

**До верхнего уровня с нуля: эволюция методов обработки
спутниковых данных в контексте создания продуктов для
российских приборов серии КМСС**

Плотников Д.Е.

при участии: Колбудаев П.А., Матвеев А.М., Прошин А.А., Лупян Е.А.,
Кашницкий А.В., Бурцев М.А., Жуков Б.С., Кондратьева Т.В.,
Полянский И.В., Зимин М.В., Лебедев С.В., Зоров А.А. и др.



Состав приборов аппарата серии Метеор-М



Тип: метеорологический

Даты запуска:

- **Метеор-М 1: 17 сентября 2009**
- **Метеор-М 2: 08 июля 2014**
- **Метеор-М 2-1: 28 ноября 2017**
- **Метеор-М 2-2: 05 июля 2019**
- **Метеор-М 2-3: 27 июня 2023**
- **Метеор-М 2-4: 29 февраля 2024**
- *Метеор-М 2-5 -- 2.6*

запланированы к запуску после 2025 года

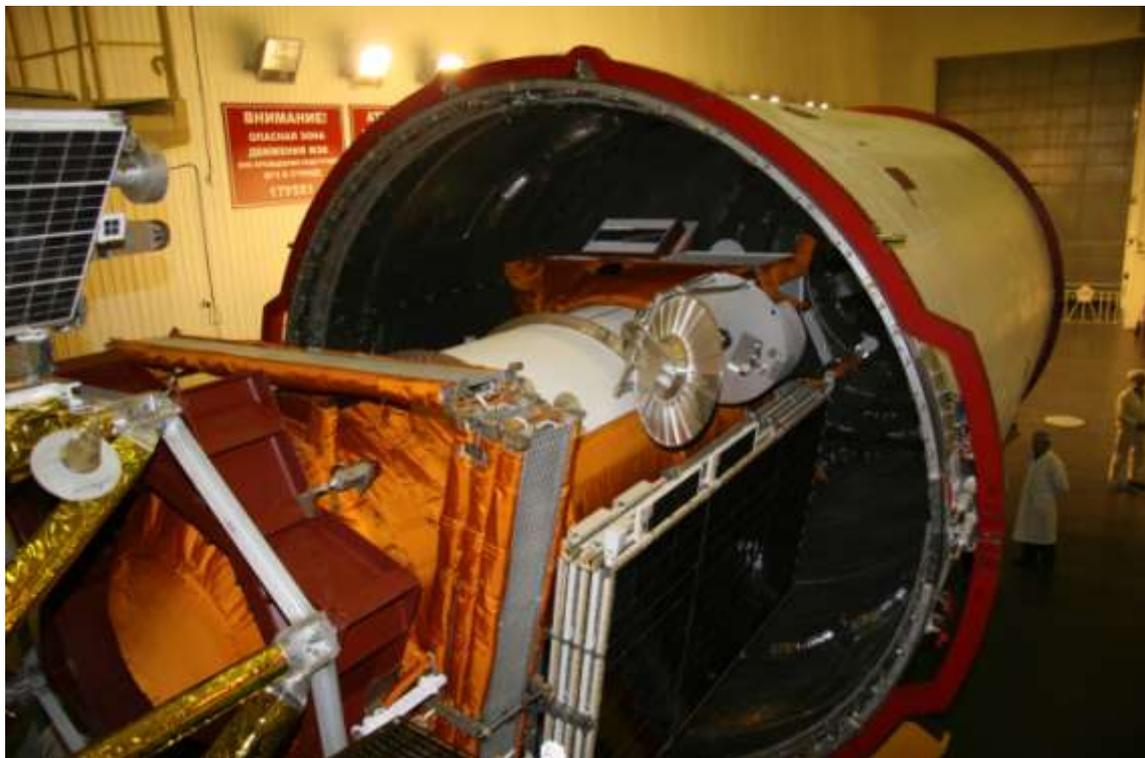
Орбита: солнечно-синхронная

Высота: 825 км

Наклонение: 98,8°

Время витка: 101,41 мин

Запуск Метеор-М №1



Космодром Байконур, 17 сентября 2009 года

Запуск Метеор-М № 2-2



Космодром Восточный, 5 июля 2019 года

Meteor-M satellites and KMSS spectral cameras specifications



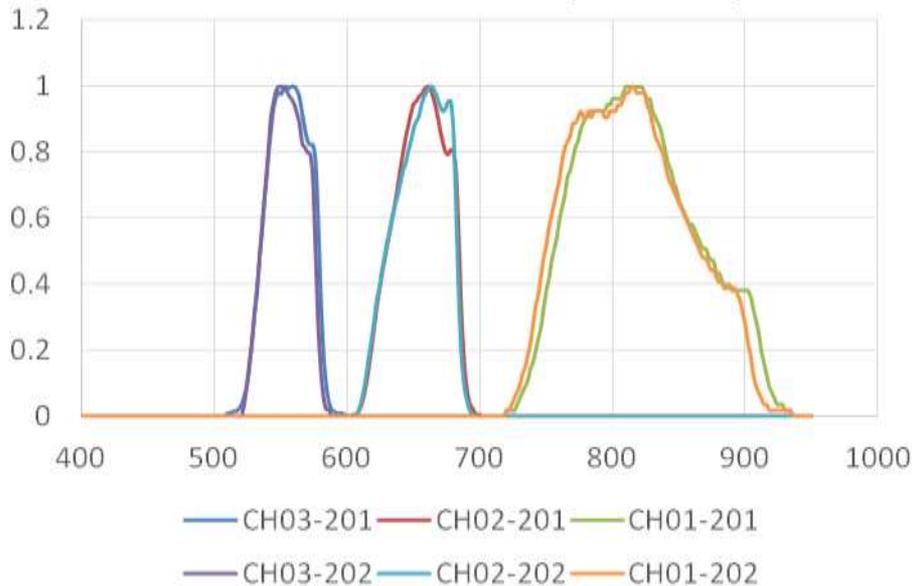
KMCC/MCY-100M

KMCC/MCY-100M

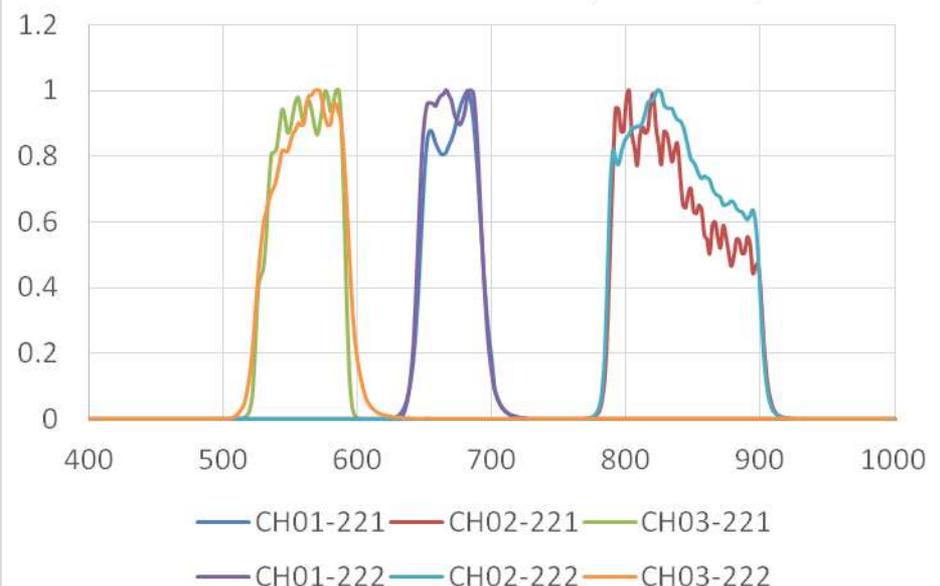
KMSS-M interband parralax is 8.6°

Characteristic	KMSS-M (Meteor-M- 2)	KMSS-2 (Meteor-M- 2.2)
Technique	Pushbroom	Pushbroom
Altitude	832 km	820 km
Spectral bands	Green: 0.535–0.575 μm	Green: 0.520–0.590 μm
	Red: 0.630–0.680 μm	Red: 0.640–0.690 μm
	NIR: 0.760–0.900 μm	NIR: 0.785–0.900 μm
Spatial resolution at nadir	60 m	55 m
Revisiting rate	5 days	5 days
Radiometric resolution	8 bit	10 bit
Total swath	960 km	1020 km

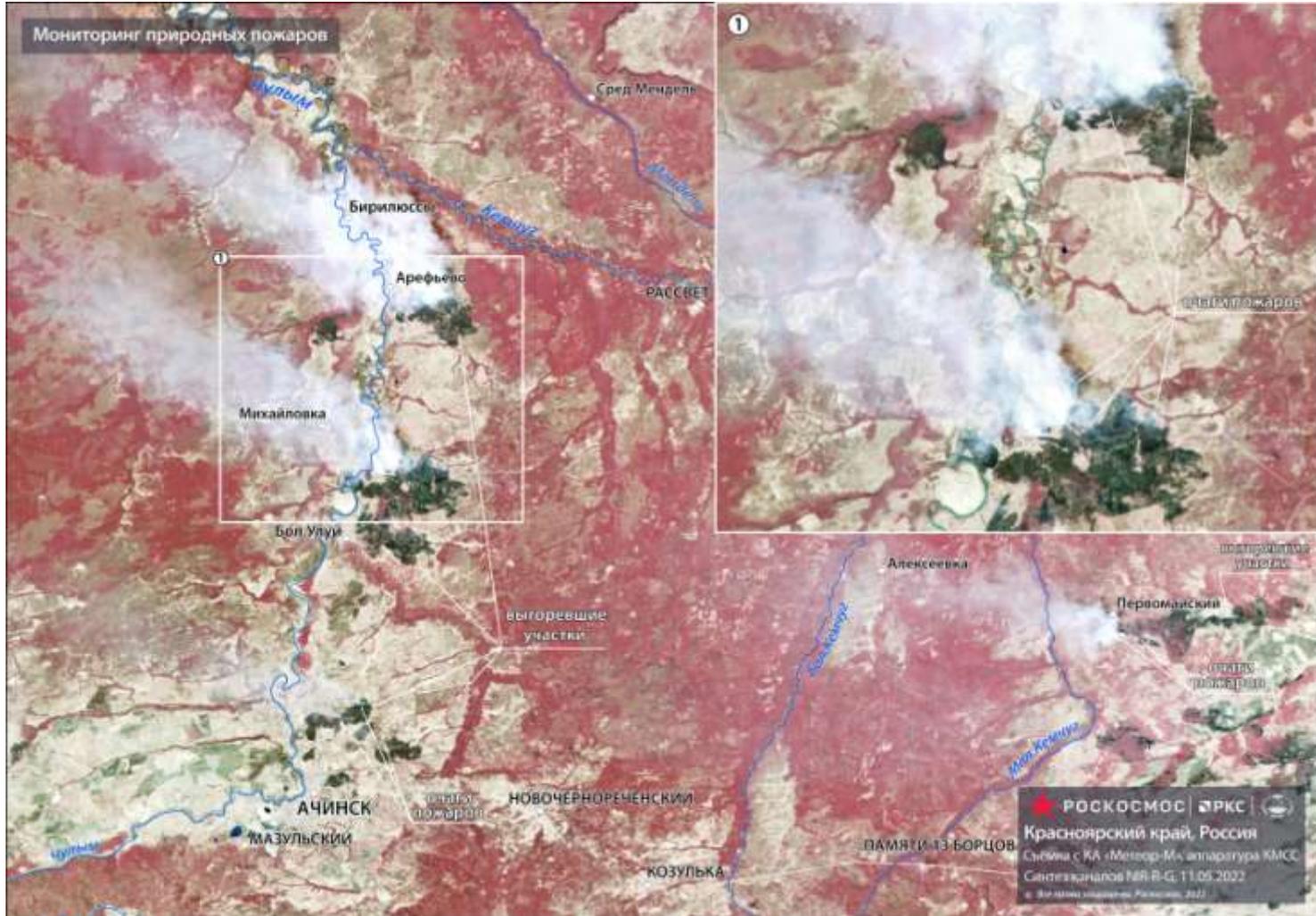
MSU-100M KMSS-M relative spectral response



MSU-100TM KMSS-2 relative spectral response



Мониторинг пожаров



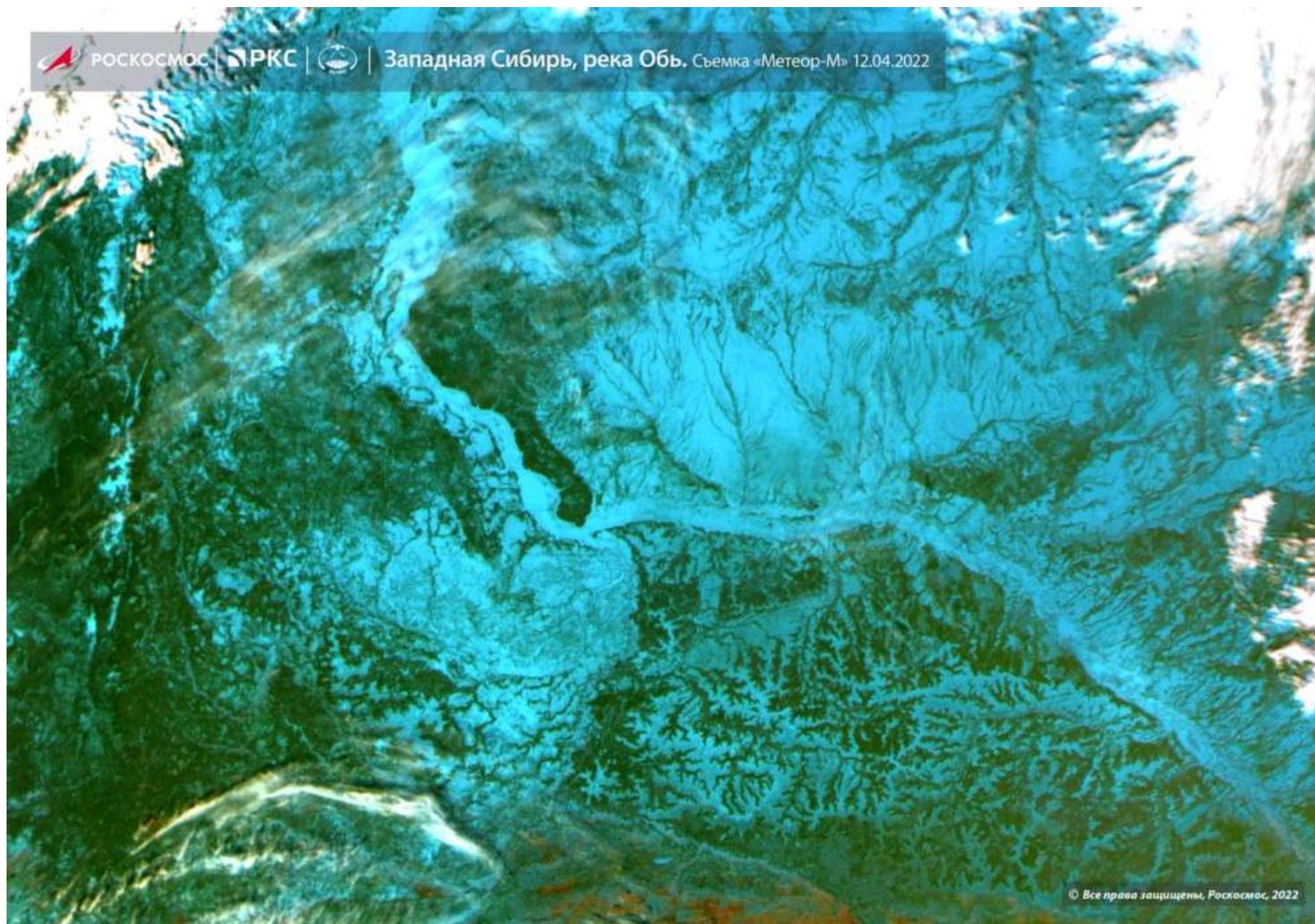
Мониторинг пожаров



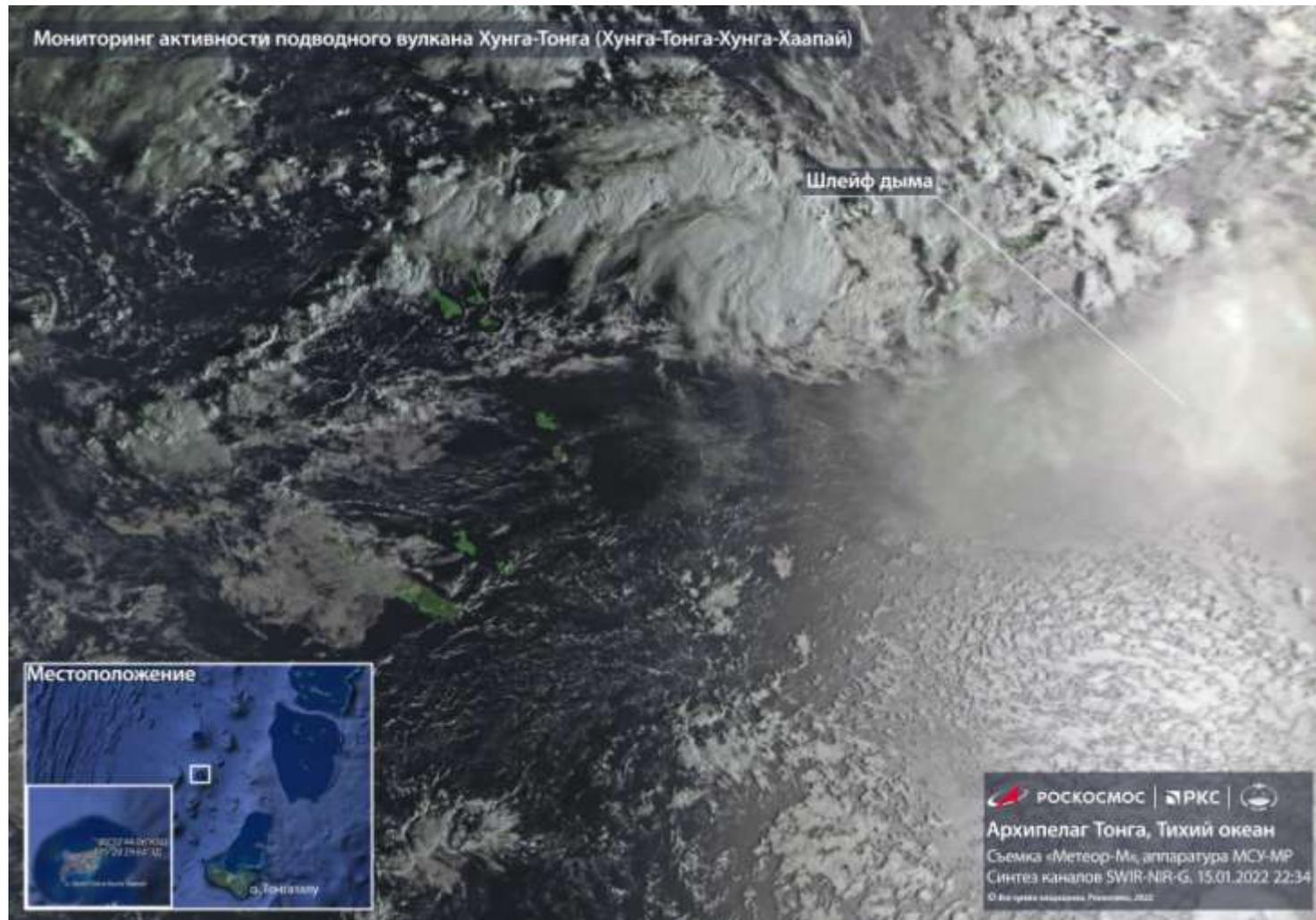
Мониторинг снежной обстановки



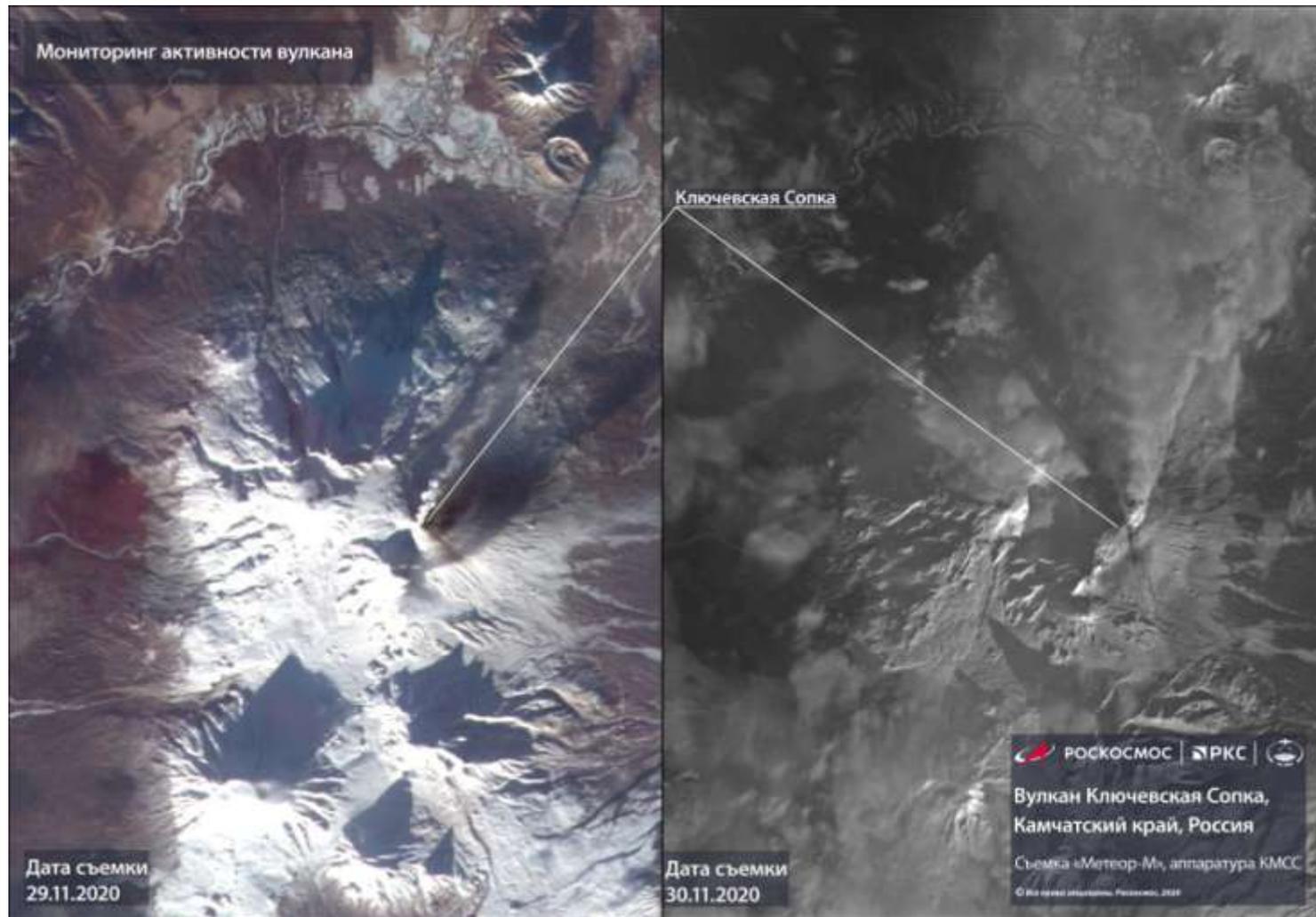
Мониторинг снежной обстановки



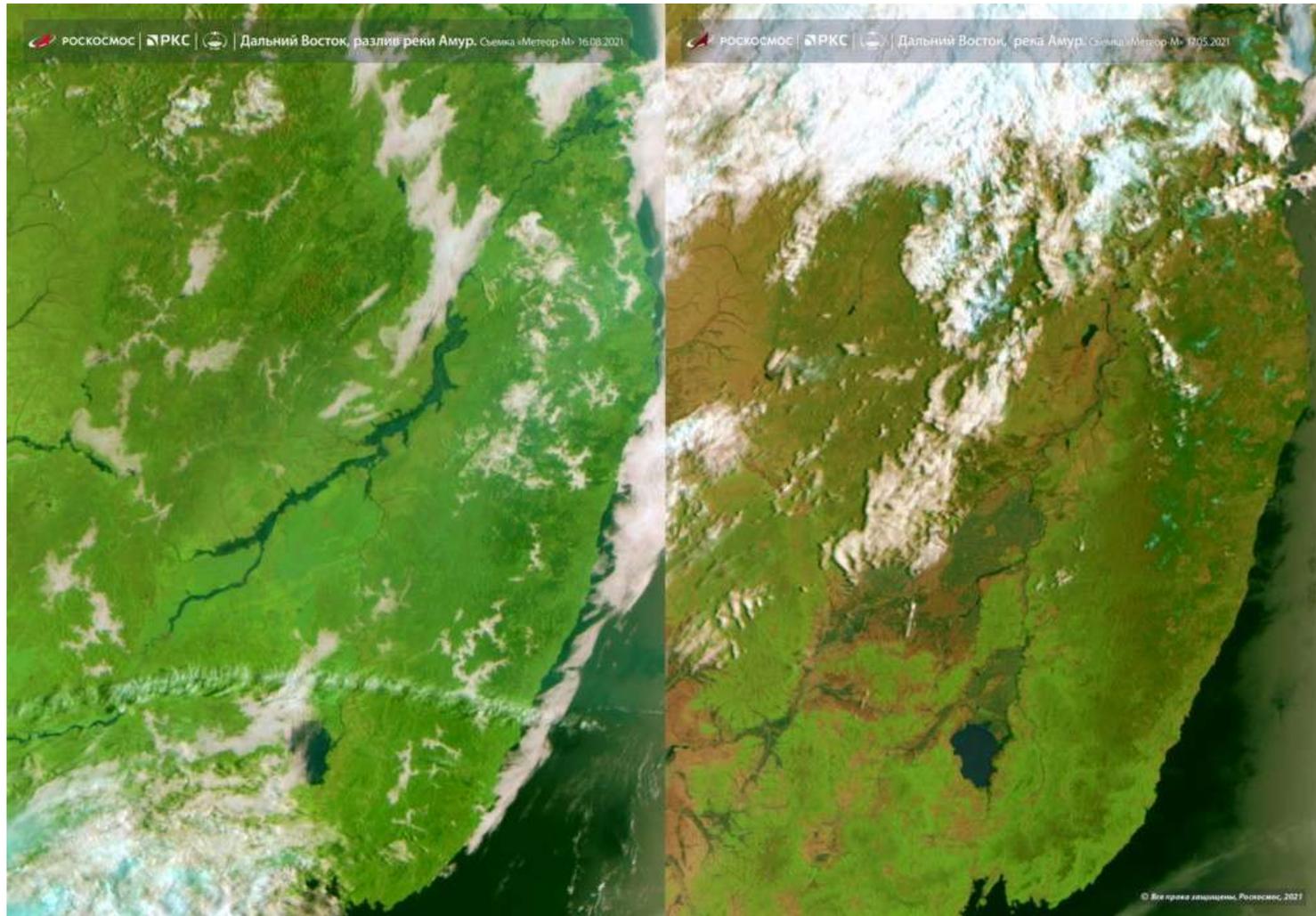
Мониторинг вулканов



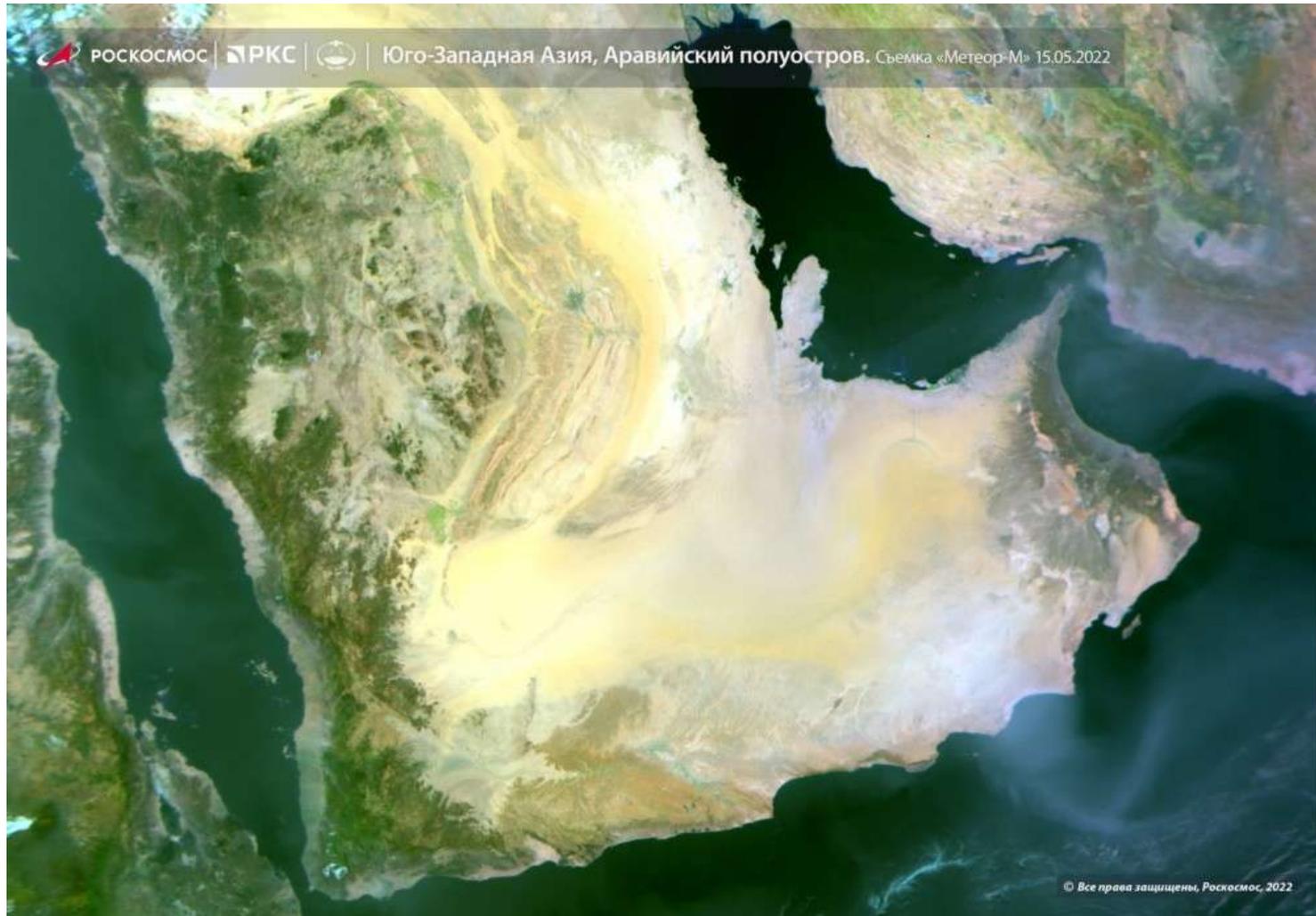
Мониторинг вулканов



Мониторинг паводков



Мониторинг пыльных бурь





 **Госкорпорация Роскосмос**
РОСКОСМОС

  **Информация принята и обработана Оператором КС ДЗЗ (ИЦ ОМЗ АО "Российские космические системы")**
© Все права защищены. Роскосмос, 2021

Германия, р.Эльба
Съемка КМСС КА "Метеор-М" № 2
16 июня 2021 г.



 Госкорпорация Роскосмос

  Информация принята и обработана Оператором КС ДЗЗ (ИЦ ОМЗ АО "Российские космические системы")
© Все права защищены. Роскосмос, 2021

Нидерланды, г.Амстердам
Съемка КМСС КА "Метеор-М" № 2
16 июня 2021 г.



