

Технология оценок эмиссии диоксида азота и углекислого газа крупными промышленными центрами Западной Сибири

А.А. Лагутин¹, Н.В. Волков¹, Е.Ю. Мордвин¹, В.В. Сеницин¹

¹ ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет»,
656049, Россия, г. Барнаул, пр. Ленина, д. 61

Аннотация

В работе представлены результаты разработки и апробирования на реальных данных технологии оценки эмиссии диоксида азота и углекислого газа источниками на территории Западной Сибири. Определение содержания NO₂ в тропосфере региона проведено с использованием данных спектрометра TROPOMI спутника Sentinel-5 Precursor. Методика вычислительных экспериментов по получению количественных оценок эмиссии CO₂ крупными промышленными объектами региона заключается в совместном анализе данных TROPOMI/Sentinel-5P по содержанию NO₂ и данных орбитальной карбоновой обсерватории OCO-2 по содержанию CO₂. Основной процедурой анализа данных является аппроксимация распределений содержания газов вдоль траектории движения спутника OCO-2 вектор-функцией распределения Гаусса. Параметры аппроксимации (полуширина и амплитуда), а также данные о направлении и скорости ветра (получены из реанализа ERA5) используются для количественных оценок эмиссии CO₂. Технология, разработанная авторами для получения количественных оценок антропогенной эмиссии CO₂ для промышленных центров Западной Сибири без использования данных OCO-2, основана на эмпирически установленной связи параметров аппроксимации распределений газов.

Результатами работы являются количественные оценки содержания диоксида азота в атмосфере и нижней тропосфере Западной Сибири, годовой ход и межгодовая изменчивость NO₂ в тропосфере, полученные с использованием данных спектрометра TROPOMI/Sentinel-5P, а также технология получения количественных оценок эмиссии CO₂ крупными промышленными центрами региона.

Ключевые слова: Западная Сибирь, парниковые газы, диоксид азота, углекислый газ, спектрометр TROPOMI/Sentinel-5P, орбитальная карбоновая обсерватория OCO-2.

Цитирование: Лагутин, А.А. Технология оценок эмиссии диоксида азота и углекислого газа крупными промышленными центрами Западной Сибири / А.А. Лагутин, Н.В. Волков, Е.Ю. Мордвин, В.В. Сеницин // Компьютерная оптика. – 2024. – Т. 48, № 3. – С. 445-453. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1420.

Citation: Lagutin AA, Volkov NV, Mordvin EY, Sinitsin VV. Technology of estimating nitrogen dioxide and carbon dioxide emissions by large industrial centers of Western Siberia. Computer Optics 2024; 48(3): 445-453. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1420.

Введение

Результаты анализа данных по содержанию в приземном слое воздуха основного парникового газа, диоксида углерода (CO₂), опубликованные Всемирной метеорологической организацией (ВМО) в ежегодном бюллетене [1], показывают, что с начала индустриальной эры в 1750 г. содержание CO₂ в атмосфере увеличилось в 1,5 раза. Оценки содержания CO₂ в 2021 г. достигли новых исторически максимальных значений $\sim 415,7 \pm 0,2$ млн⁻¹ [1]. По данным Глобального углеродного проекта (Global Carbon Project) установлено, что скорость роста эмиссии CO₂, уменьшавшаяся в период пандемии коронавирусной инфекции SARS-CoV-2 (COVID-19), в постковидный период вернулась к значениям до 2019 г. и в 2021 г. составила $\sim 36,3 \pm 1,8$ Гт CO₂/год [2]. Рост эмиссии CO₂ в указанный период обуславливает дисбаланс глобального карбонового бюджета, составляющий

– 0,3 Гт CO₂/год [2]. Отметим, что приведенные оценки получены в рамках действующей программы мониторинговых наблюдений Глобальной службы атмосферы ВМО и участвующих в ней сетей наземных пунктов (распределение пунктов измерений см. в [1]). Несмотря на значительное расширение этой сети, произошедшее в последнее десятилетие, значительные территории поверхности Земли, являющиеся источниками парниковых газов, не контролируются традиционными методами наземной, самолётной и судовой диагностики (см. рис. 4 статьи [1]).

Возможность на регулярной основе получать данные по полному содержанию CO₂ в атмосфере труднодоступных зон и/или зон с редким покрытием наземными станциями появилась в 2009 г. после запуска спутника GOSAT (Greenhouse Gases Observing Satellite) Японского аэрокосмического агентства (Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA) [3]. Успех миссии GOSAT стимулировал разработку но-

вого поколения спутниковых приборов для мониторинга атмосферных парниковых газов. В июле 2014 года Национальным управлением по авиации и исследованию космического пространства (National Aeronautics and Space Administration, NASA) была запущена первая специализированная орбитальная карбоновая обсерватория OCO-2 (Orbiting Carbon Observatory) [4, 5], а в мае 2019 года на борту Международной космической станции (МКС) была смонтирована обсерватория OCO-3 [6]. Годом ранее JAXA был запущен второй спутник программы GOSAT-2.

Диоксид азота (двуокись азота, NO₂) является короткоживущим газом (время жизни порядка нескольких часов), играющим важную роль в химии тропосферы и негативно влияющим на качество воздуха [7]. NO₂ является предшественником тропосферного озона и аэрозолей. Превышение концентраций этого газа в атмосфере связывают с преждевременной смертью и повышением уровня смертности в целом.

Короткое время жизни и широкий спектр источников NO₂ (промышленность, транспорт, сельскохозяйственный сектор и др.) затрудняют получение достоверных оценок по эмиссии и содержанию этого газа в так называемых нефоновых областях. До недавнего времени единственным методом мониторинга NO₂ являлись локальные точечные измерения.

Первым спутниковым прибором, позволяющим получать данные по содержанию NO₂ в атмосфере на глобальном уровне, являлся спектрорадиометр SCIAMACHY (SCanning Imaging Absorption SpectroMeter for Atmospheric CHartography) [8, 9], запущенный Европейским космическим агентством (European Space Agency, ESA) на борту спутника ENVISAT (Environmental Satellite) в марте 2002 г. В октябре 2017 года ESA в рамках программы Copernicus был запущен спутник Sentinel-5 Precursor (Sentinel-5P) со спектрорадиометром TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument) на борту [10,11]. Спектральные каналы TROPOMI также позволяют восстанавливать содержание NO₂ в атмосфере.

