



**РАСЧЕТ АЭРОЗОЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ТОЛЩИНЫ НАД
СУШЕЙ ПО ДАННЫМ ПРИБОРА МСУ-ГС КОСМИЧЕСКОГО
АППАРАТА ЭЛЕКТРО-Л № 3**
(на конкурс)

Докладчик: к.т.н., Кучма Михаил Олегович

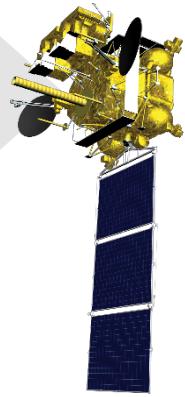
**Двадцать третья международная конференция
"СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА"**

г. Москва, 10 – 14 ноября 2025

Электро-Л № 3



Электро-Л № 3

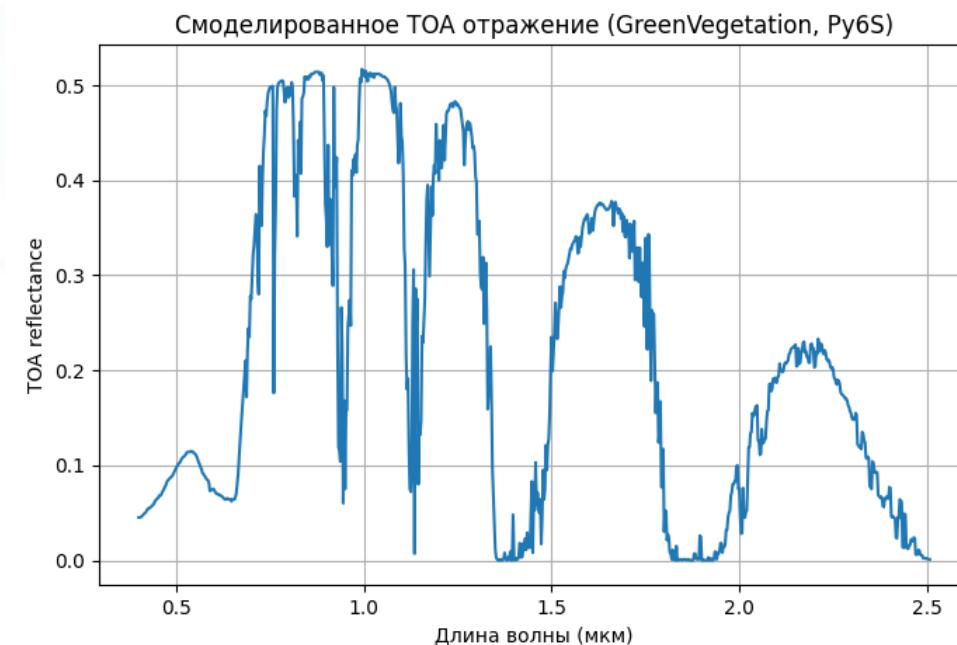
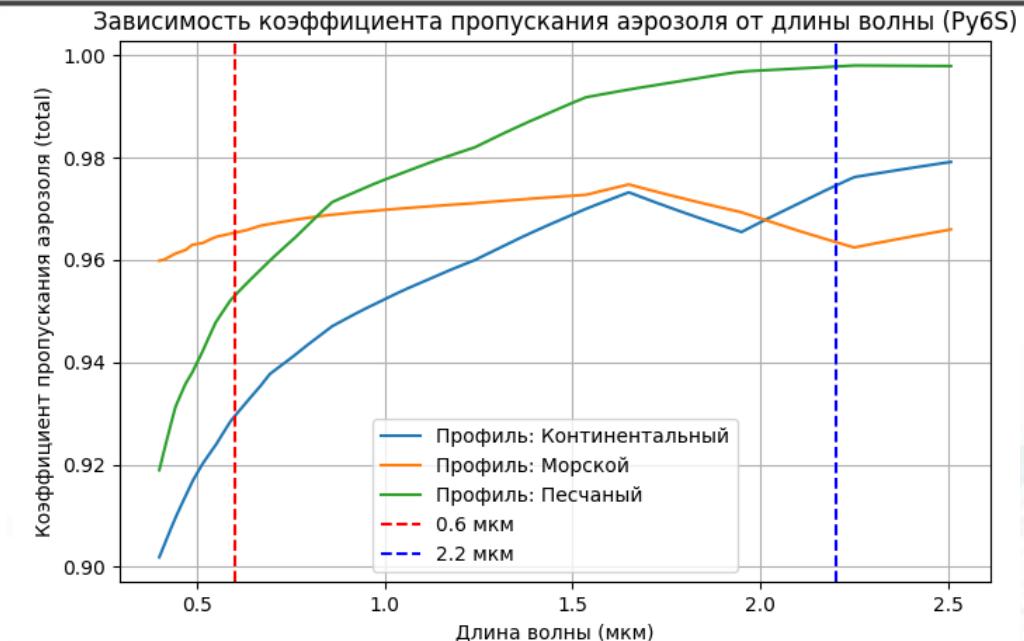
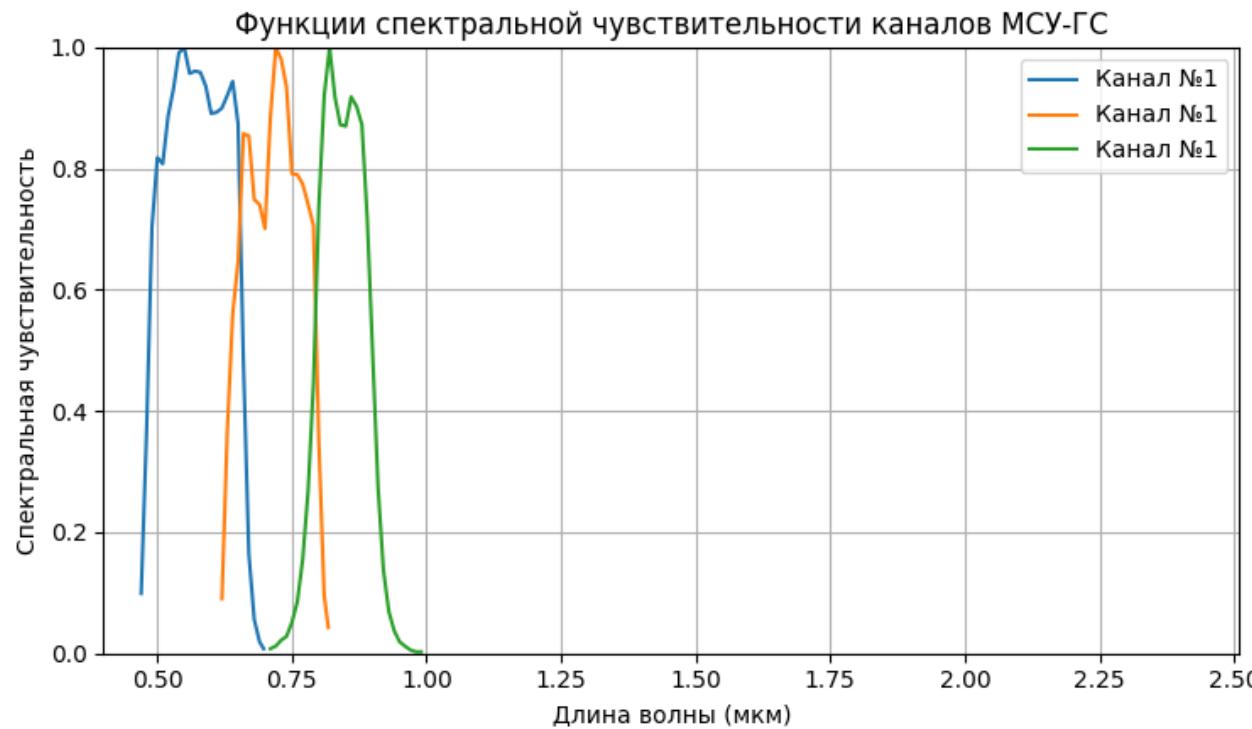


