

Разработка и оценка индекса листовой поверхности LAI растительного покрова России на основе разноугловых наблюдений КМСС (Метеор-М)

Плотников Д.Е, Чжоу Ц., Колбудаев П.А., Лупян Е.А., Матвеев А.М., Жуков Б.С., Кондратьева Т.В.

Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса
14 ноября 2024



Российский
научный
фонд



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

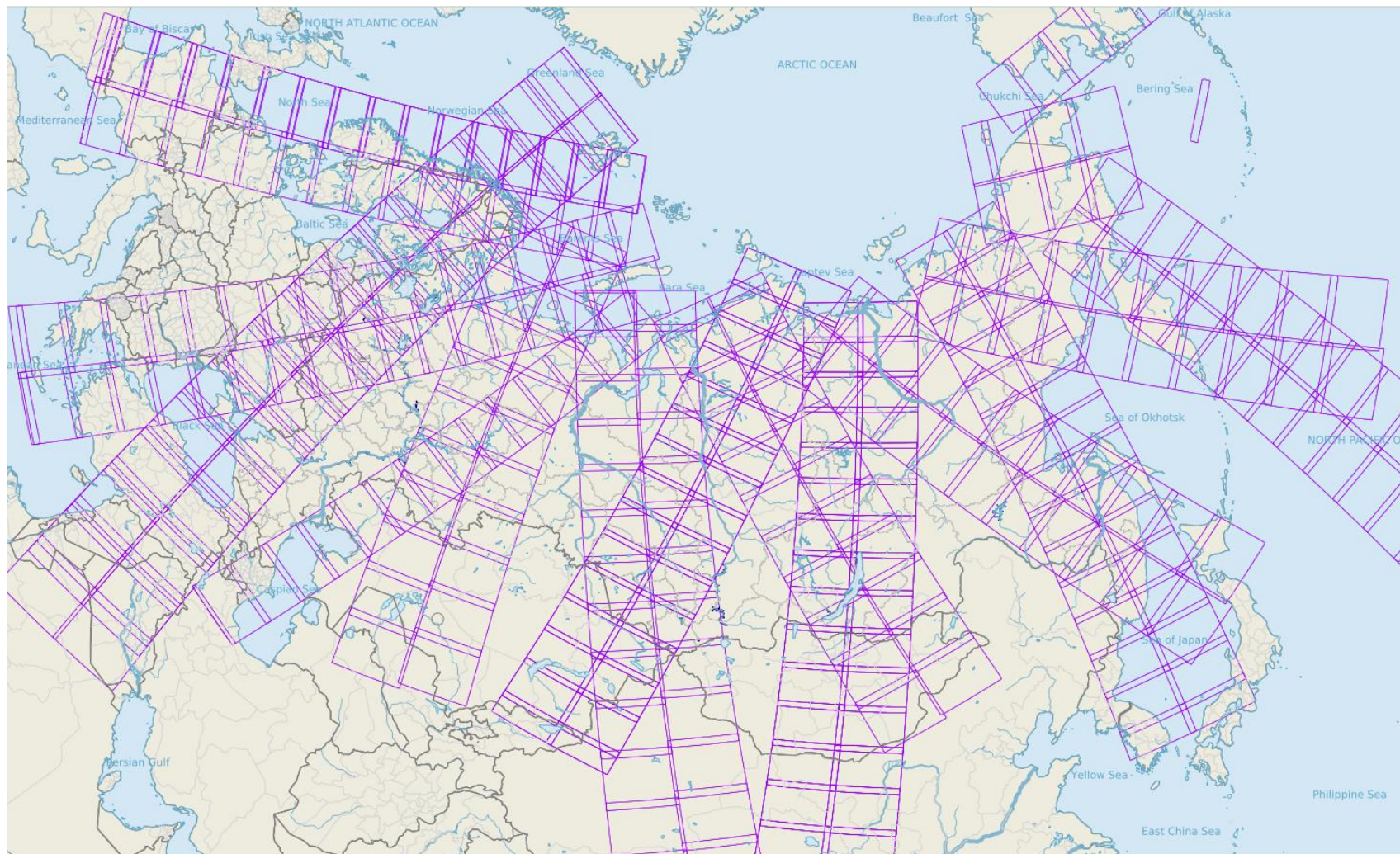
Орбита: солнечно-синхронная

Высота: 825 км

Наклонение: 98,8°

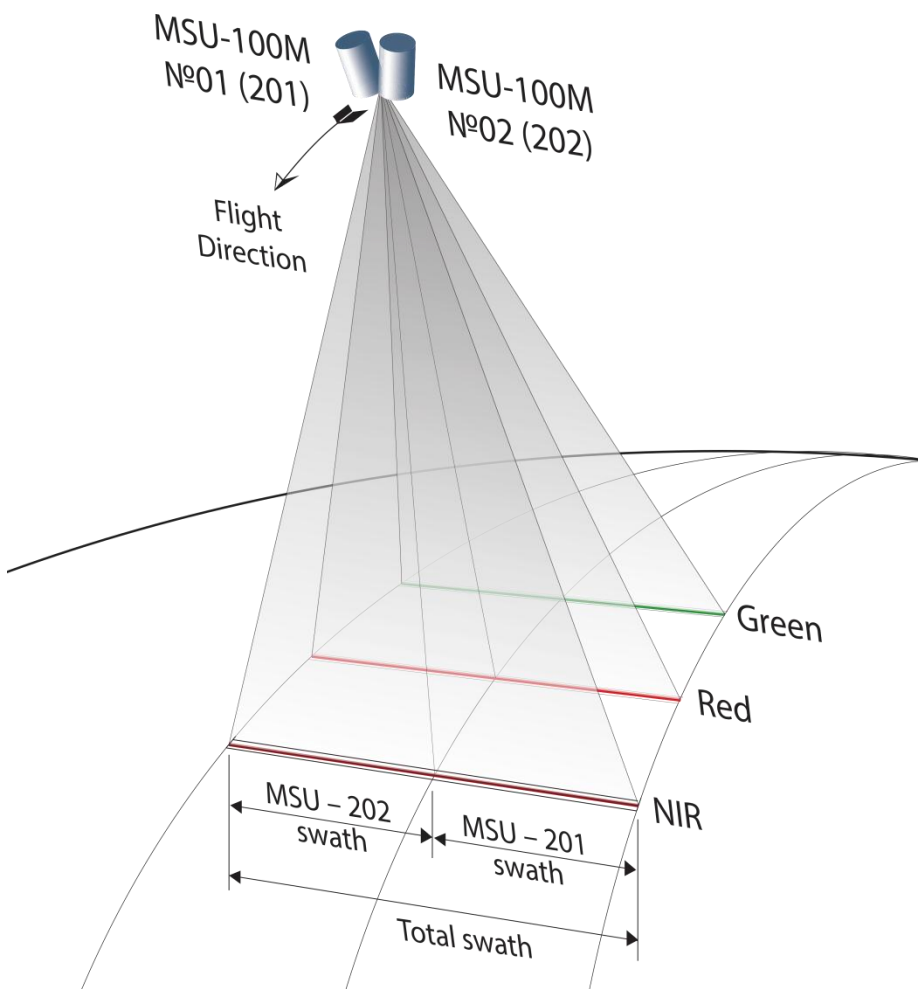
Время витка: 101,41 мин

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

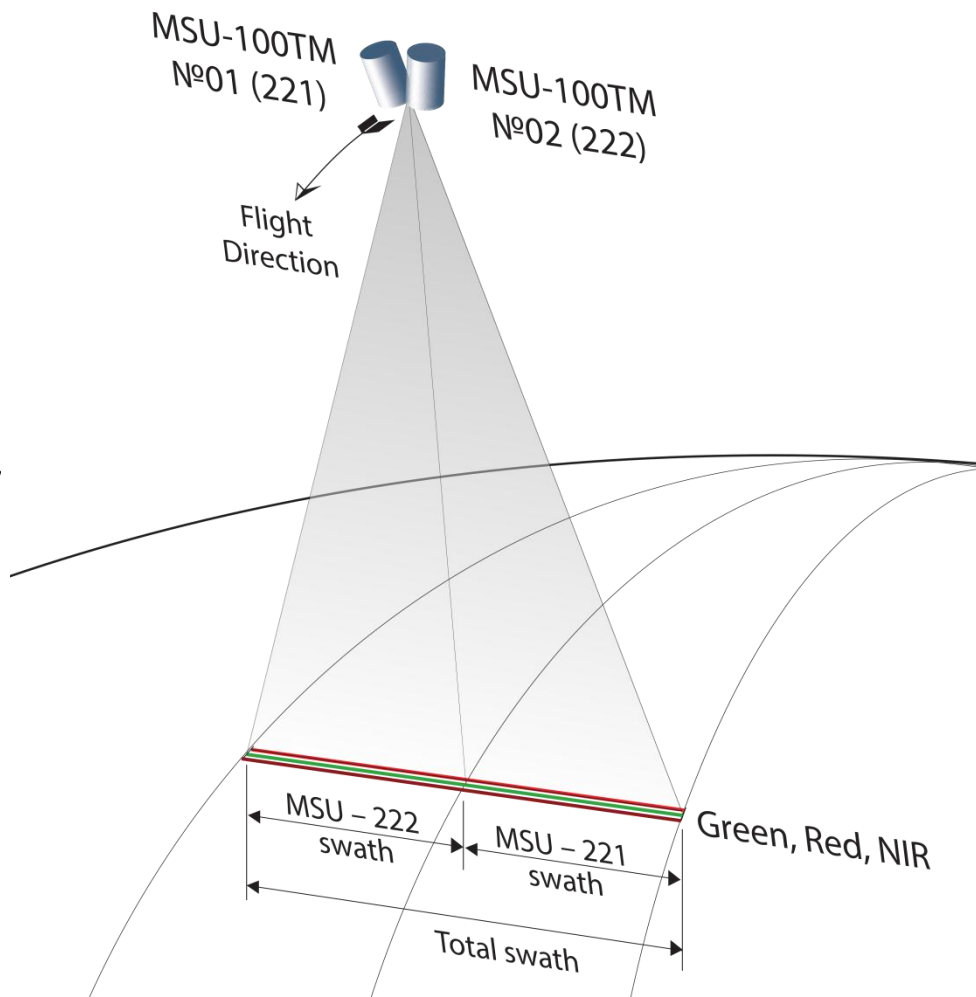


Территория России полностью покрывается изображениями КМСС-М за 3-5 дней, а совместно с КМСС-2 – за **1-2 дня** (разрешение 60 метров)

KMSS-M and KMSS-2 viewing geometry



KMSS-M (Meteor-M 2)



KMSS-2 (Meteor-M 2.2 and Meteor-M 2.3)

