

Анализ источников загрязнения по различным продуктам, полученным на основе данных прибора TROPOMI

Бриль А.А., Константинова А.М., Лупян Е.А.
Институт Космических Исследований РАН

Двадцать вторая международная конференция «СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА», 11-15 ноября 2024 г., Москва

Обзор спектральных диапазонов и газовых составляющих

Прибор TROPOMI (спутник Sentinel-5P)

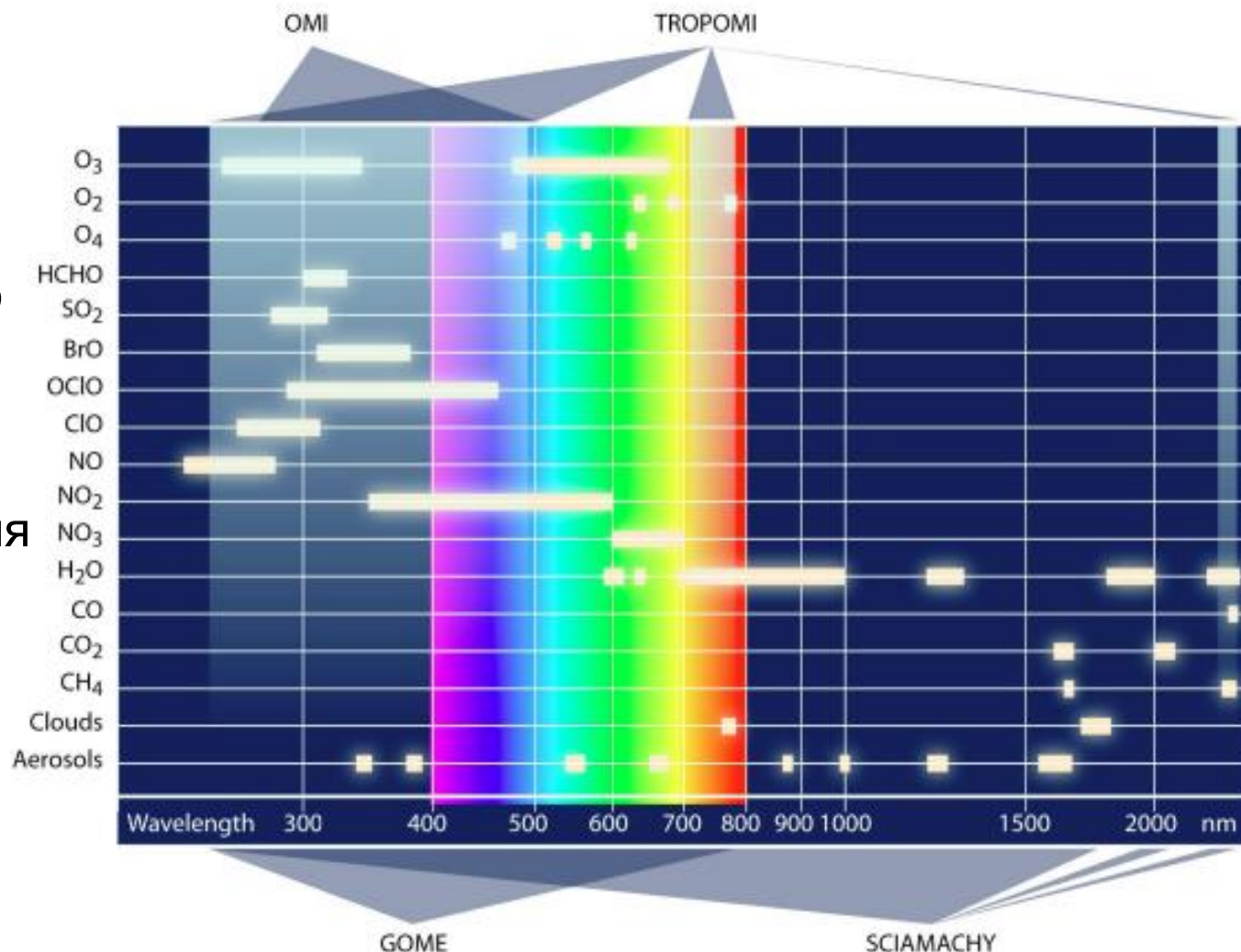
Период работы: октябрь 2017 года, данные доступны с апреля 2018 года – по настоящее время

Полоса наблюдения: 2600 км

Разрешение: 3,5x7 и 3,5x5,5 км

Территория наблюдений: вся территория Земли

Период наблюдения: ежедневно



Белыми полосами отмечены линии поглощения различных газов

Источник: https://www-cdn.eumetsat.int/files/2020-04/pdf_conf_p50_s1_04_devries_p.pdf

Основные продукты, формируемые на основе данных TROPOMI

Название	Продукт
Sulfur dioxide (SO ₂)	Концентрация диоксида серы в полном столбе
Ozone (O ₃)	Концентрация озона в полном столбе
Carbon monoxide (CO)	Концентрация угарного газа в полном столбе
UV Aerosol Index	Аэрозольный индекс состояния атмосферы
Methane (CH ₄)	Концентрация метана в полном столбе
Nitrogen dioxide (NO ₂)	Концентрация диоксида азота в стратосфере, тропосфере и полном столбе

Всю информацию о проекте TROPOMI и доступ к данным можно получить на сайте

<https://www.tropomi.eu/>

Подробную информацию о всех продуктах можно получить по ссылке:

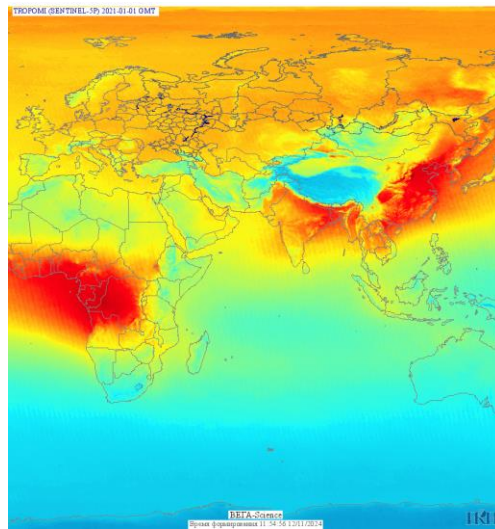
<https://www.tropomi.eu/data-products/>

Композитные изображения на основе TROPOMI

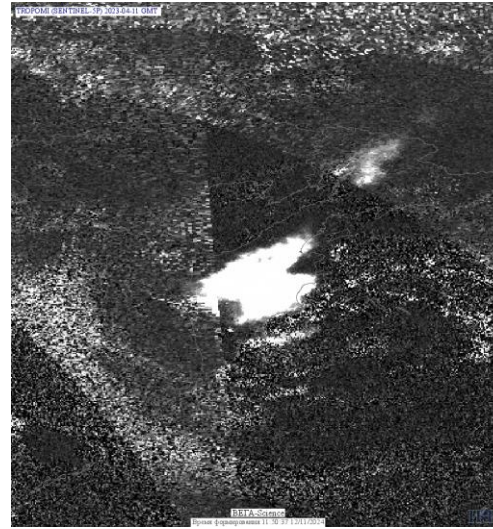
На основе сеансов TROPOMI строятся композитные изображения, доступные в архивах ЦКП «ИКИ-Мониторинг» и в ИС Vega-Science (<http://sci-vega.ru/>).

Временное разрешение: **Статистические параметры:**

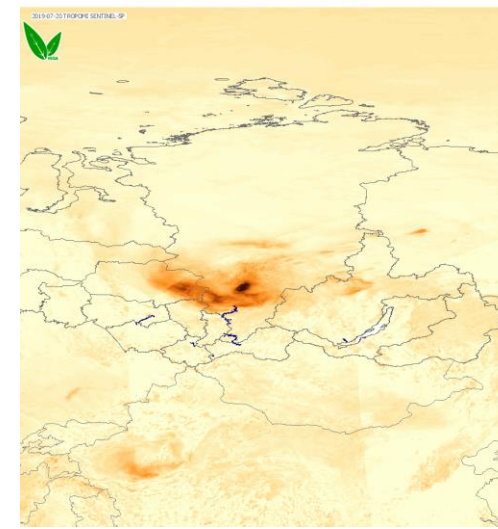
- Ежедневные
 - Еженедельные
 - Ежемесячные
 - Ежегодные
 - Многолетние
- Среднее значение
 - Максимальное значение
 - Минимальное значение



