

О восстановлении полей содержания и источников двуокиси азота в тропосфере по измерениям КА серии Ресурс-П

On retrieval of fields of nitrogen dioxide content and sources in
troposphere based on measurements of Resurs-P satellite



**Постыляков О.В.(1,*), Боровский А.Н.(1), Макаренков А.А. (2),
Мухартова Ю.В. (3), Христова А.С. (1,3), Чуличков А.И. (1,3),**

(1) Институт физики атмосферы им.А.М. Обухова РАН

*(2) Рязанский государственный радиотехнический университет
им. В.Ф. Уткина, Рязань*

(3) Московский государственный университет им.М.В. Ломоносова

() oleg.postylyakov@gmail.com*

Оксиды азота в тропосфере

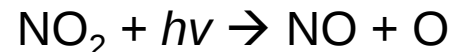
Тропосфера

- Химически активный газ:
 - связан с генерацией озона
 - индикатор присутствия VOC и FR
- Общие источники с парниковым газом CO
- Заметен вклад в радиационный баланс
- Прямое влияние на экосистемы (деградация флоры и фауны, респираторные заболевания, мутагенный).

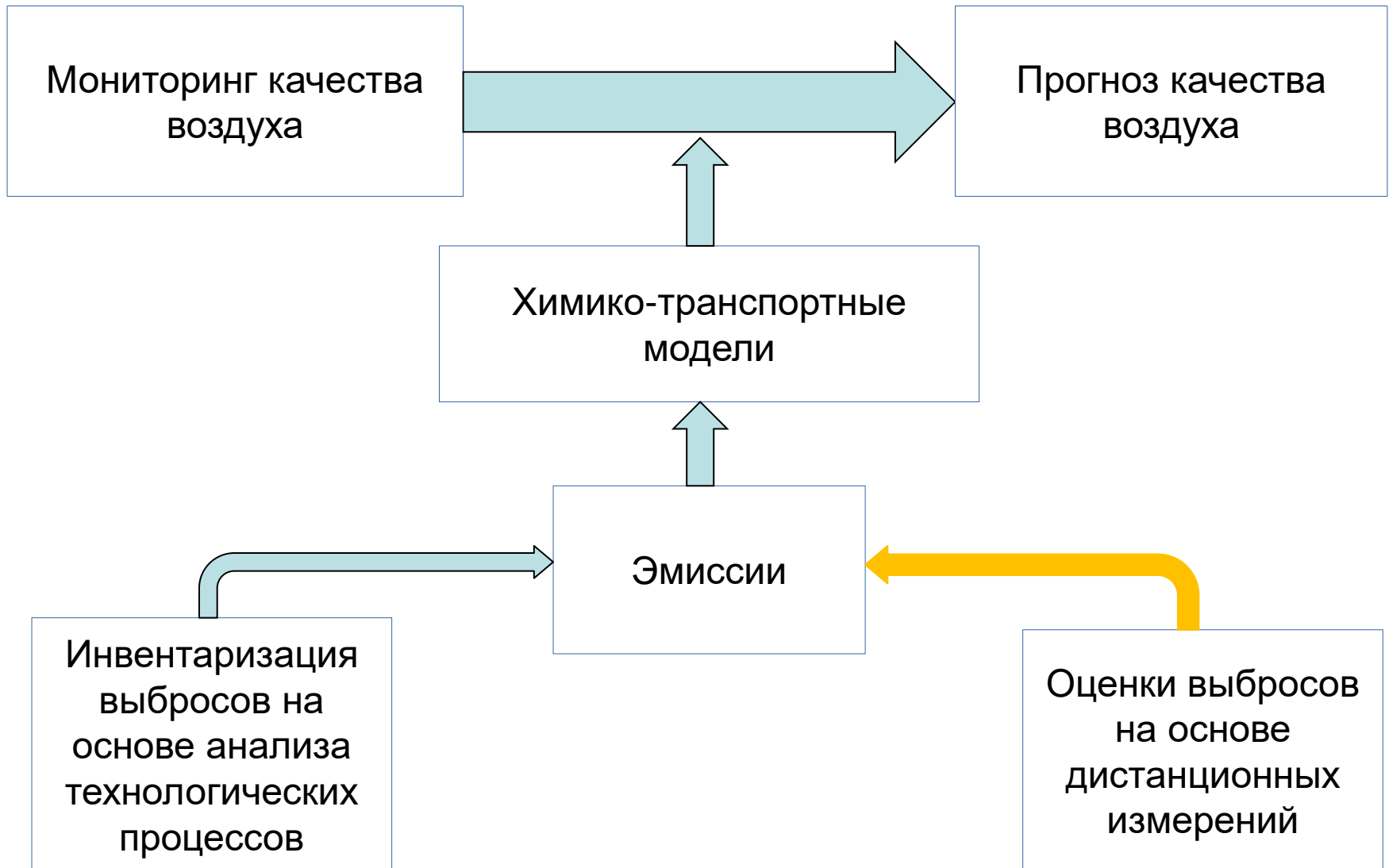
Оксиды азота NO_x
выбрасываются в виде NO



