

# Мониторинг качества воздуха с помощью данных TROPOMI в информационной системе ВЕГА-Science

*Константинова Анна Михайловна  
Бриль Алексей Алексеевич  
ИКИ РАН, Москва*

Девятнадцатая международная конференция  
«СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО  
ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА»  
15-19 ноября 2021 г., Москва

# Продукты концентрации газовых веществ, доступные в ИС Vega-Science

Загрязнения атмосферного воздуха являются одним из основных факторов, оказывающих негативное влияние на здоровье населения и окружающую среду. Повышение концентрации различных веществ в атмосфере разрушает озоновый слой Земли, приводит к возникновению кислотных дождей, к снижению плодородия почвы, воздействует на дыхательные пути и легкие человека, вызывает изменения состава крови. Поэтому, необходим комплексный мониторинг состояния атмосферы, включающий оценку концентрации определенного вещества в атмосфере.

Для мониторинга состояния воздуха в информационной системе Vega-Science (<http://sci-vega.ru/>, семейство Созвездие-Vega), функционирующей на базе Центра Коллективного Пользования ЦКП «ИКИ-Мониторинг» (<http://ckp.geosmis.ru/>) предоставляется доступ к информационным продуктам концентрации газовых веществ по данным спутников Sentinel-5P (TROPOMI), AURA(OMI).

Данные со спутников предоставляются из следующих центров распространения данных:

AURA - LAADS DAAC (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>)

SENTINEL-5P - Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu/>)

Данные представляют из себя информацию с одного оборота спутника вокруг Земли с временными точками начала и конца съемки. Для удобства использования и анализа, на этапе подготовки к архивации данные нарезаются на сеансы по пять минут. Затем, используя мета-информацию (флаги качества данных) происходит фильтрация данных.

# TROPOMI Copernicus Sentinel-5P

**30 апреля 2018 года** ESA был запущен спутник Sentinel-5 Precursor в рамках программы Copernicus, который с помощью прибора TROPOMI измеряет концентрацию газовых составляющих в различных слоях атмосферы. Целью TROPOMI является обеспечение точных и своевременных наблюдений за ключевыми элементами состава атмосферы для мониторинга качества воздуха, климата и озонового слоя.

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

Название	Диапазон дат в ЦКП «ИКИ-Мониторинг»	Продукт
Sulfur dioxide (SO <sub>2</sub> )	2018-06-26 – по н.в.	Концентрация диоксида серы в полном столбе
Ozone (O <sub>3</sub> )	2018-04-30 – по н.в.	Концентрация озона в полном столбе
Carbon monoxide (CO)	2018-04-30 – по н.в.	Концентрация угарного газа в полном столбе
UV Aerosol Index	2018-06-28 – по н.в.	Аэрозольный индекс состояния атмосферы
Methane (CH <sub>4</sub> )	2018-04-30 – по н.в.	Концентрация метана в полном столбе
Nitrogen dioxide (NO <sub>2</sub> )	2018-04-30 – по н.в.	Концентрация диоксида азота в стратосфере и тропосфере

*Таблица доступных продуктов Level 2 TROPOMI*

# Ozone Monitoring Instrument (OMI) AURA

**15 июля 2004 года** NASA был запущен научно-исследовательский спутник AURA, предназначенный для изучения атмосферы Земли. Основной задачей спутника является контроль за изменением климата на Земле, загрязнением воздуха, состоянием озонового слоя Земли.

OMI - совместная разработка учёных из Нидерландов и Финляндии. Он является ключевым прибором на AURA для мониторинга озонового слоя. OMI измеряет стандартные загрязнители, такие как O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> и аэрозоли. OMI был создан на основе прибора TOMS (NASA) и прибора GOME (ESA, на спутнике ERS-2). Он может измерять гораздо больше атмосферных компонентов, чем TOMS, и обеспечивает гораздо лучшее разрешение на местности, чем GOME (13 км x 25 км - OMI против 40 км x 320 км - GOME)

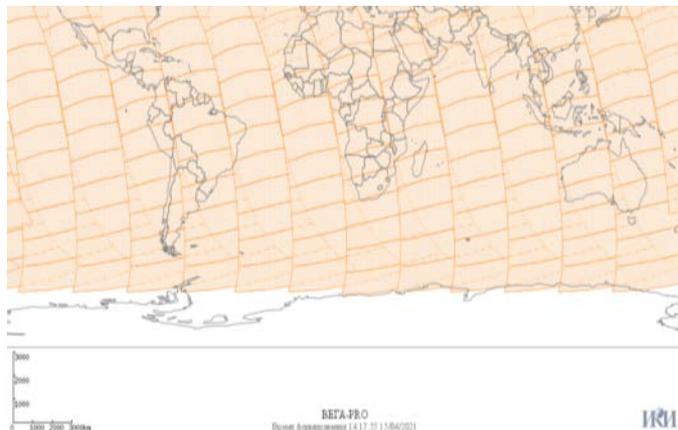
<https://aura.gsfc.nasa.gov/omi.html>

Название	Диапазон дат в ЦКП «ИКИ-Мониторинг»	Продукт
Sulfur dioxide (SO <sub>2</sub> )	2004-10-02 – по н.в.	Концентрация диоксида серы в полном столбе
UV Aerosol Index	2020-10-14 – по н.в.	Аэрозольный индекс состояния атмосферы
Nitrogen dioxide (NO <sub>2</sub> )	2012-10-07 – по н.в.	Концентрация диоксида азота в тропосфере

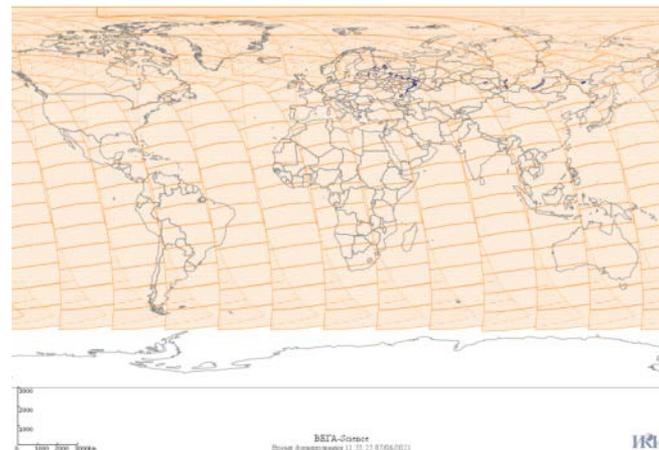
*Таблица доступных продуктов Level 2 OMI*

# Покрытие данными TROPOMI и OMI в архивах ЦКП«ИКИ-Мониторинг»

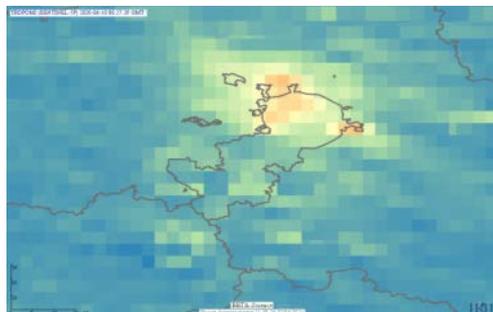
В архивах ЦКП«ИКИ-Мониторинг» доступны данные TROPOMI с апреля 2018 года и данные OMI с декабря 2004 года. Доступны продукты по газам: диоксид серы, диоксид азота, аэрозольный индекс, озон, метан, угарный газ.



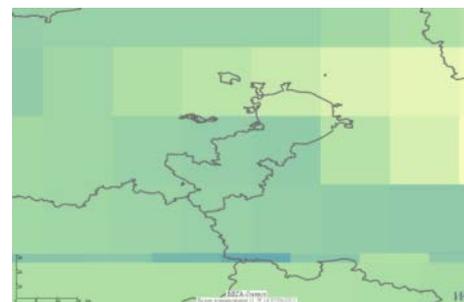
*Покрытие сеансами TROPOMI на один день в архивах ЦКП«ИКИ-Мониторинг»*



*Покрытие сеансами OMI на один день в архивах ЦКП«ИКИ-Мониторинг»*



*Пример разрешения данных TROPOMI (3.5 x 5.5 км)*



*Пример разрешения данных OMI (13 x 24 км)*

# Композитные изображения

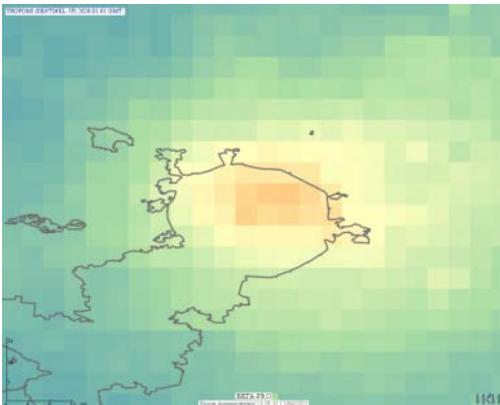
На основе ежедневно поступающих сеансов TROPOMI и OMI в автоматическом режиме создаются композитные изображения, загружаемые в архивы ЦКП «ИКИ-Мониторинг» и доступные в онлайн-сервисах, разрабатываемых в ИКИ РАН, в том числе в ИС Vega-Science.

Временное разрешение композитных изображений:

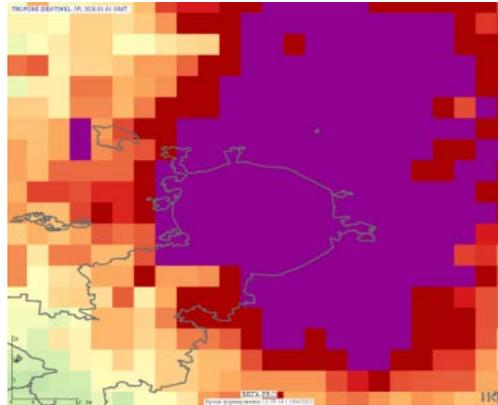
- Ежедневные
- Еженедельные
- Ежемесячные
- Ежегодные
- Многолетние

Создаваемые продукты на основе значений концентраций для каждой из доступных газовых составляющих:

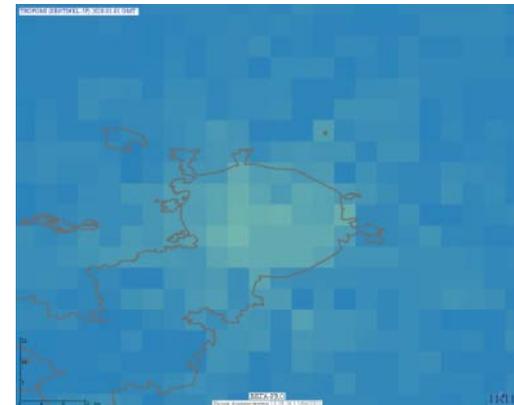
- Среднее значение
- Максимальное значение
- Минимальное значение