Годовое композитное изображение с концентрацией CO за 2021 год

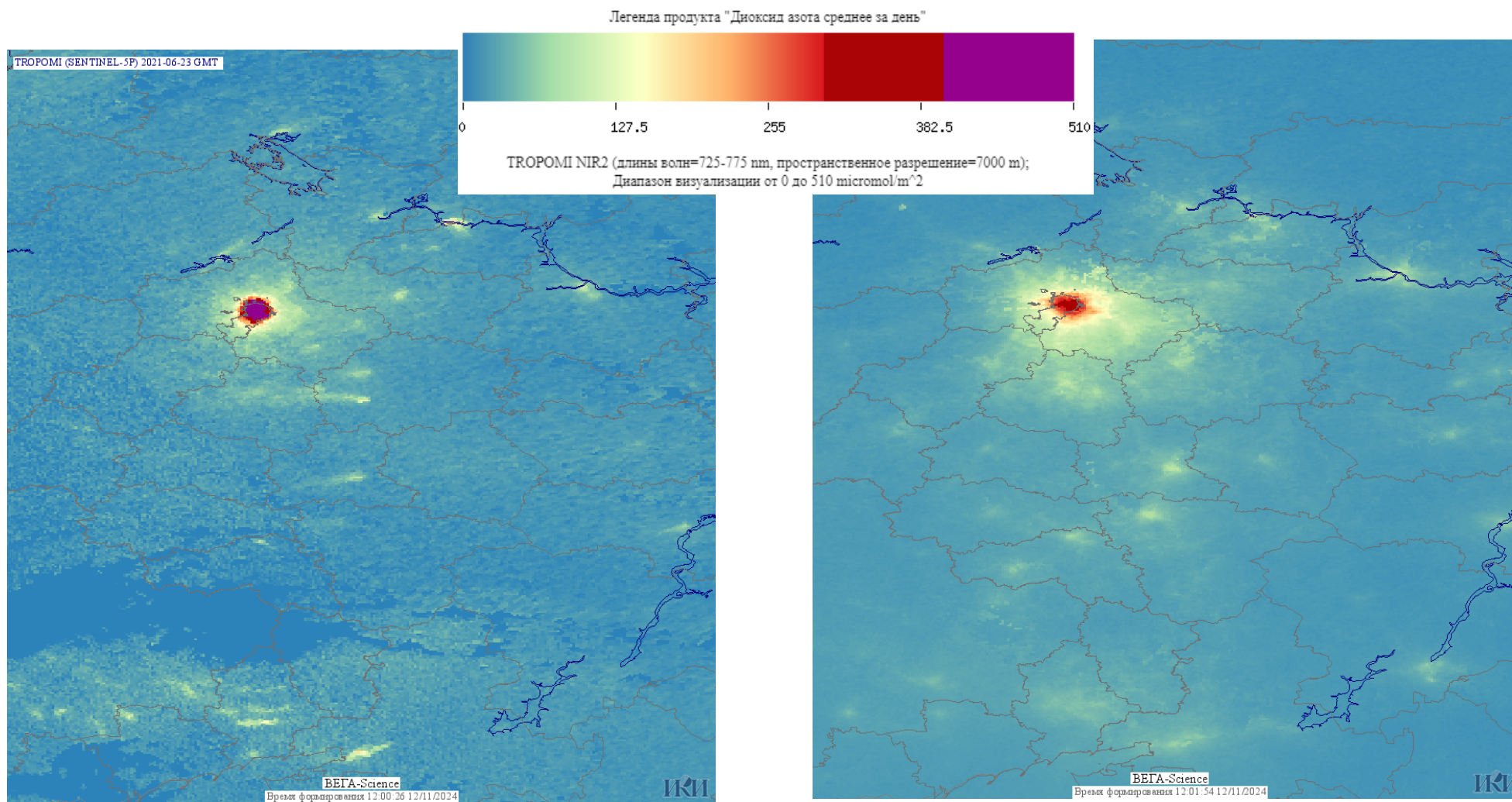


Максимальное значение SO₂ во время извержения вулкана Шивелуч 11 апреля 2024 года



Пожары в Сибири на продукте со средним аэрозольным индексом (конец июля 2019 года)

Примеры композитных изображений



Ежедневное композитное изображение со средней концентрацией NO_2 (Европейская часть России)

Годовое композитное изображение со средней концентрацией NO_2 (Европейская часть России)

Мониторинг диоксида азота

Диоксид азота (NO_2) – одна из газовых составляющих атмосферы Земли, присутствующая как в тропосфере, так и в стратосфере.

Этот газ попадает в атмосферу в результате антропогенной деятельности, в частности в результате сжигания топлива и биомассы, а также природных процессов, таких как лесные пожары, молнии и т.п.

Основные источники поступления в атмосферу в городах:

- автотранспорт
- теплоэнергетика
- предприятия нефтехимической отрасли



Диоксид азота имеет достаточно ограниченное время жизни. По разным данным в различных условиях оно может быть от 2 до 7 часов (см. S. Beirle, K. F. Boersma, U. Platt, M. G. Lawrence, T. Wagner *Megacity Emissions and Lifetimes of Nitrogen Oxides Probed from Space* // SCIENCE VOL 333 1737-1739)

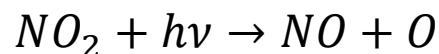
Таблица 1. Оценки глобальной эмиссии NO_x в атмосферу (миллионы тонн азота в год)

Источники эмиссии	Литература			
	(Seinfeld, Pandis, 2006; Vallero, 2014)	(Кондратьев, Донченко, 1999; Кондратьев и др., 1996)		(Мониторинг..., 1987)
		среднее	диапазон	
Антропогенные				
Сжигание ископаемого топлива	33	22,4	15–25	–
Сжигание биомассы	7,1	10,0	2–20	–
Самолётные выбросы	0,7	0,23	0,1–0,7	–
Лесные пожары	–	0,2	0,1–0,8	–
Природные				
Почвенные процессы	5,6	5,0	1–20	5–8
Окисление аммиака				3–5
Молниевые разряды	3,0	10	2–100	6–8
Образование в стратосфере	менее 0,5	1,0	0,5-1,5	0,3–0,5
Поступление из океана	–	–	–	0–0,5
Всего антропогенные	40,8	32,8	17,2–46,5	–
Всего природные	9,1	16	3,5–121,5	14,3–22
Сумма	50	48,8	20,7–168	–

Источник: Тронин А. А., Киселёв А. В., Крицук С. Г. Многолетние тренды содержания диоксида азота в воздушном бассейне России по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 259–265.

1. Фотохимические реакции:

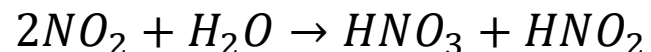
NO_2 также участвует в фотохимических реакциях, которые происходят под воздействием солнечного света. В этих условиях он может способствовать образованию озона на уровне земли, что является частью процесса формирования смога:



Здесь $h\nu$ обозначает фотон света. Атомарный кислород затем может реагировать с молекулами кислорода (O_2), образуя озон (O_3), являющийся **парниковым газом**.

2. Реакция с водой:

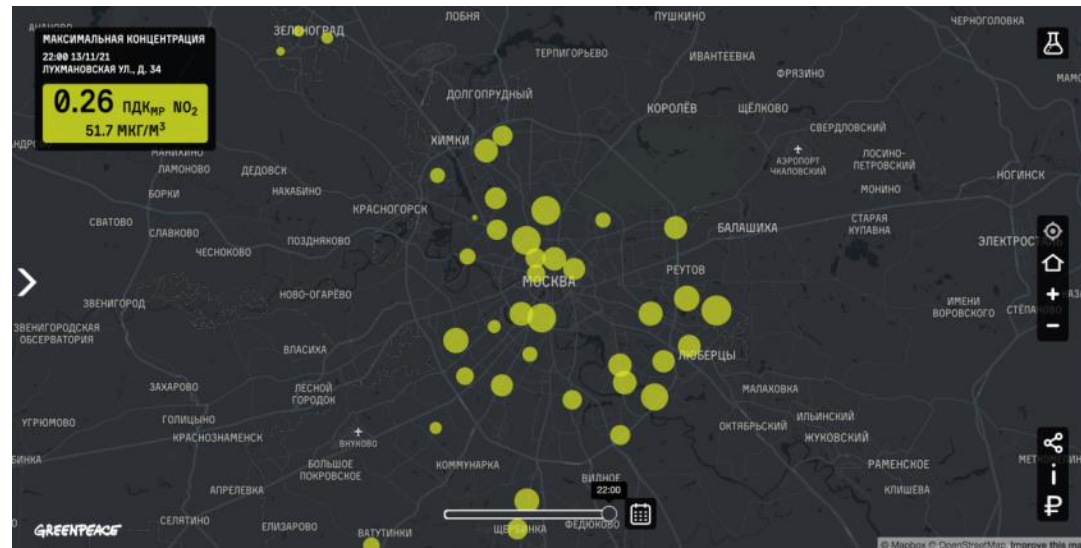
Влажность воздуха способствует образованию кислот. NO_2 может реагировать с водяными парами, образуя азотную (HNO_3) и азотистую (HNO_2) кислоты:



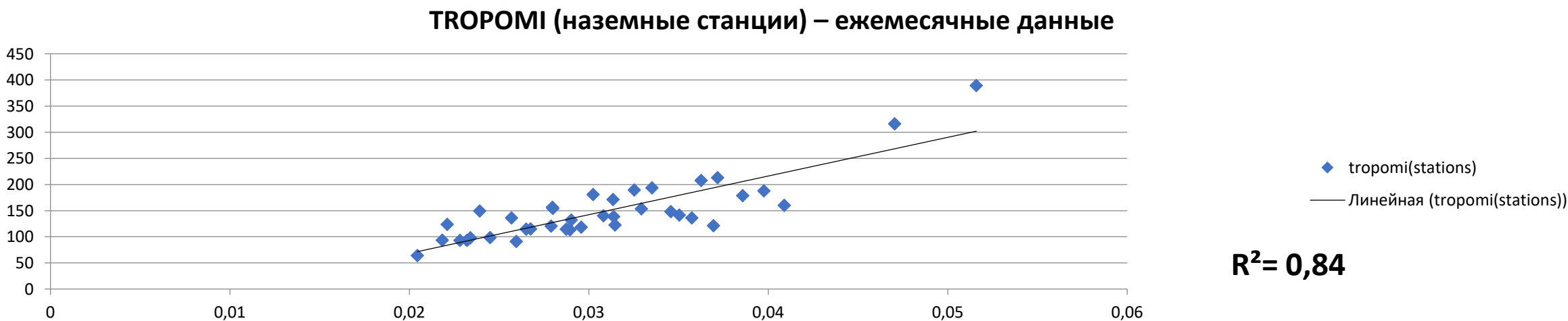
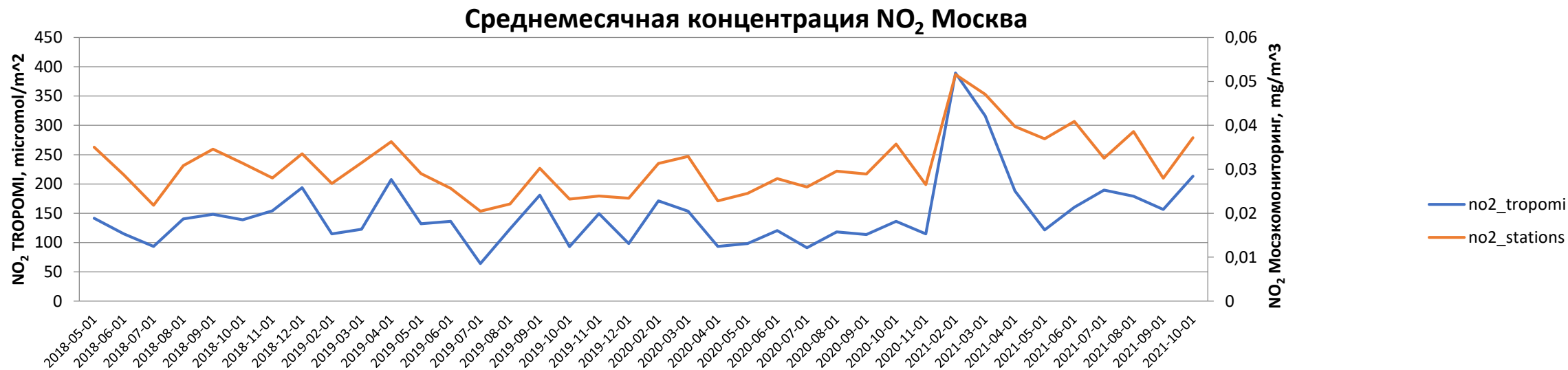
Эти кислоты могут затем оседать на землю в виде кислотного дождя, что приводит к дополнительному экологическому ущербу.