Высокотемпературное горение

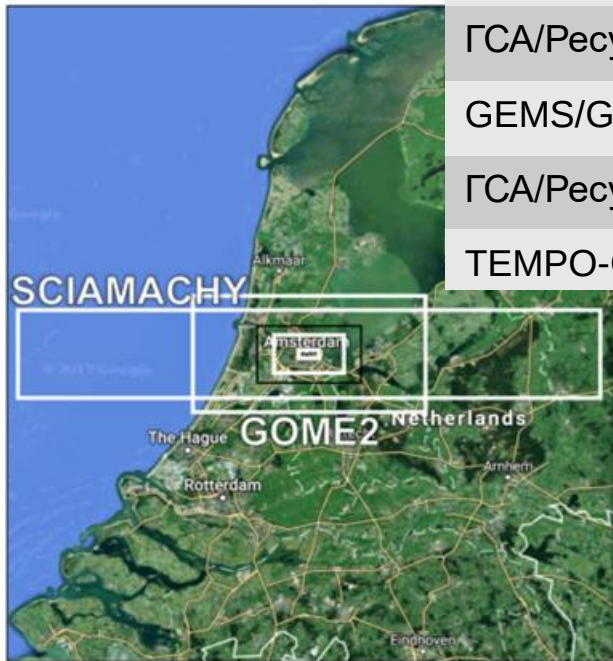


Значение оценки эмиссий газов

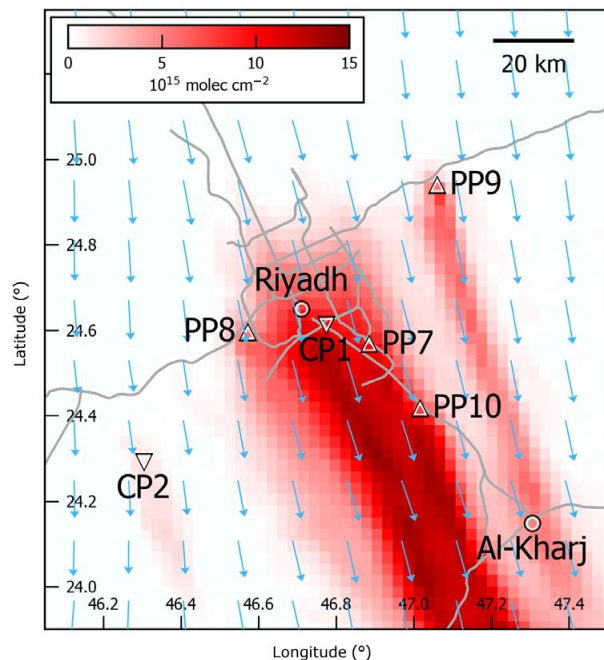


Спутниковые измерения NO₂

Спутник	Дата запуска	Лучшее разрешение по NO2 (т.е. в надир)
OMI/Aura	Jul 2004	13x24 km ²
GOME-2/MetOp-A	Oct 2006	40x80 km ²
GOME-2/MetOp-B	Sep 2012	40x80 km ²
TROPOMI/Sentinel-5P	Oct 2017	3.5x5 km ²
ГСА/Ресурс П №2	Jun 2013	2.4x2.4 км ² , 120x120 м ² (сетка)
GEMS/GEO-KOMPSAT-2B	Feb 2020	8x8 km ²
ГСА/Ресурс П №5	Dec 2024	2.4x2.4 км ² , 120x120 м ² (сетка)
TEMPO-GEO/Intelsat 40e	Apr 2023	10x10 km ²



Оценки плотности эмиссий по спутниковым данным

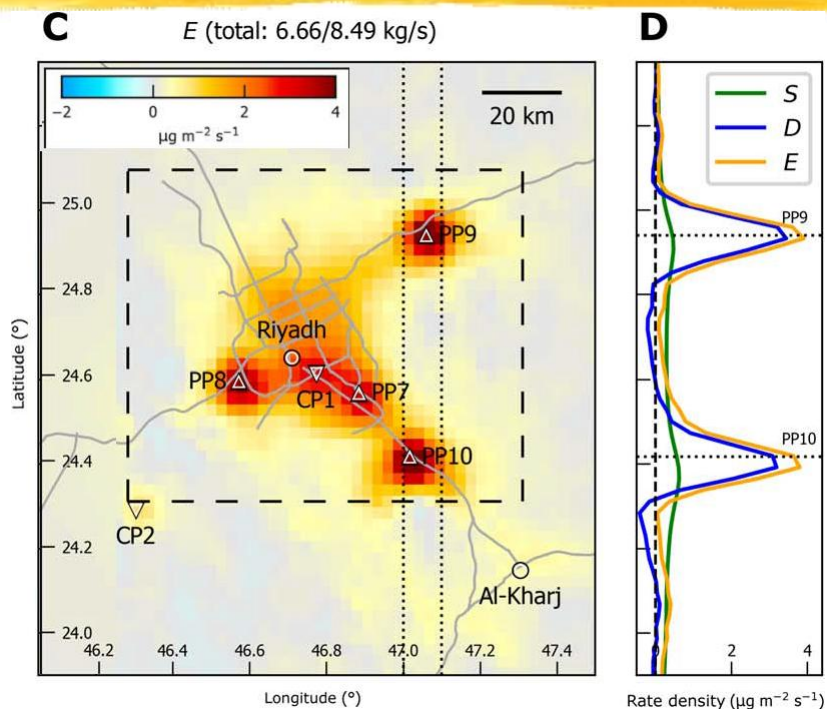


TROPOMI VCD NO₂, 10¹⁵ molec cm⁻²

$$E = S + D = LV/\tau + \nabla(LVw)$$

V – VCD, L – NO_x to NO₂, w – wind,
 τ – константа фотохимического разрушения
 NO₂ на OH
 S – сток
 D – дивергенция

