

Об определении распределения источников двуокиси азота в тропосфере по измерениям КА серии Ресурс-П

Христова А.С.^{1,2*}, Постыляков О.В.^{1**}, Чуличков А.И.^{1,2}, Боровский А.Н.¹,
Мухартова Ю.В.², Макаренков А.А.³

¹ *Институт физики атмосферы РАН, Москва, Россия*

² *МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

³ *Рязанский государственный радиотехнический университет, Рязань, Россия*

*askhristova@gmail.com, **oleg.postylyakov@gmail.com

Ссылка на видео доклада: https://vkvideo.ru/video-227431222_456239864?t=2h44m3s

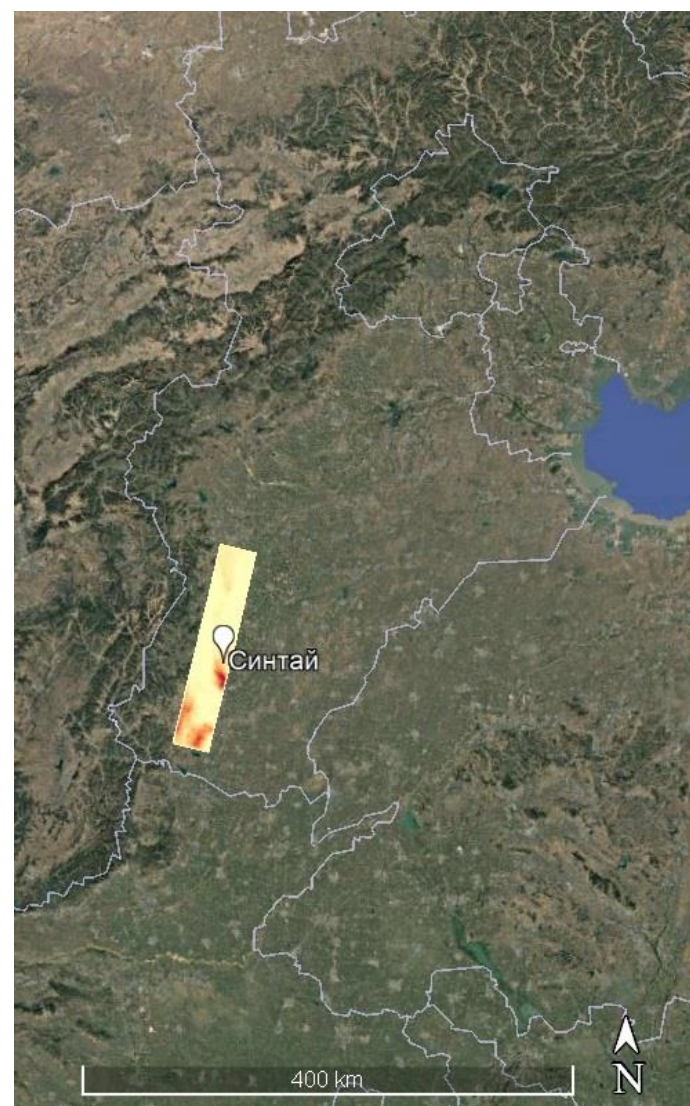
1. Полученные ранее результаты
2. Постановка задачи
3. Рассмотренные методы восстановления:
 - I. Метод смещенной линейной статистической оценки
 - II. Метод квадратичного программирования
4. Результат восстановления реальных данных

Снимок NO_2 высокого разрешения

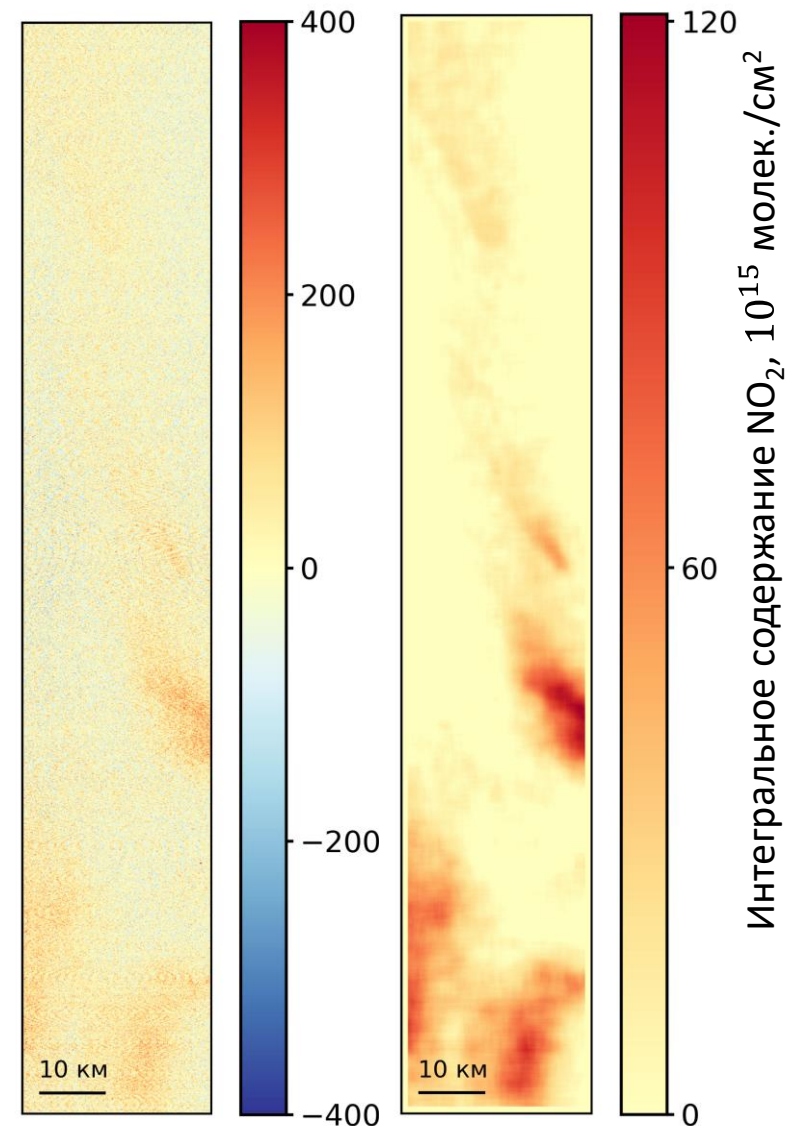
В 2016-2017, используя измерения ГСА «Ресурс-П», был разработан метод определения пространственного распределения интегрального содержания тропосферного NO_2 , с горизонтальным пространственным разрешением до 2.4 км на сетке с шагом 120 м. Это значительно превысило разрешение других доступных спутниковых инструментов, благодаря чему впервые появилась возможность идентифицировать локальные источники загрязнения NO_2 и их шлейфы.