Поскольку NO₂ имеет, в основном, антропогенное происхождение, то данные TROPOMI/Sentinel-5P, полученные с высоким пространственным и временным разрешением, стимулировали разработку подходов к оценке эмиссии углекислого газа, образующегося в тех же самых источниках. Для решения этой проблемы, например, в работе [4] предложен метод, основанный на совместном анализе данных TROPOMI/Sentinel-5P по содержанию NO₂ и данных специализированной карбоновой обсерватории OCO-2 по содержанию CO₂ в атмосфере региона.

Главной целью работы является разработка и апробирование на реальных данных технологии оценки эмиссии диоксида азота и углекислого газа крупными промышленными центрами Западной Сибири, основанной на результатах спутниковых

наблюдений. Достижение поставленной цели потребовало решения следующих задач:

- 1) получение количественных оценок содержания NO₂ и CO₂ в тропосфере в крупных промышленных центрах региона;
- 2) проведение вычислительных экспериментов по получению количественных оценок эмиссии CO₂ крупными промышленными объектами Западной Сибири, основанных на совместном анализе данных по содержанию NO₂ и CO₂ в атмосфере;
- 3) разработка технологии получения количественных оценок антропогенной эмиссии CO₂ для промышленных центров региона без использования данных по содержанию углекислого газа.

1. Спутниковые приборы

1.1. Спектрорадиометр TROPOMI/Sentinel-5P

Главной задачей миссии TROPOMI/Sentinel-5P является продолжение мониторинговых наблюдений содержания парниковых газов в атмосфере Земли по уходящему потоку излучения в ближнем ИК-диапазоне, прерванных завершением проекта SCIAMACHY [8, 9].

Спутник работает на солнечно-синхронной орбите высотой 824 км и временем пересечения экватора около 13:30 по местному времени. Сенсор TROPOMI имеет существенно лучшее разрешение – 3,5×5,5 км – вместо 30×60 км у SCIAMACHY. Ширина области сканирования прибора составляет ~2600 км, что позволяет получать покрытие всей территории Земли в течение суток [10, 11].

Для получения продуктов по содержанию парниковых газов в атмосфере используются данные четырех детекторов TROPOMI, измеряющих потоки уходящего излучения в ультрафиолетовом (UV), ультрафиолетовом и видимом (UVIS), ближнем ИК (NIR) и среднем ИК (SWIR) диапазонах.

1.2. Орбитальная карбоновая обсерватория OCO-2

Спутник OCO-2 является одним из участников спутниковой группировки A-Train, движется по солнечно-синхронной орбите высотой 705 км. Время пересечения экватора — около 13:36 по местному времени, практически совпадает с Sentinel-5P. Орбитальный цикл повторяется каждые 16 дней.

Сенсоры спутника регистрируют уходящее из атмосферы Земли излучение в трех спектральных каналах с центрами на длинах волн 0,765 мкм, 1,61 мкм и 2,06 мкм. Первый канал работает в полосе поглощения кислорода, два оставшихся — в полосах поглощения углекислого газа.

Сканирование происходит полосами, перпендикулярно направлению движения спутника. Каждая полоса сканирования содержит 8 пикселей в форме параллелограмма размером 1,29×2,25 км. Полная ширина полосы сканирования прибора составляет ~10 км. Скорость съемки – 24 измерения в секунду с высоким

пространственным разрешением обеспечивает ~10% долю безоблачных пикселей, пригодных для восстановления с высокой точностью содержания CO_2 в атмосфере [4, 5].

Верификация алгоритма восстановления CO_2 по данным карбоновой обсерватории OCO-2 проводилась с использованием результатов глобальной сети наземных станций TCCON [12].

2. Содержание NO_2 и CO_2 в атмосфере Западной Сибири

2.1. Содержание диоксида азота

На первом этапе исследований основные усилия авторов были направлены на получение количественных оценок эмиссии диоксида азота, образующегося при сжигании попутного нефтяного газа в факельных установках (ФУ) Западной Сибири. NO_2 образуется в районе расположения ФУ в зонах пламени, имеющих очень высокую температуру $T > 1800$ К (механизм Зельдовича). В силу высокой химической активности NO_2 распадается в течение нескольких часов, поэтому в районах расположения ФУ должно наблюдаться повышенное содержание диоксида азота.

На рис. 1а–е показаны пространственные распределения содержания NO_2 (молекул/см²) в тропосфере

в районах расположения ФУ в окрестностях городов Новый Уренгой, Ханты-Мансийск, Нижневартовск, Тобольск, Сургут, полученные в июле 2020 г. по данным TROPOMI/Sentinel-5P. Точками на рисунке обозначены ФУ, координаты которых установлены авторами по данным радиометра VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) спутника Suomi-NPP в работе [13].

Установлено, что в зонах расположения большинства ФУ содержание NO_2 в тропосфере соответствует фоновым значениям и варьируется в диапазоне $(3-5,5) \cdot 10^{14}$ молекул/см.

Вместе с тем в окрестностях самих городов наблюдается повышенное содержание диоксида азота $8 \cdot 10^{14} - 2 \cdot 10^{15}$ молекул/см². Этот факт стимулировал авторов направить основные усилия на решение задачи получения оценок эмиссии NO_2 антропогенными источниками в зонах крупных промышленных центров.

На рис. 1е показано пространственное распределение содержания NO_2 в тропосфере в районе города Заринск, в окрестностях которого отсутствуют ФУ. Видно, что максимум эмиссии диоксида азота, составляющий $1,4 \cdot 10^{15}$ молекул/см², достигается не в самом городе, а в его пригороде, в зоне расположения коксохимического комбината АО «Алтай-Кокс».