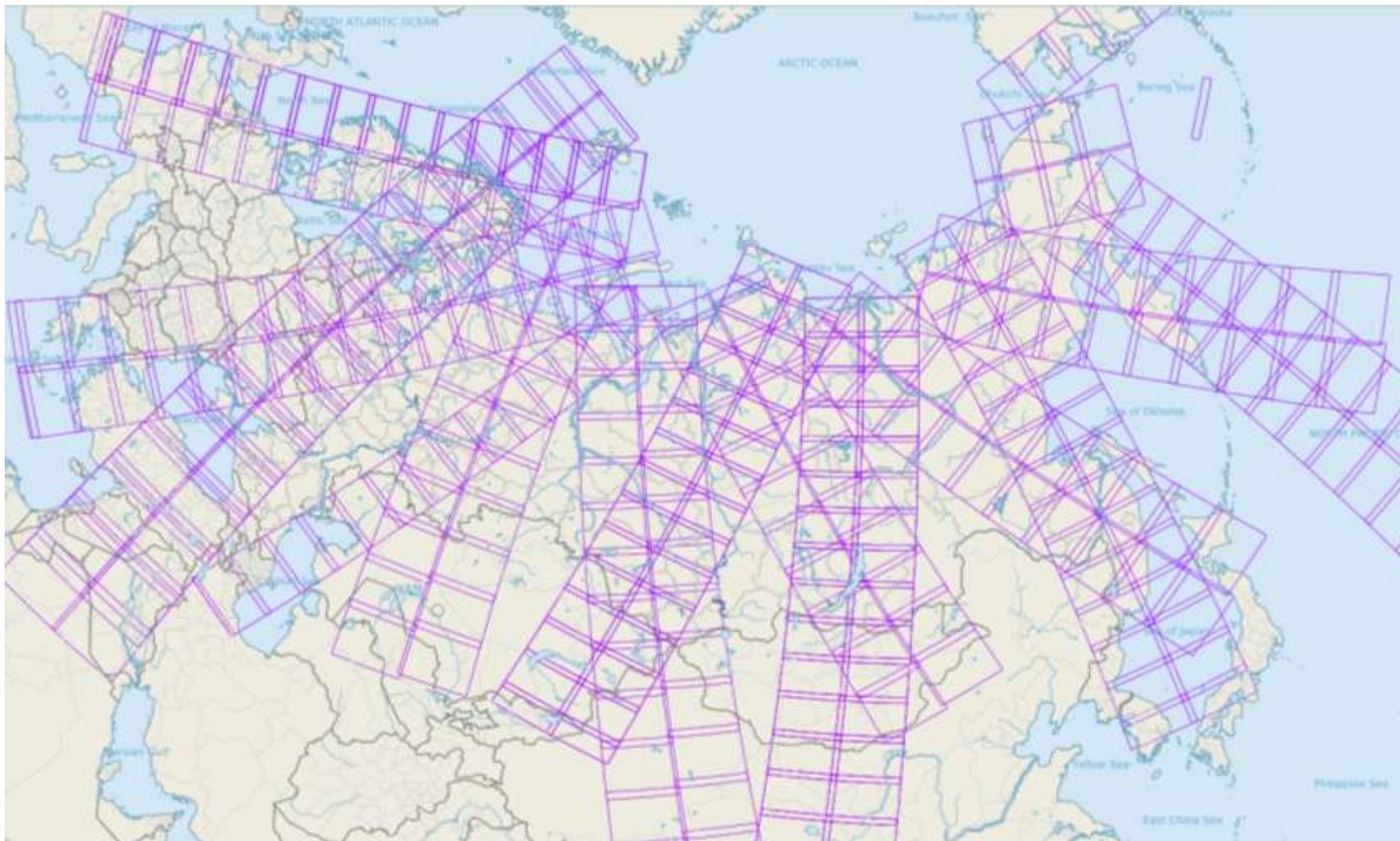
РОСКОСМОС | РКС | 

Озеро Байкал, Россия

Съемка «Метеор-М» 29.08.2021

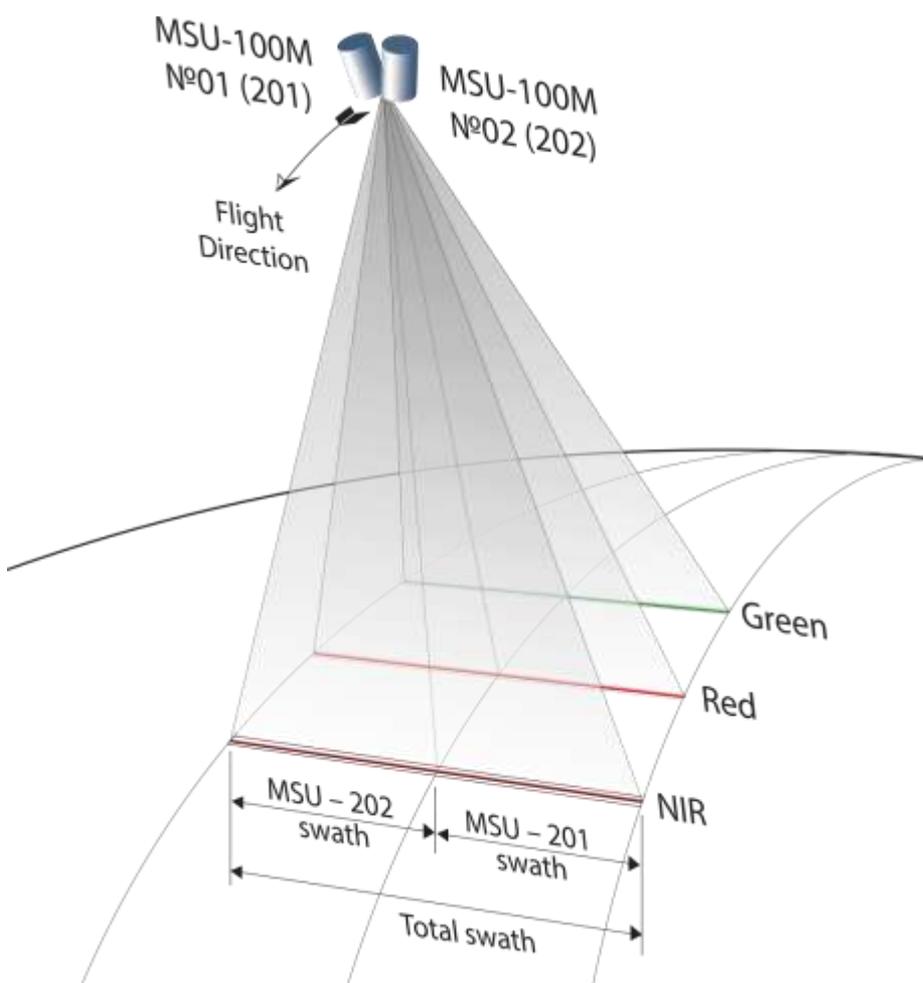
© Все права защищены, Роскосмос, 2021

Покрытие территории РФ данными КМСС за один день (1 ноября 2020 года)

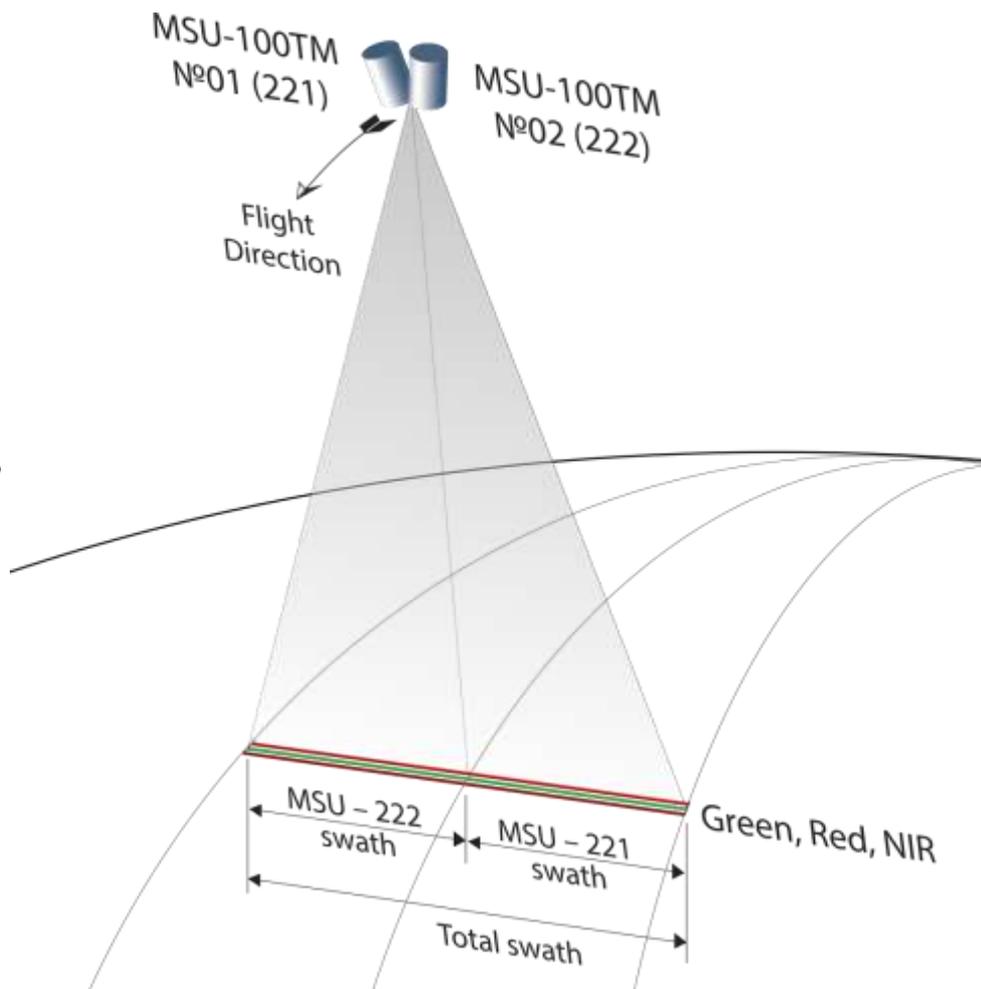


Территория России полностью покрывается изображениями КМСС-М за 3-5 дней, а совместно с КМСС-2 – за **1-2 дня** (разрешение 60 метров)

Геометрия наблюдения КМСС-М и КМСС-2

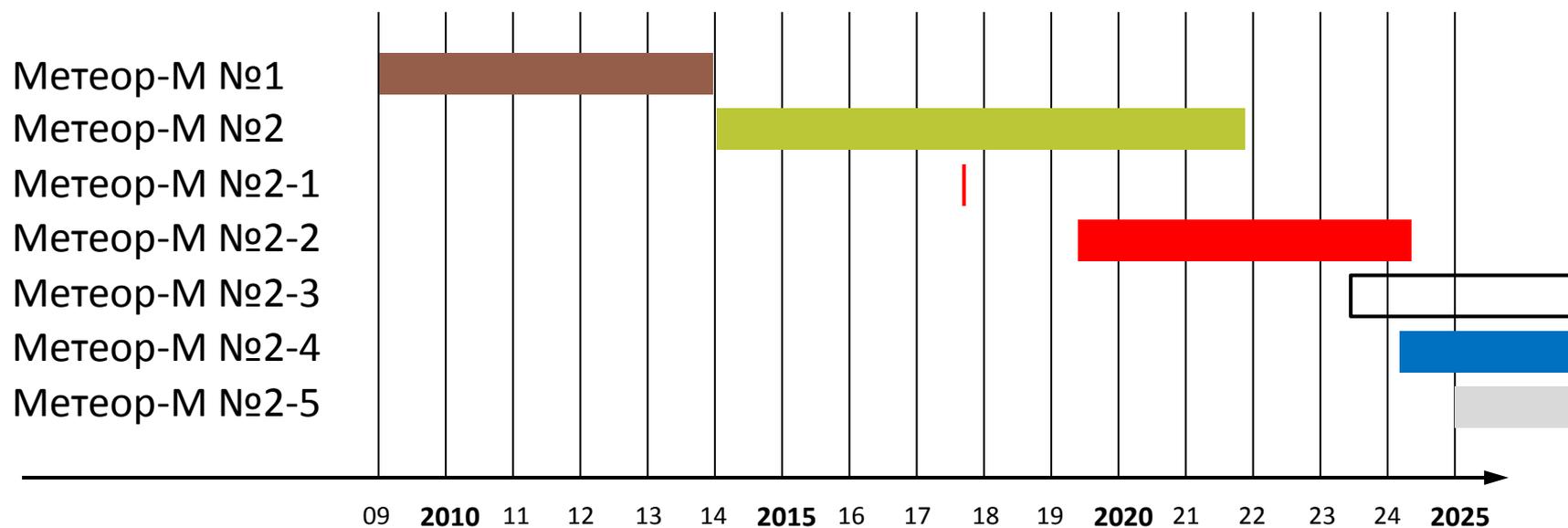


КМСС-М (Метеор-М №2)



КМСС-2 (Метеор-М №2-2 и Метеор-М №2-4)

Хронология работы аппаратов Метеор-М



«Приключение» с Метеор-М №2-2

- ▶ Российский гидрометеорологический спутник «Метеор-М» № 2-2, запущенный с космодрома «Восточный» 5 июля 2019 года, перенес внешнее воздействие, из-за чего изменились параметры его орбиты, а сам аппарат закрутило. Согласно сообщению «Роскосмоса», инцидент произошел 18 декабря 2019 года, а его причиной, вероятно, стало столкновение космического аппарата с микрометеоритом.
 - ▶ 18 декабря со спутника «Метеор-М» № 2-2 пропали все сигналы, а его орбита сильно изменилась. В частности, перигей аппарата уменьшился на 2 километра.
 - ▶ Согласно сообщению «Роскосмоса», после внешнего воздействия «Метеор-М» № 2-2 перешел в энергосберегающий режим, отключив большую часть бортовых систем. В настоящее время со спутником установлена связь, и специалисты занимаются восстановлением его работоспособности.
-

Что дальше?

- ▶ Кажется, данные вполне себе симпатичные, что же мешает с ними работать?
-

Что такое «Уровни обработки данных ДЗЗ»

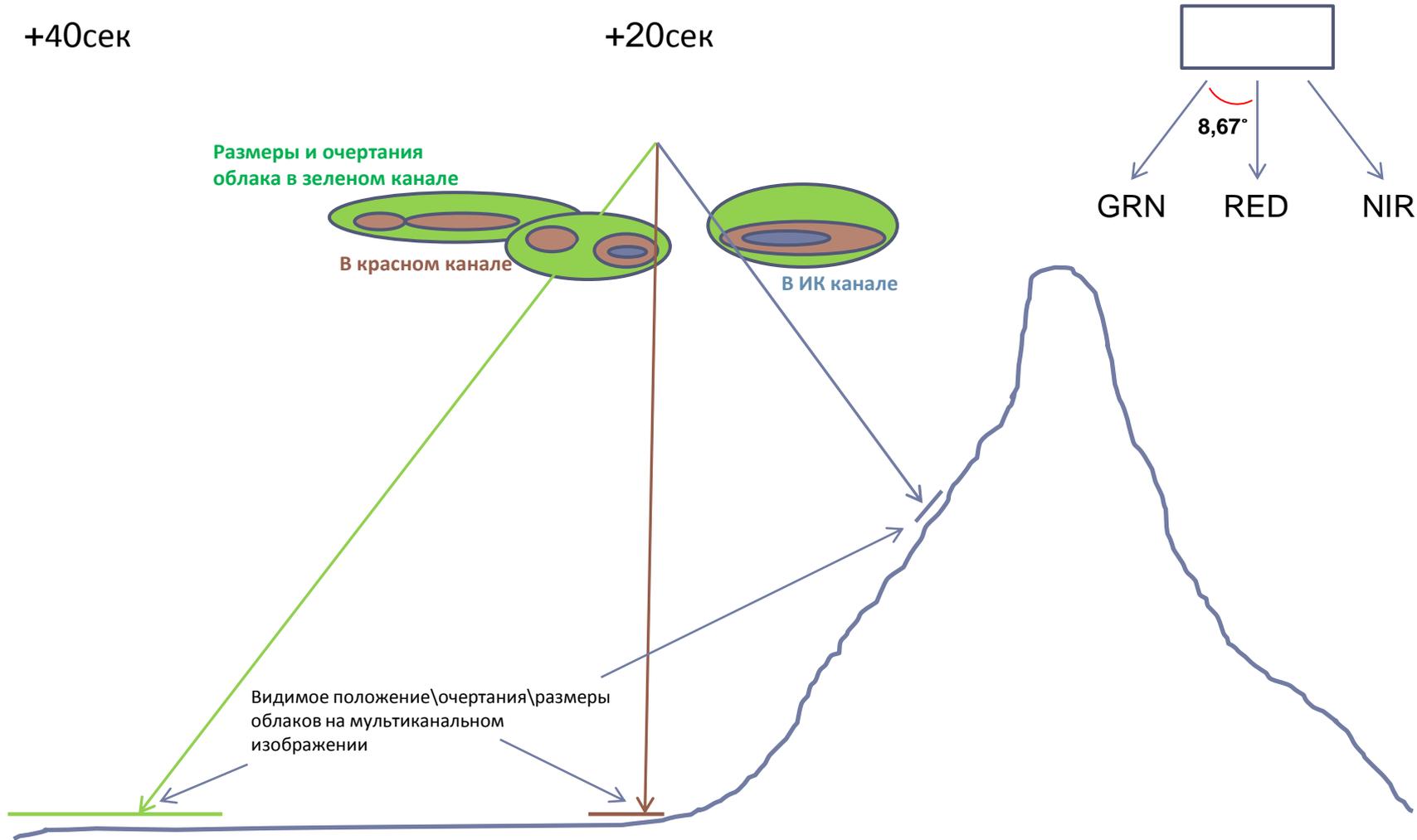
Уровень данных	Описание
0	Восстановленные необработанные данные научных приборов и оборудования в полном разрешении с удалением части или всех коммуникационных артефактов (например, синхрометок, коммуникационных заголовков, дублирующих данных) (В большинство случаев Система управления данными и операциями EOS EDOS предоставляет эти данные в центры данных в виде набора исходных данных для генерации продуктов более высокого уровня в сегменте Science Data Processing Segment (SDPS) или в SIPS)
1A	Восстановленные необработанные данные научных приборов в полном разрешении с привязкой ко времени, аннотированные вспомогательной информацией, включающей данные, необходимые для радиометрической и геометрической калибровок, и данные, необходимые для географической привязки (например, параметры орбиты), рассчитанной и присоединенной, но не примененной к данным уровня Level 0
1B	Данные научных приборов уровня Level 1A, обработанные до представления в виде физических единиц (не все научные приборы имеют этот уровень обработки)
2	Восстановленные геофизические параметры в том же месте и с тем же разрешением что и их исходные данные уровня Level 1
3	Данные, привязанные к равномерной пространственно-временной шкале, обычно с определенной степенью полноты и непротиворечивости
4	Результаты моделирования или результаты анализа данных нижних уровней представления (например, данные совокупности различных экспериментов)

уровни обработки в терминологии NASA EOS

Схема съёмки прибором КМСС-М

+40сек

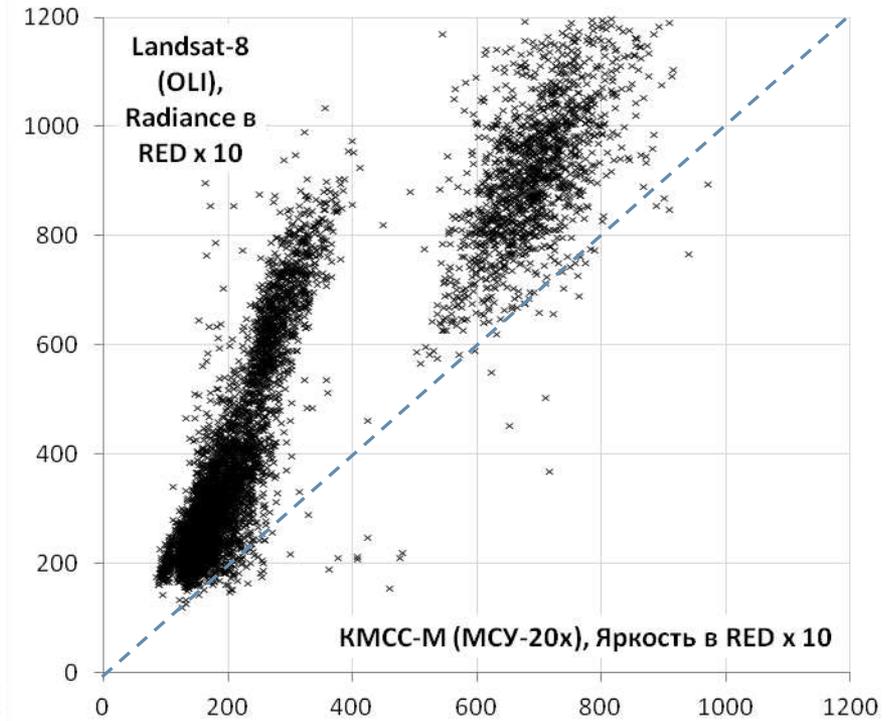
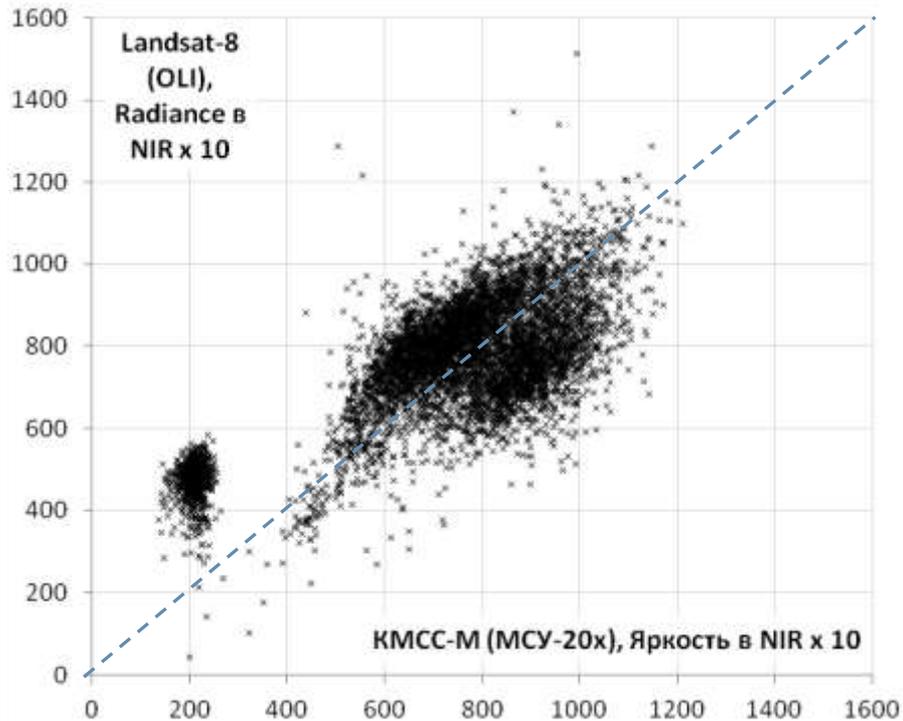
+20сек



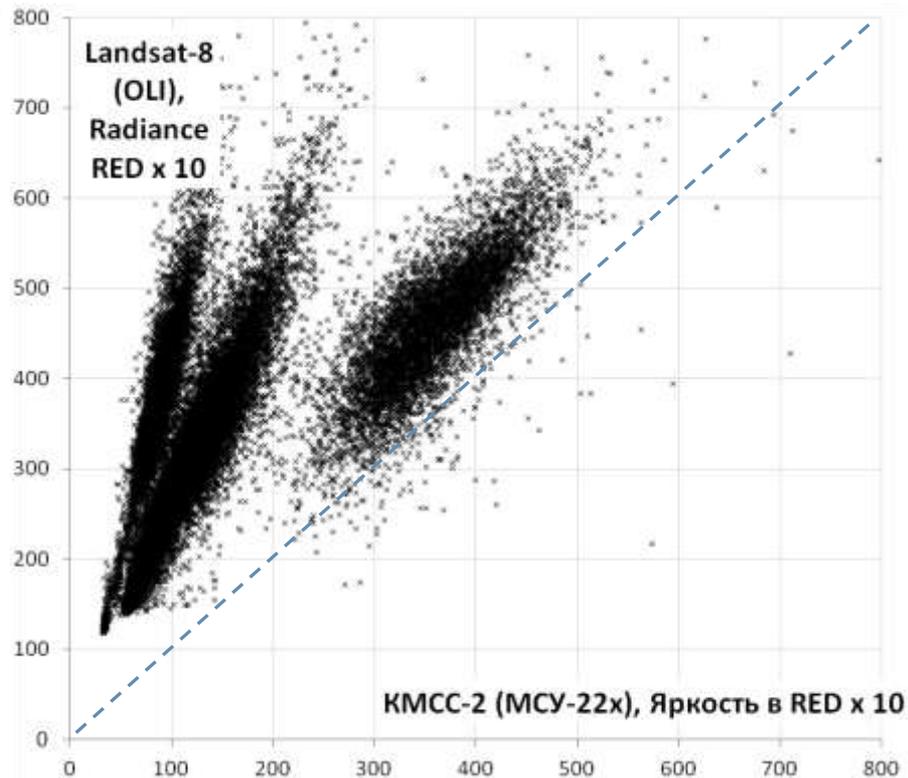
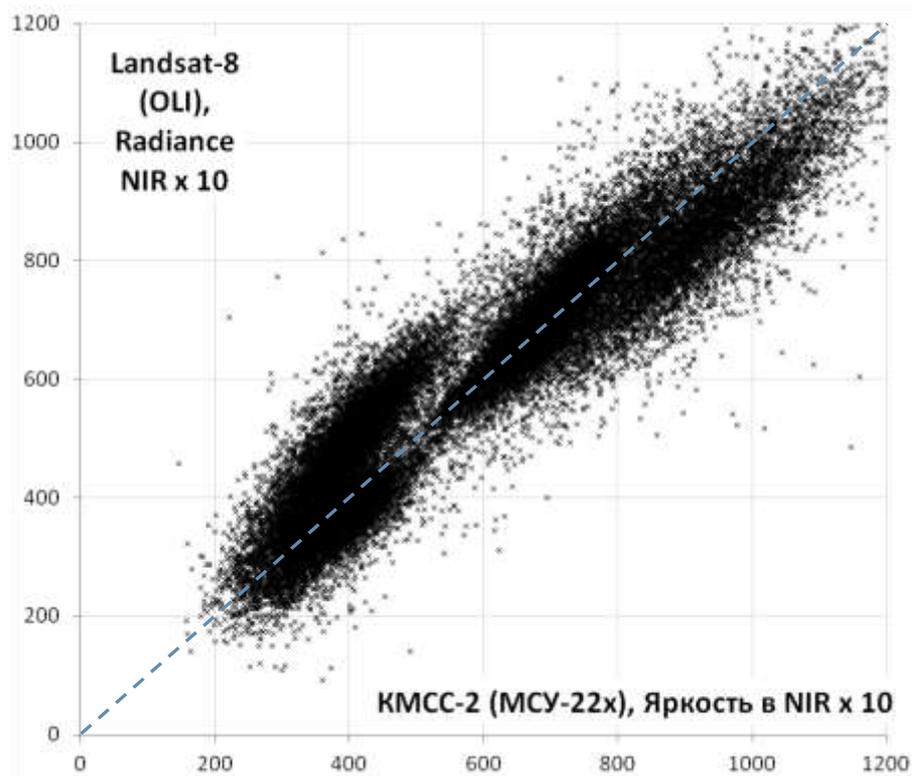
Проблемы

- ▶ Исходные данные не калиброваны, наблюдаются отклонения «альbedo» в 1,5-2 раза от ожидаемого значения, которые носят случайный характер, меняясь во времени и пространстве;
 - ▶ Погрешности привязки могут достигать до 5 пикселей (размер пикселя ~60-100 метров), причем плохо привязанные данные проходят процедуру орторектификации и перевода в географическую проекцию, вызывая значительные и неустранимые до конца геометрические искажения ввиду своей нелинейности;
 - ▶ Каналы «смотрят» в разные стороны, вид облачности в соседних каналах может быть совсем различным (особенно в случае полупрозрачной облачности), причем облачность меняется и за время межканальной задержки съемки (20-40 сек). Задействовать мультиспектральные индексы для выделения облачности не представляется возможным – в том числе также по причине непредсказуемой калибровки;
 - ▶ Выбросы типа «соль и перец», сплошные полосы шумов и порча изображений по другим причинам
-

Соответствие синхронных наблюдений КМСС-М и Landsat-8 (OLI), Radiance, TOA



Соответствие синхронных наблюдений КМСС-2 и Landsat-8 (OLI), Radiance, TOA



Проблемы

- ▶ Исходные данные не калиброваны, отклонения в «альбедо» от ожидаемого значения могут достигать 100% и носят случайный характер, меняясь во времени и пространстве;
 - ▶ Погрешности привязки могут превышать километры (размер пикселя ~60 метров), причем плохо привязанные данные проходят процедуру орторектификации, вызывая значительные и неустранимые до конца геометрические искажения ввиду своей нелинейности;
 - ▶ Каналы «смотрят» в разные стороны, вид облачности в соседних каналах может быть совсем различным (особенно в случае полупрозрачной облачности), причем облачность меняется и за время межканальной задержки съемки (20-40 сек).
Задействовать мультиспектральные индексы для выделения облачности не представляется возможным – в том числе также по причине непредсказуемой калибровки;
 - ▶ Выбросы типа «соль и перец», сплошные полосы шумов и порча изображений по другим причинам
-

