на рис. 1. В целом данные измерений демонстрируют максимальный уровень содержания NO₂ в эксперименте 28.03.2016 г. (среднее содержание ~23·10¹⁵ молек.·см⁻²) и минимальный – 19.04.2023 г. (среднее содержание ~11·10¹⁵ молек.·см⁻²), что можно связать с различиями в ветровых условиях, способствующих более интенсивному рассеянию загрязнений в атмосфере 19.04.2023 г. (максимальная скорость ветра ~7 м/с, см. табл. 1). Более низкая скорость ветра (~4 м/с 28.03.2016 г.) замедляет естественное очищение атмосферы, приводя к накоплению загрязнений в пограничном слое, сопровождающемуся повышенным содержанием NO₂. Во всех трех экспериментах наблюдались повышенные содержания NO₂ на участках маршрутов, пролегающих вблизи исследуемых ТЭЦ с подветренной стороны от дымовых труб: к востоку от Северной ТЭЦ при юго-западном ветре 28.03.2016 г. и западно-юго-западном ветре 16.03.2017 г. и к югу-юго-западу от Южной ТЭЦ при северо-северо-восточном ветре 19.04.2023 г.

Таблица 1

Общая информация о мобильных DOAS-измерениях и основных метеорологических условиях наблюдений

Дата (день недели)	Среднее время	Общее время, мин	Длина маршрута, км	Средняя скорость, км/ч	Число измерений DOAS	Скорость ветра, м/с	Направление ветра, град
28.03.2016 г. (пн)	12:43	27	23	63	51	4,2 ± 0,4	207 ± 1
16.03.2017 г. (чт)	13:12	35	24	51	63	5,6 ± 0,3	263 ± 1
19.04.2023 г. (ср)	12:52	35	20	35	67	6,7 ± 0,2	43 ± 2

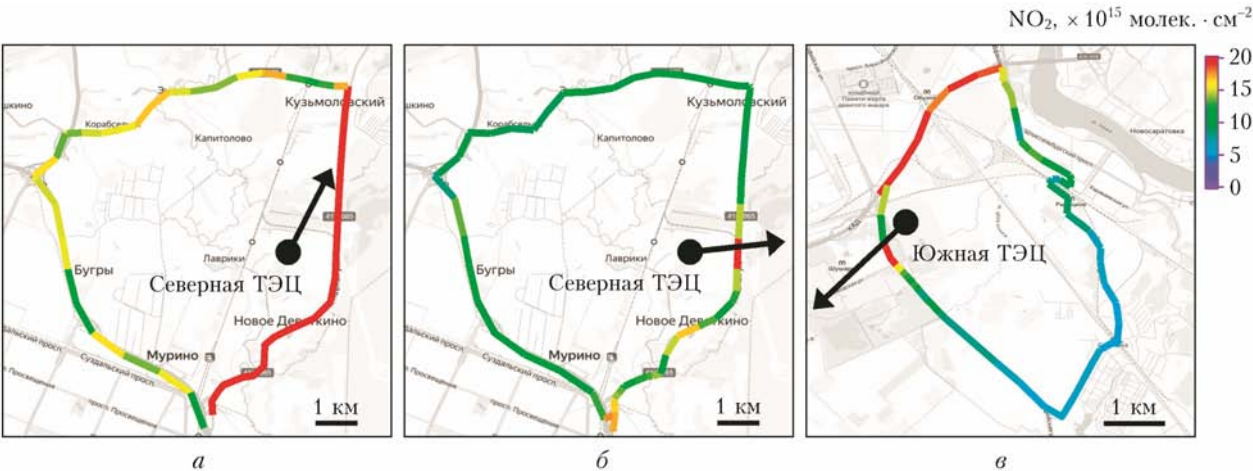


Рис. 1. Схемы маршрутов мобильных DOAS-измерений вокруг Северной и Южной ТЭЦ Санкт-Петербурга, проведенных 28.03.2016 г. (а), 16.03.2017 г. (б) и 19.04.2023 г. (в). Черными стрелками показано среднее направление ветра на высоте 150 м (см. табл. 1) (см. цветные рисунки на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.37-2024/iss.10>)

