

## Об определении содержания и источников диоксида азота в тропосфере по измерениям КА серии «Ресурс-П»

О. В. Постыляков<sup>1</sup>, А. С. Христова<sup>1,2</sup>, А. И. Чуличков<sup>2,1</sup>,  
А. Н. Боровский<sup>1</sup>, Ю. С. Мухартова<sup>2</sup>, А. А. Макаренков<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Москва, 119017, Россия*  
*E-mail: oleg.postylyakov@gmail.com*

<sup>2</sup> *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова*  
*Москва, 119991, Россия*  
*E-mail: askhristova@gmail.com*

<sup>3</sup> *Рязанский государственный радиотехнический университет им. В. Ф. Уткина*  
*Рязань, 390005, Россия*

На борту спутников серии «Ресурс-П» установлена гиперспектральная аппаратура (ГСА), которая регистрирует рассеянное солнечное излучение в спектральном диапазоне, покрывающем полосу поглощения  $\text{NO}_2$ . Ранее авторы разработали метод определения двумерного поля интегрального содержания  $\text{NO}_2$  в тропосфере по измерениям ГСА/«Ресурс-П» с высоким пространственным разрешением. При описании данных, используемых в качестве исходных для этого исследования, дан краткий обзор результатов, полученных в ходе экспериментальных измерений аппаратурой ГСА/«Ресурс-П» 29 сентября 2016 г., а также химико-транспортной модели, созданной для интерпретации высокоточных измерений. В настоящей работе разрабатываются и сравниваются три метода решения обратной задачи определения пространственного распределения источников  $\text{NO}_x$  по получаемым ГСА/«Ресурс-П» полям распределения  $\text{NO}_2$ . Представлены первые результаты применения этих методов. Нелинейный метод квадратичного программирования, который позволил учесть неотрицательность плотности источников  $\text{NO}_2$ , дал результат с лучшей локализацией источников и был меньше искажён шумом по сравнению со смещённой линейной оценкой и проекцией этой оценки, учитывающей неотрицательность плотности источников.

**Ключевые слова:** космические измерения, ГСА, «Ресурс-П», источники двуокиси азота, инвентаризация выбросов, дифференциальная спектроскопия, химико-транспортное моделирование, оптимальное статистическое оценивание, преобразование Фурье, квадратичное программирование, метод проекции градиента

Одобрена к печати: 23.12.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-2-84-94

### Введение

Оксиды азота ( $\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$ ) — одни из ключевых компонентов фотохимии тропосферы Земли. Реакции с их участием приводят к увеличению содержания приземного озона, возникновению фотохимического смога и выпадению кислотных дождей в результате образования азотной кислоты. На антропогенные выбросы окислов азота приходится около 2/3 от общего глобального количества их тропосферных источников, а их содержание в пограничном слое атмосферы над промышленными районами и крупными городами может превышать естественный фон на порядки. С 2013 г. на солнечно-синхронной орбите работает серия спутников «Ресурс-П» (Руководство..., 2023). Гиперспектральная аппаратура (ГСА), установленная на борту «Ресурс-П», регистрирует рассеянное солнечное излучение в спектральном диапазоне, который покрывает полосу поглощения  $\text{NO}_2$ . Мы разработали метод определения двумерного поля интегрального содержания  $\text{NO}_2$  в тропосфере по измерениям ГСА/«Ресурс-П», позволяющий получить распределение  $\text{NO}_2$  с пространственным разрешением около 2,4 км при типичной для космических измерений точности  $1,0 \cdot 10^{15}$  молекул/см<sup>2</sup> на сетке представления данных 120 м (Postylyakov et al., 2017), что превышает пространственное разрешение других современных спутниковых инструментов. Его

использование даёт возможность впервые выявить точечные антропогенные источники примеси  $\text{NO}_2$  масштаба предприятия по измерениям из космоса. Была выполнена валидация полученных результатов на основе сравнения со спутниковыми измерениями и химико-транспортными моделями (Postylyakov et al., 2019). Для интерпретации измерений создана химико-транспортная модель с высоким пространственным разрешением (Мухтарова и др., 2024).

В работе разрабатываются и сравниваются методы решения обратной задачи определения пространственного распределения источников  $\text{NO}_x$  по получаемым ГСА/«Ресурс-П» полям распределения  $\text{NO}_2$ . При описании данных, используемых в качестве исходных для настоящего исследования, дан краткий обзор результатов, полученных в ходе экспериментальных измерений аппаратурой ГСА/«Ресурс-П» в 2016 г., а также химико-транспортной модели, созданной для интерпретации высокочастотных измерений. Представлены первые результаты применения разработанных методов определения распределения источников примеси.

## Метод оценивания двумерного поля тропосферного содержания $\text{NO}_2$

Аппаратура ГСА/«Ресурс-П» измеряет спектр рассеянного солнечного излучения в спектральном диапазоне 400–1000 нм из близких к надирному направлений, замая по поверхности Земли полосу шириной около 30 км. Основное направление планировавшегося использования аппаратуры ГСА/«Ресурс-П» — природно-ресурсное, при котором выполняется съёмка с пространственным разрешением 30 м и спектральным разрешением 10 нм. Для измерения содержания  $\text{NO}_2$  в атмосфере мы отработали другой, заложенный разработчиками аппаратуры ГСА, нестандартный режим (Заварзин и др., 2013; Arkhipov et al., 2013). В наших экспериментах съёмка выполнялась со спектральным разрешением 3–5 нм в области спектра 400–520 нм и пространственным разрешением 120 м. Мы разработали алгоритм для восстановления тропосферного содержания  $\text{NO}_2$  по данным ГСА/«Ресурс-П» (Postylyakov et al., 2017). Он использует подход дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии для определения содержания примеси. Интегральное содержание  $\text{NO}_2$  в тропосфере при таком подходе получается в два этапа. На первом этапе определяется дифференциальное наклонное содержание  $\text{NO}_2$ , которое будем обозначать как  $X_{\text{NO}_2}$ . При его расчёте мы также учитывали поглощение газов  $\text{O}_3$ ,  $\text{O}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , неэластичное рассеяние на основе добавления эффективного сечения поглощения эффекта Шефова–Ринга, а также влияние медленно меняющихся по спектру характеристик аппаратуры и атмосферы за счёт добавления полинома третьей степени. Для получения наклонного содержания  $X_j$  атмосферных примесей решалась задача минимизации функции

$$F(\vec{X}, \vec{a}) = \sum_{i=0}^{M-1} W_i^2 \left[ \ln \left( \frac{I_0(\lambda_i)}{I'(\lambda_i)} \right) - \sum_j \sigma_j(\lambda_i) X_j - \sum_{j=0}^3 a_j (\lambda_c - \lambda_i)^j \right]^2$$