Meteor-M satellites and KMSS spectral cameras specifications



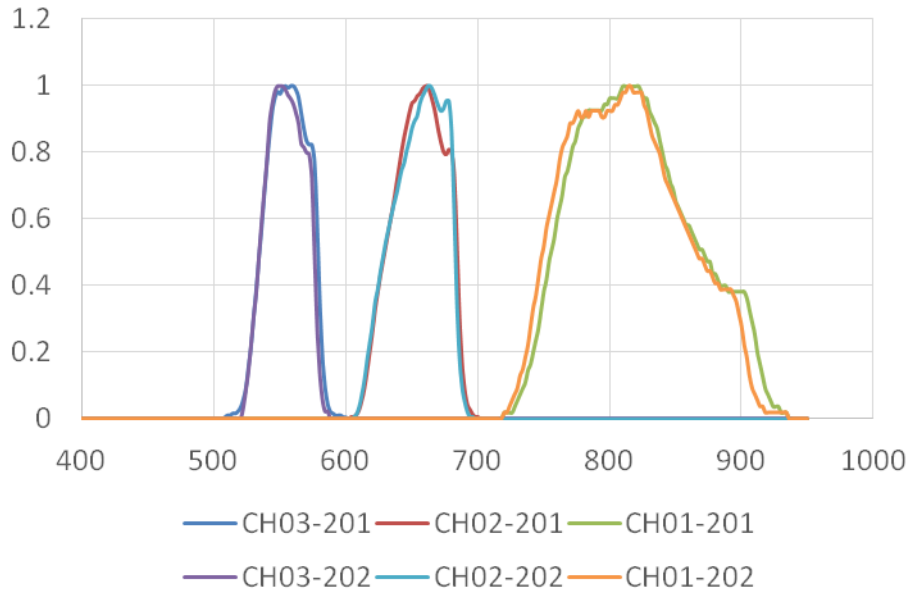
KMCC/MCY-100M

KMCC/MCY-100M

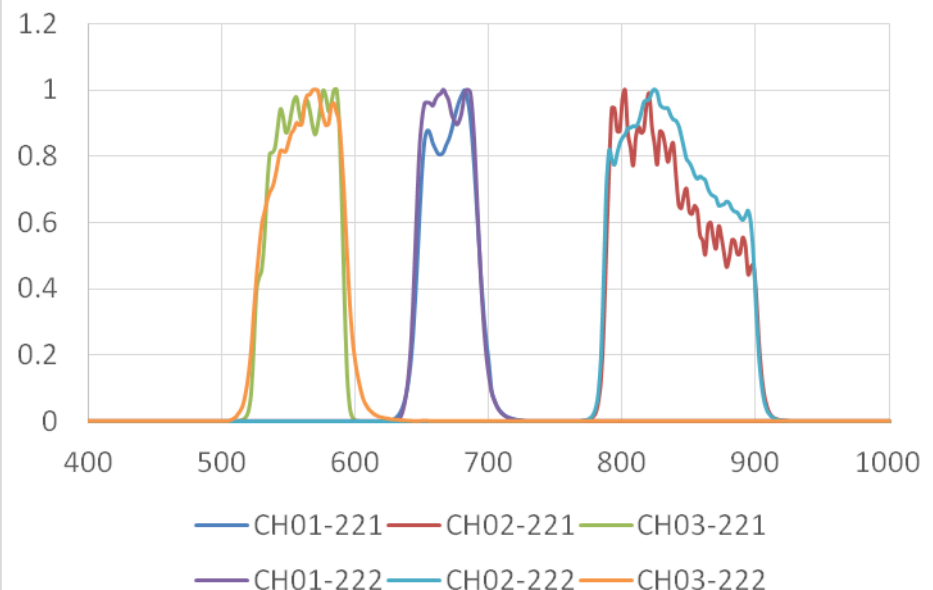
KMSS-M interband parralax is 8.6°

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

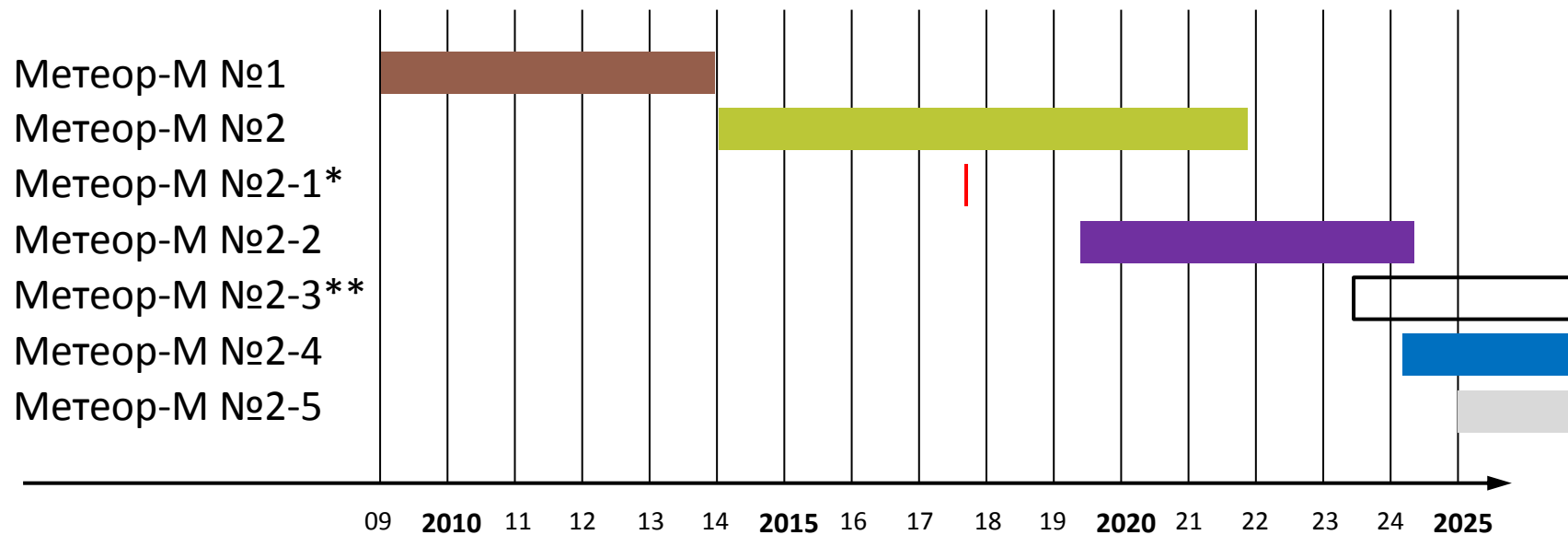
MSU-100M KMSS-M relative spectral response



MSU-100TM KMSS-2 relative spectral response



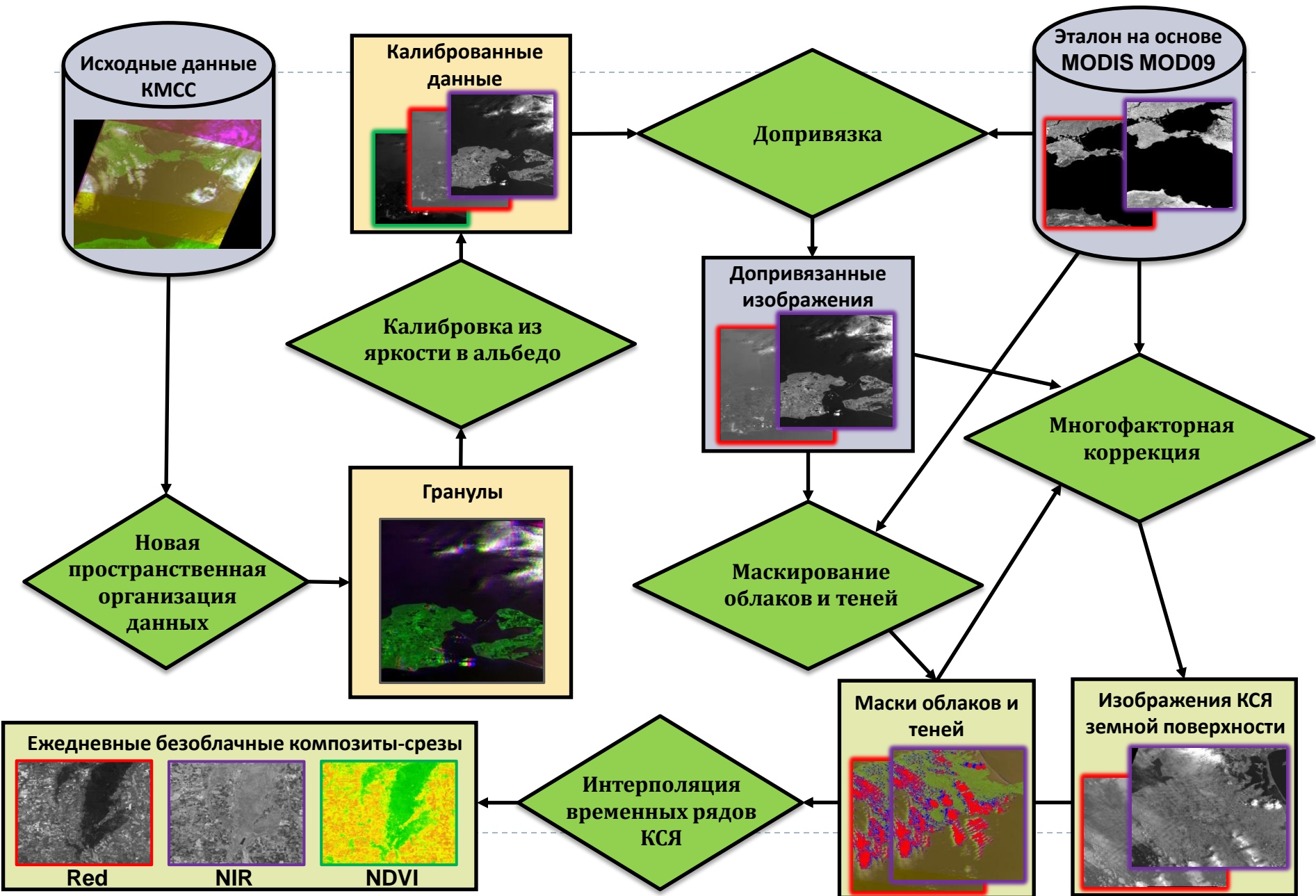
Хронология работы аппаратов Метеор-М



*Метеор-М №2-1 был потерян в процессе выведения на орбиту

**Метеор-М №2-3 работает, однако из-за проблем с радиолинией данные КМСС не поступают на Землю

Автоматическая технология обработки данных КМСС




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

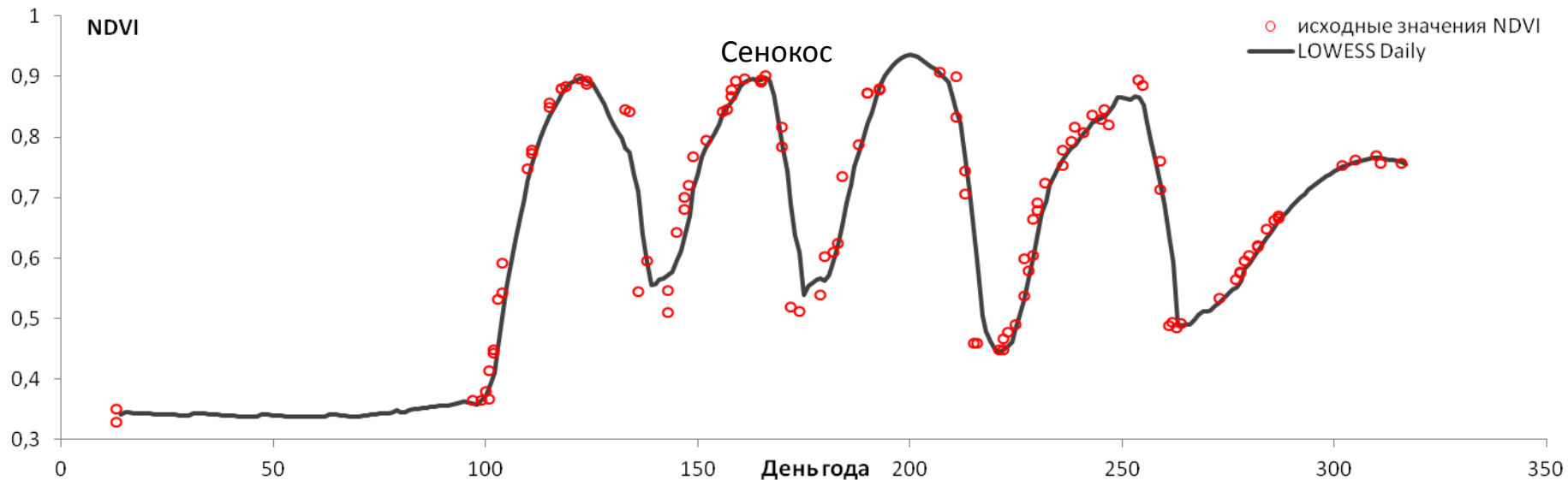
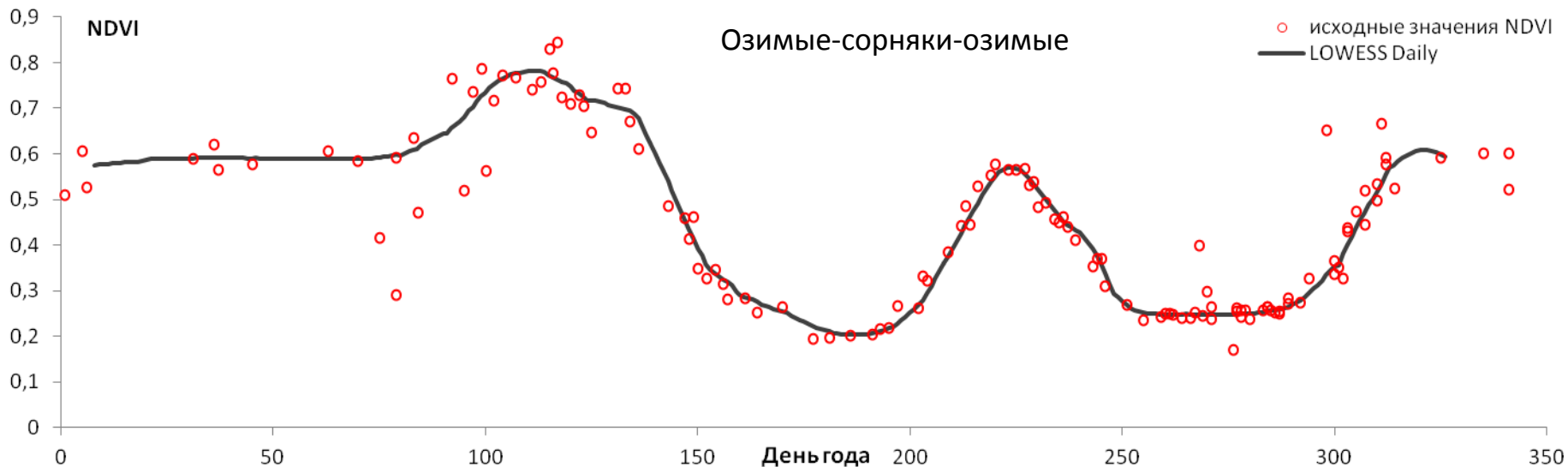
Dmitry Plotnikov ^{*}, Pavel Kolbudaev, Alexey Matveev, Andrey Proshin and Ivan Polyanskiy