Сравнение данных TROPOMI с наземными данными

Для проведения независимой оценки достоверности концентраций диоксида азота, полученных с помощью TROPOMI, были взяты данные автоматических измерительных станций «Мосэкомониторинга» (<https://mosecom.mos.ru/>), используемые для интерактивной карты «Чем дышит Москва». Сравнивались ежедневные, еженедельные и ежемесячные данные TROPOMI, усредненные по территории Москвы с усредненными данными по **53** измерительным станциям, расположенных в разных районах Москвы: вблизи автомагистралей, жилых районов и природных зон.



Сравнение данных, получаемых на основе наблюдений TROPOMI, с данными наземных измерений (среднемесячные наблюдения)



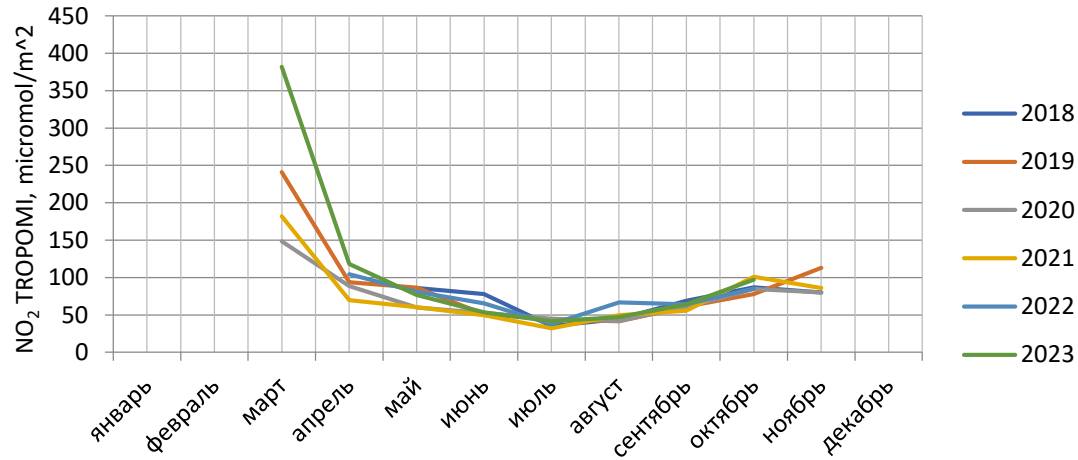
- *выявление источников выбросов NO_2*
- *оценка мощности источников*
- *мониторинг динамики источников*
- *сравнение источников (построение рейтингов)*

Метеопараметры, влияющие на концентрацию NO_2

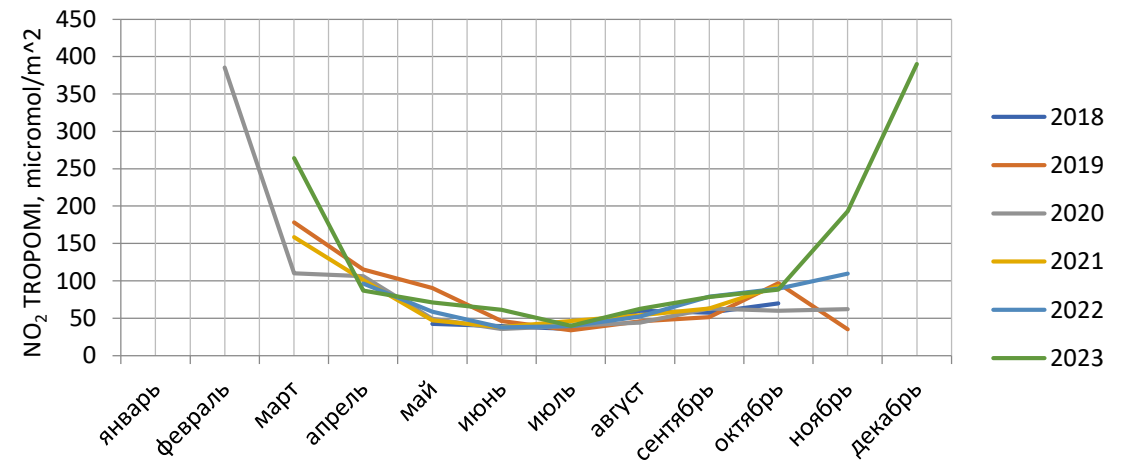
- *температура воздуха*
- *скорость и направление ветра*
- *влажность воздуха и осадки*

Регистрация роста концентрации NO_2 в зимний период

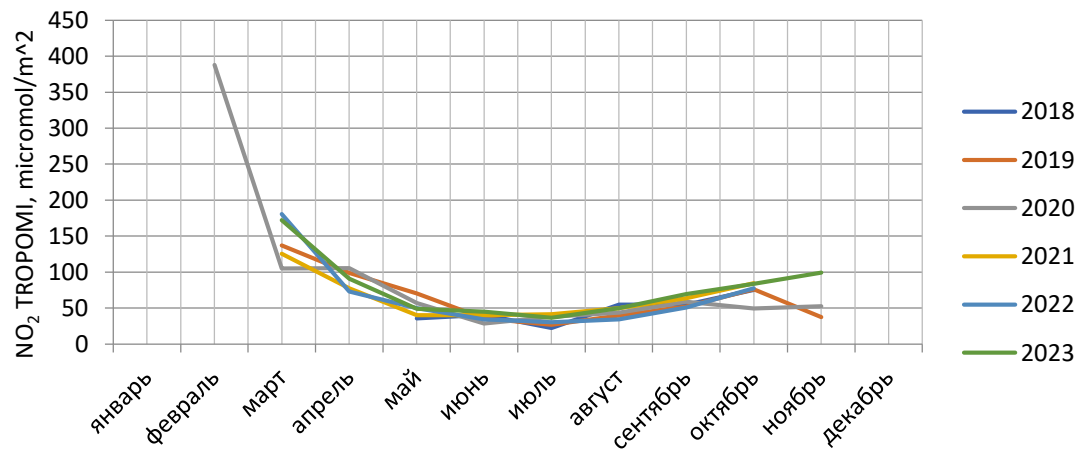
Иркутск-Ангарск



Новокузнецк-Белово



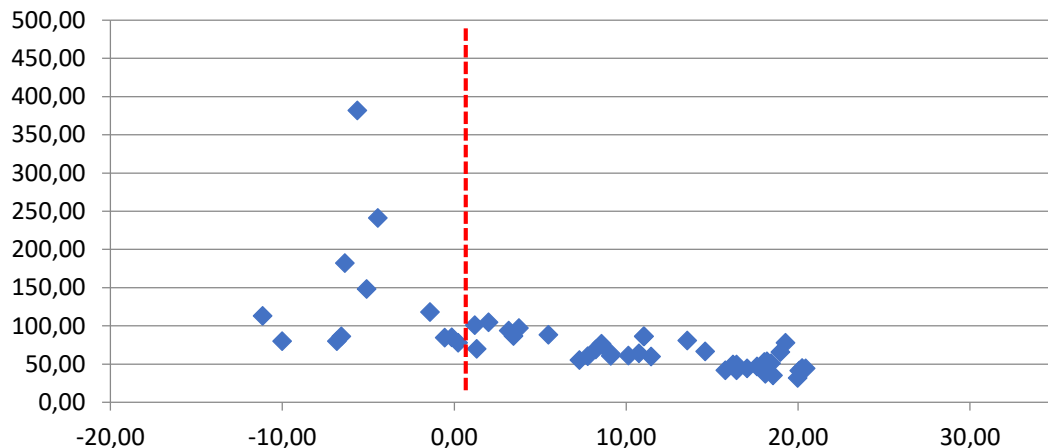
Кемерово



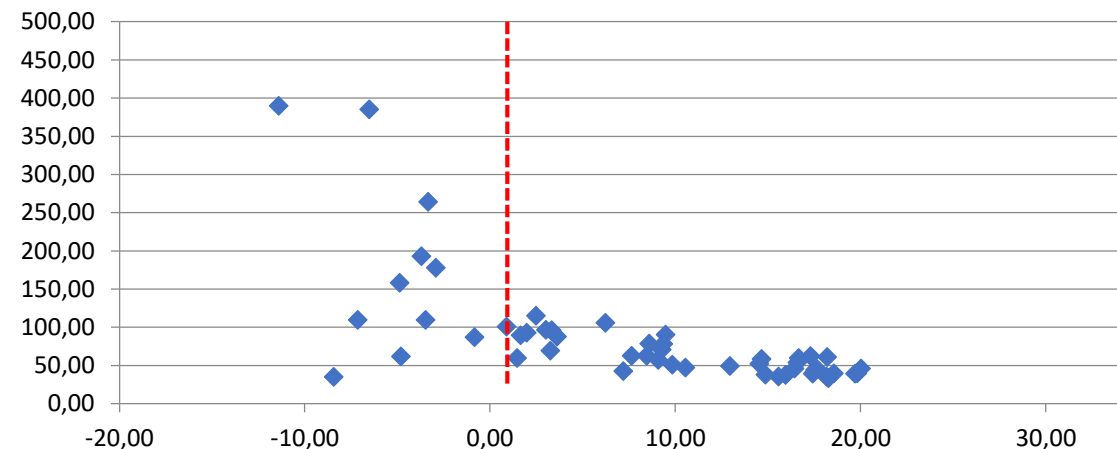
Рост концентраций диоксида азота в зимний период обычно связывают с повышением выбросов из-за увеличения интенсивности работы ТЭЦ, но документально это не доказано.