S. Beirle et al., Pinpointing nitrogen oxide emissions from space. Sci. Adv. 5, eaax9800 (**2019**).

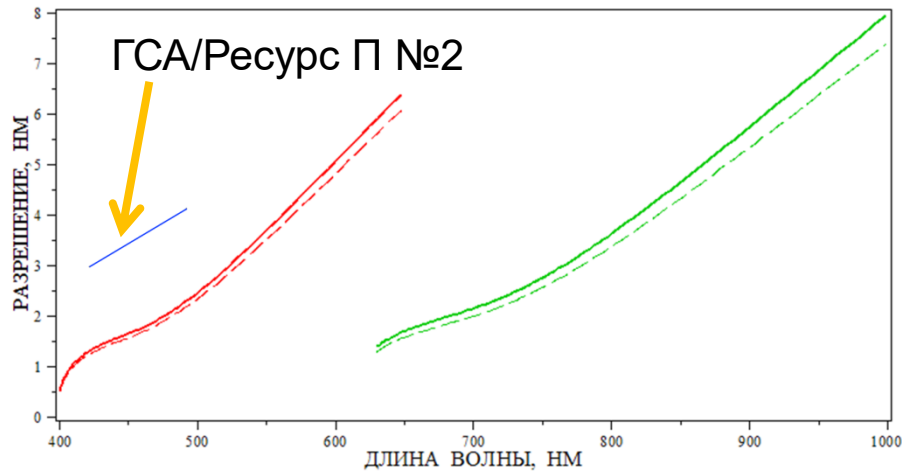


Плотность эмиссий NO_x, мкг м⁻² с⁻¹ по данным за 12.2017-10.2018

Не применимо, т.к. в методе:

- Масштаб десятки км
- Область перехода NO в NO₂ не важна
- Необходим год наблюдений
- Меньший шум единичного измерения
- Более тонкая сетка
- Постоянный ветер

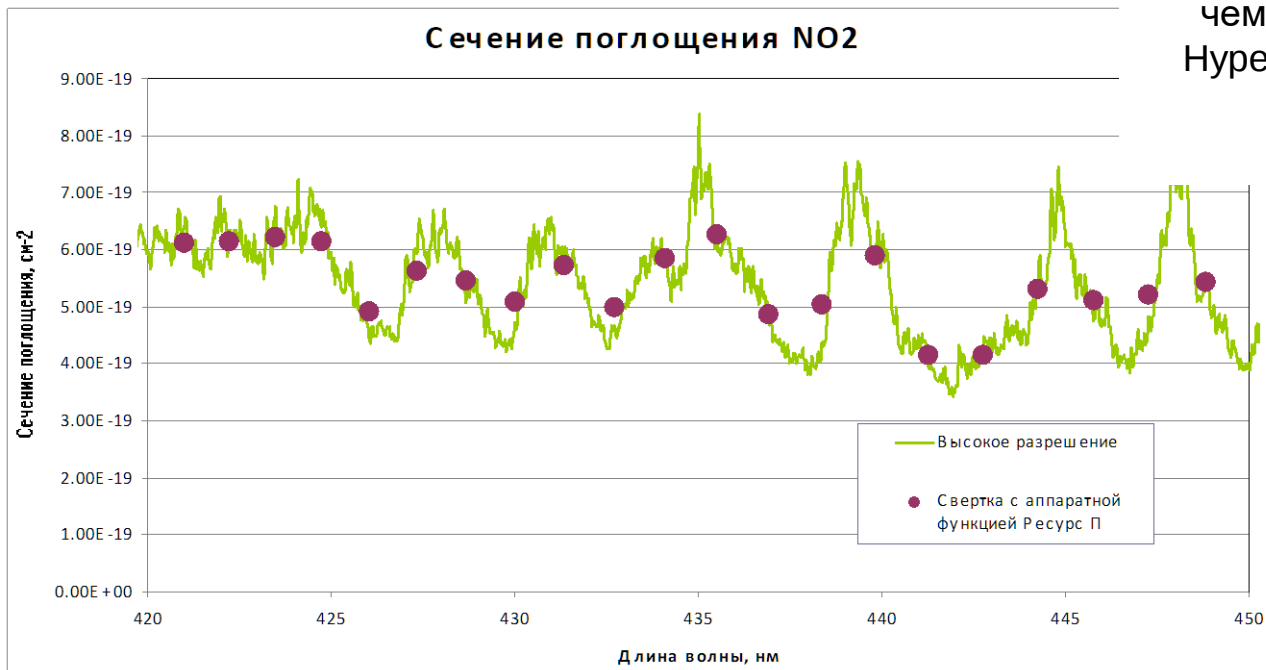
Спектральное разрешение ГСА/Ресурс-П



Хуже характеристики, чем у аппаратуры, ориентированной на исследование атмосферы:

- 1) Атмосферо-ориентированная аппаратура имеет разрешение лучше 1 нм во всем диапазоне;
- 2) Более широкий спектральный диапазон (ещё и ИК)

Конкурентное преимущество: более высокое спектральное разрешение, чем у природо-ресурсного прибора Nuregion (10 нм) при разрешении по ТЗ – 10 нм.