Результаты и обсуждение

Сравнение экспериментальных данных с результатами моделирования

Качественная оценка вклада эмиссий отдельных ТЭЦ в вариации тропосферного содержания NO_2 , наблюдаемые в данных мобильных DOAS-измерений (см. рис. 1), возможна благодаря моделированию распространения воздушного антропогенного загрязнения с использованием дисперсионной модели HYSPLIT в оффлайн версии. С помощью дисперсионного блока модели, сконфигурированной для территории Санкт-Петербурга и его окрестностей по аналогии с работой [26], выполнялись расчеты трехмерного поля концентрации NO_2 в пограничном слое атмосферы (0–1500 м). Основной пространственный домен модели имеет протяженность $6,8^\circ$ с.ш. и $14,1^\circ$ в.д. с горизонтальным размером ячейки $0,05 \times 0,05^\circ$ и 10 вертикальными уровнями на высотах от поверхности до 1500 м. Пространственное распределение источников городской эмиссии NO_x задано в модели на основе адаптированных данных глобальной инвентаризации антропогенной эмиссии CO_2 ODIAС [32], дополненной эмиссиями ряда крупных городских ТЭЦ [26].

Мощность модельных источников масштабировалась по оценкам суммарной городской эмиссии NO_x , ранее полученным на основе собственных мобильных DOAS-измерений вокруг Санкт-Петербурга. Так, для анализа экспериментов 2016 и 2017 гг., рассматриваемых в настоящей работе, использовалась величина суммарной годовой эмиссии NO_x с территории Санкт-Петербурга, равная 81 тыс. т [27], а для анализа эксперимента 2023 г. — 75 тыс. т [26]. Химическая трансформация NO_x аппроксимировалась приближенно с помощью встроенной опции HYSPLIT, позволяющей имитировать распад химических соединений с заданным пользователем временем жизни (6 ч для NO_x по аналогии с [26, 27]). Модельные расчеты полей концентрации NO_2 выполнялись для дней рассматриваемых мобильных экспериментов с шагом по времени 15 мин.

На рис. 2 изображена общая пространственная структура шлейфа антропогенного загрязнения пограничного слоя атмосферы над Санкт-Петербургом по данным моделирования содержания NO_2 в 13:00 по местному (астрономическому) времени 28.03.2016 г., 16.03.2017 г. и 19.04.2023 г. На карты нанесены также положения основных городских ТЭЦ, эмиссии которых отдельно заданы в модели на уровне ~ 4 тыс. т в год NO_x каждая. Пространственные распределения содержания NO_2 на рис. 2 показывают структуры, которые определяются в основном суммарным вкладом всех городских источников; возможность выделения роли отдельных ТЭЦ здесь ограничена. Очевидны сложности в интерпретации данных мобильного эксперимента вокруг Северной ТЭЦ 28.03.2016 г., когда весь район измерений находился внутри интегрального городского шлейфа, включая шлейф от двух других ТЭЦ, расположенных с наветренной от Северной ТЭЦ стороны (Центральная и Выборгская ТЭЦ). Похожая картина наблюдается в районе измерений 19.04.2023 г., когда Южная ТЭЦ очевидно располагалась в шлейфе Правобережной ТЭЦ, находящейся менее чем в 10 км с наветренной стороны.

Чтобы получить более детальную картину пространственной изменчивости NO_2 в районах мобильных измерений, были выполнены дополнительные модельные расчеты с использованием «вложенных» доменов, центрированных в точках исследуемых объектов (Северная или Южная ТЭЦ), протяженностью $0,1^\circ$ с.ш. и $0,2^\circ$ в.д. с горизонтальным размером ячейки $0,01 \times 0,01^\circ$. Полученные результаты представлены на рис. 3. На картах модельных распределений отчетливо видны шлейфы повышенного содержания NO_2 , формирующиеся с подветренной стороны от ТЭЦ и пересекающие соответствующие участки мобильных измерений. В расчетных данных за 19.04.2023 г. и в особенности за 28.03.2016 г. эти локальные шлейфы частично маскируются шлейфами других источников, находящимися далеко за пределами кольцевых маршрутов этого дня. Качественно результаты моделирования воспроизводят наблюдаемую пространственную структуру поля NO_2 .