по линейным параметрам  $\vec{X}, \vec{a} = (a_0, a_1, a_2, a_3)$ . Её решение даёт несмещённую линейную оценку поля дифференциальной наклонной плотности примеси  $X_{\text{NO}_2}$ . Здесь  $I_0(\lambda_i)$  — так называемый опорный спектр;  $\lambda$  — длина волны;  $I'(\lambda_i)$  — измеренный на длинах волн  $\{\lambda_i\}$  спектр;  $X_j$  — наклонная толщина  $j$ -й примеси с сечением поглощения  $\sigma_j$ ;  $W_i$  — веса, связанные с точностью измерений на длине волны  $\lambda_i$ ;  $\lambda_c$  — некоторая опорная длина волны;  $M$  — количество спектральных каналов. На втором этапе работы алгоритма содержание примеси в вертикальном столбе  $\text{VCD}_{\text{NO}_2}$  (англ. Vertical Column Density) рассчитывается по формуле

$$\text{VCD}_{\text{NO}_2} = \frac{\text{SCD}_{\text{REF}} + X_{\text{NO}_2} - \text{SCD}_{\text{strat}}}{\text{AMF}},$$

где используется эффективная тропосферная воздушная масса AMF (англ. Air Mass Factor), вычисляемая с помощью линеаризованной модели переноса излучения в атмосфере MCC++ (Postylyakov, 2004). Здесь  $\text{SCD}_{\text{REF}}$  — наклонное содержание (англ. Slant Column Density)  $\text{NO}_2$  в атмосфере на момент измерения опорного спектра  $I_0(\lambda_i)$ ,  $\text{SCD}_{\text{strat}}$  — наклонное содержание

$\text{NO}_2$  в стратосфере в месте измерения. Для минимизации влияния  $\text{SCD}_{strat}$  на точность восстановления  $\text{NO}_2$  измерения опорного спектра выполнялись над удалёнными океаническими районами, для которых характерно содержание примеси только в стратосфере. При этом выбирались районы, покрытые облачностью, для улучшения отношения сигнал/шум при измерениях спектра  $I_0(\lambda_i)$ . Содержание  $\text{SCDREF}$  и  $\text{SCD}_{strat}$  рассчитывалось с использованием модели переноса излучения по данным о стратосферном содержании  $\text{NO}_2$  аппаратуры OMI/Aura (англ. Ozone Monitoring Instrument). Заметим, что распределение примеси в стратосфере имеет значительно большую пространственную однородность и не влияет на выявленную нами неоднородность тропосферной двуокиси азота.

Разработанный алгоритм был использован для оценивания  $X_{\text{NO}_2}$  по гиперспектральному изображению прибора ГСА, полученному в 04:30 UTC (англ. Coordinated Universal Time) 29 сентября 2016 г. с аппарата «Ресурс-П» № 2 над провинцией Хэбэй в Китае. Провинция Хэбэй расположена в Северном Китае и считается одним из самых загрязнённых по  $\text{NO}_2$  регионов в мире. Несколько городов провинции имели к 2016 г. одни из самых низких показателей качества воздуха в Китае. Основным источником загрязнения, включая  $\text{NO}_2$ , становятся крупные сталелитейные и химические предприятия и станции электроэнергетики, использующие уголь. Съёмка ГСА/«Ресурс-П» охватывала область шириной около 30 км и длиной (вдоль орбиты) около 150 км (рис. 1а). Изображение ограничено координатами: на севере —  $37,93^\circ$  с. ш.,  $114,43^\circ$  в. д. и  $37,87^\circ$  с. ш.,  $114,78^\circ$  в. д.; на юге —  $36,42^\circ$  с. ш.,  $114,39^\circ$  в. д.