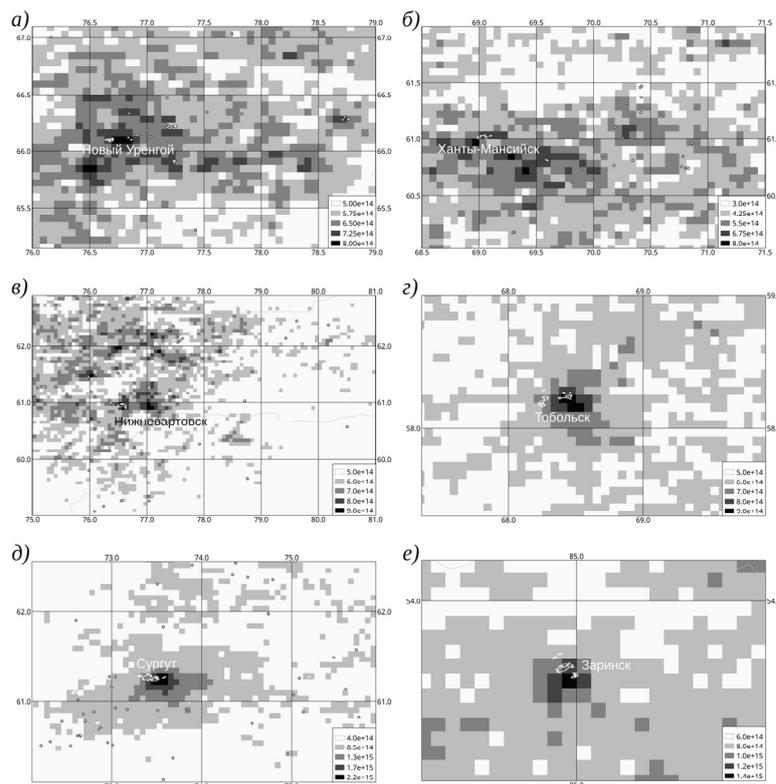


Рис. 1. Пространственные распределения содержания NO_2 (молекул/см²) в тропосфере в зонах расположения ФУ в окрестностях городов Новый Уренгой (а), Ханты-Мансийск (б), Нижневартовск (в), Тобольск (г), Сургут (д), а также в окрестности города Заринск (е) в июле 2020 г. по данным TROPOMI/Sentinel-5P. Светлые круги на рисунках – ФУ, координаты которых установлены авторами в работе [13]

На рис. 2а показано пространственное распределение содержания NO_2 (молекул/см²) в тропосфере в

городах Новосибирск, Кемерово, Новокузнецк, Барнаул, Заринск, полученное в июле и в августе 2020 г.

по данным TROPOMI / Sentinel-5P. Рис. 2б иллюстрирует распространение NO₂ на фоновые территории в ветреную погоду. Направление ветра за 5 августа 2020 г. получено по данным реанализа ERA5 [15].

Видно, что в условиях ветреной погоды содержание диоксида азота в атмосфере в течение суток может изменяться в 2–3 раза как в зонах источника, так и в фоновых областях.

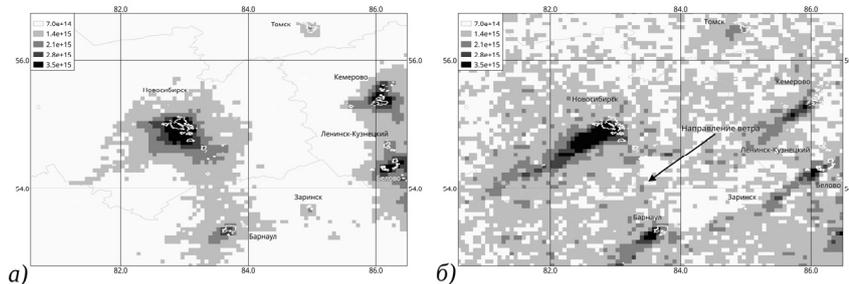


Рис. 2. Пространственное распределение содержания NO₂ (молекул/см²) в тропосфере в окрестностях крупных промышленных центров в июле 2020 г. (а) и 5 августа 2020 г. (б) по данным TROPOMI / Sentinel-5P. Контуры населенных пунктов получены по данным продукта MCD12Q1 [14] радиометра MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) спутников Terra и Aqua. Направление ветра – по данным реанализа ERA5

На рис. 3 а–в показан годовой ход и межгодовая изменчивость содержания NO₂ в тропосфере городов Новосибирск, Кемерово, Барнаул для периода 2018–2022 гг. Видно, что количественные оценки содержания NO₂ в пограничном слое атмосферы этих городов практически совпадают. Установлено также, что с декабря 2019 г. по апрель 2020 г. содержание NO₂ в тропосфере сократилось практически в два раза. Данный факт соответствует результатам глобального мониторинга парниковых газов, представленным в работе [16]. Результаты, приведенные в [16], свидетельствуют о сокращении глобальной эмиссии углекислого газа на 8,8 % в первой половине 2020 года по срав-

нению с аналогичным периодом 2019 года. Такое снижение эмиссии CO₂, по оценкам авторов [16], по своему экономическому эффекту превосходит последствия предыдущих экономических кризисов и даже Второй мировой войны и напрямую связано с пандемией коронавирусной инфекции COVID-19. В силу того, что диоксид азота образуется в тех же источниках, что и углекислый газ, выводы авторов [16] можно обобщить и на оценки эмиссии этого газа. Таким образом, уменьшение содержания NO₂ в указанный период обусловлено мерами, предпринятыми Правительством РФ и региональными органами власти для борьбы с пандемией коронавируса COVID-19.