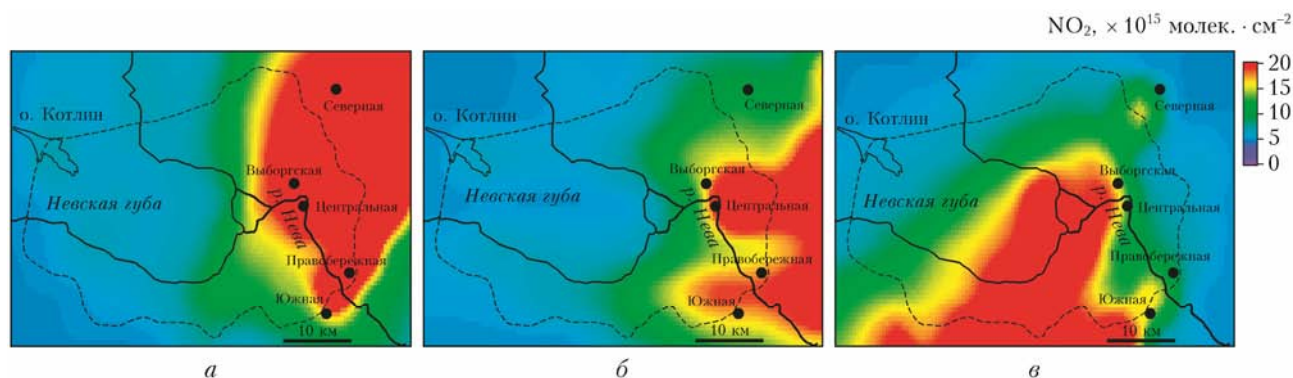


Рис. 2. Содержание NO_2 в пограничном слое атмосферы (0–1500 м) в дни мобильных DOAS-измерений вокруг Северной и Южной ТЭЦ Санкт-Петербурга 28.03.2016 г. (а), 16.03.2017 г. (б) и 19.04.2023 г. (в) по результатам моделирования HYSPLIT в 13:00 по местному (астрономическому) времени. Пунктирная линия показывает кольцевую автодорогу, огибающую большую часть городской застройки Санкт-Петербурга

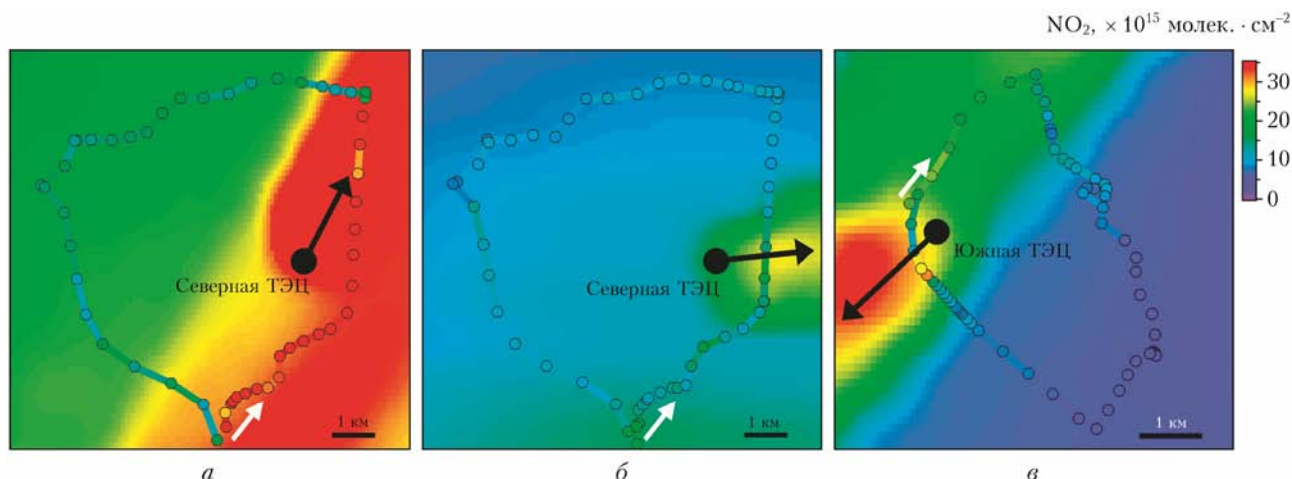


Рис. 3. Содержание NO_2 в пограничном слое атмосферы по результатам моделирования с использованием модели HYSPLIT (13:00) высокого пространственного разрешения совместно с данными мобильных DOAS-измерений вокруг Северной и Южной ТЭЦ Санкт-Петербурга 28.03.2016 г. (а), 16.03.2017 г. (б) и 19.04.2023 г. (в). Черными стрелками показано среднее направление ветра на высоте 150 м (см. табл. 1). Белыми стрелками показаны направления движения автомобиля в начальной точке кольцевого маршрута

Оценка эмиссии NO_x отдельными ТЭЦ

Интенсивность эмиссий рассматриваемых нами ТЭЦ можно оценить с помощью интегрирования по контуру результатов кольцевых DOAS-измерений содержания NO_2 , рассматривая суммарный поток молекул NO_2 через замкнутый контур маршрута, который содержит внутри себя анализируемые источники — так называемый метод интегрирования по контуру (МИК — Closed Integral Method, CIM, см. например, [8]). Аналогичный подход применялся нами ранее для оценок интегральной эмиссии NO_x с территории Санкт-Петербурга [23, 24]. Как можно видеть из карт на рис. 3, мобильные измерения с подветренной от ТЭЦ стороны фиксируют повышенное содержание NO_2 .