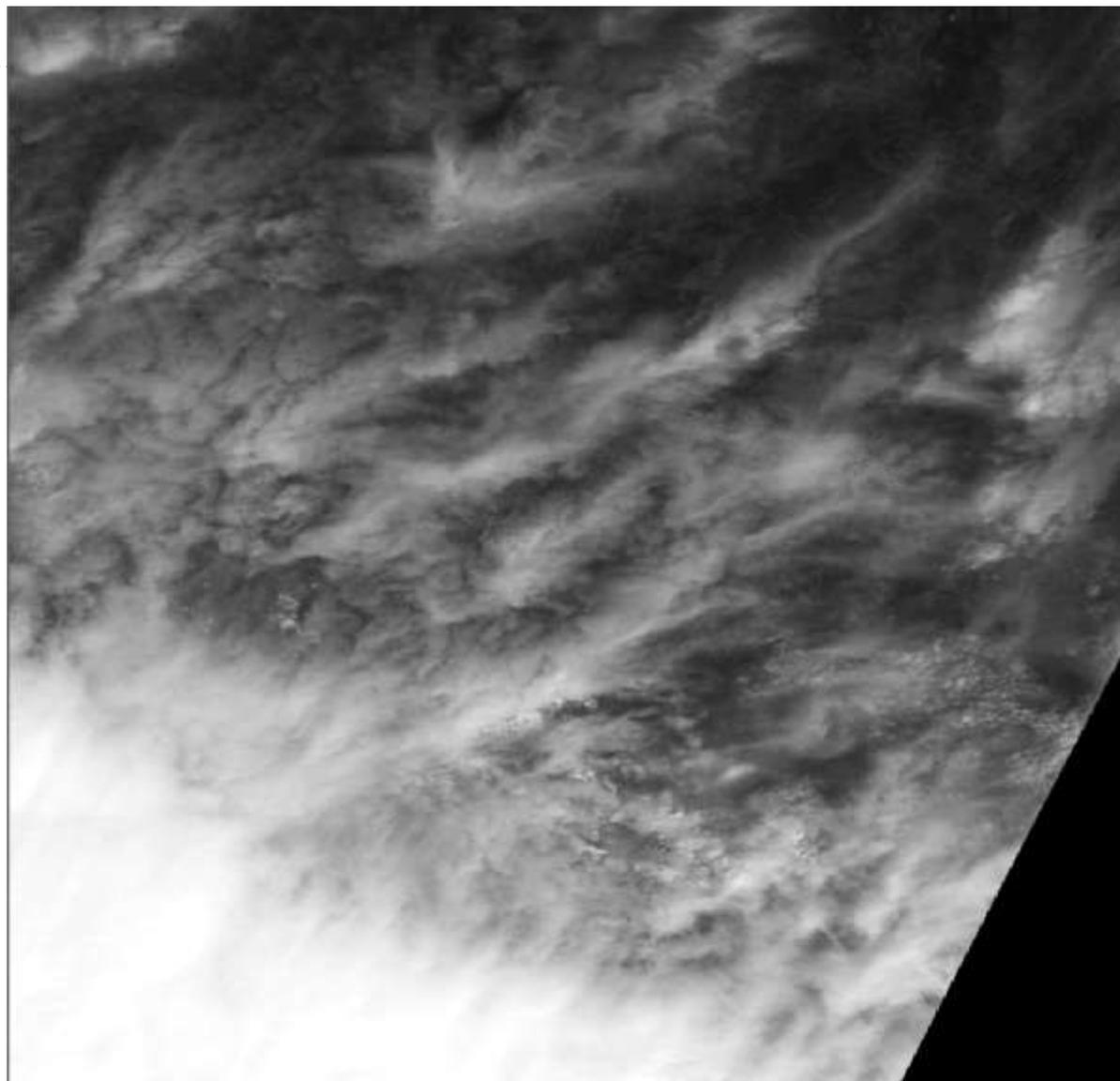
Нелинейные искажения



Проблемы

- ▶ Исходные данные не калиброваны, наблюдаются отклонения «альбеда» в 1,5-2 раза от ожидаемого значения, которые носят случайный характер, меняясь во времени и пространстве;
 - ▶ Погрешности привязки могут достигать до 5 пикселей (размер пикселя ~60-100 метров), причем плохо привязанные данные проходят процедуру орторектификации и перевода в географическую проекцию, вызывая значительные и неустранимые до конца геометрические искажения ввиду своей нелинейности;
 - ▶ Каналы «смотрят» в разные стороны, вид облачности в соседних каналах может быть совсем различным (особенно в случае полупрозрачной облачности), причем облачность меняется и за время межканальной задержки съемки (20-40 сек). Задействовать мультиспектральные индексы для выделения облачности не представляется возможным – в том числе также по причине непредсказуемой калибровки;
 - ▶ Выбросы типа «соль и перец», сплошные полосы шумов и порча изображений по другим причинам
-

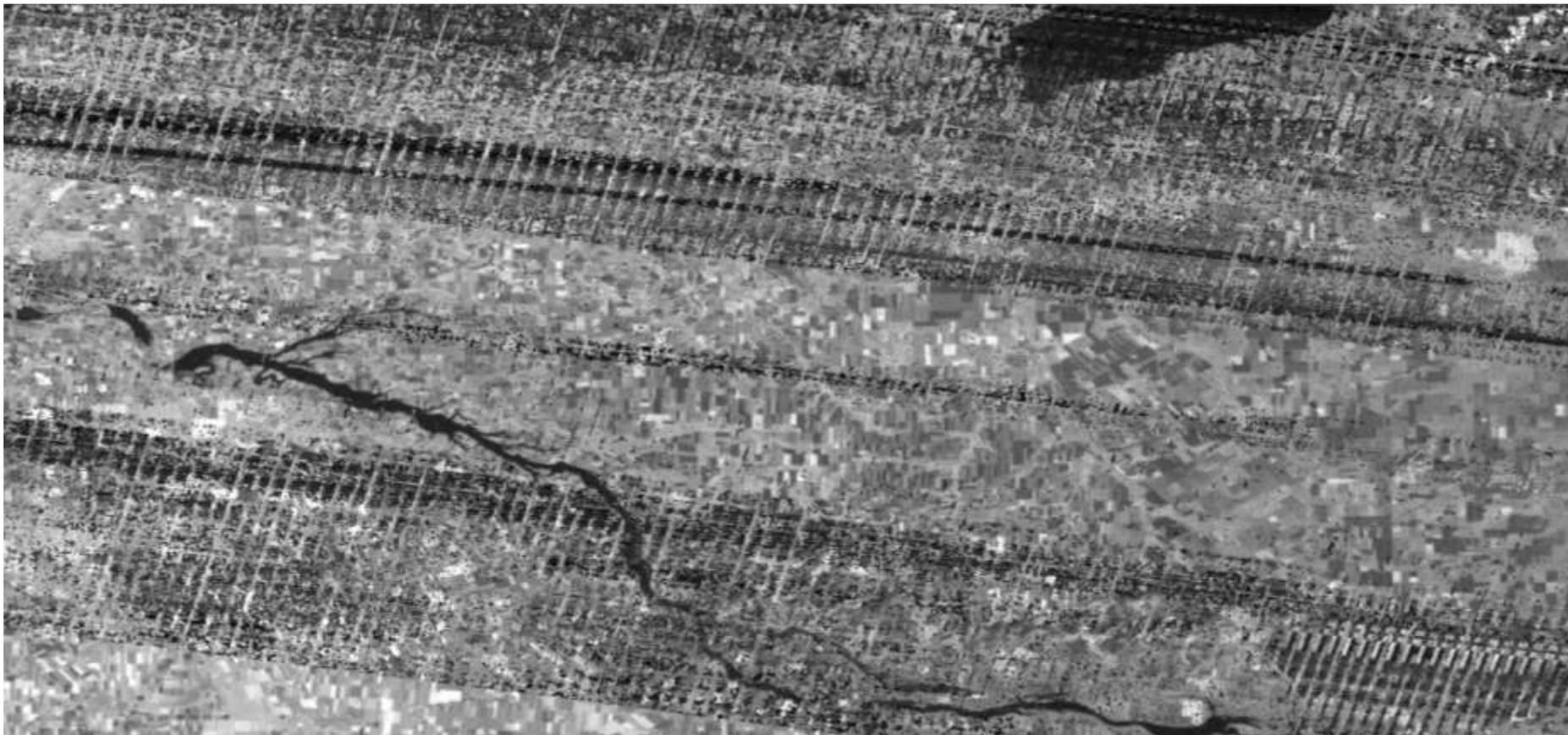
Вид облачности на разноканальных изображениях



Проблемы

- ▶ Исходные данные не калиброваны, наблюдаются отклонения «альбеда» в 1,5-2 раза от ожидаемого значения, которые носят случайный характер, меняясь во времени и пространстве;
 - ▶ Погрешности привязки могут достигать до 5 пикселей (размер пикселя ~60-100 метров), причем плохо привязанные данные проходят процедуру орторектификации и перевода в географическую проекцию, вызывая значительные и неустраняемые до конца геометрические искажения ввиду своей нелинейности;
 - ▶ Каналы «смотрят» в разные стороны, вид облачности в соседних каналах может быть совсем различным (особенно в случае полупрозрачной облачности), причем облачность меняется и за время межканальной задержки съемки (20-40 сек). Задействовать мультиспектральные индексы для выделения облачности не представляется возможным – в том числе также по причине непредсказуемой калибровки;
 - ▶ Выбросы типа «соль и перец», сплошные полосы шумов и порча изображений по другим причинам
-

Соль и перец



С чего начать?

- ▶ Выработка алгоритма действий
-

Блок-схема калибровки без использования метаданных
(только базовые – координаты и время съемки)

LT – Local Time

GMT – Greenwich Mean Time

$$B = \frac{360}{365}(d - 81)$$

$$\Delta T_{GMT} = LT - GMT$$

$$LSTM = 15^\circ \cdot \Delta T_{GMT}$$

$$\delta = 23.45^\circ \sin \left[\frac{360}{365}(d - 81) \right]$$

$$EoT = 9.87 \sin(2B) - 7.53 \cos(B) - 1.5 \sin(B)$$

$$TC = 4(LSTM - Longitude) + EoT$$

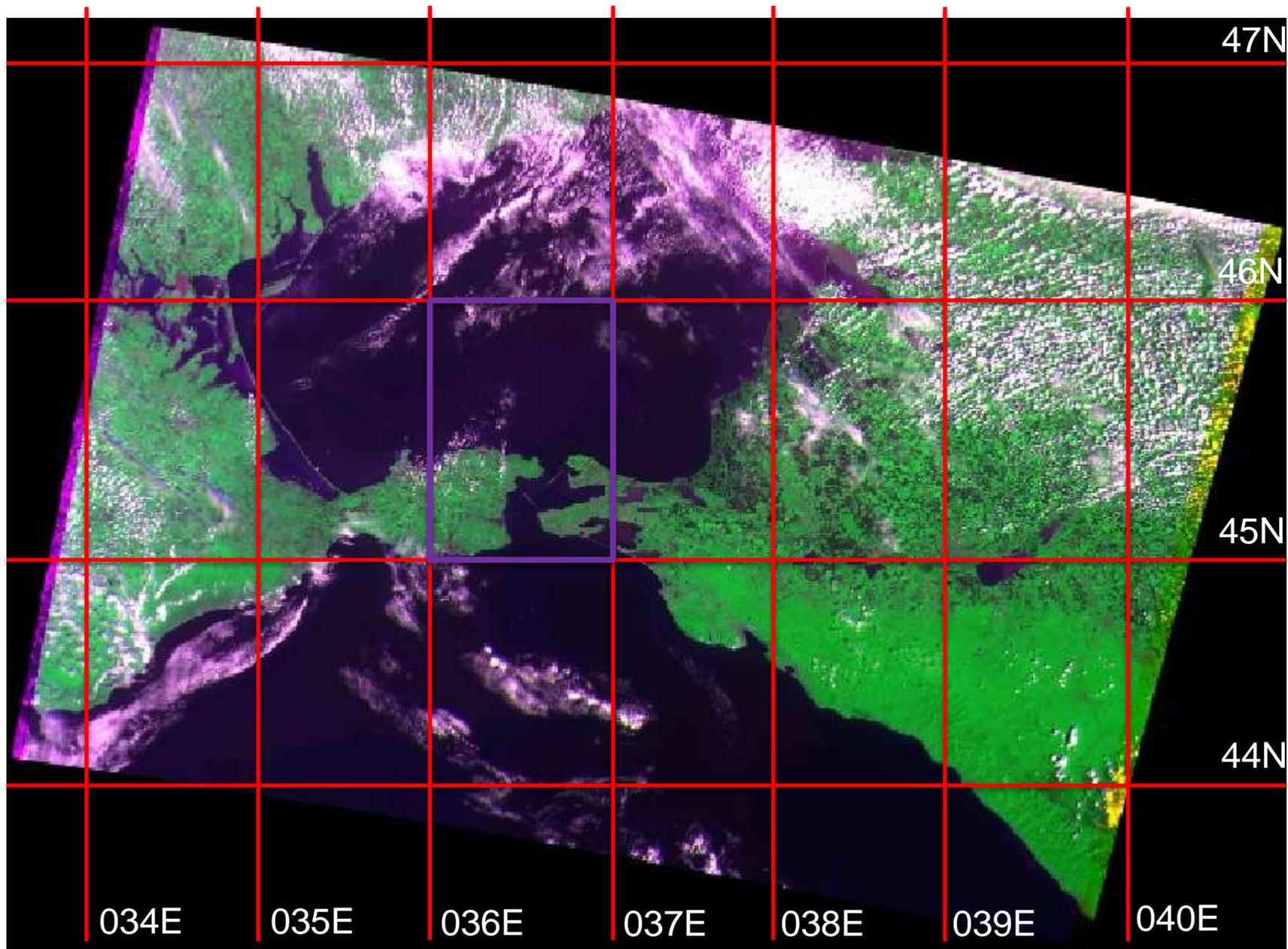
$$LST = LT + \frac{TC}{60}$$

$$Elevation = \sin^{-1} [\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos(HRA)]$$

$$Azimuth = \cos^{-1} \left[\frac{\sin \delta \cos \phi - \cos \delta \sin \phi \cos(HRA)}{\cos \alpha} \right]$$

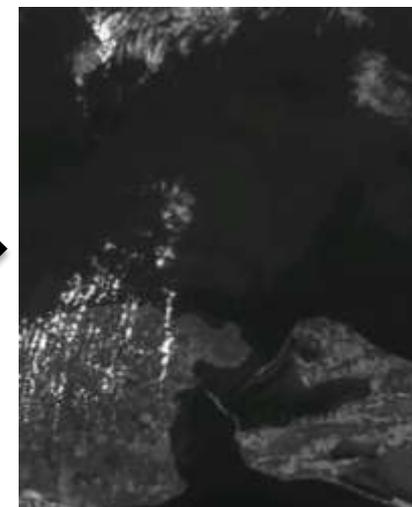
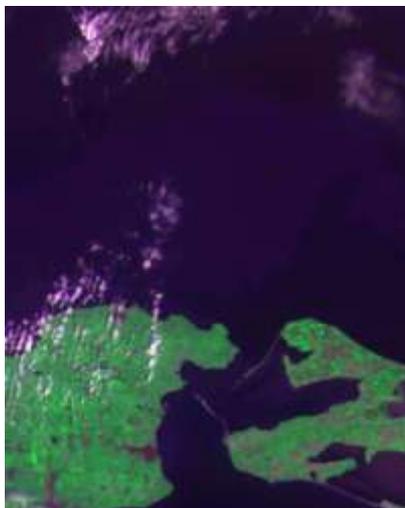
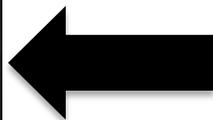
$$HRA = 15^\circ(LST - 12)$$

Гранульный формат данных



Формат имени файлов\продуктов

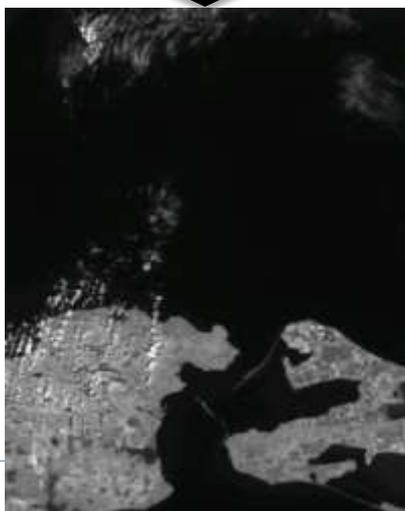
[BAND][Sensor].A[YEAR][DoY]T[Hour][Min][Sec].[E/N][Lon][N/S][Lat]



GREEN101.A2016138T070843.E036N46



RED101.A2016138T070843.E036N46



NIR101.A2016138T070843.E036N46

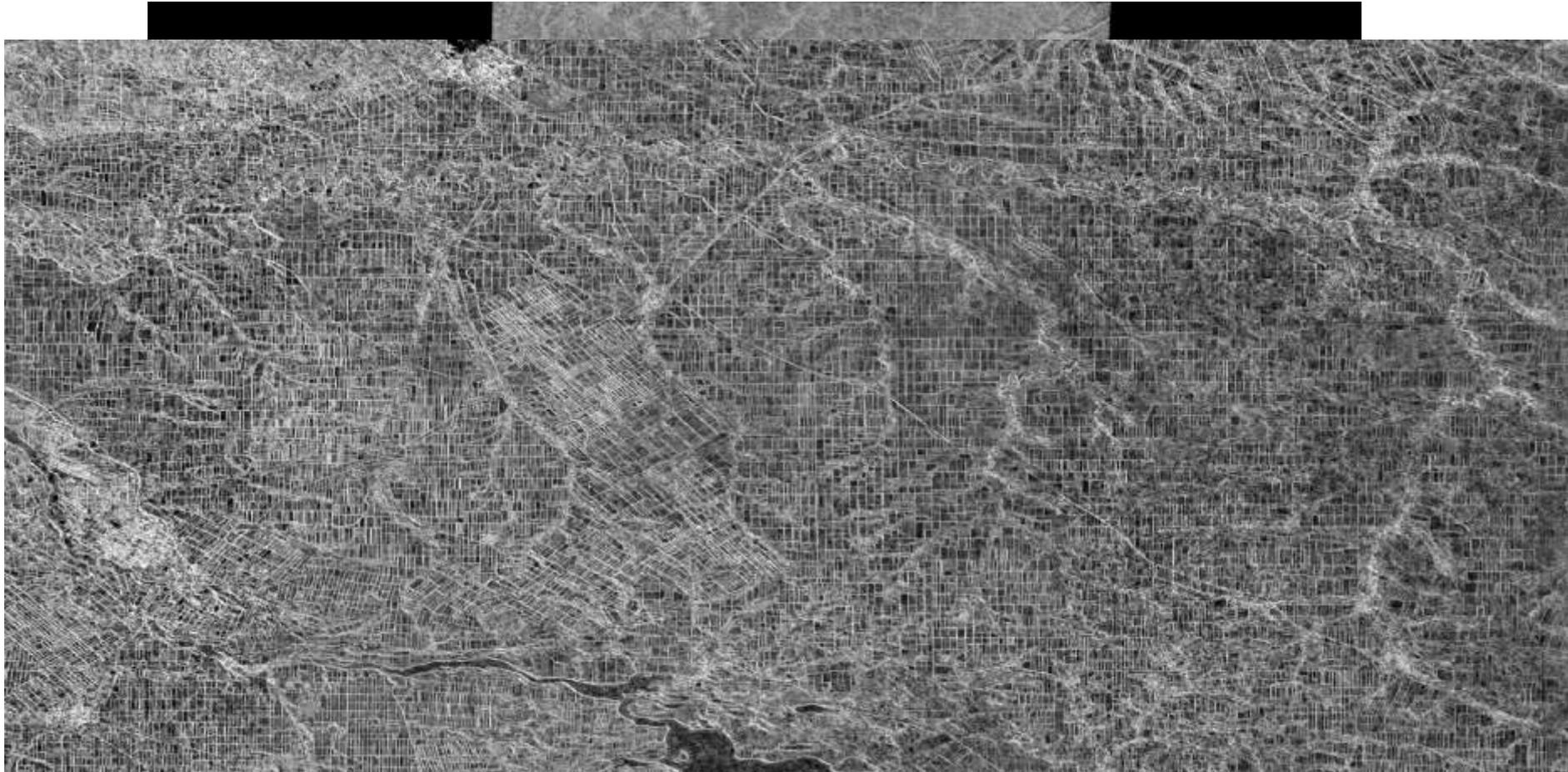
Как сделать допривязку?

- ▶ Можно попробовать привязаться к подложке-опоре, но нужен относительно быстрый метод, не требующий привлечения больших объемов опорных данных
-

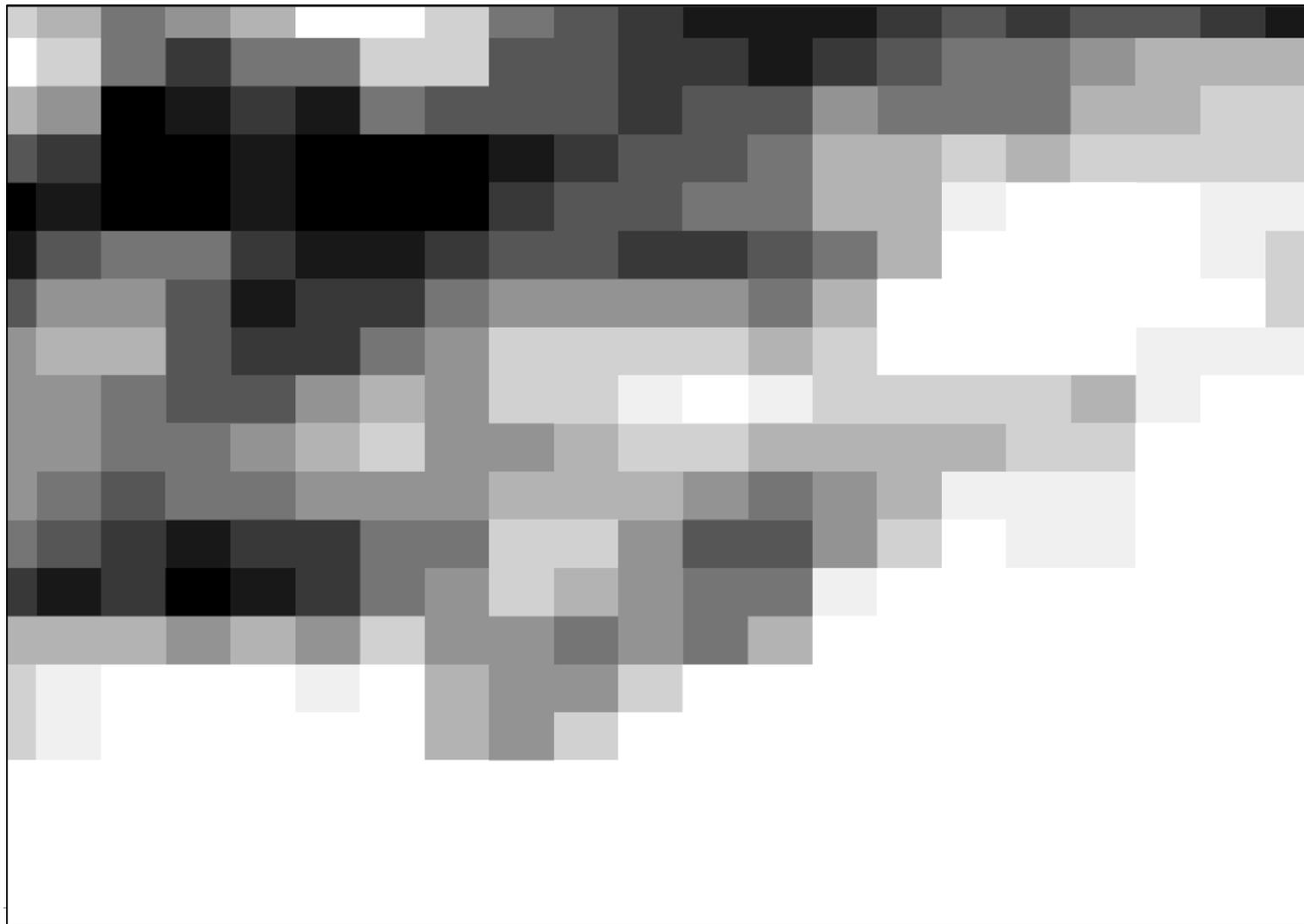
Метод анализа границ объектов земной поверхности для допривязки и выявления потенциальной облачности и теней (2 в 1)

- ▶ 1. Подготовка «подложки» Landsat. Эталонная подложка имеет идеальную привязку и содержит наиболее устойчивые границы объектов земной поверхности, её можно обновлять, например, раз в год, чтобы учитывать появление новых и исчезновение старых объектов – например, полей, вырубок, гарей, просек, дорог и др.;
 - ▶ 2. Выделение устойчивых границ на текущем изображении нужного канала КМСС;
 - ▶ 3. Поиск наиболее оптимального положения границ внутри рассматриваемого блока изображения с расчетом характеристики «оптимальности» этого положения.
-

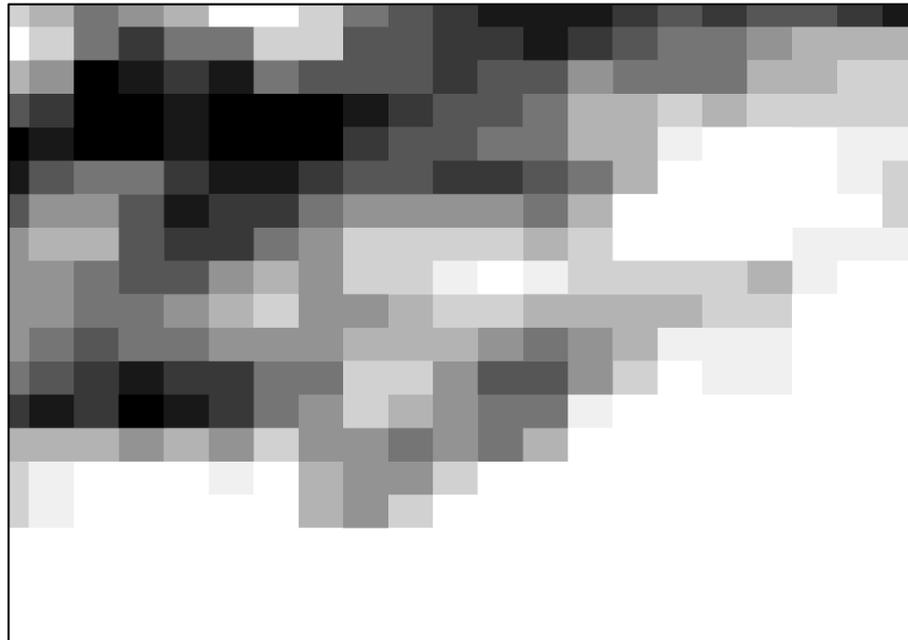
Пример подложки границ по Landsat



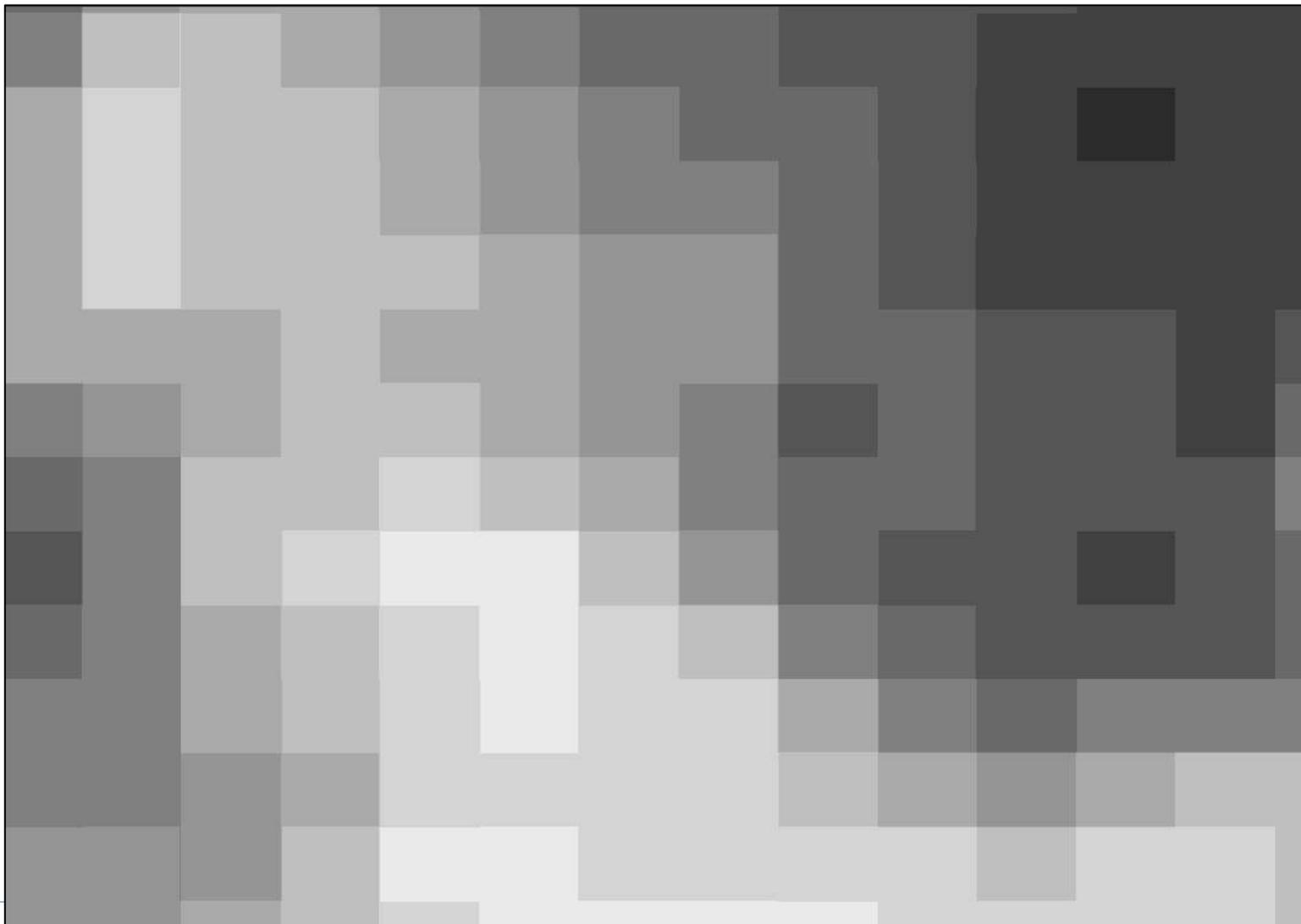
Пример расчета слоя оптимальной суммы



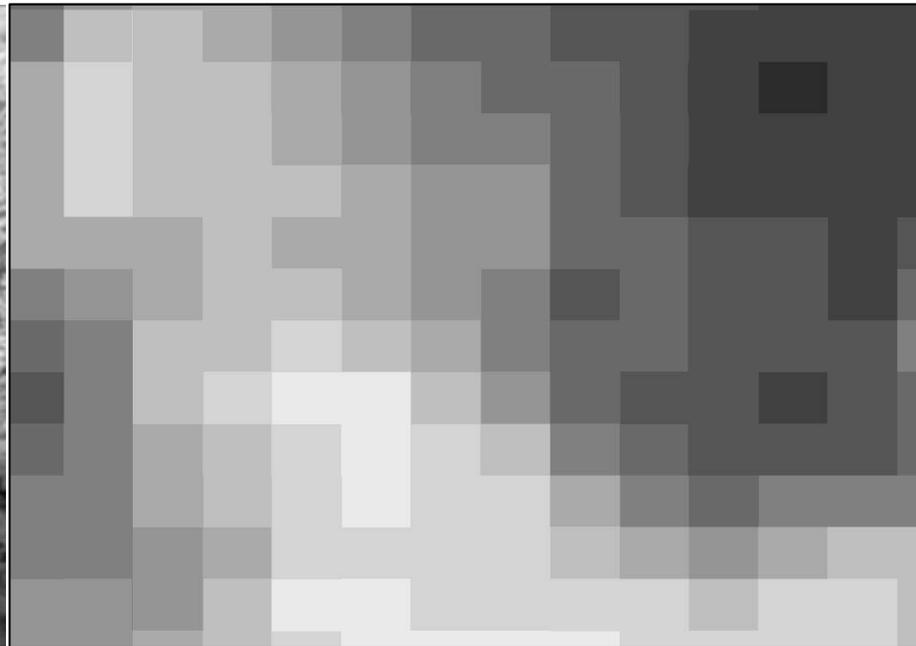
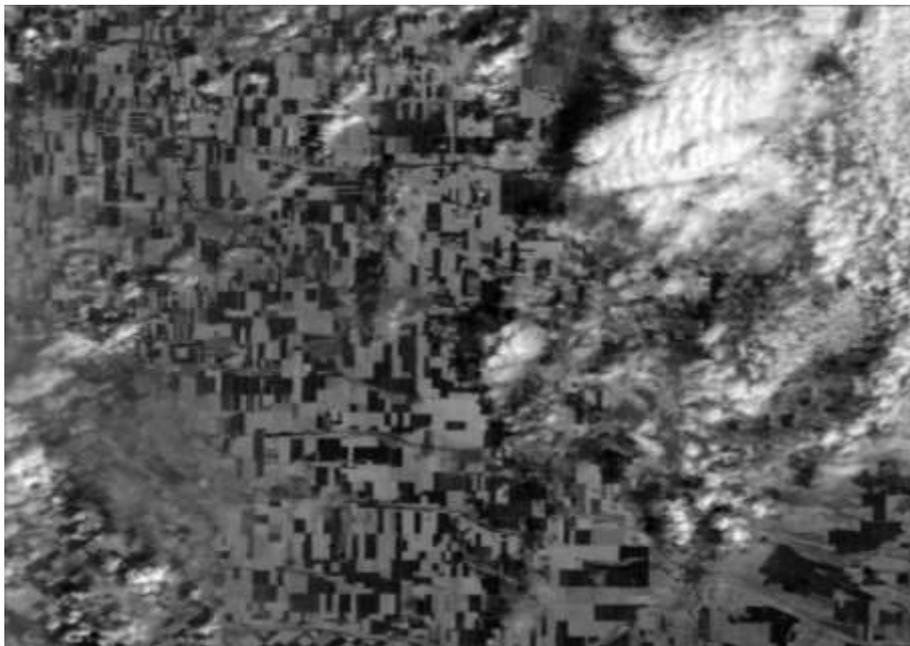
Исходное изображение и ОС