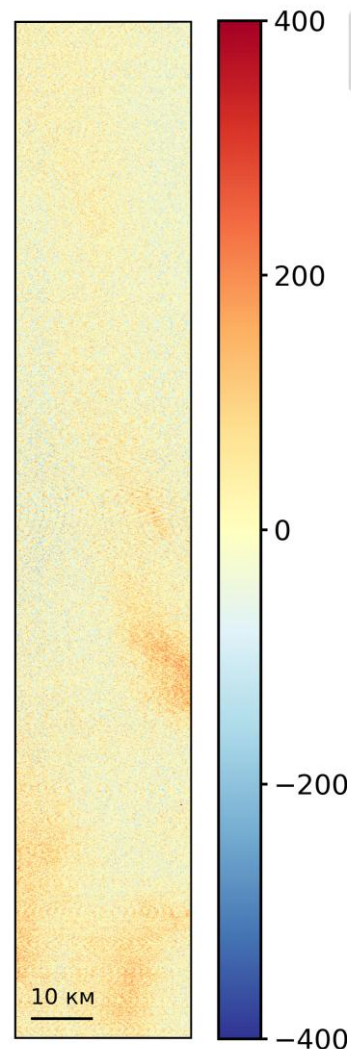
Результаты восстановления NO₂ по данным ГСА

Измерение Ресурс П №2
Сентябрь 29, 2016, 4:30UTC

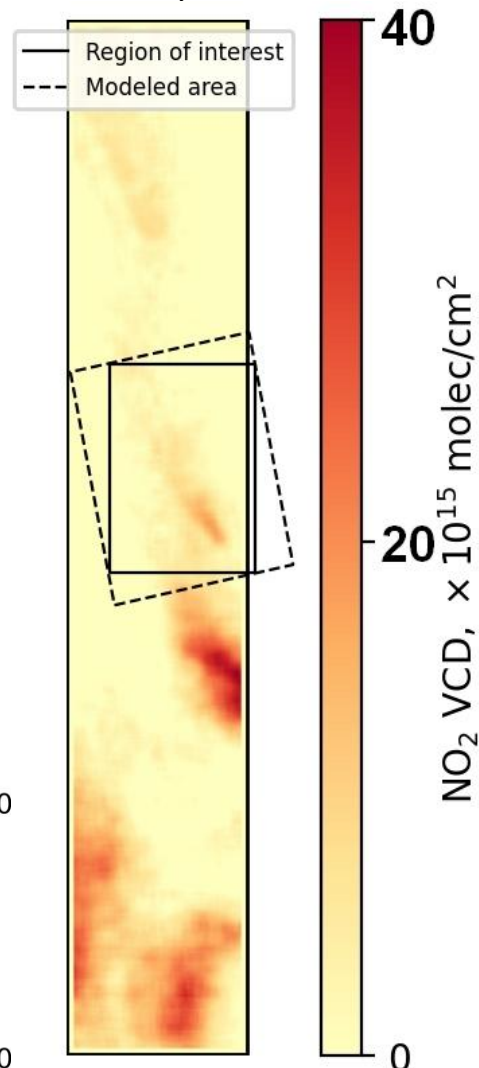


O.V. Postilyakov, A.N. Borovski, A.A. Makarenkov. First experiment on retrieval of tropospheric NO₂ over polluted areas with 2.4-km spatial resolution basing on satellite spectral measurements. Proc. SPIE, **2017**, Vol. 10466, 104662Y-8; doi: 10.1117/12.2285794.

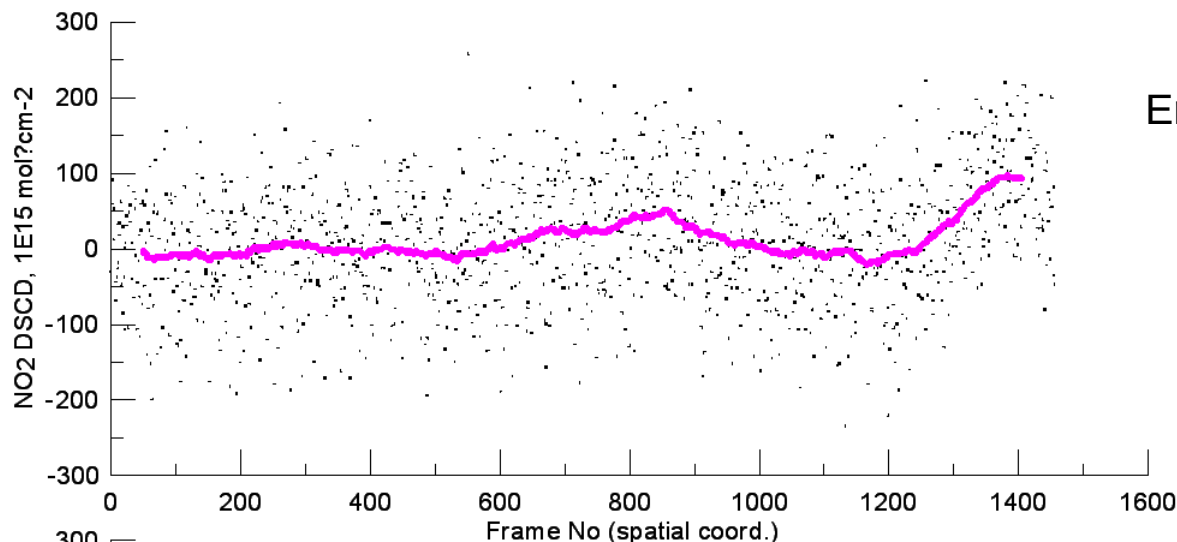
NO₂ DSCD, разрешение 120 m



VCD, разрешение 2.4 km, сетка 120 m



Результаты восстановления NO₂ по данным ГСА



Error of single DSCD measurement
(120x120m):