Более наглядным подтверждением возможности идентификации вклада ТЭЦ в данных DOAS-измерений служат графики содержания NO_2 на каждом кольцевом маршруте, представленные на рис. 4. На графиках нанесено содержание NO_2 по согласованным по времени данным мобильных измерений и результатам моделирования в точках маршрута. Фоновое содержание NO_2 определялось из данных мобильных измерений, выполненных в этот день за пределами городского шлейфа, и в качестве систематической поправки в расчетах HYSPLIT было принято равным $5 \cdot 10^{15}$ молек./см². Результаты моделирования, представленные двумя типами расчета — с учетом эмиссии ТЭЦ и без него — наглядно указывают участки маршрута, где следует ожидать локальный максимум содержания NO_2 . Качественно эти максимумы хорошо согласуются с данными измерений 16.03.2017 г. (приблизительно между 3-м и 8-м км маршрута) и 19.04.2023 г. (примерно между 17-м и 20-м км маршрута). В эксперименте 28.03.2016 г. общий ход содержания NO_2 на маршруте по данным измерений существенно отличается от рассчитанного: результаты моделирования систематически превышают данные измерений (рис. 4).

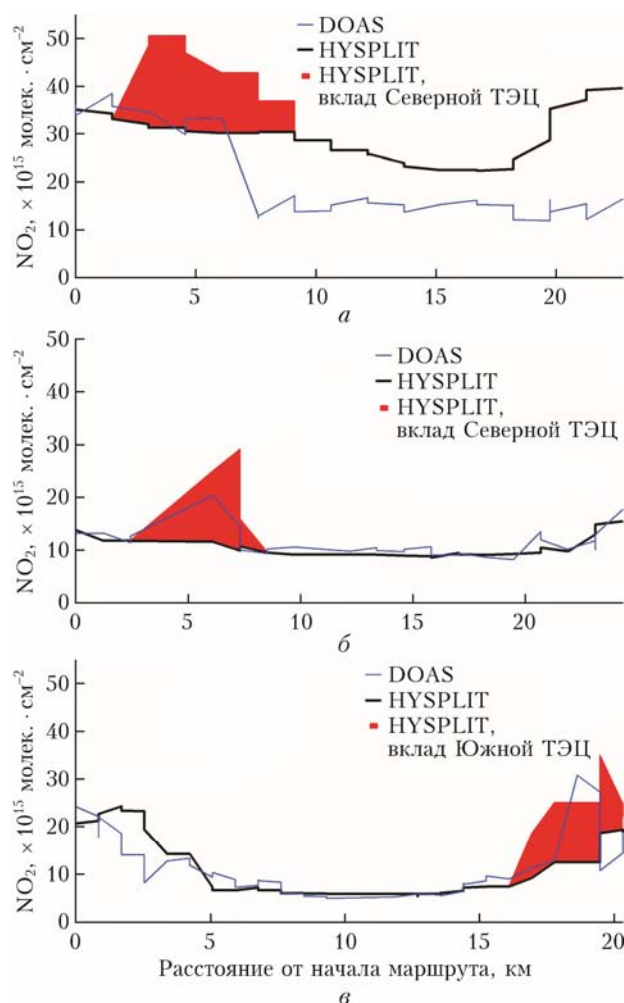


Рис. 4. Содержание NO_2 на маршрутах 28.03.2016 г. (а), 16.03.2017 г. (б) и 19.04.2023 г. (в) по согласованным по времени данным мобильных измерений (DOAS) и результатам моделирования (HYSPLIT) в точках маршрута с учетом эмиссии ТЭЦ (красная заливка) и без него (черная кривая)

Такое расхождение может быть связано с переоценкой эмиссии отдельных городских источников, в частности Центральной и Выборгской ТЭЦ, в шлейфе которых находилась Северная ТЭЦ в этот день. Положение основного максимума содержания NO_2 , наблюдаемое в начале маршрута, совпадает с данными моделирования (приблизительно между 2-м и 9-м км маршрута, см. рис. 4).