*Среднее значение концентрации NO2 за 2020 год (Москва)*

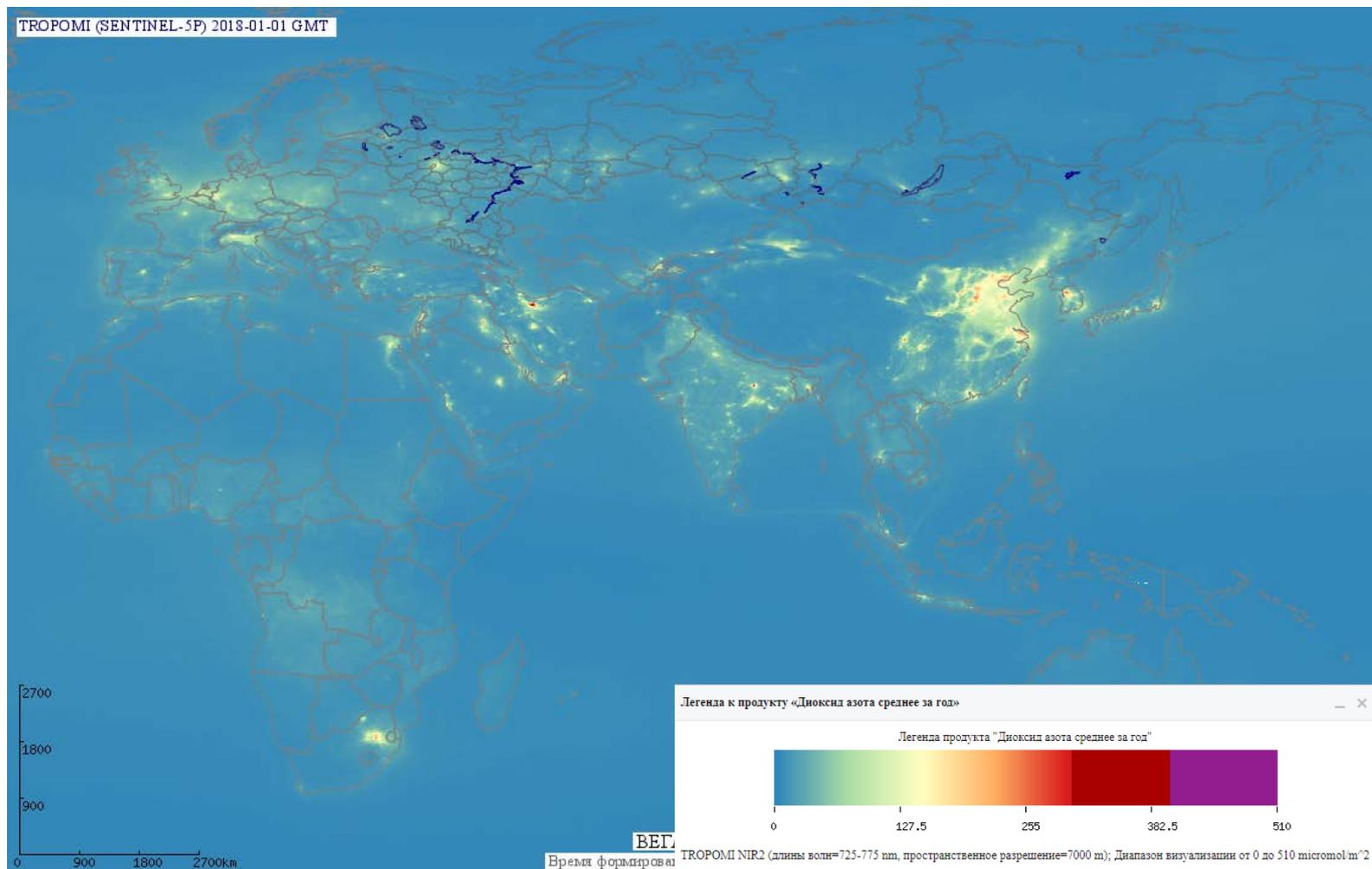


*Максимальное значение концентрации NO2 за 2020 год (Москва)*



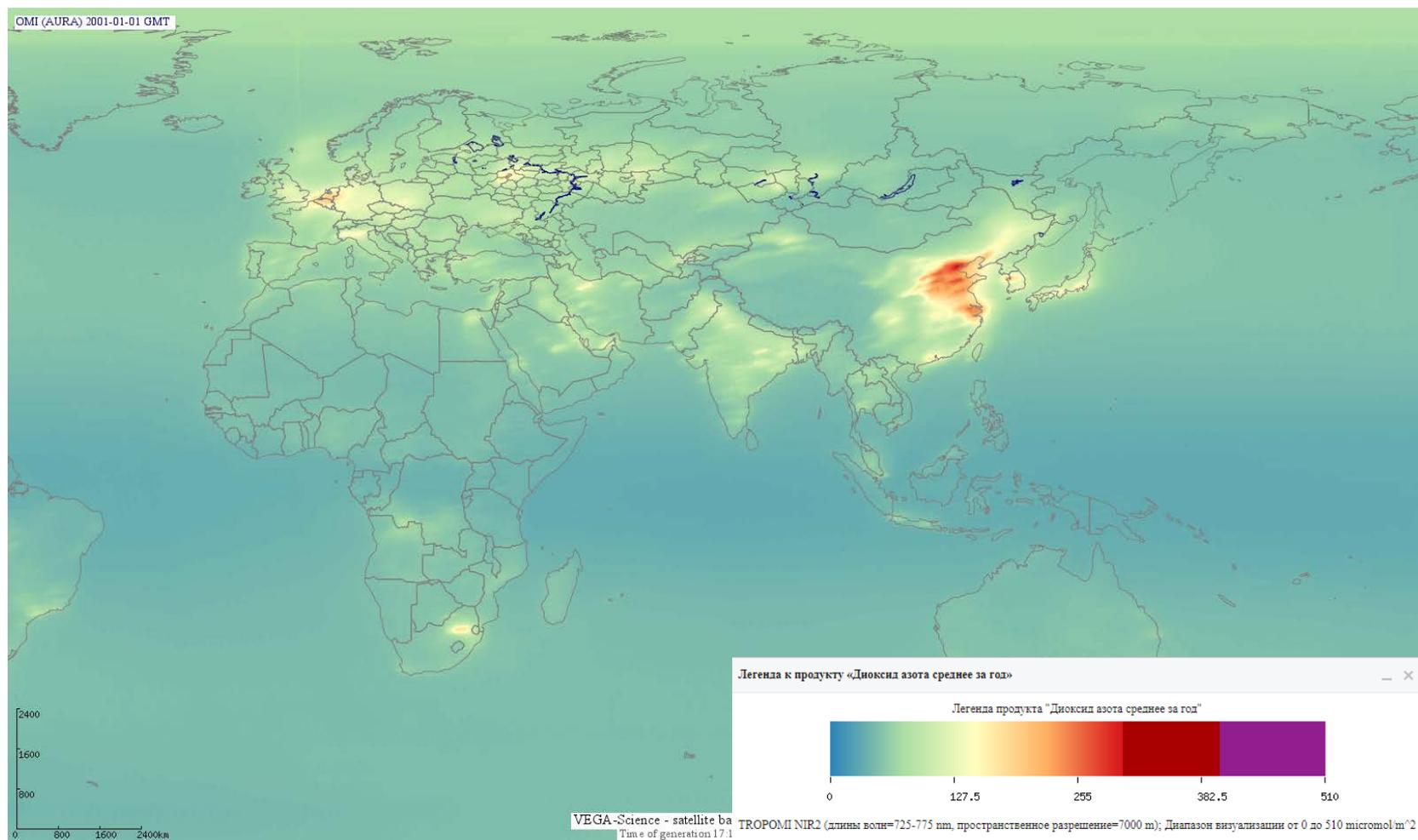
*Минимальное значение концентрации NO2 за 2020 год (Москва)*

# Примеры созданных композитных изображений



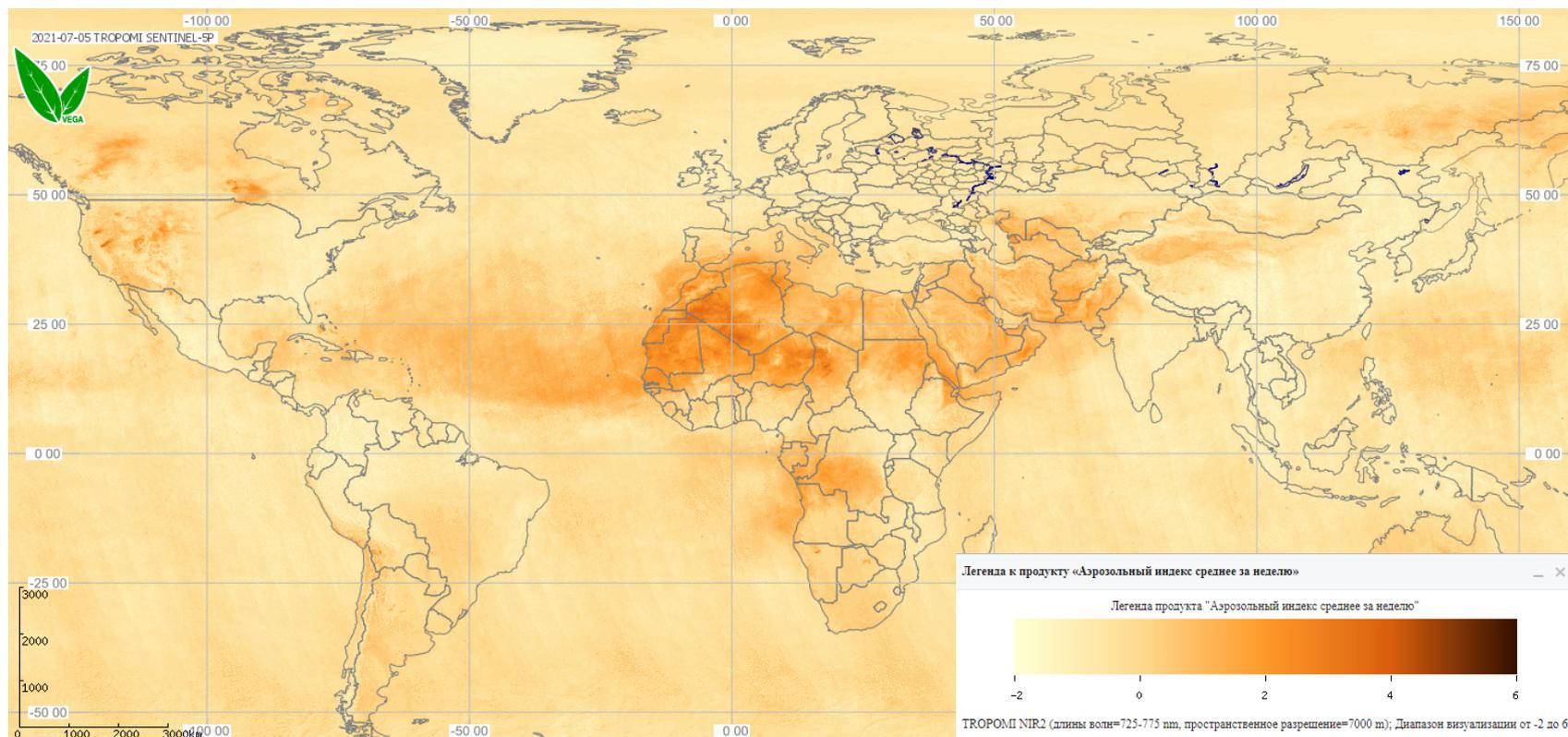
*Многолетнее композитное изображение со средней концентрацией NO<sub>2</sub> по TROPOMI за 2018-2021 года*

# Примеры созданных композитных изображений



*Многолетнее композитное изображение со средней  
концентрацией NO2 по OMI за 2016-2021 года*