Зависимость концентрации NO_2 от среднемесячной температуры

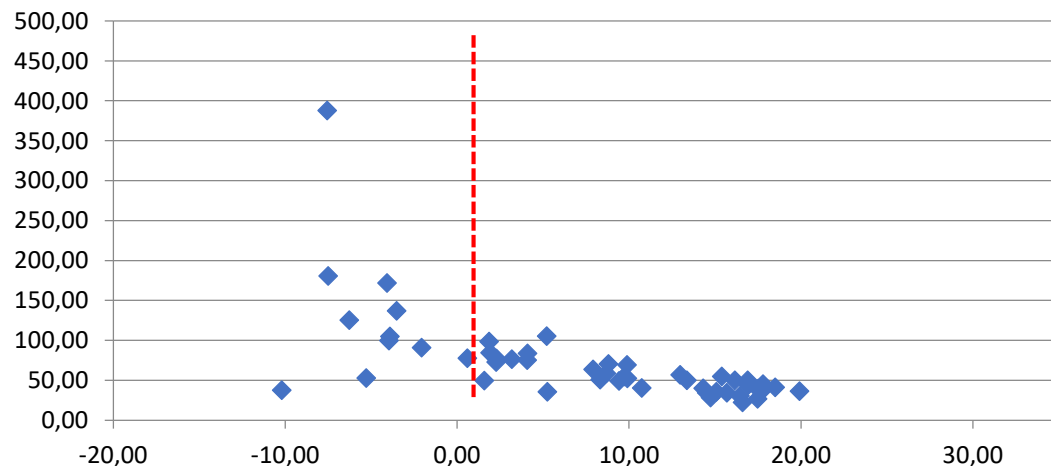
Иркутск-Ангарск



Новокузнецк-Белово

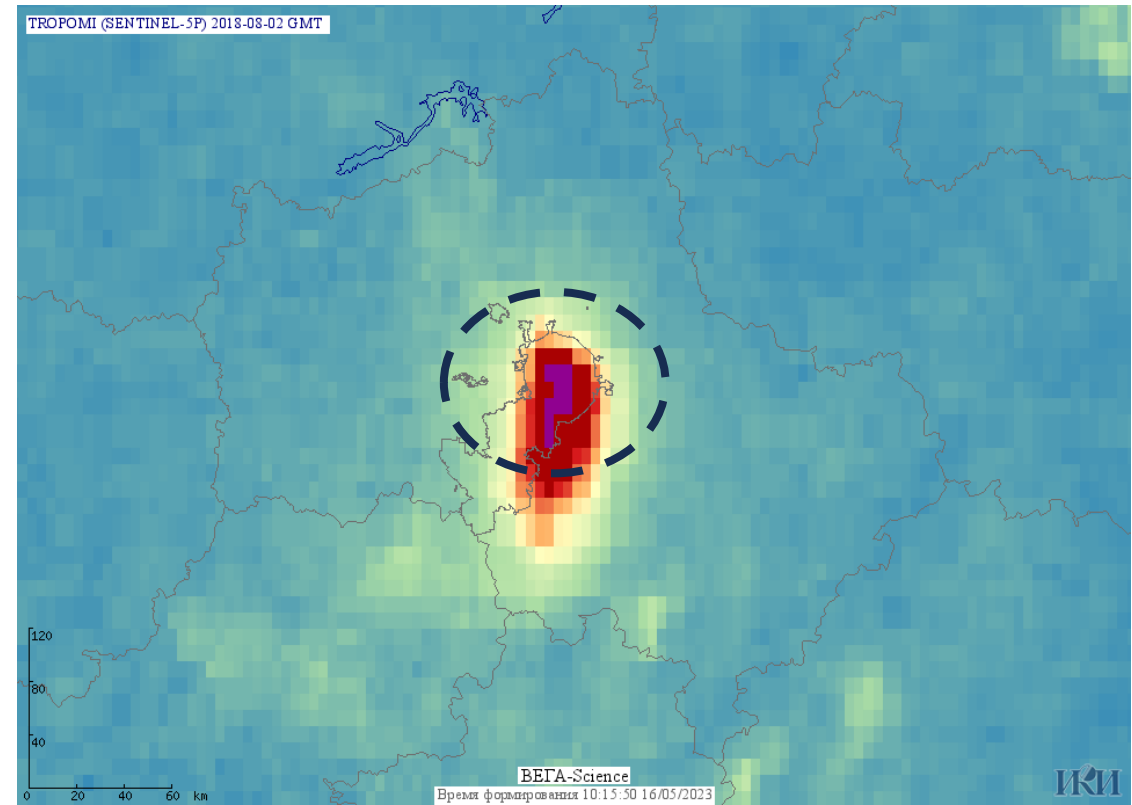
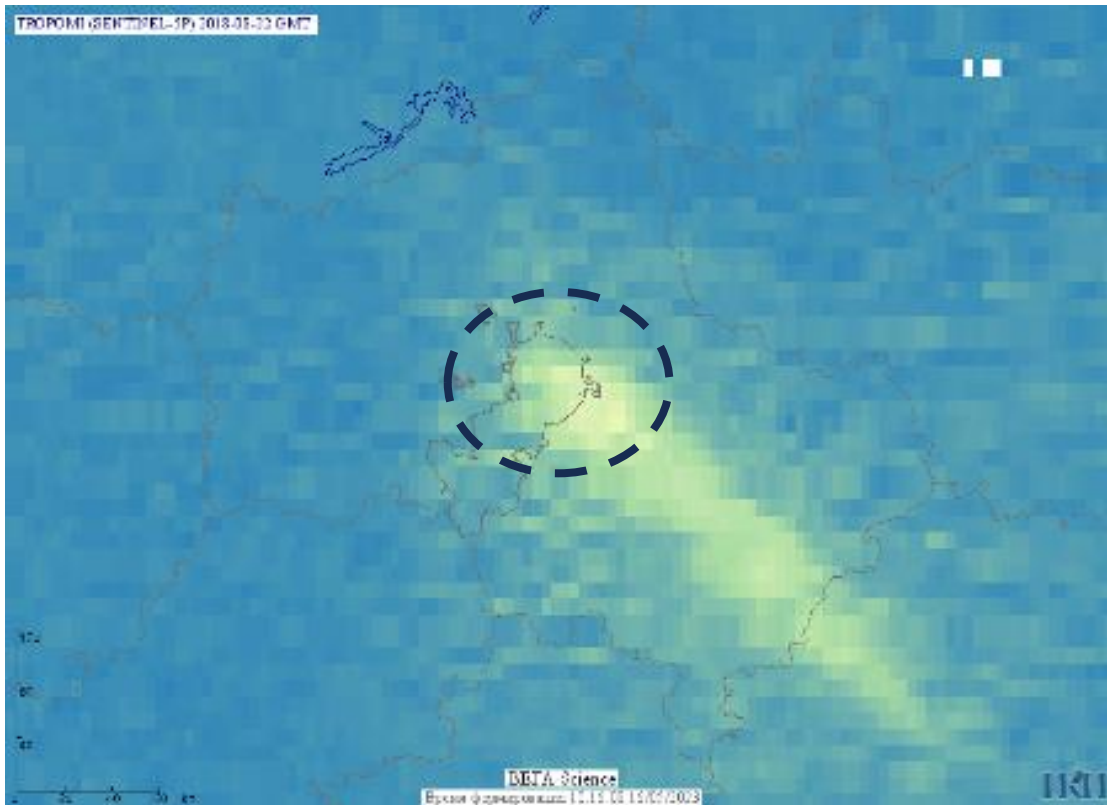


Кемерово



Виден явный рост концентраций при падении температуры ниже нуля градусов, что может быть связано с ростом времени жизни диоксида азота в атмосфере.