По аналогии с полученными нами ранее оценками интегральной антропогенной эмиссии NO_x с территории Санкт-Петербурга [23] МИК-подход был использован для оценок эмиссий, исследуемых в настоящей работе ТЭЦ. Расчет эмиссии основан на интегрировании по замкнутому контуру потока NO_2 :

$$F_{\text{NO}_2} = \sum_i Q_{\text{NO}_2}(s_i) W \sin(\beta(s_i)) \Delta s_i, \quad (1)$$

где Q_{NO_2} — измеренное тропосферное содержание NO_2 в точке маршрута s_i ; W — средняя скорость ветра; $\beta(s_i)$ — угол между направлением движения и направлением ветра в точке маршрута s_i ; Δs_i — длина участка маршрута, соответствующего времени i -го измерения. Итоговые оценки эмиссии NO_x получены исходя из характерной доли NO_2 в NO_x (в настоящей работе принята равной 0,71) с учетом погрешности измерений Q_{NO_2} и неопределенностей направления и скорости ветра (β и W соответственно) и пересчитаны к годовой эмиссии с использованием эмпирических коэффициентов коррекции суточной, недельной и сезонной изменчивости городской эмиссии [27]. Результаты представлены в табл. 2.

Для сравнения в табл. 2 приведены также оценки эмиссий NO_x в выбросах ТЭЦ, полученные другими авторами по результатам мобильных спектроскопических DOAS-измерений (для сопоставимости все эмиссии приведены к среднегодовым величинам без учета сезонной изменчивости). Представленные результаты показывают, что полученные разными авторами и для разных ТЭЦ оценки варьируются в большом диапазоне — от ~0,3 до ~24,9 тыс. т в год.

Мощность рассматриваемых ТЭЦ также существенно различается — от 385 до 4100 мВт. Заяв-

ленная энергетическая мощность ТЭЦ не может служить показателем объема выброса NO_x , определяемого как типом используемого топлива, так и индивидуальными технологическими особенностями генерации электроэнергии и тепла (включая также режим работы ТЭЦ в зависимости от температуры и потребительской нагрузки). Следует также отметить, что в отличие от других ТЭЦ, эмиссии которых оцениваются в аналогичных работах (см. табл. 2), все ТЭЦ, обслуживающие Санкт-Петербург и его пригороды, используют в качестве основного топлива природный газ (а не уголь или мазут). Еще одной причиной в расхождениях между экспериментальными оценками эмиссий может являться особенность измерений содержания NO_2 вблизи ТЭЦ (в «свежем» шлейфе), когда высокие концентрации NO способствуют полному локальному разрушению O_3 с избыточной долей NO в NO_x , что, в свою очередь, приводит к систематическому занижению эмиссии [13, 16, 17].

Заключение

Представленные в работе данные мобильных спектроскопических измерений атмосферного содержания двуокиси азота (NO_2) вблизи городских ТЭЦ очевидно позволяют идентифицировать соответствующие этим источникам антропогенные эмиссии. Кольцевые мобильные DOAS-измерения на маршрутах, полностью огибающих исследуемую ТЭЦ, предоставляют возможность выделить вклад данного локального источника на фоне поля воздушного загрязнения, формирующегося совокупностью множества городских эмиссий. Приведенные нами примеры полевых измерений показывают применимость такого подхода. Приближенные оценки эмиссий рассмотренных в работе ТЭЦ, полученные нами данным методом впервые, составляют ~2 ÷ 3 тыс. т NO_x в год. Эти значения близки к оценкам, полученным ранее для основных городских ТЭЦ по результатам мобильных DOAS-измерений на кольцевой автомобильной дороге, — ~4 тыс. т NO_x в год. Учитывая общее количество основных ТЭЦ, обслуживающих Санкт-Петербург и его пригороды

Таблица 2
Оценки эмиссии NO_x городскими ТЭЦ Санкт-Петербурга по данным кольцевых мобильных DOAS-измерений в сравнении с оценками эмиссий некоторых других ТЭЦ, полученными по результатам аналогичных спектроскопических измерений

Местоположение	Мощность, мВт (вид топлива)	Период измерений	Эмиссия NO_x , тыс. т в год	Источник
Санкт-Петербург, Россия:				
Северная ТЭЦ	500 (газ)	Март 2016 г.	$1,9 \pm 0,6$	Настоящая работа
Северная ТЭЦ	500 (газ)	Март 2017 г.	$3,1 \pm 0,5$	
Южная ТЭЦ	1207 (газ)	Апрель 2023 г.	$1,6 \pm 0,5$	
Монтевидео, Уругвай	385 (мазут)	Март 2012 г.	$0,3 \pm 0,1$	[13]
Шицзячжуан, Китай	600 (уголь)	Октябрь–ноябрь 2011 г.	$4,7 \pm 1,9$	[17]
Хэншуй, Китай	1260 (уголь)	Январь 2018 г.	~3,8	[33]
Дэжжоу, Китай	2670 (уголь)		~24,9	
Нагоя, Япония	4100 (уголь)	Февраль 2018 г.	$2,0 \pm 2,2$	[34]