Параметр	Значение
Орбита	Геостационарная
Количество каналов МСУ-ГС	10
Спектральный диапазон, мкм	от 0.4 до 13
Разрешение (в надире): - ВИД-канал, км - ИК-канал, км	1 4
Частота съемки, мин: - обычный режим - учащенный режим	30 15
Масса спутника, кг	2094

Спектрорадиометр МСУ-ГС

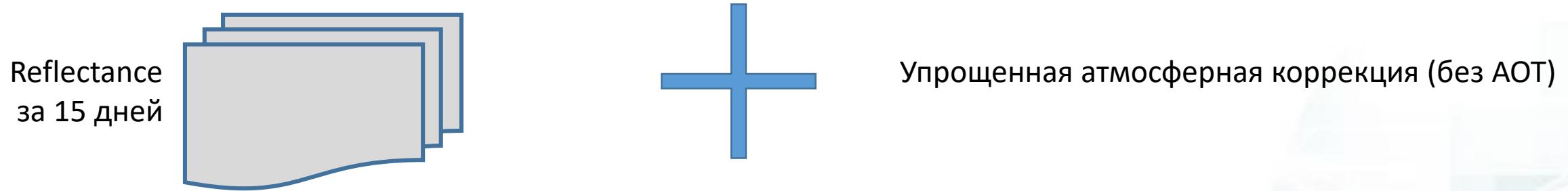
№ канала	Спектральный диапазон, мкм	Область применения
1	0.4 – 0.7	Детектирование облачности, слежение за облаками-трассерами для определения направления ветров, наблюдения аэрозоля.
2	0.6 – 0.8	
3	0.7 – 0.9	Детектирование облачности малых размеров.
4	3.4 – 4.4	Детектирование низкой облачности, туманов. Оценка температуры поверхности океанов (ТПО) и температуры поверхности суши (ТПС) в ночных условиях.
5	5.3 – 6.9	
6	7.0 – 8.9	Наблюдения полупрозрачной слоистой облачности.
7	8.1 – 9.7	
8	8.7 – 10.6	Мониторинг общего содержания озона, оценка скорости ветра в нижней тропосфере.
9	9.7 – 11.8	Оценка ТПО, ТПС, количества осажденной воды над океанами, слежение за облаками-трассерами для определения скорости и направления ветра, определения характеристик облачности.
10	10.6 – 13.0	

Особенности расчета АОТ



Используемая методика

1. Поиск минимального reflectance для каждого пикселя за 15 предыдущих дней



2. Сопоставление текущего reflectance и минимального reflectance для расчета АОТ

Hauser, A., Oesch, D., Foppa, N., Wunderle, S., (2005). AVHRR derived aerosol optical depth over land. *J. Geoph. Res.*, 110, doi:10.1029/2004JD005439.

Jolivet, D., Ramon, D., Bernard, E., Deschamps, P. Y., Riedi, J., Nicolas, J. M., & Hagolle, O. (2008, September). Aerosol monitoring over land using MSG/SEVIRI. In Proceeding of the EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, Darmstadt, Germany (pp. 8-12).

