

**Возможности работы с информацией о
малых газовых составляющих,
получаемой на основе данных
спутникового мониторинга в ЦКП «ИКИ-
Мониторинг»**

*Бриль А.А., Константинова А.М., Бурцев М.А., Лупян Е.А.
ИКИ РАН, Москва*

Двадцать первая международная конференция "СОВРЕМЕННЫЕ
ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ
КОСМОСА"



Введение

- ❑ Мониторинг состояния и динамики малых газовых составляющих (МГС) атмосферы необходим для решения широкого круга научных и прикладных задач. Многие из этих задач требуют получения информации о распределении и динамике МГС на большие территории. При этом в силу достаточно большой пространственной и временной изменчивости концентраций МГС необходимо регулярное и достаточно частое получение информации. Решение данных задач фактически невозможно без использования дистанционных, в первую очередь спутниковых, наблюдений.
- ❑ Во многих случаях возникает необходимость в комплексном анализе информации о МГС, получаемой на основе различных спутниковых систем, а также анализе данной информации совместно с другими спутниковыми, метеорологическими и наземными данными. Для реализации таких возможностей на базе Центра коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг» создана подсистема (Подсистема) работы с различной информацией о МГС, получаемой на основе спутниковых наблюдений.

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 ₂)	2018-06-26 – по н.в.	Концентрация диоксида серы в полном столбе
Ozone (O ₃)	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 ₄)	2018-04-30 – по н.в.	Концентрация метана в полном столбе
Nitrogen dioxide (NO ₂)	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_3 , NO_2 , SO_2 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_2)	2004-10-02 – по н.в.	Концентрация диоксида серы в полном столбе
UV Aerosol Index	2006-07-01 – по н.в.	Аэрозольный индекс состояния атмосферы
Nitrogen dioxide (NO_2)	2006-07-01 – по н.в.	Концентрация диоксида азота в тропосфере

Таблица доступных продуктов Level 2 OMI

Информационные продукты о концентрации МГС

Для мониторинга состояния воздуха в информационной системе Vega-Science (<http://sci-vega.ru/>, семейство Созвездие-Вега), 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/>)

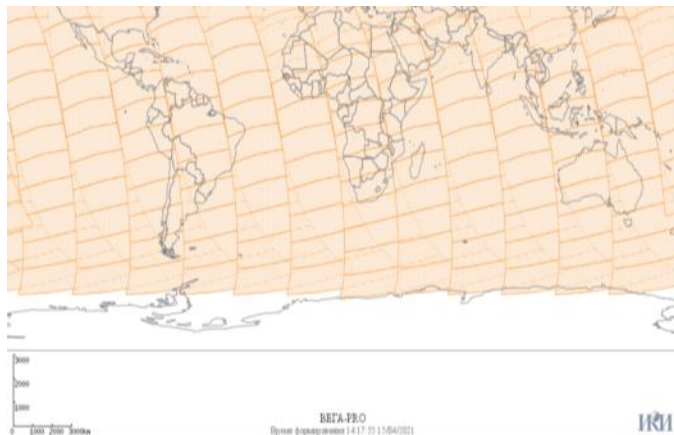
SENTINEL-5P - Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu/>)

Состав информационных продуктов о концентрации МГС в архивах ЦКП «ИКИ-Мониторинг»

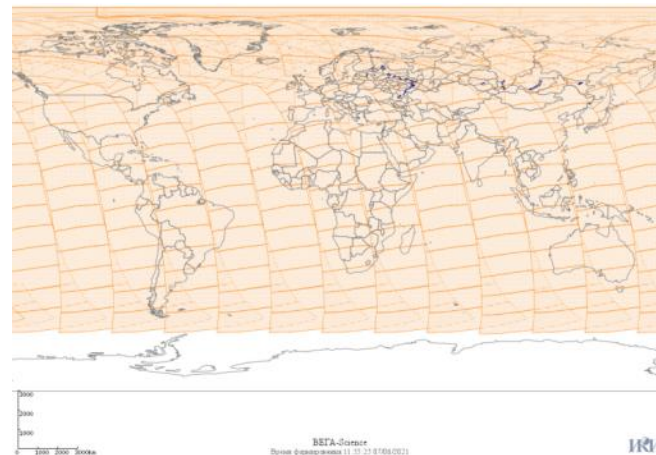
Спутник	Прибор	Газ	Доступность данных в архивах ЦКП
Sentinel 5P	TROPOMI	NO ₂	2018 по настоящее время
Sentinel 5P	TROPOMI	SO ₂	2018 по настоящее время
Sentinel 5P	TROPOMI	O ₃	2018 по настоящее время
Sentinel 5P	TROPOMI	CO	2018 по настоящее время
Sentinel 5P	TROPOMI	Aerosol	2018 по настоящее время
Sentinel 5P	TROPOMI	CH ₄	2018 по настоящее время
AURA	OMI	SO ₂	2006 - по настоящее время
AURA	OMI	NO ₂	2006 - по настоящее время
AURA	OMI	Aerosol	2008 - по настоящее время

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

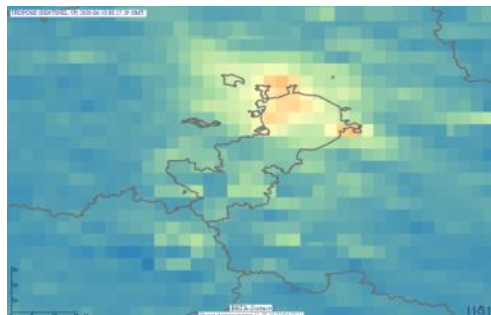
В архивах ЦКП«ИКИ-Мониторинг» доступны данные TROPOMI с апреля 2018 года и данные OMI с декабря 2004 года. Доступны продукты по газам: диоксид серы, диоксид азота, аэрозольный индекс, озон, метан, угарный газ.



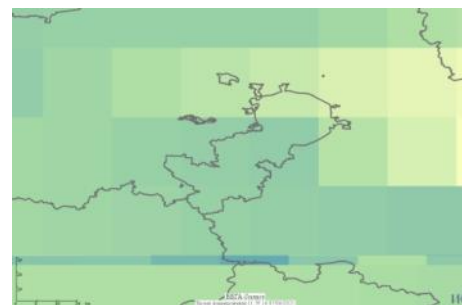
Покрытие сеансами TROPOMI на один день в архивах ЦКП«ИКИ-Мониторинг»



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)

Наращивание объемов архивов ЦКП «ИКИ-Мониторинг» за счет увеличения числа спутниковых систем ДЗЗ

- 1. OMPS (озон, аэрозоль, диоксид серы,), стоит на NPP и последующих JPSS;
- 2. CRiS (парниковые газы, в основном оксид и диоксид углерода, плюс верт. профили температуры, давления и влажности), стоит на NPP и последующих JPSS;
- 3. MOPITT (CO), стоит на Терре;
- 4. MISR (аэрозоль), стоит на Терре;

Исходные данные

Стандартные информационные продукты с информацией о концентрации МГС формируются и распространяются Центрами распространения данных в двух вариантах:

- NRTI (Near real time interval) – продукты, предоставляемые в режиме реального времени, как правило в течении 3 часов после измерения. Такие продукты строятся на основе данных уровня L1B.
- RPRO (ReProcessing) – продукты более высокого уровня обработки. Алгоритмы расчёта таких продуктов включают в себя дополнительные параметры, например, метеоданные.