- a) Расположение маршрута в крупном масштабе
- b) Измеренное ГСА/Ресурс-П содержание NO_2 на сетке 120 м
- c) Изображение b, усреднённое медианным фильтром 20x20 пикселей

Данные съемки 29 сентября 2016 года над провинцией Хэбэй, Китай.



a)

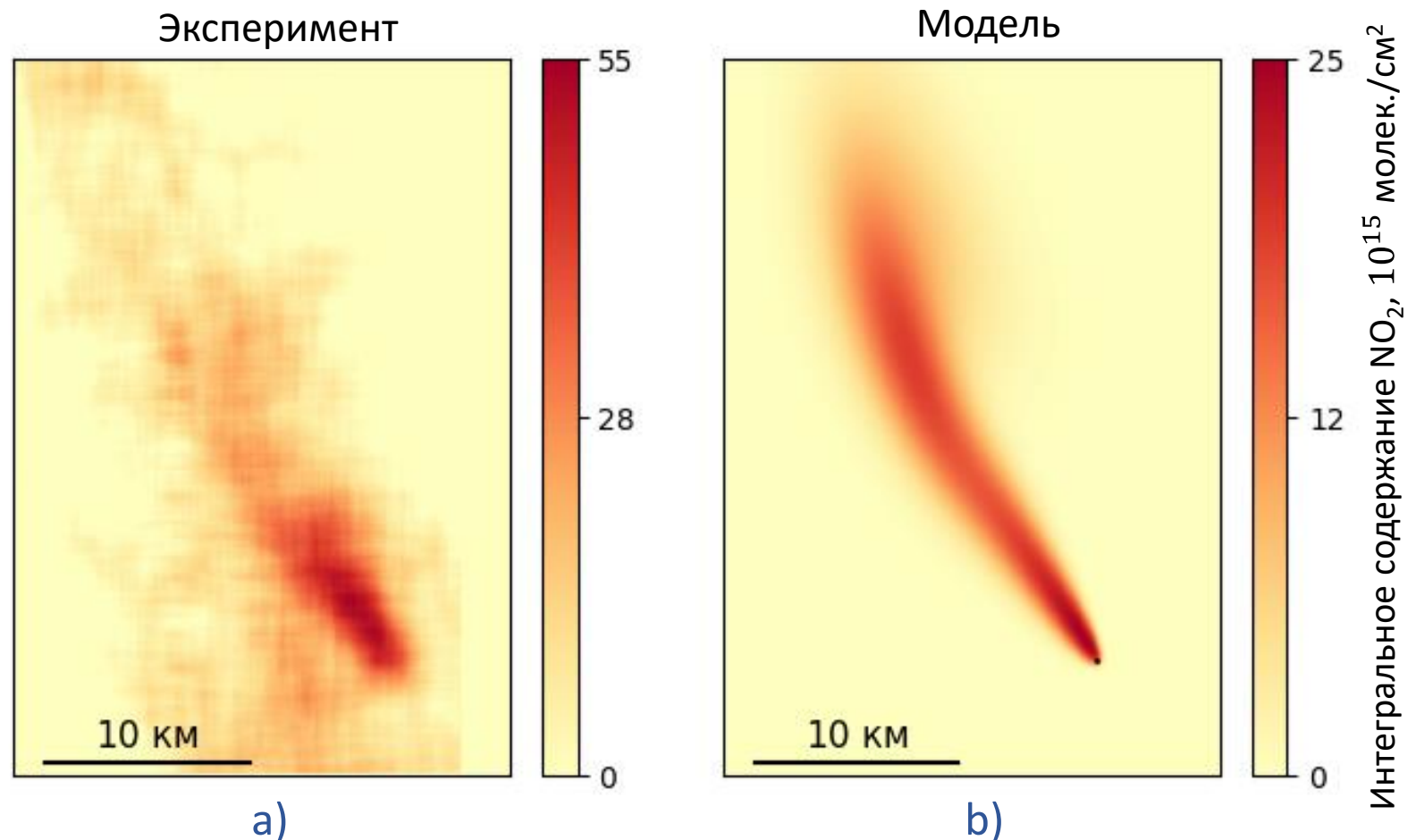


b)

c)

Интегральное содержание NO_2 , 10^{15} молек./ см^2

Для исследования тонких структур, обнаруженных в полях, были разработаны методы химико-транспортного моделирования шлейфов NO_2 . Эти методы, в сочетании с данными космического мониторинга, позволяют моделировать поле тропосферного NO_2 , задав распределение источников.



- a) Шлейф, наблюдаемый в эксперименте (фрагмент спутникового изображения, усредненного медианным фильтром)
- b) Результат моделирования этого шлейфа NO_2 (для заданного точечного источника мощностью 1.1×10^{24} молек./с на высоте 150 м)

Обозначим:

$f(x, y)$ – функция распределения источников NO_2 , которую хотим оценить,

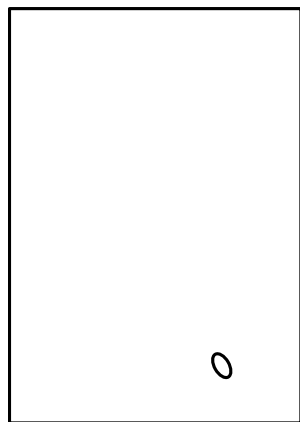
$k(x, y)$ – шлейф NO_2 от стационарного точечного источника, рассчитанный по построенной химико-транспортной модели,

$\xi(x, y)$ – измеренное интегральное содержание NO_2 .

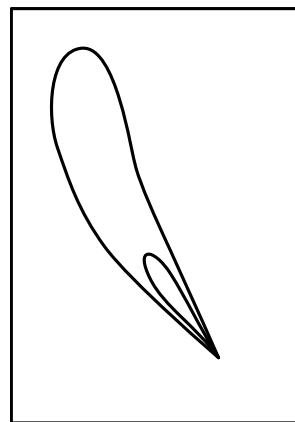
Представим функцию $\xi(x, y)$ измеренного интегрального содержания NO_2 в виде свёртки:

$$\xi(x, y) = k(x, y) * f(x, y) + n(x, y) = \int k(x - x', y - y') f(x', y') dx' dy' + n(x, y),$$

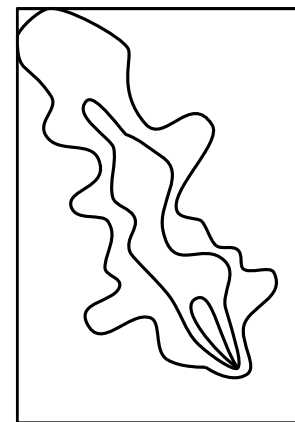
где $n(x, y)$ – шум измерения.