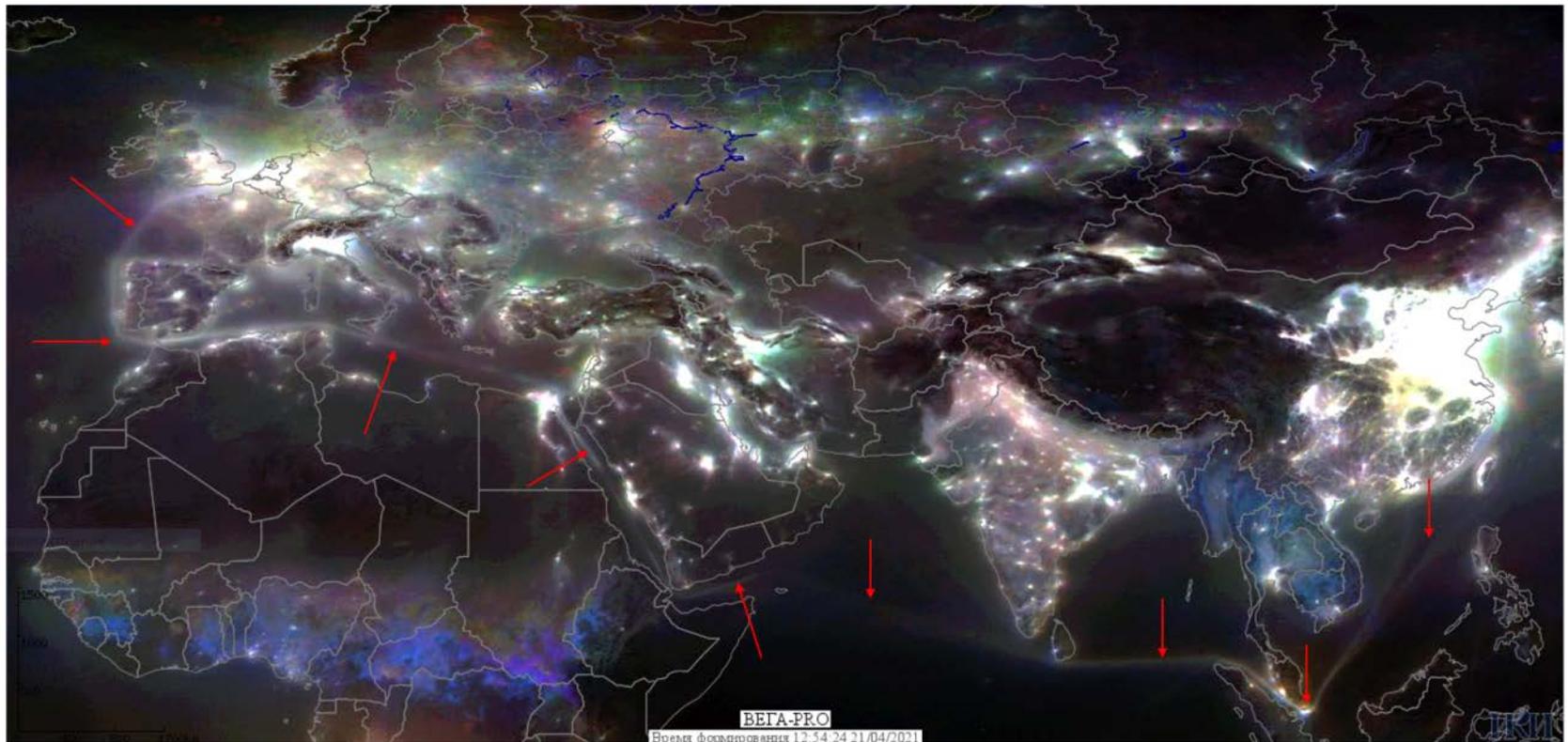
# Примеры продуктов, созданных на основе композитных изображений



*Анимация временного ряда изображений, созданных на основе средних еженедельных значений аэрозольного индекса по TROPOMI за июль-август 2021 года*

На анимации хорошо видна циркуляция аэрозолей, вызванная мощными пожарами на территории Сибири. Результаты измерений аэрозольного индекса применяются и для отслеживания других аэрозольных выбросов, таких как песчаные бури и вулканический пепел.

## Примеры продуктов, созданных на основе композитных изображений



*Распределение выбросов в атмосферу диоксида азота от крупных антропогенных объектов и природных пожаров*

Цветосинтез средних концентраций диоксида азота за 2018(R), 2019(G), 2020(B) годы на основе данных прибора TROPOMI (спутник Sentinel-5P). В частности, хорошо видно, что заметный вклад в загрязнения вносят суда, перемещающиеся по стандартному маршруту, связывающему Европу с Восточной Азией (отмечен красными стрелками).

# Диоксид азота

Диоксид азота ( $\text{NO}_2$ ) – одна из газовых составляющих атмосферы Земли, присутствующая как и в тропосфере, так и в стратосфере. Этот газ является токсичным и попадает в атмосферу в результате антропогенной деятельности (диоксид азота занимает одно из первых мест), в частности в результате сжигания топлива и биомассы, а также природных процессов, таких как лесные пожары, молнии и т.п. В крупных городах основным источником диоксида азота является автотранспорт, по его концентрации можно в целом судить о качестве городского воздуха, который напрямую влияет на здоровье и продолжительность жизни населения городов. При растворении в воде диоксид азота образует азотную и азотистую кислоты. Если растворение происходит в атмосфере, в каплях воды облаков, следствием этого явления становятся кислотные дожди. При поступлении в организм человека в виде газа растворение происходит внутри лёгких, вот почему диоксид азота негативно воздействует на слизистые оболочки органов дыхания. Время жизни данного газа от нескольких часов до не

Основные источники поступления в атмосферу в городах:

- автотранспорт
- теплоэнергетика
- предприятия нефтехимической отрасли

Вещество	ПДК мр, мг/м <sup>3</sup>	ПДК сс, мг/м <sup>3</sup>
Азота диоксид	0,085	0.04



# Валидация данных TROPOMI Level 2 Nitrogen Dioxide (L2\_\_NO2\_\_)

<http://www.tropomi.eu/data-products/nitrogen-dioxide>

Temporal coverage:	Since 30-Apr-2018
Spatial coverage:	~2600 km swath. Full daily surface coverage of radiance and reflectance measurements for latitudes > 7° and < -7°, and better than 95 % coverage for latitudes in the interval [-7°, 7°].
Spatial resolution:	3.5 x 7.0 Km (across x along track), at beginning of mission 3.5 x 5.5 Km (across x along track), since 6 August 2019
Processor Version:	01.xx.xx, with x=any digit between 0 and 9

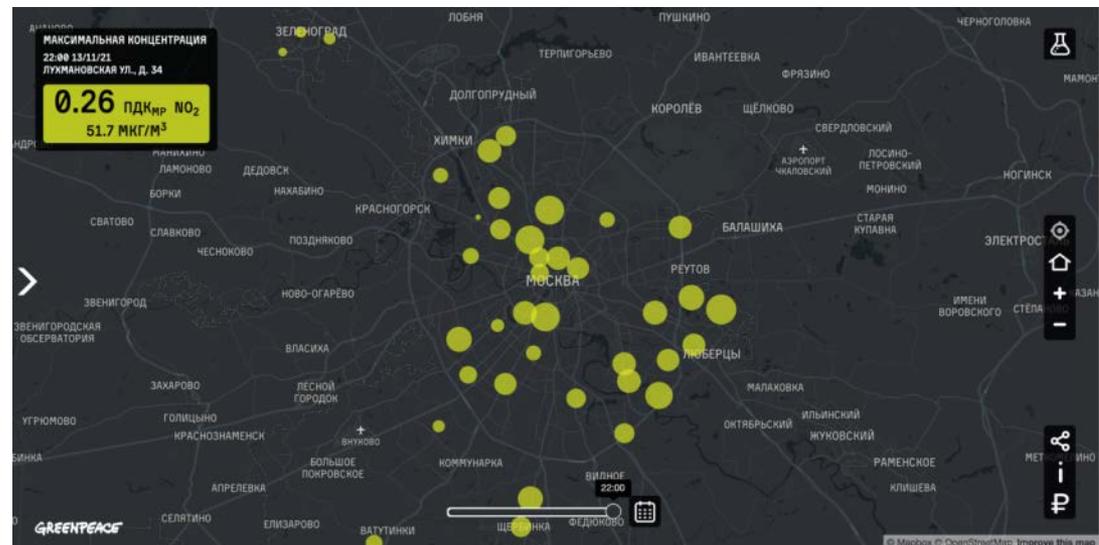
<https://mpc-vdaf.tropomi.eu/>

Данные Sentinel-5p TROPOMI L2\_NO2 (тропосферный, стратосферный и общий столбец NO<sub>2</sub>) в целом хорошо согласуются с наземными измерениями ([NDACC](#) MAX-DOAS, [NDACC](#) ZSL-DOAS и [PGN](#) DOAS ) и со спутниковыми данными OMI NO<sub>2</sub>. Оценки смещения соответствуют требованиям миссии: <50% для тропосферного NO<sub>2</sub> и <10% для стратосферного NO<sub>2</sub>.

Product ID	Stream	Product	Bias	Dispersion	Special features
L2_NO2	NRTI	NO <sub>2</sub> troposphere	-22%	3.6 Pmolec/cm <sup>2</sup>	Total NO <sub>2</sub> bias varies with column amount: positive bias over low pollution, negative bias over high pollution, with 7 Pmolec/cm <sup>2</sup> as a threshold.
		NO <sub>2</sub> stratosphere	-9%	0.4 Pmolec/cm <sup>2</sup>	
		NO <sub>2</sub> total	0±50%	-	
	OFFL RPRO	NO <sub>2</sub> troposphere	-22%	3.6 Pmolec/cm <sup>2</sup>	
		NO <sub>2</sub> stratosphere	-6%	0.3 Pmolec/cm <sup>2</sup>	
		NO <sub>2</sub> total,low	+5%	1 Pmolec/cm <sup>2</sup>	
		NO <sub>2</sub> total,high	-22%	3 Pmolec/cm <sup>2</sup>	

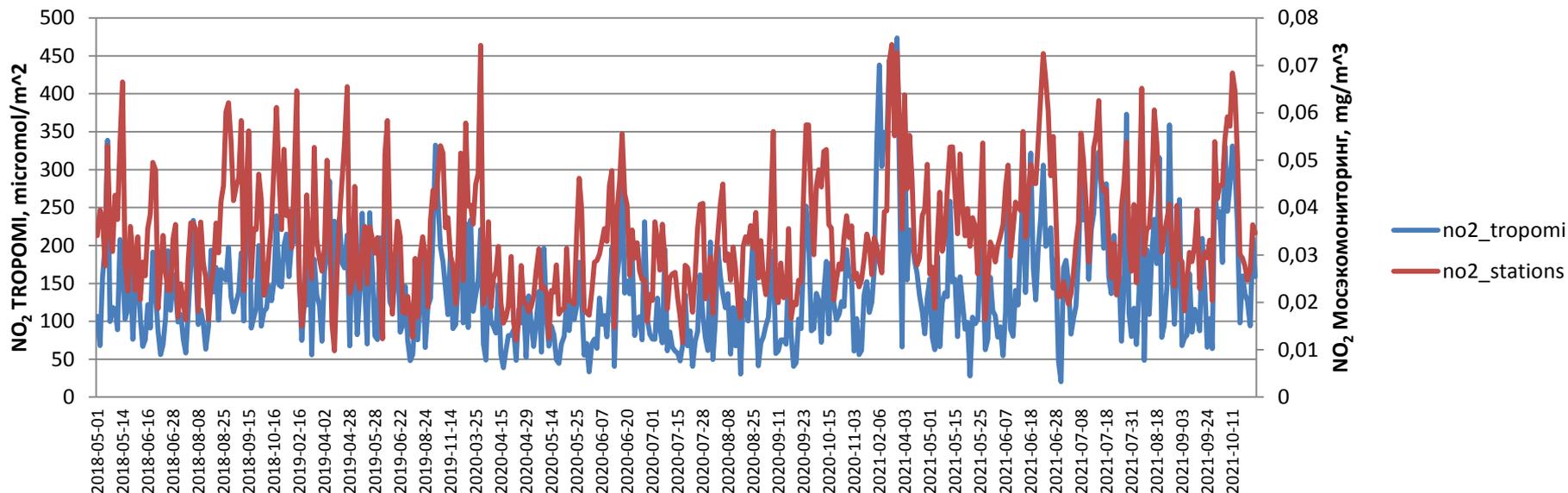
# Сравнение данных TROPOMI с наземными данными

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» (<https://maps.greenpeace.org/air/>). 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.