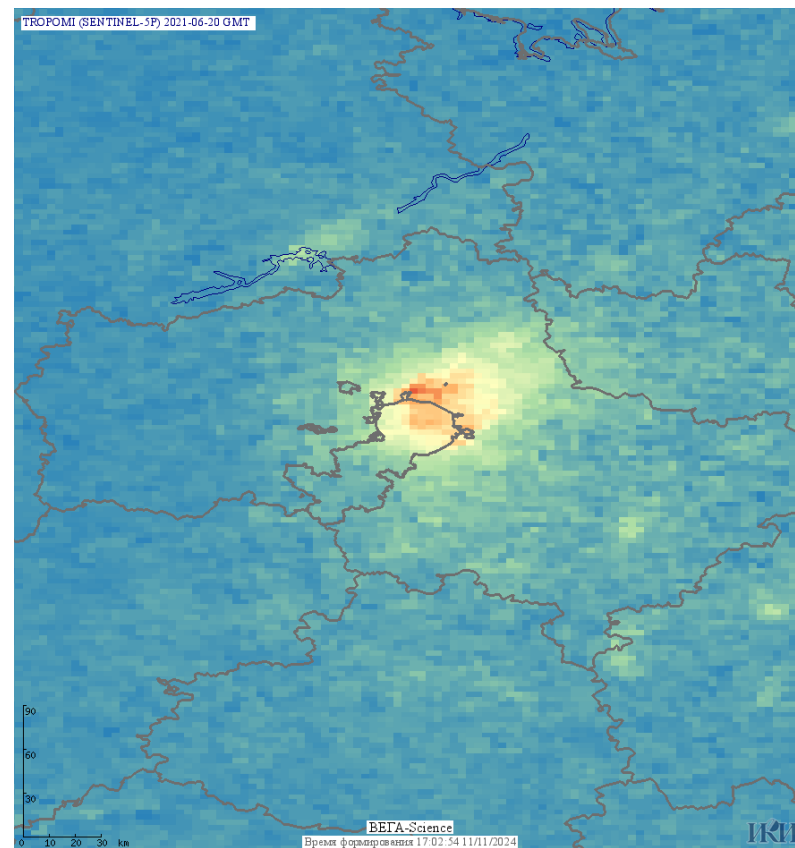
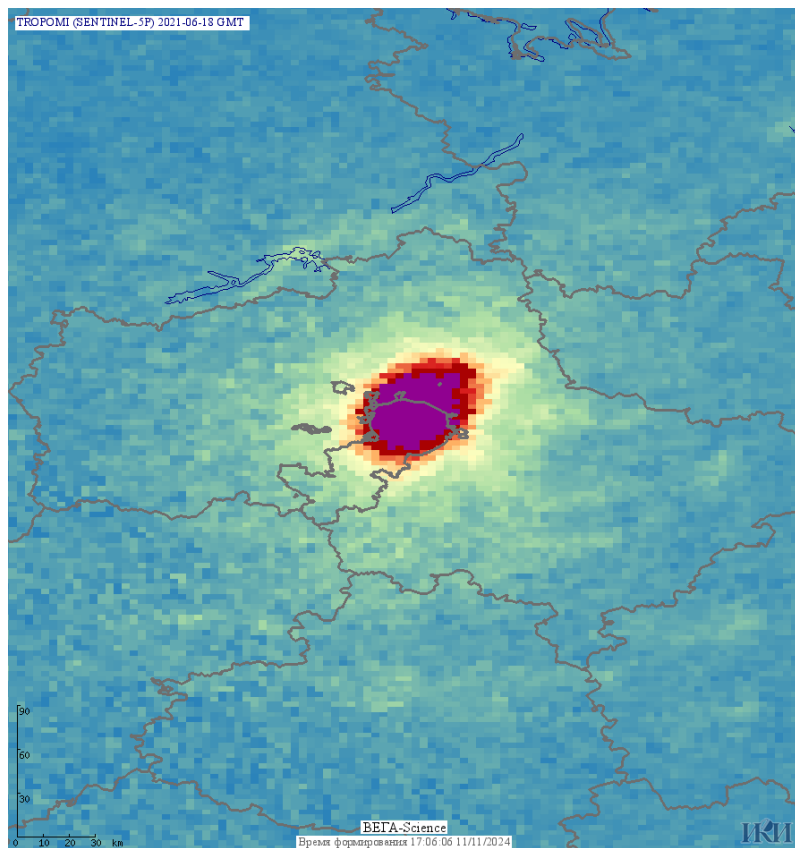
Влияние ветра на концентрацию NO_2



*Распределение концентраций NO_2 в районе Москвы в дни с разной скоростью ветра: **4,42 м/с** (слева) и **0,78 м/с** (справа).*

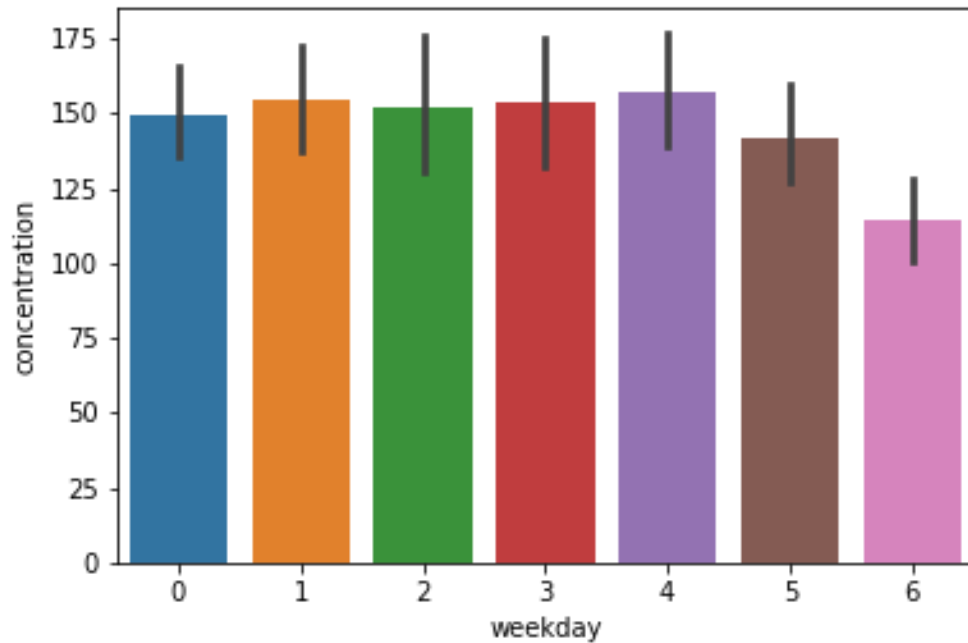
Оценка в фиксированном районе даже при постоянной мощности источника может давать различные концентрации

Непостоянная мощность выбросов NO_2

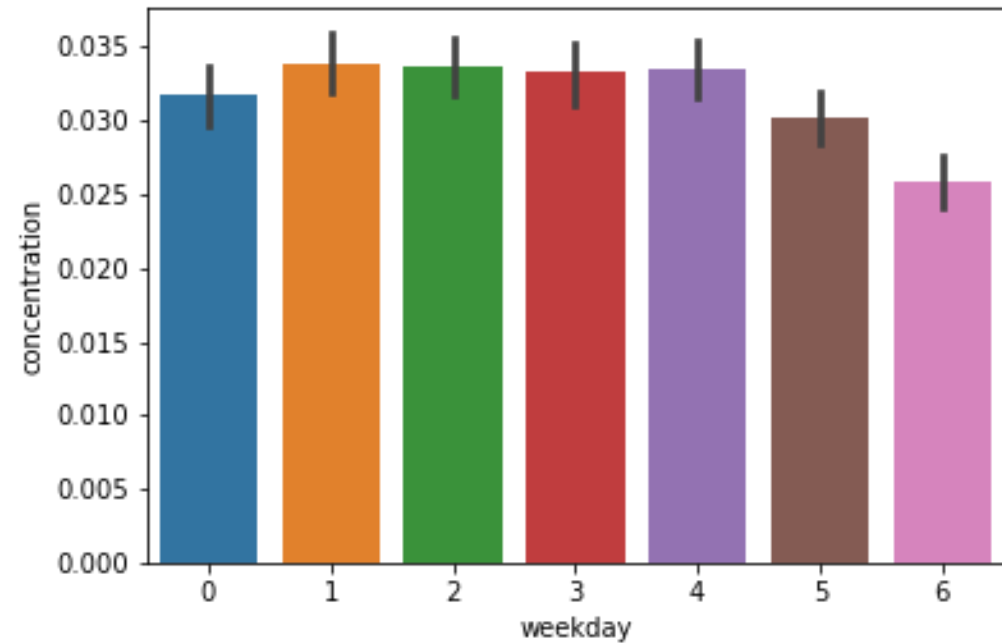


*Распределение концентраций NO_2 в районе Москвы в разные дни одной недели: 18 июня 2021 года (**пятница**) и скоростью ветра 1,6 м/с (слева) и 20 июня 2021 года (**воскресенье**) и 0,91 м/с (справа).*