(10 ТЭЦ), приближенная оценка вклада всех ТЭЦ в суммарную городскую антропогенную эмиссию NO_x составит $\sim 20 \div 40$ тыс. т в год, или $\sim 30 \div 50\%$. Согласно официальным данным городской инвентаризации воздушного загрязнения суммарный вклад стационарных источников эмиссии NO_x , большая часть которого явно приходится на ТЭЦ, составляет $\sim 70\%$.

Финансирование. Исследования проведены с использованием оборудования ресурсного центра Научного парка СПбГУ «Геомодель» при поддержке РНФ (проект № 23-27-00019, <https://rscf.ru/project/23-27-00019/>).

Список литературы

1. Seinfeld J.H., Pandis S.N. From Air Pollution to Climate Change. Atmospheric Chemistry and Physics. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 2006. 1326 p.
2. Molina J.M., Molina L.T. Megacities and atmospheric pollution // J. Air Waste Manag. Assoc. 2004. V. 54, N 6. P. 644–680. DOI: 10.1080/10473289.2004.10470936.
3. Голдовская Л.Ф. Химия окружающей среды. М.: Мир, 2005. 296 с.
4. Platt U., Stutz J. Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS), Principles and Applications. Berlin–Heidelberg: Springer, 2008. 598 p.
5. Johansson M., Galle B., Yu T., Tang L., Chen D., Li H., Li J.X., Zhang Y. Quantification of total emission of air pollutants from Beijing using mobile mini-DOAS // Atmos. Environ. 2008. V. 42. P. 6926–6933. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2008.05.025.
6. Johansson M., Rivera C., de Foy B., Lei W., Song J., Zhang Y., Galle B., Molina L. Mobile mini-DOAS measurement of the outflow of NO_2 and HCHO from Mexico City // Atmos. Chem. Phys. 2009. V. 9. P. 5647–5653. DOI: 10.5194/acp-9-5647-2009.
7. Rivera C., Sosa G., Wohnschimmel H., de Foy B., Johansson M., Galle B. Tula industrial complex (Mexico) emissions of SO_2 and NO_2 during the MCMA 2006 field campaign using a mobile mini-DOAS system // Atmos. Chem. Phys. 2009. V. 9. P. 6351–6361. DOI: 10.5194/acp-9-6351-2009.
8. Ibrahim O., Shaiganfar R., Sinreich R., Stein T., Platt U., Wagner T. Car MAX-DOAS measurements around entire cities: Quantification of NO_x emissions from the cities of Mannheim and Ludwigshafen (Germany) // Atmos. Meas. Tech. 2010. V. 3. P. 709–721. DOI: 10.5194/amt-3-709-2010.
9. Shaiganfar R., Beirle S., Sharma M., Chauhan A., Singh R.P., Wagner T. Estimation of NO_x emissions from Delhi using car MAX-DOAS observations and comparison with OMI satellite data // Atmos. Chem. Phys. 2001. V. 11. P. 10871–10887. DOI: 10.5194/acp-11-10871-2011.
10. Wang S., Zhou B., Wang Z., Yang S., Hao N., Valks P., Trautmann T., Chen L. Remote sensing of NO_2 emission from the central urban area of Shanghai (China) using the mobile DOAS technique // J. Geophys. Res. 2012. V. 117, N D13305. P. 1–14. DOI: 10.1029/2011JD016983.
11. Wu F.C., Xie P.H., Li A., Chan K.L., Hart A., Wang Y., Si F.Q., Zeng Y.M., Qin M., Xu J., Liu J.G., Liu W.Q., Wenig M. Observations of SO_2 and NO_2 by mobile DOAS in the Guangzhou eastern area during the Asian Games 2010 // Atmos. Meas. Tech. 2013. V. 6. P. 2277–2292. DOI: 10.5194/amt-6-2277-2013.
12. Rivera C., Barrera H., Grutter M., Zavala M., Galle B., Bei N., Li G., Molina L.T. NO_2 fluxes from Tijuana using a mobile mini-DOAS during Cal-Mex 2010 // Atmos. Environ. 2013. V. 70. P. 532–539. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2012.12.026.