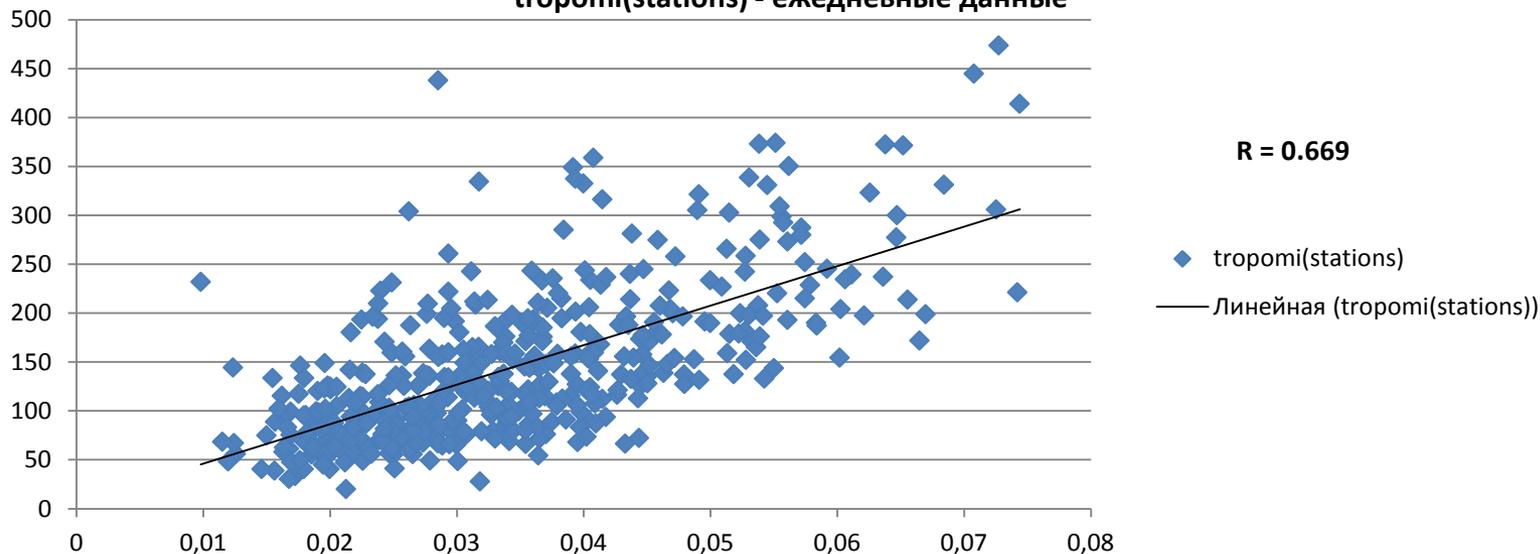


# Сравнение данных ТРОПОМІ с наземными данными

## Среднесуточные концентрации NO<sub>2</sub> Москва

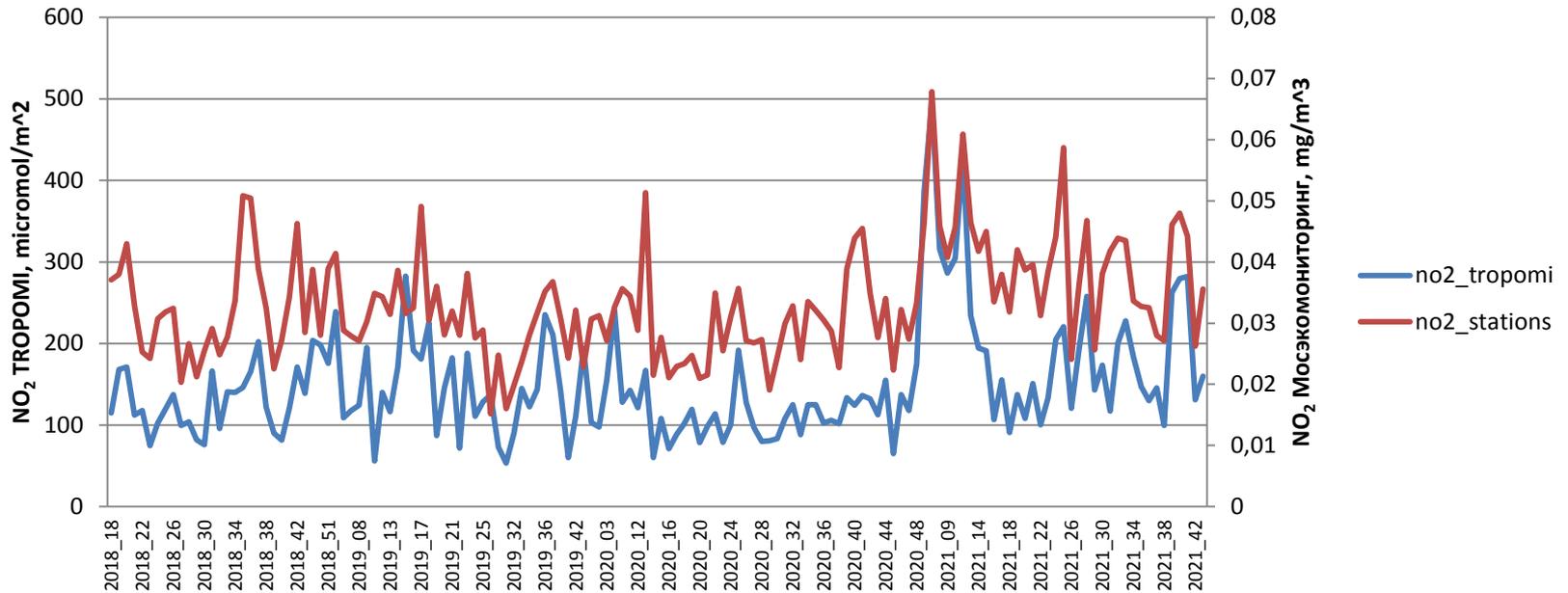


## tropomi(stations) - ежедневные данные

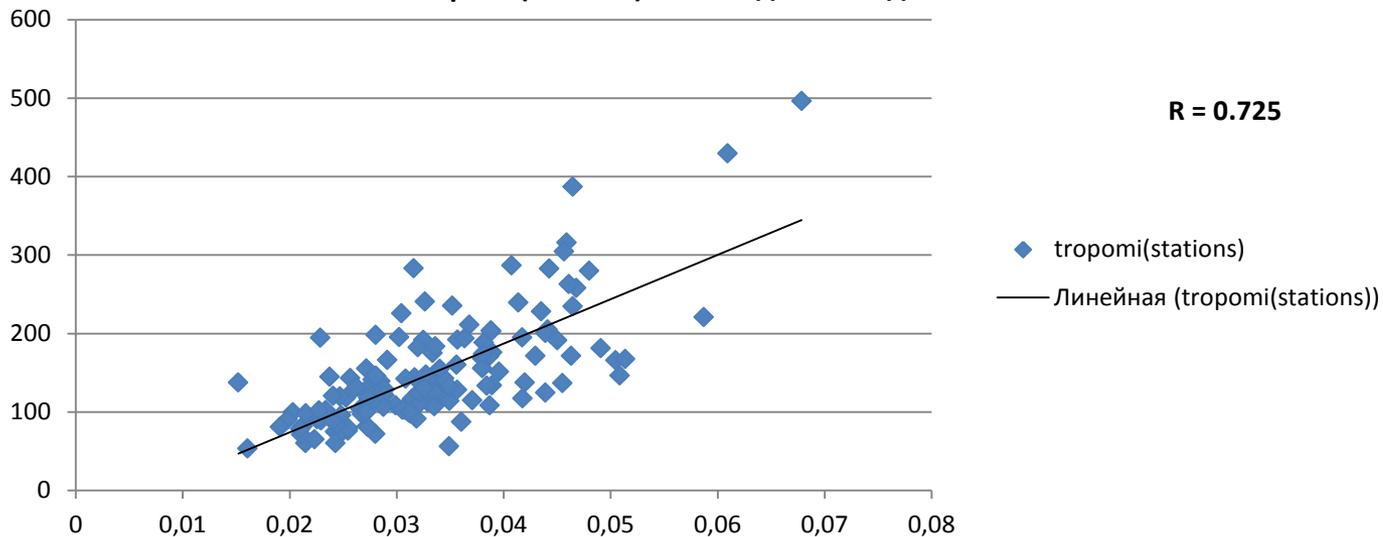


# Сравнение данных TROPOMI с наземными данными

Еженедельные концентрации NO<sub>2</sub> Москва

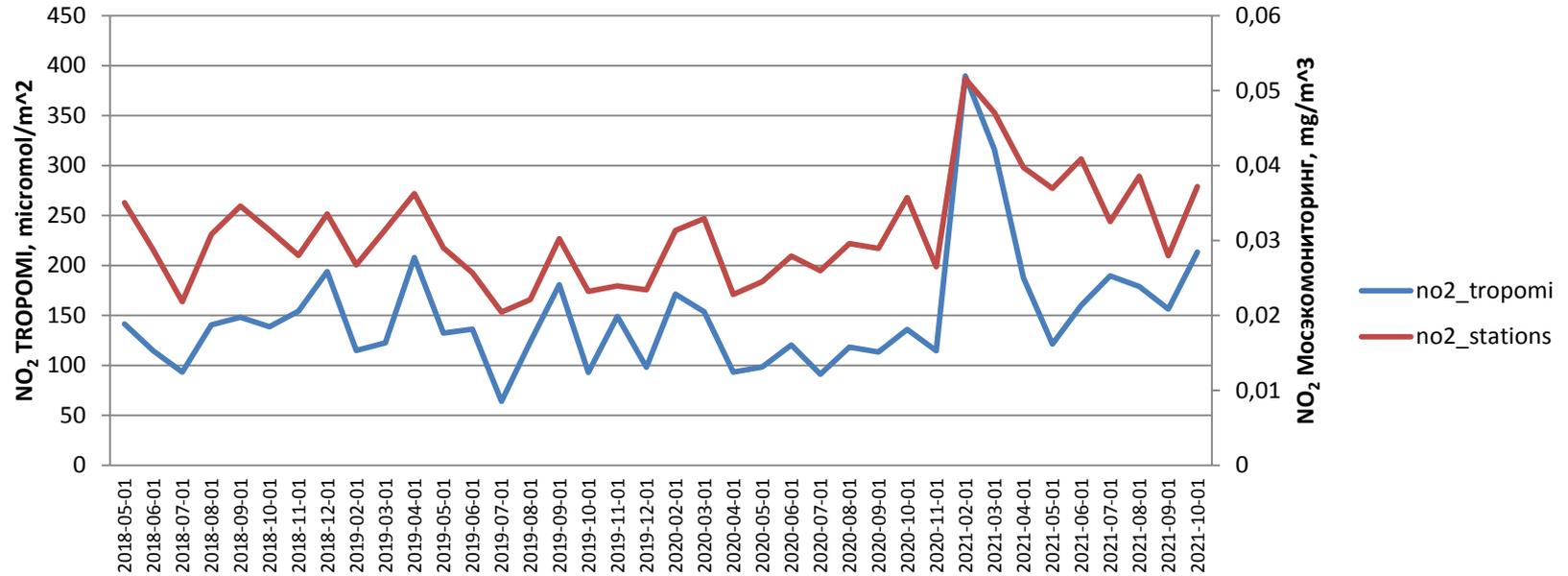


tropomi(stations) - еженедельные данные

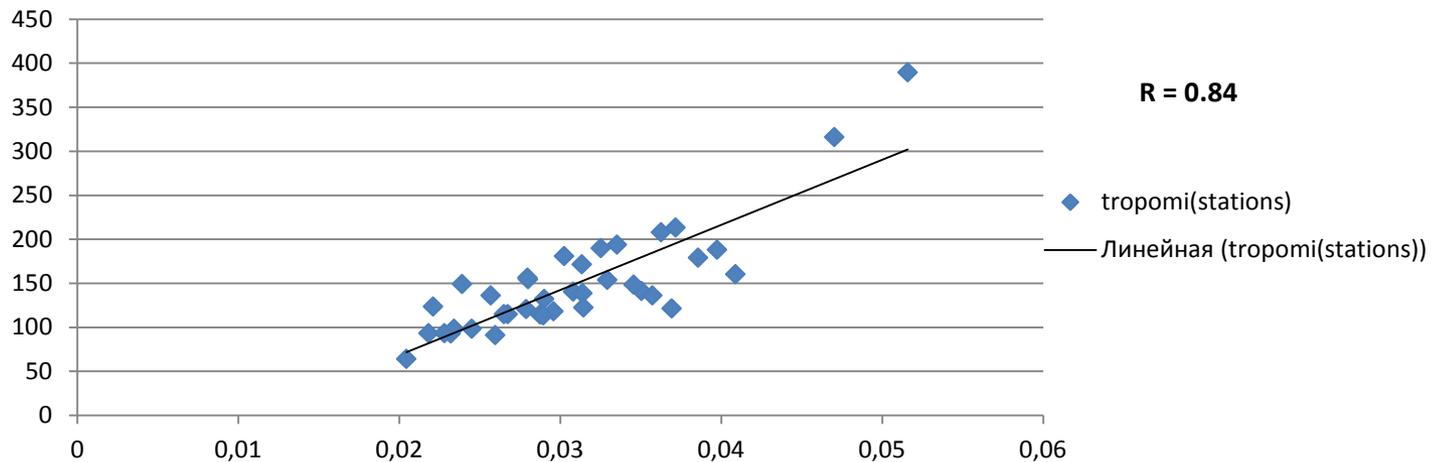


# Сравнение данных ТРОПОМИ с наземными данными

## Среднемесячная концентрация NO<sub>2</sub> Москва

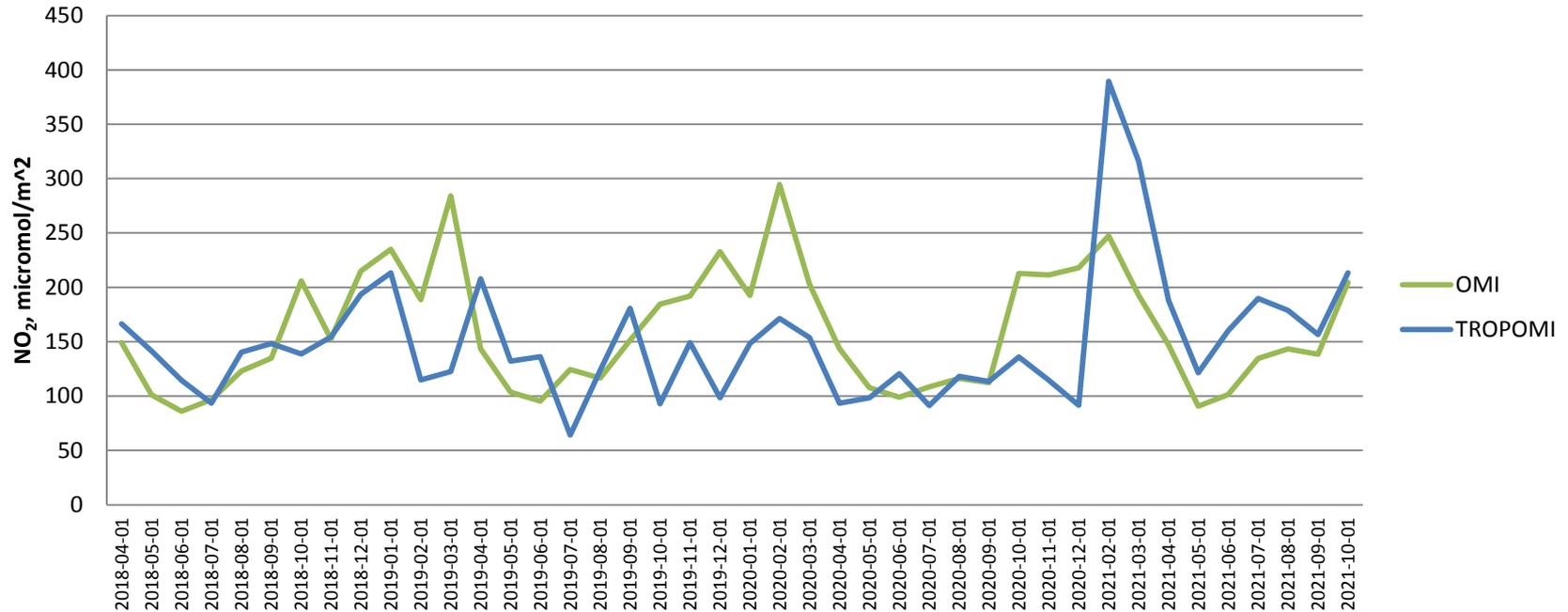


## tropomi(stations) – ежемесячные данные

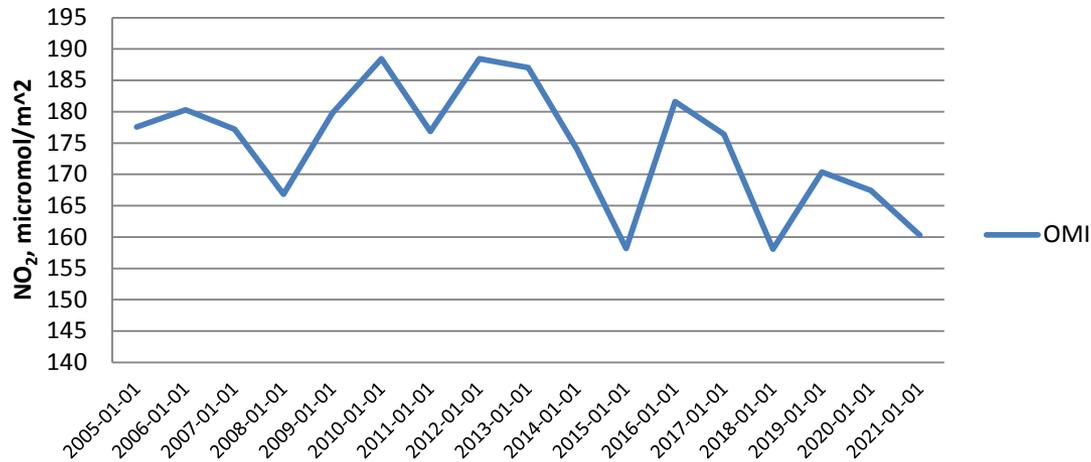