Упрощенная атмосферная коррекция

Поверхностное отражение (ρ_{ac}) :

$$\rho_{ac} = \frac{\frac{\rho_{TOA}(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v)}{Tg^{OG}(\theta_s, \theta_v) \cdot Tg_{O_3}(\theta_s, \theta_v, U_{O_3})} - [\rho_a(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v) - \chi\rho_r] \cdot Tg^{H_2O}\left(\theta_s, \theta_v, \frac{1}{2}U_{H_2O}\right) - \chi\rho_r}{T_a(\theta_s, \theta_v) \cdot Tg^{H_2O}(\theta_s, \theta_v, U_{H_2O}) \cdot [1 + S \cdot \rho'_{ac}]},$$

где:

ρ_{ac} – поверхностное отражение, без учёта атмосферных явлений;

$\rho_{TOA}(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v)$ – коэффициент отражения верхней части атмосферы (ТОА);

$Tg^{OG}(\theta_s, \theta_v)$ – газопроницаемость других газов (за исключением озона и водяного пара);

$Tg_{O_3}(\theta_s, \theta_v, U_{O_3})$ – газопроницаемость озона;

$\rho_a(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v)$ – отражательная способность атмосферы;

$Tg^{H_2O}(\theta_s, \theta_v, U_{H_2O})$ – газопроницаемость столба водяного пара;

$Tg^{H_2O}\left(\theta_s, \theta_v, \frac{1}{2}U_{H_2O}\right)$ – газопроницаемость половины столба водяного пара;

$\chi\rho_r$ – коэффициент отражения при Рэлеевском рассеянии;

$T_a(\theta_s, \theta_v) = T(\theta_s) \cdot T(\theta_v)$ – полный коэффициент пропускания атмосферы;

S – сферическое альбедо атмосферы;

ρ'_{ac} – частичное поверхностное отражение.

Упрощенная атмосферная коррекция

Частичное поверхностное отражение является приближением полной отражательной способности поверхности:

$$\rho'_{ac} = \frac{\frac{\rho_{TOA}(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v)}{Tg^{OG}(\theta_s, \theta_v) \cdot Tg_{O_3}(\theta_s, \theta_v, U_{O_3})} - [\rho_a(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v) - \chi \rho_r] \cdot Tg^{H_2O}(\theta_s, \theta_v, \frac{1}{2}U_{H_2O}) - \chi \rho_r}{T_a(\theta_s, \theta_v) \cdot Tg^{H_2O}(\theta_s, \theta_v, U_{H_2O})}$$

Для получения компонент можно использовать формулы с эмпирически выведенными коэффициентами.

Например, для расчета коэффициента пропускания водяного пара может использоваться следующее приближение:

$$Tg_{H_2O} = e^{-AMF \cdot \tau_{H_2O}}$$

где AMF – относительная воздушная масса в обоих направлениях от верхних слоев атмосферы и обратно (в случае надира принимается как единица); τ_{H_2O} – оптическая толщина водяного пара для определенной длины волны, которая выражается как:

$$\tau_{H_2O} = c_{0,\lambda} + c_{1,\lambda} u_{H_2O} + c_{2,\lambda} u_{H_2O}^2$$

где u_{H_2O} – общее содержание водяного пара в столбе атмосферы в мм, с – коэффициенты, полученные эмпирическим путем для определенной длины волны.

Генерирование LUT

Водяной пар

```
s=SixS()
s.altitudes.set_sensor_satellite_level()
s.aero_profile = AeroProfile.PredefinedType(AeroProfile.NoAerosols)
s.geometry = Geometry.User()
s.geometry.solar_a = 0
s.geometry.view_a = 0
s.wavelength = Wavelength(wave_start, wave_end, spectr)
s.geometry.solar_z = s_z
s.geometry.view_z = view_z
s.altitudes.set_target_custom_altitude(alt)
s.atmos_profile = AtmosProfile.UserWaterAndOzone(wat, 0.0)
s.run()
return round(s.outputs.transmittance_water.total, 8)
```

Другие газы

```
s=SixS()
s.altitudes.set_sensor_satellite_level()
s.aero_profile = AeroProfile.PredefinedType(AeroProfile.NoAerosols)
s.geometry = Geometry.User()
s.geometry.solar_z = 0
s.geometry.solar_a = 0
s.geometry.view_a = 0
s.wavelength = Wavelength(wave_start, wave_end, spectr)
s.geometry.solar_z = s_z
s.geometry.view_z = view_z
s.altitudes.set_target_custom_altitude(alt)
s.atmos_profile = AtmosProfile.UserWaterAndOzone(0.0, 0.0)
s.run()
transm_og = s.outputs.trans['co2'].total * \
           s.outputs.trans['oxygen'].total * \
           s.outputs.trans['no2'].total * \
           s.outputs.trans['ch4'].total * \
           s.outputs.trans['co'].total
return round(transm_og, 8)
```

Озон

```
s=SixS()
s.altitudes.set_sensor_satellite_level()
s.aero_profile = AeroProfile.PredefinedType(AeroProfile.NoAerosols)
s.geometry = Geometry.User()
s.geometry.solar_z = 0
s.geometry.solar_a = 0
s.geometry.view_a = 0
s.wavelength = Wavelength(wave_start, wave_end, spectr)
s.geometry.solar_z = s_z
s.geometry.view_z = view_z
s.altitudes.set_target_custom_altitude(alt)
s.atmos_profile = AtmosProfile.UserWaterAndOzone(0.0, ozone)
s.run()
return round(s.outputs.transmittance_ozone.total, 8)
```

Пропускание атмосферы

```
s=SixS()
s.altitudes.set_sensor_satellite_level()
s.atmos_profile = AtmosProfile.PredefinedType(AtmosProfile.NoGaseousAbsorption)
s.geometry = Geometry.User()
s.geometry.solar_a = 0
s.geometry.view_a = 0
s.wavelength = Wavelength(wave_start, wave_end, spectr)
s.geometry.solar_z = s_z
s.geometry.view_z = view_z
s.altitudes.set_target_custom_altitude(alt)
s.aero_profile = AeroProfile.PredefinedType(aero_profile)
s.run()
absorb = s.outputs.trans['global_gas'].total      # absorption transmissivity
scatter = s.outputs.trans['total_scattering'].total # scattering transmissivity
tau = absorb*scatter # total atmospheric transmission
return round(tau, 8)
```