13. Frins E., Bobrowski N., Osorio M., Casaballe N., Belsterli G., Wagner T., Platt U. Scanning and mobile multi-axis DOAS measurements of SO_2 and NO_2 emissions from an electric power plant in Montevideo, Uruguay // Atmos. Environ. 2014. V. 98. P. 347–356. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2014.03.069.
14. Li A., Zhang J., Xie P., Hu Z., Xu J., Mou F., Wu F., Liu J., Liu W. Variation of temporal and spatial patterns of NO_2 in Beijing using OMI and mobile DOAS // Science China. 2015. V. 58, N 9. P. 1367–1376. DOI: 10.1007/s11426-015-5459-x.
15. Shaiganfar R., Beirle S., Petetin H., Zhang Q., Beekmann M., Wagner T. New concepts for the comparison of tropospheric NO_2 column densities derived from car-MAX-DOAS observations, OMI satellite observations and the regional model CHIMERE during two MEGAPOLI campaigns in Paris 2009/10 // Atmos. Meas. Tech. 2015. V. 8. P. 2827–2852. DOI: 10.5194/amt-8-2827-2015.
16. Shaiganfar R., Beirle S., Denier van der Gon H., Jonkers S., Kuenen J., Petetin H., Zhang Q., Beekmann M., Wagner T. Estimation of the Paris NO_x emissions from mobile MAX-DOAS observations and CHIMERE model simulations during the MEGAPOLI campaign using the closed integral method // Atmos. Chem. Phys. 2017. V. 17. P. 7853–7890. DOI: 10.5194/acp-17-7853-2017.
17. Wu F., Li A., Xie P., Chen H., Hu Z., Zhang Q., Liu J., Liu W. Emission flux measurement error with a mobile DOAS system and application to NO_x flux observations // Sensors. 2017. V. 17. P. 231. DOI: 10.3390/s17020231.
18. Wu F., Xie P., Li A., Mou F., Chen H., Zhu Y., Zhu T., Liu J., Liu W. Investigations of temporal and spatial distribution of precursors SO_2 and NO_2 vertical columns in the North China Plain using mobile DOAS // Atmos. Chem. Phys. 2018. V. 18. P. 1535–1554. DOI: 10.5194/acp-18-1535-2018.
19. Davis Z.Y.W., Baray S., McLinden C.A., Khanbaba-khani A., Fujs W., Csukat C., Debosz J., McLaren R. Estimation of NO_x and SO_2 emissions from Sarnia, Ontario, using a mobile MAX-DOAS (Multi-AXis Differential Optical Absorption Spectroscopy) and a NO_x analyzer // Atmos. Chem. Phys. 2019. V. 19. P. 13871–13889. DOI: 10.5194/acp-19-13871-2019.
20. Cheng X., Ma J., Jin J., Guo J., Liu Y., Peng J., Ma X., Qian M., Xia Q., Yan P. Retrieving tropospheric NO_2 vertical column densities around the city of Beijing and estimating NO_x emissions based on car MAX-DOAS measurements // Atmos. Chem. Phys. 2020. V. 20. P. 10757–10774. DOI: 10.5194/acp-20-10757-2020.
21. Huang Y., Li A., Xie P., Hu Z., Xu J., Fang X., Ren H., Li X., Dang B. NO_x emission flux measurements with multiple mobile-DOAS instruments in Beijing // Remote Sens. 2020. V. 12, N 16. P. 2527. DOI: 10.3390/rs12162527.
22. Merlaud A., Belegante L., Constantin D.-E., Den Hoed M., Meier A.C., Allaart M., Ardelean M., Arseni M., Bösch T., Brenot H., Calcan A., Dekemper E., Donner S., Dörner S., Balanica Dragomir M.C., Georgescu L., Nemuc A., Nicolae D., Pinardi G., Richter A., Rosu A., Ruhtz T., Schönhardt A., Schuette-meyer D., Shaiganfar R., Stebel K., Tack F., Nicolae Văjăiac S., Vasilescu J., Vanhamel J., Wagner T., Van Roozendael M. Satellite validation strategy assessments based on the AROMAT campaigns // Atmos. Meas.