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

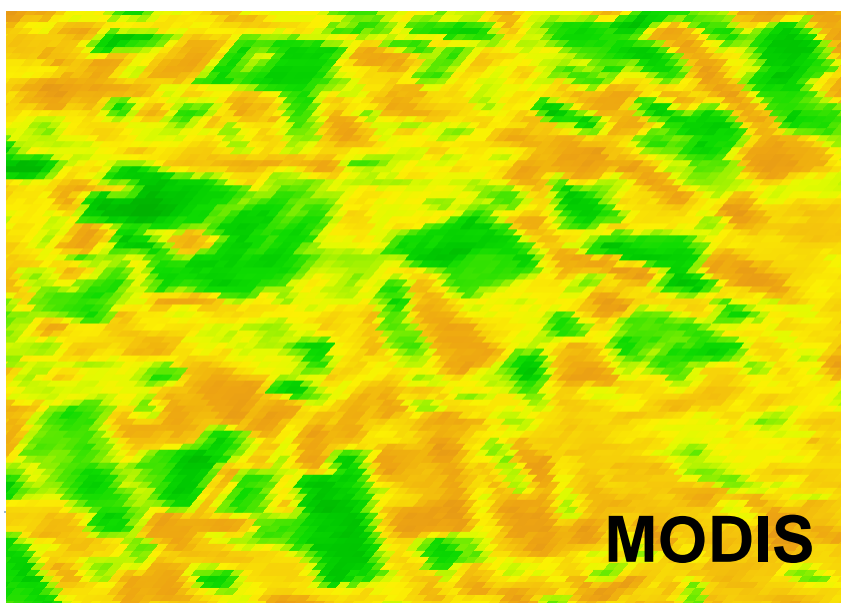
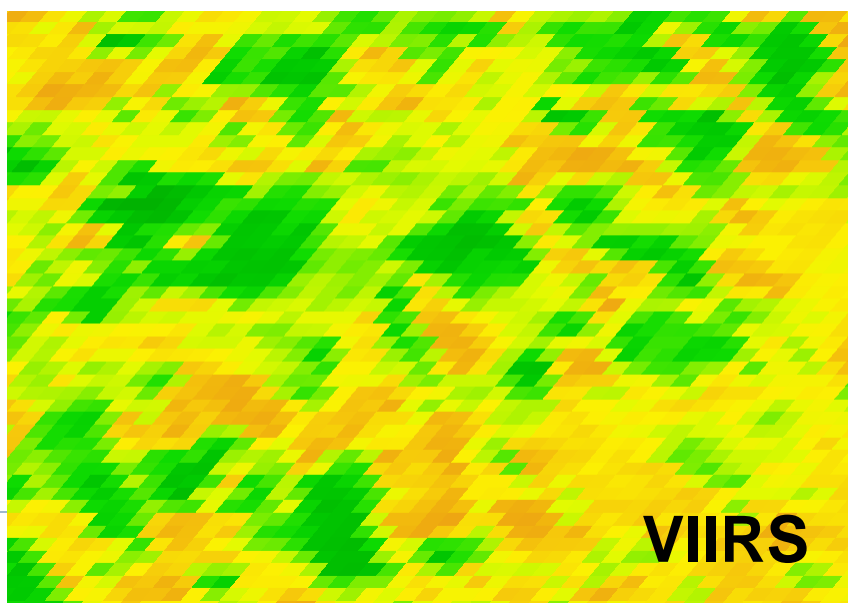
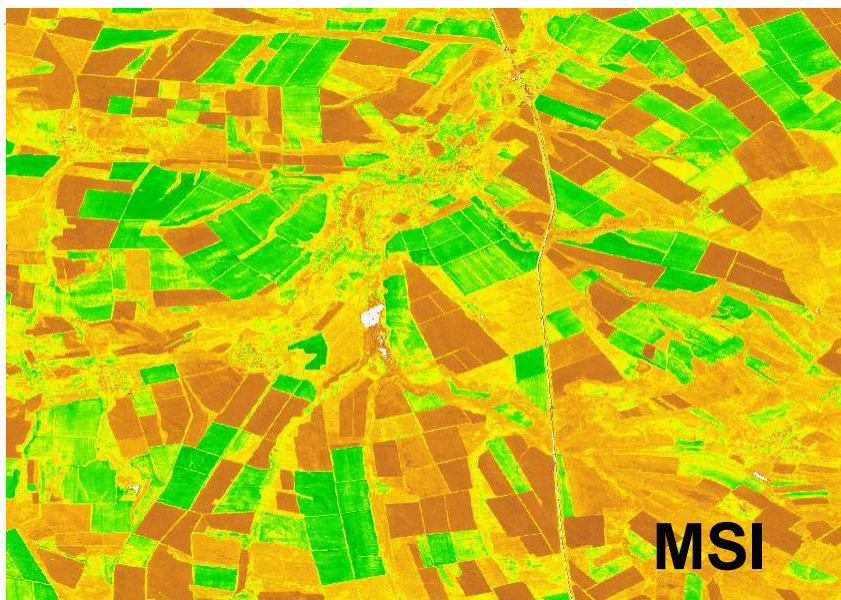
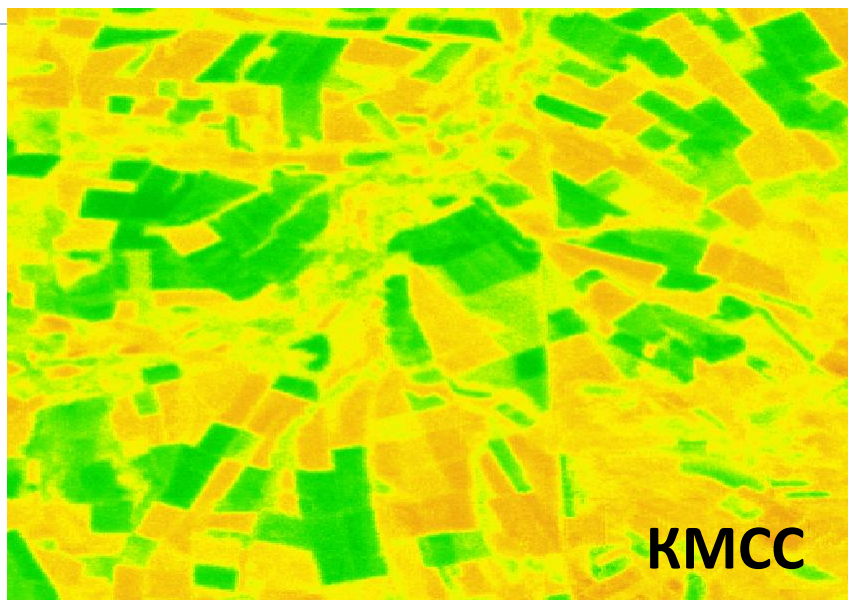
* Correspondence: dmitplot@d902.iki.rssi.ru; Tel.: +7-333-53-13

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.

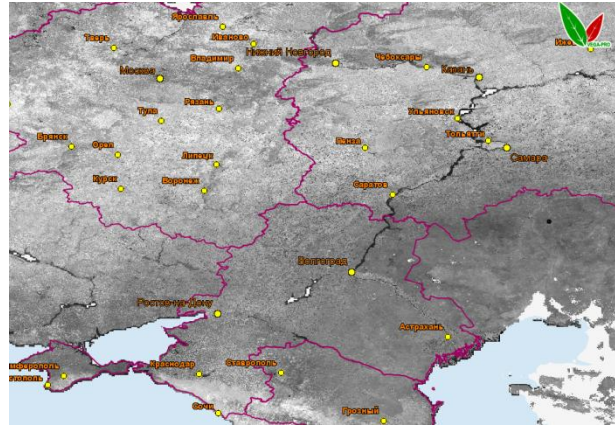
Весовая интерполяция LOWESS для скорректированных измерений



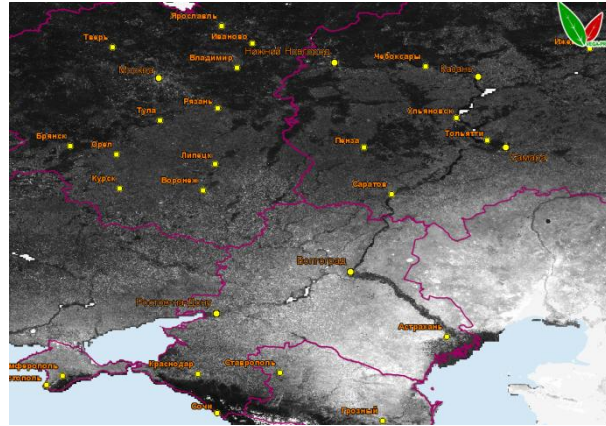
Восстановленный NDVI по данным различных систем на 1 мая 2020 года



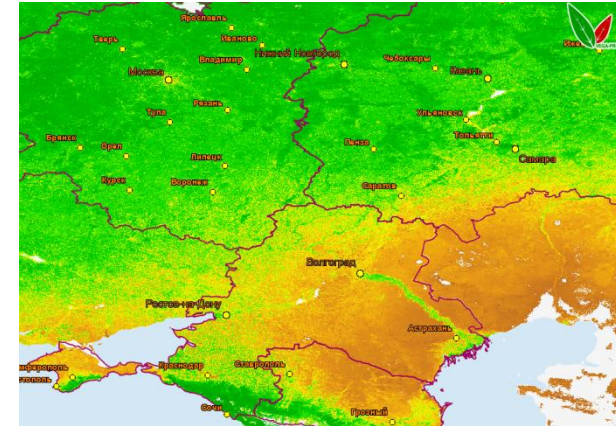
KMSS daily gap-free images and scatterplots



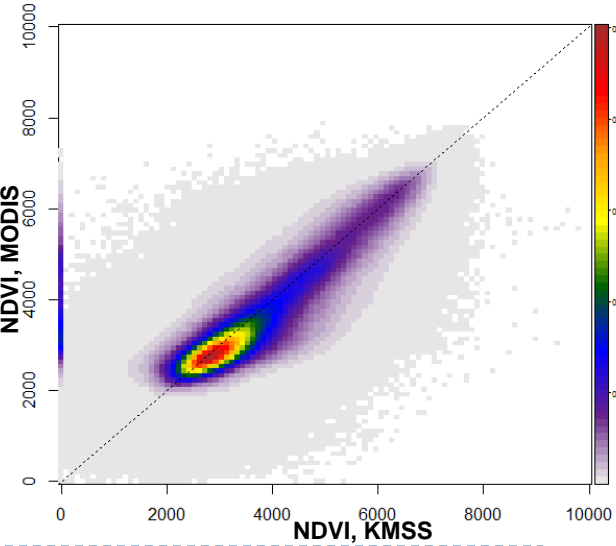
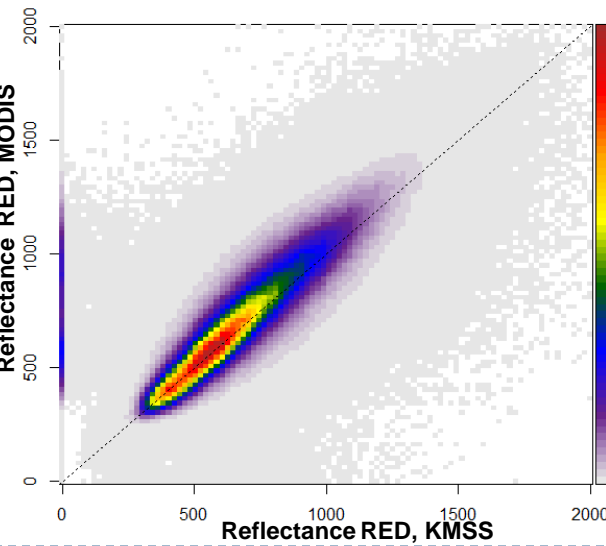
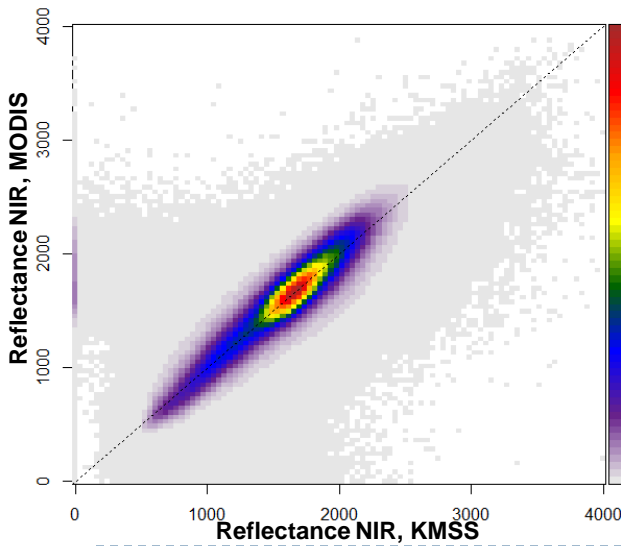
KMSS daily gap free NIR (1.08.2020)



KMSS daily gap free RED (1.08.2020)