# Сравнение данных TROPOMI с OMI

## Среднемесячные концентрации NO<sub>2</sub> Москва

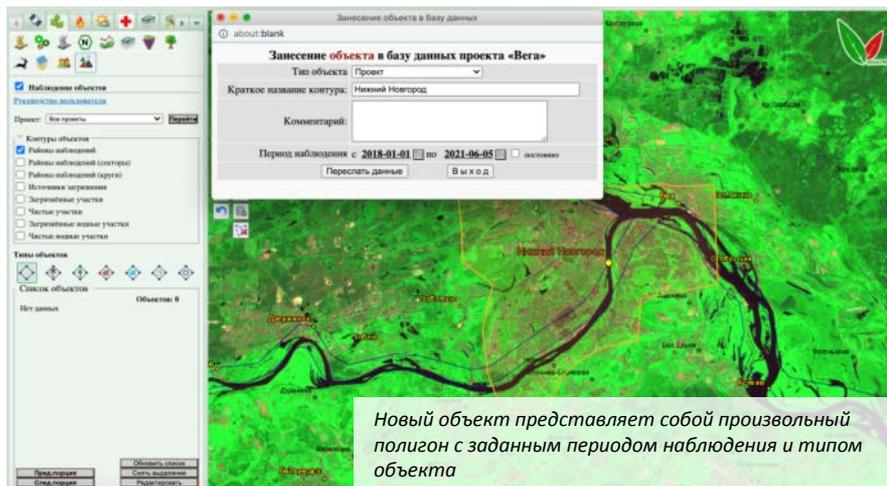


## Многолетний тренд концентрации NO<sub>2</sub> Москва



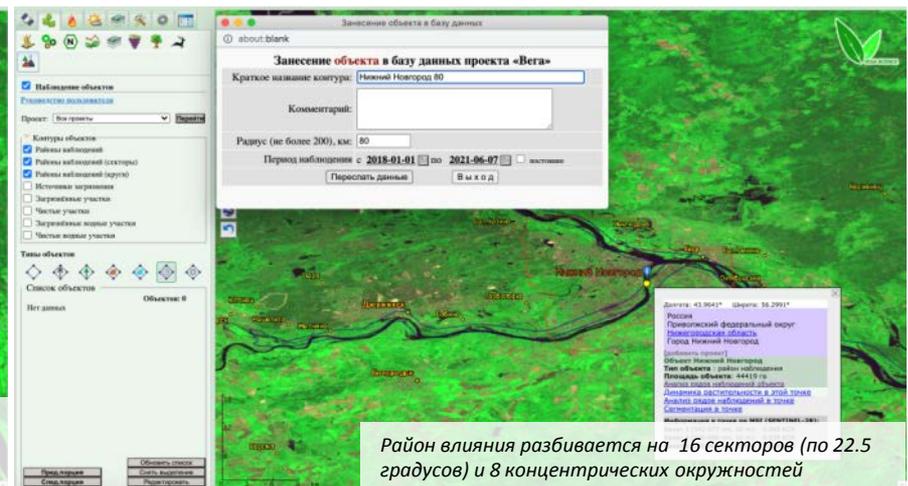
# Инструмент наблюдения за объектами

В ИКИ РАН была разработана технология «объектного» мониторинга, которая позволяет рассчитывать значения различных показателей (продуктов, каналов) внутри произвольных полигонов исследуемых объектов по имеющимся в архивах ЦКП «ИКИ-Мониторинг» по сценам спутниковых данных, в том числе оперативным. С помощью этой технологии, интегрированной в ИС Vega-Science были посчитаны средние концентрации диоксида азота внутри крупных городов России. Также были посчитаны концентрации для зон влияния этих городов, разбитых на секторы и концентрические окружности.