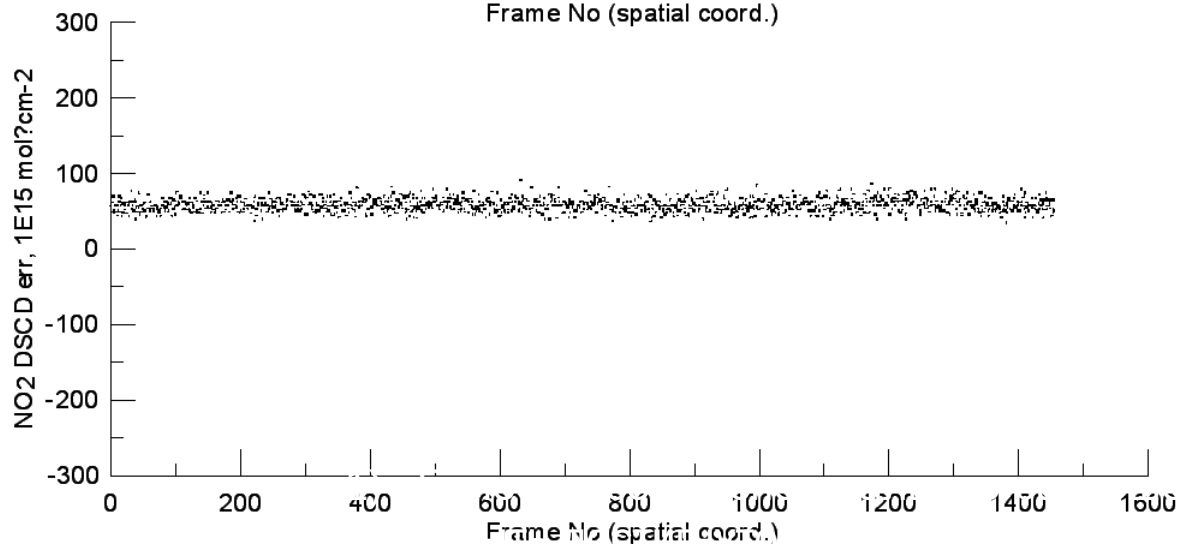
$50 \cdot 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$

Error for DSCD for averaged 400
pixels (2.4x2.4 km):

$2.5 \cdot 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$

**Error for VCD for averaged 400
pixels (2.4x2.4 km):**

**$(0.7-1.0) \cdot 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$
(for typical AMF=2.5-3.5)**



Typical stratospheric VCD:

$3 \dots 5 \cdot 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$

Tropospheric VCD:

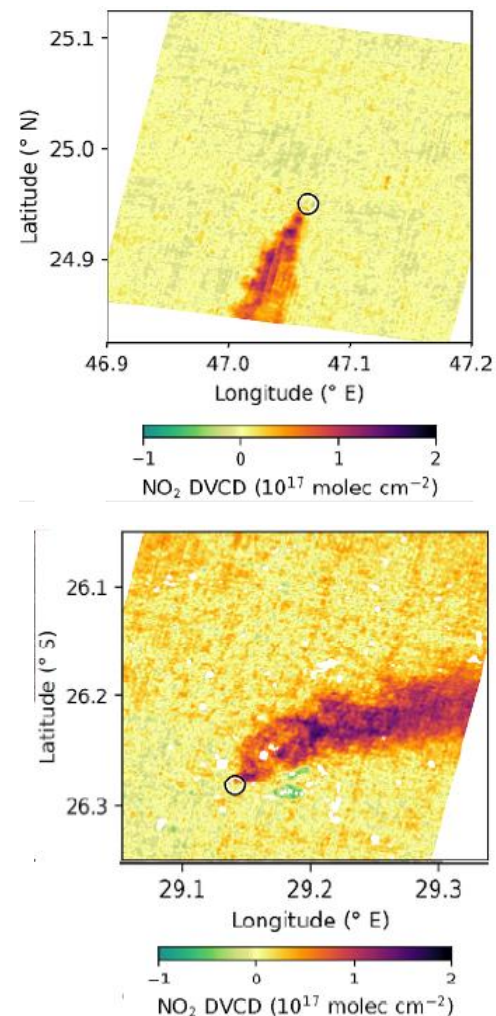
$0 \dots 20 \dots 50 \dots \cdot 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$

Аналогичная публикация 2025 года

Приборы, предназначенные для исследования поверхности

Характеристика	ГСА/Ресурс-П №2	EnMAP
Дата измерений	2016	2023
Спектральное разрешение	3-4 нм	6.5 нм
Сигнал/Шум	100-650	400-500
Полоса захвата	30 км	30 км
Размер пикселя	120 м	30 м
Попиксельный шум	$50 \cdot 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$	$90 \cdot 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$

C. Borger *et al* High-resolution observations of NO₂ and CO₂ emission plumes from EnMAP satellite measurements, **March 2025**, *Environ. Res. Lett.* 20 044034, DOI 10.1088/1748-9326/adc0b1