Расчет коэффициентов пропускания

$$\tau_{H_2O} = \left(c_0 \cdot (c_1 + A)^2 + c_2 \cdot (c_3 + A) + c_4 \right) \cdot \left(c_5 \cdot (c_6 + u_{H_2O})^2 + c_7 \cdot (c_8 + u_{H_2O}) \right) \cdot \left((c_9 + \theta) \cdot c_{10} - c_{11} \right)$$

$$\tau_{O_3} = \left(c_0 \cdot (c_1 + u_{O_3})^2 + c_2 \cdot (u_{O_3} \cdot c_3 \cdot (\theta + c_4)) + c_5 \right) \cdot (c_6 \cdot A)$$

$$\tau_a = \left(c_{0,Atm} \cdot (c_{1,Atm} + \theta^2) + c_{2,Atm} \cdot (c_{3,Atm} + \theta) + c_{4,Atm} \right) \cdot c_{5,Atm} \cdot \left(c_{8,Atm} \cdot (c_{9,Atm} + A) \right) \cdot c_{10,Atm}$$

$$\tau_{OG} = (\theta + c_0) \cdot c_1 \cdot (c_2 \cdot A + (c_3 \cdot A)^2 + c_4)$$

$$\tau_{Rayleigh} = c_0 + c_1 \theta_{rel} + c_2 \theta_{rel}^2 + c_3 \theta_{sat} + c_4 \theta_{sat}^2 + c_5 \theta_{sun} + c_6 \theta_{sun}^2 + c_7 A + c_8 A^2$$

где:

A – косинус высоты поверхности (в км);

$$\Theta = \frac{1}{\cos(\theta_s)} + \frac{1}{\cos(\theta_v)};$$

Atm – тип аэрозоля: континентальный, морской, песчаный

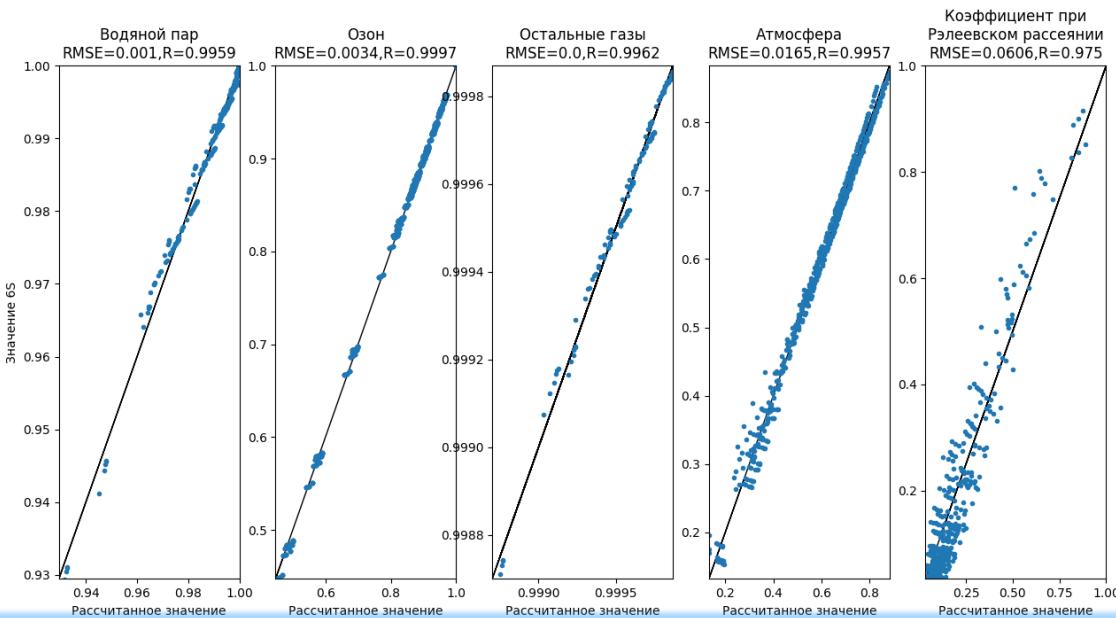
Для расчета τ моделируется LUT с помощью Py6S для конкретного канала МСУ-ГС

Расчет одной LUT занимает не более 30 минут, поскольку используется необходимый минимум набора значений