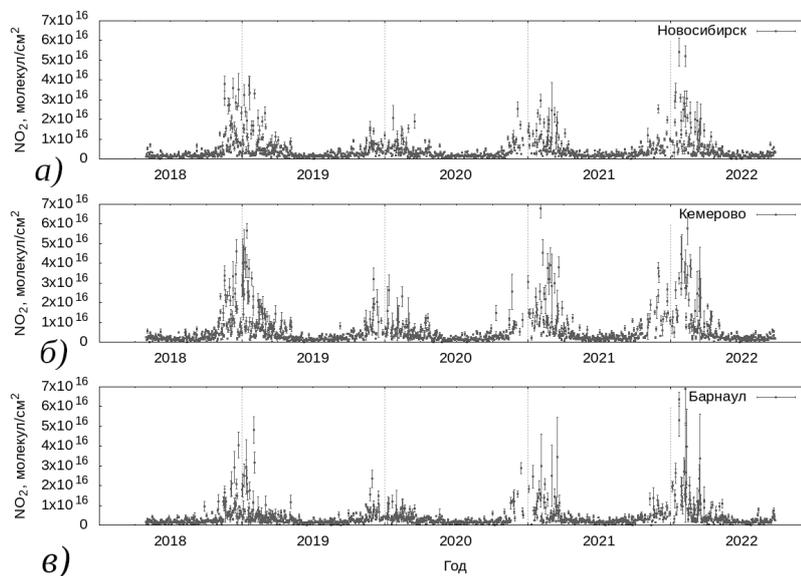


Рис. 3. Годовой ход и межгодовая изменчивость содержания NO₂ в тропосфере городов Новосибирск (а), Кемерово (б), Барнаул (в) для периода 2018–2022 гг.

2.2. Эмиссия CO₂ антропогенными источниками

В данном параграфе представлены результаты вычислительных экспериментов по получению количественных оценок эмиссии CO₂ крупными промыш-

ленными центрами Западной Сибири. Метод предложен в работе [4] и основан на совместном анализе данных TROPOMI / Sentinel-5P по содержанию диоксида азота в тропосфере и данных орбитальной карбоновой обсерватории OCO-2 по полному содержа-

нию CO_2 в столбе атмосферы. Анализ проводится только для источников, для которых на одну и ту же дату имеются данные измерений обоих спутников.

На рис. 4 и 5 показана сцена за 29 августа 2020 г. в окрестностях Экибастузской ГРЭС-1, данные для которой анализировались в вычислительных экспериментах.

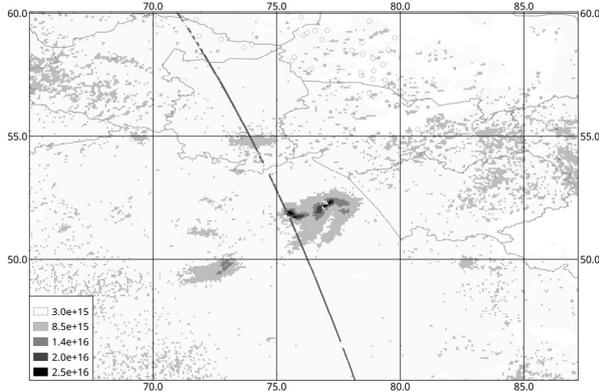


Рис. 4. Пространственное распределение полного содержания NO_2 (молекул/см³) в тропосфере юга Западной Сибири в окрестностях Экибастузской ГРЭС-1 по данным TROPOMI/Sentinel-5P за 29 августа 2020 года. Наклонная линия в центре рисунка – трек обсерватории OCO-2

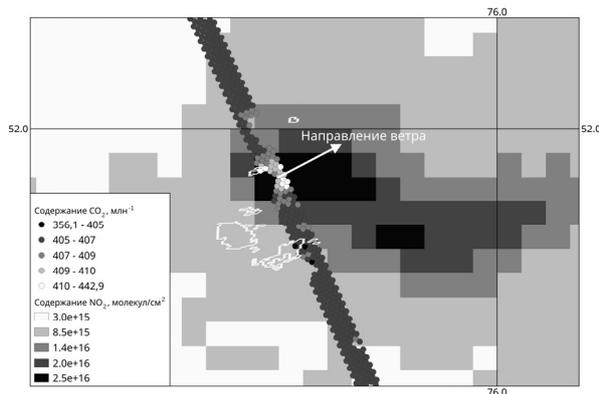


Рис. 5. Пространственное распределение полного содержания NO_2 (молекул/см³) в тропосфере в окрестностях Экибастузской ГРЭС-1 по данным TROPOMI/Sentinel-5P за 29 августа 2020 года. Кругами обозначены пиксели сканирования обсерватории OCO-2 (содержание CO_2 млн⁻¹). Стрелкой показано направление ветра на текущее время, полученное по данным реанализа ERA5

На первом этапе строятся распределения содержания NO_2 и CO_2 в поперечном сечении относительно направления движения OCO-2 на различных расстояниях вдоль трека OCO-2.

На втором этапе полученные распределения аппроксимируются вектор-функцией Гаусса вида [4]:

$$\begin{pmatrix} \text{NO}_2 \\ \text{XCO}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_0 + a_1x + a_2 \exp[-4(\ln 2)(x - a_3)^2 / a_4^2] \\ a_5 + a_6x + a_7 \exp[-4(\ln 2)(x - a_8)^2 / a_4^2] \end{pmatrix}. \quad (1)$$

В выражении (1) NO_2 и XCO_2 – содержание диоксида азота в тропосфере и полное содержание диок-

сида углерода в поперечном сечении соответственно. Содержание газовых компонент измеряется на разных расстояниях вдоль направления движения обсерватории OCO-2. Параметры аппроксимации $a_{0,1,5,6}$ соответствуют фоновым значениям распределения, $a_{2,7}$ – амплитуды максимумов распределений (амплитуды антропогенных аномалий содержания газов ΔNO_2 и ΔXCO_2 соответственно), $a_{3,8}$ – смещения распределений, a_4 – ширина распределения Гаусса на половине высоты. Значения этих параметров установлены в результате решения нелинейной задачи наименьших квадратов с использованием алгоритма оптимизации Левенберга–Марквардта [17, 18].

На третьем этапе проводится оценка эмиссии CO_2 . В случае атмосферы в гидростатическом равновесии со стандартным приземным давлением 1013 гПа поток углекислого газа F_{CO_2} в единицах измерения Мт $\text{CO}_2/\text{год}$, следуя результатам работы [4], может быть записан в виде:

$$F_{\text{CO}_2} = 0,53 \frac{\text{МтCO}_2}{\text{год}} \frac{a_4}{\text{км}} \frac{a_7}{\text{млн}^{-1}} \frac{v}{\text{м/с}}. \quad (2)$$

Значения a_4 , a_7 и v – скорости ветра в направлении, перпендикулярном движению спутника, в выражении (2) даются в единицах измерения: километры, частиц/миллион и метры/секунду. Если вектор скорости ветра и скорости спутника образуют угол, отличный от прямого, то в выражении (2) следует использовать нормировочный множитель, равный 1,4, установленный в [4] эмпирическим путем.