$f(x, y)$



$k(x, y)$



$\xi(x, y)$

Считаем, что

1. Интегральное содержание NO_2 зависит от интенсивности источника практически линейно в диапазоне адекватных значений мощности источника.
2. В рассматриваемой области модель шлейфа точечного источника мало зависит от того, где он расположен.

Также предполагаем, что функции $g(x, y)$, $k(x, y)$, $f(x, y)$ периодически продолжаемы на всю числовую плоскость R^2 . Тогда по теореме о свертке имеем для их образов Фурье

$$\tilde{\xi}(\omega) = \tilde{k}(\omega)\tilde{f}(\omega) + \tilde{n}(\omega).$$

Пусть $n(x, y)$ – независимые случайные величины, $\mathbf{E}n(x, y) = 0$, $\mathbf{E}n^2(x, y) = \sigma^2$.

Будем искать оценку \hat{f} как решение задачи синтеза измерительного прибора на измерительно-вычислительных системах. Представим оценку в виде линейного преобразования редукции:

$$\hat{f}(\omega) = \tilde{r}(\omega)\tilde{\xi}(\omega) = \tilde{f}(\omega) + (\tilde{r}(\omega)\tilde{k}(\omega) - 1)\tilde{f}(\omega) + \tilde{r}(\omega)\tilde{n}(\omega).$$

Ставится задача на минимизацию операторной невязки при ограничении на уровень шума оценивания

$$\inf_{\tilde{r}(\omega)} \left\{ \underbrace{\|\tilde{r}(\omega)\tilde{k}(\omega) - 1\|^2}_{\text{невязка}} \left| \underbrace{\mathbf{E}\|\tilde{r}(\omega)\tilde{n}(\omega)\|^2}_{\text{шум оценивания}} \leq \varepsilon \right. \right\},$$

решением которой является оператор редукции

$$\hat{\tilde{r}}(\omega) = \frac{\tilde{k}^*(\omega)}{|\tilde{k}(\omega)|^2 + \lambda_\varepsilon}.$$

Тогда оценка \hat{f} находится как

$$\hat{f}(\omega) = \hat{\tilde{r}}(\omega)\tilde{\xi}(\omega) = \frac{\tilde{k}^*(\omega)}{|\tilde{k}(\omega)|^2 + \lambda_\varepsilon} \tilde{\xi}(\omega).$$

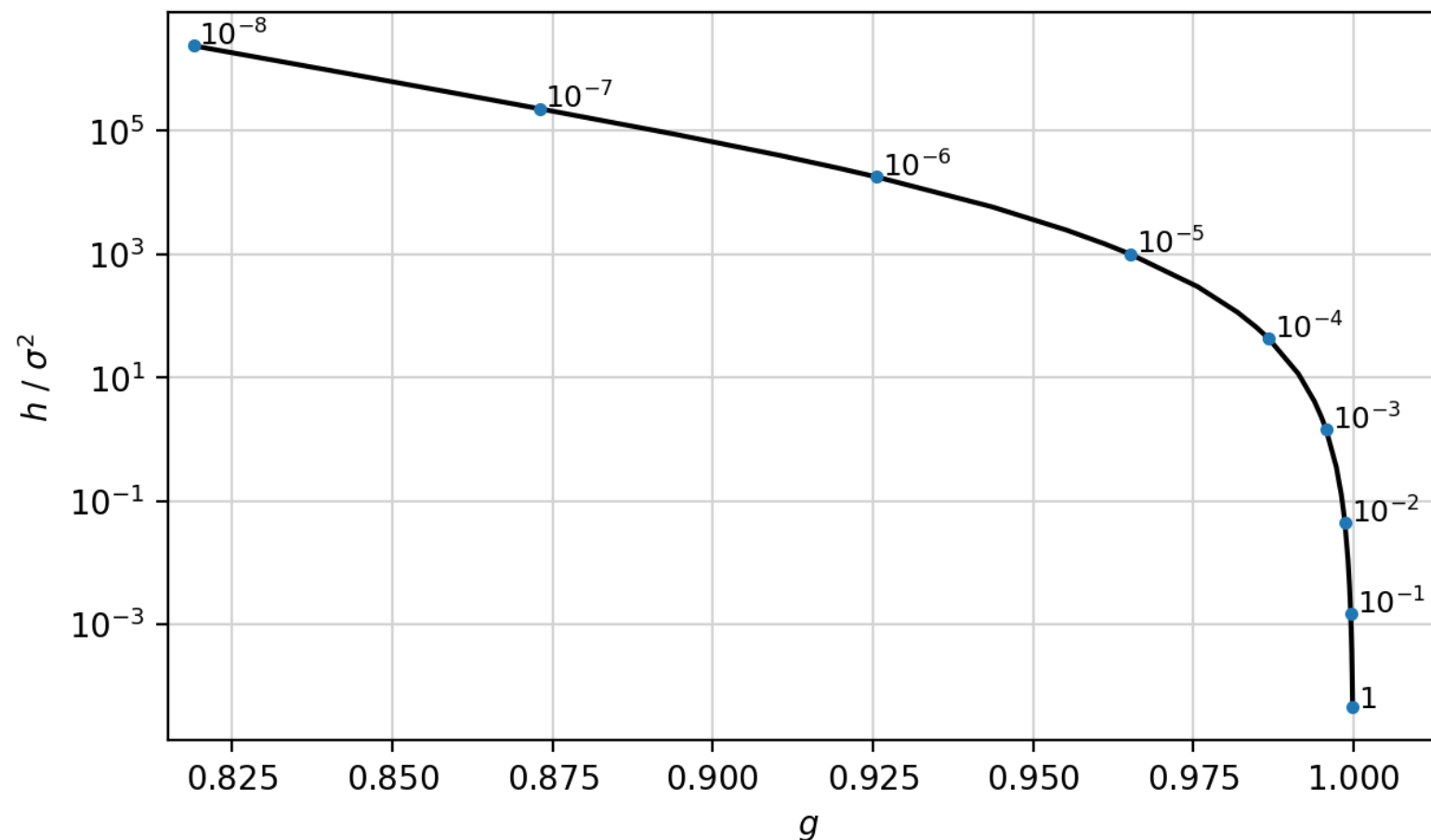
* — комплексное сопряжение

Смещенная линейная статистическая оценка

Таким образом, решение задачи связано с двумя функциями:

Операторная невязка $g(k, \lambda_\varepsilon) = \|\tilde{r}(\omega)\tilde{k}(\omega) - 1\|^2 = \left\| \frac{\lambda_\varepsilon}{|\tilde{k}(\omega)|^2 + \lambda_\varepsilon} \right\|^2$