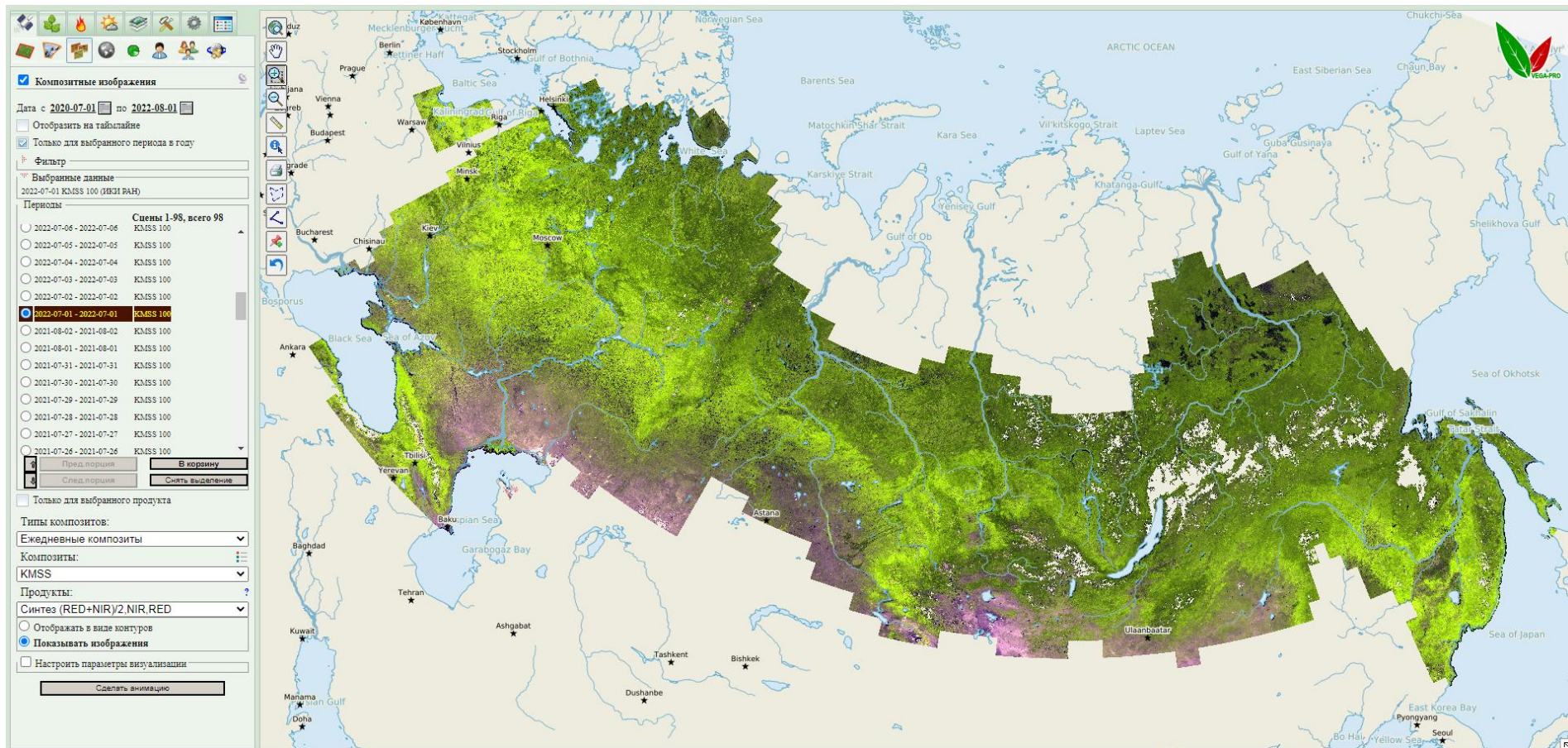


KMSS daily gap free NDVI (1.08.2020)



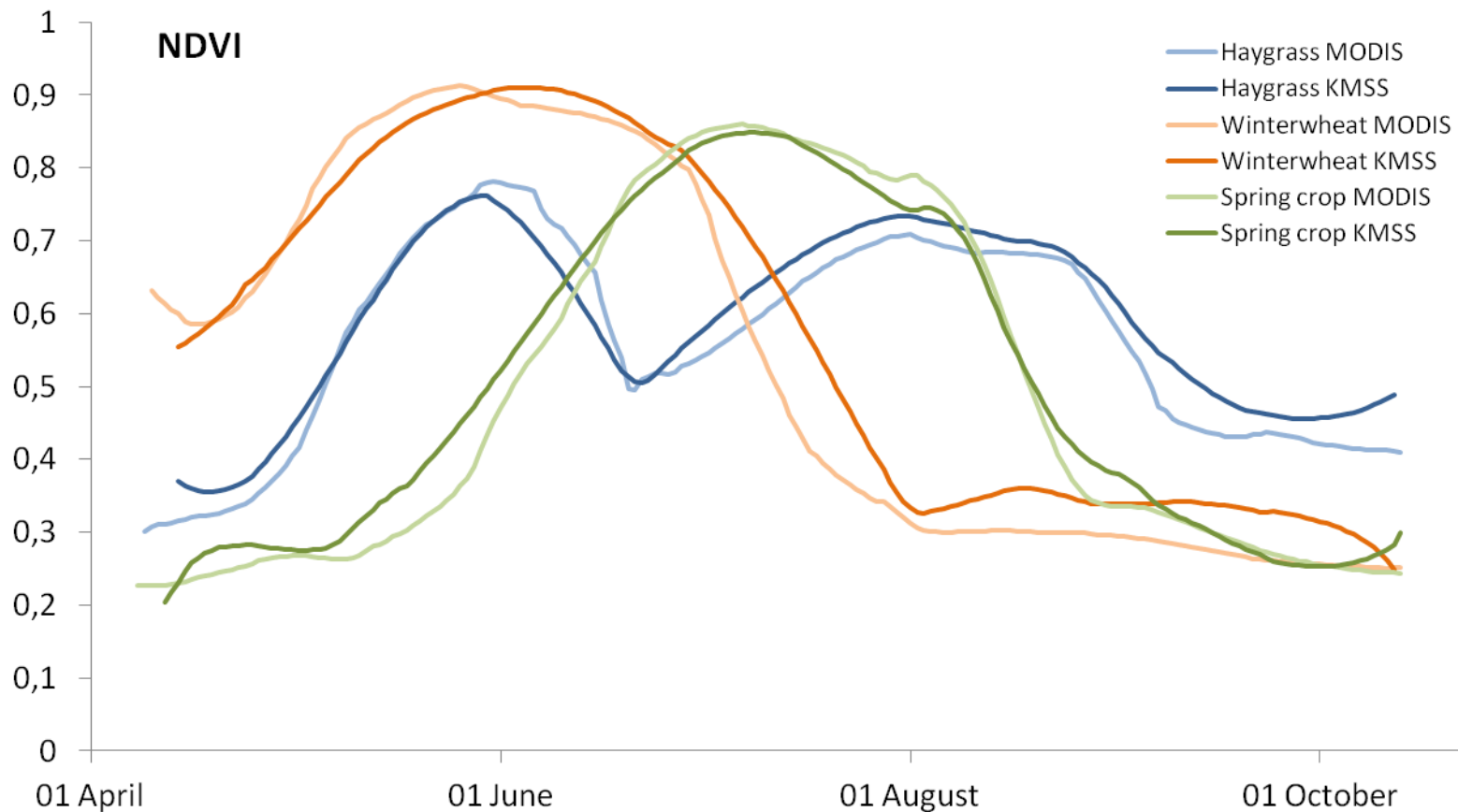
Пример ежедневного безоблачного изображения КМСС за 1 июля 2022

<http://pro-vega.ru>



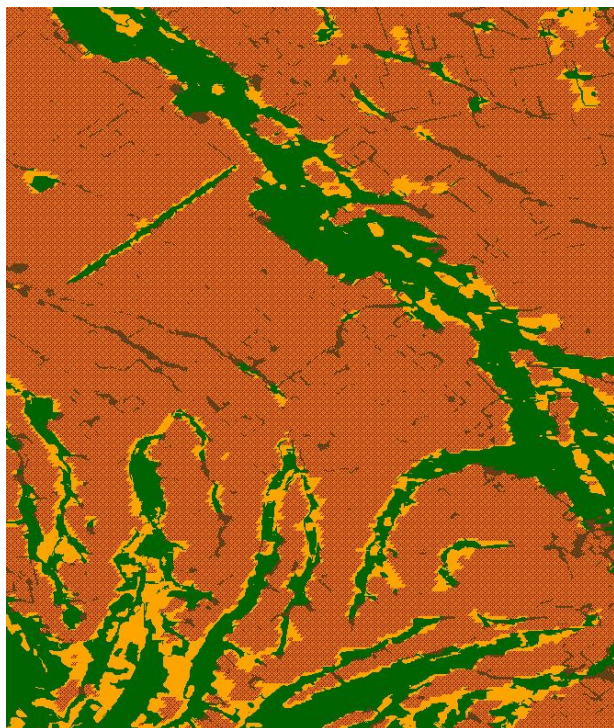
Пример ежедневного безоблачного изображения КМСС на территорию РФ

Временные серии восстановленных значений NDVI по данным КМСС и MODIS

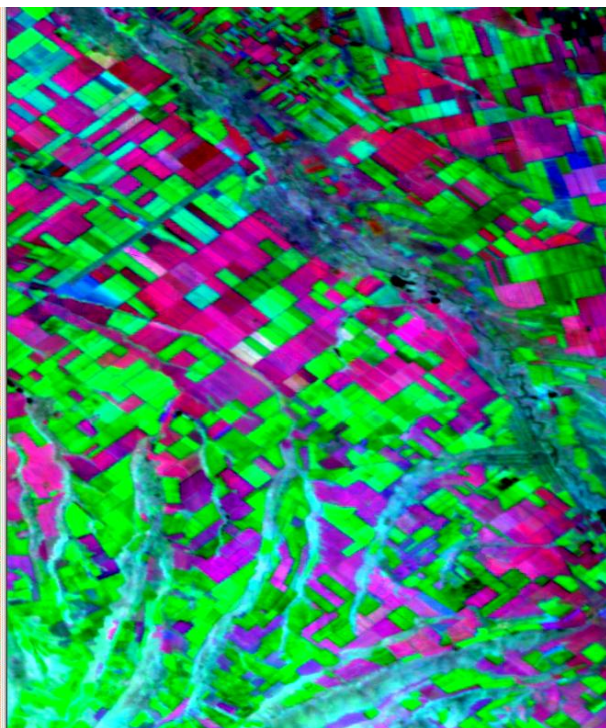


Количественное и качественное совпадение динамики NDVI для различных групп культур позволяет использовать восстановленные временные серии для мониторинга быстроменяющихся классов растительного покрова

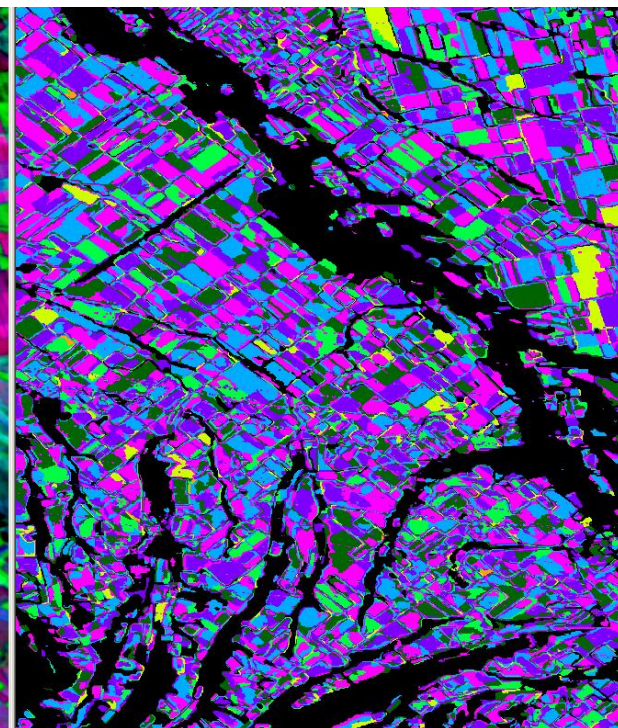
Автоматическое формирование тематических продуктов для сельскохозяйственного мониторинга на основе ежедневных безоблачных данных КМСС уровня L2A