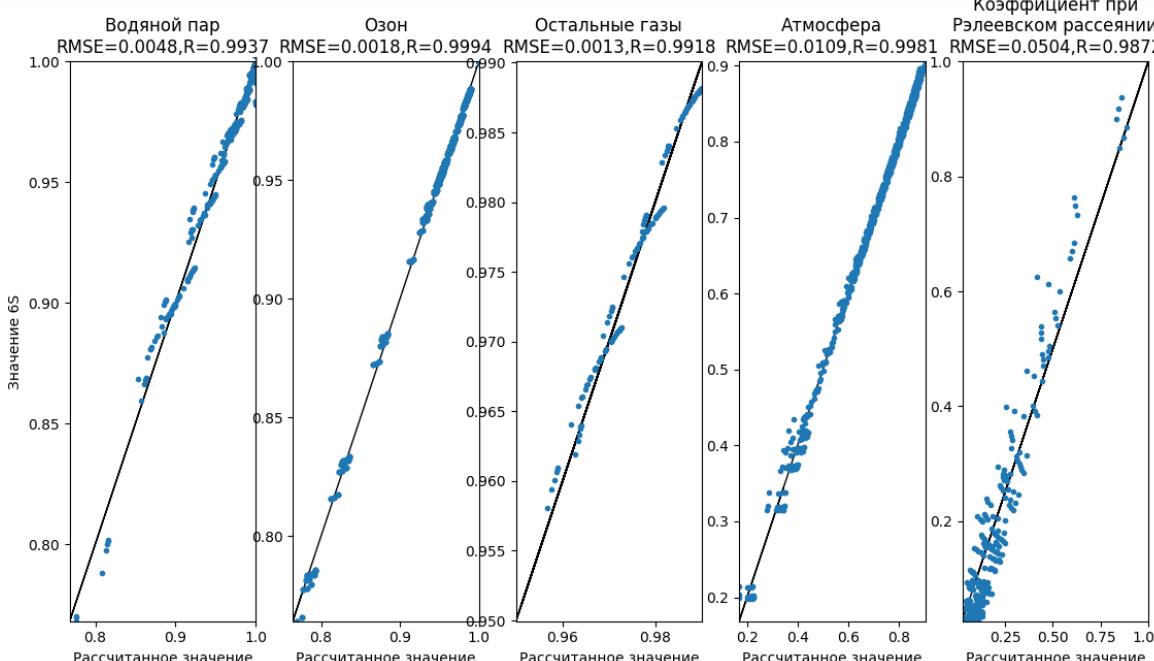
Коэффициенты «с» рассчитываются методом наименьших квадратов