Шум оценивания $h(k, \lambda_\varepsilon) = \mathbf{E}\|\tilde{r}(\omega)\tilde{n}(\omega)\|^2 = \sigma^2\|\tilde{r}(\omega)\|^2 = \sigma^2 \left\| \frac{\tilde{k}^*(\omega)}{|\tilde{k}(\omega)|^2 + \lambda_\varepsilon} \right\|^2$

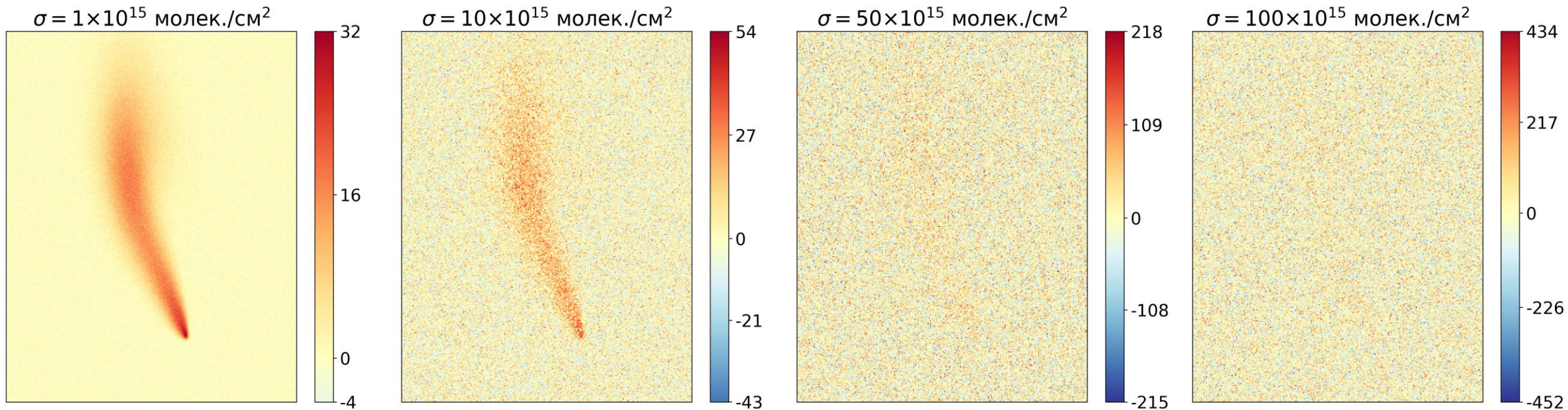


Зависимость $h(g)$ называется *оперативной характеристикой* задачи.

Пример оперативной характеристики задачи СЛСО. Показаны точки, соответствующие различным значениям параметра λ_ε .

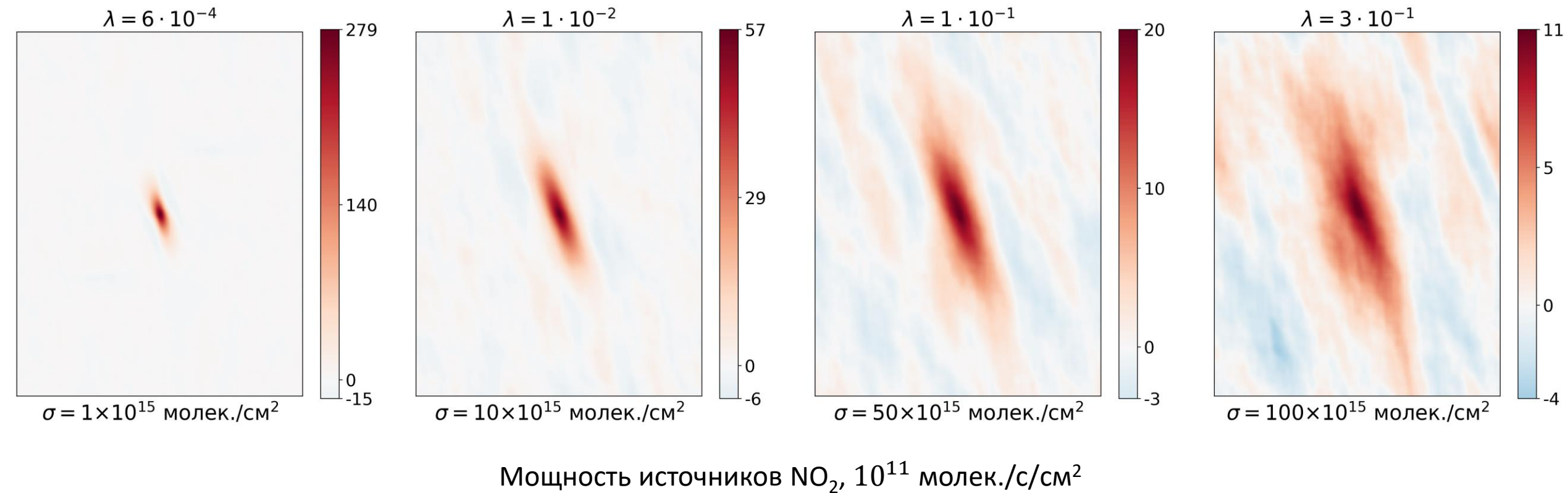
Исследуем метод СЛСО в численном эксперименте:

$$\xi(x, y) = k(x, y) + n(x, y), \quad n(x, y) \in N(0, \sigma^2)$$

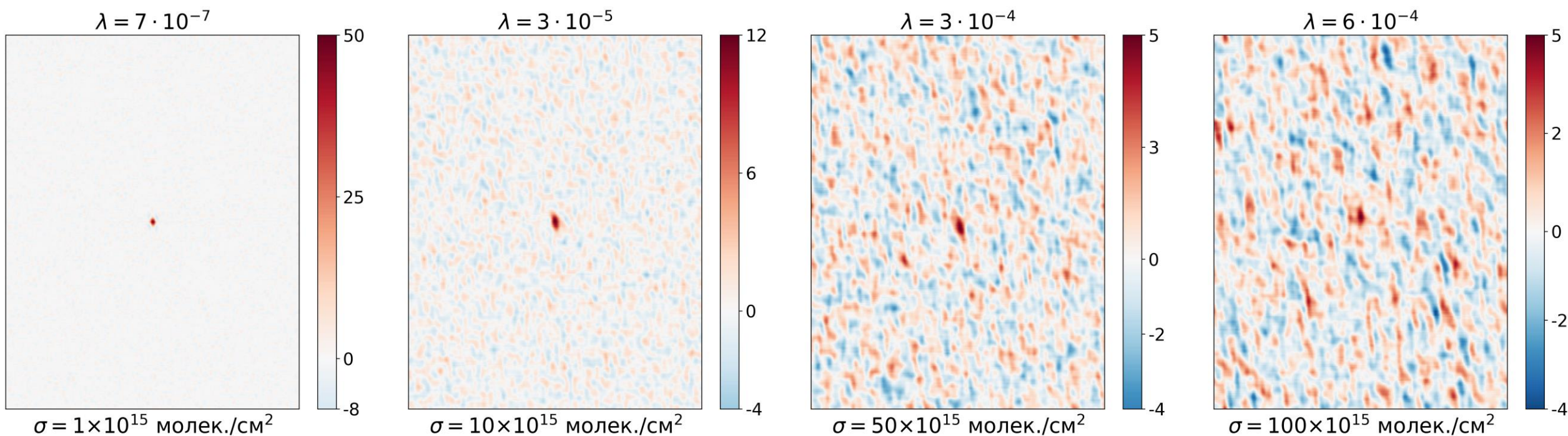


Интегральное содержание NO_2 , 10^{15} молек./см²

Восстановление при постоянном шуме оценивания $h^{1/2} = 10^{11} \frac{\text{молек.}}{\text{с} \cdot \text{см}^2}$. При увеличении дисперсии шума увеличивается операторная невязка (происходит размытие), и уменьшается соотношение сигнал-шум.



Восстановление при постоянном шуме оценивания $h^{1/2} = 10^{13} \frac{\text{молек.}}{\text{с} \cdot \text{см}^2}$. Увеличение шума редукции h приводит к уменьшению операторной невязки g . При больших σ это приводит к тому, что при восстановлении шум интерпретируется как сигнал.



Мощность источников NO_2 , $10^{13} \text{ молек./с/см}^2$

Чтобы учесть неотрицательность восстанавливаемой функции $f(x, y)$, поставим задачу как задачу квадратичного программирования, т.е. как решение задачи минимизации с ограничениями

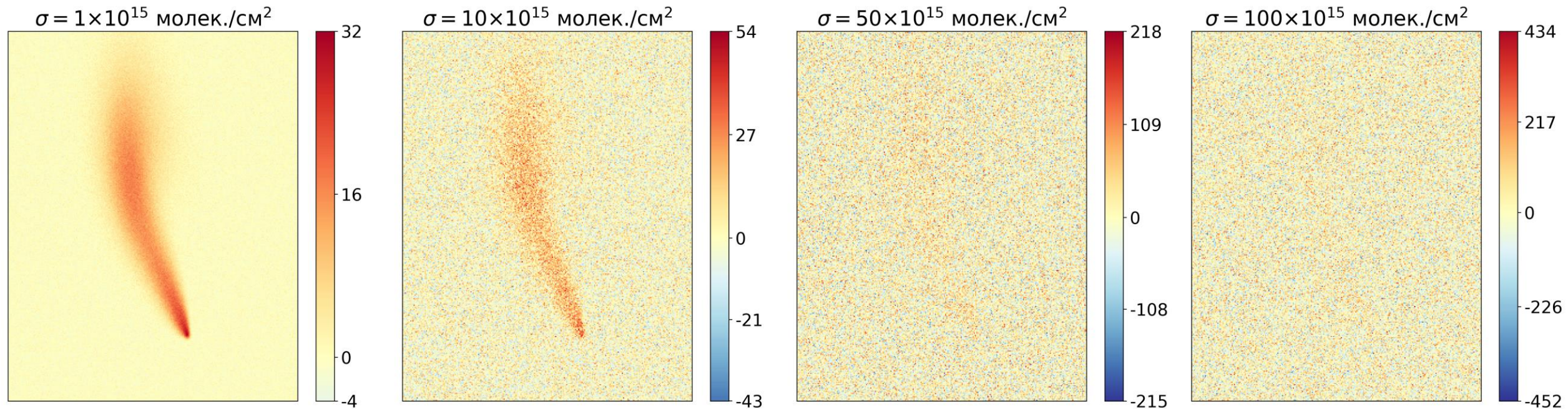
$$\check{f}(x, y) = \arg \inf_f \{ \|\xi - k * f\|^2 \mid f(x, y) \geq 0 \}.$$

Минимизация функционала проводилась методом проекции градиента. В общем виде этот метод представляет собой итерационную процедуру, где на каждом шаге делается шаг против градиента, который затем проецируется в разрешенную область:

$$f^{n+1} = P_+(f^n + \alpha_n d_n)$$

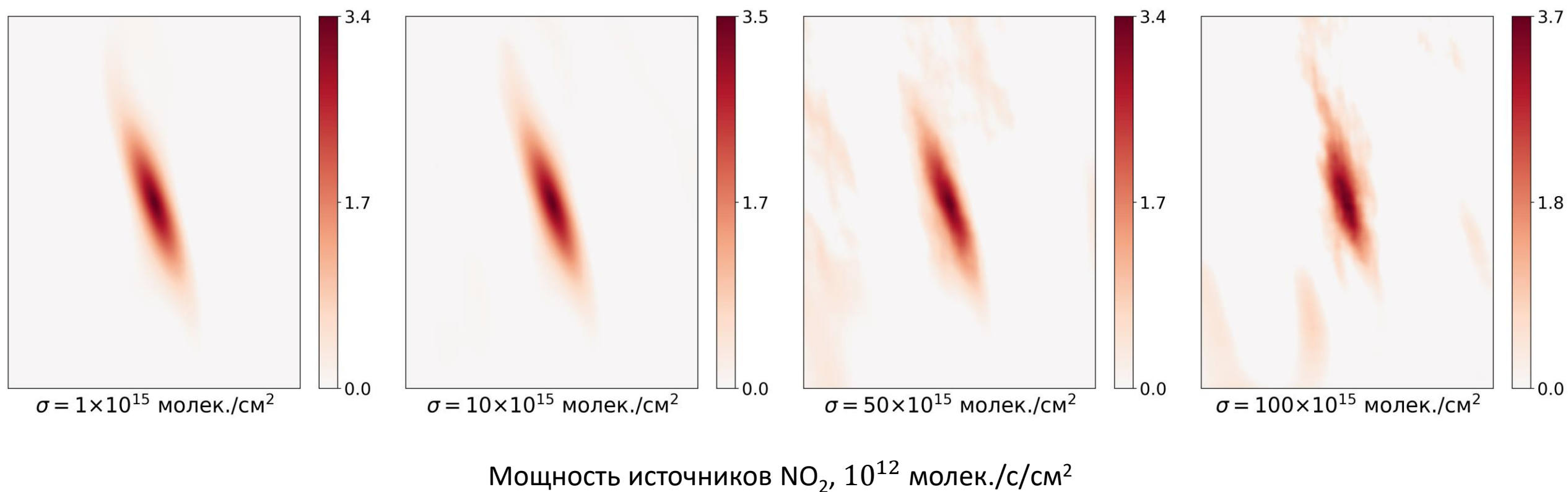
Исследуем метод квадратичного программирования в численном эксперименте:

$$\xi(x, y) = k(x, y) + n(x, y), \quad n(x, y) \in N(0, \sigma^2)$$

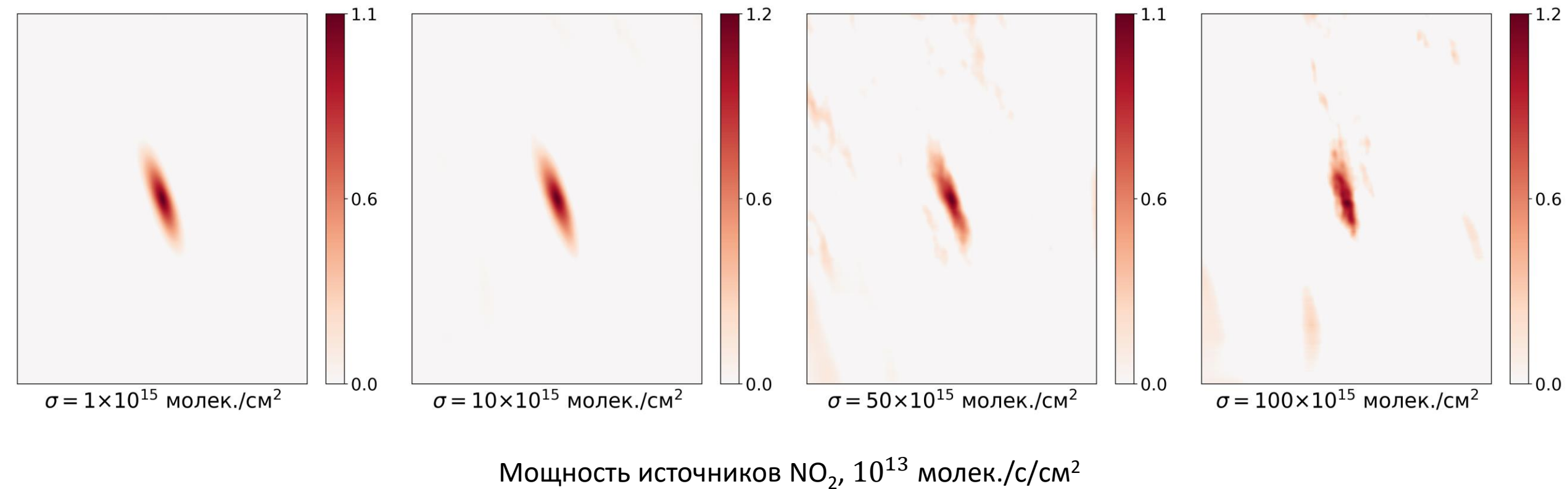


Интегральное содержание NO_2 , 10^{15} молек./см²

Градиентный спуск с нулевым начальным приближением, 10 итераций.

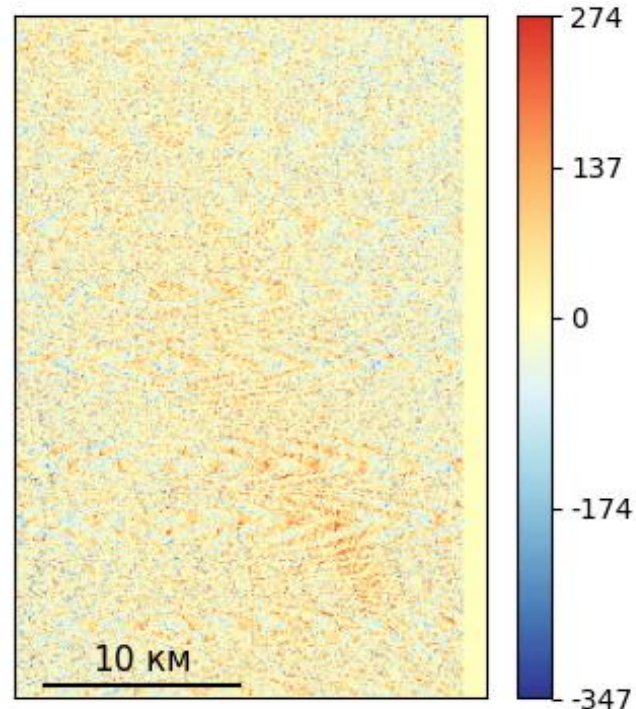
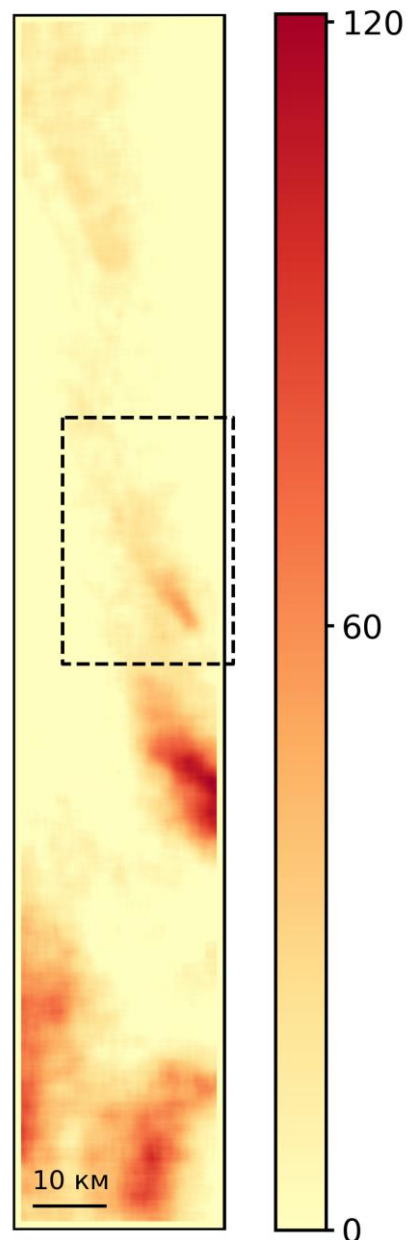


Градиентный спуск с нулевым начальным приближением, 100 итераций.