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

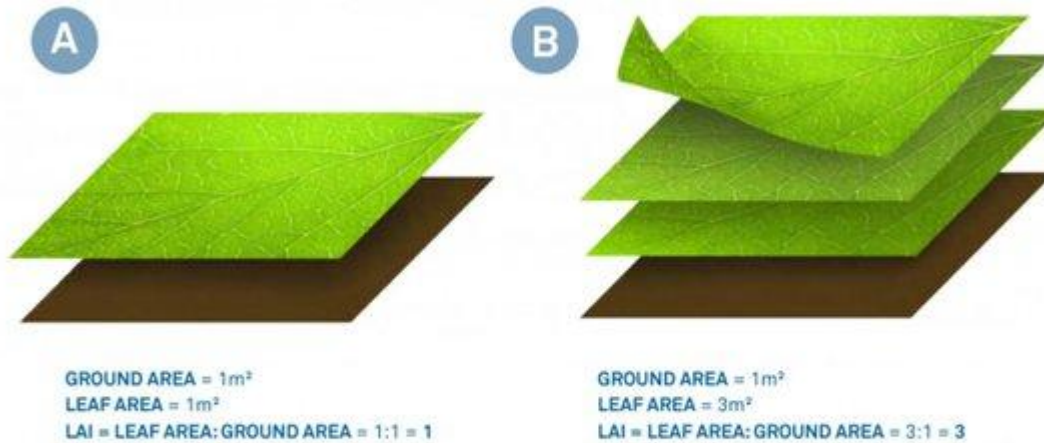


Автоматическая сегментация для распознавания сельскохозяйственных культур

Цель работы

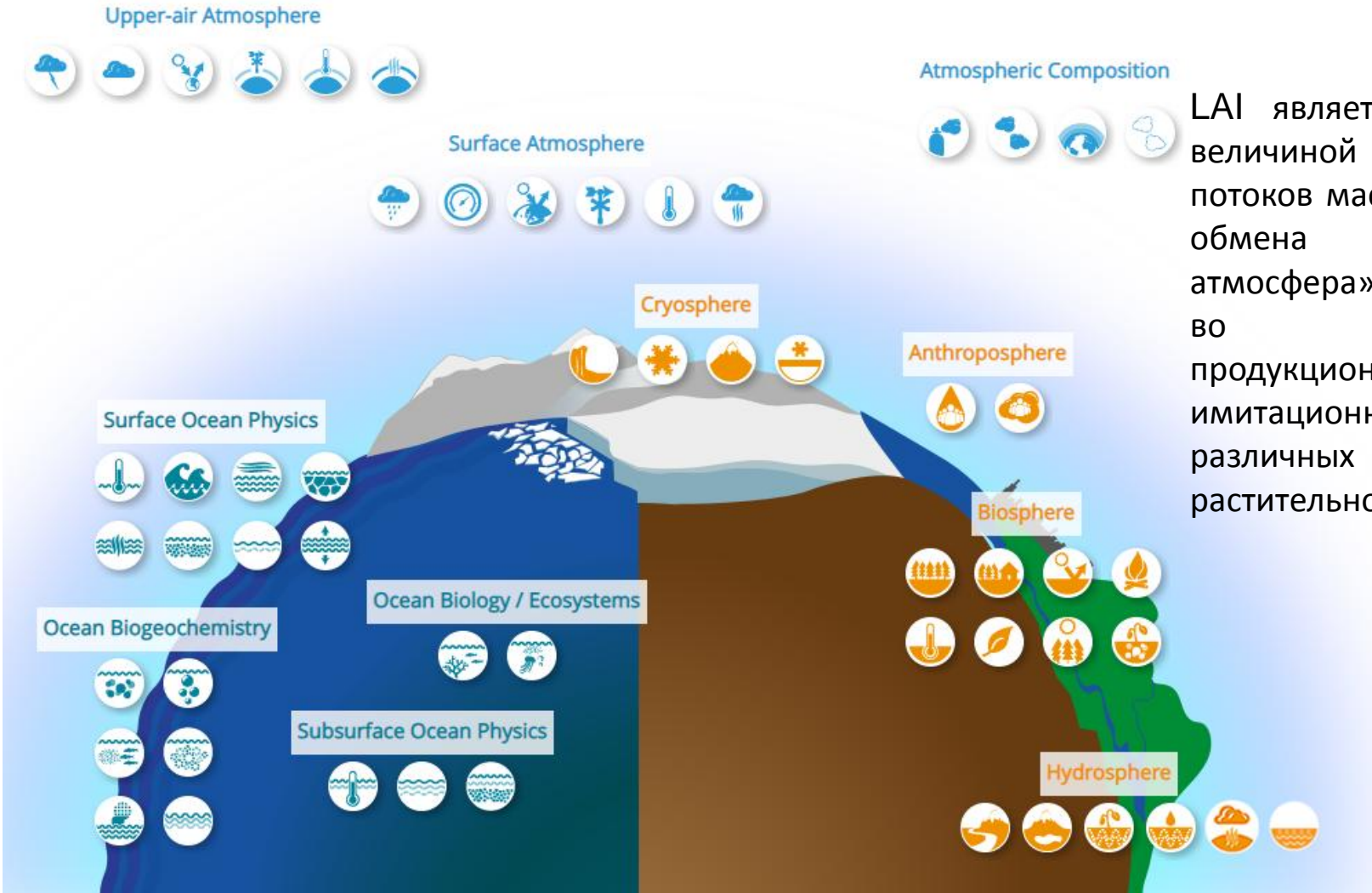
- ▶ Разработка метода дистанционного определения LAI по данным приборов серии KMCC путём нейросетевой инверсии модели переноса излучения PROSAIL и его оценка на больших территориях;
 - ▶ Оценка эффективности разноугловой схемы мультиспектральных наблюдений приборами KMCC при определении LAI.
-

Leaf Area Index



Индекс листовой поверхности LAI (m^2/m^2) – это отношение односторонней площади всех листьев к площади их проекции на поверхность земли.

Leaf Area Index относится к важнейшим климатическим переменным



LAI является ключевой величиной при расчёте потоков массо- и энергообмена «растение-атмосфера» и участвует во множестве продукционных и имитационных моделей различных типов растительного покрова

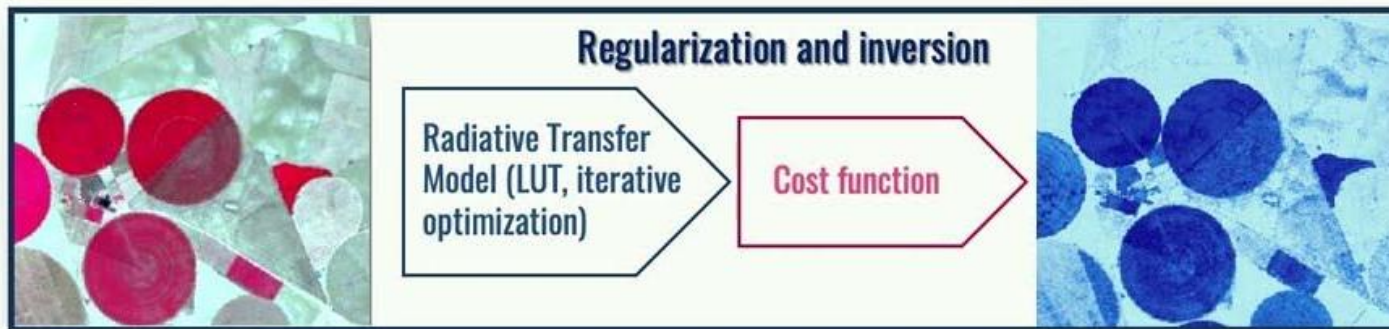
Существующие методы оценки LAI и продукты

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)

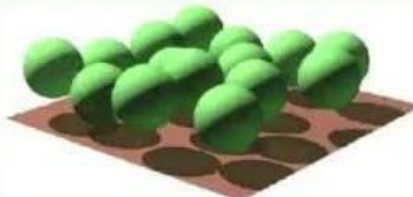
- ▶ Эмпирические соотношения VI-LAI
- ▶ LUT и методы оптимизации
- ▶ Инверсия RT-модели с помощью NN

Типы моделей переноса излучения, используемые в задачах инверсии

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)

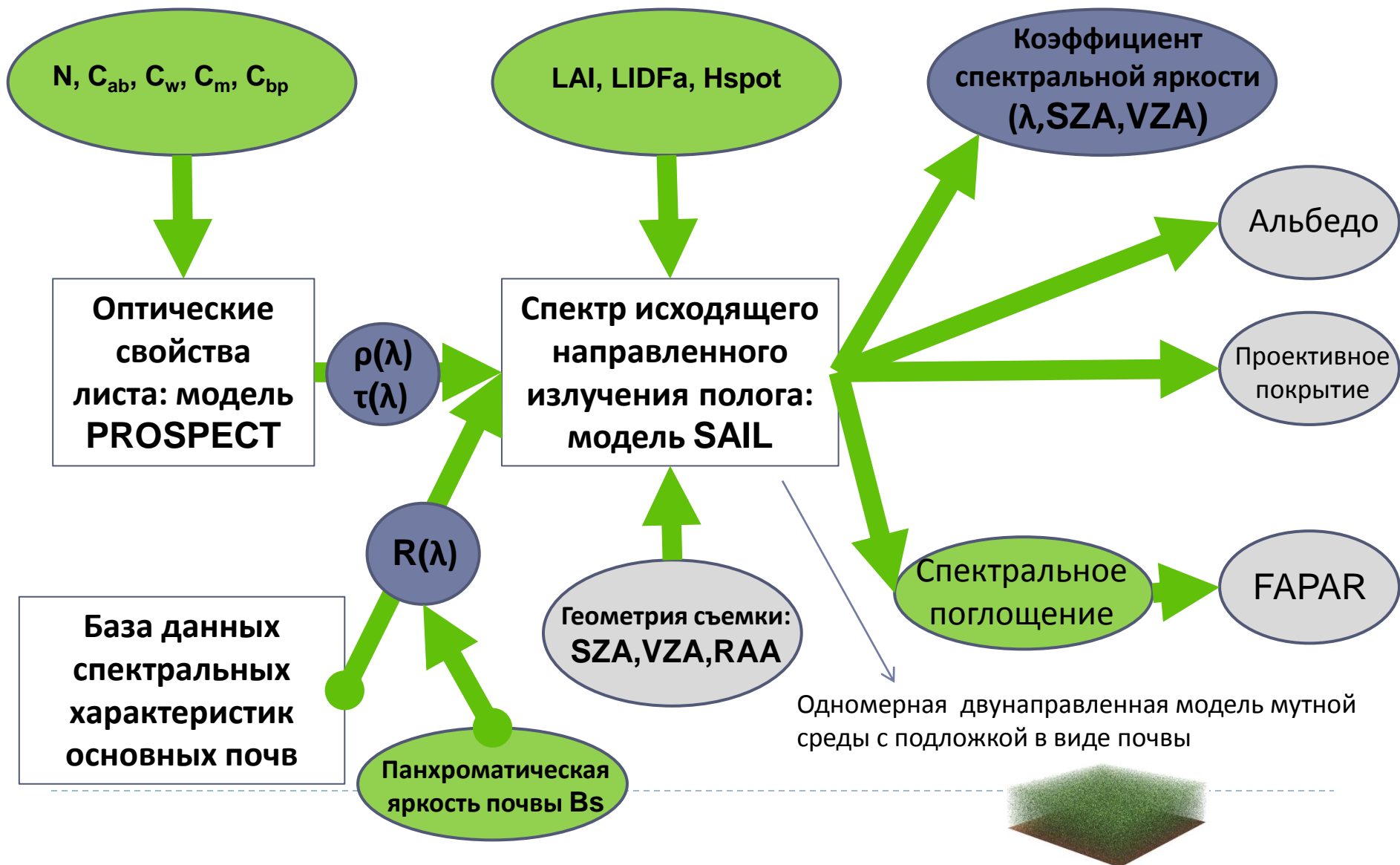


Computer graphic model**
(e.g. drat, Raytran, FLIGHT)