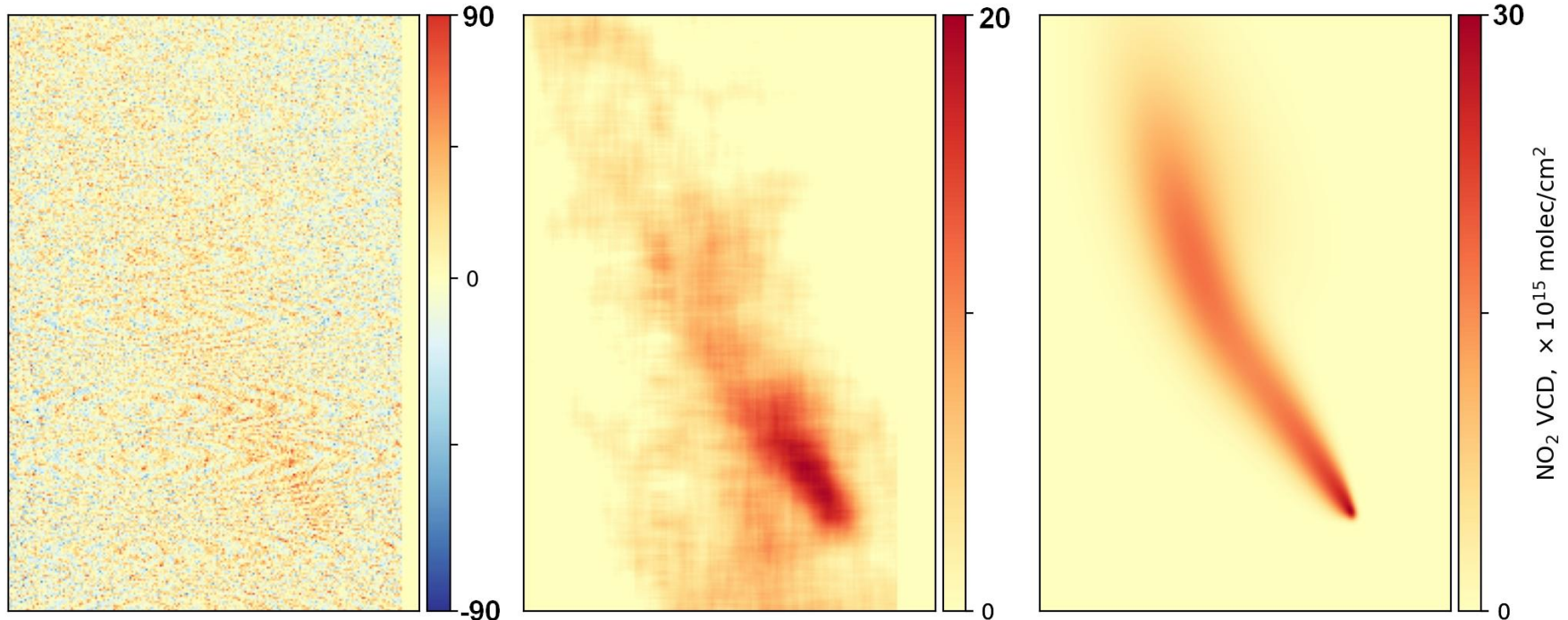


Линейная модель формирования шлейфа

Satellite image $\xi(x, y)$

Averaged 20x20 image

Model plume $a(x, y)$
источник 1.1×10^{24} молек с^{-1}



$$\xi(x, y) = \int_{X'} a(x - x', y - y') f(x', y') dx' dy' + v(x, y)$$

$f(x', y')$ - плотность распределения мощности стационарных источников NO_2

Восстановление с использованием линейного алгоритма

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

Из-за большой размерности задачи используем возможность работать с фурье-образами функций. Здесь оператор представляется диагональной матрицей

Предполагаем, что $\mathbf{E} v(x, y) = 0$ и $\mathbf{E} v^2(x, y) = \sigma^2$

Качество оценки контролируем двумя параметрами:

операторной невязкой $g(\tilde{r}) = \sum (\tilde{r}(\omega) \tilde{a}(\omega) - 1)^2$

и дисперсией шума $h(\tilde{r}) = \mathbf{E} \sum_{\omega} (\tilde{r}(\omega) \tilde{v}(\omega))^2 = \sigma^2 \sum_{\omega} (\tilde{r}(\omega))^2$

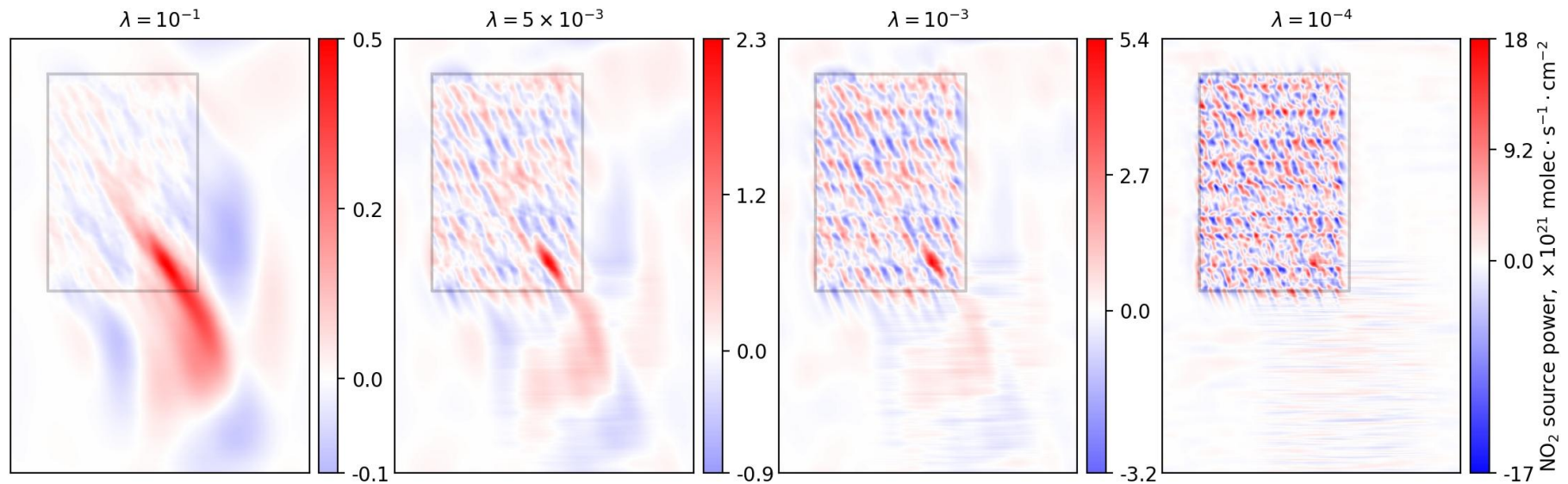
Ставим задачу как задачу на минимум при ограничении:

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

Её решением будет

$$\hat{\tilde{f}}(\omega) = \hat{\tilde{r}}(\omega) \tilde{\xi}(\omega), \quad \hat{\tilde{r}}(\omega) = \frac{\tilde{a}(\omega)}{\tilde{a}^2(\omega) + \lambda_{\varepsilon} \sigma^2}$$

Восстановление с использованием линейного алгоритма



Результаты восстановления распределения источников

для различных λ_ϵ

Улучшение линейной оценки



Как использовать априорную информацию о положительности сигнала?