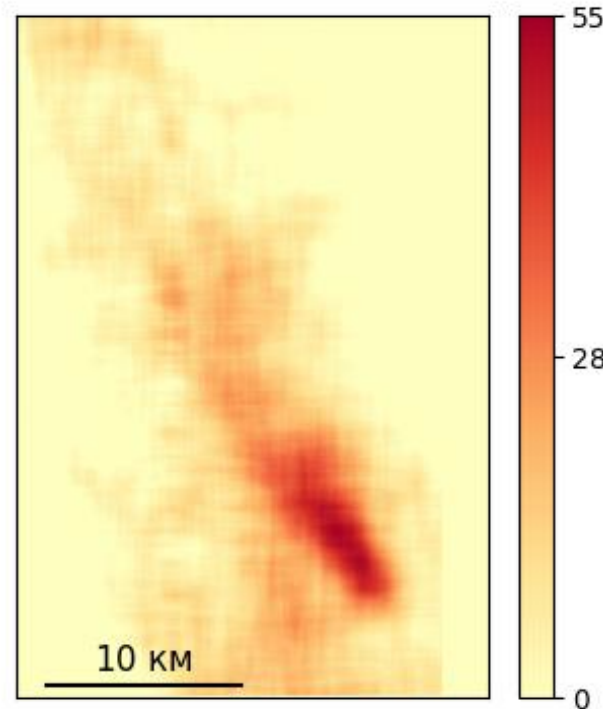


Результат восстановления реальных данных

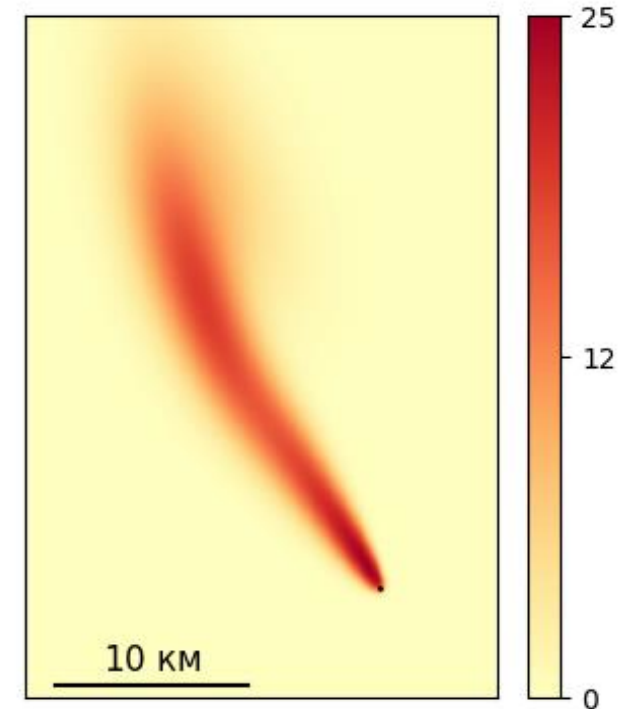
Слева: интегральное содержание NO_2 в тропосфере по маршруту съемки, 10^{15} молек./см². Пунктирной рамкой выделена область шлейфа с точечным источником выбросов.



a)



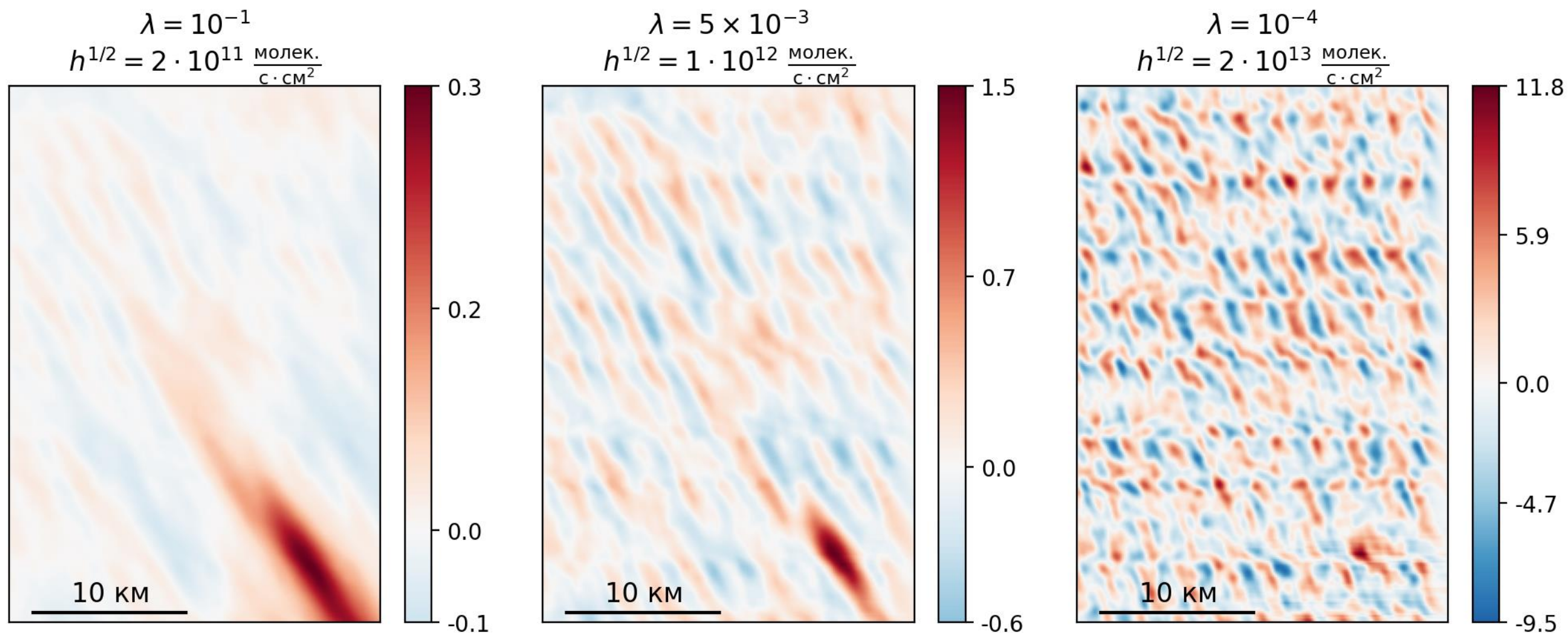
b)