На рис. 6 показаны результаты аппроксимации поперечных распределений содержания NO_2 и CO_2 , полученные с использованием вектор-функции (1) для данных TROPOMI/Sentinel-5P и OCO-2 за 29 августа 2020 г., приведенных на рис. 4 и 5 для Экибастузской ГРЭС-1. Анализ проводился для полосы сканирования OCO-2 длиной ~180 км. Видно, что полученные распределения имеют аномалии. Установлено, что амплитуда антропогенной аномалии содержания углекислого газа $\Delta\text{CO}_2 = 3,24$ млн⁻¹ при ширине аномалии $a_4 = 14,2$ км. Эффективная приземная скорость ветра на высоте 10 м на момент пролета спутника, по данным ERA5, составляла $v = 0,6$ м/с. Поскольку вектор \vec{v} в рассматриваемом случае практически перпендикулярен вектору скорости OCO-2, то нормировка не проводилась. Используя полученные результаты, из (2) получаем оценку эмиссии $F_{\text{CO}_2} \approx 20,5$ Мт $\text{CO}_2/\text{год}$.

На основе метода [4] авторами впервые разработана технология получения количественных оценок антропогенной эмиссии CO_2 для промышленных центров Западной Сибири без использования данных OCO-2, которые имеют малую зону покрытия и в силу наличия облачного покрова малую статистику достоверных результатов для региона.

В силу наличия связи коэффициентов аппроксимирующих функций поперечных распределений содержа-

ния NO_2 и CO_2 , можно эмпирическим путем установить масштабирующий коэффициент для амплитуды аномалий ΔCO_2 . В работе [19] для этого коэффициента дается глобальная оценка $1,1 \cdot 10^{-16}$ млн⁻¹/(молекул/см²). Анализ данных для Западной Сибири, проделанный авторами, дает значение $1,4 \cdot 10^{-16}$ млн⁻¹/(молекул/см²).

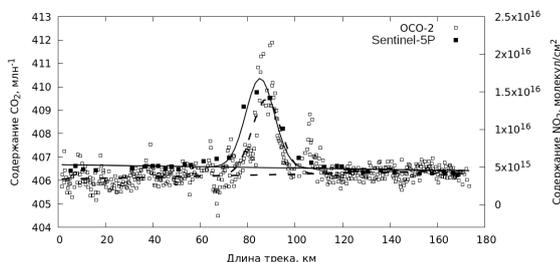


Рис. 6. Результаты аппроксимации поперечных распределений содержания NO_2 и CO_2 , полученные с использованием вектор-функции (1) для данных TROPOMI/Sentinel-5P (черные квадраты) и OCO-2 (светлые квадраты) за 29 августа 2020 года. Параметры аппроксимирующей вектор-функции Гаусса (1) приведены в табл. 1 приложения

Разработанная технология апробирована на данных для Новосибирска, Кемерово и Барнаула. На рис. 7 показаны результаты аппроксимации поперечных распределений содержания NO_2 , полученные с использованием функции Гаусса для данных TROPOMI/Sentinel-5P за 5 августа 2020 г. Установленные таким образом аномалии содержания диоксида азота ΔNO_2 свидетельствуют о наличии и углекислого газа и могут быть использованы для оценок антропогенных аномалий ΔCO_2 :

$$\Delta\text{CO}_2 = 1,4 \cdot 10^{-16} \text{ млн}^{-1} / (\text{молекул/см}^2) \times \text{NO}_2. \quad (3)$$

С использованием эмпирического результата (3), выражения (2) при эффективной скорости ветра 5,5 м/с (по данным ERA5) установлено, что годовая эмиссия CO_2 в 2020 г. составляла: $\sim 33,17$ Мт CO_2 /год для Новосибирска; $\sim 13,87$ Мт CO_2 /год для Кемерово и $\sim 17,92$ Мт CO_2 /год для Барнаула.

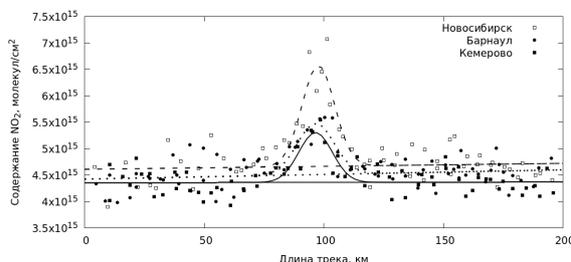


Рис. 7. Результаты аппроксимации поперечных распределений содержания NO_2 , полученные с использованием функции Гаусса для данных TROPOMI/Sentinel-5P за 5 августа 2020 года для Новосибирска, Кемерово и Барнаула. Параметры аппроксимации приведены в табл. 2 приложения

Разработанная технология внедрена в цепочку оперативной деятельности центра космического мониторинга Алтайского госуниверситета. На рис. 8 в качестве примера показан продукт «пространственное распределение аномалий ΔCO_2 для территории юга Западной Сибири», полученный в центре по данным TROPOMI/Sentinel-5P о полном содержании NO_2 за 15 июля 2020 г.