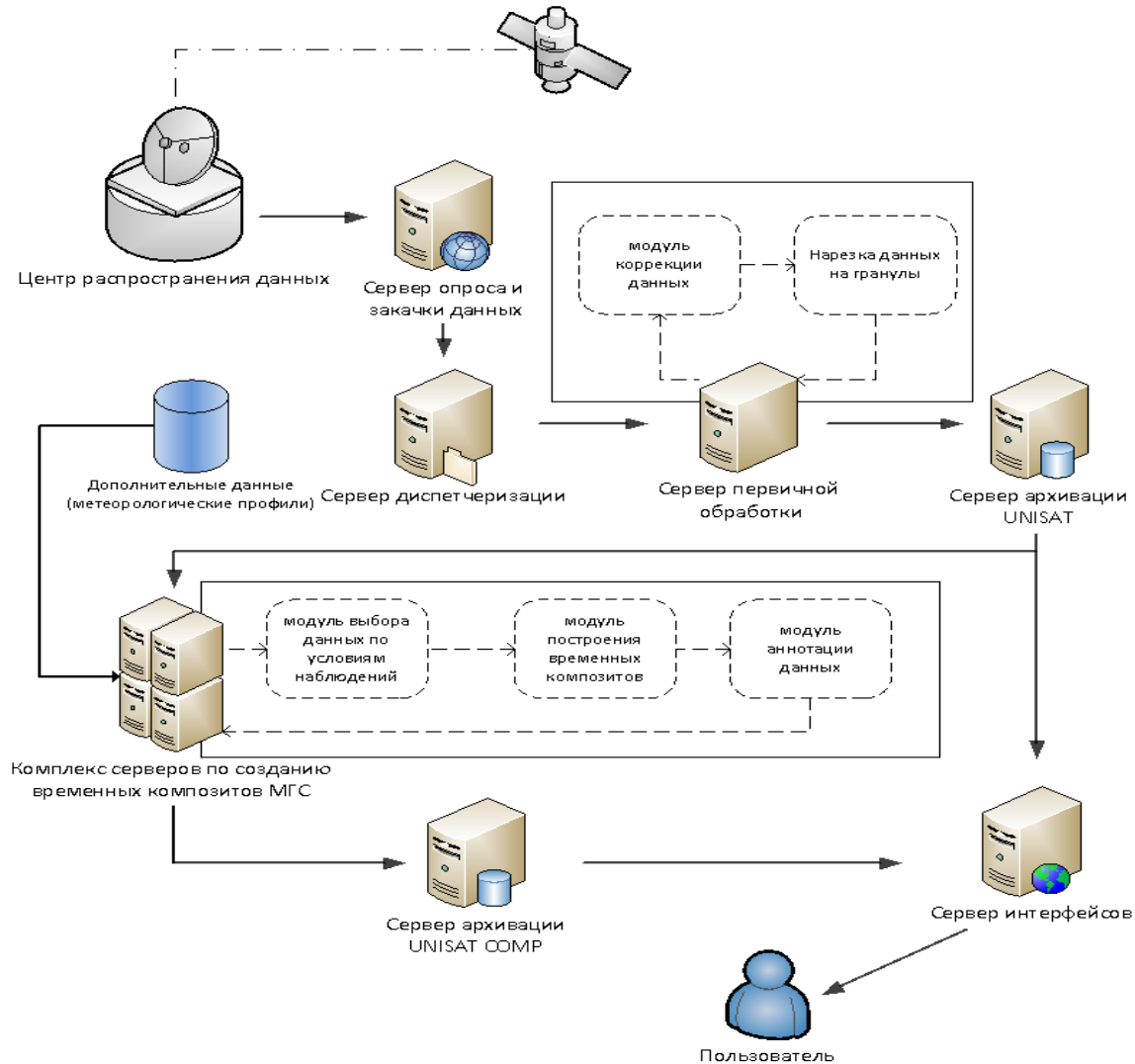
Продукты высокого уровня обработки представляются Центрами в виде файла, содержащего информацию с одного витка в проекции пролета, в то время как продукты, близкие к реальному времени, в виде пятиминутных гранул в проекции пролета. Продукты NRTI обычно используются только для получения оперативных сведений о текущих распределениях МГС и аэрозоля. Для проведения анализа динамики МГС и аэрозоля в атмосфере используются обычно продукты более высокого уровня обработки, а также информация, полученная на их основе.

Построение продуктов композитов МГС

Для удобства использования и анализа динамики состояния атмосферы, в том числе для построения рядов долговременных измерений, предпочтительно использовать композитные изображения за различные временные промежутки. Такие информационные продукты (временные композиты) обычно представляют собой изображения, покрывающие какую-то территорию, в каждой точке которых содержится информация о какой-либо характеристике, полученной на основе всех имеющихся в данной точке наблюдений за заданный период времени.

На базе языка программирования python с использованием стандартных библиотек работы с растровыми и векторными данными создано автоматизированное программное обеспечение по построению таких статистических временных композитов. При этом созданный программный код позволяет создавать статистические композиты за любой промежуток времени и может быть применен к данным любых спутниковых систем.

Блок-схема организации обработки, архивации и представления продуктов по МГС



Построение временных композитов по МГС

Программное обеспечение по построению временных композитных изображений состоит из нескольких модулей:

- *Модуль предварительной обработки (МПО)*
- *Модуль построения временных композитов (МПВК)*
- *Модуль усвоения временных композитов в архивах ЦКП «ИКИ-Мониторинг». (МУВК)*

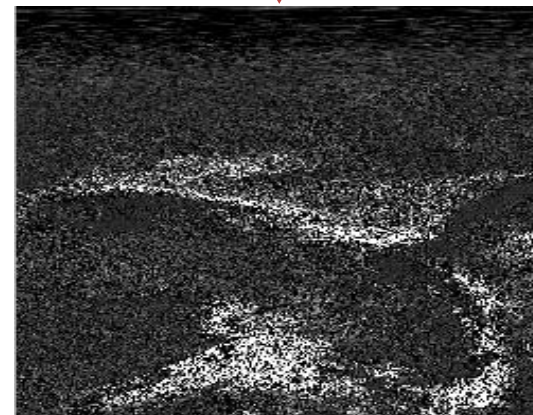
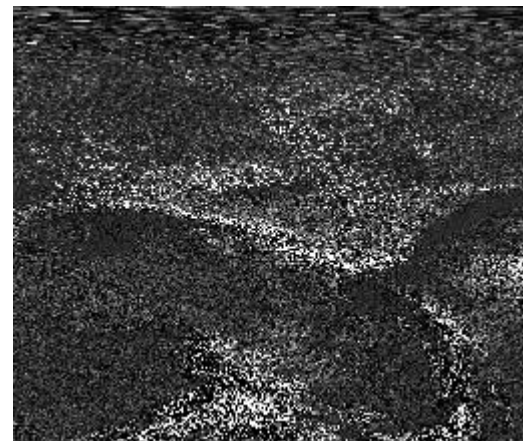
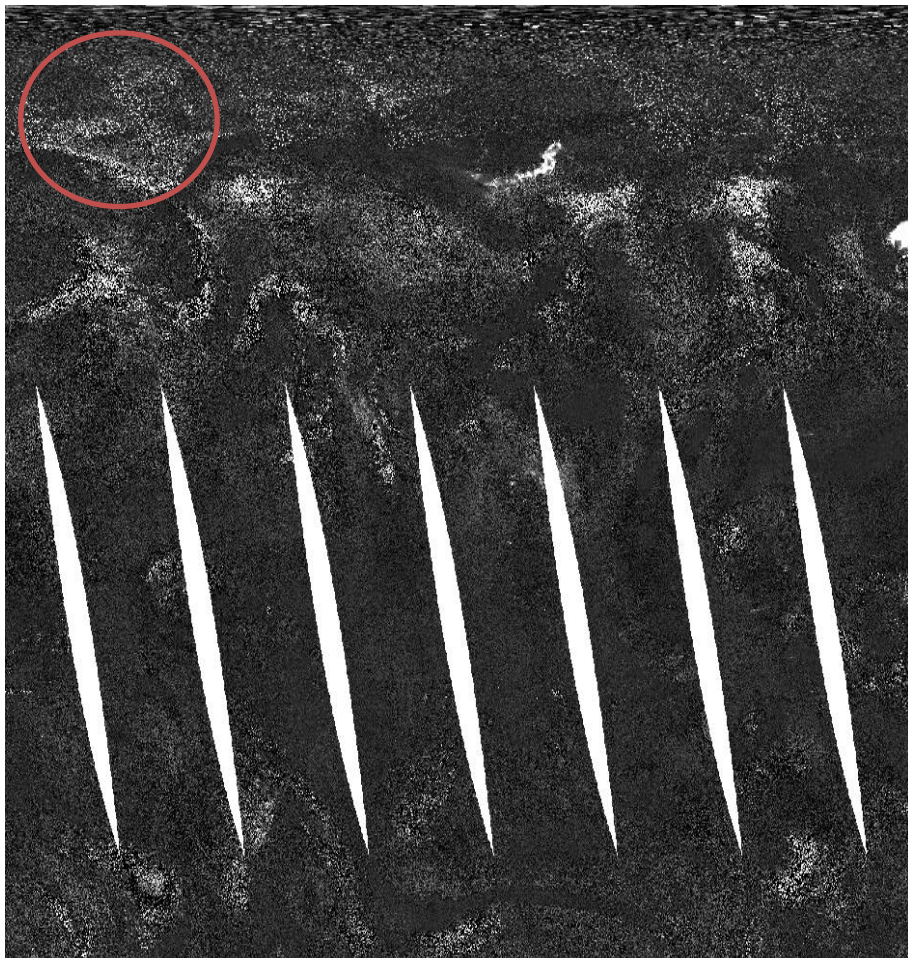
Модуль предварительной обработки