Зависимость концентрации NO_2 от дня недели

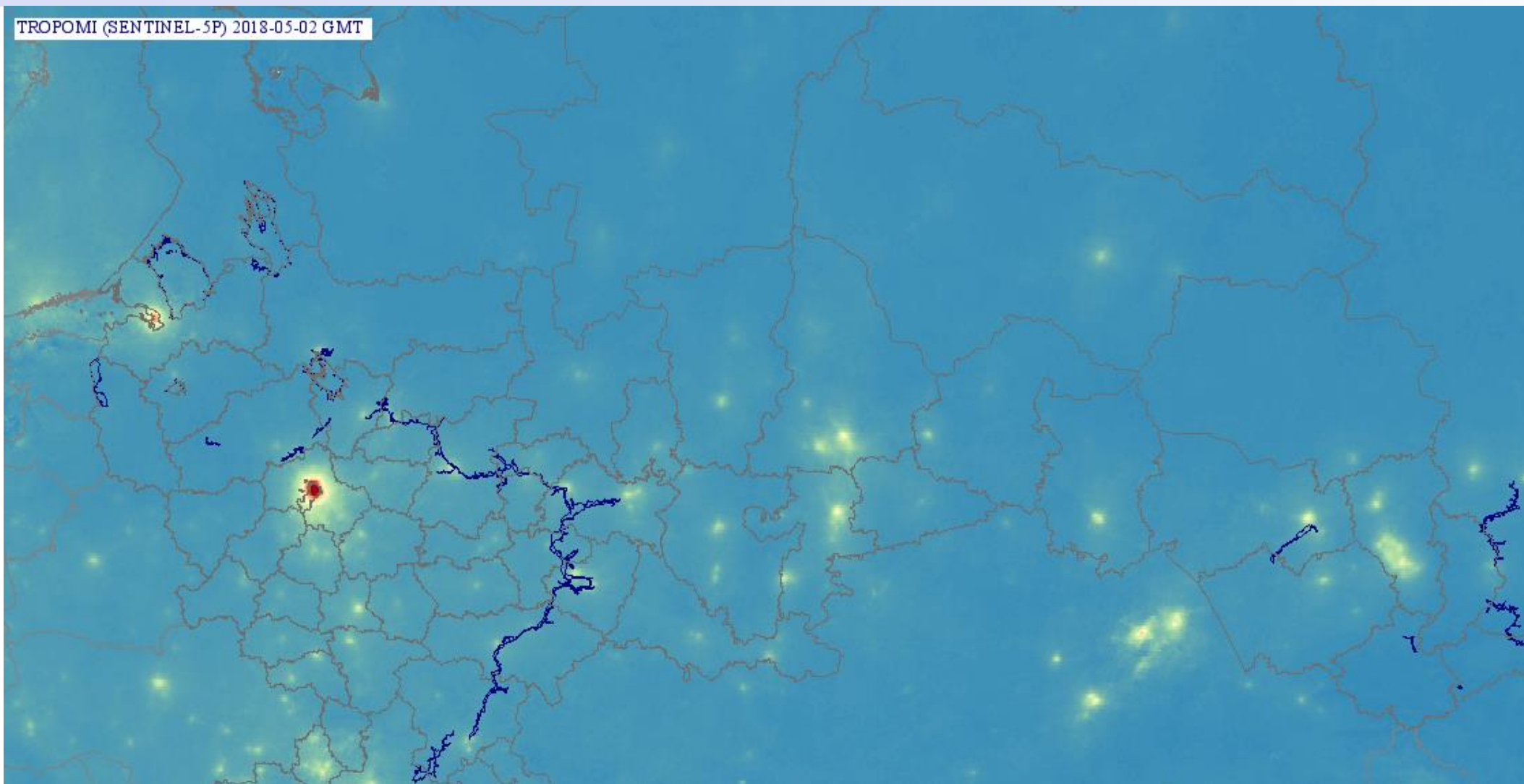


Зависимость концентрации NO_2
по данным TROPOMI от дня недели
(Москва)



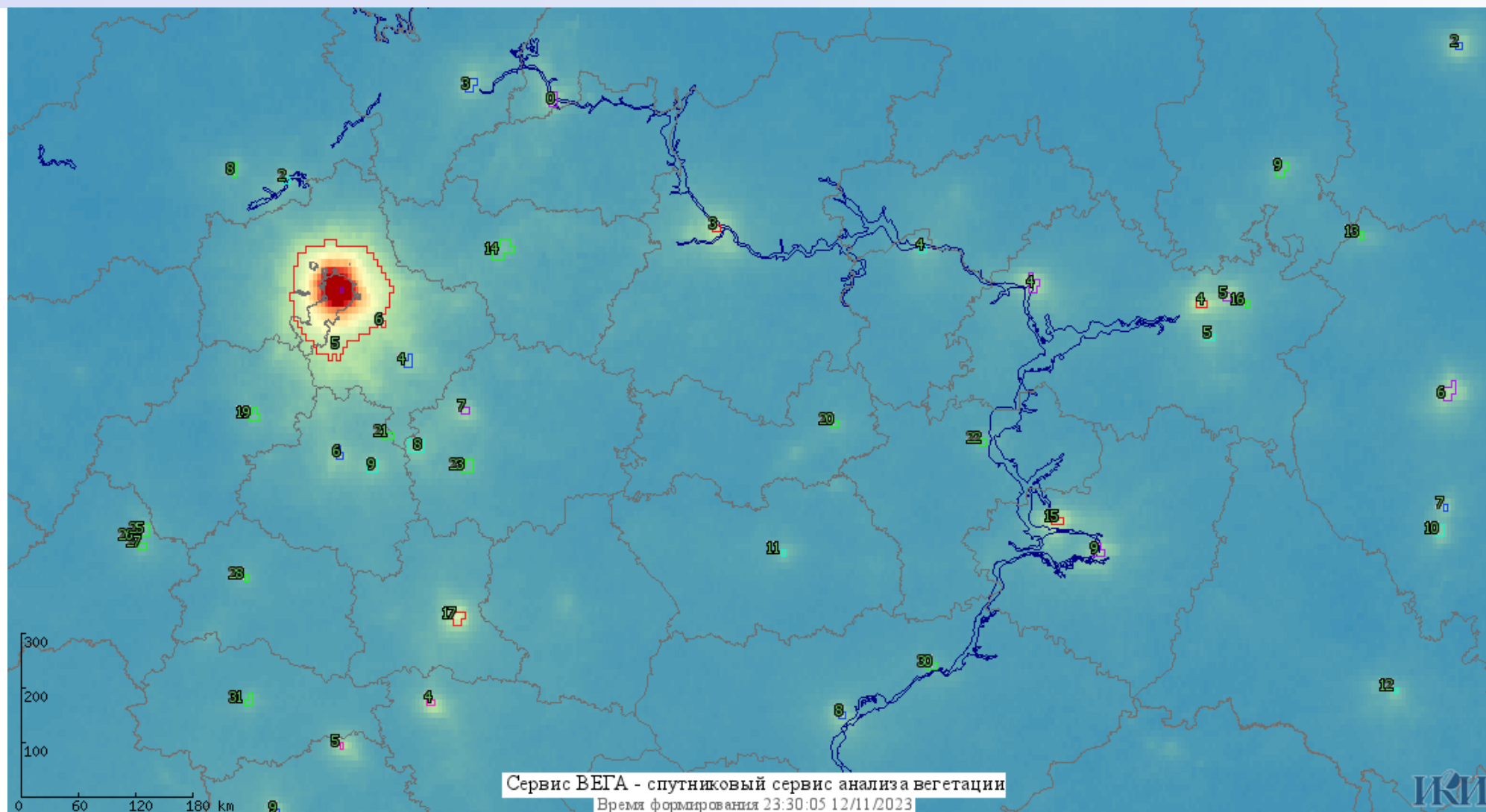
Зависимость концентрации NO_2 по
по наземным данным от дня недели
(Москва)

Использование «безветренного» композитного изображения для выделения постоянных источников NO_2



Многолетнее «безветренное» композитное изображение со средней концентрацией NO_2 по прибору TROPOMI (Sentinel-5P) за 2018-2023 года (период май-сентябрь)

Выделение источников NO_2 для их постоянных наблюдений



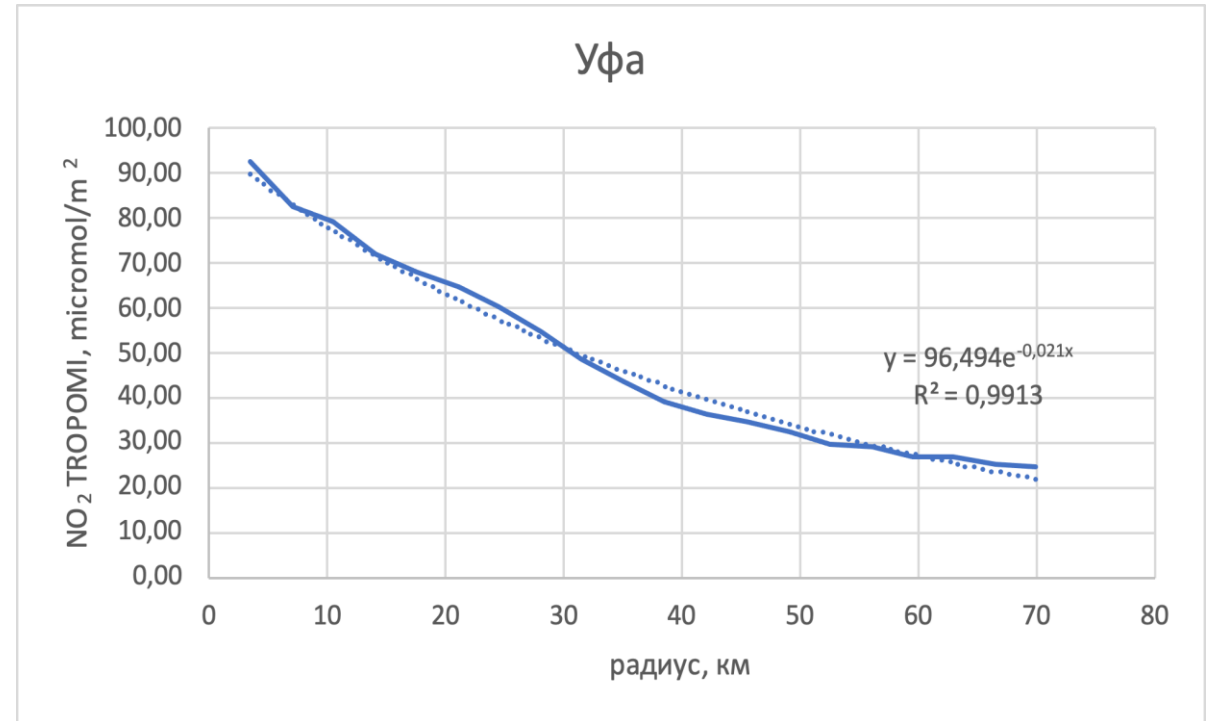
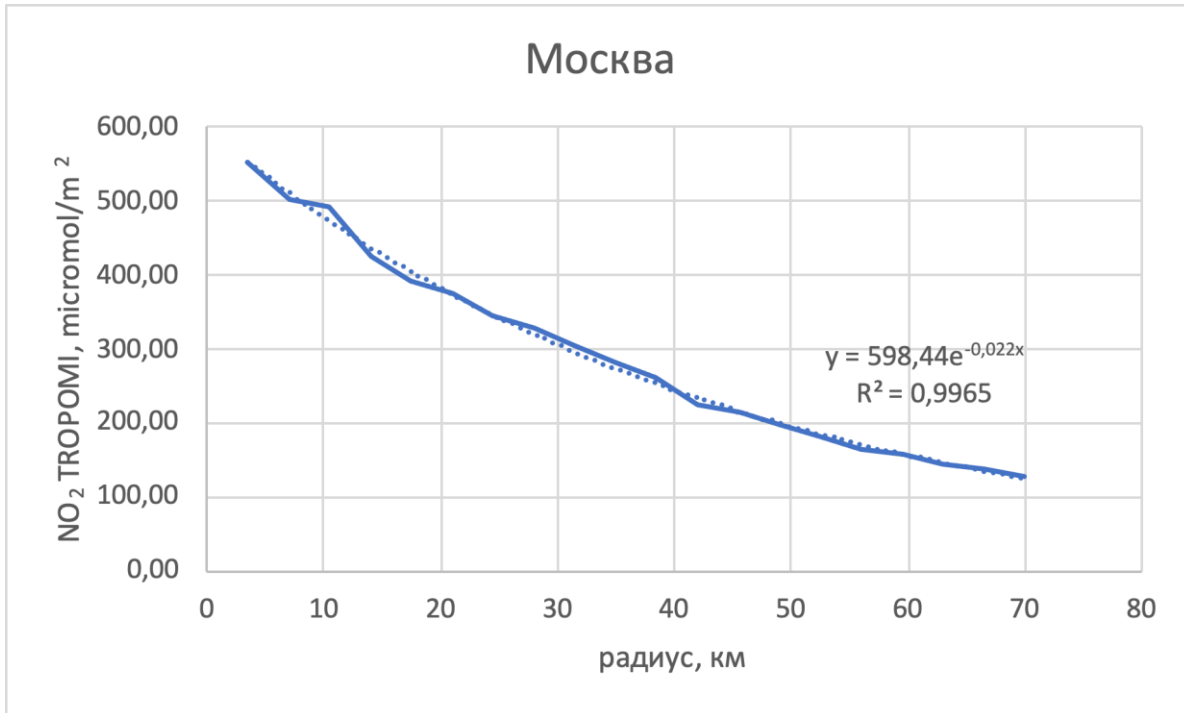
Карта источников выбросов NO_2 различных классов интенсивности: от 90 до 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$, с шагом 10 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$