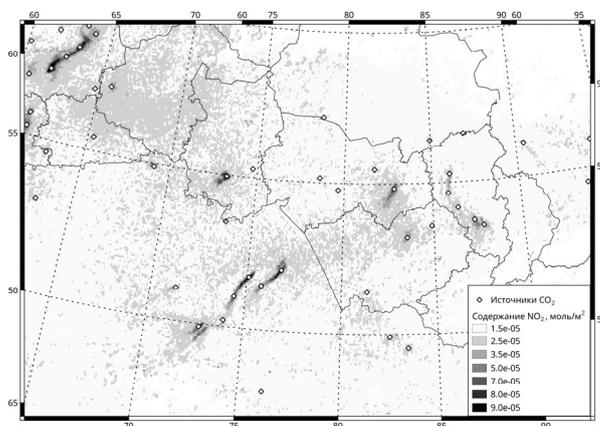


Рис. 8. Пространственное распределение аномалий ΔCO_2 для территории юга Западной Сибири по данным TROPOMI/Sentinel-5P о полном содержании NO_2 за 15 июля 2020 г. Светлыми ромбами показаны источники антропогенных аномалий CO_2

Заключение

Представленные в работе исследования авторов нацелены на разработку и апробирование на реальных данных технологии оценки эмиссии диоксида азота и углекислого газа источниками Западной Сибири, основанной на результатах спутниковых наблюдений. В результате проведенных работ получены следующие результаты.

1. Проведено исследование пространственного содержания NO_2 в тропосфере Западной Сибири в зонах расположения факельных установок для сжигания нефтяного попутного газа, а также в зонах расположения крупных промышленных центров региона. Получены оценки содержания NO_2 в этих источниках.
2. Проведено исследование годового хода и межгодовой изменчивости содержания NO_2 в тропо-

сфере крупных промышленных центров региона (Новосибирск, Кемерово, Барнаул) для периода 2018–2022 гг. Показано, что количественные оценки содержания NO₂ в этих городах практически совпадают. Вместе с тем установлено, что с декабря 2019 по апрель 2020 гг. содержание NO₂ в тропосфере сократилось практически в два раза. Данный факт соответствует результатам глобального мониторинга парниковых газов (в частности CO₂) и обусловлен мерами, предпринятыми Правительством РФ и региональными органами власти для борьбы с пандемией коронавирусной инфекции COVID-19.

3. С использованием метода, предложенного в литературе, проведены вычислительные эксперименты по получению количественных оценок эмиссии CO₂ крупными промышленными объектами региона. Суть метода заключается в совместном анализе данных TROPOMI/ Sentinel-5P по содержанию NO₂ и данных орбитальной карбоновой обсерватории OCO-2 по содержанию CO₂. Основной процедурой анализа данных является аппроксимация распределений содержания газов вдоль траектории движения спутника OCO-2 вектор-функцией распределения Гаусса. Параметры аппроксимации (полуширина и амплитуда), а также данные о направлении и скорости ветра, полученные из реанализа ERA5, используются для получения количественных оценок эмиссии CO₂.

4. Разработана технология получения количественных оценок антропогенной эмиссии CO₂ для промышленных центров Западной Сибири без использования данных OCO-2, которые имеют малую зону покрытия и в силу наличия облачного покрова малую статистику достоверных результатов для региона. Разработанная технология апробирована на данных для Новосибирска, Кемерово и Барнаула. Установлено, что эмиссия CO₂ в 2020 г. составляла: ~33,17 Мт CO₂/год для Новосибирска; ~13,87 Мт CO₂/год для Кемерово и ~17,92 Мт CO₂/год для Барнаула. Технология внедрена в цепочку оперативной деятельности центра космического мониторинга Алтайского государственного университета.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание на проведение научных исследований, выполняемых в АлтГУ, проект FZMW-2023-0007).

References

- [1] WMO greenhouse gas bulletin 2022; 18. Source: <<https://library.wmo.int/idurl/4/58743>>.
- [2] Friedlingstein P, O'Sullivan M, Jones MW, et al. Global carbon budget 2022. *Earth Syst Sci Data* 2022; 14: 4811-4900. DOI: 10.5194/essd-14-4811-2022.
- [3] Feng L, Palmer PI, Bösch H, Parker RJ, Webb AJ, Correia CSC, Deutscher NM, Domingues LG, Feist DG, Gatti LV, Gloor E, Hase F, Kivi R, Liu Y, Miller JB, Morino I, Sussmann R, Strong K, Uchino O, Wang J, Zahn A. Consistent regional fluxes of CH₄ and CO₂ inferred from GOSAT proxy XCH₄: XCO₂ retrievals, 2010-2014. *Atmospheric Chem Phys* 2017; 17(7): 4781-4797. DOI: 10.5194/acp-17-4781-2017.
- [4] Reuter M, Buchwitz M, Schneising O, Krautwurst S, O'Dell CW, Richter A, Bovensmann H, Burrows JP. Towards monitoring localized CO₂ emissions from space: collocated regional CO₂ and NO₂ enhancements observed by the OCO-2 and S5P satellites. *Atmospheric Chem Phys* 2019; 19(14): 9371-9383. DOI: 10.5194/acp-19-9371-2019.
- [5] Frankenberg C, Pollock R, Lee RAM, Rosenberg R, Blavier J-F, Crisp D, O'Dell CW, Osterman GB, Roehl C, Wennberg PO, Wunch D. The Orbiting Carbon Observatory (OCO-2): spectrometer performance evaluation using pre-launch direct sun measurements. *Atmos Meas Tech* 2015; 8(1): 301-313. DOI: 10.5194/amt-8-301-2015.
- [6] Eldering A, Taylor TE, O'Dell CW, Pavlick R. The OCO-3 mission: measurement objectives and expected performance based on 1 year of simulated data. *Atmos Meas Tech* 2019; 12(4): 2341-2370. DOI: 10.5194/amt-12-2341-2019.
- [7] Pseftogkas A, Koukouli M-E, Segers A, Manders A, van Geffen J, Balis D, Meleti C, Stavrakou T, Eskes H. Comparison of S5P/TROPOMI Inferred NO₂ surface concentrations with in situ measurements over Central Europe. *Remote Sens* 2022; 14(19): 4886. DOI: 10.3390/rs14194886.
- [8] Burrows J, Hölzle E, Goede A, Visser H, Fricke W. SCIAMACHY – Scanning imaging absorption spectrometer for atmospheric cartography. *Acta Astronaut* 1995; 35(7): 445-451. DOI: 10.1016/0094-5765(94)00278-T.
- [9] Bovensmann H, Burrows JP, Buchwitz M, Frerick J, Noël S, Rozanov VV, Chance KV, Goede APH. SCIAMACHY: Mission objectives and measurement modes. *J Atmos Sci* 1999; 56(2): 127-150. DOI: 10.1175/1520-0469(1999)056<0127:SMOAMM>2.0.CO;2.
- [10] Veeffkind JP, Aben I, Mullan KM, Förster H, de Vries J, Otter G, Claas J, Eskes HJ, de Haan JF, Kleipool Q, van Weele M, Hasekamp O, Hoogeveen R, Landgraf J, Snel R, Tol P, Ingmann P, Voors R, Kruizinga B, Vink R, Visser H, Levelt PF. TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications. *Remote Sens Environ* 2012; 120: 70-83. DOI: 10.1016/j.rse.2011.09.027.
- [11] Butz A, Galli A, Hasekamp O, Landgraf J, Tol P, Aben I. TROPOMI aboard Sentinel-5 CH₄ retrievals for aerosol and Precursor: Prospective performance of cirrus loaded atmospheres. *Remote Sens Environ* 2012; 120: 267-276. DOI: 10.1016/j.rse.2011.05.030.
- [12] Wunch D, Toon GC, Blavier J-FL, Washenfelder RA, Notholt J, Connor BJ, Griffith DWT, Sherlock V, Wennberg PO. The total carbon column observing network. *Philos Trans Royal Soc A* 2011; 369(1943): 2087-2112. DOI: 10.1098/rsta.2010.0240.
- [13] Lagutin AA, Mordvin EYu, Volkov NV, Tuchina NV. Estimation of natural gas flaring volume at the Western Siberia flares using satellite night-time data in the visible and near-infrared range. *CEUR Workshop Proc* 2020; 2534: 22-26.