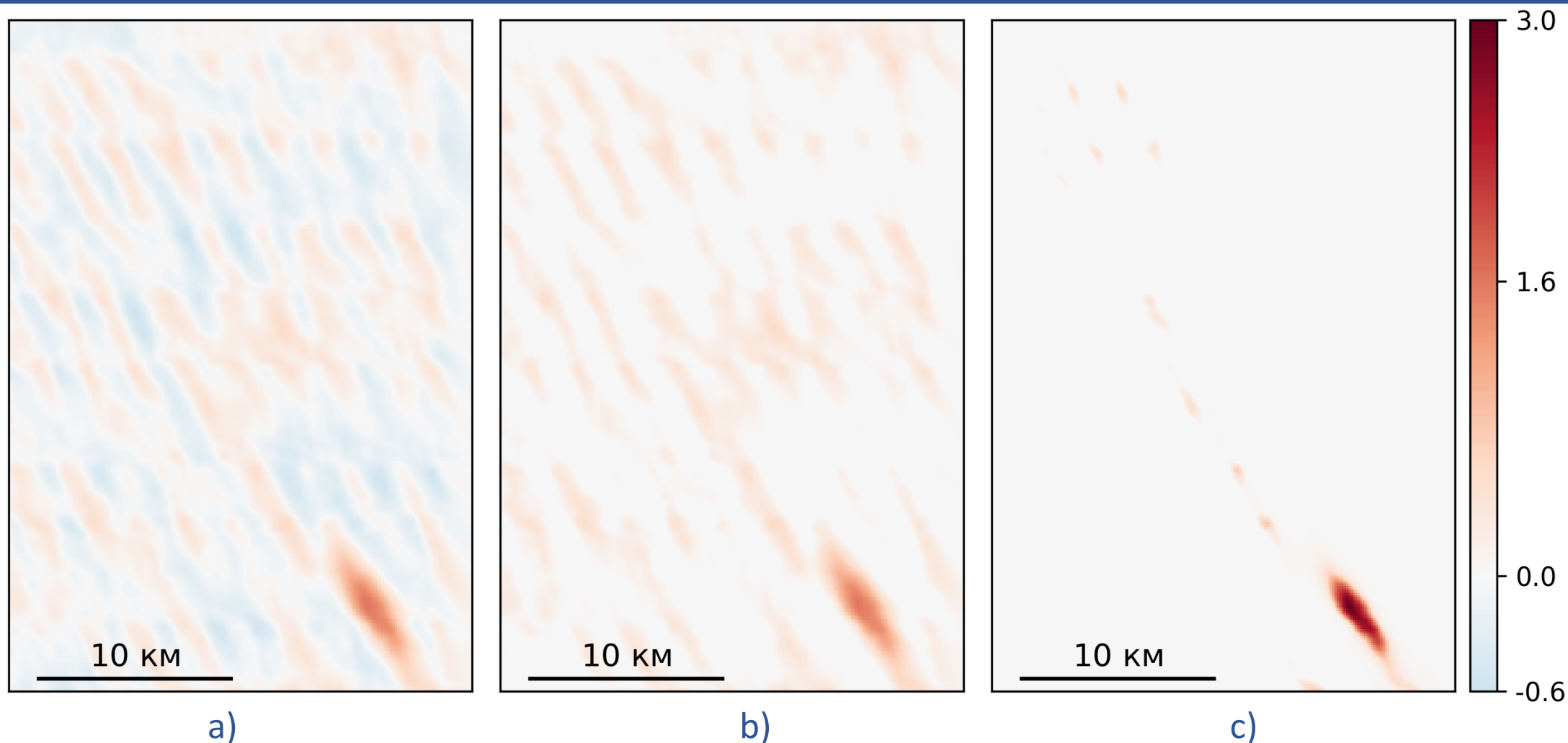
c)

Интегральное содержание NO_2 в области, выделенной рамкой

- a) измеренное ГСА/Ресурс-П содержание на сетке 120 м (значения существенно искажены шумом)
- b) Изображение a, усреднённое медианным фильтром 20x20 пикселей
- c) результат моделирования моделирования шлейфа NO_2 (для точечного источника мощностью $1,1 \times 10^{24}$ молек./с на высоте 150 м)

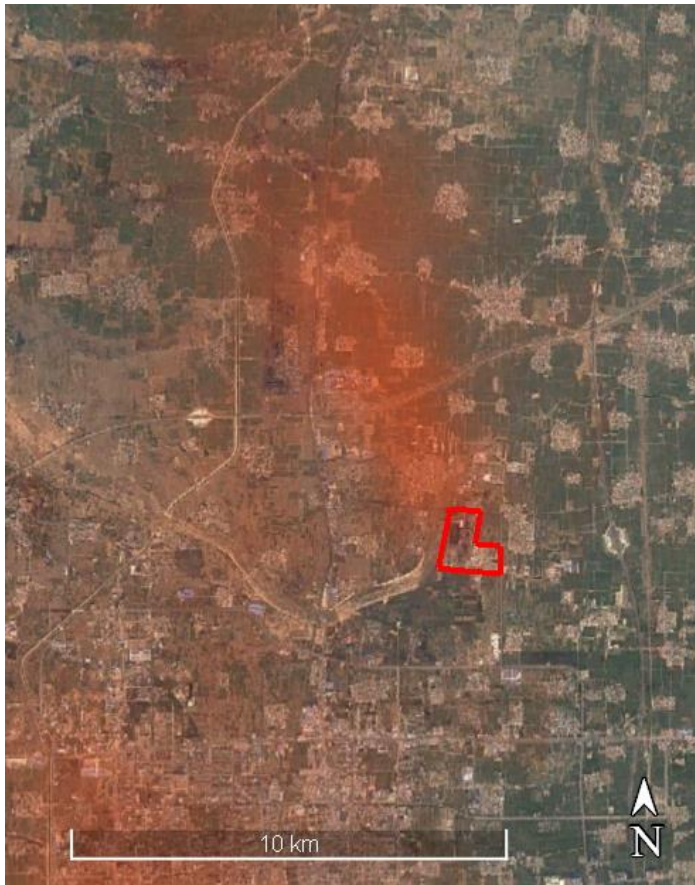


Оценки распределения источников NO_2 методом СЛСО для разных значений параметров λ_ε , $10^{13} \text{ молек./с/см}^2$



Результаты восстановления распределения источников NO_2 , 10^{13} молек./с/см²

- a) методом СЛСО с $\lambda_\varepsilon = 0.005$
- b) методом проецирования оценки СЛСО с $\lambda_\varepsilon = 0.005$
- c) методом квадратичного программирования



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

Предложенные методы позволяют получить оценку функции плотности распределения источников загрязнения, непосредственно из данных, полученных на сетке $120 \times 120 \text{ м}^2$, несмотря на значительный уровень шума в этих исходных данных.

Нелинейный метод квадратичного программирования, который позволил учесть неотрицательность плотности источников NO_2 , дал результат с лучшей локализацией источников и был меньше искажен шумом по сравнению со смещенной линейной оценкой.

Спасибо за внимание!

Ссылка на видео доклада: https://vkvideo.ru/video-227431222_456239864?t=2h44m3s