Модуль предварительной обработки обеспечивает дополнительную очистку и коррекцию стандартных продуктов, поступающих из Центров.

Такая обработка может требоваться для некоторого типа продуктов. Так, например, в ЦКП «ИКИ-Мониторинг» такая обработка проводится для стандартных продуктов по концентрации SO_2 и обеспечивает более корректный учет условий наблюдений.

Для этого разработан алгоритм, основанный на методе анализа гистограмм. Суть метода заключается в анализе распределения значений концентрации SO_2 при разных углах наблюдения. Данный алгоритм позволяет существенно сократить шумовые эффекты, наблюдаемые при использовании стандартного продукта по SO_2 .

Пример применения МПО для данных SO_2

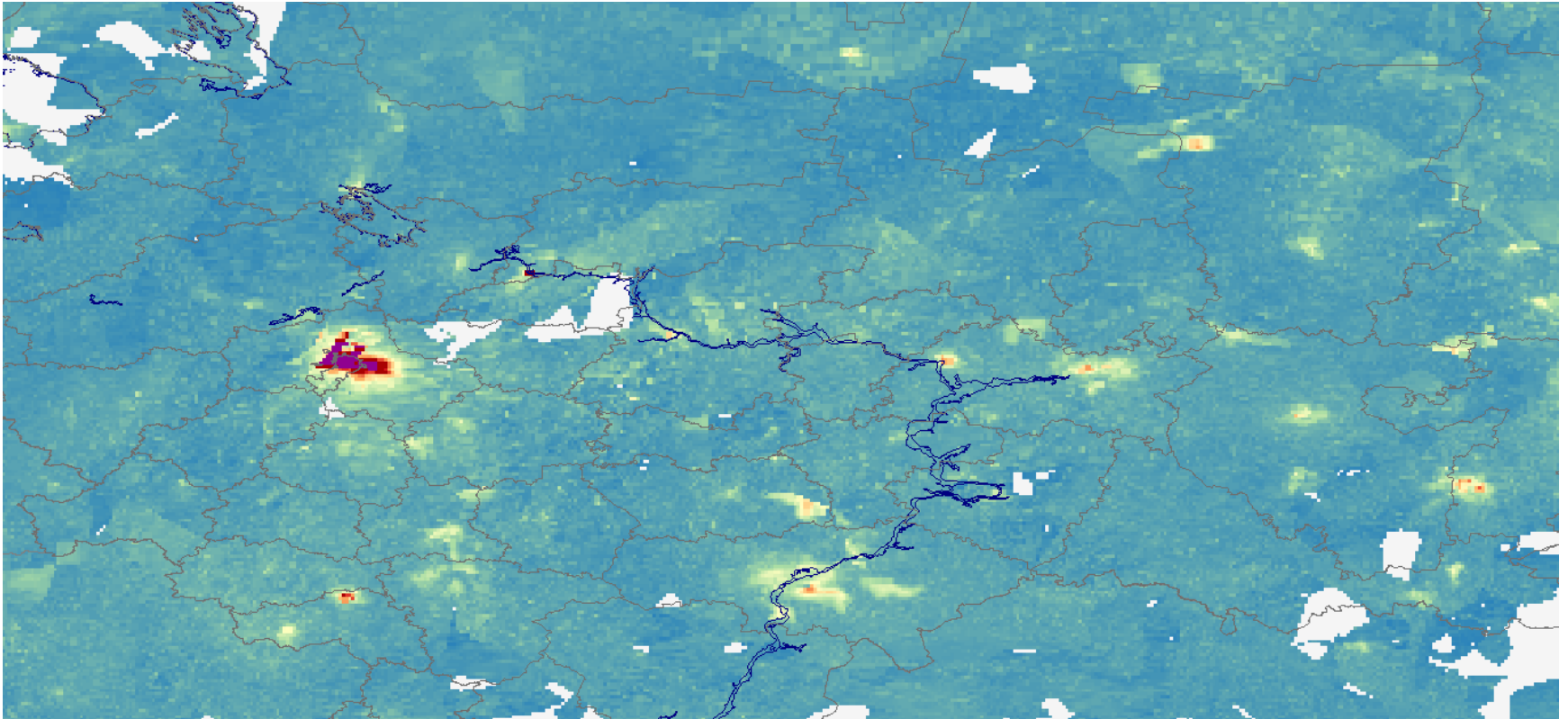


Фильтрация шумов на стандартном продукте диоксида серы по прибору TROPOMI за 11 апреля 2023 года

Модуль построения временных композигов

- *Модуль построения временных композигов (МПВК)* осуществляет выбор данных, необходимых для построения конкретного композита, из архивов ЦКП «ИКИ-Мониторинг». При этом при необходимости возможен учет дополнительных условий наблюдений, например, метеоусловий.
- Основой МПВК является программный модуль, реализованный на базе языка программирования python3 с использованием стандартных библиотек работы с растровыми и векторными данными.
- Данный модуль позволяет формировать композитное изображение за любой промежуток времени по заданным правилам построения конкретного временного композита.