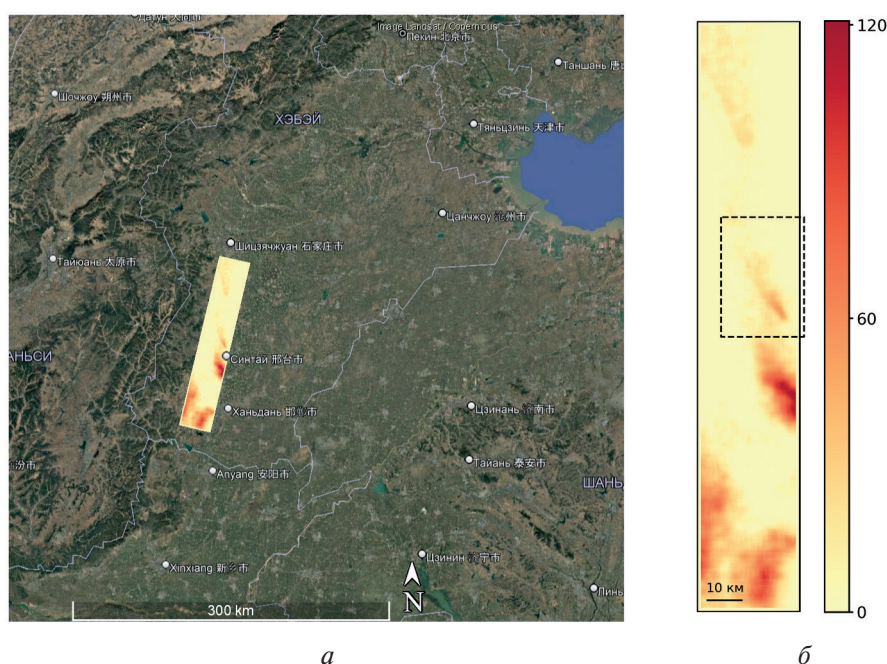


Рис. 1. Интегральное содержание  $\text{NO}_2$  ( $\times 10^{15}$  молекул/ $\text{см}^2$ ) в тропосфере по маршруту съёмки 29 сентября 2016 г. над провинцией Хэбэй, Китай (показаны значения, усреднённые медианным фильтром скользящего среднего  $20 \times 20$  пикселей ( $2,4 \times 2,4$  км)): а — расположение маршрута в крупном масштабе; б — содержание  $\text{NO}_2$  вдоль маршрута. В центре пунктирной рамкой выделен фрагмент с точечным источником выбросов, который далее рассмотрен подробнее

Наш анализ показал, что среднеквадратическая ошибка оценивания содержания  $X_{\text{NO}_2}$  для отдельного пространственного пикселя размером  $120 \times 120$  м составляет около  $20 \cdot 10^{15}$  молекул/ $\text{см}^2$ . Высокая погрешность оценивания связана с низким спектральным разрешением измерений. Ориентированные на атмосферные измерения спутниковые гиперспектрометры (GOME (англ. Global Ozone Monitoring Experiment), GOME-2, SCIAMACHY (англ. Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography), OMI, TROPOMI

(англ. Tropospheric Monitoring Instrument)) имеют более высокое разрешение — около 0,3–1,0 нм в полосе поглощения  $\text{NO}_2$ . Такое разрешение соответствует особенностям спектра  $\text{NO}_2$ , которые позволяют наилучшим образом отделить его поглощение от поглощения других газов. При усреднении данных по квадратам размером  $20 \times 20$  пикселей ( $2,4 \times 2,4$  км) среднеквадратическая ошибка оценивания  $X_{\text{NO}_2}$  уменьшается в 20 раз и составляет  $(0,8–1,0) \cdot 10^{15}$  молекул/см<sup>2</sup>. Такая ошибка восстановления характерна для точности по-пиксельного восстановления  $X_{\text{NO}_2}$  аппаратуры OMI/Aura и TROPOMI/Sentinel-5P. Однако эта аппаратура имеет более низкое пространственное разрешение, для пикселей, снимаемых в надирном направлении, только  $13 \times 24$  и  $3,5 \times 7$  км соответственно. Тем самым достигнутое в 2017 г. с использованием ГСА/«Ресурс-П» № 2 разрешение  $2,4 \times 2,4$  км является рекордным.

### Химико-транспортная модель

Основной антропогенный источник образования оксидов азота  $\text{NO}_x$  в тропосфере — окисление атмосферного азота, сопровождающее все процессы высокотемпературного горения, в которых в качестве окислителя выступает воздух. В результате горения выбрасывается в основном  $\text{NO}$ , который окисляется до  $\text{NO}_2$ , доступного для измерения используемым нами методом со спутника. Поэтому для нахождения источников  $\text{NO}_x$  по измерениям  $\text{NO}_2$  необходимо привлекать химико-транспортную модель. Важной характеристикой модели химического транспорта, используемой для интерпретации высокоточных измерений ГСА/«Ресурс-П», представляется скорость расчётов. Для минимизации вычислительных затрат была оптимизирована система химических реакций, включаемых в систему уравнений диффузии — реакции — адвекции. Для этого выполнялось сравнение (Мухтарова и др., 2024) результатов различных версий модели с сокращённым набором химических реакций с полной моделью атмосферной химии RACM (англ. Regional Atmospheric Chemistry Modeling). Модель RACM (Stockwell et al., 1997) была разработана для описания основных газофазных реакций в тропосфере, включая реакции органических и неорганических веществ, а также был спроектирован алгоритм вычисления скорости фотохимической диссоциации в зависимости от географического положения, даты, времени суток и условий облачности. Компоненты скорости ветра, вертикальная составляющая коэффициента турбулентности  $K_z$ , температура, давление и влажность воздуха в нашей модели получены посредством кубической интерполяции данных реанализа ERA5 (англ. ECMWF Reanalysis v5) Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды ECMWF (англ. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) на расчётную сетку модели. Горизонтальная составляющая коэффициента турбулентности принималась как  $K_{\perp} = 2,5K_z$ . Анализ также показал, что в шлейфе, формирующемся за время около 3–4 ч, интегральное содержание  $\text{NO}_2$  зависит от интенсивности источника практически линейно в диапазоне адекватных значений мощности источника, поэтому применима линейная модель формирования сигнала.

Таким образом, мы описываем зависимость измеренного интегрального содержания  $\text{NO}_2$   $\xi(x, y), (x, y) \in X \subset R^2$  ( $X$  — область изображения на плоскости  $R^2$ ) от плотности распределения стационарных источников  $f(x', y')$   $\text{NO}_x$  в виде равенства

$$\xi(x, y) = \int a(x - x', y - y') f(x', y') dx' dy' + v(x, y), \quad (1)$$

где  $a(x, y)$  — шлейф  $\text{NO}_2$  от точечного источника  $\text{NO}_x$ , расположенного в точке  $(0, 0) \in X$  считанный по построенной химико-транспортной модели, а  $v(x, y)$  — шум измерения.

### Оценка поля пространственного распределения источников $\text{NO}_2$

Для построения оценки распределения источников  $f(x, y)$  по выполненным измерениям  $\xi(x, y)$  ГСА/«Ресурс-П» мы рассмотрели несколько методов, основанных на различных критериях оптимальности.