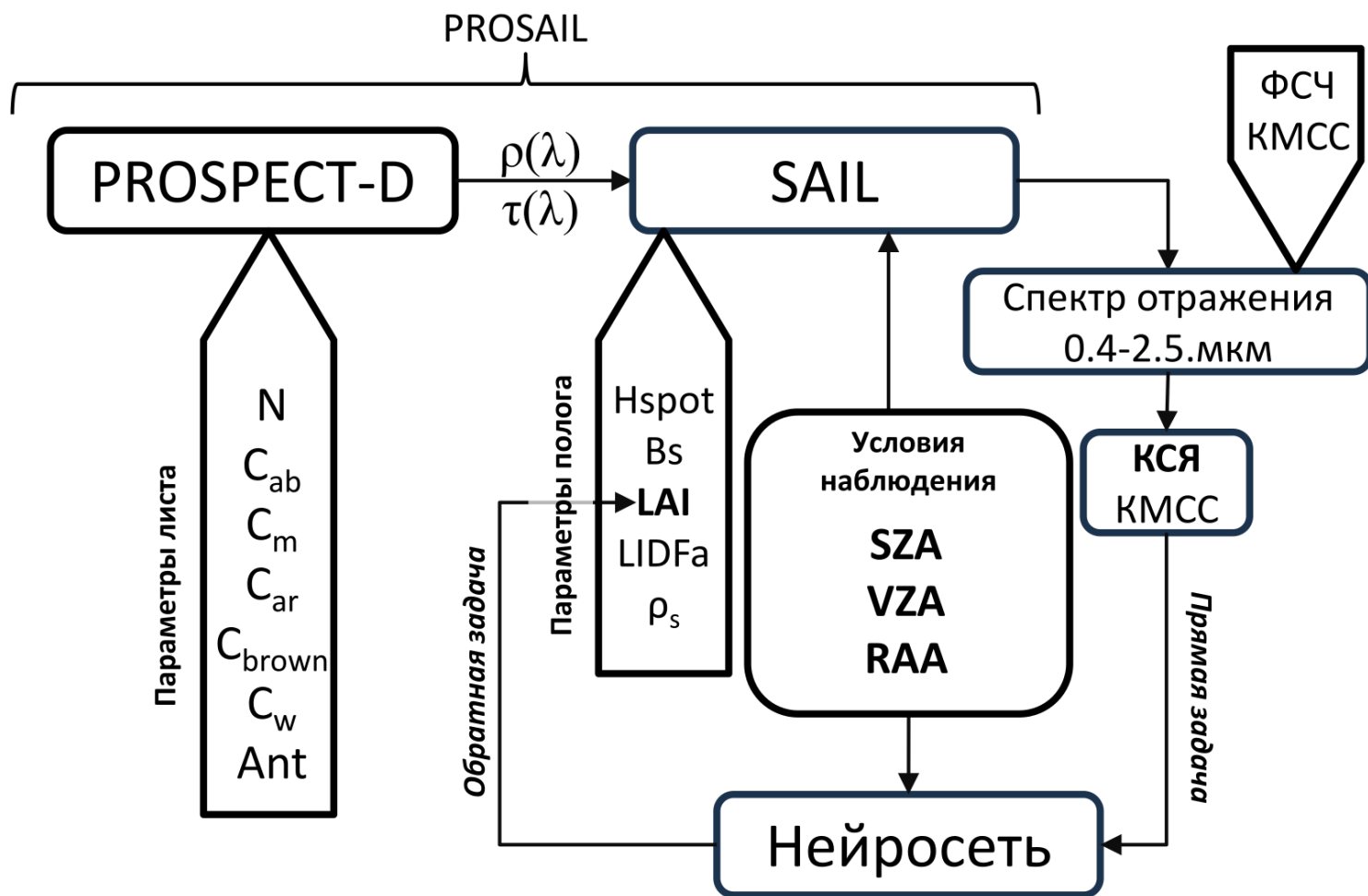
Методы и модели

- ▶ Для создания обучающей выборки:
 - ▶ Проведен анализ литературы для сбора агрегированной информации о распределении входных параметров (метаанализ);
 - ▶ Использована модель переноса излучения PROSAIL;
 - ▶ Использован метод построения полного ортогонального плана;
 - ▶ Для инверсии модели PROSAIL с получением LAI:
 - ▶ Определена оптимальная архитектура нейросети путём параметризации
-

PROSPECT-D + SAIL



Общая схема инверсии PROSAIL для LAI



Полный ортогональный план

- ▶ 1) Диапазоны значений каждой из входных переменных разделяются на страты (отрезки) ;
 - ▶ 2) Затем формируется набор комбинаций, включающий выбор страты из каждой переменной по одному разу (число комбинаций равно произведению числа страт всех параметров);
 - ▶ 3) Выбирается фактическое значение каждой переменной из диапазона соответствующей страты в соответствии с законом её распределения.
-

Метаанализ

▶ Изучены распределения физико-химических характеристик листа:

- ▶ концентрации хлорофилла C_{ab}
- ▶ содержания сухого вещества C_m
- ▶ содержание воды C_w
- ▶ каротиноидов C_{ar}
- ▶ антоцианов Ant
- ▶ коричневого пигмента C_{brown}
- ▶ мезофильной структуры листа N

▶ Полога:

- ▶ индекс листовой поверхности LAI
- ▶ средний угол наклона листьев $LIDFa$
- ▶ хот-спот параметр $Hspot$

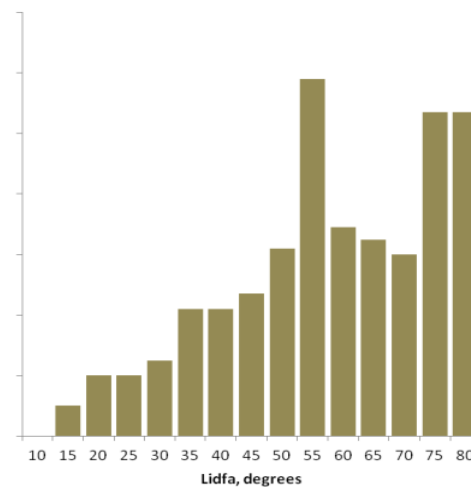
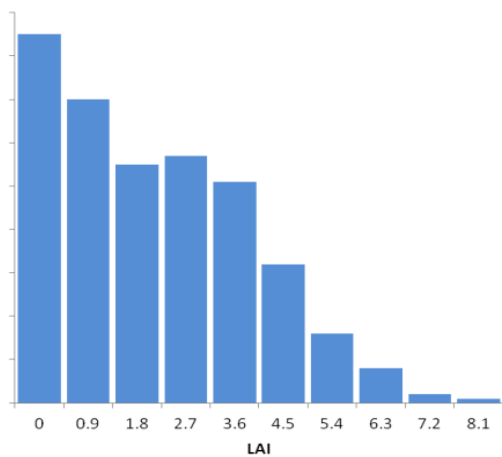
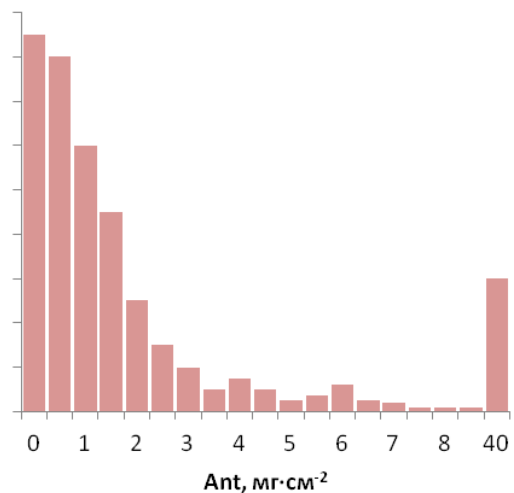
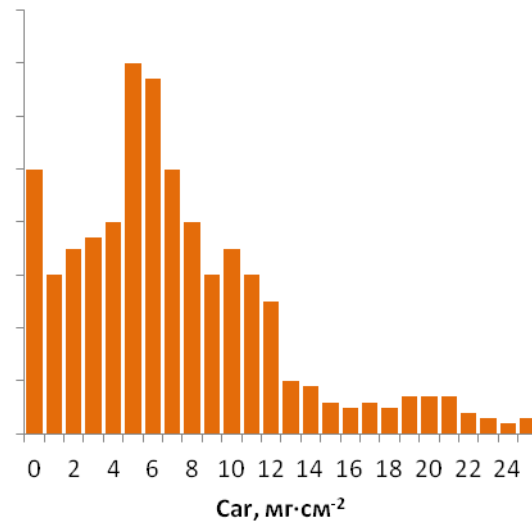
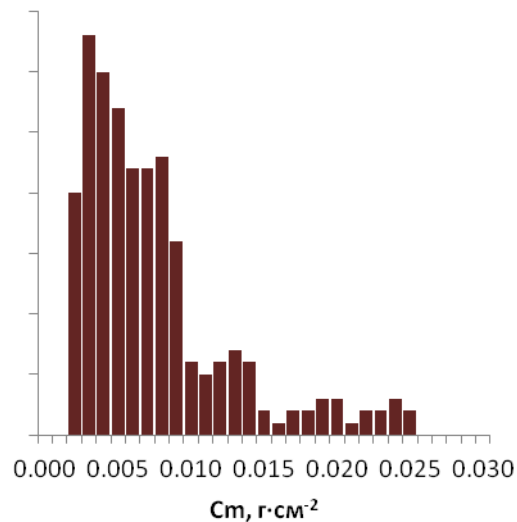
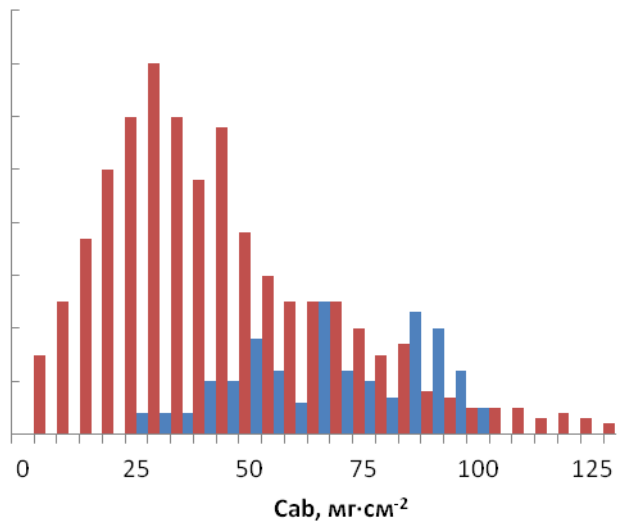
▶ Подстилающей поверхности:

- ▶ спектр почв ρ_s
- ▶ яркость почв Bs

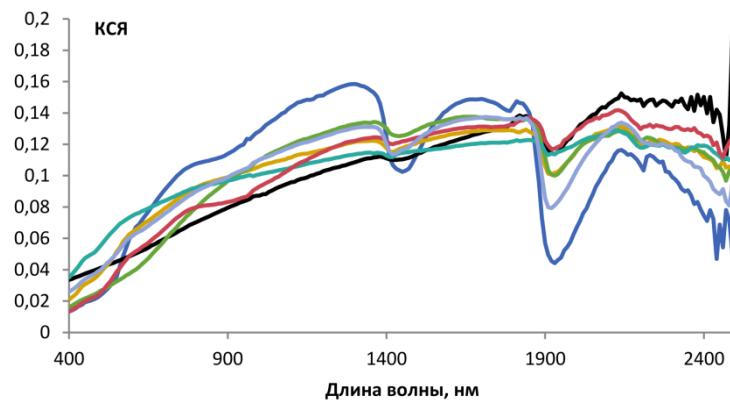
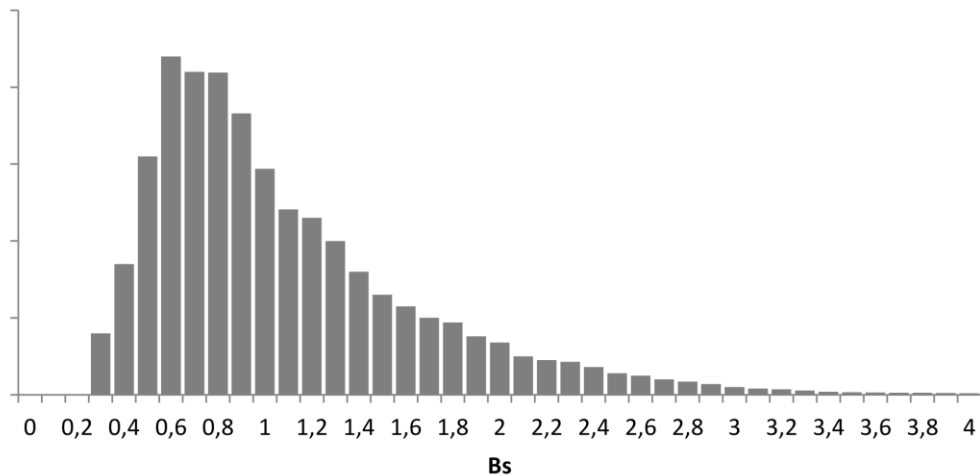
В анализе использовались работы:

- ▶ Feret et al. (2008) Remote Sensing of Environment;
- ▶ Feret et al. (2017) Remote Sensing of Environment;
- ▶ Scurlock (2002) Oak Ridge National Lab;
- ▶ Weiss et al. (2020) Research Report Avignon;
- ▶ Masson et al.(2003) Journal of climate;
- ▶ Baret et al (2006) IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing;
- ▶ Weiss et al.(2004) Agricultural and forest meteorology,
- ▶ Garrigues et al.(2008) Agricultural and forest meteorology.