Пример применения МПВК с учетом дополнительных условий наблюдения



Композитное изображение за июль месяц 2022 по данным прибора TROPOMI, содержащее информацию о максимальной концентрации NO_2 с условием выбора измерений концентраций только в безветренные дни (когда скорость ветра менее 1.5 м/с)

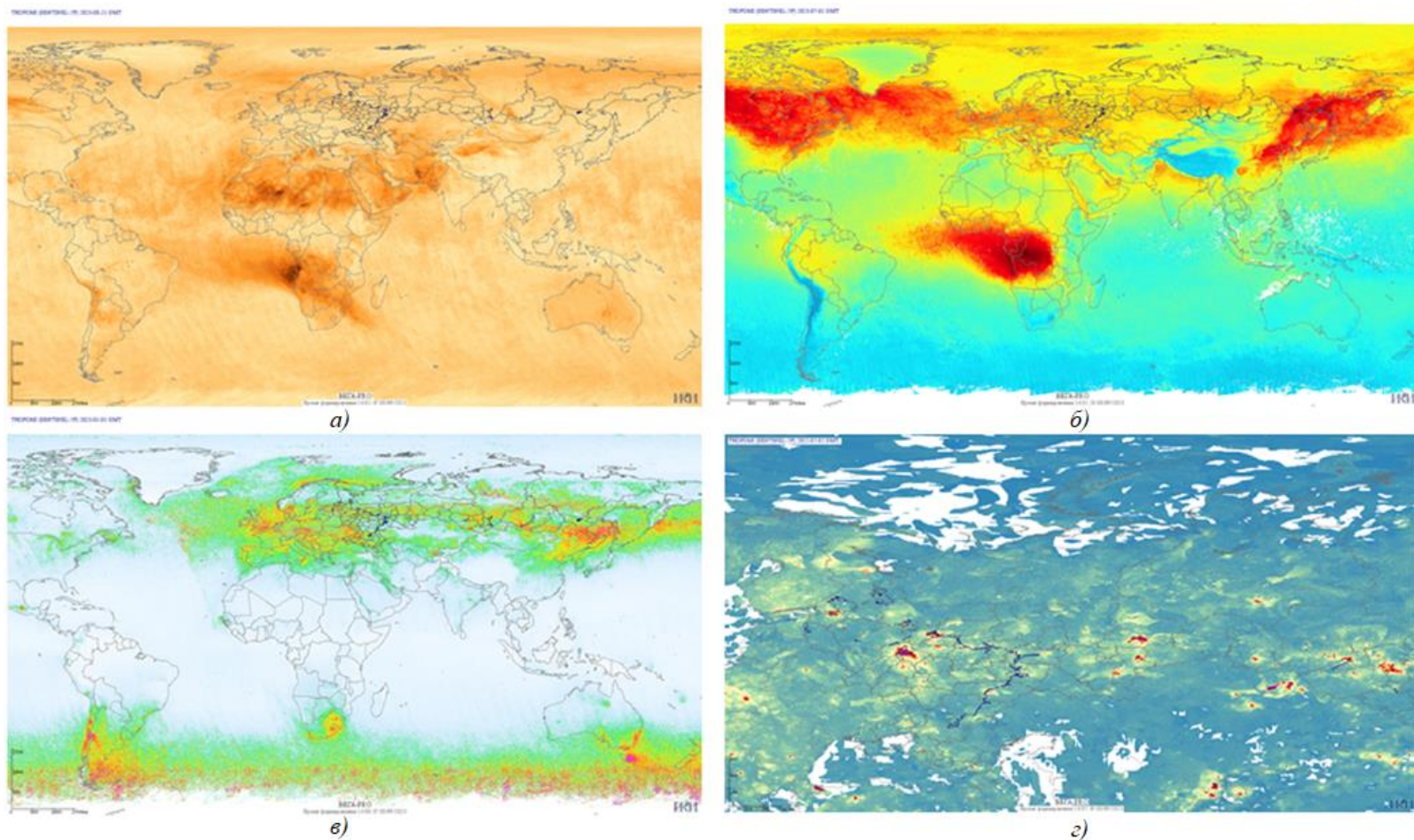
*Модуль усвоения временных композитов в архивах ЦКП
«ИКИ-Мониторинг».*

- Модуль обеспечивает аннотацию данных, то есть формирование метаинформации к ним, включающей: название спутника, прибора, время начала или конца съемки и хэш-сумму для проверки целостности данных, а также автоматическое помещение созданных продуктов в архивы ЦКП «ИКИ-Мониторинг». При этом модуль выполняет процедуры контроля состояния архивов на предмет наличия одинаковых продуктов, осуществляет контроль актуальности вводимых и уже существующих в архивах продуктов, для обеспечения погружения в архивы наиболее актуальных продуктов.

. Состав архивов временных композитов в архивах ЦКП «ИКИ-Мониторинг»

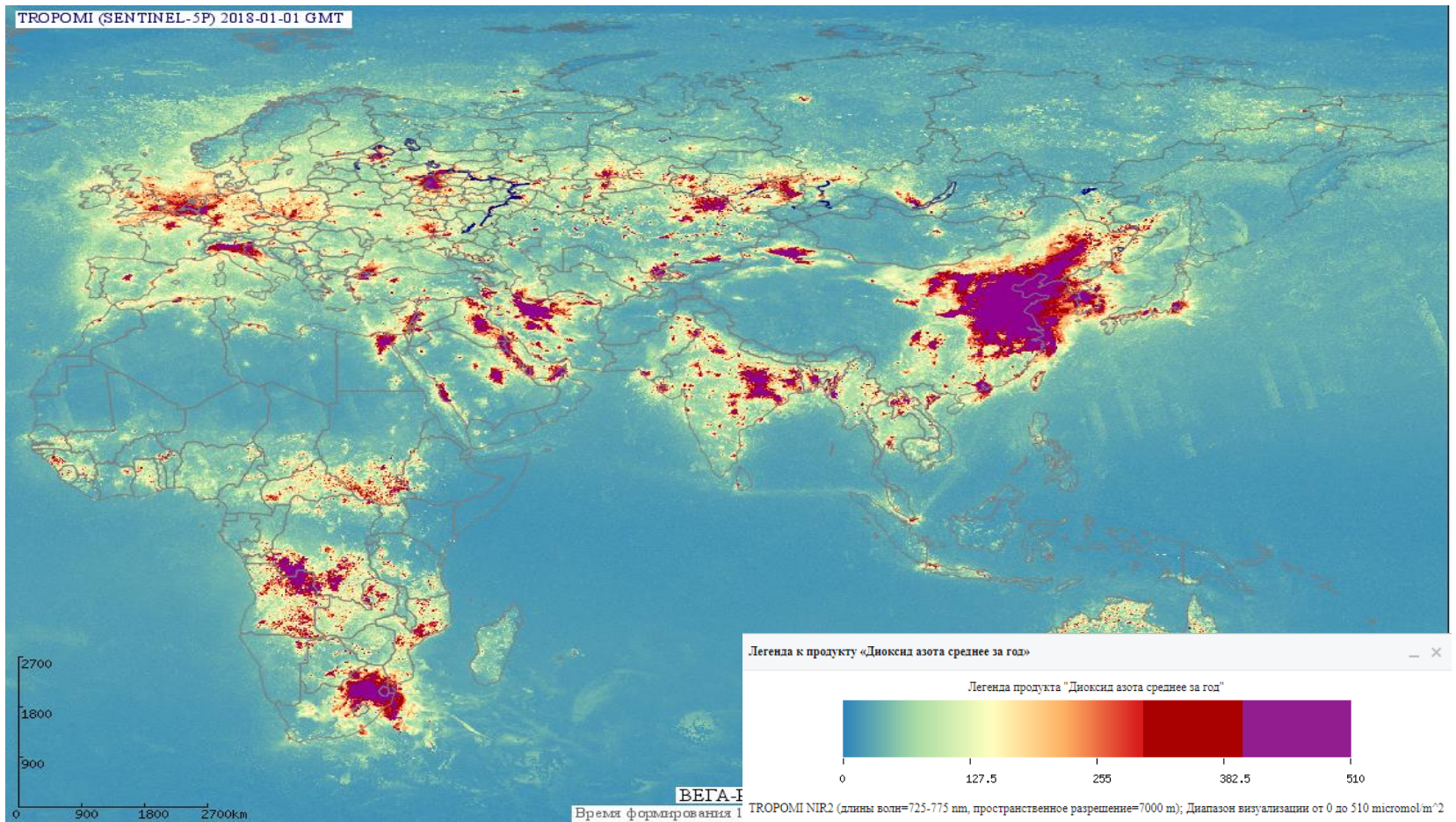
Временной композит	Характеристика	Прибор	МГС
Ежедневный	Минимум	TROPOMI	NO ₂ , SO ₂ , Aerosol Index, CO, CH ₄ , O ₃
	Максимум Среднее	OMI	Aerosol Index, NO ₂ , O ₃
Еженедельный	Минимум	TROPOMI	NO ₂ , SO ₂ , Aerosol Index, CO, CH ₄ , O ₃
	Максимум Среднее	OMI	NO ₂
Ежемесячный	Минимум	TROPOMI	NO ₂ , SO ₂ , Aerosol Index, CO, CH ₄ , O ₃
	Максимум		
	Среднее		
Годовой	Минимум	TROPOMI	NO ₂ , SO ₂ , Aerosol Index, CO, CH ₄ , O ₃
	Максимум		
	Среднее		
Многолетний	Минимум	TROPOMI	NO ₂
	Максимум		
	Среднее	OMI	NO ₂
Сезонный	Максимум	TROPOMI	NO ₂
	Среднее		