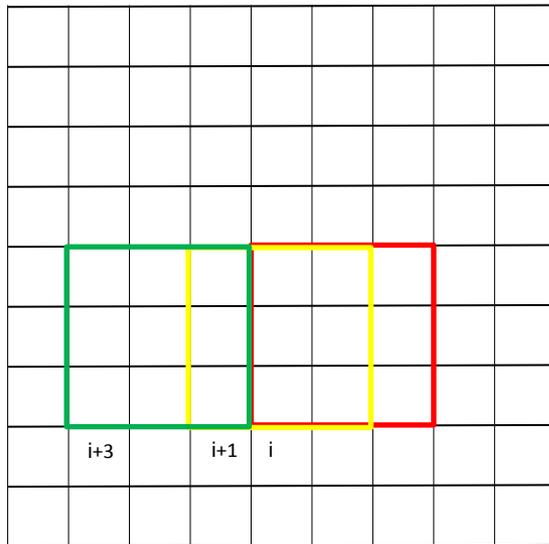
Пример расчета слоя оптимальной суммы



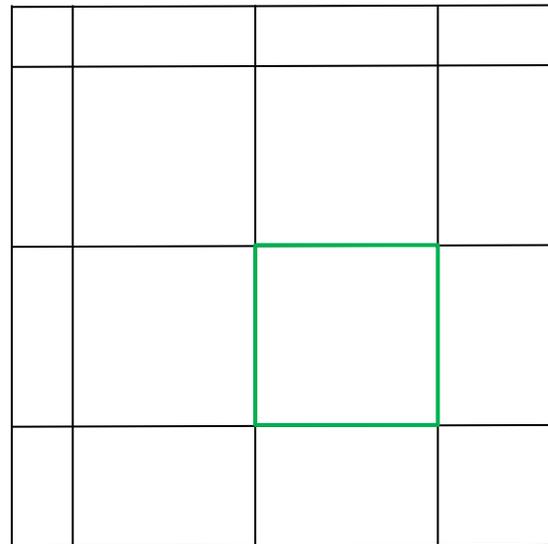
Исходное изображение и ОС



Идея метода привязки изображения высокого разрешения по опоре низкого разрешения



Сетка пикселей изображения высокого разрешения (BP) – ровно вчетверо детальнее



Сетка пикселей изображения низкого разрешения (HP)

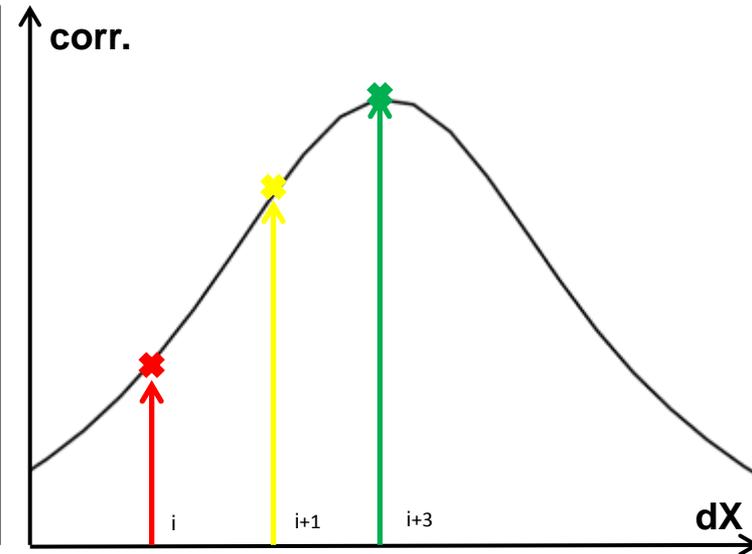
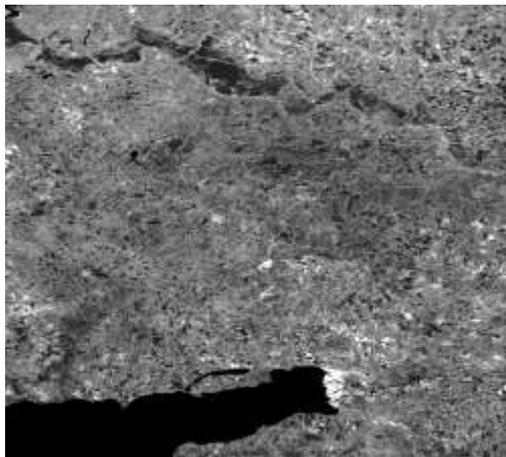


Иллюстрация динамики значения k -та корр. Пирсона между окнами

- ▶ 1) загрубление всех пикселей BP в скользящем окне с положением I
- ▶ 2) сравнение загрубленного BP с HP (разрешение вчетверо хуже) и расчет k -та корр. Пирсона
- ▶ 3) сдвиг сетки загрубления BP на 1 пиксель

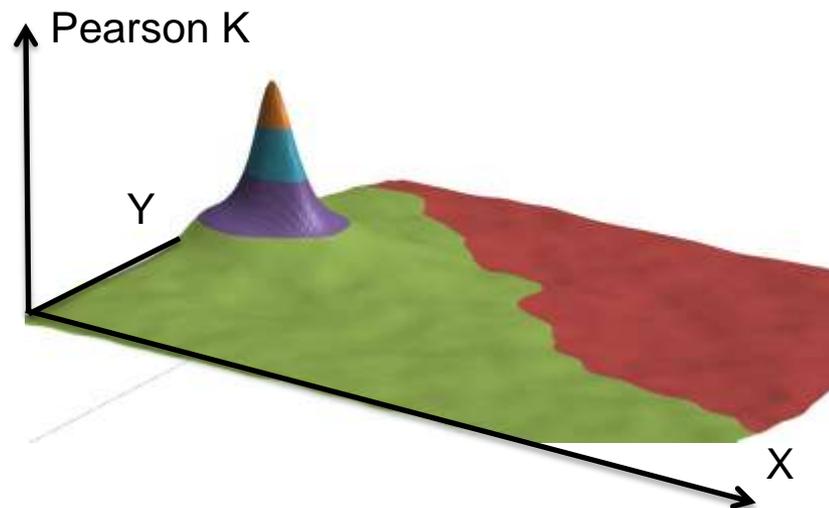
Блок устранения аномалий географической привязки



Точно привязанный и актуализированный эталон MODIS



Допривязываемое изображение KMCC



Зависимость корреляции от взаимного положения изображений KMCC-MODIS

Двухэтапная допривязка:

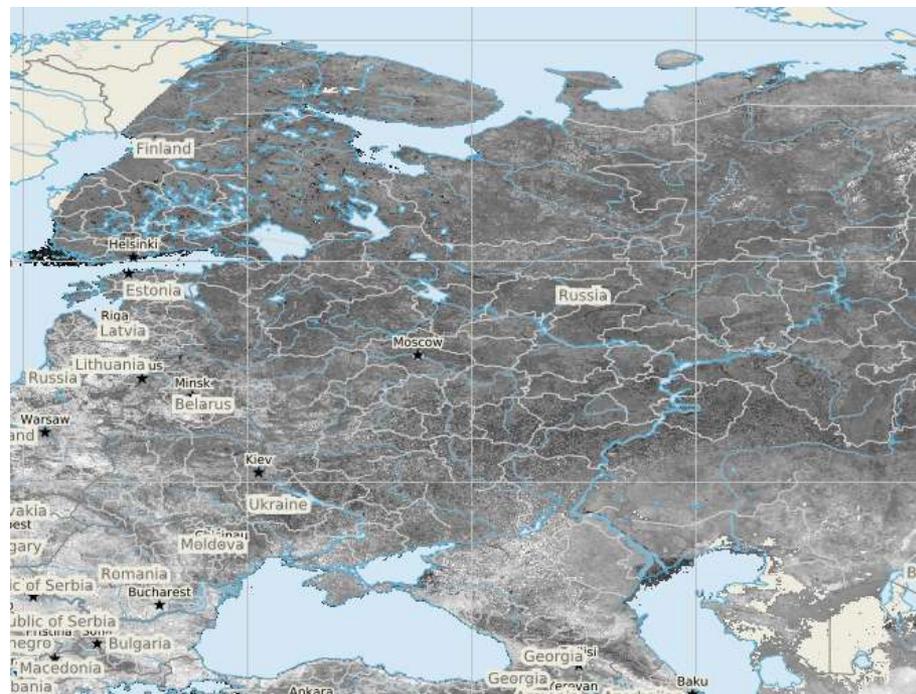
- ▶ Поиск и устранение систематического смещения всего изображения KMCC dX_0, dY_0 относительно эталона MODIS;
- ▶ Локализованный поиск и устранение местных искажений географической привязки dX_{loc}, dY_{loc} в узлах сети с шагом 100 пикселей ~ 6 км

$$dX = dX_0 + dX_{loc}$$

$$dY = dY_0 + dY_{loc}$$

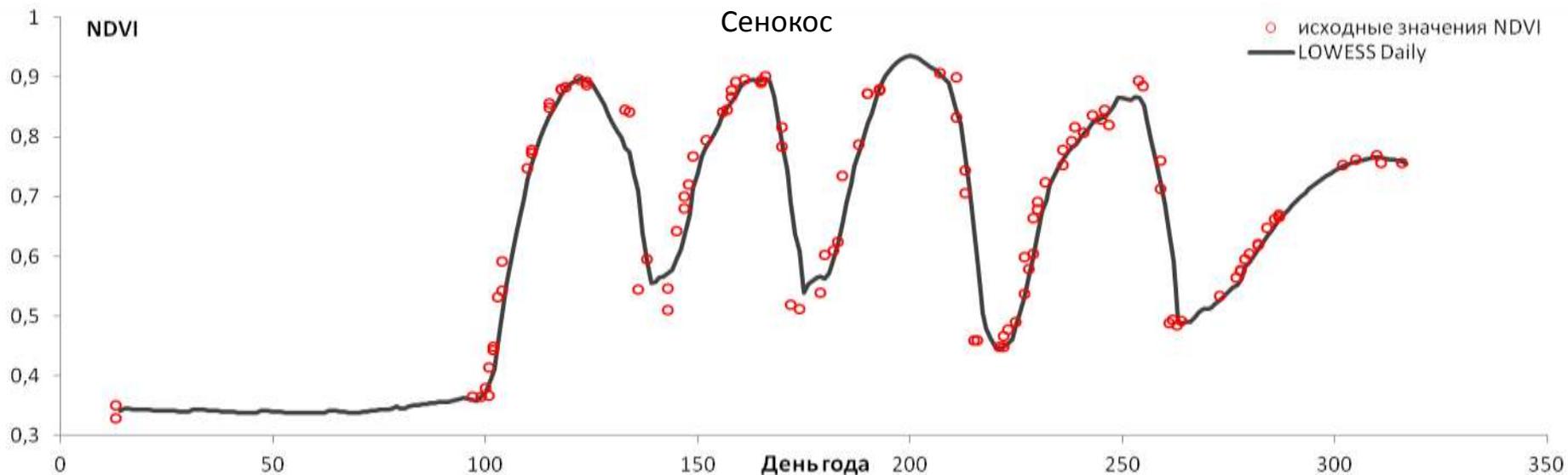
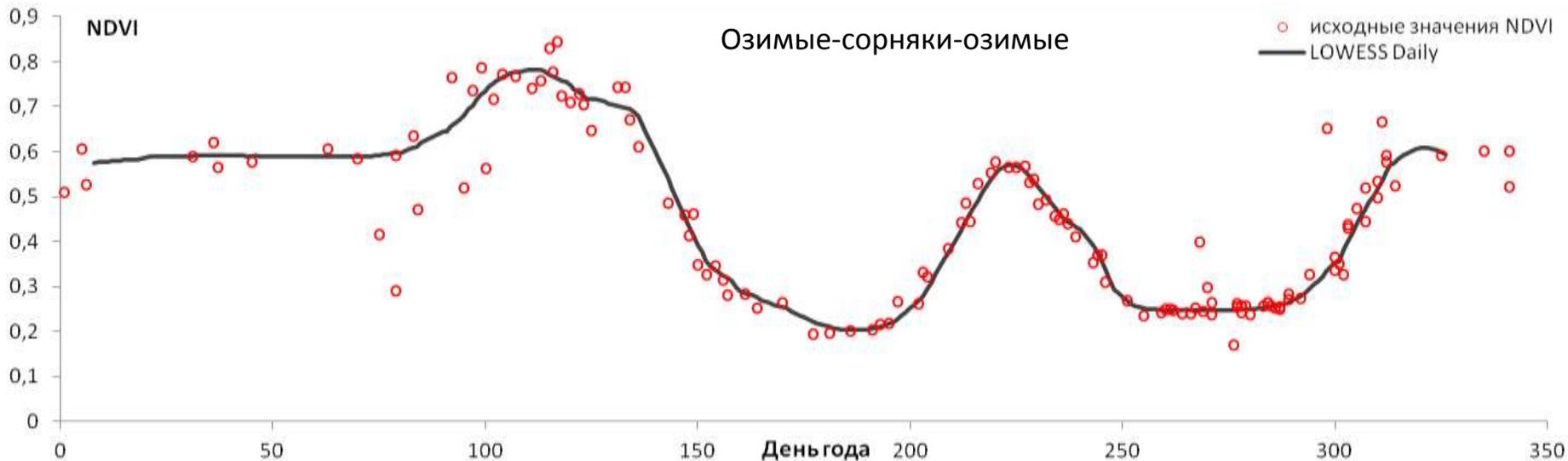
Эталон на основе MODIS MOD09

- ▶ В качестве эталона используются ежедневные безоблачные изображения с прибора MODIS, полученные в оперативном режиме путем восстановления пропущенных и искаженных измерений на основе метода wLOESS (Cleveland, 1979)
- ▶ Такой эталон:
 - ▶ Содержит **калиброванные, атмосферно-скорректированные измерения КСЯ** земной поверхности в необходимых спектральных каналах;
 - ▶ Позволяет компенсировать влияние **геометрии наблюдения и освещения** на значения КСЯ;
 - ▶ Характеризуется максимально **полным покрытием** на любой день года;
 - ▶ Характеризуется точной **географической привязкой** (СКО согласно Senintel-2 в среднем лучше 30 метров при размере пикселя ~250 метров)

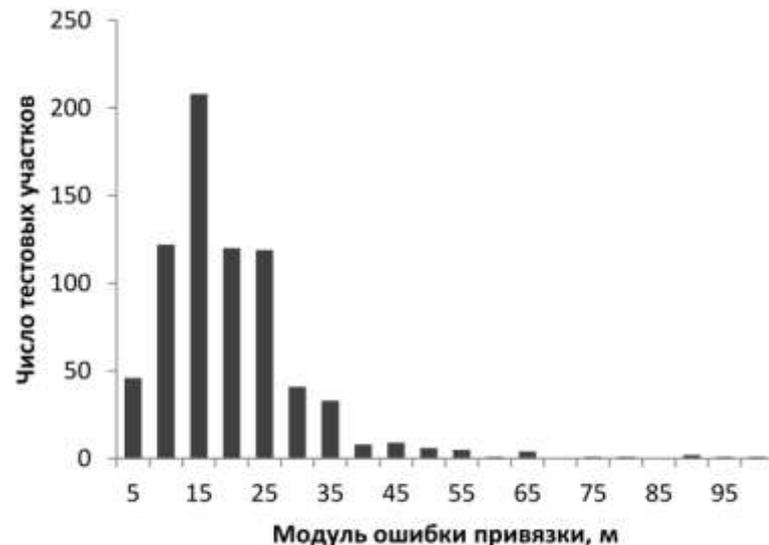
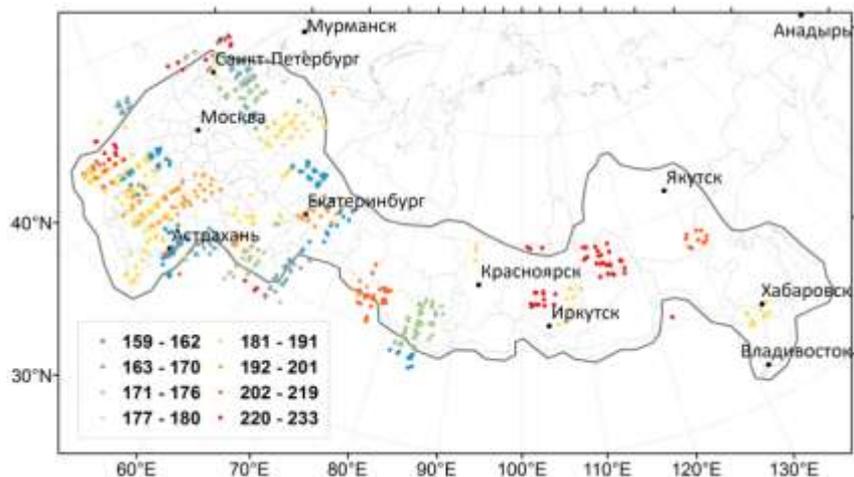


Изображение эталона MODIS в красном канале на 1 апреля 2020 года

Весовая интерполяция LOWESS для скорректированных измерений

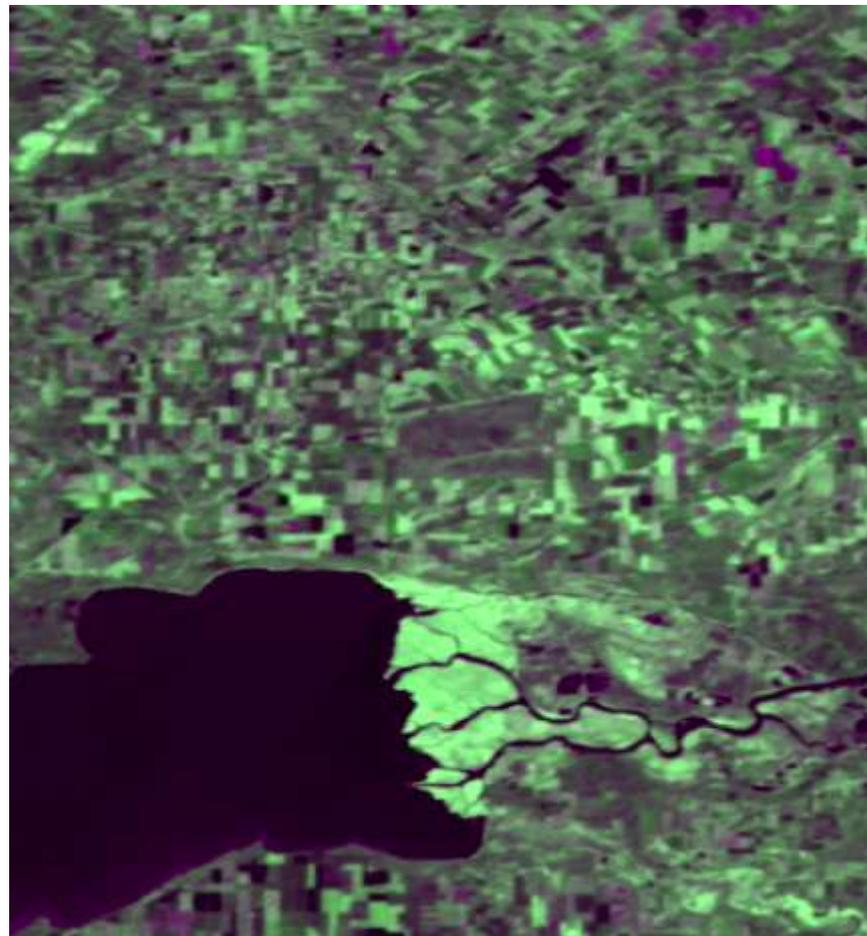
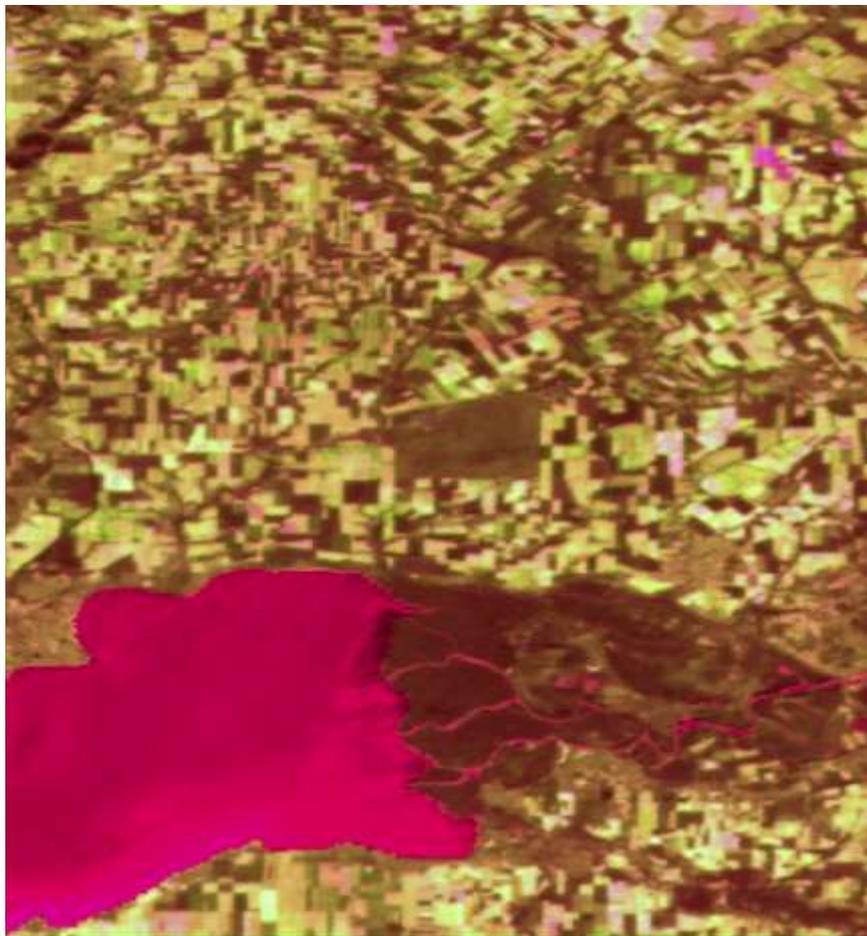


Оценка точности привязки эталона MODIS



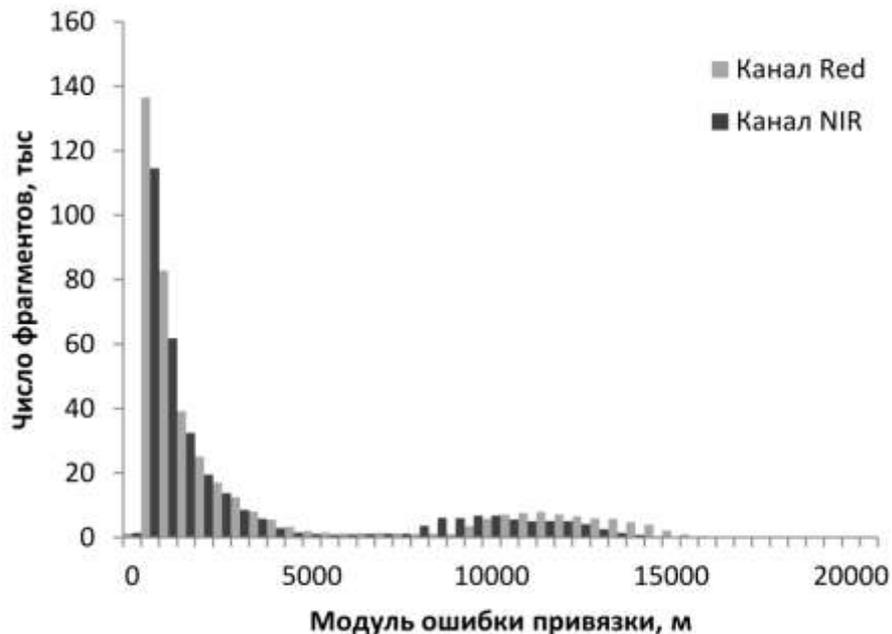
- ▶ В рамках эксперимента было обработано 736 случайно выбранных на территории России участков изображений MODIS в инфракрасном канале и 680 участков в красном канале. Среднее значение абсолютной ошибки привязки данных MODIS составило 18 метров в инфракрасном канале и 19 метров в красном канале (менее 8% размера пиксела)

Устранение ошибок географической привязки

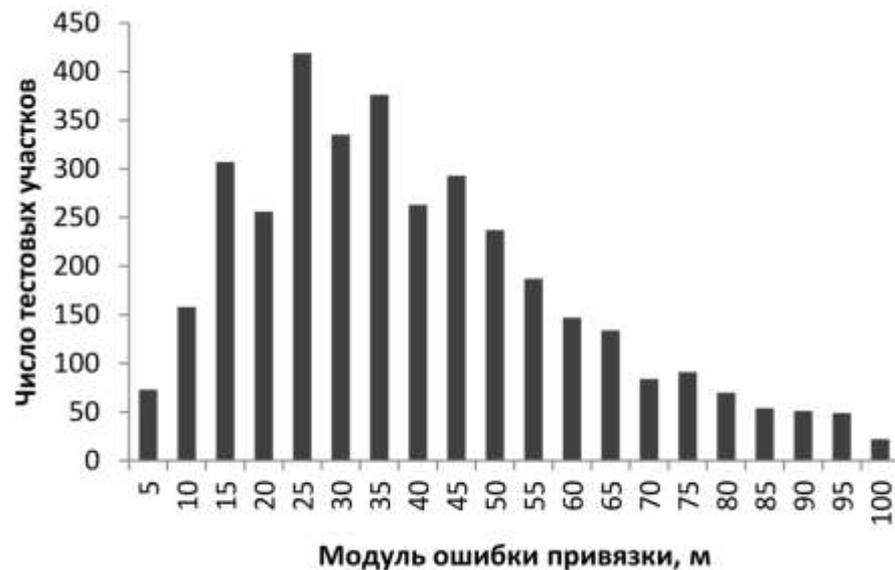


Мультисенсорный синтез изображений **КМСС-М\MODIS** до географической допривязки и после неё для красного канала (слева) и БИК (справа)

Оценка точности геопривязки изображений КМСС-М



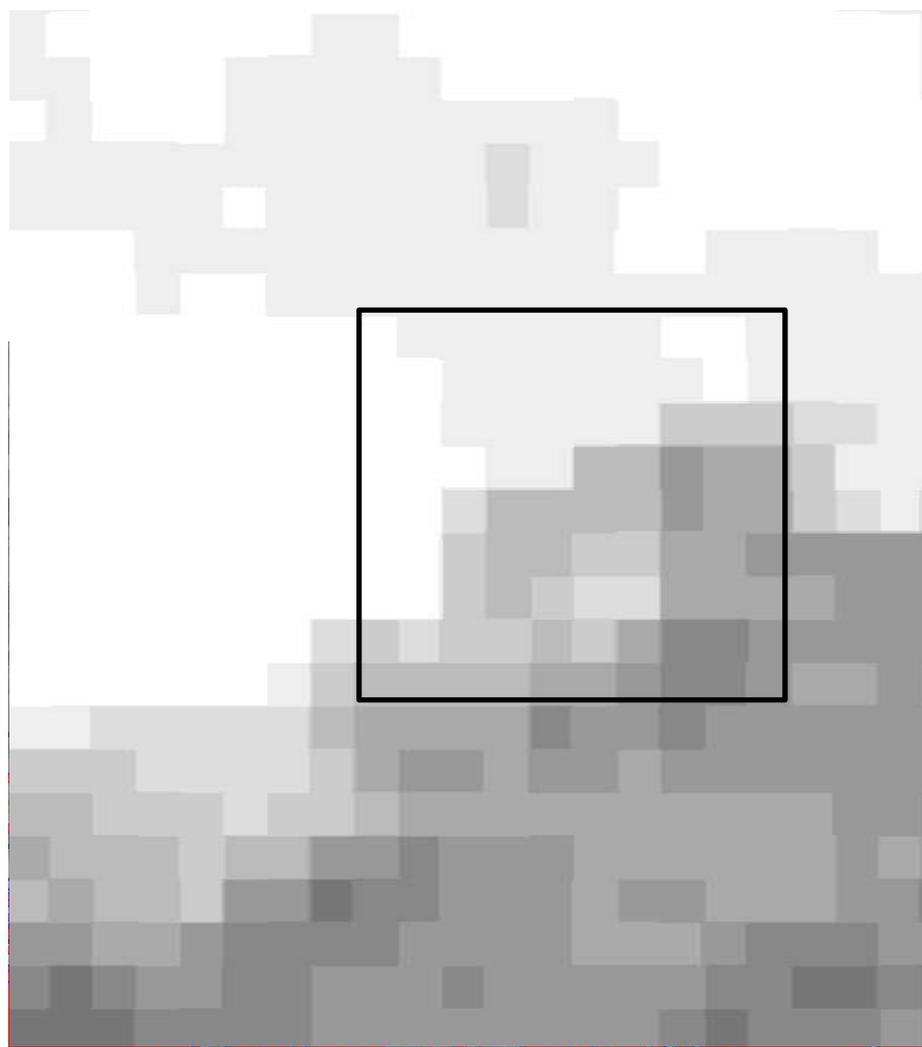
Результаты оценки исходных изображений КМСС-М (Метеор-М №2)



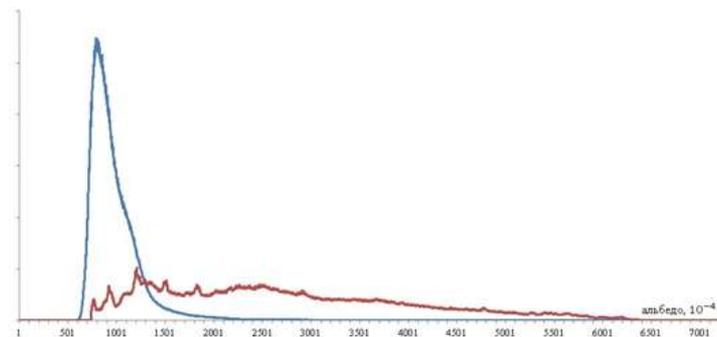
Оценка точности привязки обработанных изображений КМСС-М по данным Sentinel-2 (10 метров)

Plotnikov DE, Kolbudaev PA, Loupian EA. An automatic method for subpixel registration of KMSS-M imagery based on coarse-resolution actualized reference. *Computer Optics* 2022; 46(5): 818-827. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1098.

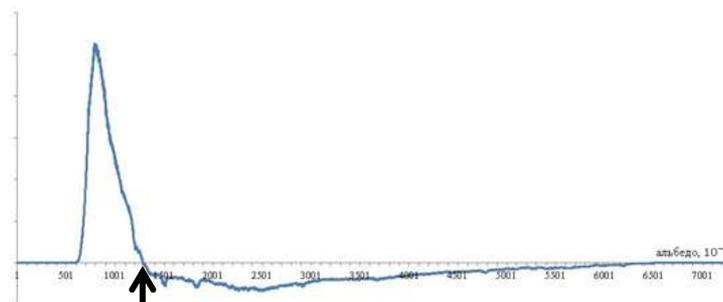
Блок выявления облачности и теней



Часть сцены KMCC-M (NIR) за 19 июля 2020 г.