Новый объект представляет собой произвольный полигон с заданным периодом наблюдения и типом объекта

*Занесение нового объекта – города с полигоном*

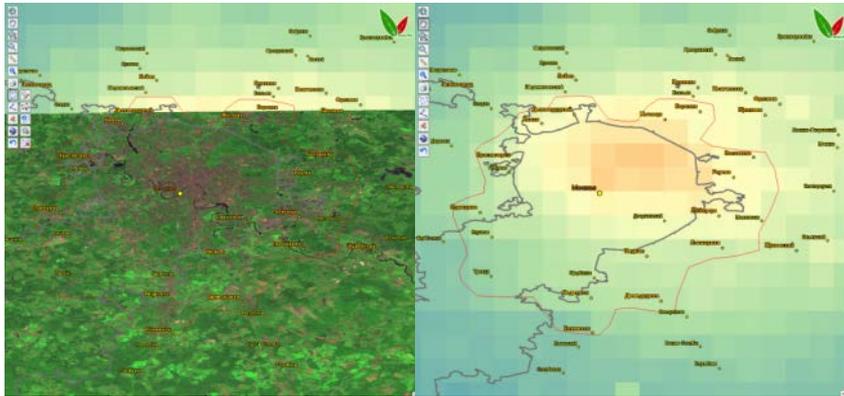


Район влияния разбивается на 16 секторов (по 22.5 градусов) и 8 концентрических окружностей

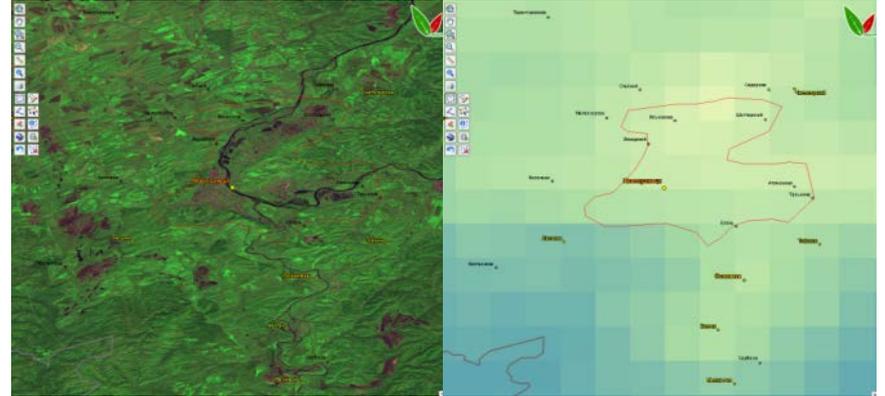
*Занесение зоны влияния вокруг города, разбиваемой на секторы и концентрические окружности*

# Заведение объектов-городов

По композитному изображению со средним многолетним значением концентрации диоксида азота ( $\text{NO}_2$ ) визуально были выбраны города с наибольшей концентрацией. По данным высокого разрешения MSI (Sentinel-2A,B) города были оконтурены, затем в автоматическом режиме был произведён расчёт среднего значения концентрации диоксида азота внутри оконтуренных полигонов по всем еженедельным, ежемесячным, ежегодным и многолетним композитным изображениям TROPOMI (Sentinel-5P), имеющимся в архивах ЦКП «ИКИ-Мониторинг».



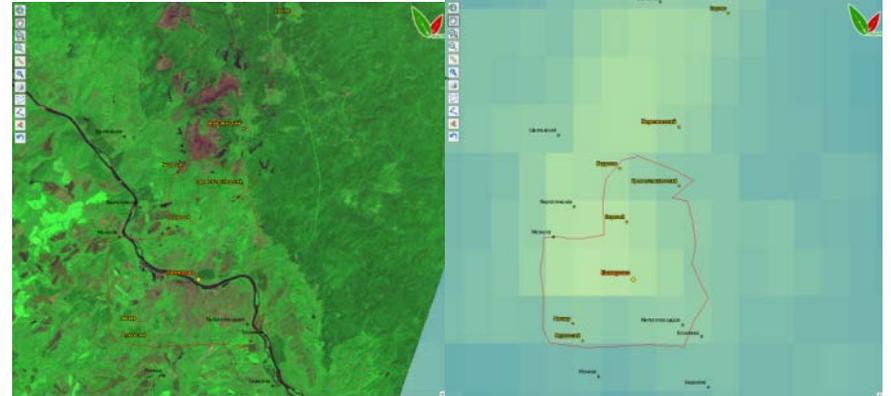
Москва



Новокузнецк



Новосибирск



Кемерово

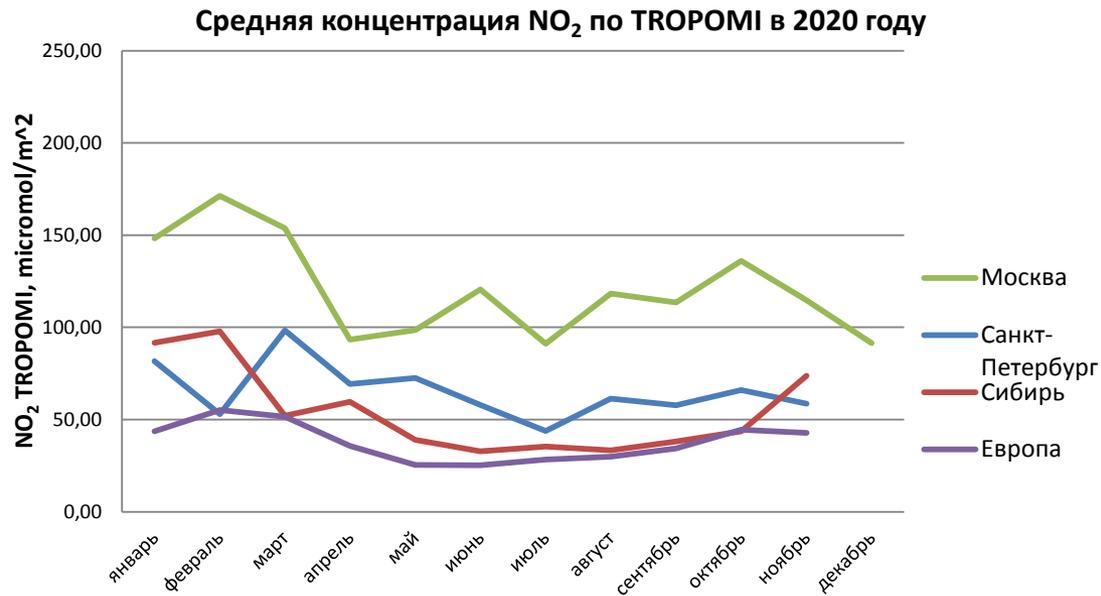
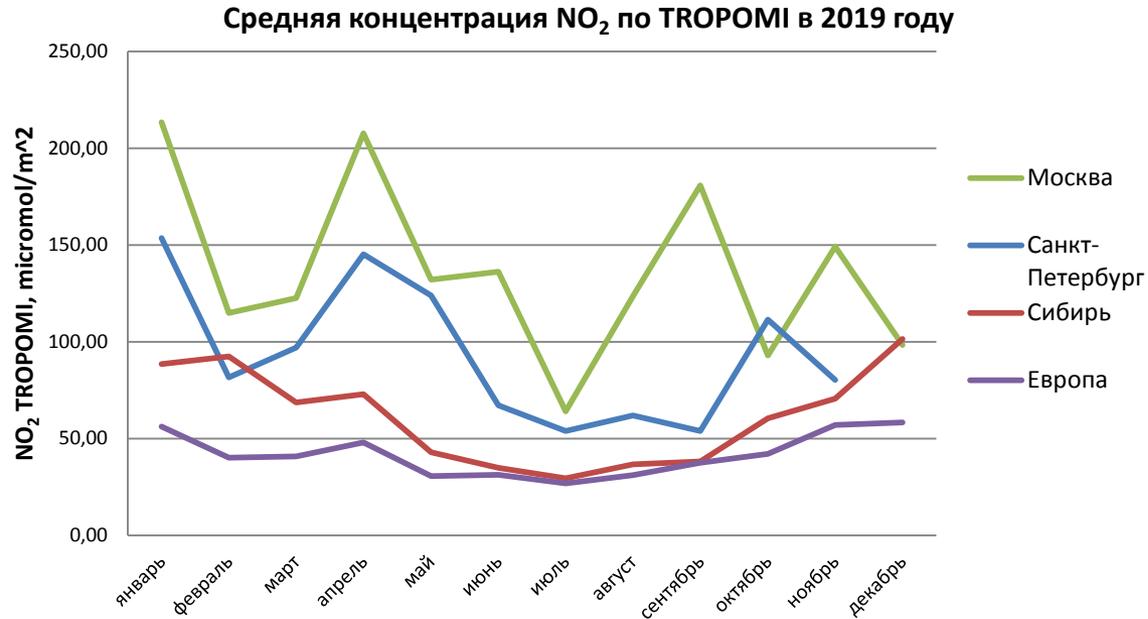
# Средняя концентрация диоксида азота в годовом разрезе

В таблице приведена средняя годовая концентрация диоксида азота для всех выбранных городов с 2018 по 2020 года.

Место в рейтинге		2018	2019	2020
1	Москва	139,31	136,34	125,82
2	Новокузнецк	87,29	103,52	100,47
3	Санкт-Петербург	95,04	92,57	70,47
4	Иркутск	72,33	81,83	82,83
5	Красноярск	65,29	66,82	72,23
6	Кемерово	59,37	72,25	68,50
7	Челябинск	60,20	68,40	67,59
8	Новосибирск	57,84	64,84	70,69
9	Нижний Новгород	58,92	52,15	48,00
10	Екатеринбург	52,66	54,22	61,77
11	Казань	45,29	46,23	42,00
12	Самара	51,60	47,90	45,00
13	Ростов-на-Дону	48,00	57,45	50,90
14	Воронеж	46,53	45,33	48,66
15	Омск	39,04	41,65	45,39

*Средняя годовая концентрация NO<sub>2</sub> по TROPOMI*

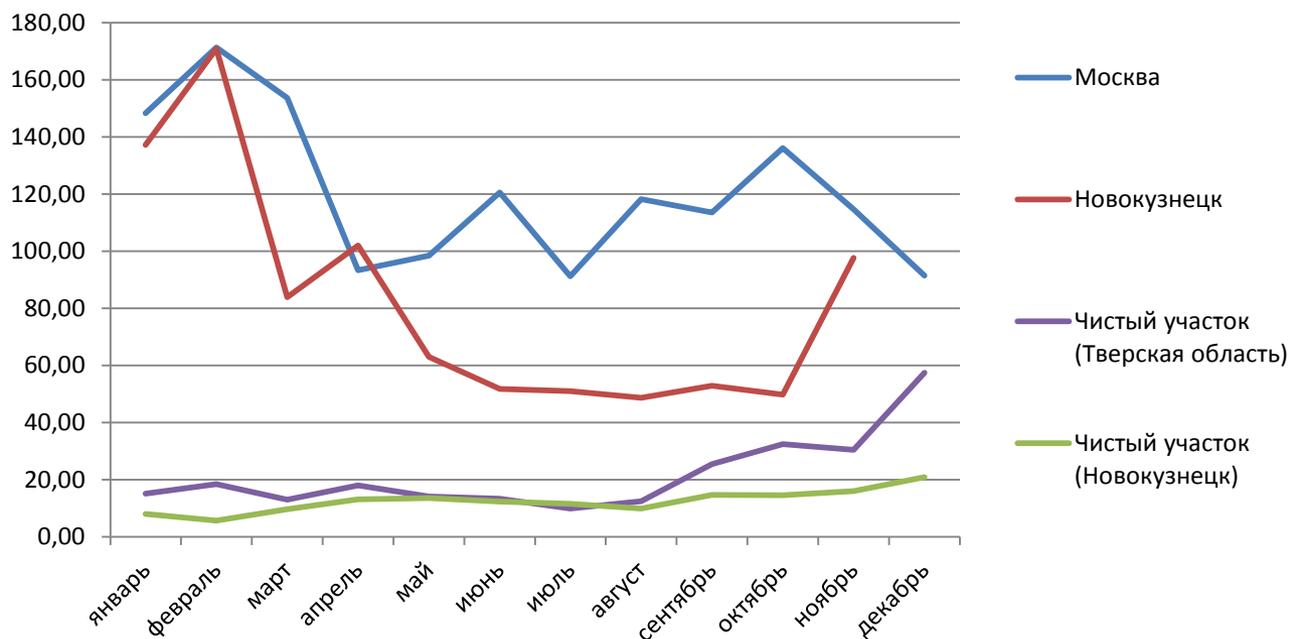
# Средняя концентрация диоксида азота в ежемесячном разрезе



## Сравнение концентрации диоксида азота внутри городов и с концентрацией на малозаселенных участках территорий

Для подтверждения влияния отопительного периода на концентрацию диоксида азота были околтурены «чистые» малозаселенные участки, внутри которых также была посчитана концентрация диоксида азота. Из графика видно, что на малозаселенных территориях она остается примерно одинаковой в течение всего года.