[14] Strahler A, Muchoney D, Borak J, Friedl M, Gopal S, Lambin E, Moody A. MODIS land cover product algorithm theoretical basis document (ATBD) version 5.0. 1999. Source: <https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd12q1v006/>.

[15] Hersbach H, Bell B, Berrisford P, Hirahara S, Horányi A, Muñoz-Sabater J, Nicolas J, Peubey C, Radu R, Schepers D, Simmons A, Soci C, Abdalla S, Abellan X, Balsamo G, Bechtold P, Biavati G, Bidlot J, Bonavita M, De Chiara G et al. The ERA5 global reanalysis. Q J R Meteorol Soc 2020; 146: 1999-2049. DOI: 10.1002/qj.3803.

[16] Liu Z, Ciais P, Deng Z, et al. Near-real-time monitoring of global CO₂ emissions reveals the effects of the COVID-19 pandemic. Nat Commun 2020; 11: 5172. DOI: 10.1038/s41467-020-18922-7.

[17] Levenberg K. A method for the solution of certain non-linear problems in least squares. Q Appl Math 1944; 2: 164-168. DOI: 10.1090/qam/10666.

[18] Marquardt DW. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. SIAM J Appl Math 1963; 11: 431-441. DOI: 10.1137/0111030.

[19] Hakkarainen J, Jalongo I, Maksyutov S, Crisp D. Analysis of four years of global XCO₂ anomalies as seen by Orbiting Carbon Observatory-2. Remote Sens 2019; 11: 850. DOI: 10.3390/rs11070850.

Приложение

В табл. 1 и 2 приведены значения параметров a_{0-8} , полученные при аппроксимации данных ТРОПОМ/ Sentinel-5P по содержанию диоксида азота в тропосфере и данных орбитальной карбоновой обсерватории OCO-2 по полному содержанию CO₂ в столбе атмосферы с использованием вектор-функции Гаусса (1). В таблицах также приведены оценки среднеквадратических ошибок (RMSE) и коэффициентов детерминации (R^2).

Табл. 1. Параметры аппроксимации вектор-функцией (1) поперечных распределений содержания NO₂ и CO₂, показанных на рис. 6

NO ₂	CO ₂
$a_0 = 8,84 \cdot 10^{-5}$ моль/м ²	$a_5 = 406,10$ млн ⁻¹
$a_1 = 7,63 \cdot 10^{-8}$ (моль/м ²)/км	$a_6 = 2,15 \cdot 10^{-3}$ млн ⁻¹ /км
$a_2 = 1,98 \cdot 10^{-4}$ моль/м ²	$a_7 = 3,24$ млн ⁻¹
$a_3 = 85,20$ км	$a_8 = 87,90$ км
$a_4 = 14,20$ км	
RMSE = $1,19 \cdot 10^{-5}$	RMSE = 0,52
$R^2 = 0,93$	$R^2 = 0,66$

Табл. 2. Параметры аппроксимации вектор-функцией (1) поперечных распределений содержания NO₂, показанных на рис. 7

Параметр	Город		
	Новосибирск	Кемерово	Барнаул
a_0 , моль / м ²	$7,65 \cdot 10^{-5}$	$7,23 \cdot 10^{-5}$	$7,35 \cdot 10^{-5}$
a_1 , (моль / м ²)/км	$9,33 \cdot 10^{-9}$	$1,20 \cdot 10^{-9}$	$1,46 \cdot 10^{-8}$
a_2 , моль / м ²	$3,16 \cdot 10^{-5}$	$1,56 \cdot 10^{-5}$	$1,61 \cdot 10^{-5}$
a_3 , км	97,68	91,51	96,56
a_4 , км	16,15	16,50	18,22
RMSE	$5,05 \cdot 10^{-6}$	$3,74 \cdot 10^{-6}$	$4,11 \cdot 10^{-6}$
R^2	0,72	0,51	0,46

Сведения об авторах

Лагутин Анатолий Алексеевич, 1952 года рождения. В 1979 году защитил в МИФИ диссертацию на соискание степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 Физика атомного ядра и элементарных частиц, в 1995 — диссертацию на соискание степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 в НИИ ЯФ ТПУ. Звание профессора по кафедре теоретической физики присвоено в 1996 г. В настоящий момент работает в должности заведующего кафедрой радиофизики и теоретической физики Алтайского государственного университета. Директор Центра космического мониторинга этого университета. Область научных интересов: астрофизика космических лучей, неклассическая диффузия частиц в резко неоднородных средах, теория чувствительности, радиационные процессы в атмосфере, зондирование Земли из космоса, климат, климатические модели. E-mail: lagutin@theory.asu.ru