Расчет коэффициентов пропускания

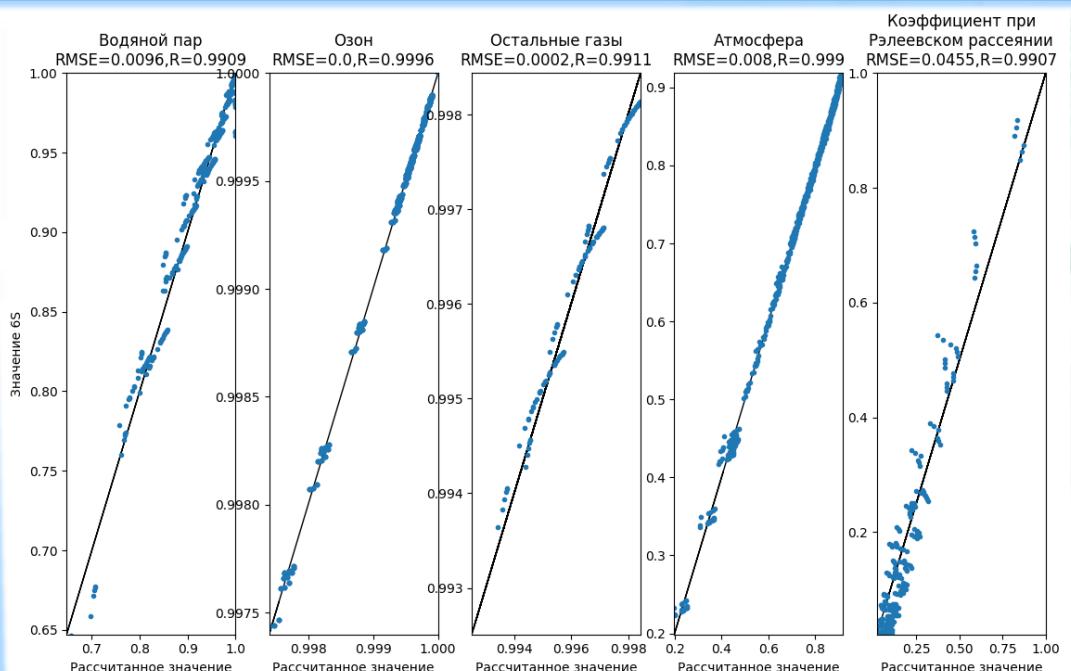
Канал № 1



Канал № 2



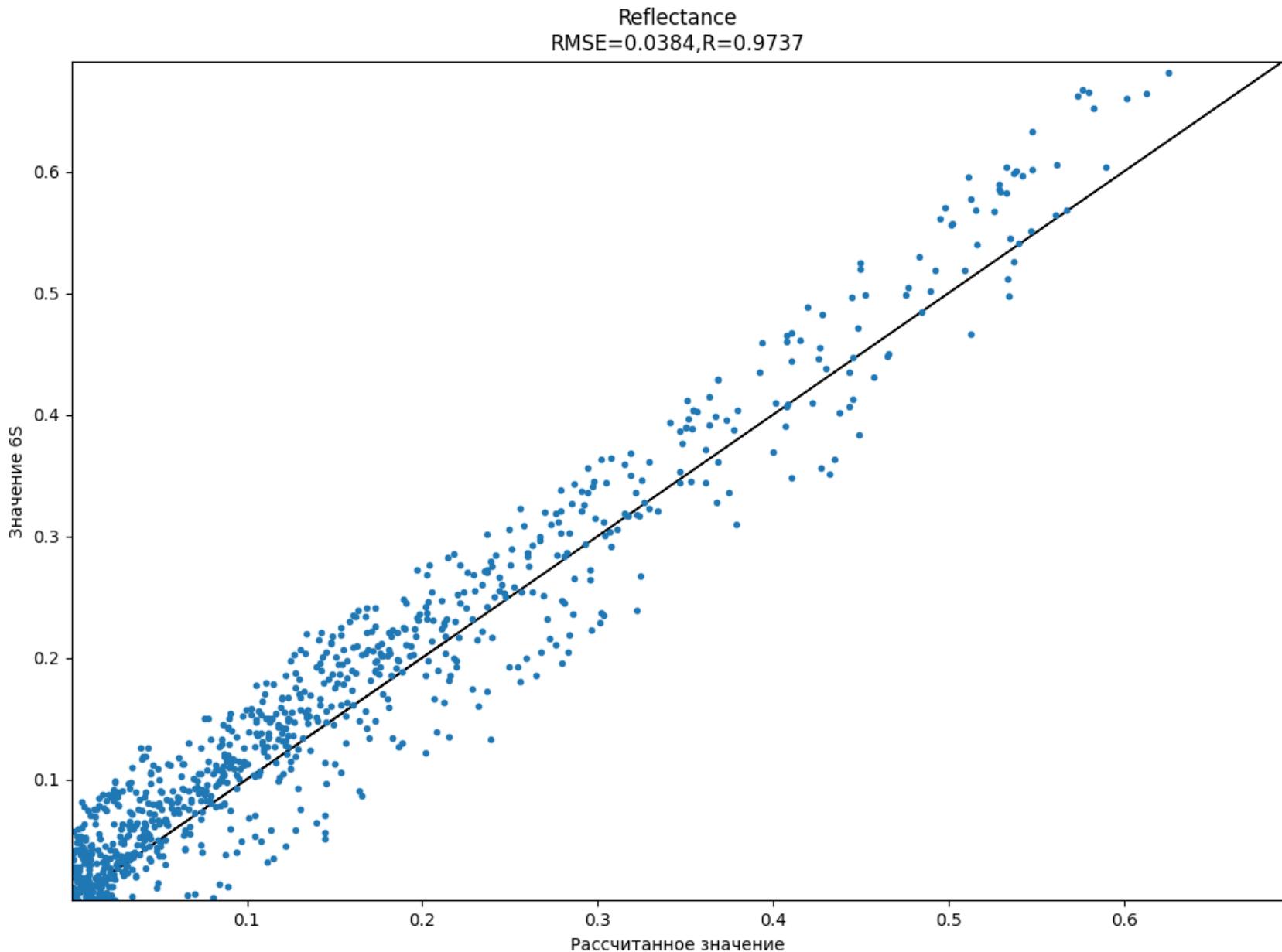
Канал № 3



Верификация расчета

Отбрано 1000
случайных точек
реального снимка
МСУ-ГС за период с
апреля по август
2025 года

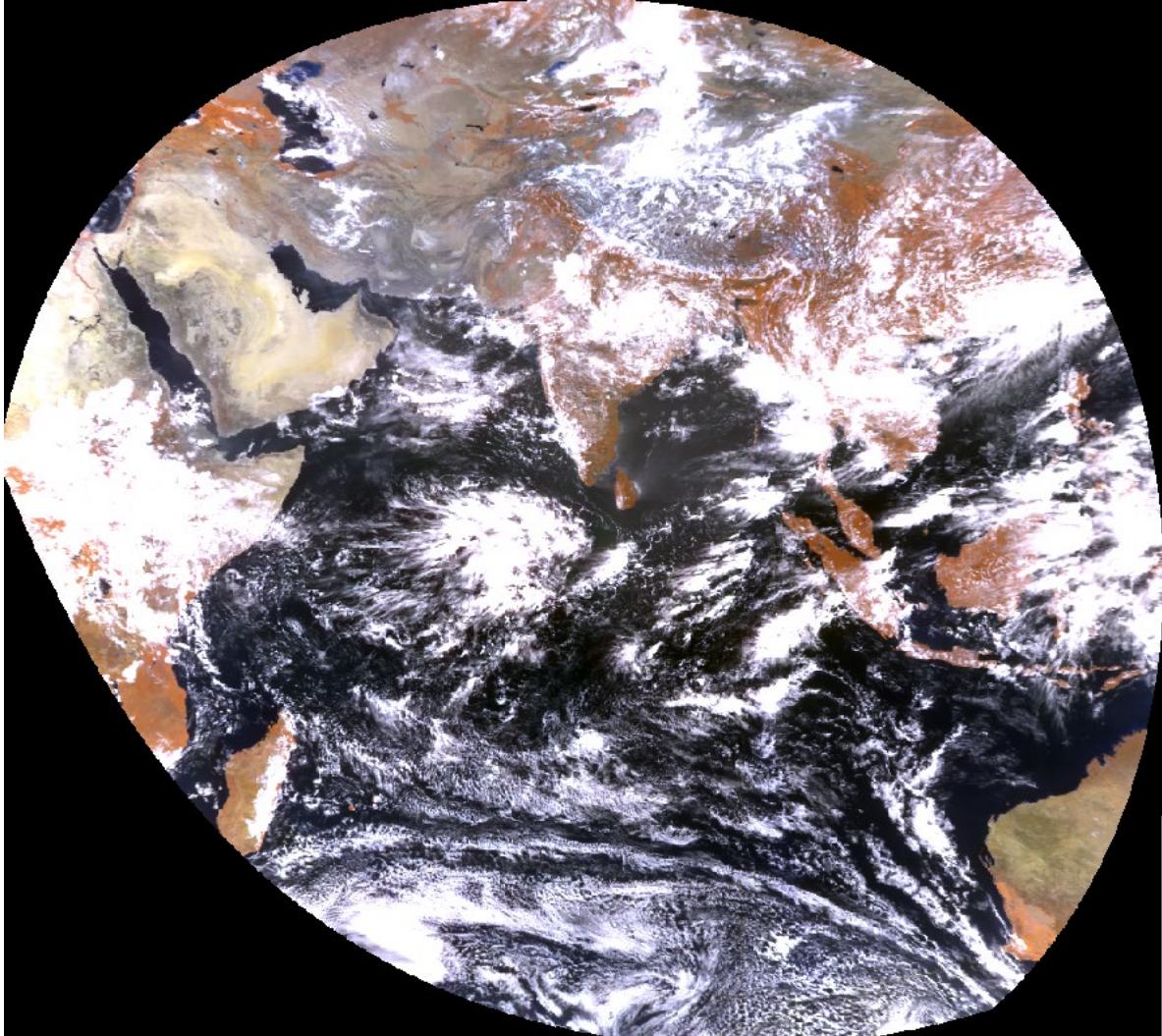
Сравнение
проводится по
данным прямого
моделирования с
помощью 6S



