

# Об определении содержания, мощности и расположения источников двуокиси азота в тропосфере по измерениям КА серии Ресурс-П

О.В. Постыляков  
Институт физики атмосферы им.  
А.М.Обухова РАН, Москва, Россия  
oleg.postylyakov@gmail.com

А.Н. Боровский  
Институт физики атмосферы им.  
А.М.Обухова РАН, Москва, Россия  
alexander.n.borovski@gmail.com

Ю.В. Мухартова  
Московский государственный  
университет имени М.В.Ломоносова,  
Москва, Россия  
muhartova@yandex.ru

А.С. Христова  
Московский государственный  
университет имени М.В.Ломоносова,  
Москва, Россия  
Институт физики атмосферы им.  
А.М.Обухова РАН, Москва, Россия  
khristova.as19@physics.msu.ru

А.И. Чуличков  
Московский государственный  
университет имени М.В.Ломоносова,  
Москва, Россия  
Институт физики атмосферы им.  
А.М.Обухова РАН, Москва, Россия  
achulichkov@gmail.com

А.А. Макаренко  
Рязанский государственный  
радиотехнический университет  
им. В.Ф.Уткина, Рязань, Россия  
alexmakwork@gmail.com

**Аннотация**— Рассматриваются математические подходы, использованные при решении задач восстановления двумерного поля распределения  $\text{NO}_2$  в тропосфере по космическим спектральным измерениям, их химико-транспортного моделирования и последующего решения задачи нахождения источников примеси, а также результаты их практического применения.

**Ключевые слова**— двуокись азота, дифференциальная спектроскопия, космические измерения, химико-транспортное моделирование, смещенная линейная оценка, преобразование Фурье, квадратичное программирование, метод проекции градиента.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Семейство окислов азота ( $\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$ ) играет главную роль в разрушении озона в стратосфере и его образовании в тропосфере. С 2013 года на солнечно-синхронной орбите работает серия российских спутников Ресурс-П. Гиперспектральная аппаратура (ГСА), установленная на борту Ресурс-П, регистрирует рассеянное солнечное излучение в спектральном диапазоне 430–520 нм, который используется для определения содержания в атмосфере такой примеси как диоксид азота. Мы разработали метод определения 2D поля содержания  $\text{NO}_2$  по измерениям ГСА Ресурс-П, который позволяет получить содержание  $\text{NO}_2$  с пространственным разрешением около 2.4 км при типичной для космических измерений точности  $1.0 \times 10^{15}$  молек/см<sup>2</sup> на сетке представления данных 120 м [1], что превышает пространственное разрешение других современных спутниковых инструментов. Его использование позволило в 2016 году впервые выявить точечные антропогенные источники примеси масштаба предприятия по измерениям из космоса [1]. Для интерпретации измерений разработана химико-транспортная модель с высоким пространственным разрешением [2].

В работе будут представлены алгоритм, первые экспериментальные результаты по измерениям,

выполненным в 2016-2017 годах, их сравнение с данными высокодетального транспортно-химического моделирования, результаты апробации разрабатываемых методов решения обратной задачи определения источников примеси.

В декабре 2024 года был осуществлен запуск 5-го аппарата серии Ресурс-П. На основе выполняемых им измерений в 2025 году предполагается продолжить исследования распределения  $\text{NO}_2$  и отработку методик определения антропогенных источников примеси в атмосфере.

## II. ВОССТАНОВЛЕНИЕ 2D ПОЛЯ СОДЕРЖАНИЯ $\text{NO}_2$

Анализируемый снимок ГСА/Ресурс-П был получен в 12:30 поясного времени 29 сентября 2016 года и охватывает область шириной около 30 км и длиной (вдоль орбиты) около 150 км (см. рис. 1). Город Синтай расположен примерно в центре изображения. При восстановлении мы использовали сечения поглощения  $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{O}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и эффективное сечение эффекта Шефова-Ринга, а также полином 3-й степени. Для получения наклонного содержания  $\text{NO}_2$  решалась задача минимизации функции

$$F(\vec{X}, \vec{a}) = \sum_{i=0}^{M-1} W_i^2 \left[ \ln \left( \frac{I_0(\lambda_i)}{I(\lambda_i)} \right) - \sum_j \sigma_j(\lambda_i) X_j - \sum_{j=0}^N a_j (\lambda_i - \lambda_j)^j \right]^2$$

по линейным параметрам  $\vec{X}, \vec{a}$ , которая дает несмещенную линейную оценку поля наклонного содержания примеси  $X_{\text{NO}_2}$ . Здесь  $I_0$  – опорный спектр,  $I$  – измеренный спектр,  $X_j$  – наклонная толщина j-го газа. Затем интегральное содержание  $\text{NO}_2$  рассчитывается из  $X_{\text{NO}_2}$  с применением эффективной воздушной массы, оцененной по модели переноса излучения.

## III. ХИМИКО-ТРАНСПОРТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Важной характеристикой химико-транспортной модели используемой для интерпретации высокодетальных измерений ГСА/Ресурс-П является скорость вычисления. Для оптимизации вычислительных затрат был осуществлен выбор системы ключевых

кинетических уравнений химических реакций для  $\text{NO}_x$  для включения в систему уравнений диффузии-реакции-адвекции, который был осуществлен на основе сравнения результатов с полной моделью атмосферной химии RACM [2]. Компоненты скорости ветра и коэффициент турбулентности были получены путем кубической интерполяции данных реанализа ERA5 на расчетную сетку модели. Горизонтальная компонента коэффициента турбулентности оценивалась как  $K_{\perp} = 2.5K_z$ . Проведенный анализ также показал, что в шлейфе, сформированном за время порядка 3-4 часов, интегральное содержание  $\text{NO}_2$  зависит от интенсивности источника практически линейно в диапазоне адекватных значений мощности источника, а следовательно применима линейная модель формирования сигнала.