Примеры созданных композитных изображений



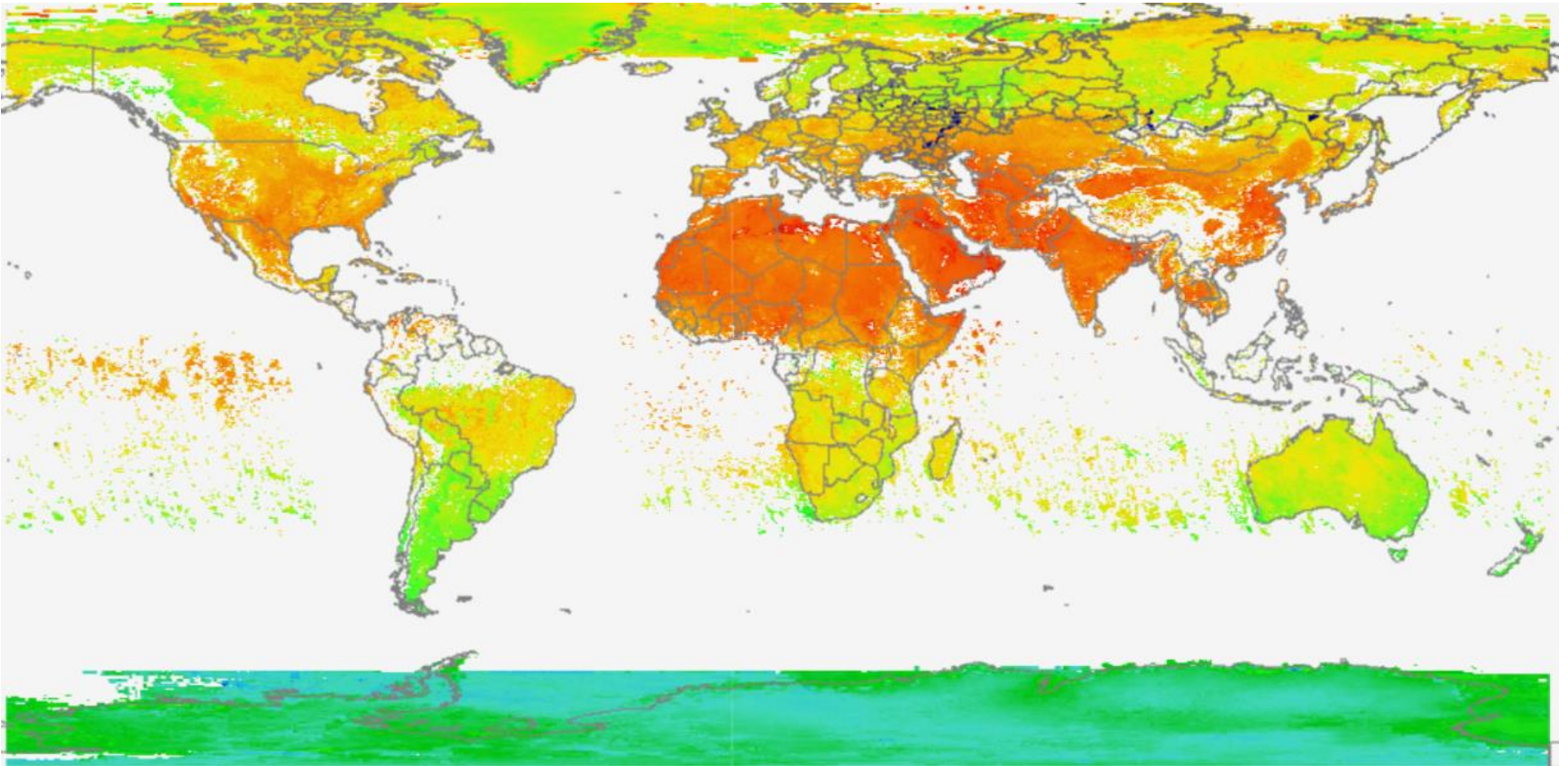
Примеры временных композитных изображений по данным прибора TROPOMI: а) среднее значение аэрозольного индекса на территорию всего земного шара за неделю с 2023-08-21 по 2023-08-28; б) среднее значение CO за месяц с 2023-07-01 по 2023-07-31 на территорию всего земного шара; в) среднее значение SO₂ за неполный 2023 год с января по август на территорию всего земного шара; г) максимальное значение NO₂ за летний сезон 2022 года с первого мая по первое октября на территорию России с условием выбора измерений концентраций только в безветренные дни