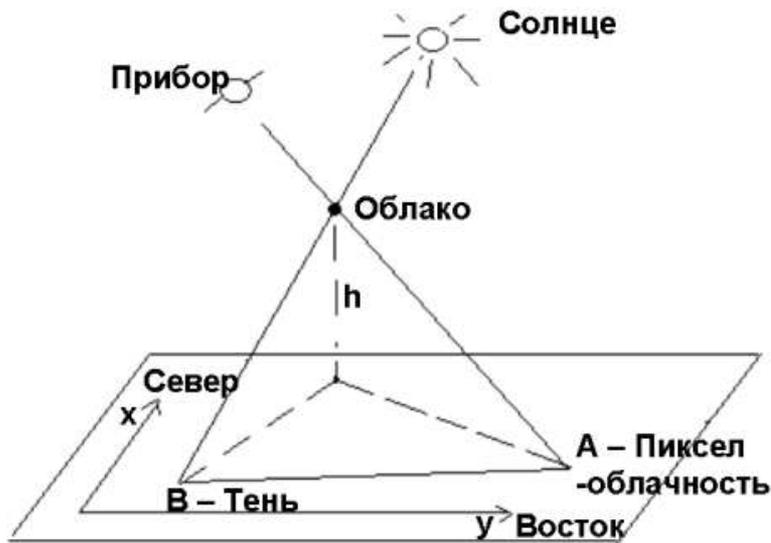
Гистограммы «яркости» чистой поверхности (синяя) и облачной части изображения (красная)



Разность гистограмм

локальное пороговое значение для отделения облачности

Блок выявления облачности и теней



Геометрия положения теней :

$$x = H(\cos(\Psi) \operatorname{tg}(\theta) - \cos(\beta) \operatorname{tg}(\delta))$$

$$y = H(\sin(\Psi) \operatorname{tg}(\theta) - \sin(\beta) \operatorname{tg}(\delta))$$

H - высота облака над Землей,

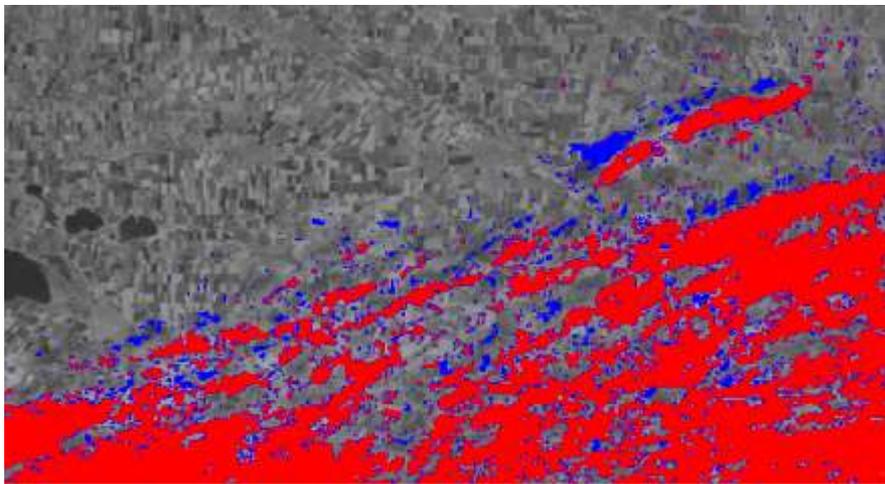
Ψ – азимутальный угол наблюдения

θ – зенитный угол наблюдения

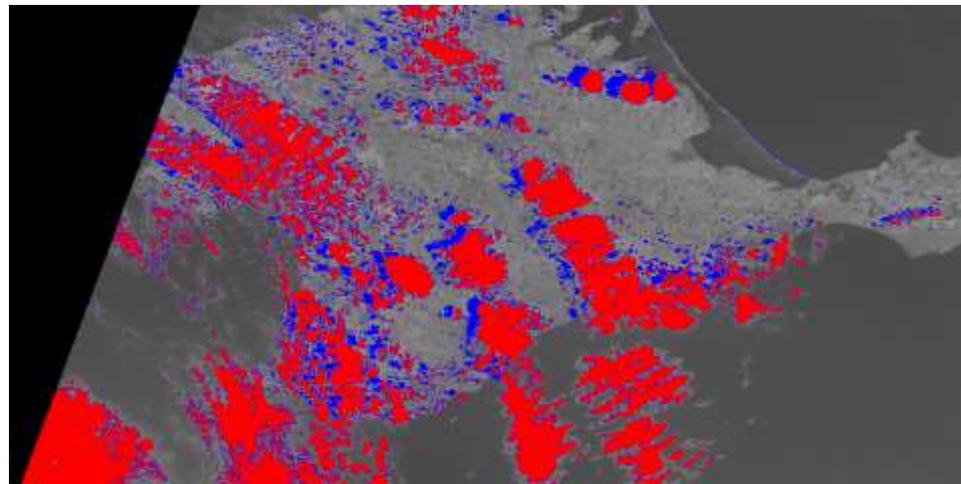
β – азимутальный угол Солнца

δ – зенитный угол Солнца

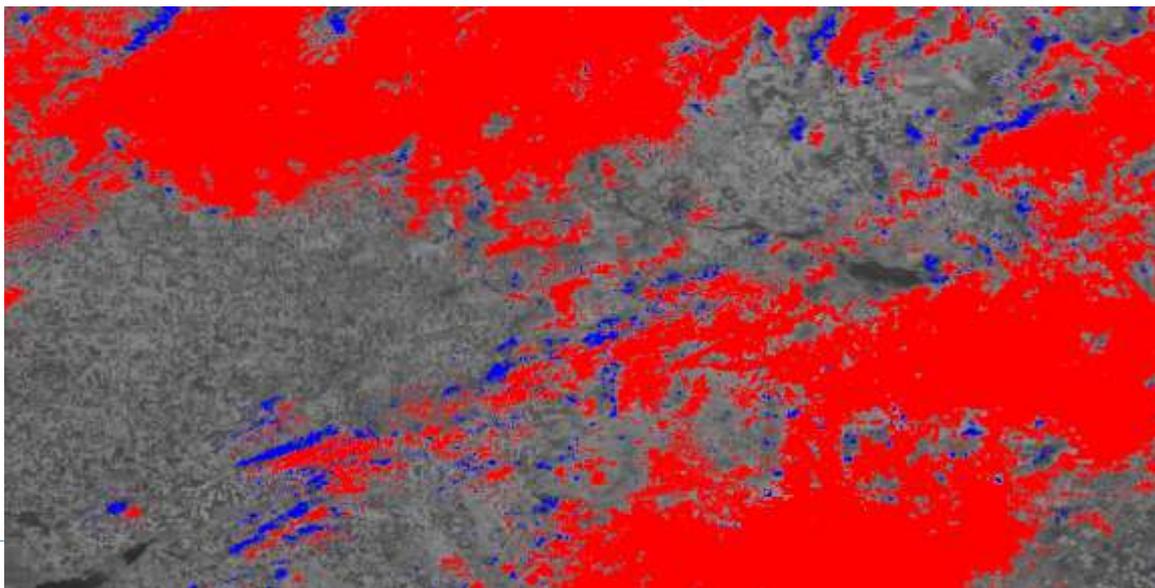
Маскирование облачности и теней



19 июля 2020 года, Восточная Европа

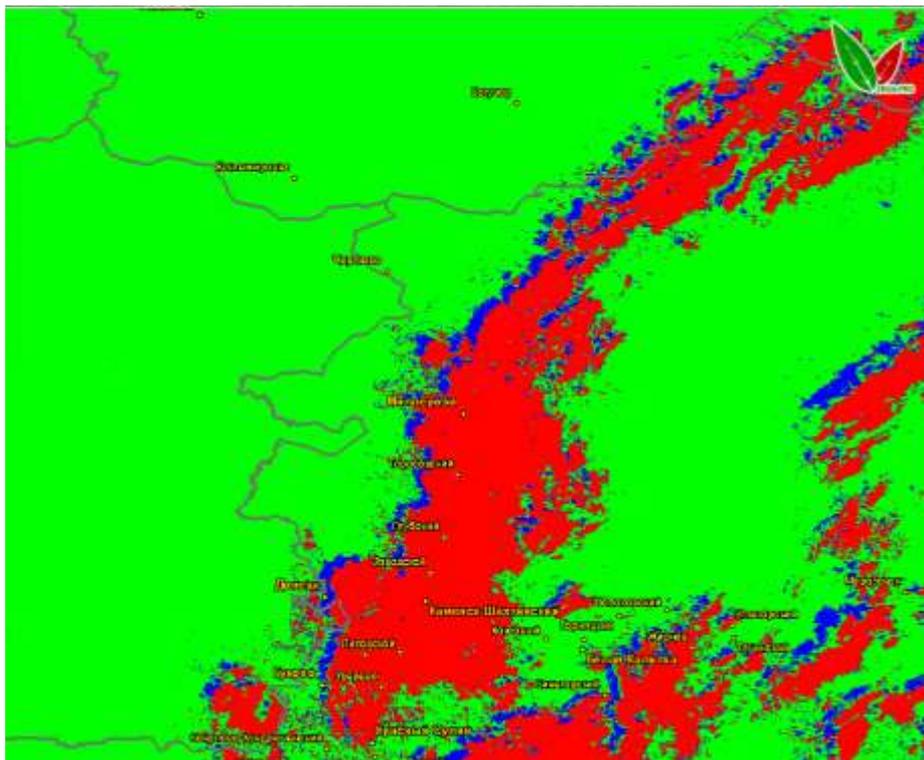


10 мая 2020 года, Крым

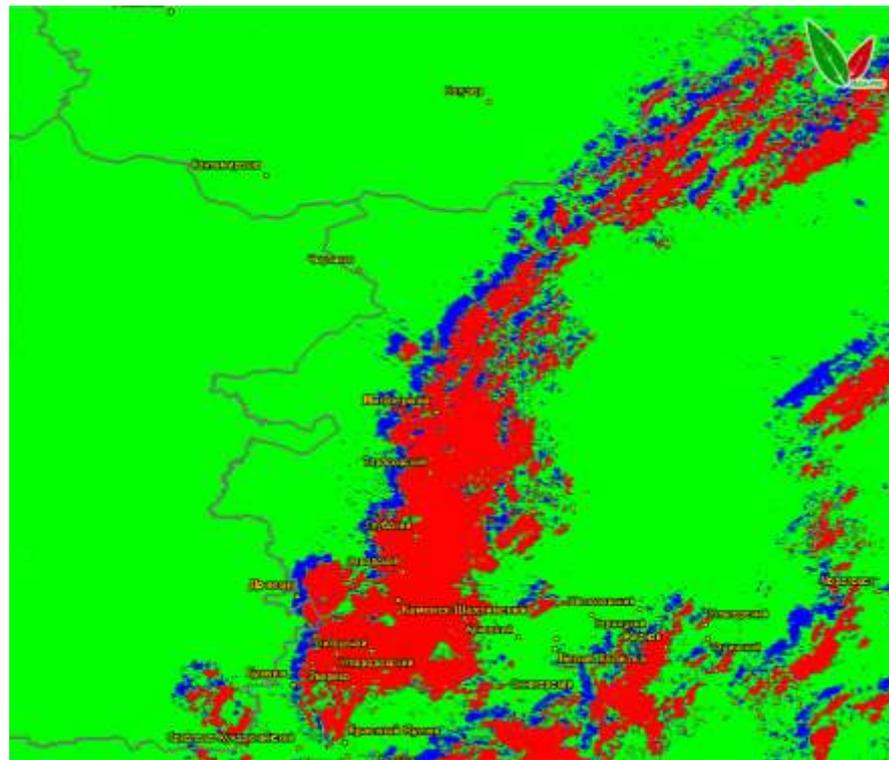


15 мая 2020 года, Южный федеральный округ

Маскирование облачности и теней

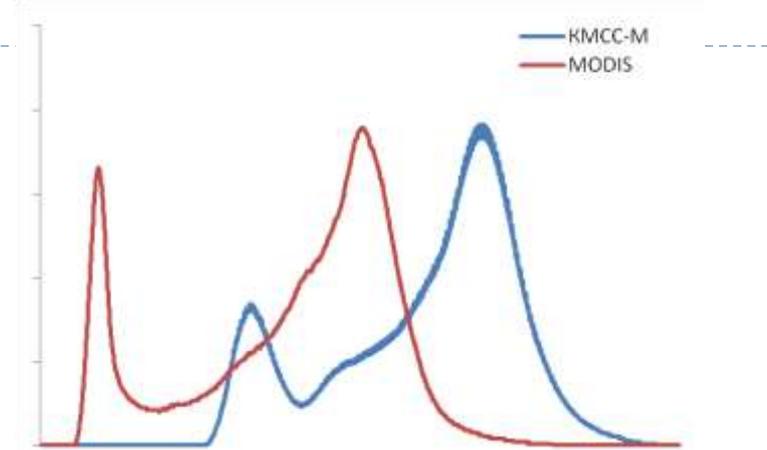
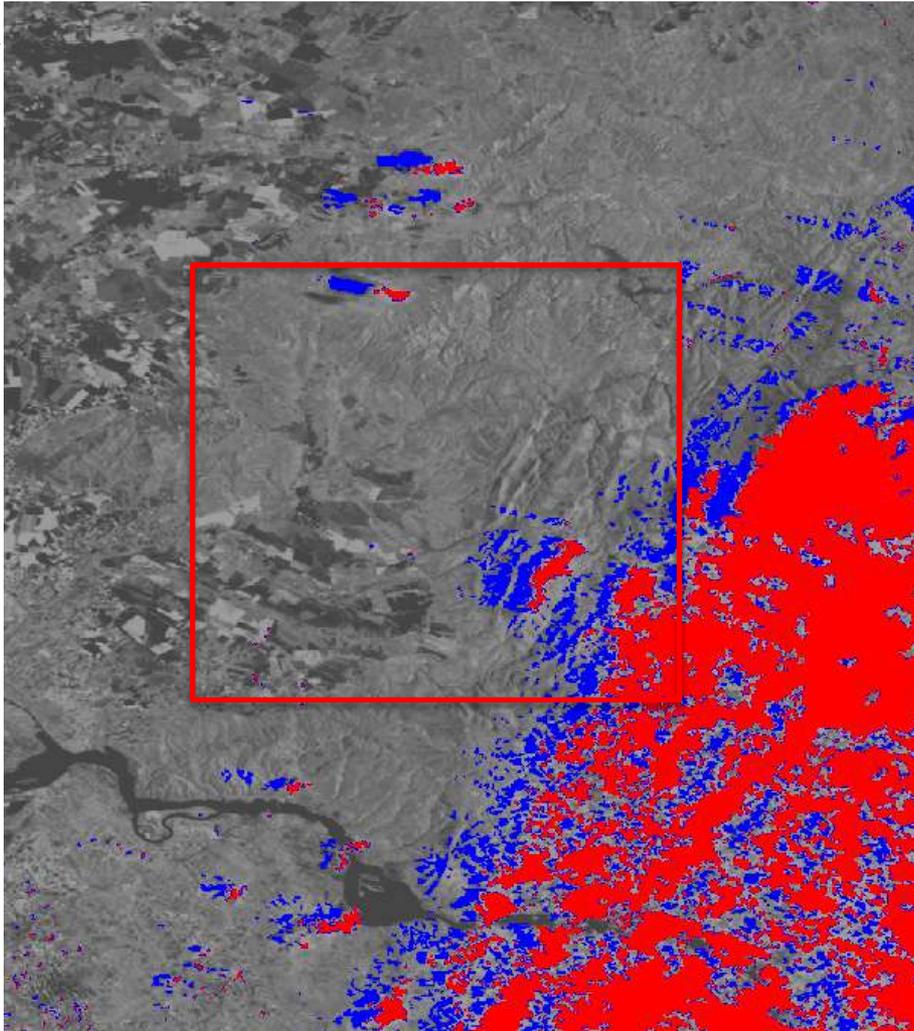


Красный канал КМСС-М

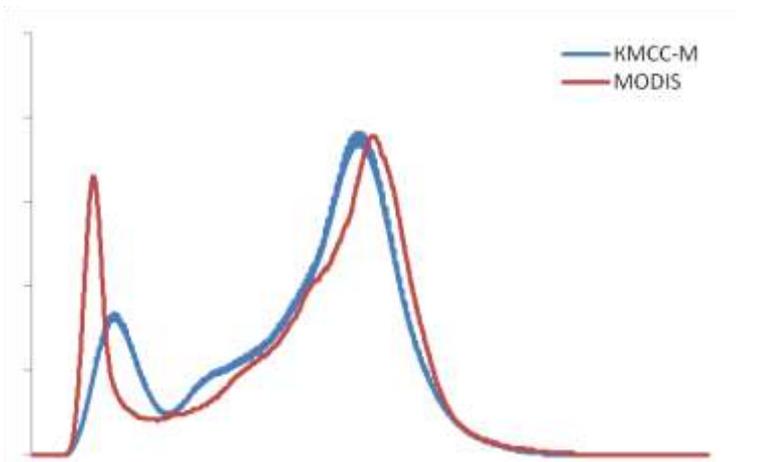


Ближний ИК канал КМСС-М

Блок коррекции влияния атмосферы и докалибровки



До коррекции



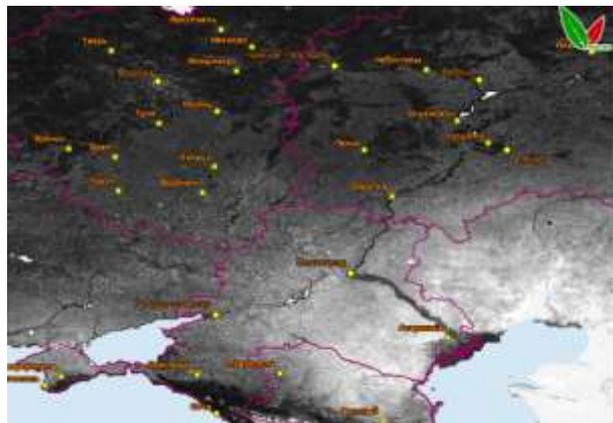
После коррекции

Локализованное приведение скользящими окнами гистограммы яркости чистой поверхности к актуализированному спектральному эталону адаптивно компенсирует влияние нескольких факторов одновременно

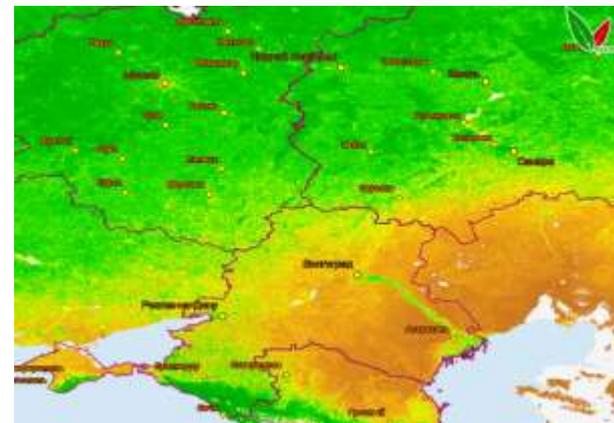
Результаты использования технологии на больших территориях



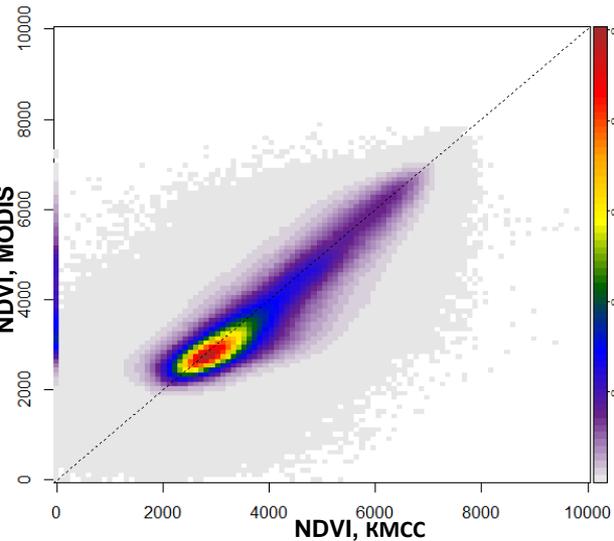
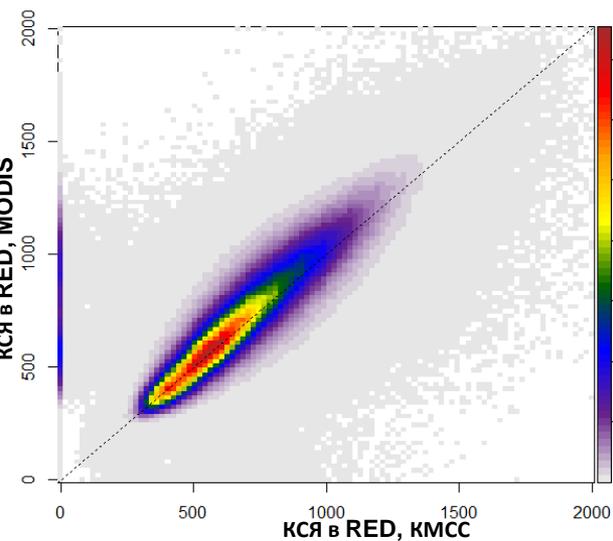
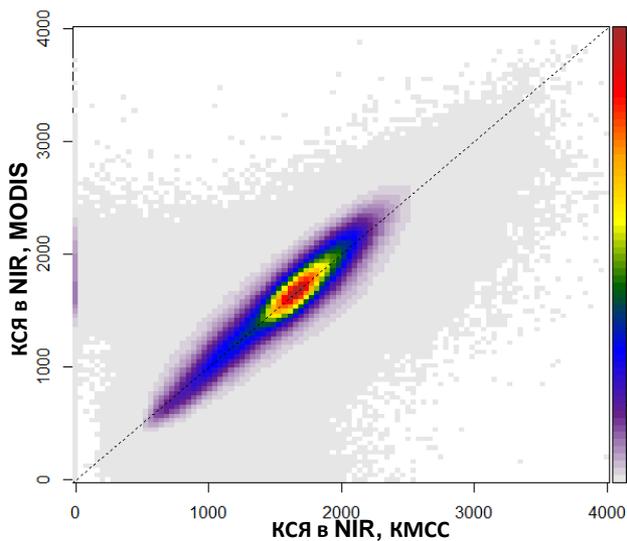
Однодневный композит КМСС в NIR (1.08.2020)



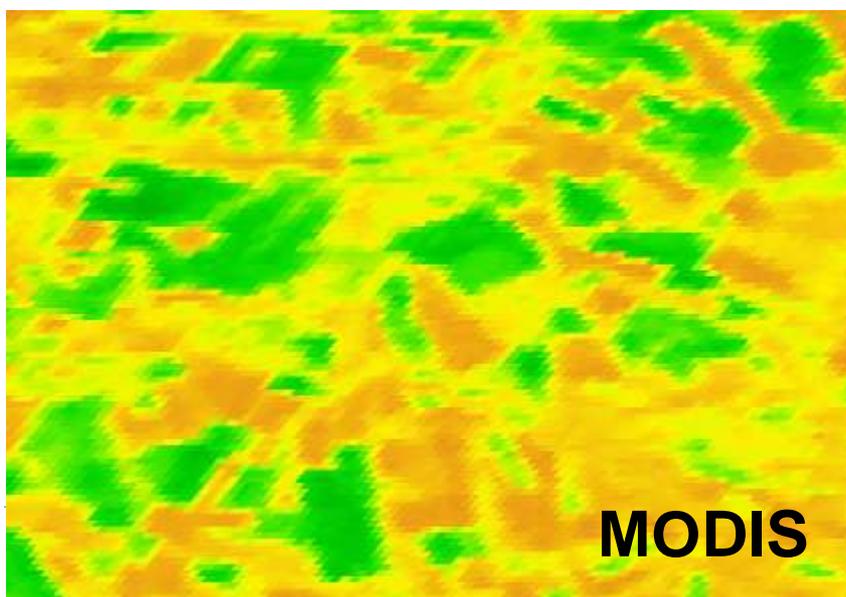
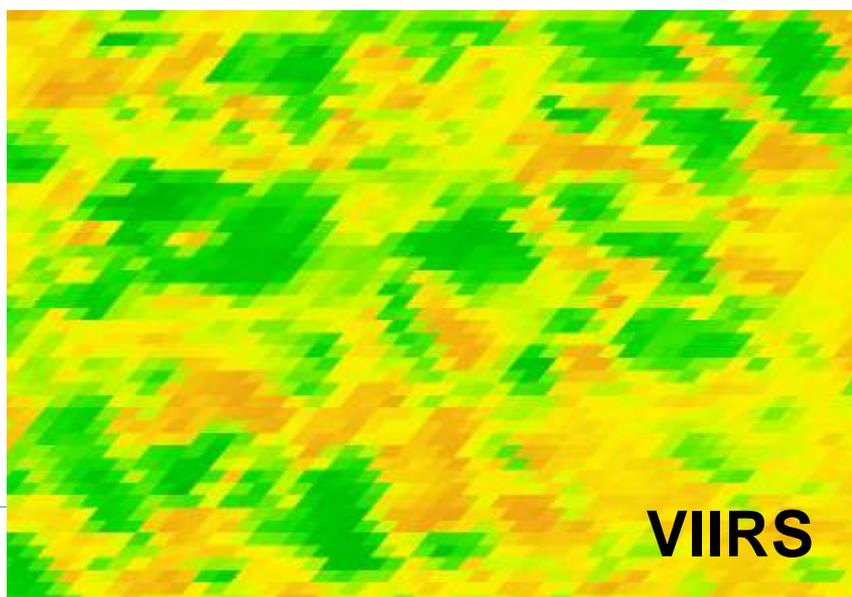
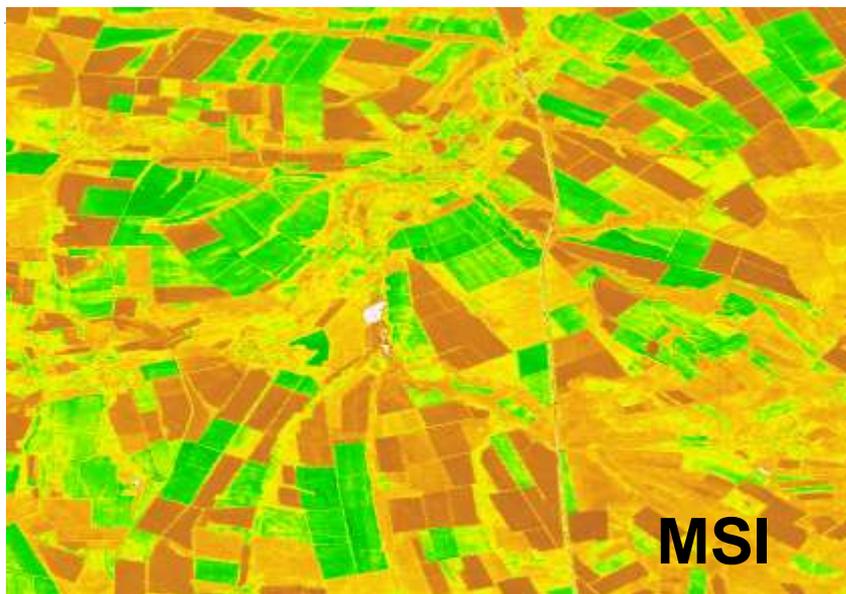
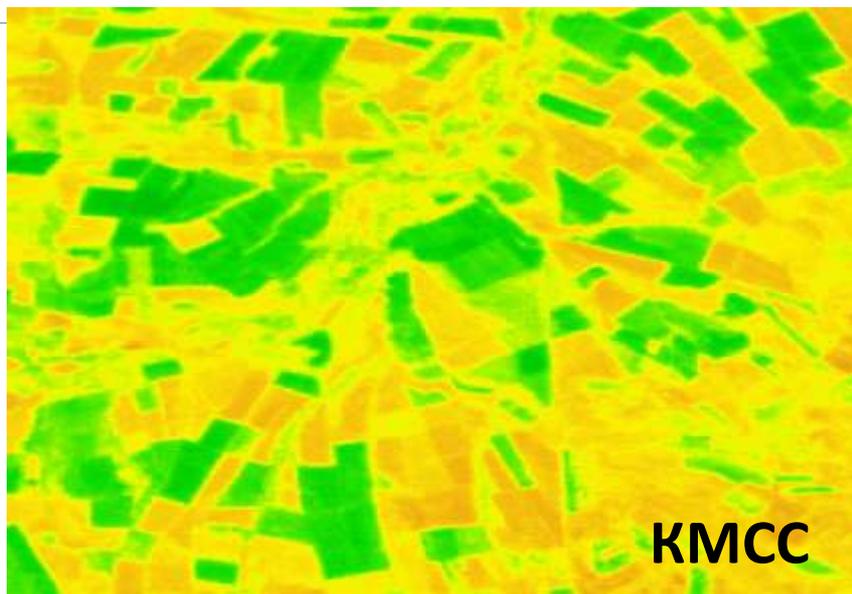
Однодневный композит КМСС в красном канале (1.08.2020)



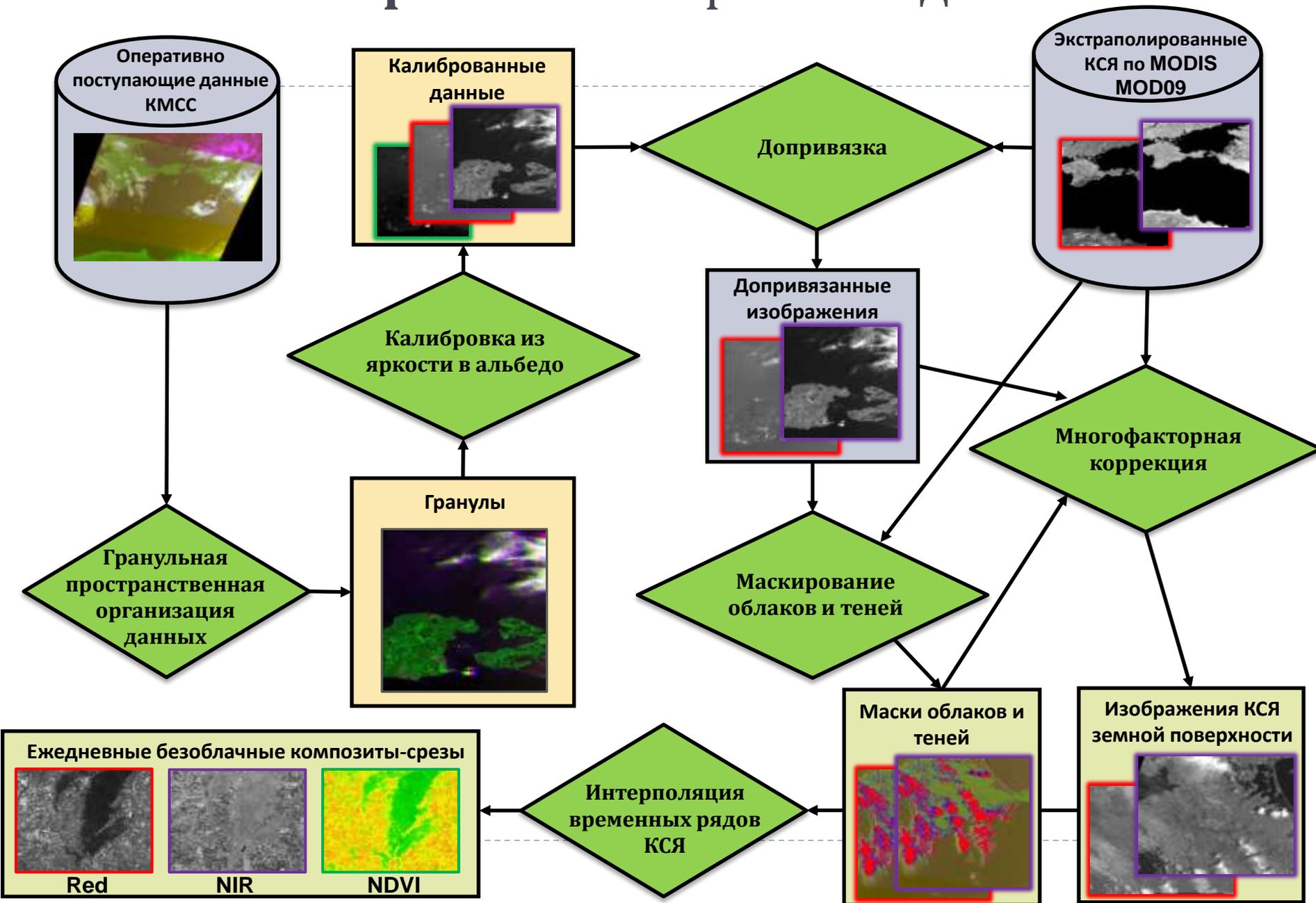
Однодневный композит NDVI по данным КМСС (1.08.2020)