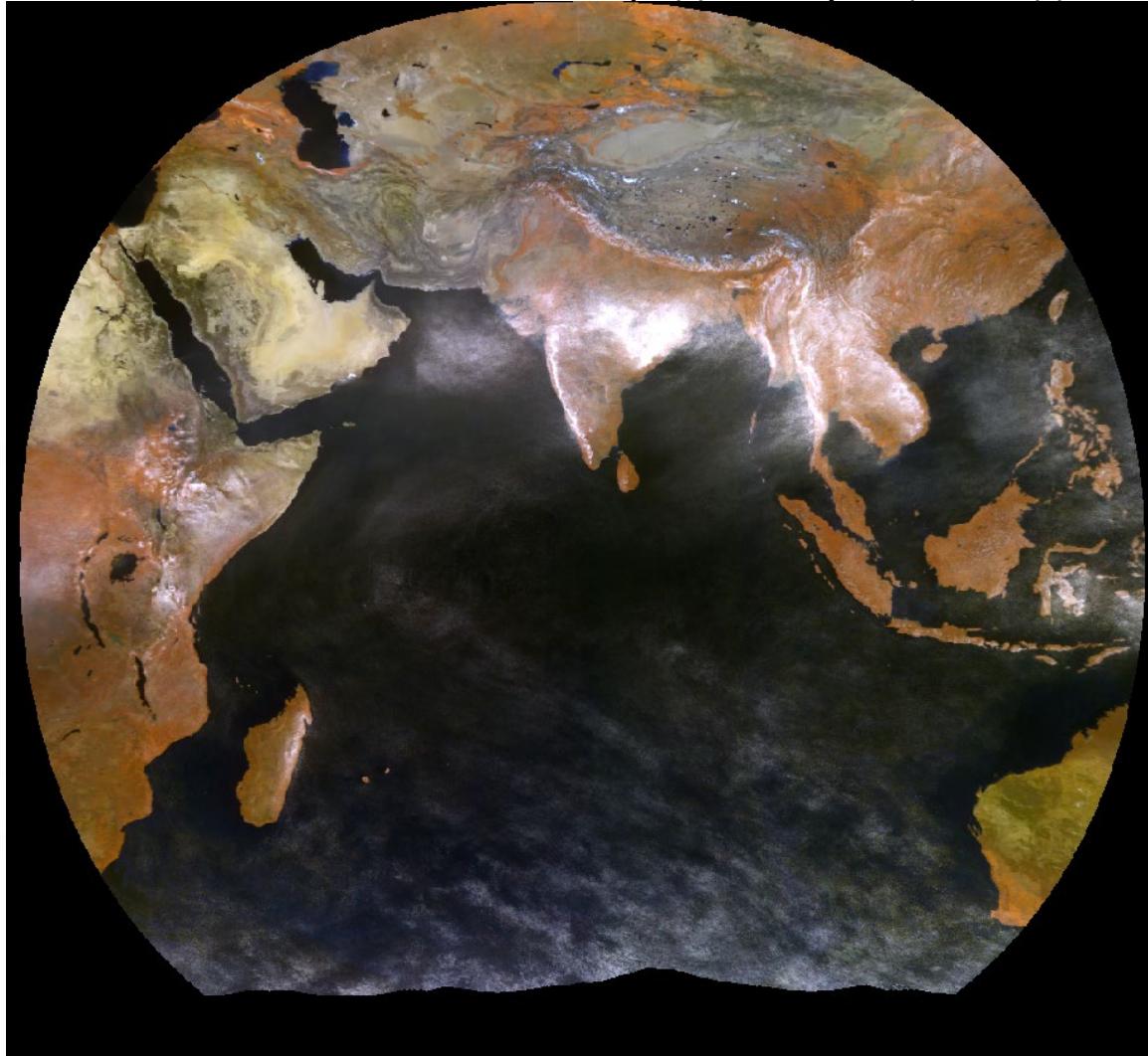
Упрощенная атмосферная коррекция

Результирующее разрешение – 0.1°

Текущий reflectance. 2025.07.11 06:00 UTC



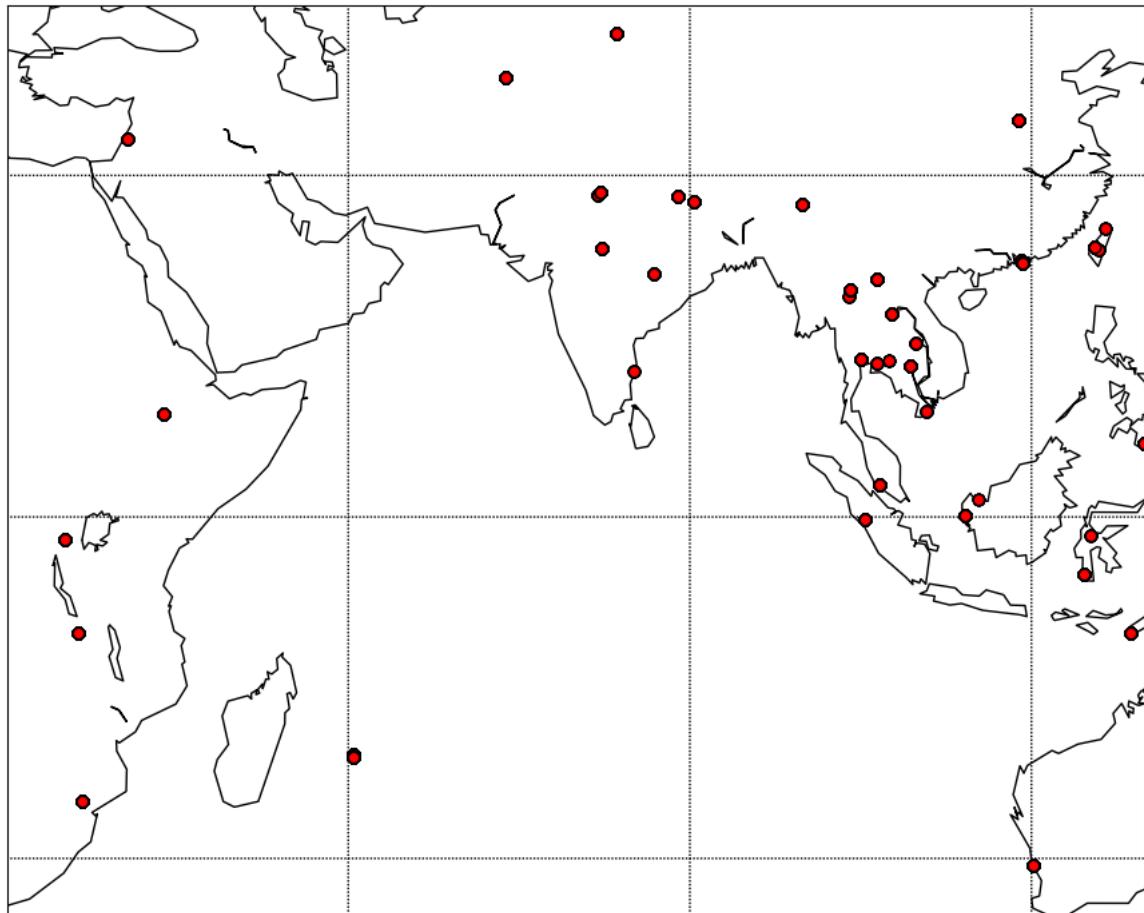
Минимальный reflectance за предшествующие 15 дней



Каждый пиксель определяется как 7-й перцентиль минимальных значений reflectance после упрощённой атмосферной коррекции