Примеры созданных композитных изображений



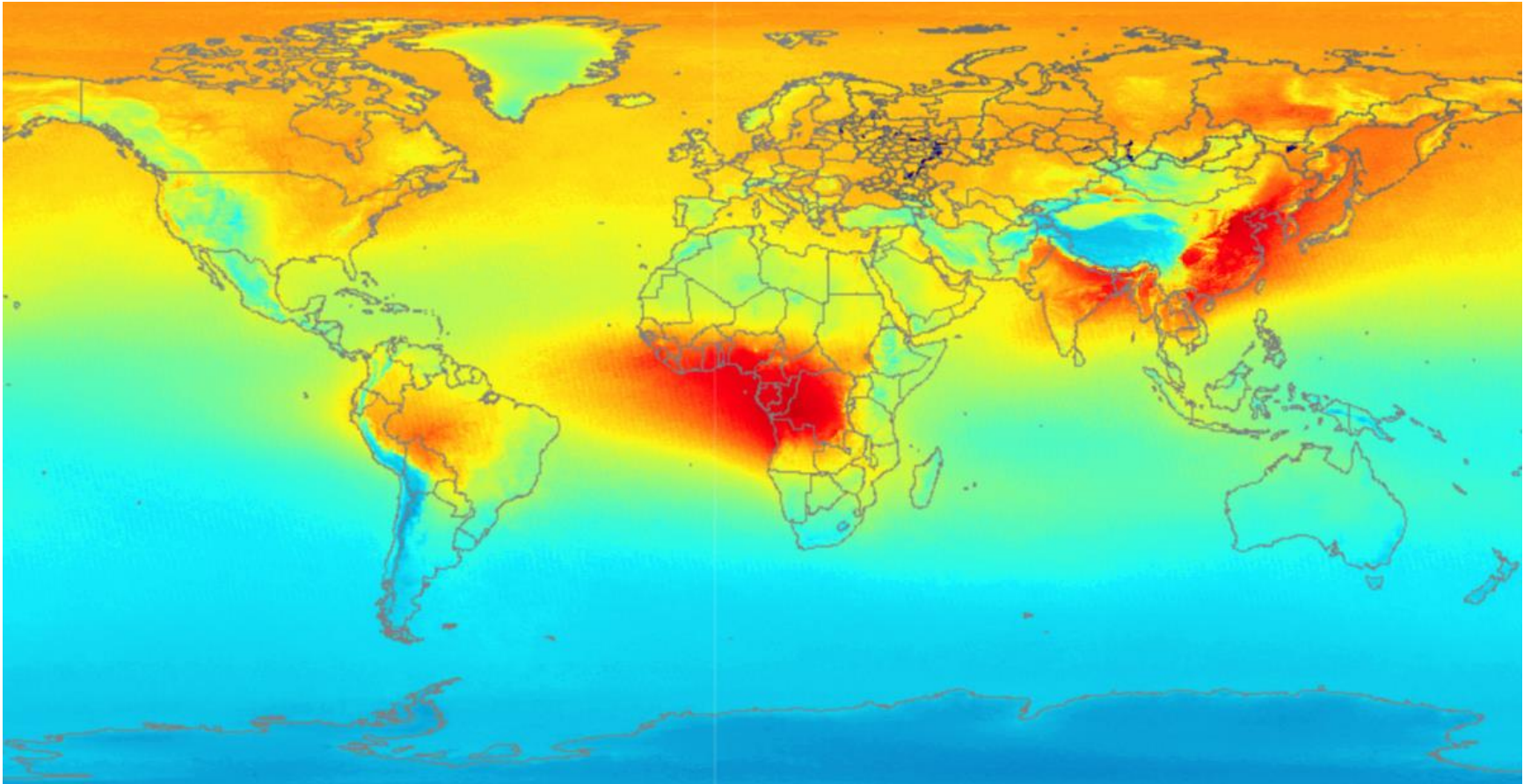
Многолетнее композитное изображение с максимальной концентрацией NO₂ по TROPOMI за 2018-2021 года

Примеры созданных композитных изображений



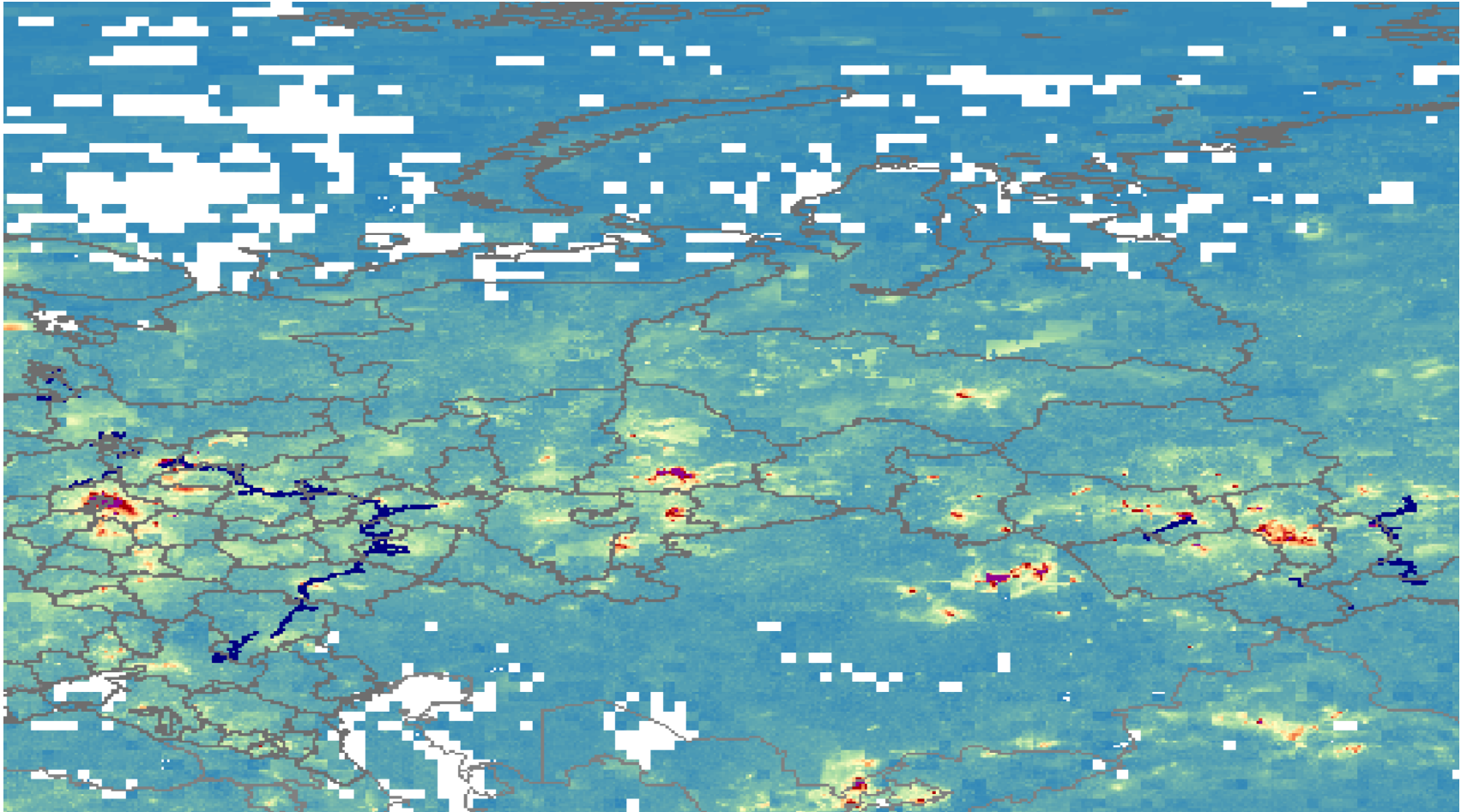
Годовое композитное изображение с концентрацией метана по TROPOMI за 2021 год