Восстановленный NDVI по данным различных систем на 1 мая 2020 года

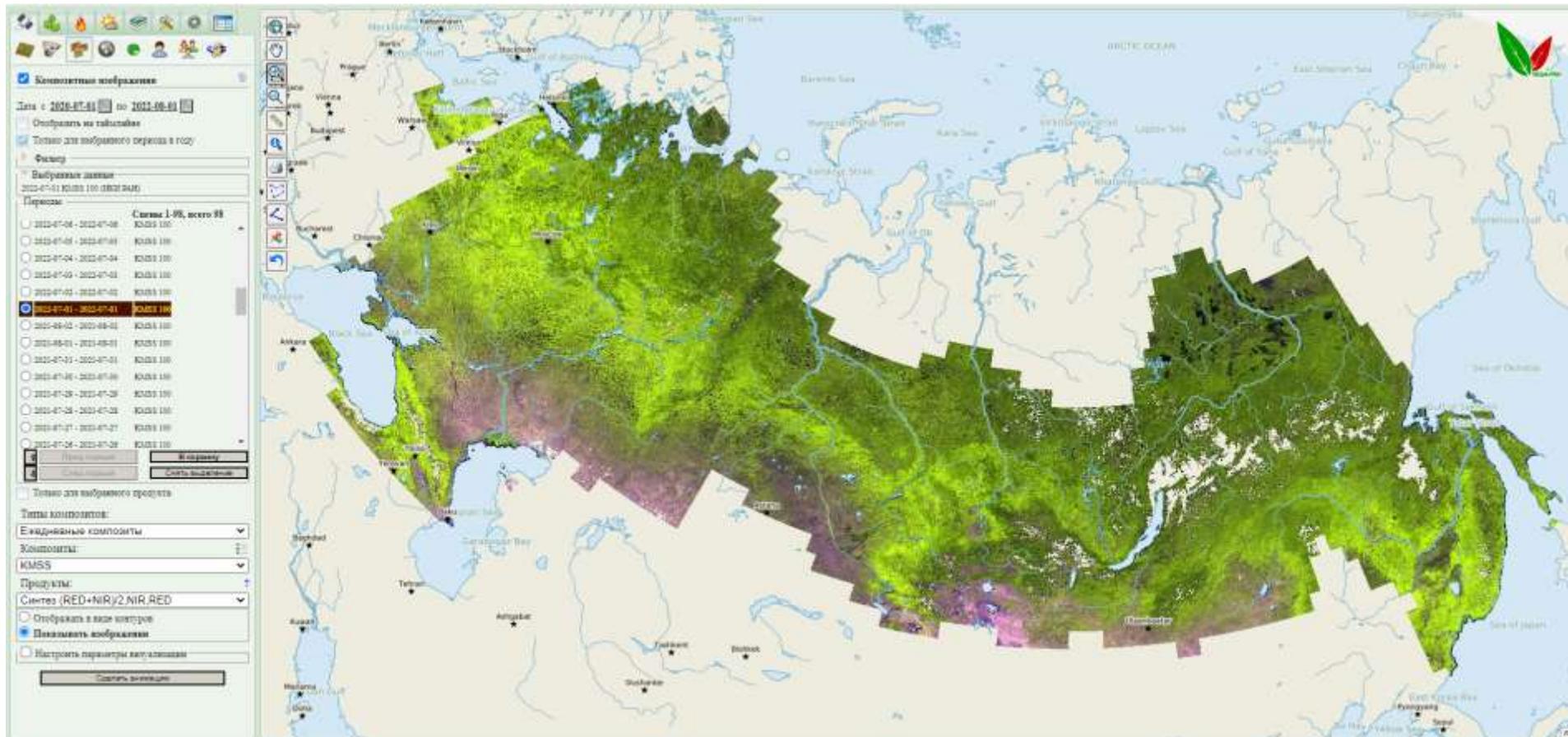


Технология оперативной обработки данных КМСС



Пример ежедневного безоблачного изображения КМСС за 1 июля 2022

<http://pro-vega.ru>



Пример ежедневного безоблачного изображения КМСС на территорию РФ, сформированного в оперативном режиме

Канал NIR

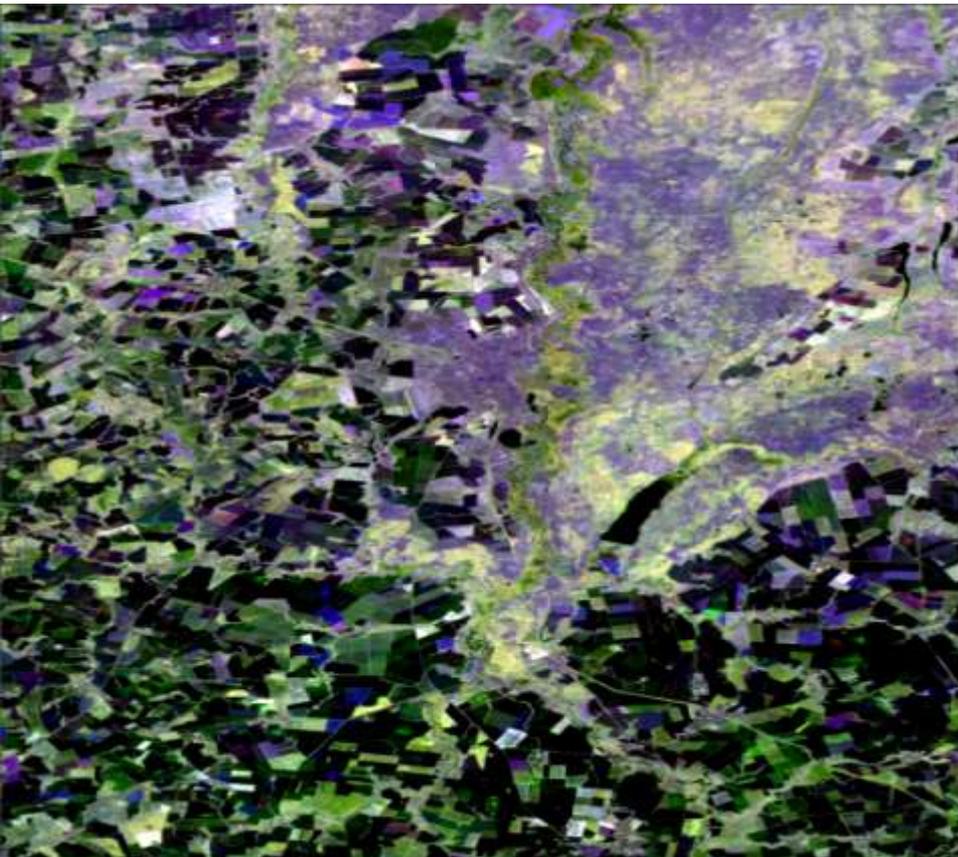


KMSS (60 м)

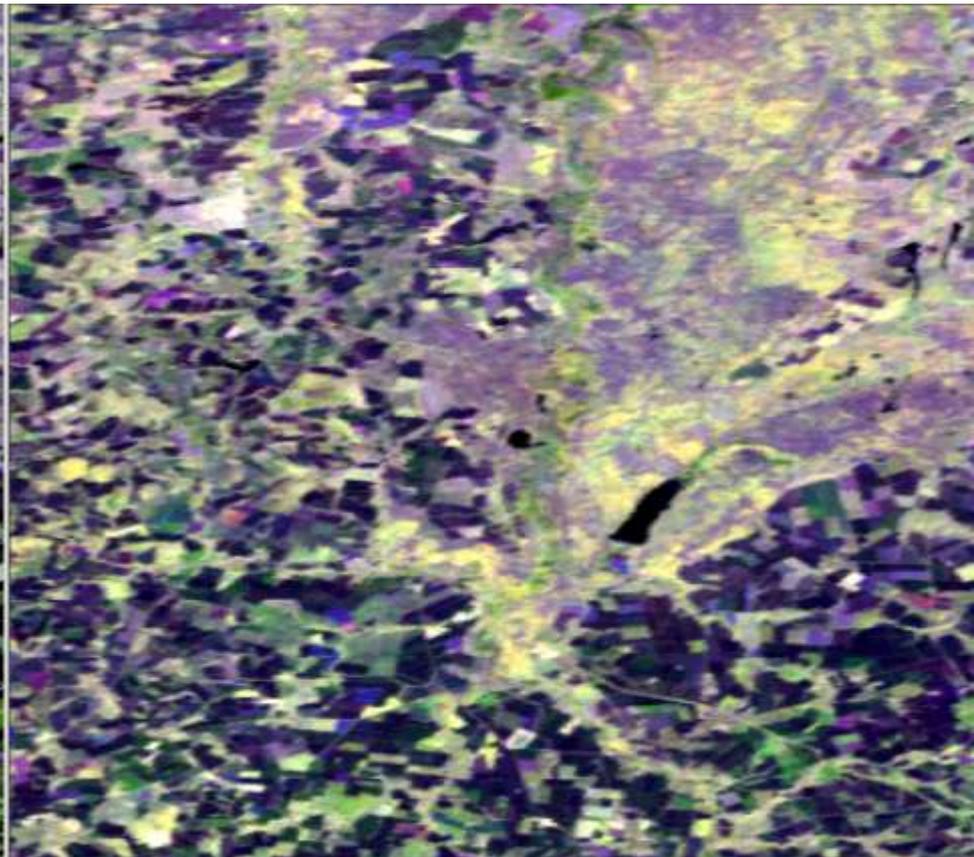


MODIS (230м)

Канал NIR



KMSS



MODIS

Картинки красивые

- ▶ Но насколько точно получены отражательные характеристики земной поверхности (коэффициенты спектральной яркости)?
-

Оценка атмосферной коррекции

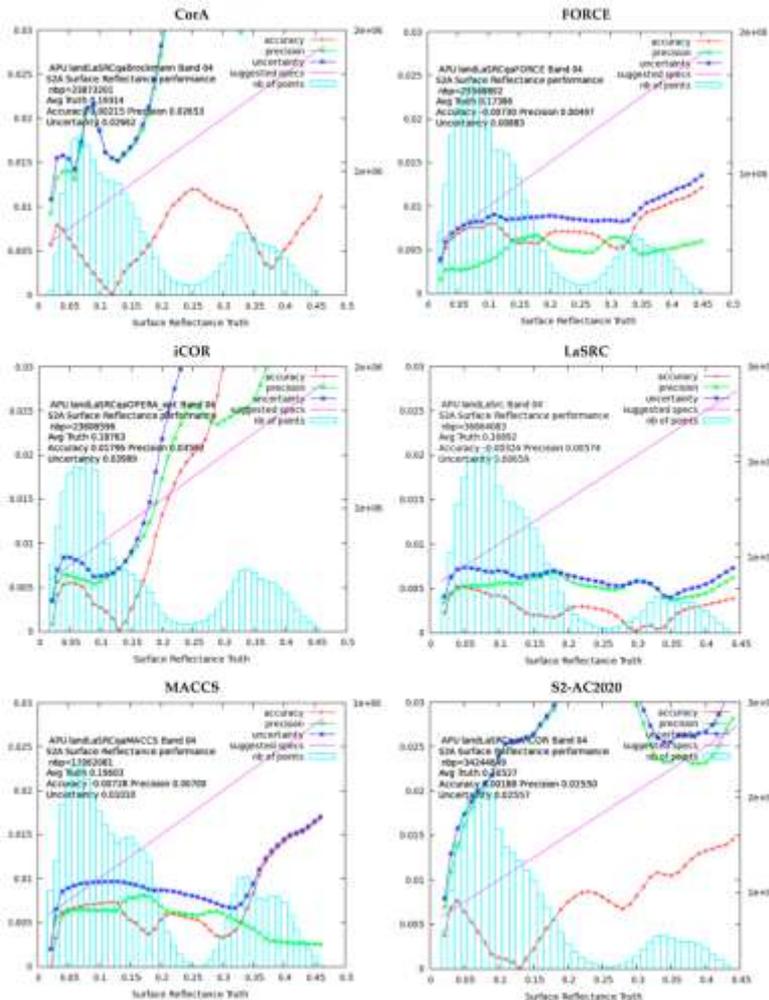
- ▶ Для оценки качества атмосферной коррекции обычно используют следующие метрики:

- ▶ Accuracy
$$A = \frac{1}{n_\lambda} \left(\sum_{i=1}^{n_\lambda} \Delta\rho_{i,\lambda}^{SR} \right)$$

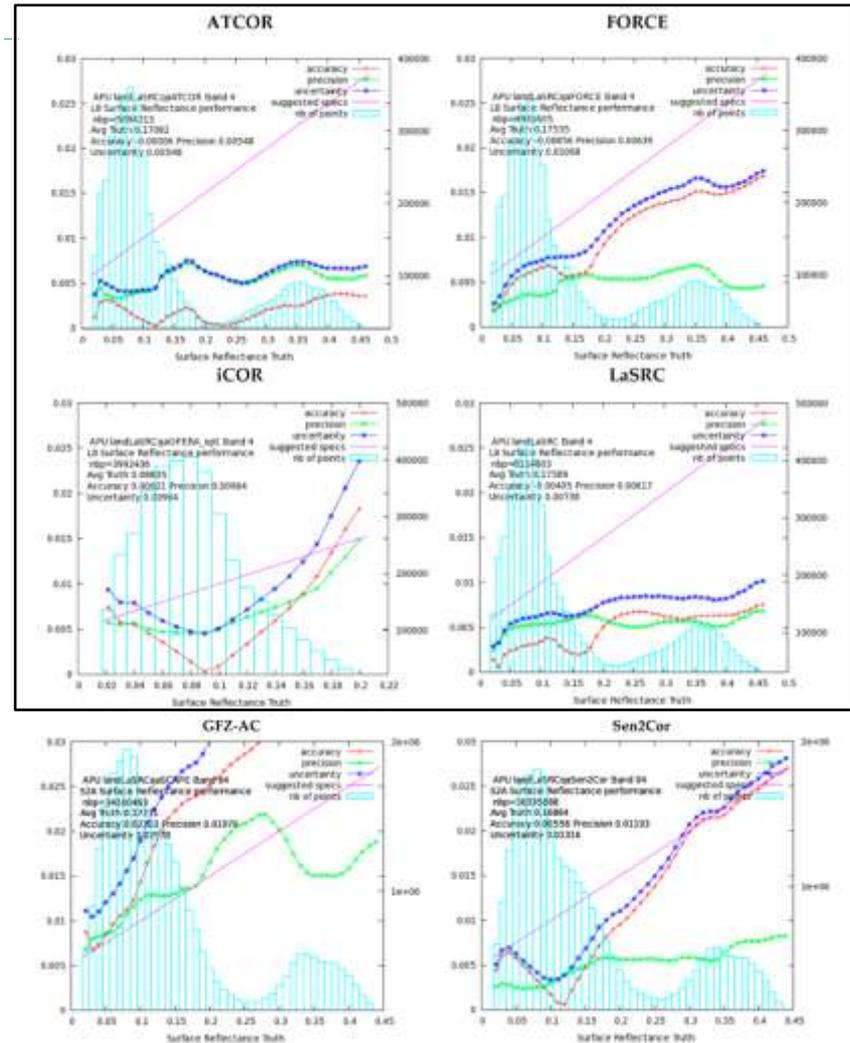
- ▶ Precision
$$P = \sqrt{\frac{1}{(n_\lambda - 1)} \sum_{i=1}^{n_\lambda} (\Delta\rho_{i,\lambda}^{SR} - A)^2}$$

- ▶ Uncertainty
$$U = \sqrt{\frac{1}{n_\lambda} \sum_{i=1}^{n_\lambda} (\Delta\rho_{i,\lambda}^{SR})^2}$$

Результаты оценки корректоров (RED) в рамках эксперимента ACIX

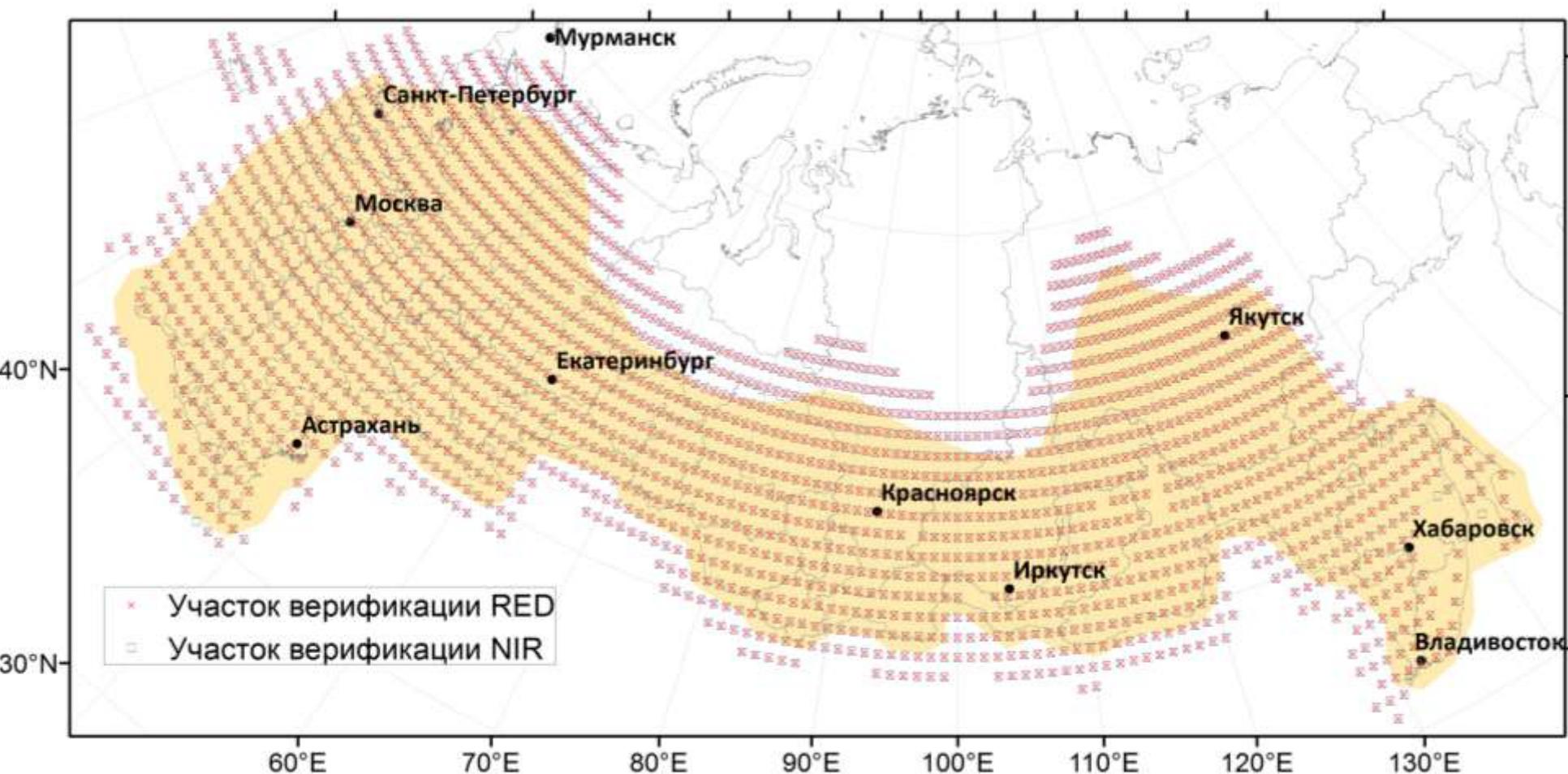


Sentinel-2

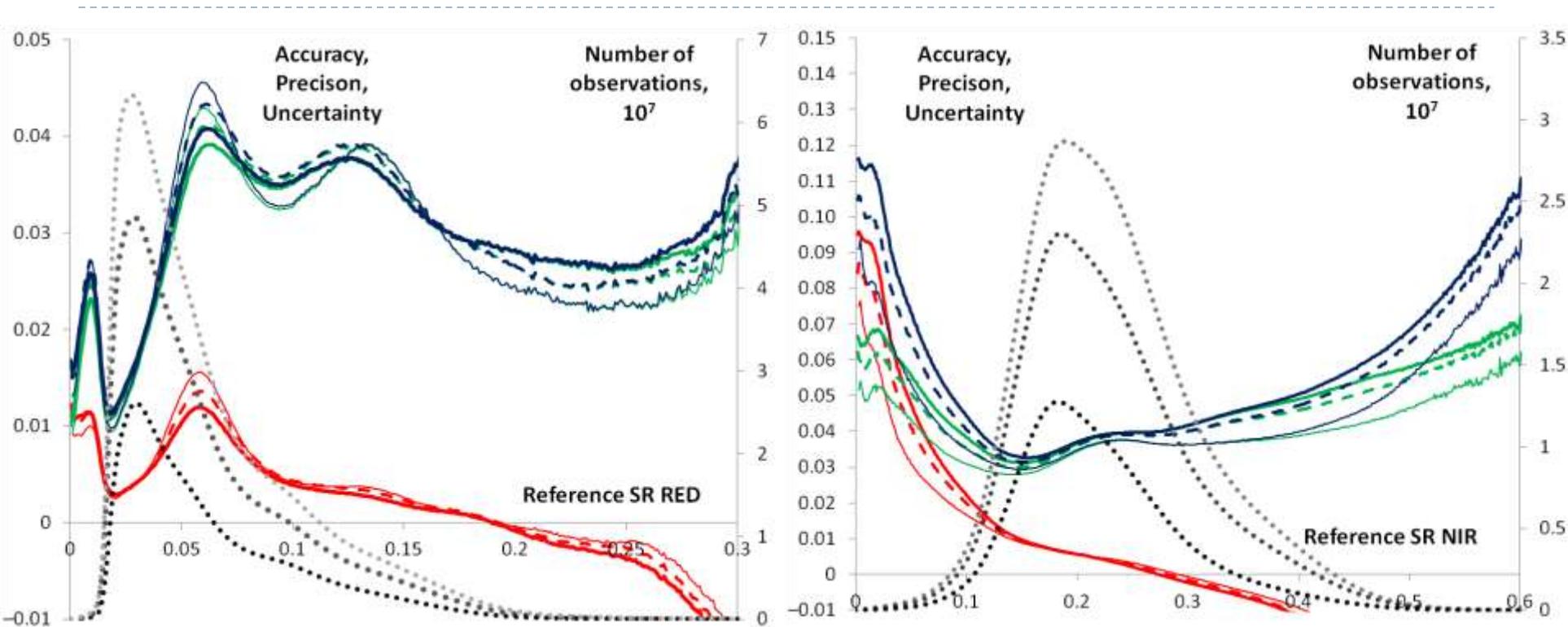


Landsat-8

Расположение участков верификации оперативно полученных продуктов за 2022 год



KMSS-2 AC assessment: Accuracy, Precision and Uncertainty over Russian grain belt



APU metrics (colored) and samples density (grey levels) aggregated from Russian grain belt area for the whole season of 2022 for RED (left) and NIR (right) bands

More details on KMSS data and AC accuracy assessment over Northern Eurasia



Article

Accuracy Assessment of Atmospheric Correction of KMSS-2 Meteor-M #2.2 Data over Northern Eurasia

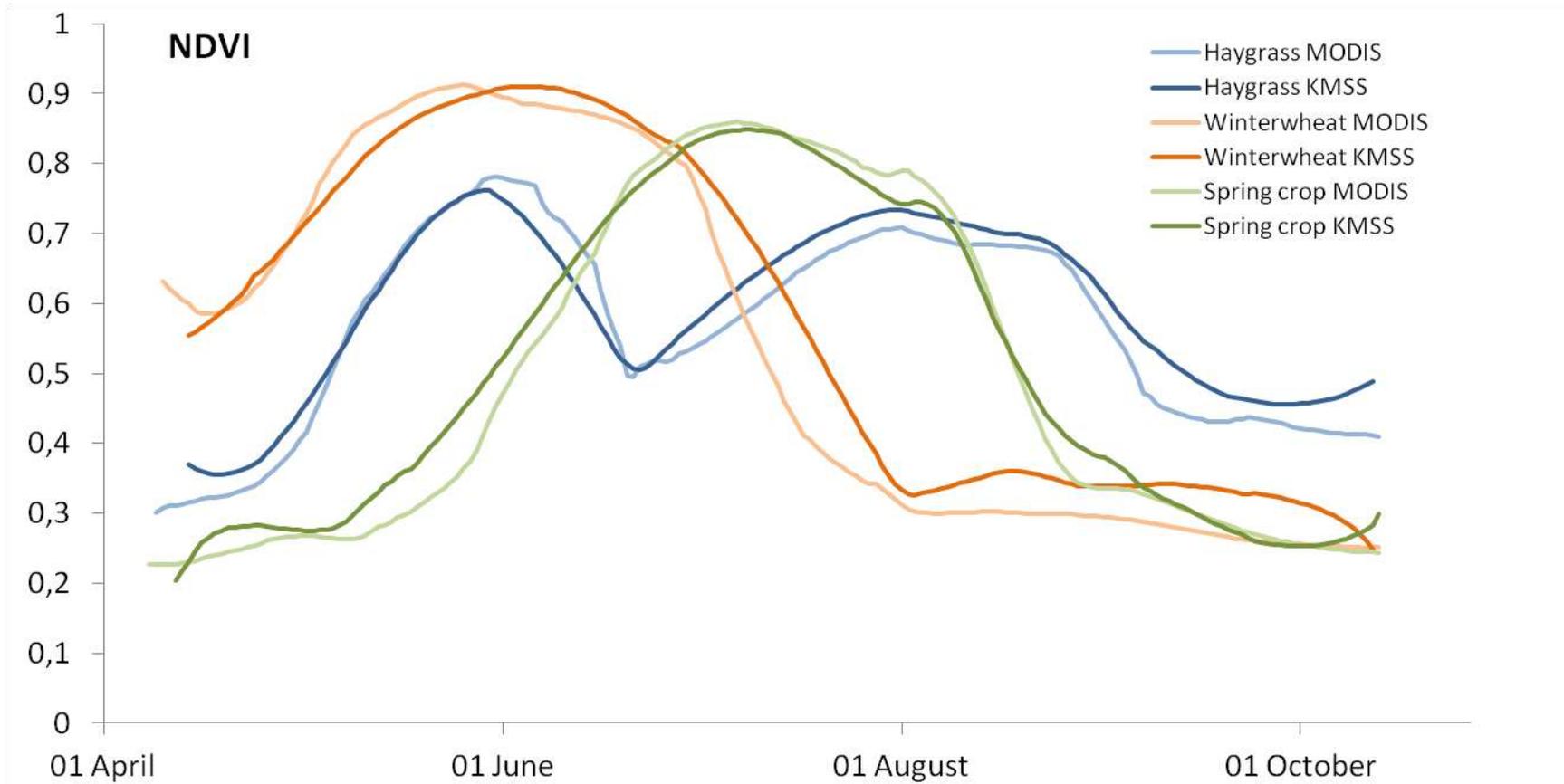
Dmitry Plotnikov ^{*}, Pavel Kolbudaev, Alexey Matveev, Andrey Proshin and Ivan Polyanskiy

Space Research Institute of Russian Academy of Sciences, 117997 Moscow, Russia

* Correspondence: dmitplot@d902.iki.rssi.ru; Tel.: +7-333-53-13

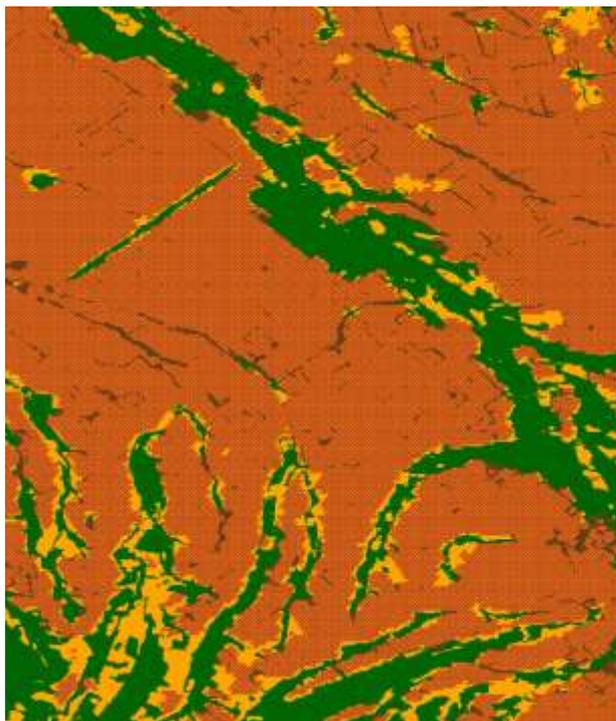
Abstract: Atmospheric correction of satellite remote sensing data is a prerequisite for a large variety of applications, including time series analysis and quantitative assessment of the Earth's vegetation cover. It was earlier reported that an atmospherically corrected KMSS-M (Meteor-M #2) dataset was produced for Russia and neighboring countries. The methodology adopted for atmospheric correction was based on localized histogram matching of target KMSS-M and MODIS reference gap-free and date-matching imagery. In this paper, we further advanced the methodology and quantitatively assessed Level-2 surface reflectance analysis-ready datasets, operatively produced for KMSS-2 instruments over continental scales. Quantitative assessment was based on accuracy, precision, and uncertainty (APU) metrics produced for red and near-infrared bands of the KMSS-2 instrument based on a reference derived from a MODIS MOD09 reconstructed surface reflectance. We compared error distributions at 5%, 20%, and 50% levels of cloudiness and indicated that the cloudiness factor has little impact on the robustness of the atmospheric correction regardless of the band. Finally, the spatial and temporal gradients of accuracy metrics were investigated over northern Eurasia and across different seasons. It was found that for the vast majority of observations, accuracy falls within the -0.010 – 0.035 range, while precision and uncertainty were below 0.06 for any band. With the successful launch of the most recent Meteor-M #2.3 with a new KMSS-2 instrument onboard, the efficiency and interoperability of the constellation are expected to increase.