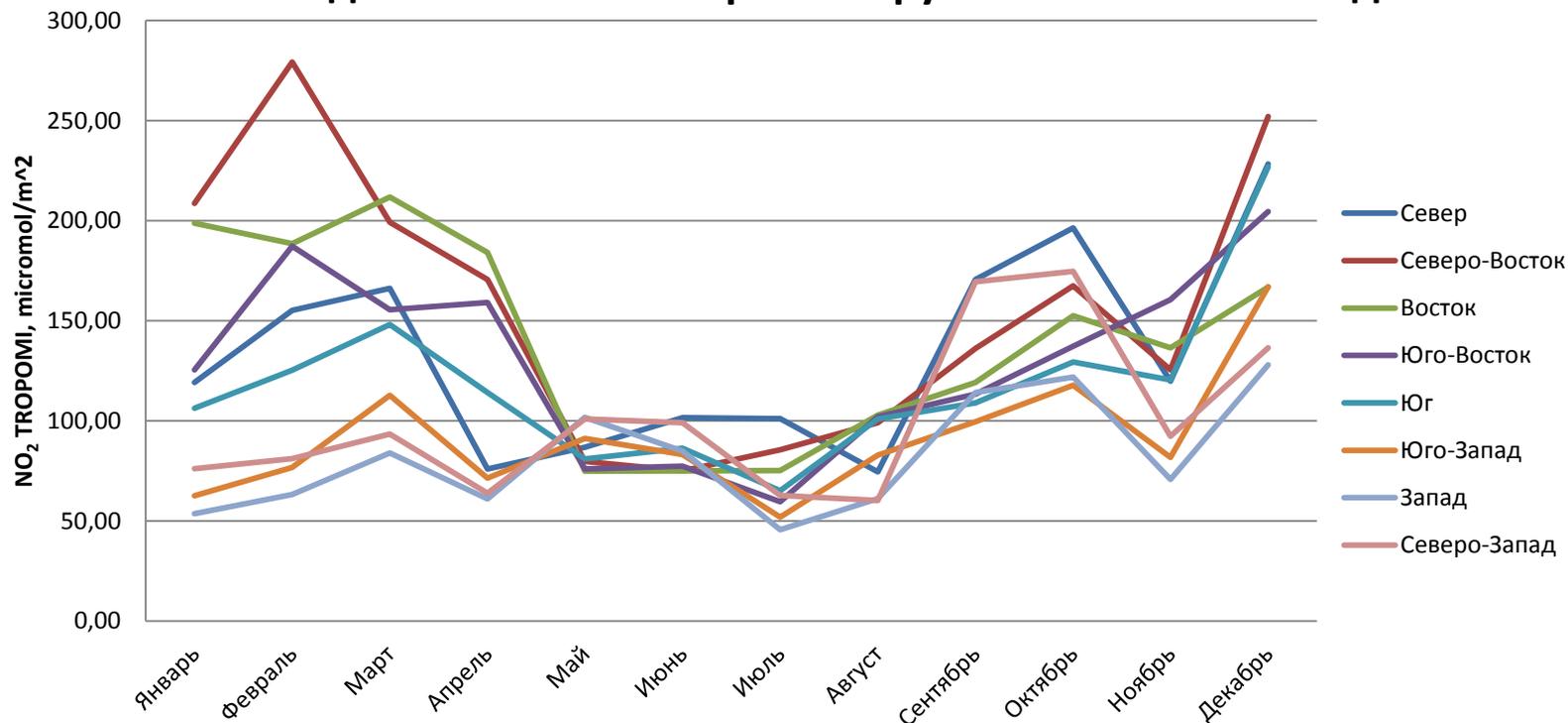
### Сезонная динамика концентрации диоксида азота за 2020 год



## Концентрация диоксида азота вокруг Москвы

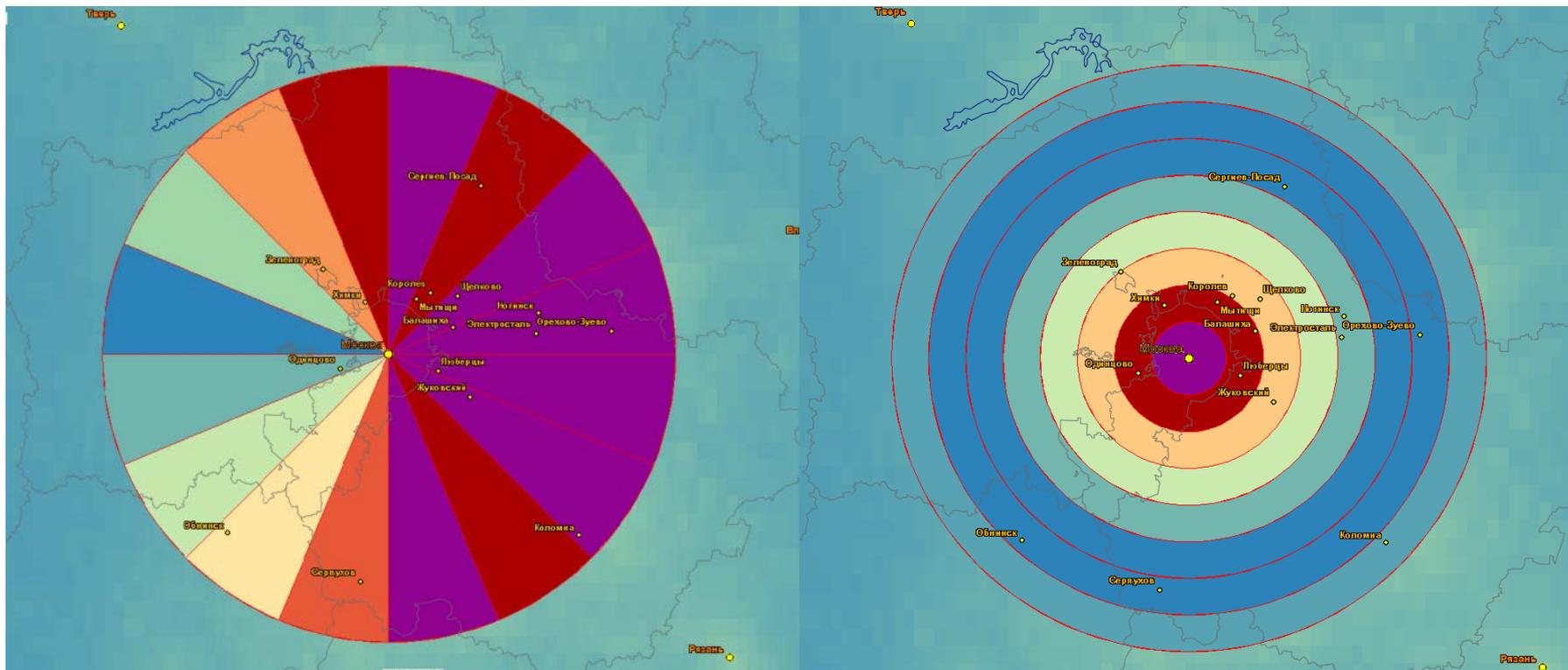
На графике изображена средняя ежемесячная концентрация диоксида за сезон 2020 года по секторам вокруг Москвы (100 км). Из графика видно, что в летние месяцы по всем направлениям концентрации примерно равны, в то время как в зимнее время, в некоторых направлениях наблюдается снижение концентрации (преимущественно на Западе и Юго-Западе), а в некоторых – рост концентраций (Восток и Северо-Восток), что говорит также о присутствии тренда, связанного с отопительным периодом, и значительном ветровом сносе выбросов диоксида азота.

### Сезонная динамика по секторам вокруг Москвы за 2020 год



## Концентрация диоксида азота вокруг Москвы

На изображениях визуализированы рассчитанные средние концентрации диоксида азота внутри секторов и колец вокруг Москвы (100 км) за многолетний период 2018-2021гг. Изображения также подтверждают, что наиболее загрязнённым диоксидом азота является Восточное направление и центр Москвы соответственно.

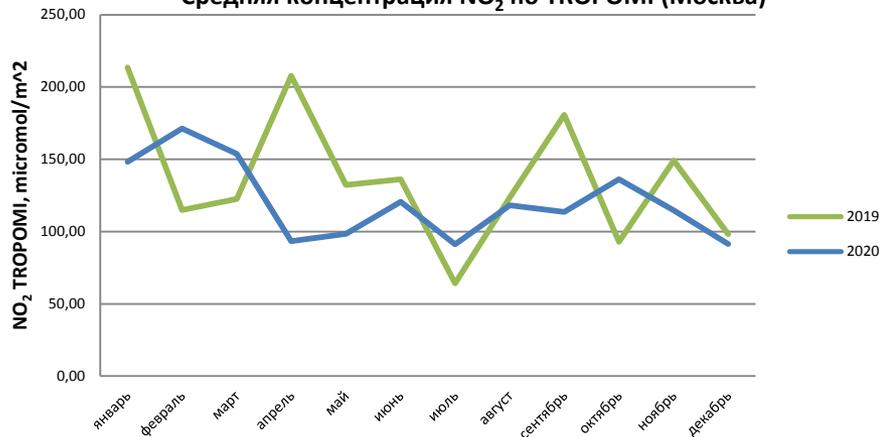


*Распределение многолетней средней концентрации диоксида азота внутри секторов (после «перенормировки») вокруг Москвы(100 км) за 2018-2021 гг.*

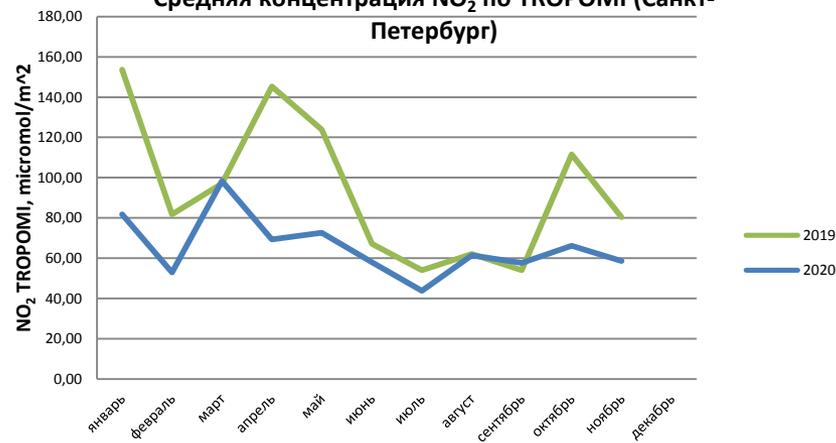
*Распределение многолетней средней концентрации диоксида азота внутри колец (после «перенормировки») вокруг Москвы(100 км) за 2018-2021 гг.*