Примеры созданных композитных изображений



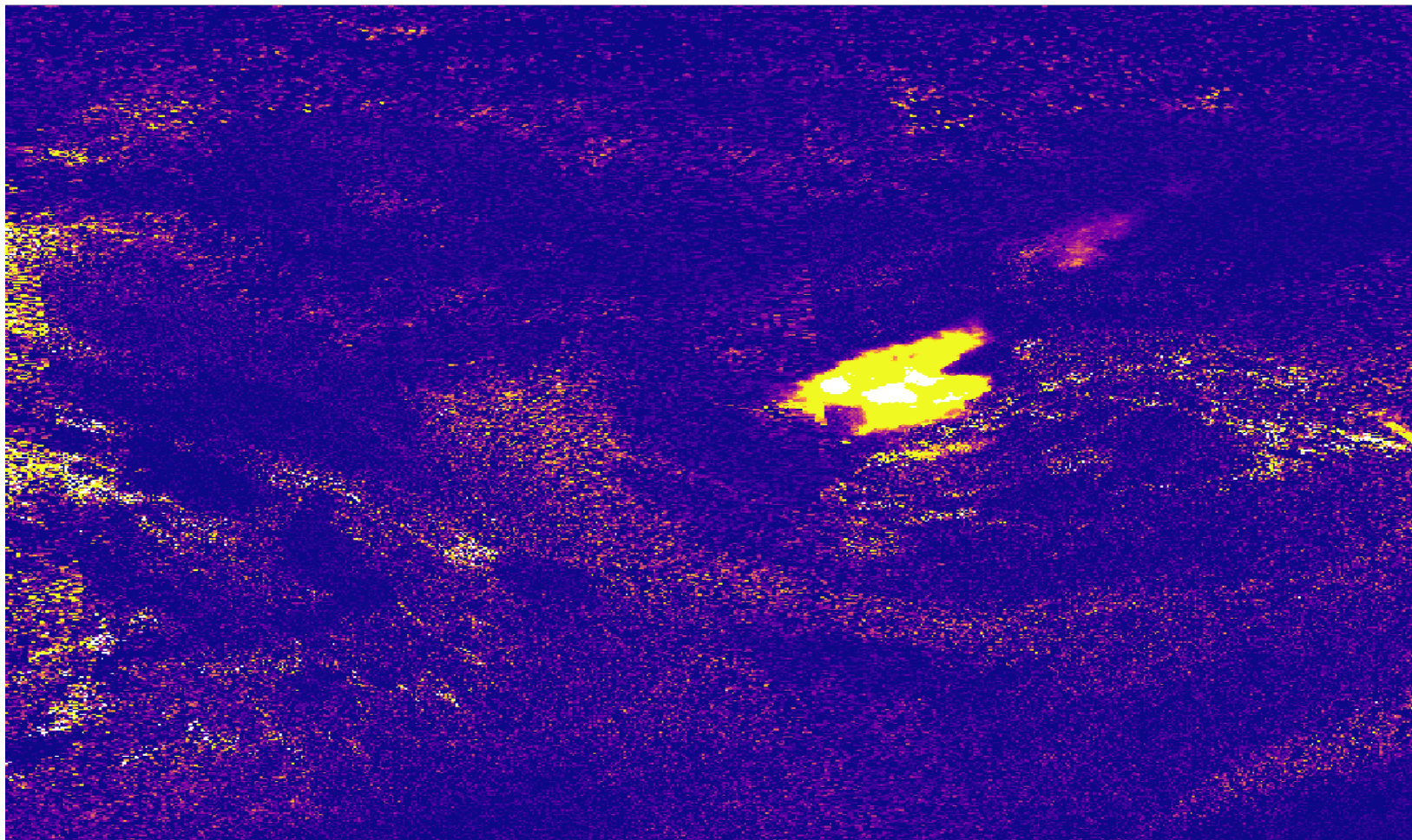
*Годовое композитное изображение с концентрацией
CO по TROPOMI за 2021 год*

Построенные продукты на основе композитных изображений с информацией о концентрации МГС



Композитное изображение по прибору TROPOMI NO2 летний сезон 2022-го года, построенные в безветренные дни

Примеры продуктов, созданных на основе композитных изображений



Композитное изображение по прибору TROPOMI диоксид серы в период извержения вулкана Шивелуч. 11 апреля 2023 года, примерное время 2 часа ночи UTC.

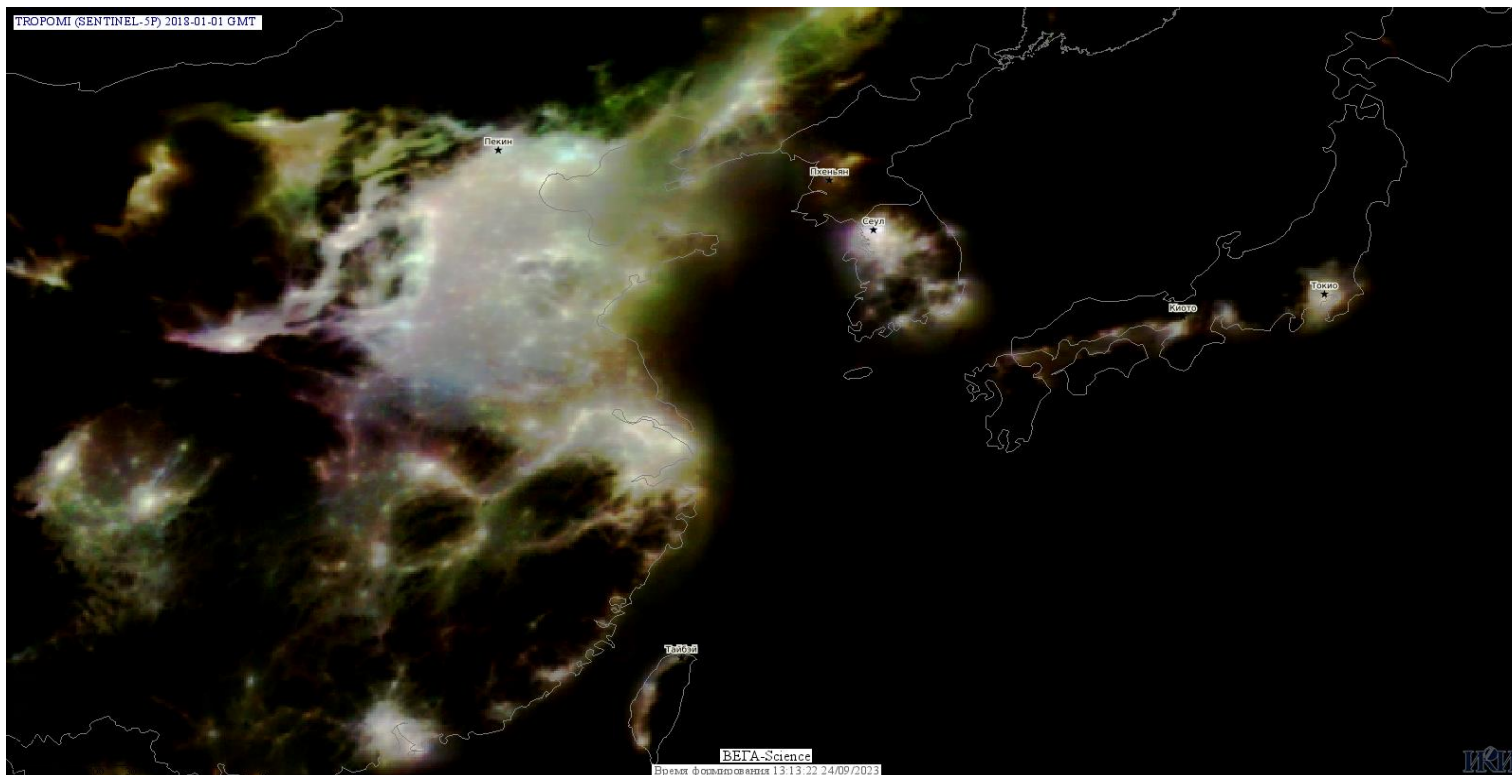
Возможности работы с информационными продуктами о концентрации МГС

Пользователи ЦКП «ИКИ-Мониторинг» могут получить доступ к различным информационным продуктам с концентрацией МГС, накопленным в центре, работая с информационными системами (ИС), развиваемыми в ИКИ РАН, в веб-интерфейсах которых предоставляется доступ к спутниковым архивам ЦКП.