Временные серии восстановленных значений NDVI по данным КМСС и MODIS

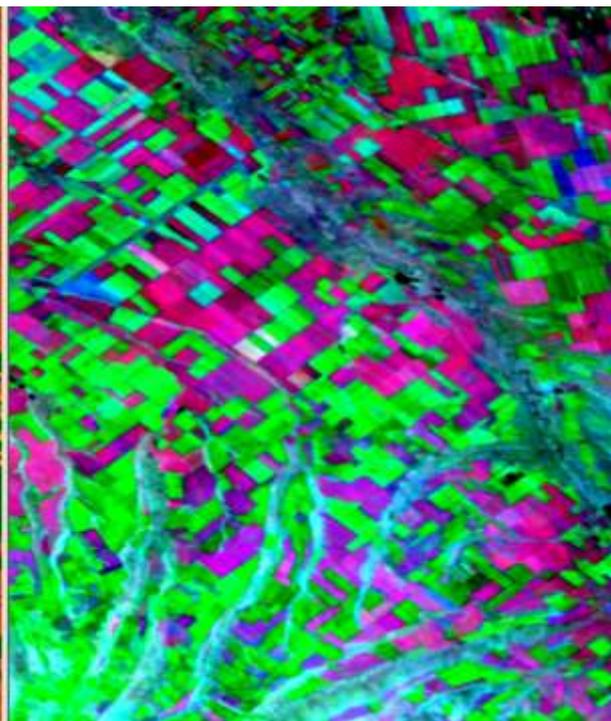


Количественное и качественное совпадение динамики NDVI для различных групп культур позволяет использовать восстановленные временные серии для мониторинга быстроменяющихся классов растительного покрова

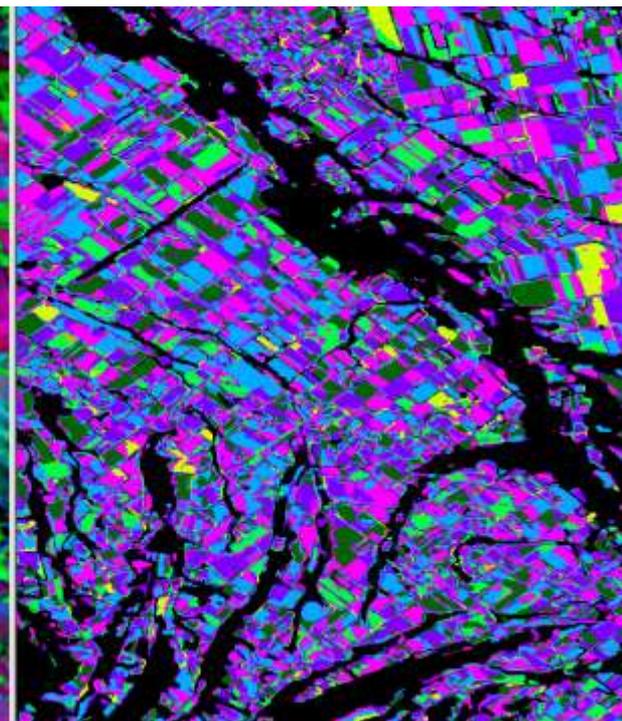
Автоматическое формирование тематических продуктов для континентального сельскохозяйственного мониторинга на основе ежедневных безоблачных данных КМСС уровня L2A



Автоматическое распознавание используемой пашни по данным КМСС-М с разрешением 60 метров



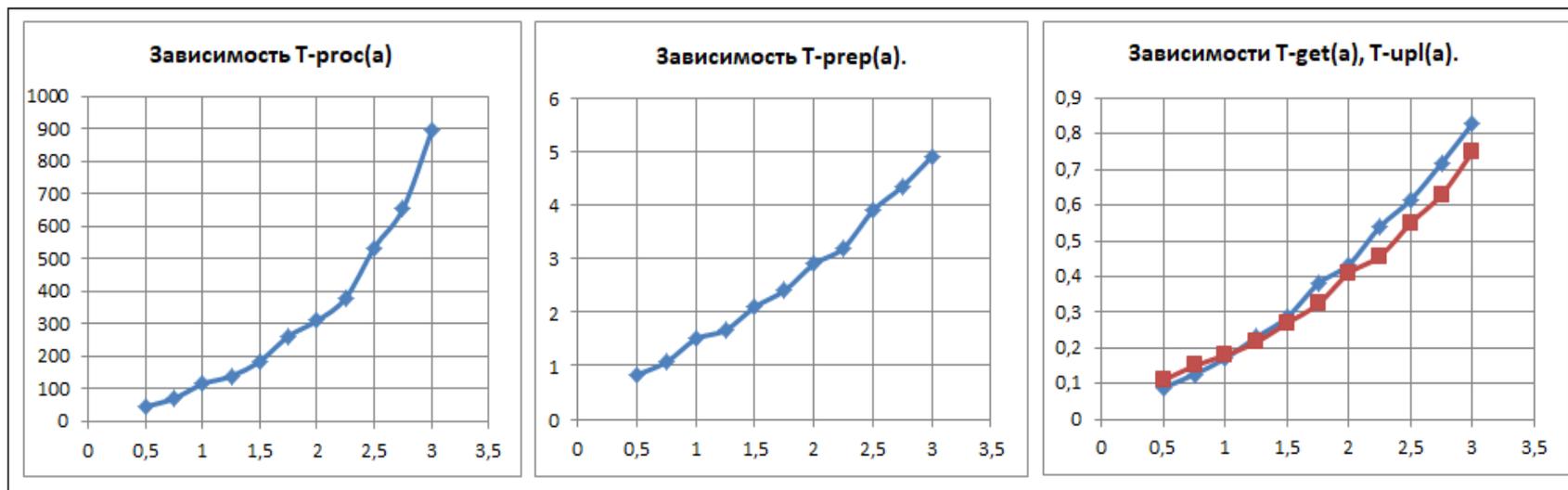
Разновременной синтез ежедневных безоблачных мультиспектральных изображений КСЯ по данным КМСС-М уровня L2A



Автоматическая сегментация для распознавания сельскохозяйственных культур

Блочный доступ

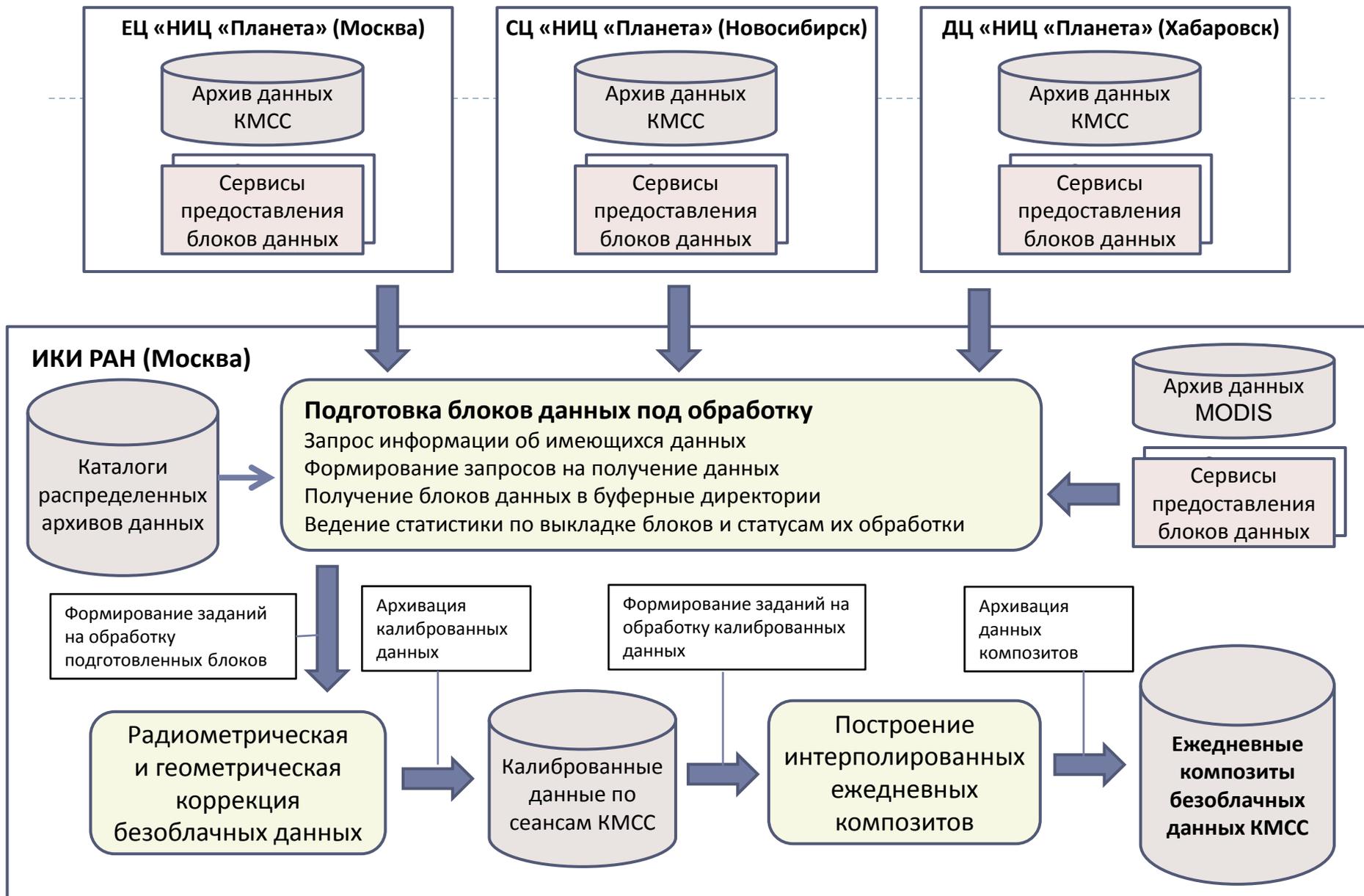
- ▶ Представленная методика была использована для выбора оптимальных параметров пространственного разбиения на блоки и кластеры данных для задачи радиометрической и геометрической коррекции данных прибора КМСС (спутники серии Метеор-М).
- ▶ В качестве допустимых значений блока были выбраны значения от 0,5 до 3 градусов с шагом 0,25 градуса. Ниже в виде графиков представлены выявленные по описываемой методике зависимости времени выполнения различных операций в секундах от размера блока **a**.



Блочный доступ

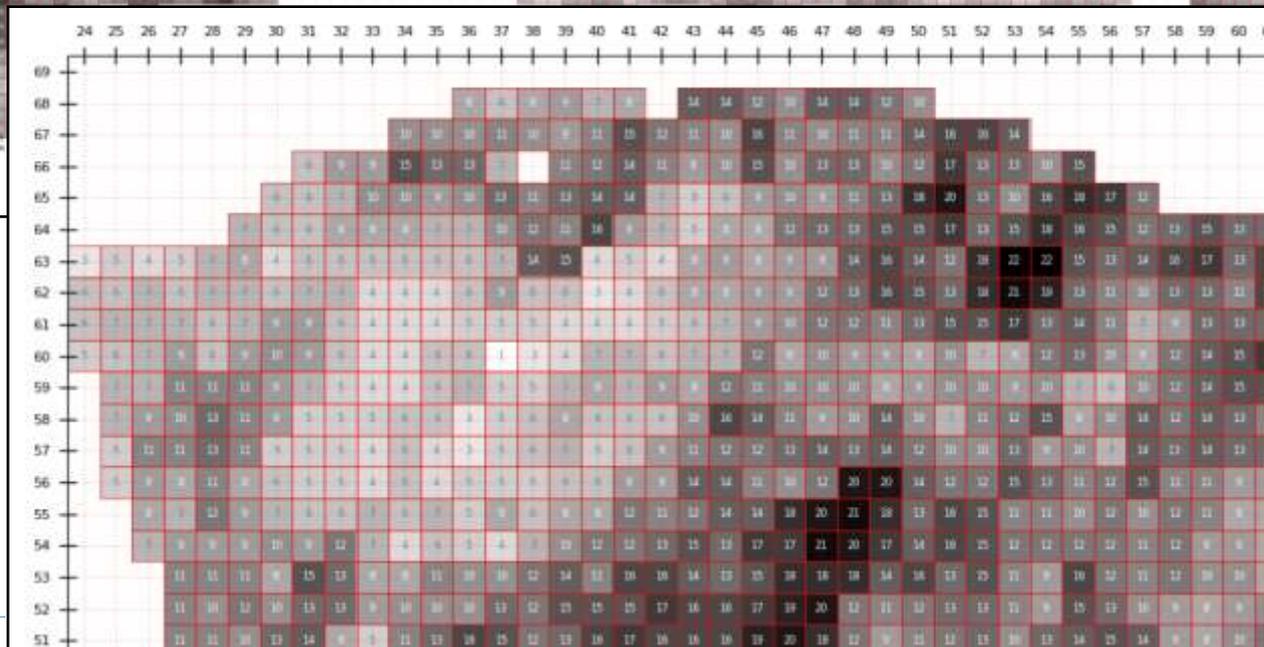
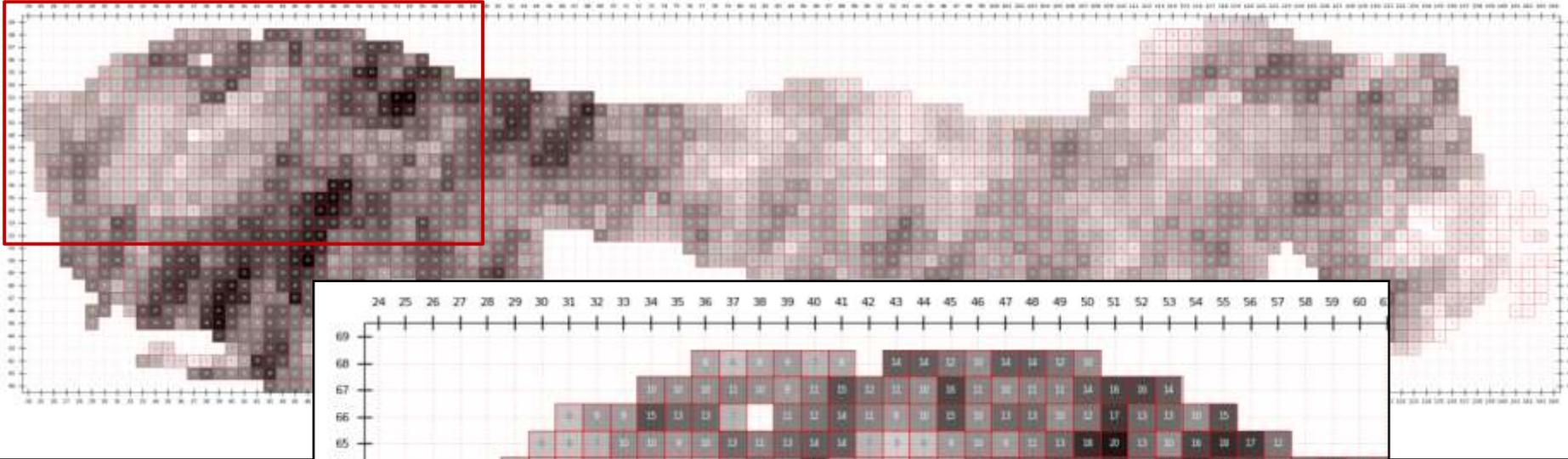
- ▶ Оценка оптимального размера блока проводилась для обработки участка площадью 40 на 40 градусов с одновременным использованием 10 вычислительных узлов. Для каждого из допустимых значений размера блока был выбран размер кластера данных, позволяющий проводить обработку с требуемым уровнем распараллеливания, после чего по представленной выше формуле было оценено интегральное время выполнения обработки.
- ▶ На основании приведенной ниже полученной зависимости был сделан вывод, что для проведения обработки оптимальным размером блока является 2 градуса, а размер кластера данных – 7.





Инструменты мониторинга наличия данных по блокам

```
Task name      : KMSS CORR 2020
Conditions     : dt >= '2020-07-01' AND dt <= '2020-08-01'
Proc status    : red
Stat type     : show_count
Diff tiles    : 2105
Total blocks  : 17883
Min-Max(Avg) : 1-22(8)
White-Black   : 1-22
```



Что дальше?

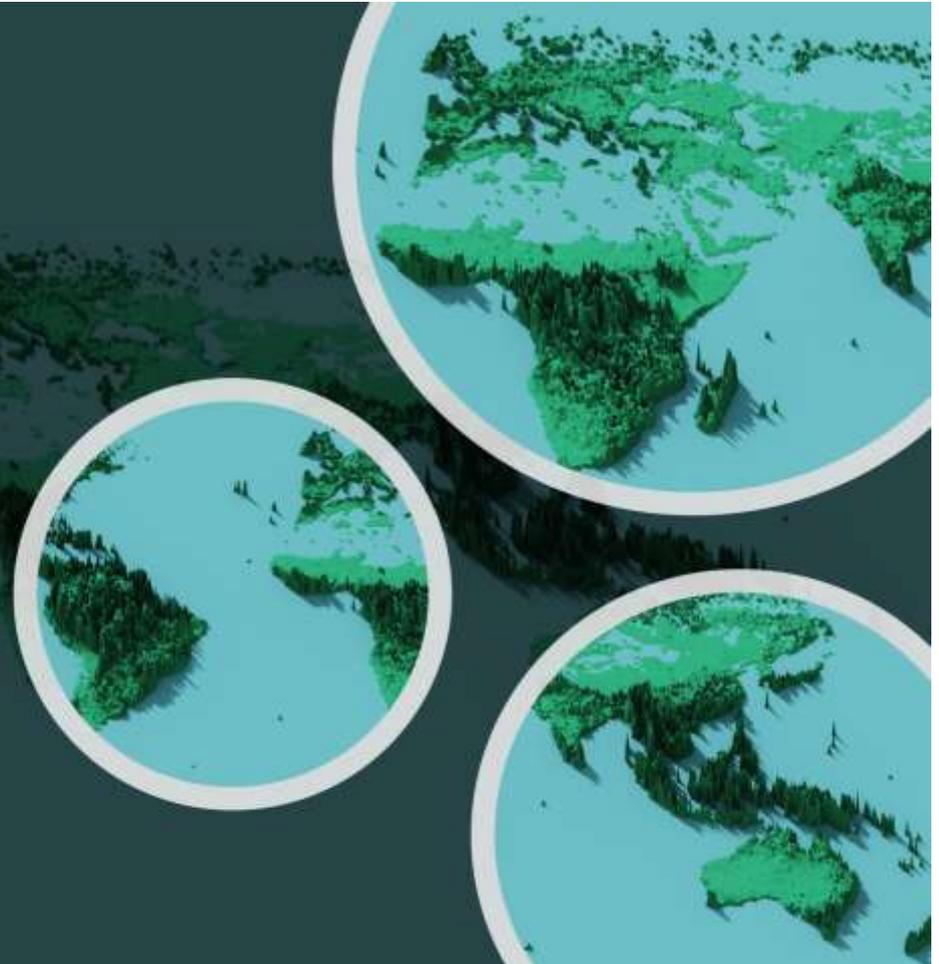
- ▶ Можно ли на основе данных КМСС оценить сложные биофизические характеристики, как по данным других спутниковых систем?
-

Leaf Area Index

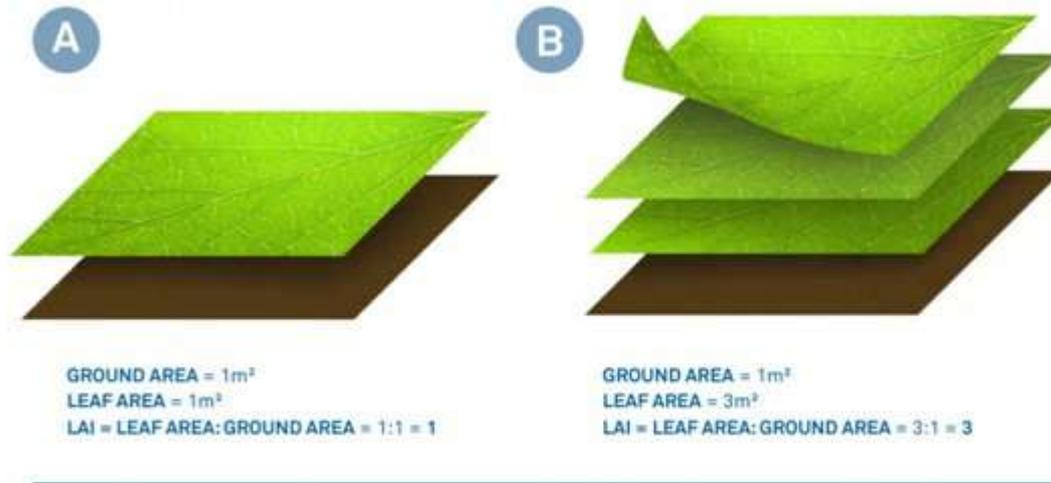
Leaf Area Index

The leaf area index (LAI) is measured in square metres of leaf area per square metre of ground. LAI is an important measure in plant ecology, indicating quantity of foliage and how much photosynthesis is taking place. In addition, LAI can also help determine how much water will be stored and released by an ecosystem.

-Source: Nasa Earth Observation



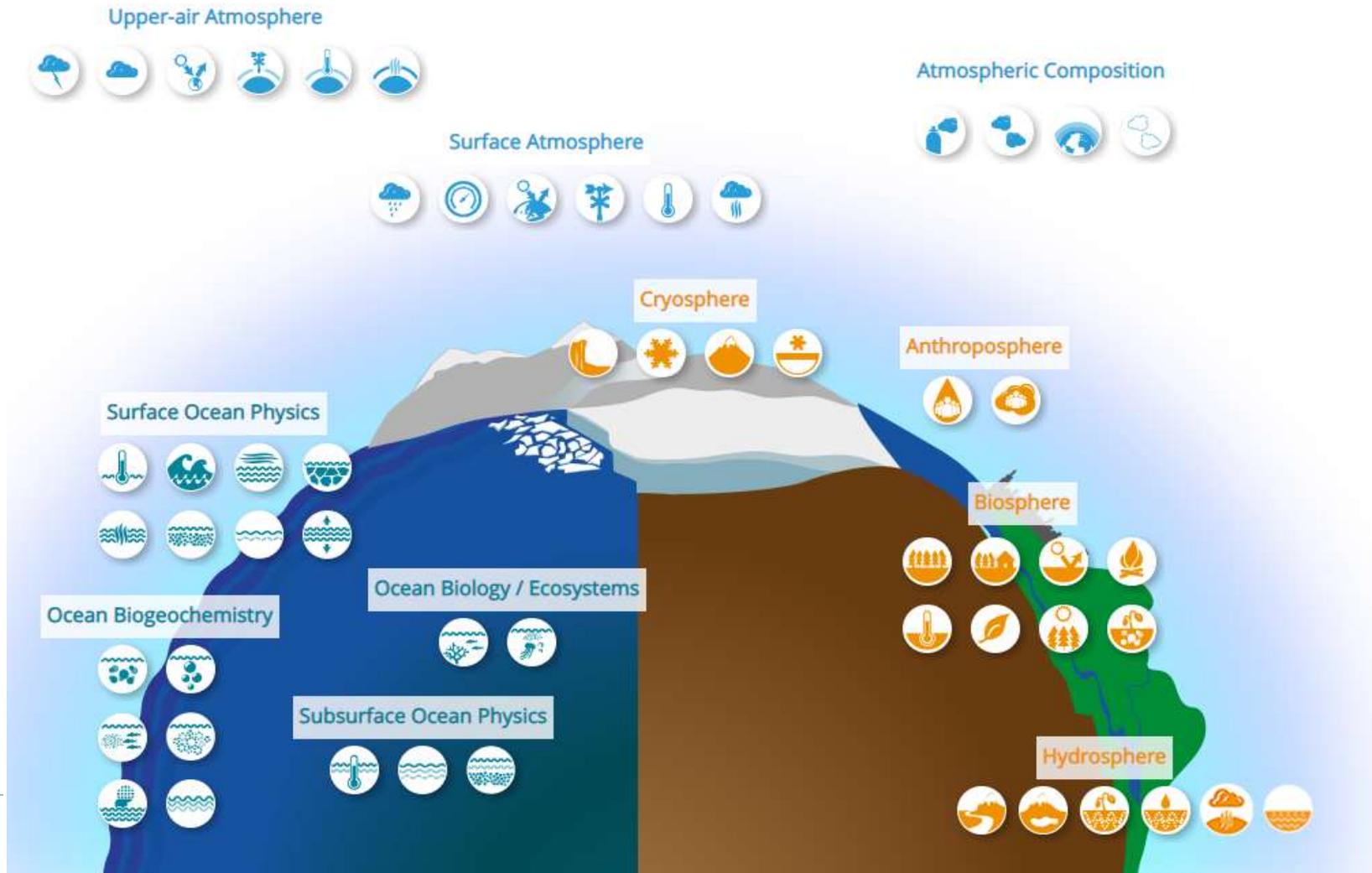
Leaf Area Index



LAI является фундаментальной характеристикой растительности и важнейшей климатической переменной (Essential Climate Variable, ECV – то есть переменной, которая критически важна для описания земного климата)

Leaf Area Index относится к 55 ЕСВ согласно WMO и Global climate observing system

Essential Climate Variables



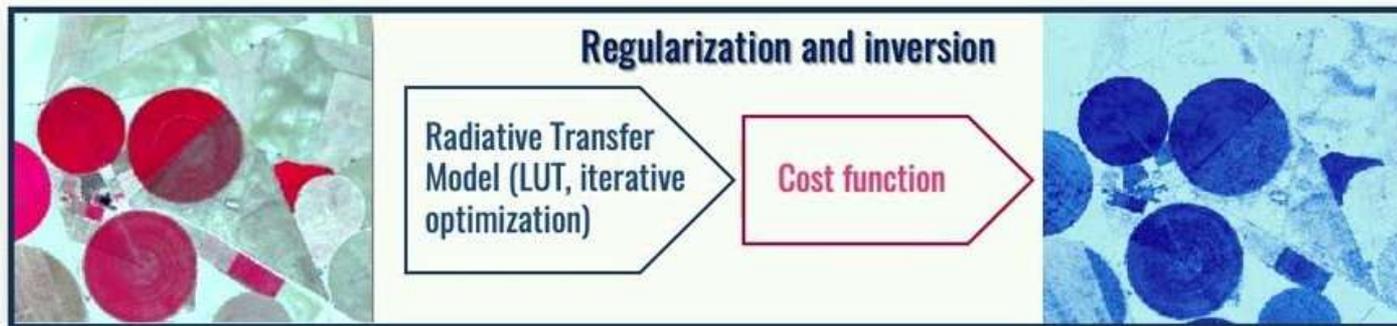
Актуальные методы оценки LAI и продукты

Products	Version	Sensor	Spatial resolution	Temporal resolution	Algorithms	LAI T/E	References
CYCLOPES	V3.1	SPOT/VEGETATION	1/112°	10-day (1997–2007)	NN (red, NIR, SWIR, and SZA)	T	Baret et al. (2007)
EUMETSAT Polar System	V1	MetOp/AVHRR	1.1 km	10-day (2015–)	Gaussian process regression	T	García-Haro et al. (2018)
GA-TIP	V1	SPOT/VEGETATION and EnviSAT/MERIS	1 km	8-day (2002–2011)	Data assimilation retrieval from albedo (GlobAlbedo)	E	Disney et al. (2016)
GEOV2	V2	SPOT/VEGETATION, MODIS	1/112°	10-day (1999–)	NN (red, NIR, SWIR, and SZA)	T	Baret et al. (2013)
GLASS	V3	SPOT/VEGETATION, MODIS	1 km	8-day (2000–)	NN (red and NIR)	T	Xiao et al. (2014)
GLOBCARBON	V2	SPOT/VEGETATION, ENVISAT/ATSR	1 km	Monthly (1998–2006)	Empirical VI-LAI relationship	T	Deng et al. (2006)
GLOBMAP	V2	MODIS	500 m	8-day (2000–)	Empirical VI-LAI relationship	T	Liu, Liu, et al. (2012)
JRC-TIP	V1	MODIS	0.01°	16-day (2000–)	Data assimilation retrieval from albedo (MODIS)	E	Pinty et al. (2011)
MERIS	V1	EnviSAT/MERIS	300 m	10-day (2003–2011)	NN (13 bands, observation geometry, and atmosphere characteristics)	T	Tum et al. (2016)
MISR	V2	MISR	1.1 km	Daily (2000–)	LUT (red and NIR)	T	Diner et al. (2008)
MODIS	C6	MODIS	500 m	4-day (2000–)	LUT (red and NIR)	T	Huang et al. (2008)
PROBA-V	V1	PROBA-V	300 m	10-day (2014–)	NN (blue, red, NIR, and observation geometry)	T	Baret et al. (2016)
University of Toronto (UofT)	V2	MODIS, MISR	250 m	10-day (2003)	Empirical VI-LAI relationship	T	Gonsamo and Chen (2014)
VIIRS	V1	SNPP/VIIRS	500 m	8-day (2012–)	LUT (red and NIR)	T	K. Yan et al. (2018)

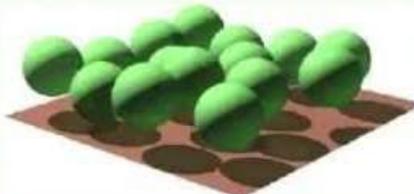
- ▶ Эмпирические соотношения VI-LAI
- ▶ LUT и методы оптимизации
- ▶ Инверсия RT-модели с помощью NN

Какие бывают модели переноса излучения

Radiative Transfer Models



Turbid medium*
(e.g. SAIL, Verhoef 1984)



Geometric optics*
(e.g. Chen & Leblanc 1997)

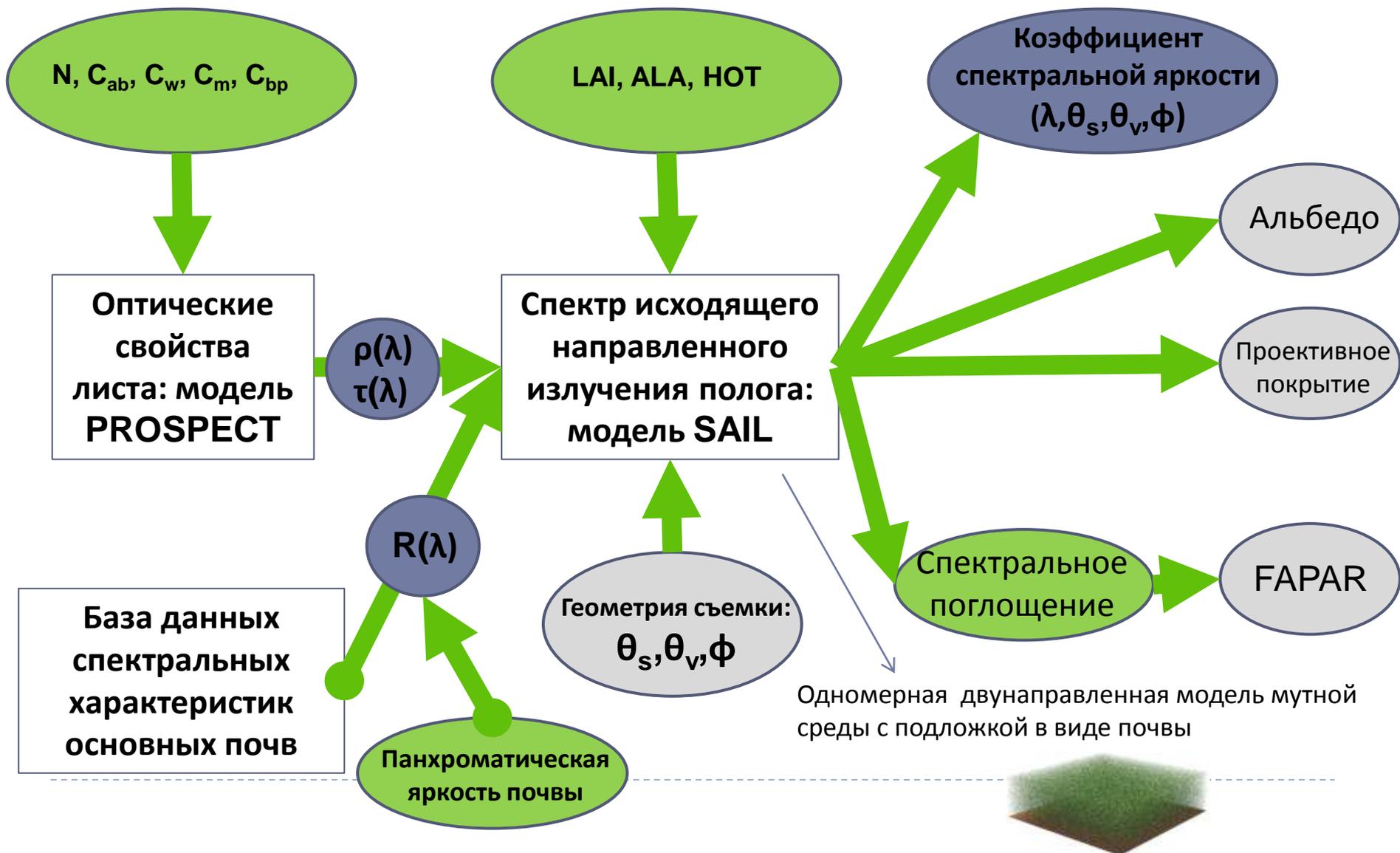


Hybrid model (GO + TM)*
(e.g. DART, INFORM)