Можно спроецировать полученную оценку на положительные значения:

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

Восстановление с использованием нелинейного алгоритма

Как использовать априорную информацию о положительности сигнала?

Ставим задачу как задачу на минимум при ограничении:

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

$$\alpha(f') = \int_X \left(\xi(x, y) - a(x - x', y - y') f'(x', y') \right)^2 dx' dy'$$

- это задача квадратичного программирования.

Получаемая зависимость оценки $\tilde{f}(x, y)$ от $\xi(x, y)$ нелинейна.

Решение находится численно итерационным методом проекции градиента:

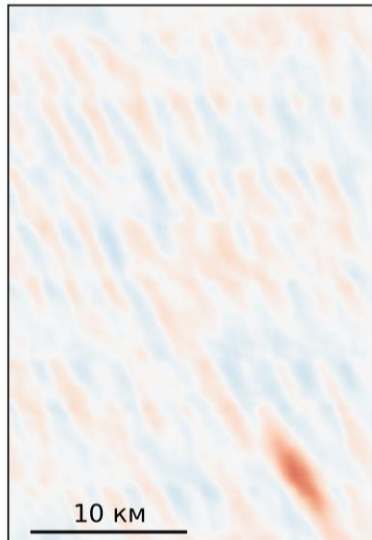
$$f^{n+1} = P_{\Omega}(f^n + \alpha^n d^n),$$

где α^n – длина шага градиентного спуска, d^n – направление спуска, $\Omega = \{f : f(x', y') \geq 0\}$ – неотрицательный ортант.

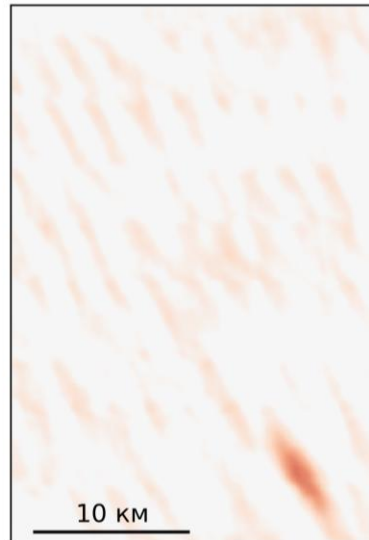
Сравнение алгоритмов

Результаты оценивания плотности распределения источников

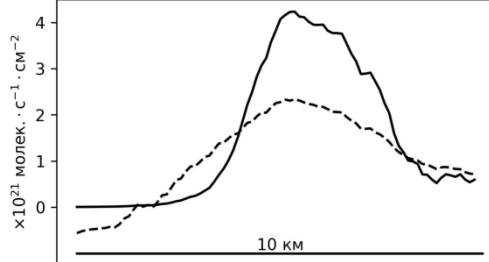
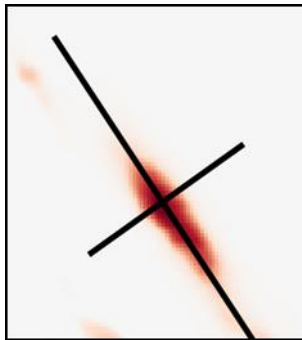
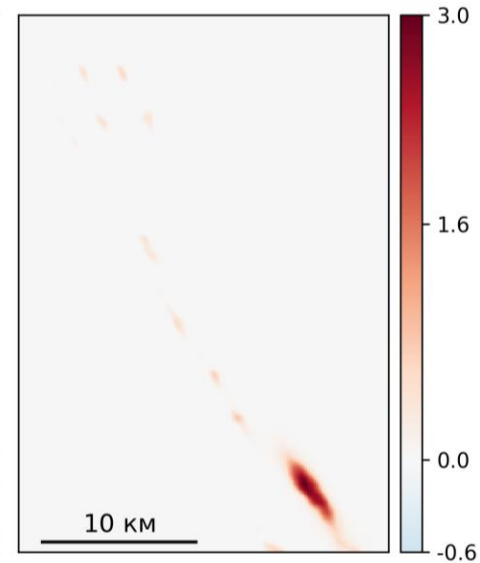
Линейная оценка
 $\lambda_{\varepsilon} = 0.005$



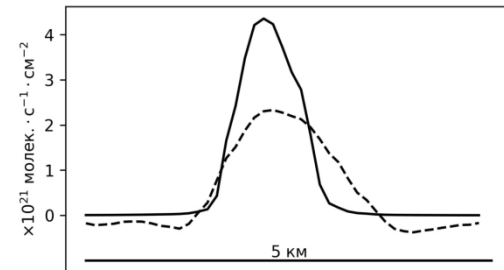
Проекция лин.оценки на
положительные значения