### Смещённая линейная статистическая оценка

Рассмотрим оценивание распределения источников  $f(x, y)$  по измерению (1) в отсутствии априорной информации о  $f(x, y)$ . Для большей вычислительной эффективности можно проанализировать задачу для фурье-образов функций. Продолжим функции, входящие в выражение (1), на всю числовую плоскость  $R^2$ . Мы предполагаем, что источники шлейфа, показанного на рис. 2а и б, расположены вблизи его максимума, поэтому перед таким периодическим расширением нам необходимо расширить поле  $NO_2$  нулевыми значениями в наветренном направлении, по крайней мере, на длину шлейфа. Тогда, считая, что квадрат всех этих функций интегрируем на  $X$ , по теореме о свёртке имеем следующее выражение для их образов Фурье:

$$\tilde{\xi}(\omega) = \tilde{a}(\omega)\tilde{f}(\omega) + \tilde{v}(\omega).$$

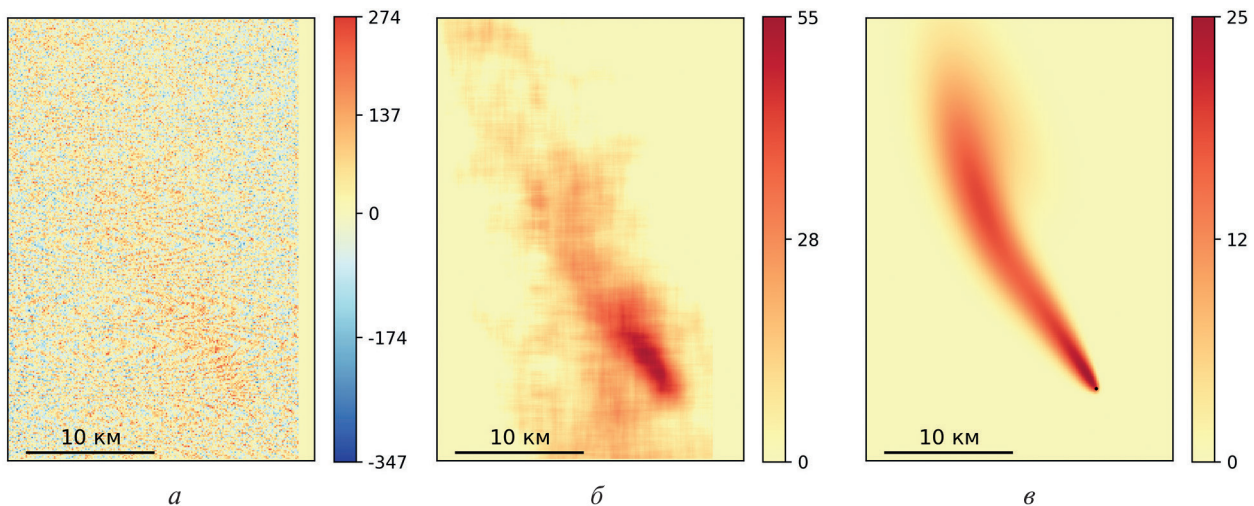


Рис. 2. Интегральное содержание  $NO_2$  ( $\times 10^{15}$  молекул/см<sup>2</sup>) в тропосфере в области, выделенной сплошной рамкой на рис. 1: а — измеренное ГСА/«Ресурс-П» содержание на сетке 120 м (значения существенно искажены шумом); б — измеренное ГСА/«Ресурс-П» содержание, усреднённое фильтром скользящего среднего  $20 \times 20$  пикселей ( $2,4 \times 2,4$  км); в — результат химико-транспортного моделирования шлейфа  $NO_2$   $a(x, y)$  от точечного источника  $NO$  мощностью  $1,1 \cdot 10^{24}$  молекул/с

Поскольку в экспериментальных данных функции  $\xi(x, y)$ ,  $f(x, y)$  и  $a(x, y)$  заданы в конечном числе узлов прямоугольной сетки, то для вычисления мы использовали быстрое дискретное преобразование Фурье. Для оценки функции  $f(x, y)$  можно воспользоваться методами решения задач интерпретации данных (Пытьев, 2012). Пусть  $v(x, y)$  — независимые случайные величины с нулевым математическим ожиданием  $E v(x, y) = 0$  и дисперсией  $E v^2(x, y) = \sigma^2$ . Если ограничения на функцию  $f(x, y)$  отсутствуют, то будем искать её оценку  $\hat{f}(x, y)$  как решение задачи синтеза идеального прибора (Пытьев, 2012). В этом случае задача ставится как задача на минимизацию операторной невязки  $g(\tilde{r}(\omega)) \equiv \sum_{\omega} (\tilde{r}(\omega)\tilde{a}(\omega) - 1)^2$  при ограничении на уровень шума оценивания  $h(\tilde{r}(\omega)) \equiv E \sum_{\omega} (\tilde{r}(\omega)\tilde{v}(\omega))^2 = \sigma^2 \sum_{\omega} (\tilde{r}(\omega))^2$ :

$$\hat{\tilde{r}}(\omega) = \arg \inf_{\tilde{r}} \{ g(\tilde{r}) | \tilde{r}(\omega) : h(\tilde{r}) \leq \varepsilon \}.$$

В этом случае фурье-образом оценки  $\hat{f}(x, y)$  будет

$$\hat{\tilde{f}}(\omega) = \hat{\tilde{r}}(\omega)\tilde{\xi}(\omega), \tag{2}$$

где  $\hat{\tilde{r}}(\omega) = \tilde{a}(\omega)^* / (|\tilde{a}(\omega)|^2 + \lambda_{\varepsilon})$ .

Здесь \* — знак комплексного сопряжения. Параметр (множитель Лагранжа)  $\lambda_\varepsilon > 0$  подбирается из оперативной характеристики, связывающей приборную невязку и случайную погрешность (Пытьев, 2012).