Метаанализ: результаты (лист и полог)



Метаанализ: результаты (почва)

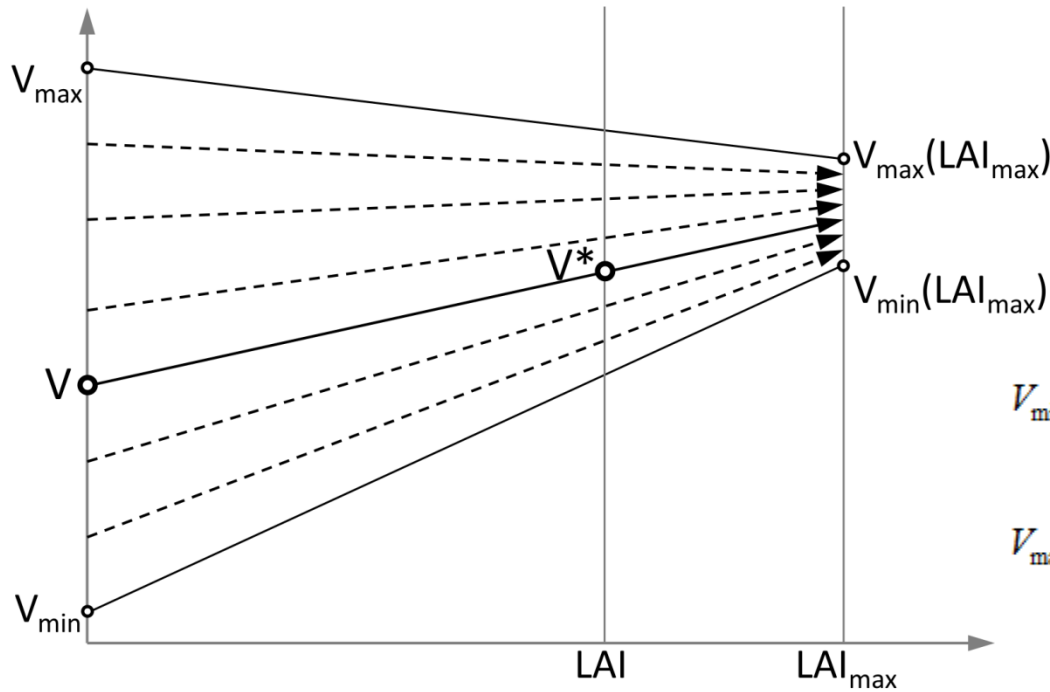


Параметры распределений лист\полог\почва

Объект	Параметр	Описание	Мин	Макс	Среднее	Дисперсия	Число страт	Закон	V_{\min} при LAI _{max}	V_{\max} при LAI _{max}
Лист	N (-)	число мезофильных пластин в листе	1,2	1,8	1,5	0,3	3	Гаусс	1,3	1,8
	Cab(мг/см ²)	общее содержание хлорофилла a и b	20	90	45	30	4	Гаусс	45	90
	Car(мг/см ²)	содержание каротиноидов	2	20	6	3	4	Гаусс	6	20
	Cbrown (-)	относительное количество коричневого пигмента	0	2	0	0,3	3	Гаусс	0	0,2
	Cw(г/см ²)	эквивалентная толщина воды	0,6	0,85	0,75	0,08	4	Гаусс	0,7	0,08
	Cm(г/см ²)	содержание сухого вещества	0,003	0,011	0,005	0,005	4	Гаусс	0,005	0,011
	Ant(мг/см ²)	содержание антоцианов	0	8	0,5	2	4	Гаусс	0,5	8
Полог	LAI(м ² /м ²)	индекс листовой поверхности	0	15	2	3	7	Равномерное (0-0,5) Гаусс(0,5-15)	-	-
	LIDFa(град)	средний угол наклона листьев	30	80	60	30	3	Гаусс	55	65
	Hspot (-)	хот-спот параметр	0,1	0,5	0,2	0,5	1	Гаусс	0,1	0,5
Почва	Bs (-)	коэффициент яркости фона	0,5	3,5	1,2	2	4	Равномерное	0,5	1,2

Распределение значений входных переменных, а также параметры их сораспределений (LAI) для модели PROSAIL

Учёт сораспределений параметров от LAI

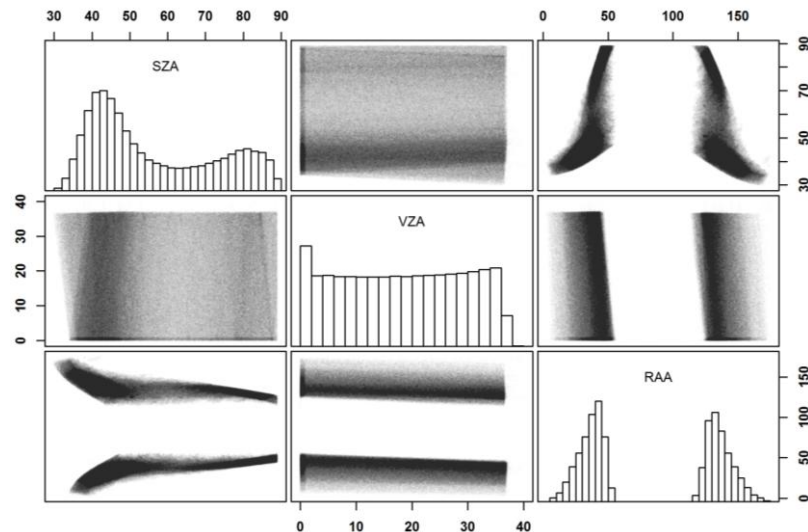
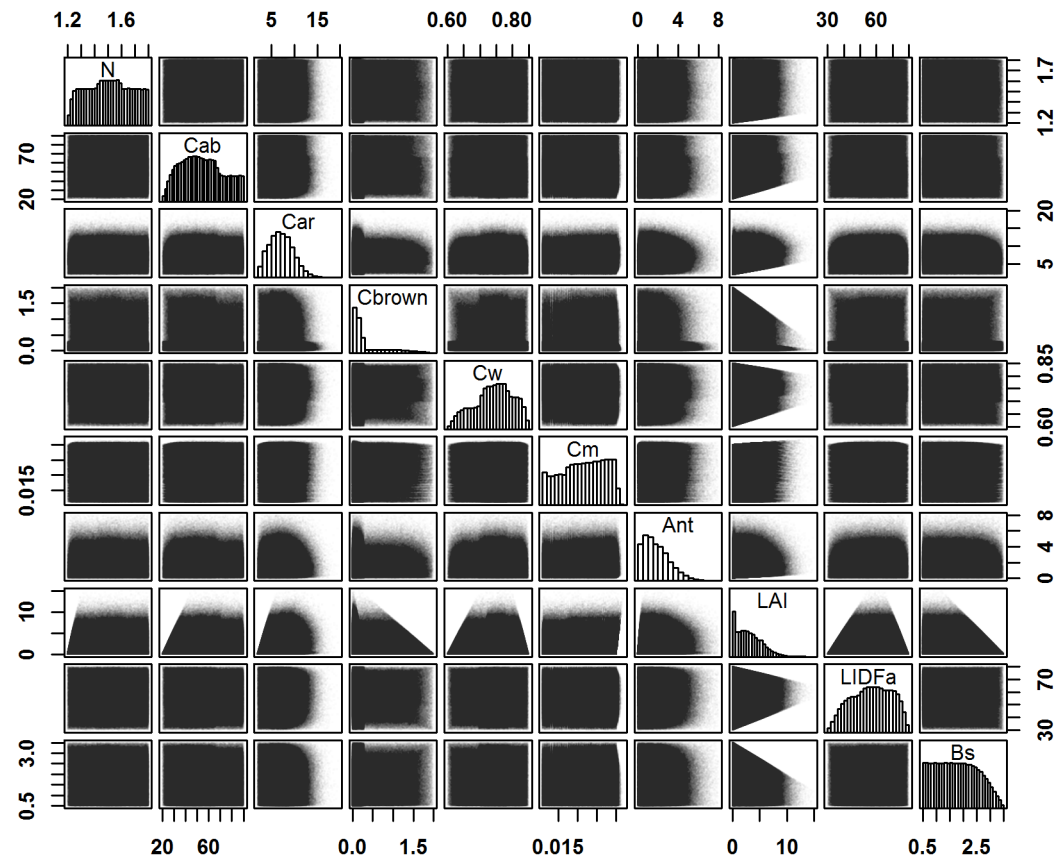


$$\frac{V - V_{\min}(0)}{V_{\max}(0) - V_{\min}(0)} = \frac{V^* - V_{\min}(LAI)}{V_{\max}(LAI) - V_{\min}(LAI)}$$

$$V_{\min}(LAI) = V_{\min}(0) + \frac{LAI}{LAI_{\max}} (V_{\min}(LAI_{\max}) - V_{\min}(0))$$

$$V_{\max}(LAI) = V_{\max}(0) + \frac{LAI}{LAI_{\max}} (V_{\max}(LAI_{\max}) - V_{\max}(0))$$

Распределения входных параметров модели PROSAIL



Попарные распределения фактически измеренных углов наблюдения и освещения для пикселей всех сцен КМСС, полученных за 2022 год для территории России

Попарные распределения входных переменных лист-полог-почва

Формирование обучающей выборки

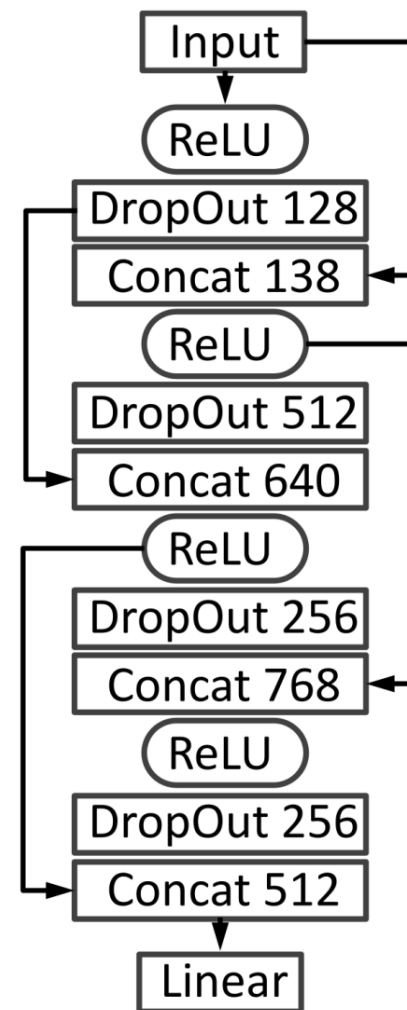
Для создания обучающей выборки в соответствии с полным ортогональным планом выполнялась нижеописанная последовательность действий, повторяемая для каждой комбинации параметров.

- ▶ Сначала выбирается дата – полный год (365 дней) разбивается на 4 равных интервала, после чего внутри отрезка финальная дата выбирается случайным образом.
 - ▶ Далее, на основании даты случайным образом выбирается соответствующее ей случайное мультиспектральное наблюдение из собранной базы данных реальных наблюдений за один год съёмки. Под наблюдением имеется в виду скоординированная пара двух записей: первая – с разноугловой геометрией, вторая – с классической надирной; каждая запись включает в себя угол наблюдения VZA , зенитный угол Солнца SZA , а также фазовый угол RAA . Это позволило сравнить эти две геометрии наблюдений.
 - ▶ Далее, случайным образом в качестве фонового спектра подстилающей поверхности выбирался один из семи стандартных спектров почв.
 - ▶ Входные параметры для модели PROSAIL в трех категориях - полог, лист и почва - генерировались в соответствии с стратами таблицы параметров.
 - ▶ Затем значения каждого сораспределённого параметра корректировались в соответствии с правилами сораспределения этой величины с LAI.
 - ▶ После окончания формирования таблицы было запущено моделирование спектра в режиме прямой задачи: сгенерированные комбинации параметров вводились в модель PROSAIL для расчета соответствующих значений спектрального отклика в трёх спектральных каналах KMCC и для двух конфигураций наблюдений: разноугловой и надирной.
 - ▶ Всего было создано 774144 образца, для обучения модели было использовано 4/5 случайно отобранных образцов, а оставшиеся 1/5 образцов - для тестирования и оценки модели.
-

Результаты параметризации нейросети

Параметризация осуществлялась с использованием метода Hyperband (Li et al. 2018) для следующих параметров:

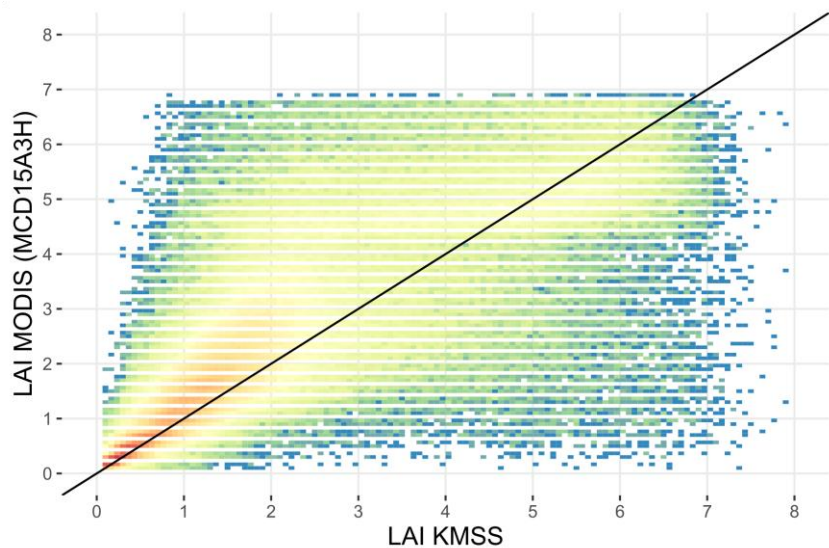
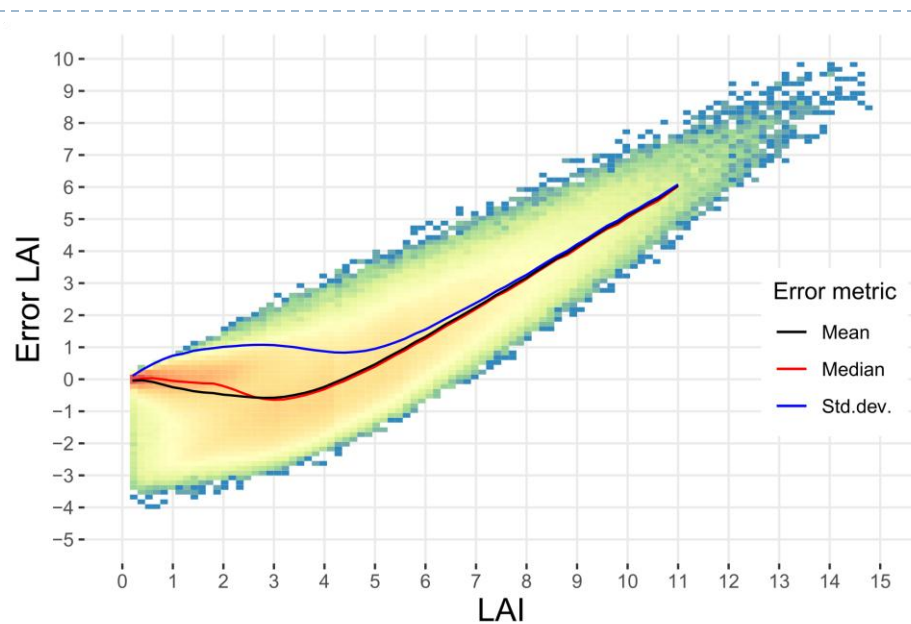
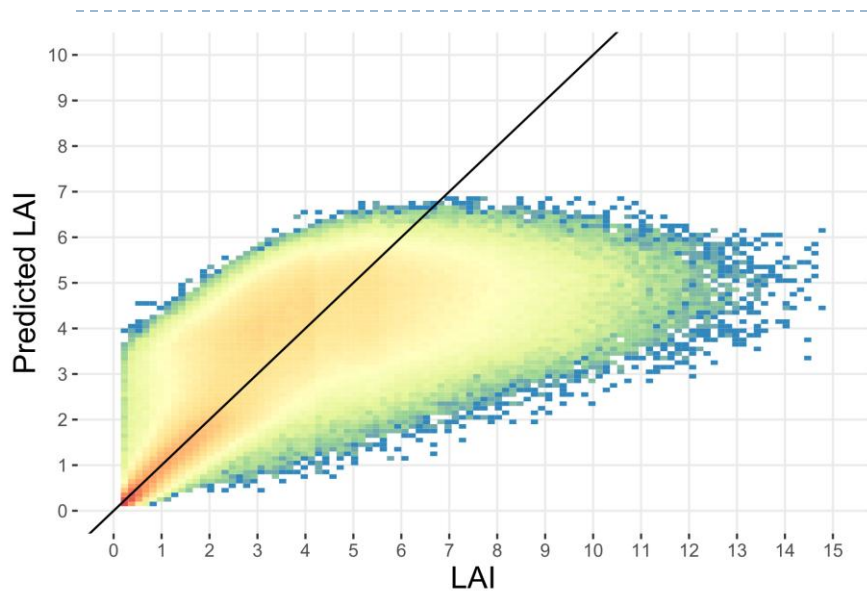
- ▶ Вид функции активации: *relu*, *tanh*, *softplus*;
- ▶ Значение коэффициента dropout: *0*, *0.1*, *0.2*, *0.3*, *0.4*, *0.5*;
- ▶ Число скрытых слоёв: *1*, *2*, *3*, *4*;
- ▶ Число нейронов в каждом скрытом слое: *128*, *256*, *512*;
- ▶ Скорость обучения: 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} ;
- ▶ Вид функции оптимизации: *Adam*, *Adamx*, *Nadam*;
- ▶ Тип распределения параметров нейросети при инициализации: *he_normal*, *glorot_normal*, *random_normal*;
- ▶ Применение «skip-connection»: *да*, *нет*.



Сравнение КМСС LAI с MCD15A3H

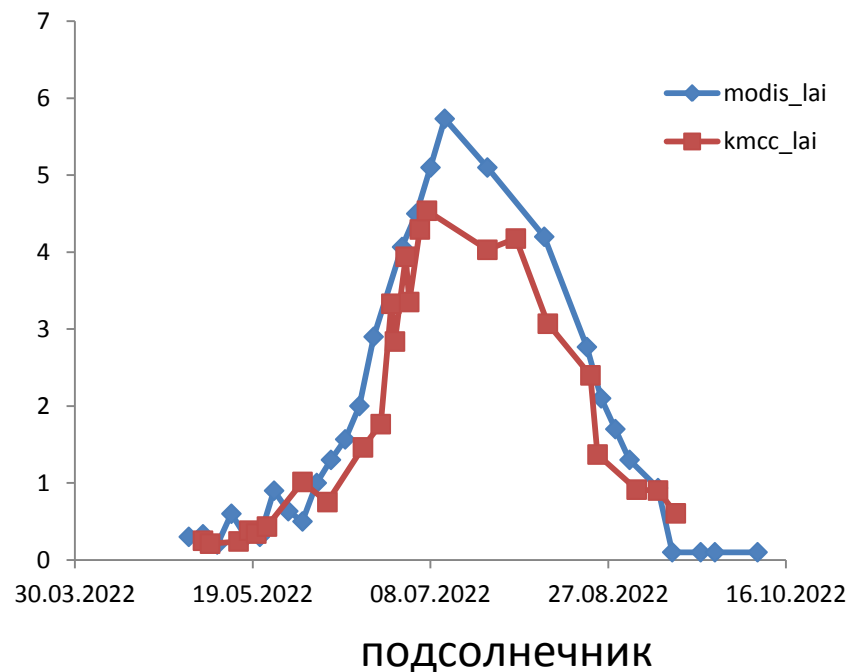
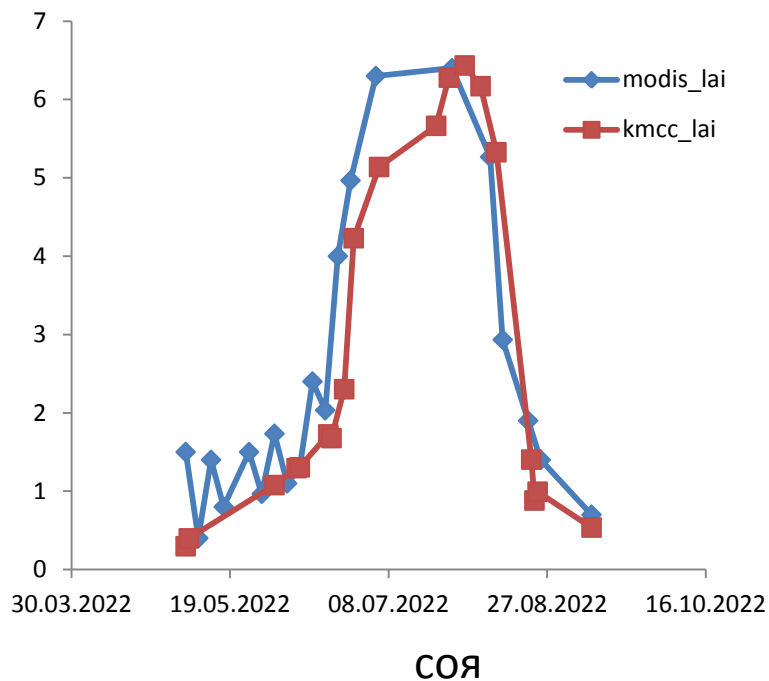
- ▶ По результатам работы был обработан набор атмосферно-скорректированных мультиспектральных измерений прибором КМСС-2 за полный 2022 год для территории России: около 8 тысяч гранул-дат КМСС (~2000x2000 пикселей) при размере одной гранулы приблизительно $1^\circ \times 1^\circ$;
 - ▶ В качестве опоры для сопоставления был использован продукт LAI NASA MCD15A3H – четырёхдневные композитные изображения LAI по данным прибора MODIS (Terra и Aqua) с пространственным разрешением 500 метров прореженные до частоты ~1 раз в 2 недели;
 - ▶ Каждому изображению MCD15A3H для территории России ставилось в соответствие одномоментное покрытие данными LAI, полученного по данным КМСС-2, соответствующее первому дню 4-дневного интервала.
 - ▶ Пары сравниваемых изображений были переведены в географическую проекцию с одинаковым размером пикселя ($0,004312^\circ$);
 - ▶ Облачность, тени, сбойные пиксели были исключены из сравнения с использованием флагов качества и масок мешающих факторов.
-

Оценка точности продукта LAI по КМСС

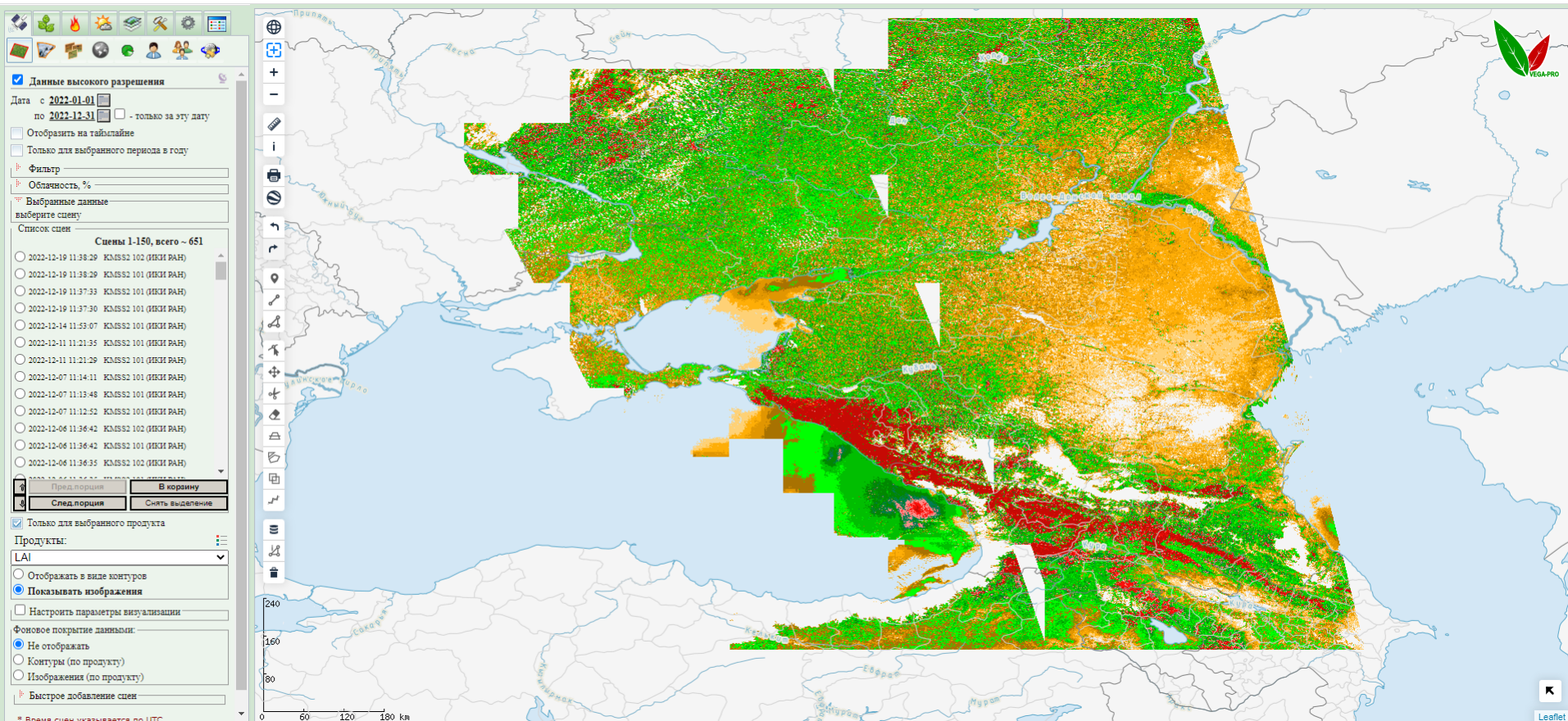


Метрика ошибок	Надирная схема	Разноугловая схема	MCD15A3H (4-дневный MODIS LAI)
RMSE	1,00428	1,00051	1,065
MAE	0,7102	0,7053	0,669
R ²	0,7203	0,7227	0,668

Временные серии LAI КМСС vs MCD15A3H



Пример покрытия продуктом LAI в VEGA



В настоящее время в ЦКП «ИКИ-Мониторинг» уже находится более 8000 гранул-дат LAI за 2022 год, информационный продукт доступен пользователям Vega-Science

Выводы

- ▶ Впервые описан метод дистанционной оценки индекса листовой поверхности LAI по данным прибора КМСС российской спутниковой системы Метеор-М с пространственным разрешением 60 метров.
 - ▶ Исследована эффективность двух различных геометрических схем наблюдения – классической надирной и характерной для прибора КМСС-М разноугловой с углами $\pm 8,67^\circ$. Несмотря на систематическое преимущество разноугловой схемы над классической надирной для всех рассчитанных метрик ошибок, модельные ошибки оценки LAI надирной и разноугловой схемами отличаются незначительно, при этом была достигнута достаточно высокая модельная точность оценки LAI: RMSE=1, MAE=0,705 и $R^2=0,722$.
 - ▶ На основе разработанного метода был впервые построен и исследован продукт LAI по данным КМСС-2 с разрешением 60 метров на территорию России за 2022 год.
 - ▶ Информационный продукт доступен для научных исследований в системах дистанционного мониторинга растительного покрова семейства Вега.
-



Российский
научный
фонд



Спасибо за внимание!

Исследование выполнено при поддержке РНФ, проект № 23-27-00412 «Развитие методов дистанционной оценки биофизических характеристик растительного покрова на основе российских спутниковых данных КМСС, модели переноса излучения и методов машинного обучения» с использованием ресурсов ЦКП «ИКИ-Мониторинг»