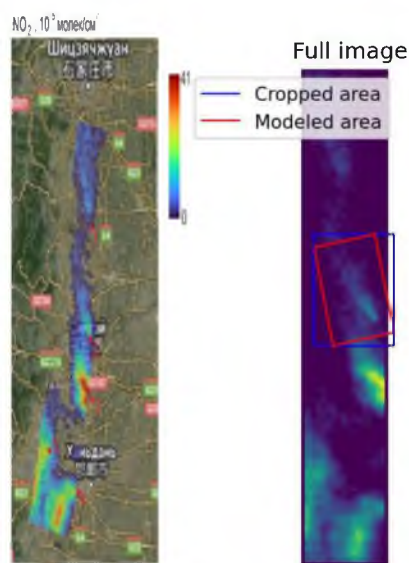


Рис. 1. 2D поле распределения интегрального содержания  $\text{NO}_2$  по маршруту 29.09.2016 в районе г. Синтай, Китай. Слева – показаны значения в координатной привязке. Справа – содержания по маршруту, данные усреднены скользящим средним с окном  $2.4\text{км} \times 2.4\text{км}$ ; в средней части показан исследуемый далее фрагмент с шлейфом точечного источника, красным выделена область химико-транспортного моделирования.

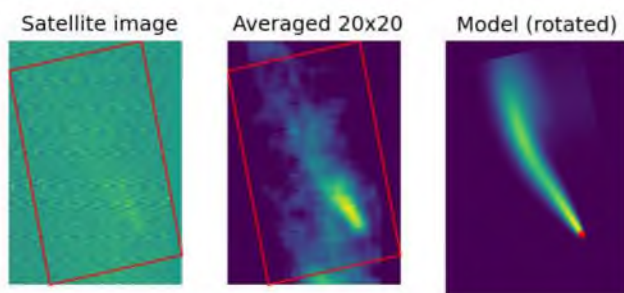


Рис. 2. Слева: оценка содержания  $\text{NO}_2$  на сетке 120 м, которая существенно искажена шумом. В центре: данные содержания  $\text{NO}_2$  усреднены скользящим средним с окном  $2.4\text{км} \times 2.4\text{км}$  ( $20 \times 20$  точек). Справа: результат моделирования шлейфа содержания  $\text{NO}_2$  от точечного источника. Показан фрагмент, выделенный синим прямоугольником на Рис. 1.

#### IV. ОЦЕНИВАНИЕ ПОЛЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ

Для оценки поля распределения источников мы использовали методы восстановления изображений.

Представим поле распределения  $\text{NO}_2$  как изображение в виде:

$$g(x, y) = (k * f)(x, y) + n(x, y),$$

где  $k$  – шлейф от точечного стационарного источника загрязнения,  $f$  – неизвестная функция распределения источников,  $n$  – шум. Для получения оценки  $\hat{f}$  функции  $f$  используется деконволюция Винера [3]:

$$\hat{F} = \frac{K^*}{K^*K + \lambda^2 I} G.$$

Здесь  $\hat{F} = \frac{K^*}{K^*K + \lambda^2 I} G$  – преобразования Фурье функций  $k, g, \hat{f}$ ; параметр  $\lambda$  подбирался вручную. Результат деконволюции при различных значениях  $\lambda$  представлен на Рис. 3.

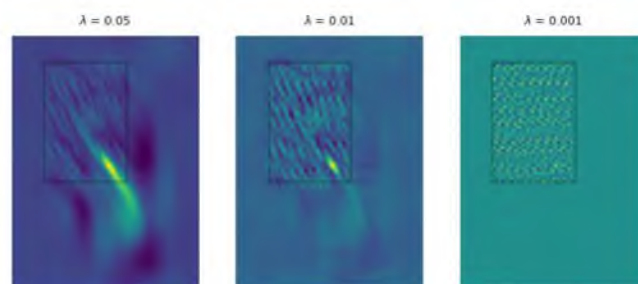


Рис. 3. Оценка поля распределения источников  $\text{NO}_2$  при различных значениях параметра  $\lambda$ .

#### V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан алгоритм восстановления 2D поля распределения интегрального содержания  $\text{NO}_2$  в тропосфере с высоким пространственным разрешением по спектральным измерениям из космоса. Для интерпретации получаемых высокодетальных полей содержания  $\text{NO}_2$  построена химико-транспортная модель. Разработан метод построения полей распределения источников  $\text{NO}_2$  с использованием измерений и химико-транспортного моделирования в предположении стационарности источников.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена за счет средств государственных заданий ИФА им. А.М. Обухова РАН, регистрационный номер темы 125020501413-6, и МГУ им. А.М. Ломоносова.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Postlyakov, O.V. First Experiment on Retrieval of Tropospheric  $\text{NO}_2$  over Polluted Areas with 2.4-km Spatial Resolution Basing on Satellite Spectral Measurements / O.V. Postlyakov, A.N. Borovski, A.A. Makarenkov // Proc. SPIE. – 2017. – Vol. 10466. – Art. 104662Y-8. DOI: 10.1117/12.2285794.
- [2] Мухартова, Ю.В. Моделирование переноса окислов азота с учетом химических трансформаций с помощью RANS и LES моделей / Ю.В. Мухартова, Е.В. Пашенцева, Е.В. Мортиков, О.В. Постыляков // ENVIRONIS-2024: Материалы международной конференции (1–6 июля 2024 г., Алтай). – 2024.
- [3] Bertero, M. Introduction to Inverse Problems in Imaging / M. Bertero, P. Boccacci, C. De Mol. – 2nd ed. – CRC Press, 2021.