Результаты восстановления плотности распределения источников  $\text{NO}_2$  в зависимости от параметра  $\lambda_\varepsilon$  показаны на рис. 3. Построенная таким образом оценка (2) довольно сильно искажена шумом, а также имеет нефизические — отрицательные — значения плотности источников. При увеличении  $\lambda$  (которое приводит к уменьшению ограничения на шум  $\varepsilon$ ) происходит размытие распределения источников. Распределение, наиболее близкое к ожидаемому распределению источников  $\text{NO}_2$ , которое привязано к выявляемым по спутниковой съёмке промышленным объектам, в нашем случае дала оценка с параметром  $\lambda_\varepsilon = 0,005$ . Место, где достигается максимум плотности источников при  $\lambda_\varepsilon = 0,005$ , хорошо согласуется с расположением ( $37,144^\circ$  с. ш.,  $114,539^\circ$  в. д.) предприятия Xingtai production base (производственная база Синтай) компании China Risun Group Limited (Environmental..., 2019), которая является крупнейшим в мире производителем кокса ([https://en.risun-global.com/content/details\\_528\\_8166.html](https://en.risun-global.com/content/details_528_8166.html)).

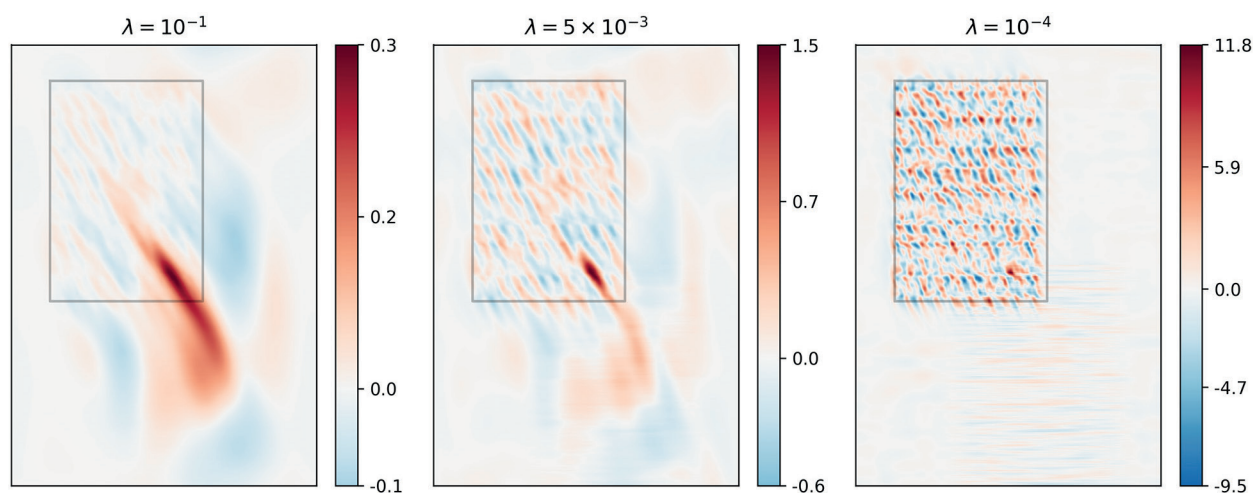


Рис. 3. Результат восстановления плотности распределения источников  $\text{NO}_2$  ( $\times 10^{13}$  молекул·с<sup>-1</sup>·см<sup>-2</sup>) методом СЛСО (2) (смещённая линейная статистическая оценка) при разных значениях параметра  $\lambda_\varepsilon$

### Проекция смещённой линейной статистической оценки

Полученная линейная оценка (2) может быть улучшена, если учесть неотрицательность оцениваемых величин  $f(x, y) \geq 0$ . Меньшую ошибку, чем выражение (2), будет давать её ортогональная проекция на неотрицательные значения:

$$\bar{f}(x, y) = \max\{\hat{f}(x, y), 0\}. \quad (3)$$

Эта оценка показана на рис. 4б (см. с. 90).

### Оценка метода квадратичного программирования

Рассмотрим ещё один подход к решению задачи, который позволяет учитывать неотрицательность восстанавливаемой функции  $f(x, y) \geq 0$ . Поставим задачу как задачу квадратичного программирования (Васильев, 2011), т. е. как решение задачи минимизации с ограничениями

$$\bar{f}(x, y) = \arg \inf_{f'} \{ \alpha(f') \mid f'(x', y') \geq 0 \} \quad (4)$$

квадратичного функционала

$$\alpha(f') = \int_X \int_X (\xi(x, y) - a(x - x', y - y') f'(x', y'))^2 dx' dy' dx dy. \quad (5)$$