Классификация выделенных источников

Города-миллионники	ГРЭС	Промышленные города	Угольные разрезы	Цементные заводы
Москва	Рефтинская	Липецк	Талдинский	Михайловцемент
Санкт-Петербург	Новочеркасская	Тольятти	Киселёвский	Серебрянский цементный завод
Краснодар	Беловская	Нижнекамск	Бачатский	Вольский цементный завод
Ростов-на-Дону	Костромская	Магнитогорск	Евтинский	Мальцовский портландцемент
Нижний Новгород	Невинномысская	Новокузнецк	Коркинский	Мордовцемент
Нижний Новгород	Сургутская	Кемерово		
Челябинск	Конаковская	Ангарск		
Екатеринбург	Новомосковская	Губкин		
Омск	Заинская	Ачинск		
Новосибирск	Южноуральская	Рязань		
Воронеж	Ставропольская	Набережные Челны		
Казань	Рязанская	Тюмень		
Самара	Киришская	Барнаул		
Уфа	Кармановская	Череповец		
Красноярск	Ириклинская	Ярославль		
Волгоград (Красноармейский район)		Саратов		
Пермь (Индустриальный район)		Стерлитамак		

Какие проблемы необходимо решить для оценки мощности источников NO_2 , их мониторинга и сравнения

- *необходима методика восстановления мощности источника, учитывающая погодные условия (в первую очередь скорость ветра)*
- *выбор зоны источника, в которой проводится оценка концентрации NO_2*

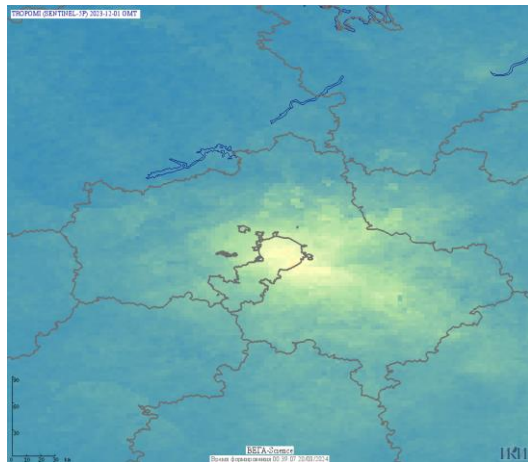
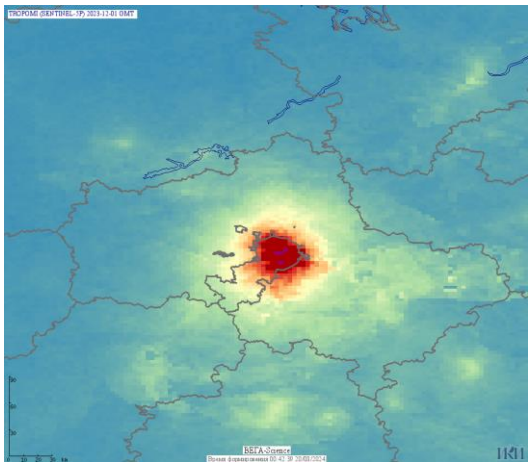


Примеры аппроксимации распределений по «безветренным» данным :

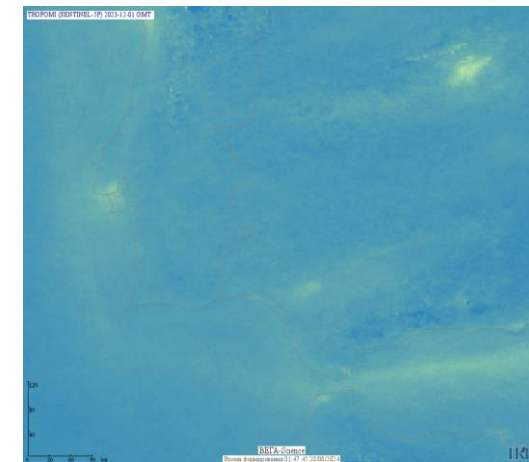
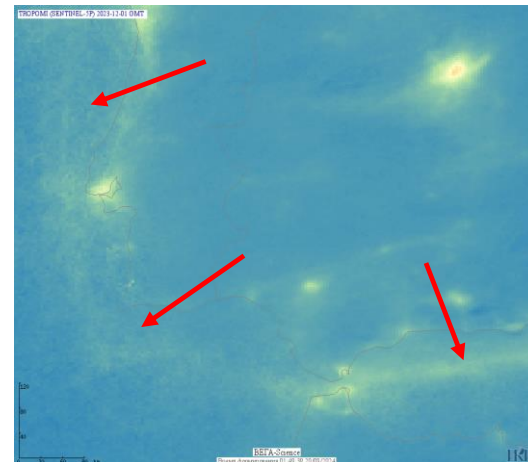
Эксперименты с более чем 30 городами показали, что зависимость концентрации от расстояния до источника можно аппроксимировать экспоненциальной зависимостью

$$q(x) = \frac{F_0}{2 * \sqrt{ni * h}} * e^{-x \sqrt{\frac{h}{ni}}}$$

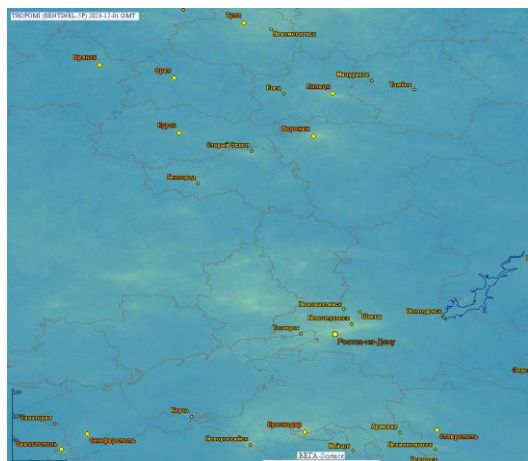
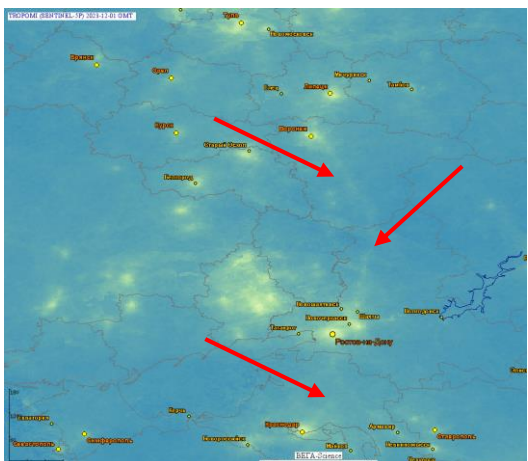
Карты NO_2 , построенные для разных диапазонов скоростей ветра от 0 до 4 м/с и шагом 0,5 м/с