В ИС доступен набор инструментов для распределенного анализа этих продуктов, в том числе анализа их временных рядов, в том числе:

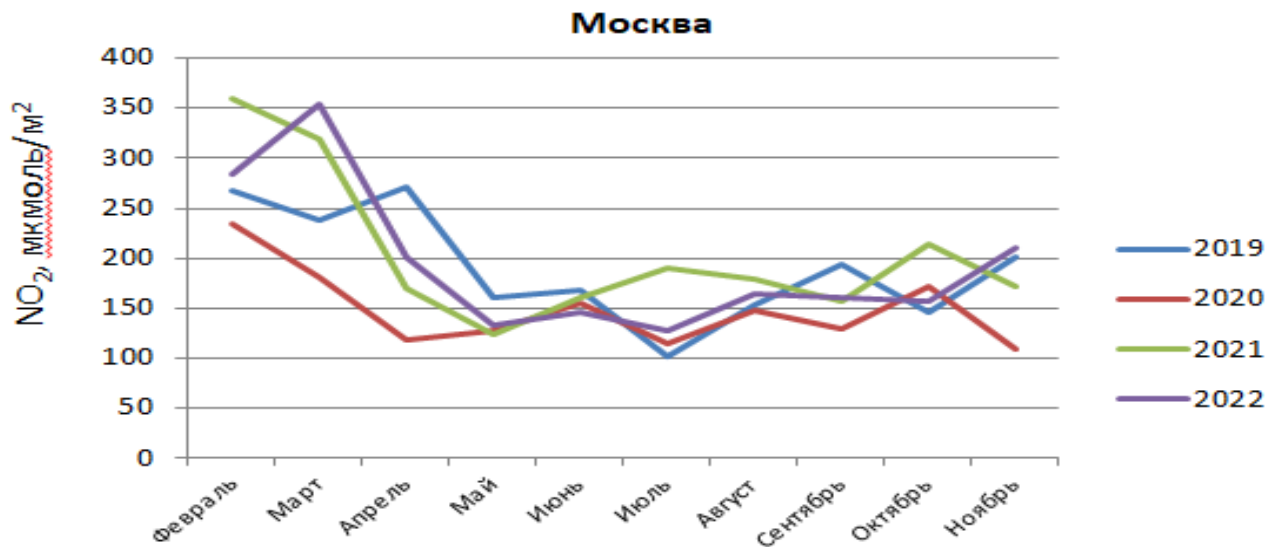
- Обеспечивать возможность проведения выбора, визуализации и анализа как стандартных продуктов, так и временных композитов, в частности совместно анализировать данные, полученные в различные временные сроки. Инструмент позволяет синтезировать (формировать) RGB-изображения, в том числе на основе временных композитов за различные моменты времени.
- Создавать анимации, которые позволяют анализировать распространение МГС и аэрозолей от различных источников.
- Рассчитывать различные статистические характеристики (среднее, минимальное, максимальное значения, площади пикселей с определёнными значениями и т. п.) внутри границ произвольных полигонов на основе создаваемых композитных изображений с концентрацией МГС.
- Проводить анализ численных значений концентрации МГС в различных точках, в том числе и изменение этих концентраций по времени.

Пример продукта, созданного с помощью инструмента Цветосинтез на основе композитных изображений



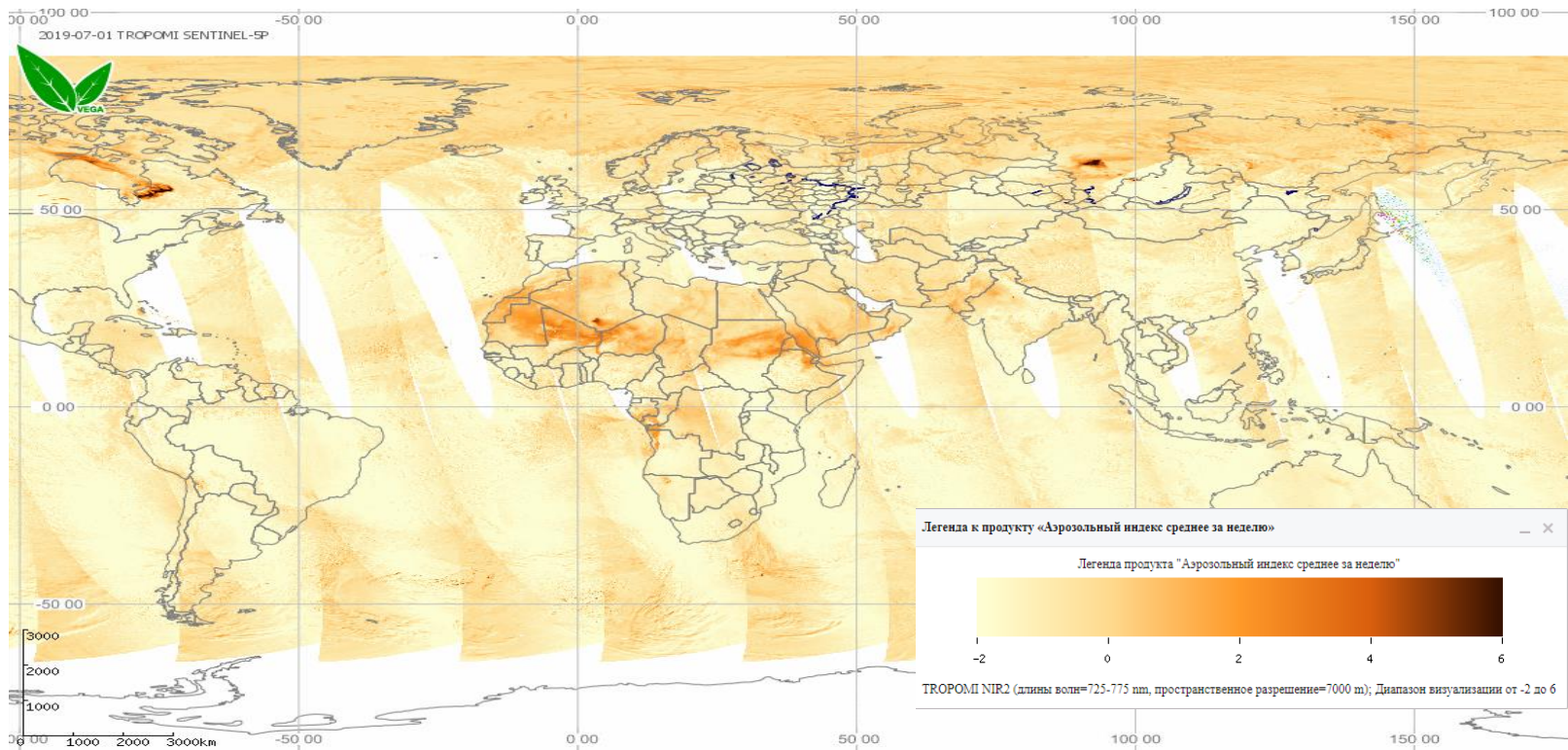
пример синтеза данных о концентрациях NO_2 по территории центрального и восточного Китая, Корейского полуострова и южных островов Японии. Цветовая изменчивость представленных изображений отражает изменчивость наблюдаемых концентраций NO_2 в различные годы. Синтез построен на основе годовых композитов средних концентраций NO_2 , восстановленных по данным прибора TROPOMI за 2022 (красный), 2020 (зеленый) и 2018 (синий)

Пример анализа продуктов МГС



Временные профили концентраций NO₂ по прибору TROPOMI за различные годы на территории Москвы. В частности, видно значительное снижение концентраций в 2020-ом году во время распространения COVID-19

Примеры продуктов, созданных на основе композитных изображений



Анимация временного ряда изображений, созданных на основе максимальных ежедневных значений аэрозольного индекса по TROPOMI за июль-август 2019 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.

Заключение

- С помощью описанной технологии был создан ряд информационных продуктов на территорию всего Земного шара.
- Уже сегодня 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. Планируется увеличение объемов спутниковых данных.
- Доступный набор инструментов для работы с данными позволяет анализировать их в картографических веб-интерфейсах, выявлять различные тренды, использовать их для мониторинга различных природных и антропогенных явлений.

Таким образом, реализованная на базе ЦКП «ИКИ-Мониторинг» подсистема сбора, автоматизированной обработки и анализа данных может быть использована для решения различных научных и прикладных задач.

Спасибо за внимание!