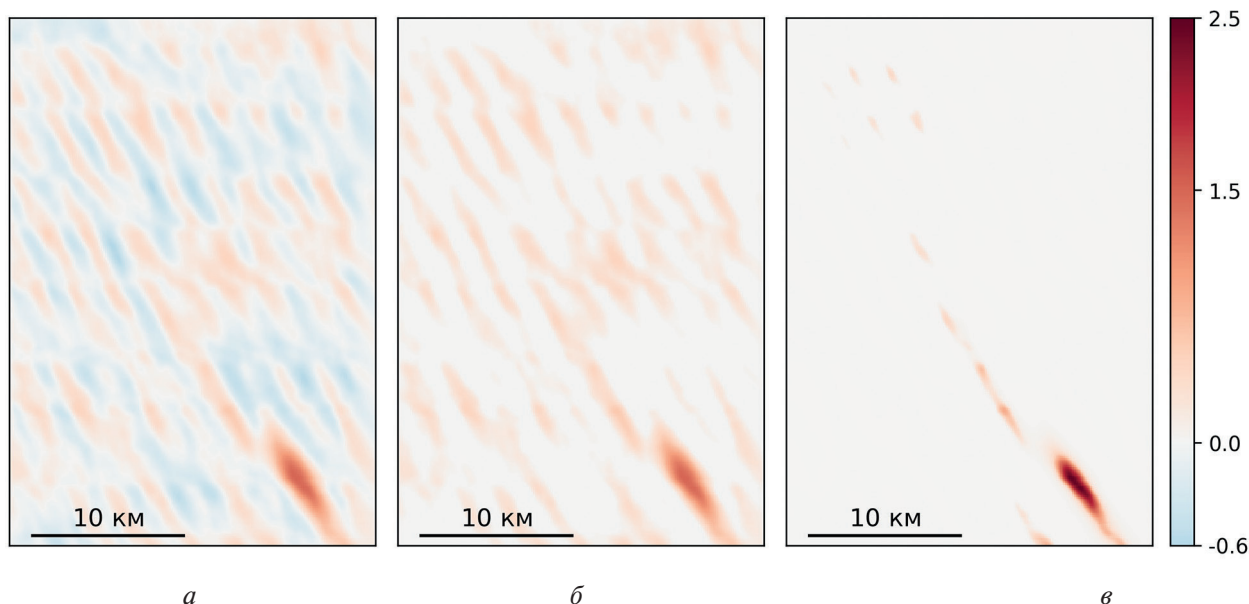


Рис. 4. Результат восстановления распределения источников  $\text{NO}_2$  ( $\times 10^{13}$  молекул·с $^{-1}$ ·см $^{-2}$ ): а — методом СЛСО (2) с  $\lambda_\epsilon = 0,005$ ; б — методом проецирования оценки СЛСО (3) с  $\lambda_\epsilon = 0,005$ ; в — методом квадратичного программирования (4)

Заметим, что к такой же задаче минимизации (4) приводит подход максимизации надёжности модели измерения в теории измерительно-вычислительных систем (Пытьев, 2012). Минимизация (4) функционала (5) проводилась методом проекции градиента (Васильев, 2011). Для этого выбирается начальное приближение для  $f$  (решение, даваемое методом проекции СЛСО) и вычисляется градиент функционала, минимизируемого в выражении (4). Для минимизации функционала делается шаг против градиента, но, вообще говоря, этот шаг может вывести результат из разрешённой области. Поэтому направление шага корректируется заменой функционала на его проекцию на множество  $\check{f}(x, y) \geq 0$ . Эта проекция сводится к замене отрицательных координат шага на нулевые. Минимизация проводится итерационной процедурой до тех пор, пока убывание функционала не станет достаточно малым.

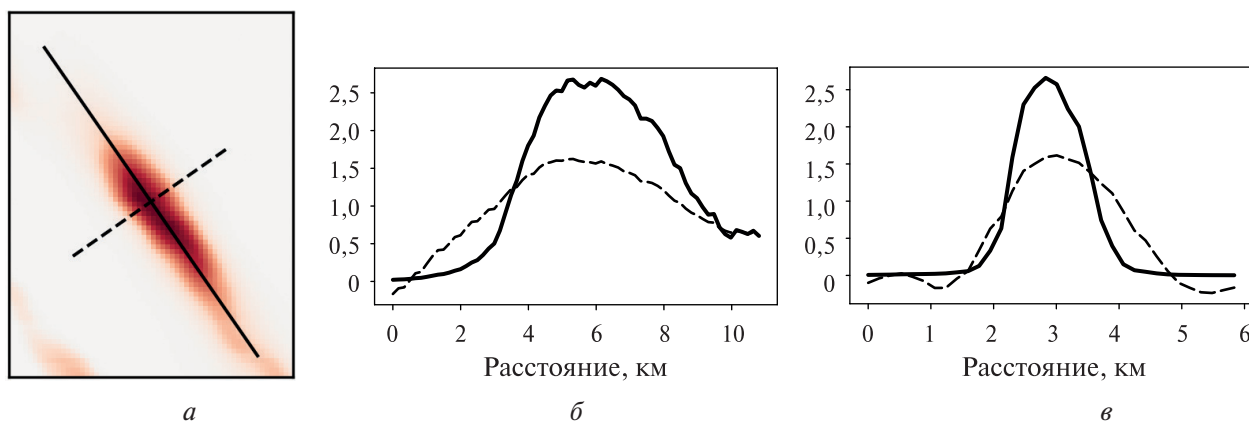


Рис. 5. Продольное и поперечное (по направлению ветра) сечение пятна плотности распределения источников  $\text{NO}_2$  ( $\times 10^{13}$  молекул·с $^{-1}$ ·см $^{-2}$ ) (а). Плотность распределения источников  $\text{NO}_2$  в продольном (б) и поперечном (в) направлении для метода СЛСО (3) с  $\lambda_\epsilon = 0,005$  (пунктирная линия) и метода квадратичного программирования (4) (сплошная линия)

Полученная оценка  $\tilde{f}(x, y)$  показана на *рис. 4в*. Оценка  $\tilde{f}(x, y)$  существенно меньше искажена шумом, функция распределения источников имеет один существенный максимум около ожидаемого источника  $\text{NO}_2$ . Необходимо также заметить, что данный метод заметно точнее указывает на область, в которой возможно расположение источников. На *рис. 5* (см. с. 90) показано сечение получаемого пятна плотности распределения источников. Размеры пятна плотности распределения источников для нелинейного метода уменьшаются в 1,5 раза по уровню  $1/2$  максимума плотности и составляют 3,5 км по направлению ветра и 0,9 км в поперечном направлении.

Заметим также, что предложенные методы позволяют найти оценку функции плотности распределения источников загрязнения непосредственно из данных, полученных на сетке  $120 \times 120$  м, несмотря на значительный уровень шума в этих исходных данных. При предварительном их усреднении для достижения среднеквадратической ошибки оценивания типичного для космических измерений содержания  $\text{NO}_2$   $(0,8-1,0) \cdot 10^{15}$  молекул/см<sup>2</sup> по квадратам  $2,4 \times 2,4$  км мы не получили бы такого высокого разрешения локализации источников. Применение нелинейного метода проекции градиента позволило улучшить линейную статистическую оценку.