## Сравнение концентрации диоксида азота в 2019 и 2020 годах

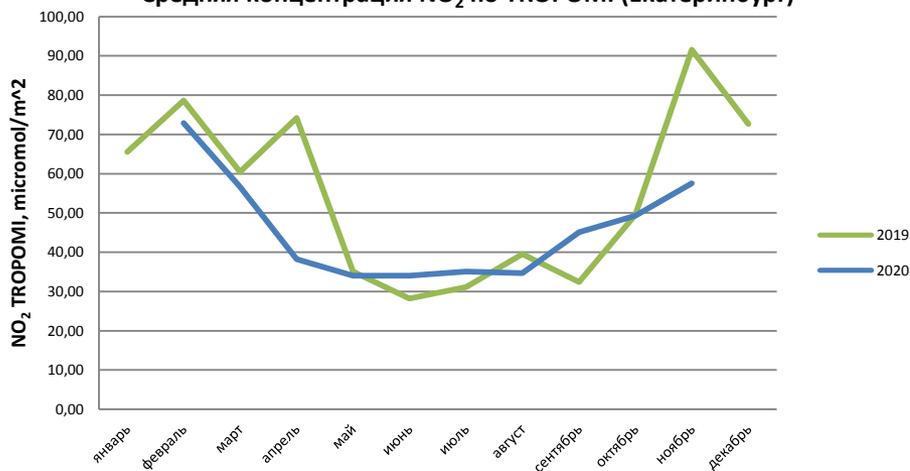
### Средняя концентрация NO<sub>2</sub> по TROPOMI (Москва)



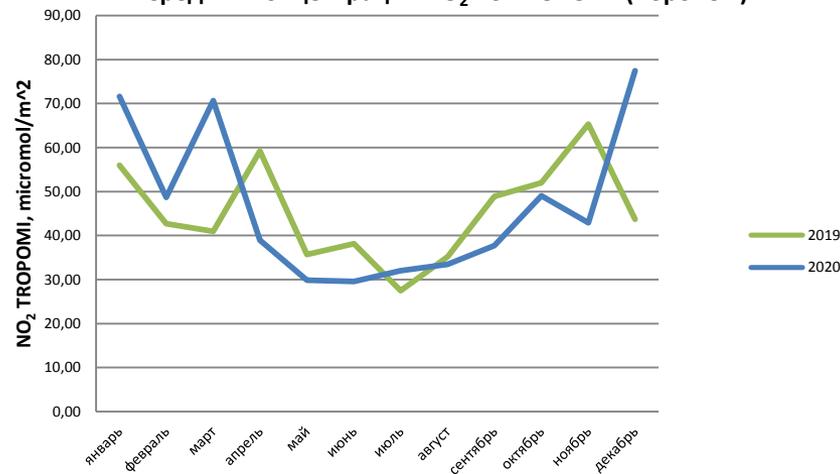
### Средняя концентрация NO<sub>2</sub> по TROPOMI (Санкт-Петербург)



### Средняя концентрация NO<sub>2</sub> по TROPOMI (Екатеринбург)



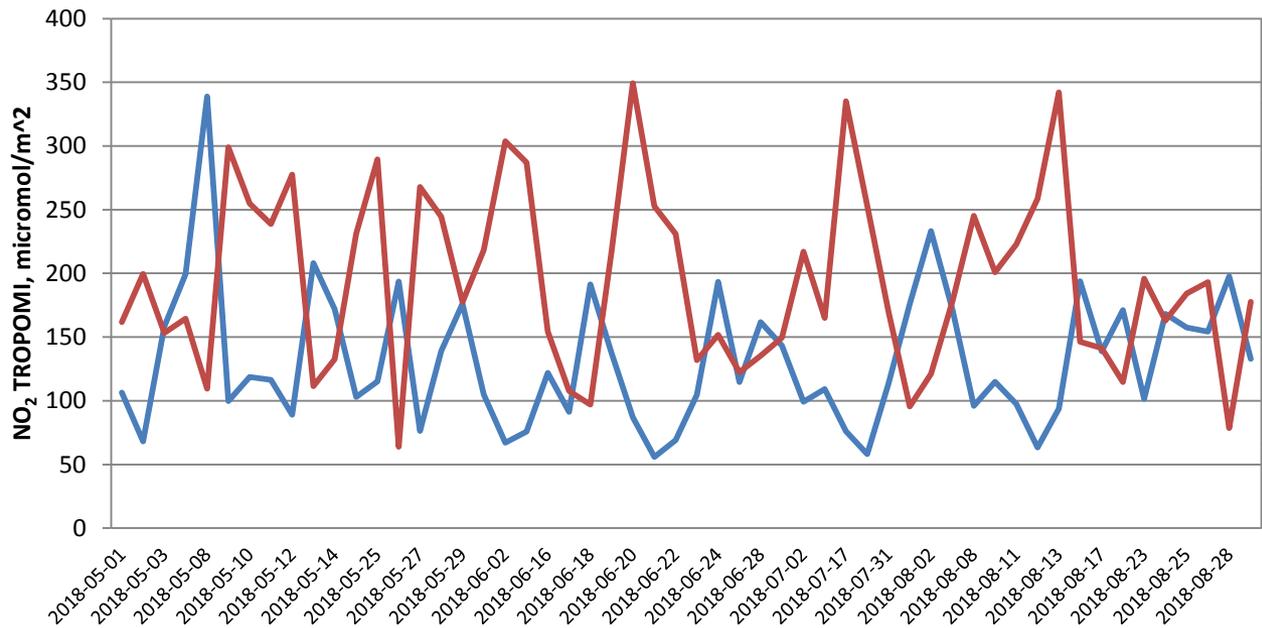
### Средняя концентрация NO<sub>2</sub> по TROPOMI (Воронеж)



В нескольких городах наблюдается значительный спад концентрации диоксида азота в апреле-мае 2020 года, очевидно связанный с ограничительными мерами по Covid-19. Например, в Москве официальный локдаун длился с 30 марта, а 9 июня были отменены цифровые пропуска.

# Анализ концентрации диоксида азота совместно с метеоданными

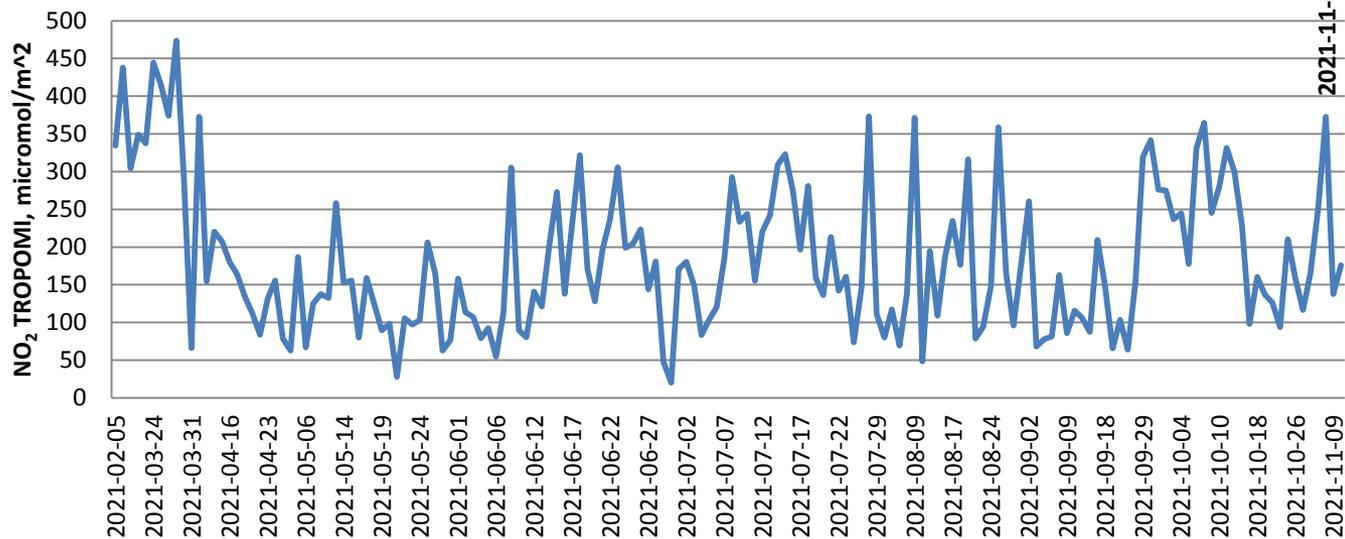
## NO<sub>2</sub> и скорость ветра



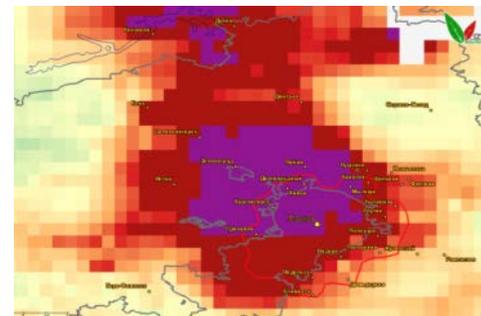
На примере летних месяцев хорошо видно, что как только усиливается ветер, падает концентрация диоксида азота

— no2\_tropomi  
— wind

## NO<sub>2</sub>, TROPOMI



В Москве 2 ноября 2021 года наблюдался радиационный туман, характерный для антициклональной погоды, когда на небе нет облачности и за день почва накапливает тепло. Ночью при отсутствии облачности это тепло резко испаряется, создавая густую пелену тумана. Такие метеоусловия способствуют накоплению выбросов в атмосфере.



# Выводы

- В архивах ЦКП «ИКИ-Мониторинг» доступны данные о концентрации основных газов в различных слоях атмосферы по приборам TROPOMI (Sentinel-5P) и OMI(AURA), имеется возможность работы с временными композитами разной скважности по газовым составляющим
- В ИС Vega-Science интегрированы инструменты для постоянного наблюдения за объектами, с помощью которых в автоматическом режиме можно осуществлять мониторинг загрязнённости городов и других объектов различными газами, в частности диоксидом азота
- верификация спутниковых данных с наземными измерениями усложнена пространственным разрешением данных, толщиной атмосферы и разными единицами измерений, но в первом приближении можно сделать вывод, что концентрация диоксида азота по TROPOMI Copernicus Sentinel-5P коррелирует с данными наземных измерительных станций
- в полученных результатах хорошо видны сезонные тренды, связанные с отопительным периодом, а также в некоторых городах наблюдалось снижение выбросов диоксида азота в период ограничительных мер
- на уровень концентрации диоксида азота в пределах города помимо источников загрязнения большое влияние оказывают метеоусловия, их также необходимо учитывать при анализе
- данные TROPOMI Copernicus Sentinel-5P могут стать основой для мониторинга качества воздуха на больших территориях при отсутствии наземных станций контроля.

# Спасибо за внимание!

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекта № 19-37-90114) с использованием возможностей ЦКП «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др. 2019), поддерживаемого в рамках темы «Мониторинг» Минобрнауки (госрегистрация № 01.20.0.2.00164). Автоматизированное формирование архивов спутниковых данных прибора TROPOMI осуществлялось при поддержке РФФИ (проект № 18-29-24121)

Авторы выражают особую благодарность Алексею Дроздовскому за предоставленные данные наземных измерительных станций

[konstantinova.anouk@gmail.com](mailto:konstantinova.anouk@gmail.com)  
[bril@d902.iki.rssi.ru](mailto:bril@d902.iki.rssi.ru)