Оценка квадратичного
программирования f^{100}



Сечение по ветру

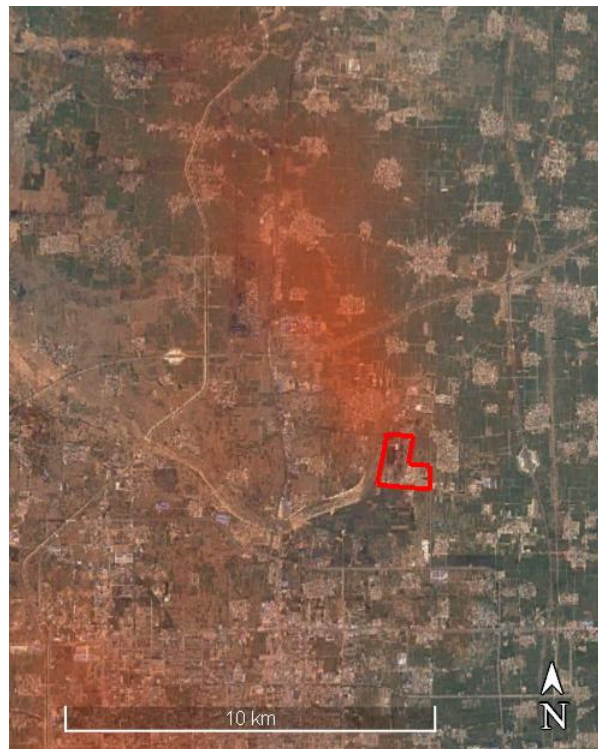


Сечение поперёк ветра

Пунктир – линейный, сплошная - нелинейный метод

Сравнение с видимым положением предприятий

Распределение содержания NO_2 в столбе



Восстановленное распределение источников NO_2



Производство кокса
China Risun Group Limited

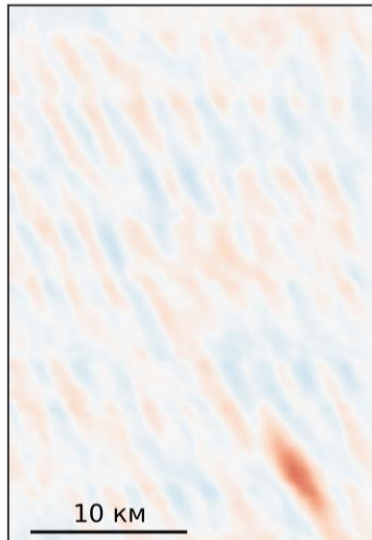


Место, где достигается максимум плотности источников, согласуется с расположением предприятия Xingtai production base компании China Risun Group Limited ($37^{\circ}08'40''114^{\circ}32'20''\text{E}$ (China Risun 2019), которая является крупнейшим в мире независимым производителем кокса (China Risun site).

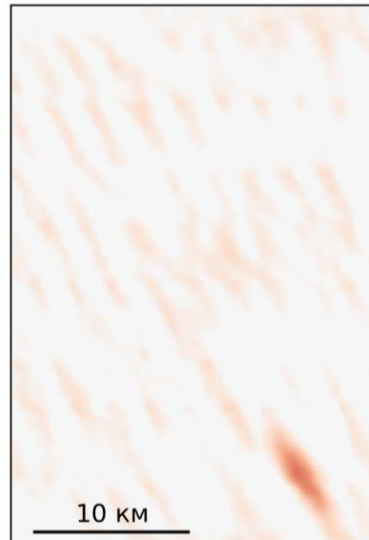
Сравнение алгоритмов

Результаты оценивания мощности источников

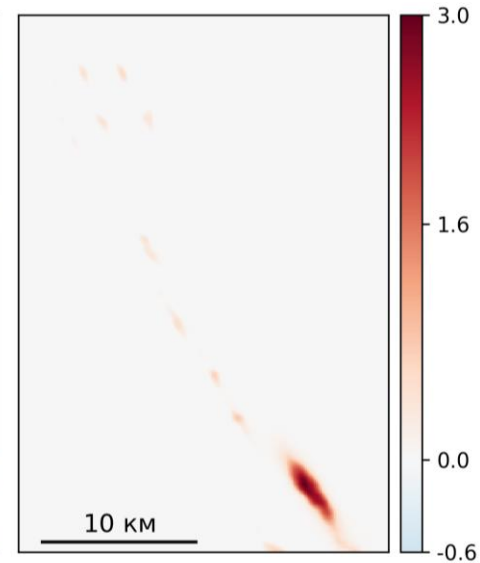
Линейная оценка
 $\lambda_{\varepsilon} = 0.005$



Проекция лин.оценки на
положительные значения



Оценка квадратичного
программирования f^{100}



линейная оценка		нелинейная оценка	
кг NO2/час	т NO2/год	кг NO2/час	т NO2/год
33,78	295,89	37,92	332,14
3,32	29,11	3,09	27,03
1,02	8,91	1,49	13,07
1,39	12,18	1,42	12,48

Заключение

- Рассмотрены три метода построения оценки плотности распределения источников загрязняющих веществ NO₂:
 - метод смещенной линейной оценки,
 - проецирование этой оценки с учетом неотрицательности плотности источников загрязняющих веществ и
 - нелинейный метод квадратичного программирования с учетом неотрицательности плотности.
- Нелинейная оценка метода квадратичного программирования, учитывающая неотрицательность плотности источников, оказалась существенно меньше искажена шумом и дала лучшую локализацию источников.
- Получены оценки мощности выбросов предприятия China Risun Group Limited (37°08'40"114°32'20"E)



Спасибо за внимание!

This work was carried out in the framework of State Assignments of A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences (registration no. 125020501413-6) and state assignments of A.M. Lomonosov Moscow State University.