## Заключение

С 2013 г. в России функционируют спутники серии «Ресурс-П» с гиперспектральными приборами ГСА, предназначенными для дистанционного зондирования Земли. В специальном режиме аппаратура ГСА/«Ресурс-П» достигает спектрального разрешения 3–5 нм в диапазоне 400–490 нм, используемом для определения содержания  $\text{NO}_2$ , при пространственном разрешении 120 м. Авторами был разработан первый алгоритм для определения интегрального содержания  $\text{NO}_2$  в тропосфере с использованием измерений ГСА. Он позволяет восстанавливать тропосферное содержание  $\text{NO}_2$  на сетке с шагом 120 м, которое, однако, при таком высоком разрешении сильно искажено случайным шумом. В настоящей работе авторами кратко рассмотрены три метода построения оценки распределения плотности источников  $\text{NO}_2$  по полученным тропосферным содержаниям атмосферной примеси над промышленными районами. Нелинейный метод квадратичного программирования, который позволил учесть неотрицательность плотности источников  $\text{NO}_2$ , дал результат с лучшей локализацией источников и был меньше искажён шумом по сравнению со смещённой линейной оценкой и проекцией этой оценки, учитывающей неотрицательность плотности источников. Линейные размеры пятна восстановленной плотности распределения  $\text{NO}_2$  от предполагаемого точечного источника для нелинейного метода уменьшаются в 1,5 раза по уровню  $1/2$  максимума плотности и составляют  $3,5 \times 0,9$  км по направлению ветра и в поперечном направлении.

Представленные методы и алгоритмы восстановления содержания  $\text{NO}_2$  и распределения его источников используются при интерпретации съёмки действующих в настоящее время аппаратов серии «Ресурс-П». Аппаратуру ГСА/«Ресурс-П» можно считать интересным и в настоящее время уникальным инструментом как для высокодетального исследования загрязнения атмосферы, так и для тестирования методов интерпретации будущих спутниковых данных высокого пространственного разрешения о загрязнениях и их источниках. Разработанные методы могут быть использованы при интерпретации измерений состава атмосферы перспективной гиперспектральной аппаратурой наноспутников дистанционного зондирования Земли (Ivliev et al., 2024) и малых космических аппаратов (Kirilin et al., 2015), в том числе на основе развития аппаратуры, испытанной на Международной космической станции (Трохимовский и др., 2022).

Работа выполнена за счёт средств государственных заданий Института физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, регистрационный номер темы 125020501413-6, и Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.

## Литература

1. *Васильев Ф. П.* Методы оптимизации. В 2-х кн., кн. 1. М: МЦНМО, 2011. 620 с.
2. *Заварзин В. И., Ли А. В.* Методика определения спектральных характеристик гиперспектральной съемочной аппаратуры дистанционного зондирования Земли // Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2013. № 1(13). 13 с. DOI: 10.18698/2308-6033-2013-1-517.
3. *Мухартова Ю. В., Пащенко Е. В., Мортиков Е. В., Постыляков О. В.* Моделирование переноса окислов азота с учетом химических трансформаций с помощью RANS и LES моделей // Материалы Международ. конф. по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды ENVIROMIS-2024. ИМКЭС СО РАН, 2024. С. 56–61.
4. *Пытьев Ю. П.* Методы математического моделирования измерительно-вычислительных систем. М: Физматлит, 2012. 427 с.
5. Руководство пользователя данными дистанционного зондирования Земли, получаемыми с космической системой «Ресурс-П». Госкорпорация «Роскосмос», АО РКЦ «Прогресс», 2023. 150 с.
6. *Трохимовский А. Ю., Кораблев О. И., Иванов Ю. С. и др.* Инфракрасный канал научной аппаратуры «Дриада» для измерения содержания парниковых газов из космоса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 6. С. 50–60. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-50-60.
7. *Arkhipov S. A., Senik B. N., Zavarzin V. I.* Developing and fabricating optical systems for a prospective remote-earth-probe spacecraft // J. Optical Technology. 2013. V. 80. Iss. 1. P. 25–27. DOI: 10.1364/JOT.80.000025.
8. Environmental, social and governance report 2018. China Risun Group Limited, 2019. 280 p. <https://en.risun.com/upload/file/2025/06/20/73c4fe44-8bf1-4302-91eb-81e8c912d8e7.pdf>.
9. *Ivliev N., Podlipnov V., Petrov M. et al.* 3U CubeSat-based hyperspectral remote sensing by Offner imaging hyperspectrometer with radially-fastened primary elements // Sensors. 2024. V. 24. Iss. 9. Article 2885. 21 p. DOI: 10.3390/s24092885.
10. *Kirilin A. N., Akhmetov R., Abrashkin V. et al.* Design, testing and operation of “AIST” small satellites // 7<sup>th</sup> Intern. Conf. on Recent Advances in Space Technologies (RAST 2015). IEEE, 2015. P. 819–823. DOI: 10.1109/RAST.2015.7208453.
11. *Postylyakov O. V.* Linearized vector radiative transfer model MCC++ for a spherical atmosphere // J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2004. V. 88. Iss. 1–3. P. 297–317. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2004.01.009.
12. *Postylyakov O. V., Borovski A. N., Makarenkov A. A.* First experiment on retrieval of tropospheric NO<sub>2</sub> over polluted areas with 2.4-km spatial resolution basing on satellite spectral measurements // Proc. SPIE, 23<sup>rd</sup> Intern. Symp. on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 2017. V. 10466. Article 104662Y. DOI: 10.1117/12.2285794.
13. *Postylyakov O. V., Borovski A. N., Davydova M. A., Makarenkov A. A.* Preliminary validation of high-detailed GSA/Resurs-P tropospheric NO<sub>2</sub> maps with alternative satellite measurements and transport simulations // Proc. SPIE. 2019. V. 11152. Article 111520F. DOI: 10.1117/12.2535487.
14. *Stockwell W. R., Kirchner F., Kuhn M., Seefeld S.* A new mechanism for regional atmospheric chemistry modeling // J. Geophysical Research: Atmospheres. 1997. V. 102. No. D22. P. 25847–25879. DOI: 10.1029/97JD00849.