Computer graphic model**
(e.g. drat, Raytran, FLIGHT)

PROSPECT-D + SAIL

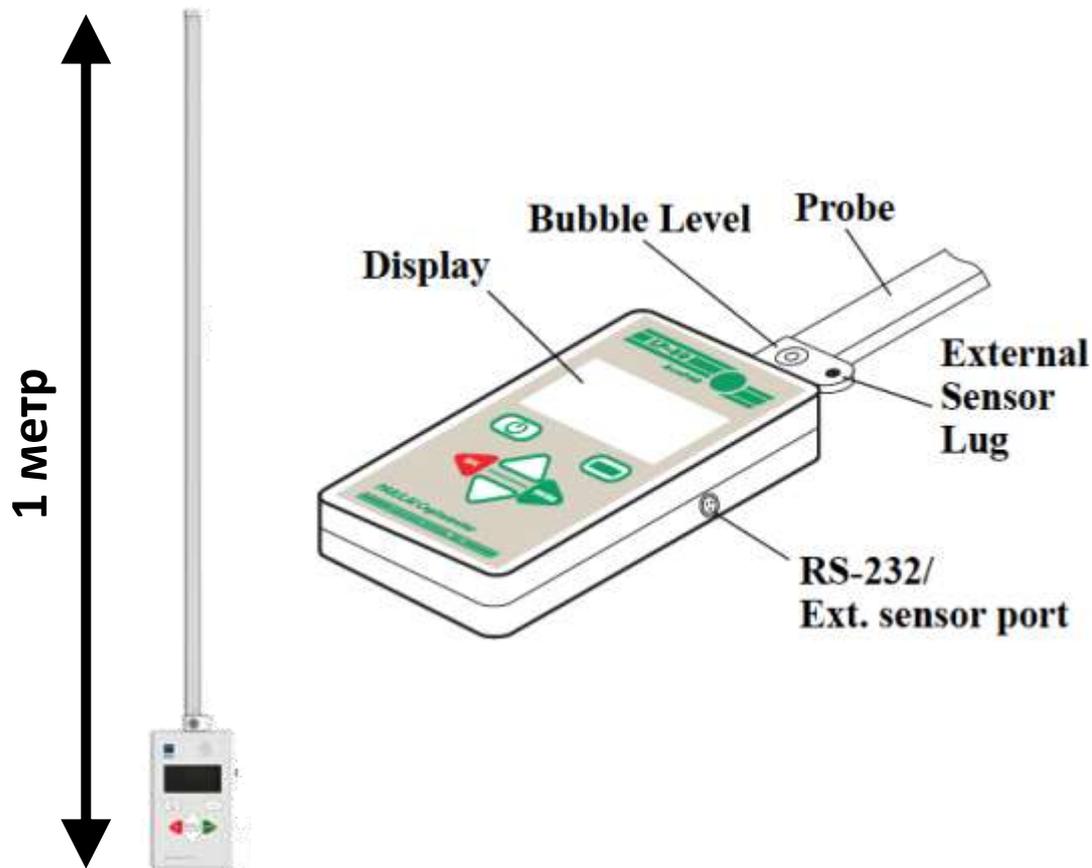


Полевые работы



- ▶ Точечные (1м x 1м) приборные наземные измерения с многократной в течение сезона повторяемостью: LAI\FAPAR, время измерения, высота растений, условия освещения (прямое солнце или рассеянный свет);
 - ▶ Точки замеров располагались на трансекте поля общей длиной до 500 метров с шагом между точками 30-40 метров;
-

Септометр AccuPAR LP-80



Инверсия модели Нормана-Джарвиса (1975)



Угол Солнца

Отношение PAR+/PAR-

$$L = \frac{\left[\left(1 - \frac{1}{2K}\right) f_b - 1\right] \ln \tau}{A(1 - 0.47 f_b)}$$

К-т пропускания

Доля прямых лучей

К-т пропускания

Доля прямых лучей

Измерения с выносным сенсором



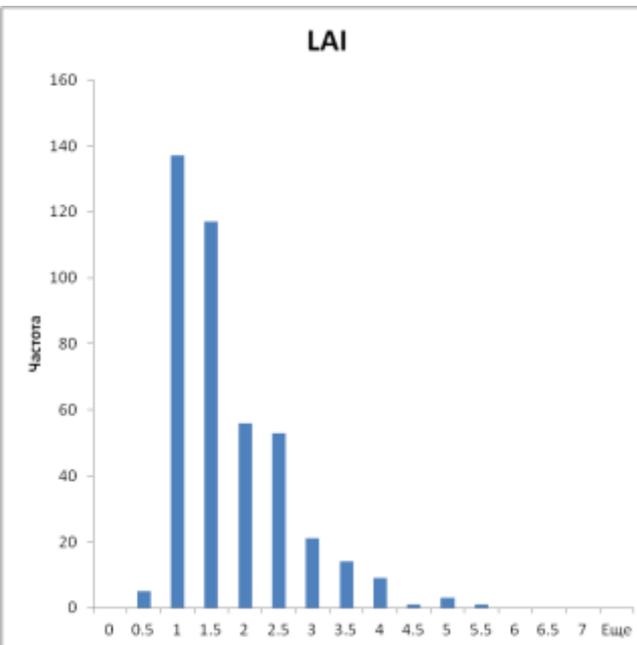
Выносной
сенсор

Ассирар
LP-80

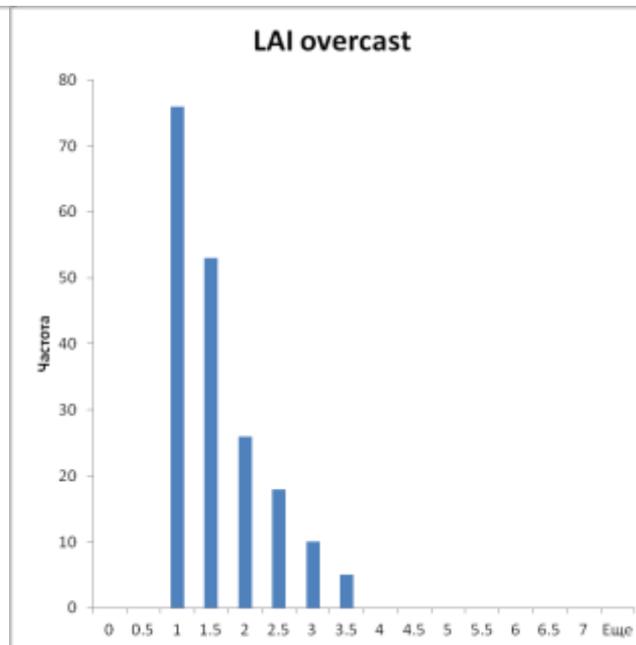
маячок



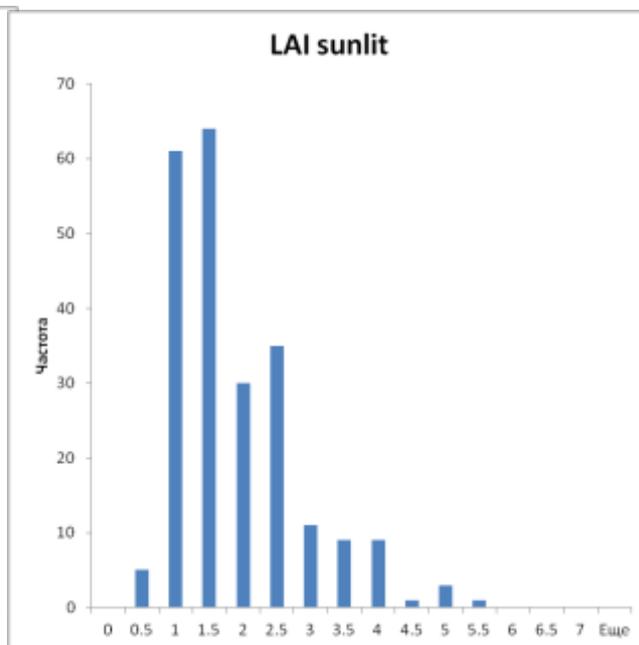
Общее распределение наземных измерений



Интегральное
распределение

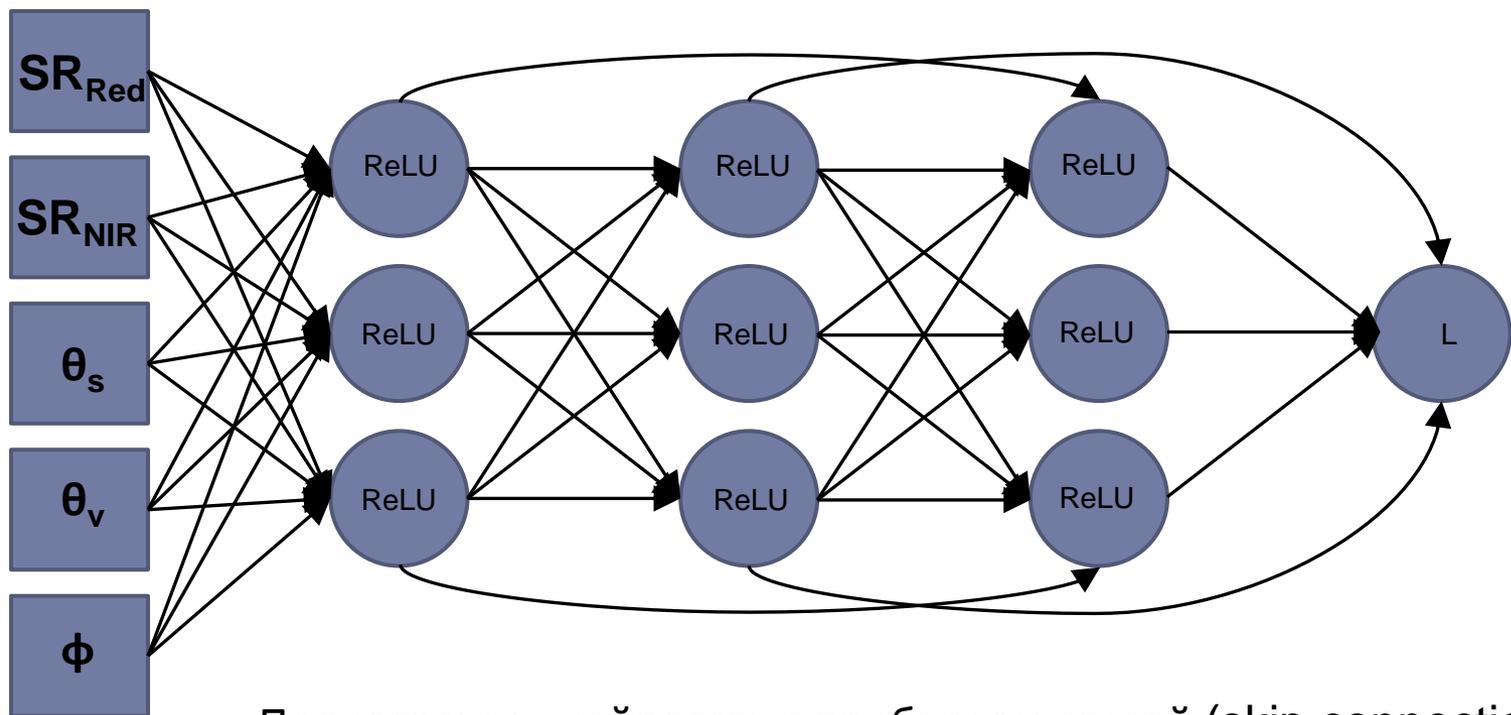


Измерения в условиях
рассеянного солнечного света



Измерения в условиях
прямого солнечного света

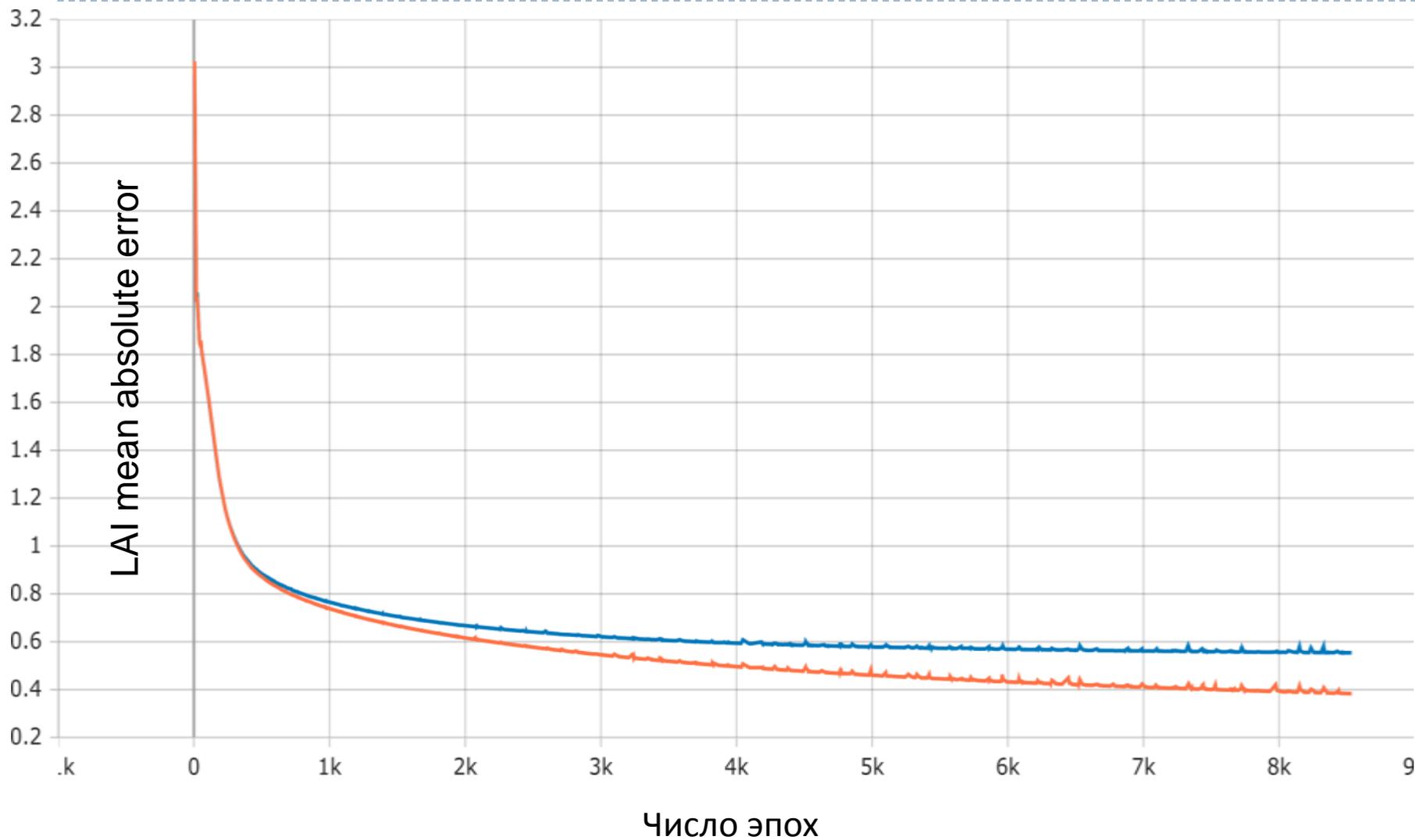
Архитектура нейросети



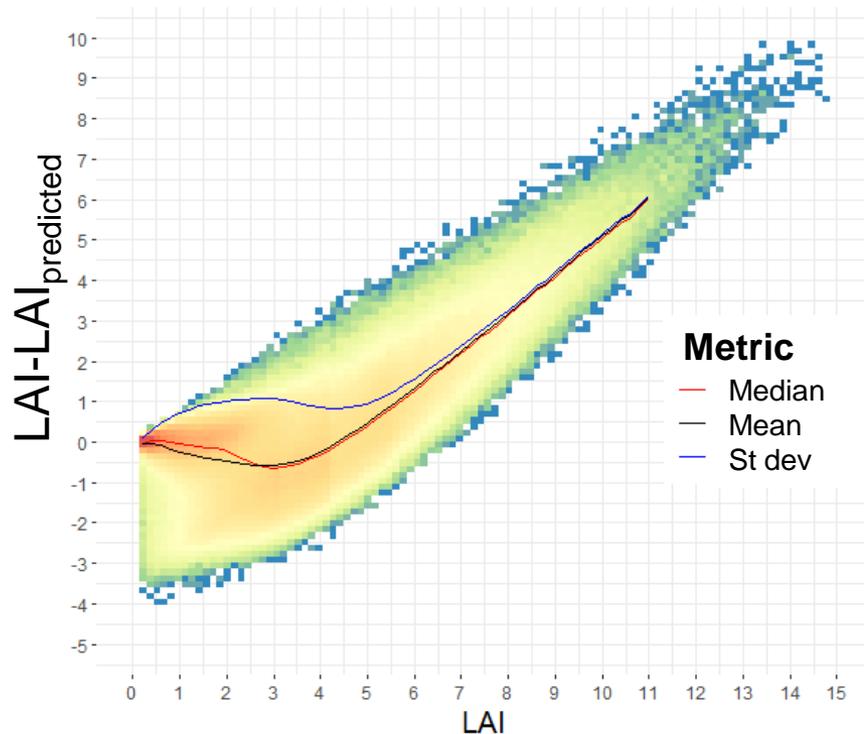
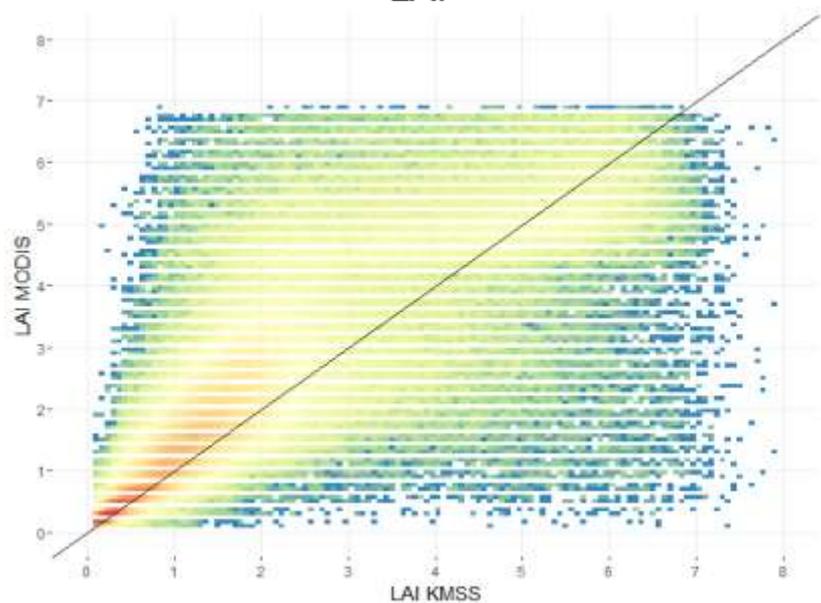
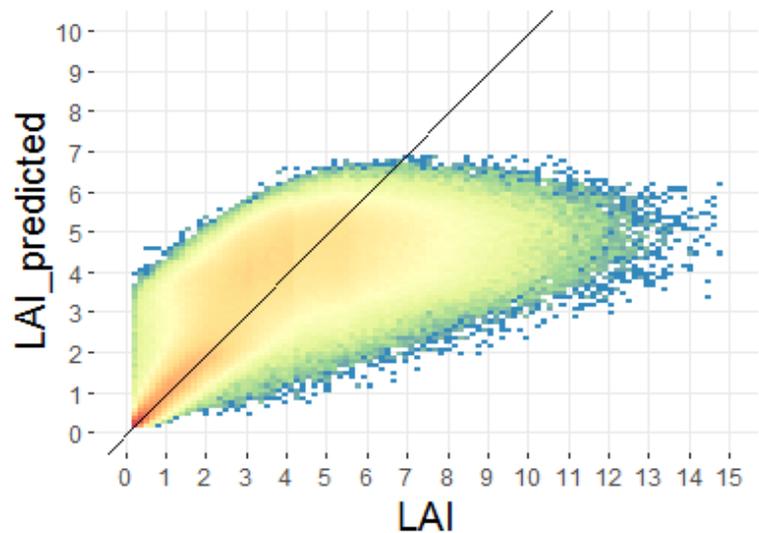
Полносвязная нейросеть с пробросом связей (skip connection)

Обучение производилось для KMCC-2 (без параллакса) с входными параметрами: ViewZen, SunZen, RelAzimuth, Red, NIR

Обучение нейросети: гипотетическая точность определения LAI



Errors of LAI estimation



Metric	KMSS Nadir view	KMSS multi-angular scheme	MCD15A3H (4-day MODIS LAI)
RMSE	1,00428	1,00051	1,065
MAE	0,7102	0,7053	0,669
R ²	0,7203	0,7227	0,668

Разработка и оценка индекса листовой поверхности LAI растительного покрова России на основе разноугловых наблюдений KMCC (Метеор-М) и нейросетевой инверсии модели PROSAIL

Д.Е. Плотников¹, Ц. Чжоу², П.А. Колбудаев¹, Е.А. Лупян¹, А.М. Матвеев¹, М.В. Зимин², Б.С. Жуков¹,
Т.В. Кондратьева¹, С.В. Лебедев³

¹Институт космических исследований РАН, 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, 84/32, Москва, Россия

²Московский государственный университет им. Ломоносова, 119991, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия

³Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий РАН, 460000, ул. 9 Января, д. 29, Оренбург, Россия

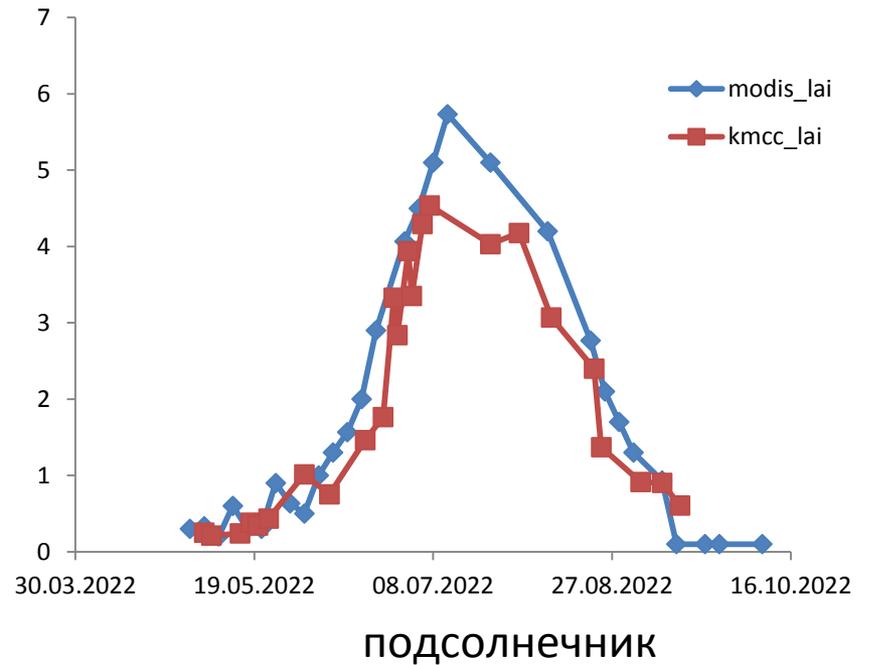
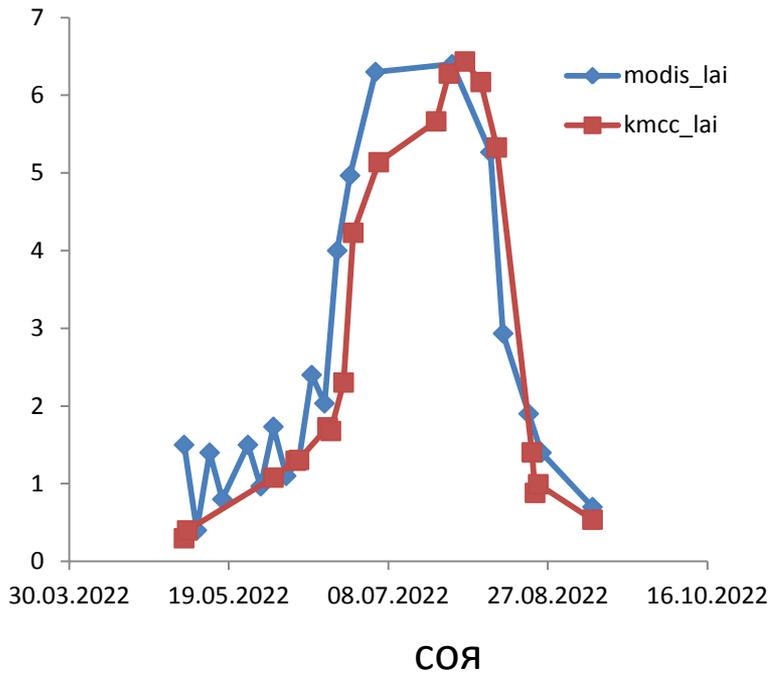
Аннотация

В работе впервые описан метод дистанционной оценки индекса листовой поверхности LAI по данным прибора KMCC российской спутниковой системы Метеор-М с пространственным разрешением 60 метров. В основе метода лежит решение обратной задачи переноса излучения в растительном пологе с заданными краевыми условиями на основе модели переноса излучения PROSAIL, дистанционных измерений спектральной яркости прибором KMCC и известных условий наблюдения и освещения. В качестве алгоритма инверсии была использована параметризованная и обученная модель на основе полносвязной нейронной сети. При создании обучающей выборки использовался полный ортогональный план для описания комбинаций входных параметров модели, при этом были учтены распределения и сораспределения характеристик по результатам метаанализа для отражения имеющихся в природе взаимосвязей. В работе была исследована эффективность двух различных схем наблюдения – классической надирной и характерной для прибора KMCC-М разноугловой с углами $\pm 8,67^\circ$. Была показана достаточно высокая модельная точность оценки LAI: RMSE=1, MAE=0,705 и $R^2=0,722$. На основе разработанного метода был рассчитан и исследован продукт LAI по данным KMCC-2 с разрешением 60 метров на территорию России за 2022 год. Попиксельное сравнение результатов оценки LAI по данным KMCC-2 с продуктом NASA LAI (MODIS MCD15A3H) за бесснежный период 2022 года также указывает на достаточно высокие характеристики полученного в результате работы продукта: RMSE=1,065, MAE=0,669 и $R^2=0,668$. Разработанный в рамках настоящей работы метод создания продукта LAI по данным прибора KMCC повысит эффективность и оперативность приложений, связанных с высокодетальным дистанционным экологическим мониторингом на основе данных российских спутниковых систем.

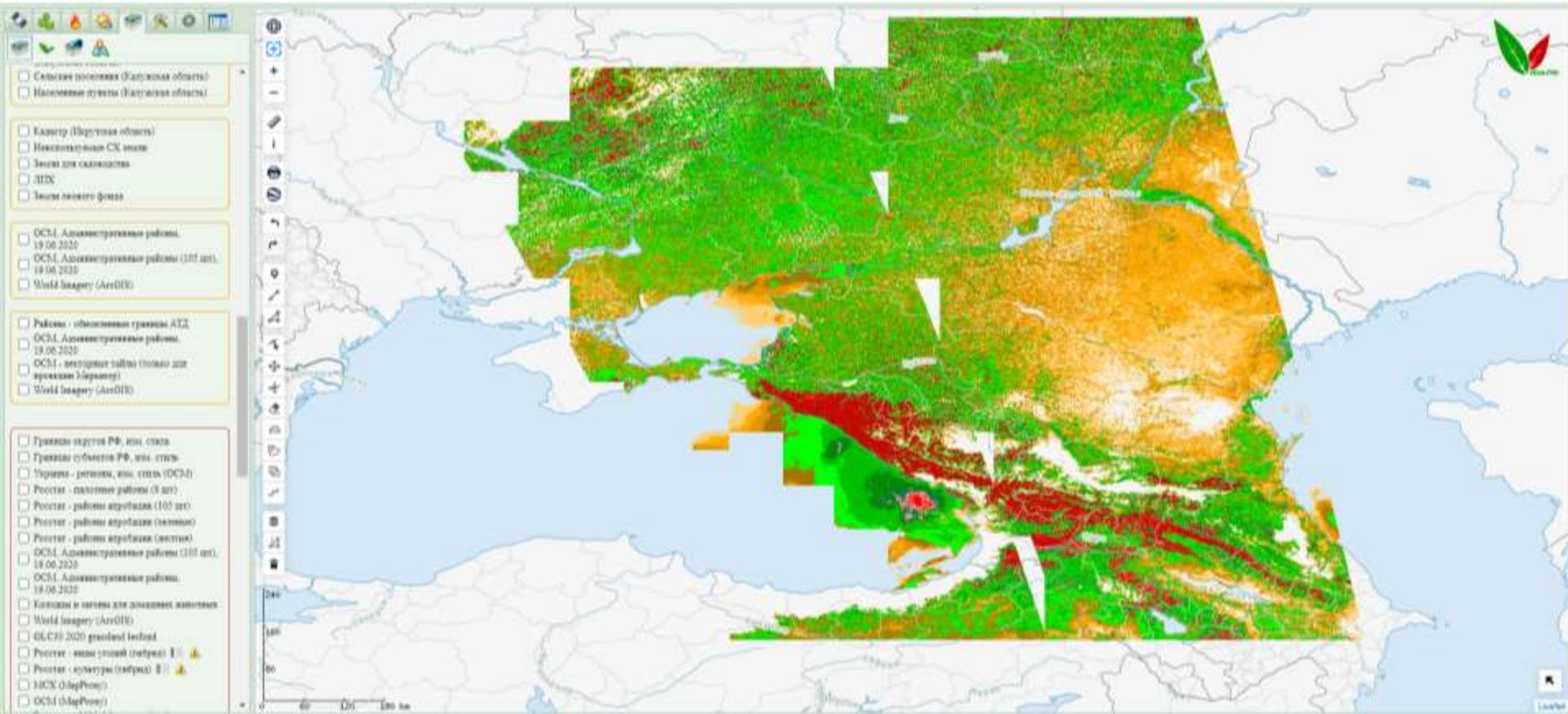
Ключевые слова: LAI, KMCC, PROSAIL, Метеор-М, разноугловые наблюдения, нейросетевая инверсия, ортогональный план, растительный покров, биофизические характеристики

Цитирование: Плотников Д.Е. Разработка и оценка индекса листовой поверхности LAI растительного покрова России на основе разноугловых наблюдений KMCC (Метеор-М) путём нейро-

KMSS LAI seasonal time series



Daily KMSS granulated coverage



Выводы и заключение

- ▶ В настоящее время в ИКИ РАН действует оперативная технология обработки данных с приборов серии КМСС
 - ▶ Технология позволяет в режиме реального времени создавать продукты для оперативного мониторинга растительного покрова России: картографирование с\х растительности, оценка последствий паводков и пожаров
 - ▶ Получаемые продукты позволяют обеспечить получение и количественной оценки показателей состояния растительности
-

Выводы и заключение

- ▶ Данные КМСС в некотором смысле оказались «стендом» и позволили отработать несколько новых подходов и технологий, которые оказались самодостаточными и универсальными
-