Волков Николай Викторович, 1983 года рождения. В 2010 году в Национальном исследовательском томском политехническом университете (НИИ ЯФ ТПУ) защитил диссертацию на соискание степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 Физика атомного ядра и элементарных частиц. В настоящий момент работает в должности доцента на кафедре радиофизики и теоретической физики Алтайского государственного университета. Сфера научных интересов: математическое и компьютерное моделирование, климатические модели, астрофизика космических лучей, странная кинетика. E-mail: volkov@theory.asu.ru

Мордвин Егор Юрьевич, 1986 года рождения. В 2015 году защитил диссертацию на соискание степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29 Физика атмосферы и гидросферы. В настоящий момент работает в должности доцента на кафедре радиофизики и теоретической физики Алтайского государственного университета. Сфера научных интересов: радиационные процессы в атмосфере, дистанционное зондирование Земли из космоса, парниковые газы, моделирование химических и транспортных процессов в атмосфере, распределенные вычисления. E-mail: zion0210@gmail.com

Сеницин Владимир Владимирович, 1980 года рождения. Окончил бакалавриат в 2021 году и магистратуру в 2003 году по направлению «Физика» в Алтайском государственном университете. В настоящий момент работает в должности научного сотрудника лаборатории космического мониторинга и вычислительных технологий Алтайского государственного университета. Сфера научных интересов: дистанционное зондирование Земли из космоса, моделирование атмосферных процессов, распределенные вычисления. E-mail: 4tankistai@inbox.ru

ГРНТИ: 37.21.15

Поступила в редакцию 08 сентября 2023 г. Окончательный вариант – 26 ноября 2023 г.

Technology of estimating nitrogen dioxide and carbon dioxide emissions by large industrial centers of Western Siberia

A.A. Lagutin¹, N.V. Volkov¹, E.Y. Mordvin¹, V.V. Sinitsin¹
¹ Altai State University, 656049, Barnaul, Russia, Lenin ave. 61

Abstract

The paper presents results of the development and testing with real data of a technology for assessing the emission of nitrogen dioxide and carbon dioxide from sources in Western Siberia. The NO₂ content in the region's troposphere was determined using data from the TROPOMI spectroradiometer of the Sentinel-5 Precursor satellite. The method of computational experiments to obtain quantitative estimates of CO₂ emissions from large industrial facilities in the region consists in a joint analysis of data from TROPOMI/Sentinel-5P for the NO₂ content and data from the OCO-2 orbiting carbon observatory for the CO₂ content. The main procedure for data analysis is the approximation of gas content distributions along the trajectory of the OCO-2 satellite by the vector function of the Gaussian distribution. Approximation parameters (full width at half maximum and amplitude), as well as data about direction and speed of wind (obtained from the ERA5 reanalysis) are used to quantify CO₂ emissions. The technology developed by the authors for obtaining quantitative estimates of anthropogenic CO₂ emissions for the industrial centers of Western Siberia without using OCO-2 data is based on an empirically established relationship between approximation parameters of gases distributions.

The results of the work are quantitative estimates of the content of nitrogen dioxide in the atmosphere and lower troposphere of Western Siberia; the annual cycle and interannual variability of NO₂ in the troposphere, obtained using data from the TROPOMI/Sentinel-5P spectroradiometer; a technology for obtaining quantitative estimates of CO₂ emissions from large industrial centers of the region.

Keywords: Western Siberia, greenhouse gases, nitrogen dioxide, carbon dioxide, TROPOMI/Sentinel-5P instrument, OCO-2 orbiting carbon observatory.

Citation: Lagutin AA, Volkov NV, Mordvin EY, Sinitsin VV. Technology of estimating nitrogen dioxide and carbon dioxide emissions by large industrial centers of Western Siberia. *Computer Optics* 2024; 48(3): 445-453. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1420.

Acknowledgements: This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (state order for scientific research carried out at ASU, project FZMW-2023-0007).

Author's information

Anatoly Alexeyevich Lagutin (b. 1952). Received his Candidate Degree in Physics of the Atomic Nucleus and Elementary Particles (1979) at MEPHI and Doctoral Degree (1995) at Tomsk Polytechnic University (Research Institute of Nuclear Physics) in the same specialty. Professor of Theoretical Physics Department (1996). Currently he works as the head of the Radiophysics and Theoretical Physics Department of Altai State University. Director of the Space Monitoring Center of ASU. Research interests: astrophysics of cosmic rays, nonclassical diffusion of particles in highly inhomogeneous media, sensitivity theory, radiation processes in the atmosphere, Earth sounding from space, climate, climate models. E-mail: lagutin@theory.asu.ru

Nikolay Viktorovich Volkov (b. 1983). Received his Candidate Degree in Physics of the Atomic Nucleus and Elementary Particles (2010) at National Research Tomsk Polytechnic University (Research Institute of Nuclear Physics). Currently he works as the associate professor at the Radiophysics and Theoretical Physics Department of Altai State University. Research interests: mathematical and computer modeling, climate models, astrophysics of cosmic rays, strange kinetics. E-mail: volkov@theory.asu.ru

Egor Yurievich Mordvin (b. 1986). Received his Candidate Degree in Physics of the Atmosphere and Hydrosphere (2015). Currently he works as the associate professor at the Radiophysics and Theoretical Physics Department of Altai State University. Research interests: radiation processes in the atmosphere, remote sensing of the Earth from space, greenhouse gases, modeling of chemical and transport processes in the atmosphere, distributed computing. E-mail: zion0210@gmail.com

Vladimir Vladimirovich Sinitsin (b. 1980). Completed Bachelors' (2001) and Master's (2003) Degrees in Physics at Altai State University. Currently he works as the researcher of the laboratory of space monitoring and computing technologies of Altai State University. Research interests: remote sensing of the Earth from space, modeling of atmospheric processes, distributed computing. E-mail: 4tankistai@inbox.ru

Received September 08, 2023. The final version – November 26, 2023.