## On the determination of content and sources of nitrogen dioxide in the troposphere based on measurements from the Resurs-P satellite

O. V. Postylyakov<sup>1</sup>, A. S. Khristova<sup>1,2</sup>, A. I. Chulichkov<sup>2,1</sup>,  
A. N. Borovsky<sup>1</sup>, Iu. S. Mukhartova<sup>2</sup>, A. A. Makarenkov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow 119017, Russia  
E-mail: oleg.postylyakov@gmail.com

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia  
E-mail: askhristova@gmail.com

<sup>3</sup> Ryazan State Radio Engineering University named after V. F. Utkin  
Ryazan 390005, Russia

The Resurs-P satellite is equipped with a hyperspectral instrument, named GSA, that records scattered solar radiation in the spectral range covering the NO<sub>2</sub> absorption band. The authors previously developed a method for determining the two-dimensional field of integrated NO<sub>2</sub> content in the troposphere based on high-spatial-resolution GSA/Resurs-P measurements. The paper describes the data used as input for this study, briefly reviewing the results obtained during experimental measurements by the GSA/Resurs-P equipment on September 29, 2016, and a chemical transport model developed for interpreting highly detailed measurements. The paper develops and compares three methods for solving the inverse problem of determining the spatial distribution of NO<sub>x</sub> sources based on the NO<sub>2</sub> distribution fields obtained by GSA/Resurs-P. The first results from applying the developed methods are presented. The nonlinear quadratic programming method, which took into account the non-negativity of the NO<sub>2</sub> source density, yielded a result with better source localization that was less distorted by noise compared to the biased linear estimate and the projection of this estimate, which took into account the non-negativity of the source density.

**Keywords:** space measurements, GSA, Resurs-P, nitrogen dioxide sources, emissions inventory, differential spectroscopy, chemical-transport modeling, optimal statistical estimation, Fourier transform, quadratic programming, gradient projection method

Accepted: 23.12.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-2-84-94

### References

1. Vasilyev F. P., *Metody optimizatsii* (Optimization methods), In 2 books, 1<sup>st</sup> book, Moscow: MTsNMO, 2011, 620 p. (in Russian).
2. Zavarzin V. I., Li A. V., Methods of determining the spectral characteristics of hyperspectral imaging equipment for Earth remote sensing, *Vestnik MGTU im. N. E. Baumana*, 2013, No. 1(13), 13 p. (in Russian), DOI: 10.18698/2308-6033-2013-1-517.
3. Mukhartova Iu. V., Pashentseva E. V., Mortikov E. V., Postylyakov O. V., Modeling of nitrogen oxide transport taking into account chemical transformations using RANS and LES models, *Materialy Mezhdunarodnoi konferentsii po izmereniyam, modelirovaniyu i informatsionnym sistemam dlya izucheniya okruzhayushchei sredy ENVIROMIS-2024* (Proc. Intern. Conf. on Environmental Observations, Modeling and Information Systems ENVIROMIS-2024), IMKEhS SO RAN, 2024, pp. 56–61 (in Russian).
4. Pytiev Yu. P., *Metody matematicheskogo modelirovaniya izmeritel'nykh sistem* (Methods of mathematical modeling of computer-aided measuring systems), Moscow: Fizmatlit, 2012, 427 p. (in Russian).
5. *Rukovodstvo pol'zovatelya dannymi distantsionnogo zondirovaniya Zemli, poluchaemyimi s kosmicheskoi sistemoi "Resurs-P"* (User's guide to Earth remote sensing data obtained from the Resurs-P space system), State corporation Roscosmos, JSC RCC "Progress", 2023, 150 p. (in Russian).
6. Trokhimovskiy A. Yu., Korablev O. I., Ivanov Yu. S. et al., Infrared channel of the Driada spectrometer for greenhouse gases measurement from space, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 19, No. 6, pp. 50–60 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-50-60.

7. Arkhipov S.A., Senik B.N., Zavarzin V.I., Developing and fabricating optical systems for a prospective remote-earth-probe spacecraft, *J. Optical Technology*, 2013, V. 80, Iss. 1, pp. 25–27, DOI: 10.1364/JOT.80.000025.
8. *Environmental, social and governance report 2018*, China Risun Group Limited, 2019, 280 p., <https://en.risun.com/upload/file/2025/06/20/73c4fe44-8bf1-4302-91eb-81e8c912d8e7.pdf>.
9. Ivliev N., Podlipnov V., Petrov M. et al., 3U CubeSat-based hyperspectral remote sensing by Offner imaging hyperspectrometer with radially-fastened primary elements, *Sensors*, 2024, V. 24, Iss. 9, Article 2885, 21 p., DOI: 10.3390/s24092885.
10. Kirilin A.N., Akhmetov R., Abrashkin V. et al., Design, testing and operation of “AIST” small satellites, *7<sup>th</sup> Intern. Conf. on Recent Advances in Space Technologies (RAST 2015)*, IEEE, 2015, pp. 819–823, DOI: 10.1109/RAST.2015.7208453.
11. Postylyakov O.V., Linearized vector radiative transfer model MCC++ for a spherical atmosphere, *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2004, V. 88, Iss. 1–3, pp. 297–317, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2004.01.009.
12. Postylyakov O.V., Borovski A.N., Makarenkov A.A., First experiment on retrieval of tropospheric NO<sub>2</sub> over polluted areas with 2.4-km spatial resolution basing on satellite spectral measurements, *Proc. SPIE, 23<sup>rd</sup> Intern. Symp. on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*, 2017, V. 10466, Article 104662Y, DOI: 10.1117/12.2285794.
13. Postylyakov O.V., Borovski A.N., Davydova M.A., Makarenkov A.A., Preliminary validation of high-detailed GSA/Resurs-P tropospheric NO<sub>2</sub> maps with alternative satellite measurements and transport simulations, *Proc. SPIE*, 2019, V. 11152, Article 111520F, DOI: 10.1117/12.2535487.
14. Stockwell W.R., Kirchner F., Kuhn M., Seefeld S., A new mechanism for regional atmospheric chemistry modeling, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, V. 102, No. D22, pp. 25847–25879, DOI: 10.1029/97JD00849.