- Tech. 2020. V. 13. P. 5513–5535. DOI: 10.5194/amt-13-5513-2020.
23. *Ionov D., Poberovskii A.* Quantification of NO_x emission from St. Petersburg (Russia) using mobile DOAS measurements around entire city // *Int. J. Remote Sens.* 2015. V. 36, N 9. P. 2486–2502. DOI: 10.1080/01431161.2015.1042123.
 24. *Ионов Д.В., Поберовский А.В.* Интегральная эмиссия окислов азота с территории Санкт-Петербурга по данным мобильных измерений и результатам численного моделирования // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана.* 2017. Т. 53, № 2. С. 232–241.
 25. *Ionov D.V., Poberovskii A.V.* Observations of urban NO_x plume dispersion using the mobile and satellite DOAS measurements around the megacity of St. Petersburg (Russia) // *Int. J. Remote Sens.* 2019. V. 40, N 2. P. 719–733. DOI: 10.1080/01431161.2018.1519274.
 26. *Ionov D.V., Makarova M.V., Kostsov V.S., Foka S.C.* Assessment of the NO_x integral emission from the St. Petersburg megacity by means of mobile DOAS measurements combined with dispersion modelling // *Atmos. Pollut. Res.* 2022. V. 13, N 12. P. 101958. DOI: 10.1016/j.apr.2022.101598.
 27. *Ионов Д.В., Макарова М.В., Косцов В.С.* Экспериментальные оценки антропогенной эмиссии окислов азота с территории Санкт-Петербурга по данным многолетних мобильных измерений // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана.* 2024. Т. 60, № 2. С. 251–263.
 28. *Makarova M.V., Alberti C., Ionov D.V., Hase F., Foka S.C., Blumenstock T., Warneke T., Virolainen Y., Kostsov V., Frey M., Poberovskii A.V., Timofeyev Y.M., Paramonova 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. DOI: 10.5194/amt-14-1047-2021.
 29. *Elansky N.* Air quality and CO emissions in the Moscow megacity // *Urban Clim.* 2014. V. 8. P. 42–56. DOI: 10.1016/j.uclim.2014.01.007.
 30. *Ионов Д.В., Поберовский А.В.* Двуокись азота в воздушном бассейне Санкт-Петербурга: дистанционные измерения и численное моделирование // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана.* 2012. Т. 48, № 4. С. 422–433.
 31. *Поберовский А.В., Шапкин А.В., Ионов Д.В., Тимофеев Ю.М.* Вариации содержания NO₂ в районе Санкт-Петербурга по наземным и спутниковым измерениям рассеянного солнечного излучения // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана.* 2007. Т. 43, № 4. С. 547–556.
 32. *Oda T., Maksyutov S.* A very high-resolution (1 km × 1 km) global fossil fuel CO₂ emission inventory derived using a point source database and satellite observations of nighttime lights // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. V. 11. P. 543–556. DOI: 10.5194/acp-11-543-2011.
 33. *Tan W., Liu C., Wang S., Liu H., Zhu Y., Su W., Hu Q., Liu J.* Long-distance mobile MAX-DOAS observations of NO₂ and SO₂ over the North China Plain and identification of regional transport and power plant emissions // *Atmos. Res.* 2020. V. 245. P. 105037. DOI:10.1016/j.atmosres.2020.105037.
 34. *Fujinawa T., Kuze A., Suto H., Shiomi K., Kanaya Y., Kawashima T., Kataoka F., Mori S., Eskes H., Tanimoto H.* First concurrent observations of NO₂ and CO₂ from power plant plumes by airborne remote sensing // *Geophys. Res. Lett.* 2021. V. 48. P. e2021GL092685. DOI: 10.1029/2021GL092685.34.

D.V. Ionov, M.V. Makarova. Remote spectrometric measurements of atmospheric nitrogen dioxide content near urban thermal power plants.

The operation of thermal power plants (TPP) is accompanied by the emission of various pollutants into the atmosphere, including nitrogen oxides. This paper presents the results of spectrometric measurements of the atmospheric NO₂ content carried out on circular routes around large urban TPPs of St. Petersburg. The spatial variability of tropospheric NO₂ content in the vicinity of a TPP, determined from experimental data using the DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy) method, demonstrates increased values in the downwind side of smokestacks. The spatial distributions observed in the mobile DOAS measurements are confirmed by the results of numerical calculations of the NO₂ content field using the HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectories) model, taking into account a priori information on the volume of NO_x emissions from the main urban TPPs. Approximate estimates of NO_x emissions from the two largest TPPs in St. Petersburg, obtained on the basis of calculations of the total flow of NO₂ molecules through a closed loop of DOAS measurement routes, amounted to ~2÷3 thousand tons per year. These experimental data are important for determining the contribution of thermal power plants to anthropogenic atmospheric pollution.