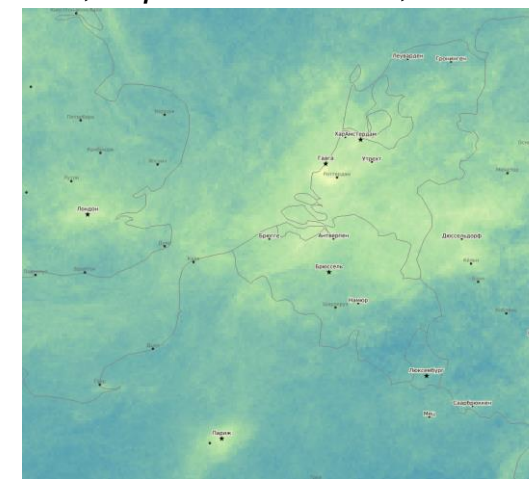
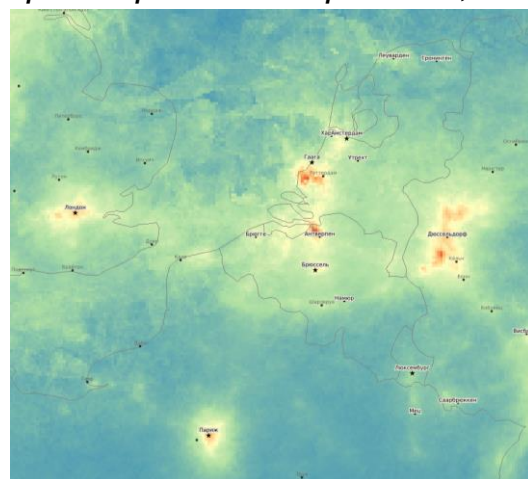
NO_2 в районе Москвы за летние периоды 2018-2023 годов: слева при скорость ветра от 0,5 до 1 м/с, справа от 3,5 до 4 м/с



NO_2 на юге Испании в районе Гибралтарского пролива: слева при скорость ветра от 0,5 до 1 м/с, справа от 3 до 3,5 м/с

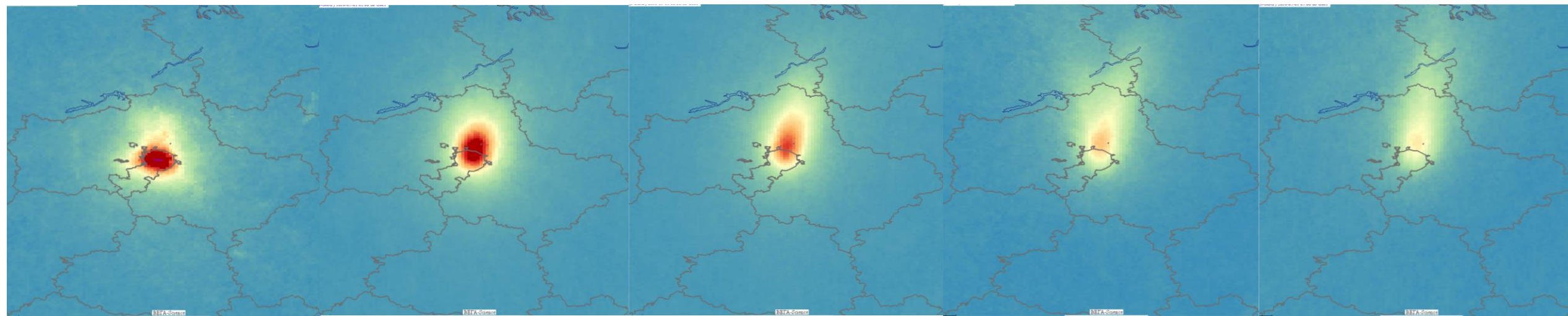


NO_2 в районе М4 за летние периоды 2018-2023 годов: слева при скорость ветра от 0,5 до 1 м/с, справа от 3,5 до 4 м/с



NO_2 в районе Среднеевропейской равнины: слева при скорость ветра от 0,5 до 1 м/с, справа от 3,5 до 4 м/с

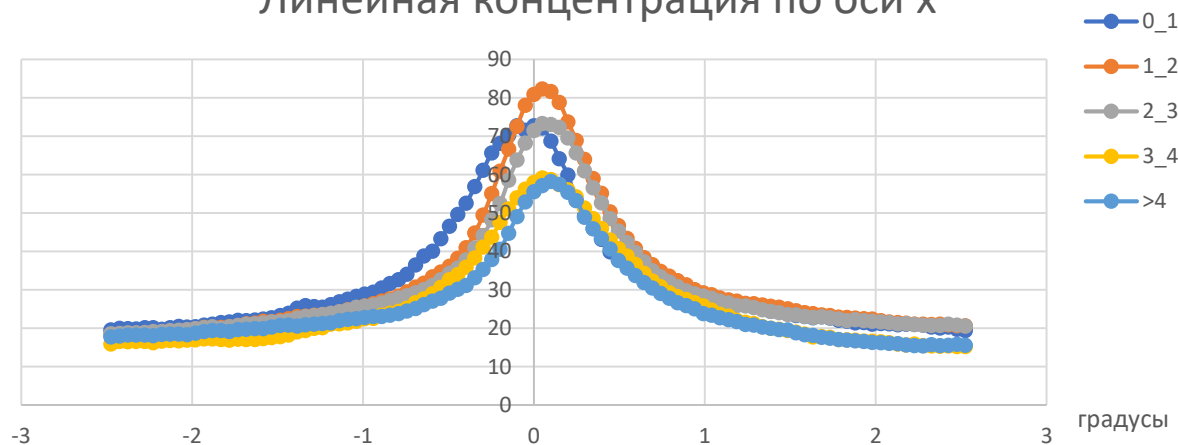
Карты NO_2 , развёрнутые по направлению ветра в центре источника



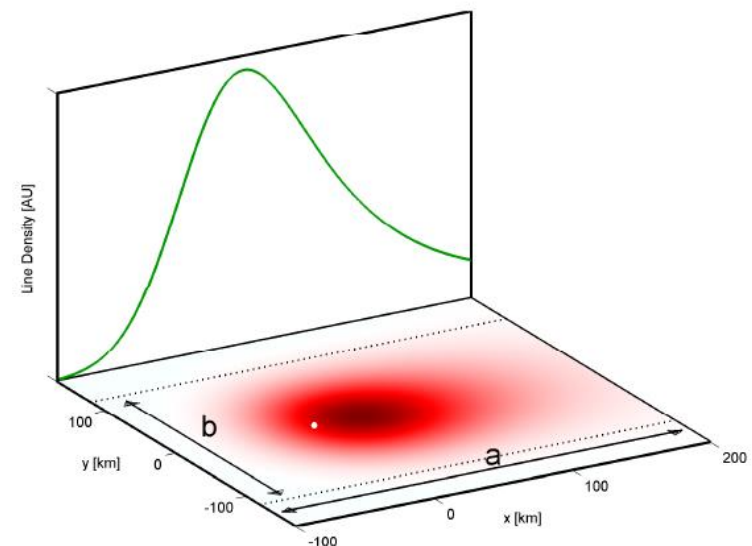
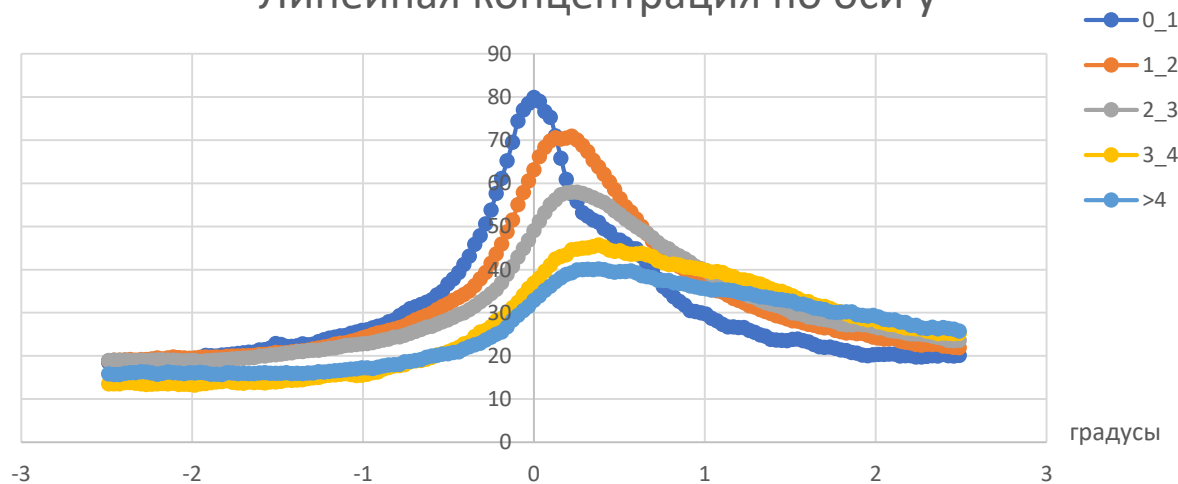
Средняя концентрация NO_2 для источника Москвы за летние периоды 2018-2023 годов с шагом скорости ветра 1 м/с: слева-направо 0-1 м/с, 1-2 м/с, 2-3 м/с, 3-4 м/с, более 4 м/с

Линейная концентрация NO_2

Линейная концентрация по оси x



Линейная концентрация по оси y



Линейные (средние) концентрации NO_2 для источника Москвы за летние периоды 2018-2023 годов, рассчитанные по развёрнутым картам для разных диапазонов скорости ветра

- 1. В ИС Vega-Science доступны продукты выбросов различных газов на основе данных TROPOMI, имеющихся в архивах ЦКП «ИКИ-Мониторинг».*
- 2. Концентрация NO₂ отражает антропогенную деятельность*
- 3. На основе данных TROPOMI о концентрации NO₂ возможно выделять основные источники выбросов*
- 4. Для оценки мощностей источников необходимо вводить корректирующие коэффициенты (в первую очередь на ветер)*
- 5. Сравнение мощностей источников возможно только в одних и тех же метеоусловиях*

Спасибо за внимание !

Работа выполнена с использованием возможностей ЦКП «ИКИ-Мониторинг», поддерживаемого в рамках темы «Мониторинг» Минобрнауки (госрегистрация № 122042500031-8), и при поддержке темы «Эмиссия» (госрегистрация № 122101700045-7)

*Контактная информация:
Константинова Анна Михайловна
e-mail: konstantinova@d902.iki.rssi.ru*

**Отдел «Технологий
спутникового
Мониторинга»**