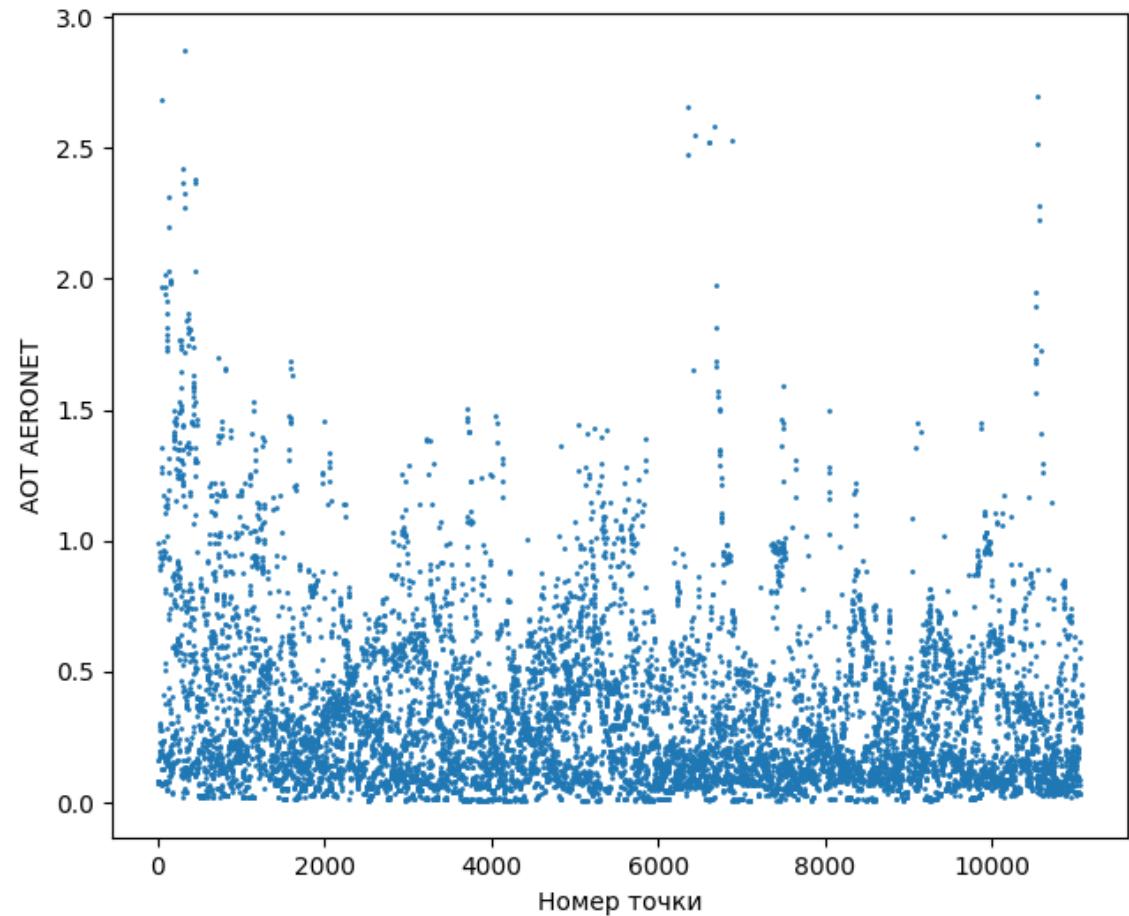
Данные AERONET

Расположение используемых станций



- 42 станций AERONET
- Период: с 01.04.2025 по 15.09.2025
- Количество измерений: 11076

Распределение значений АОТ



Алгоритм расчета АОТ

Тестируемые методы МО из библиотеки sklearn :

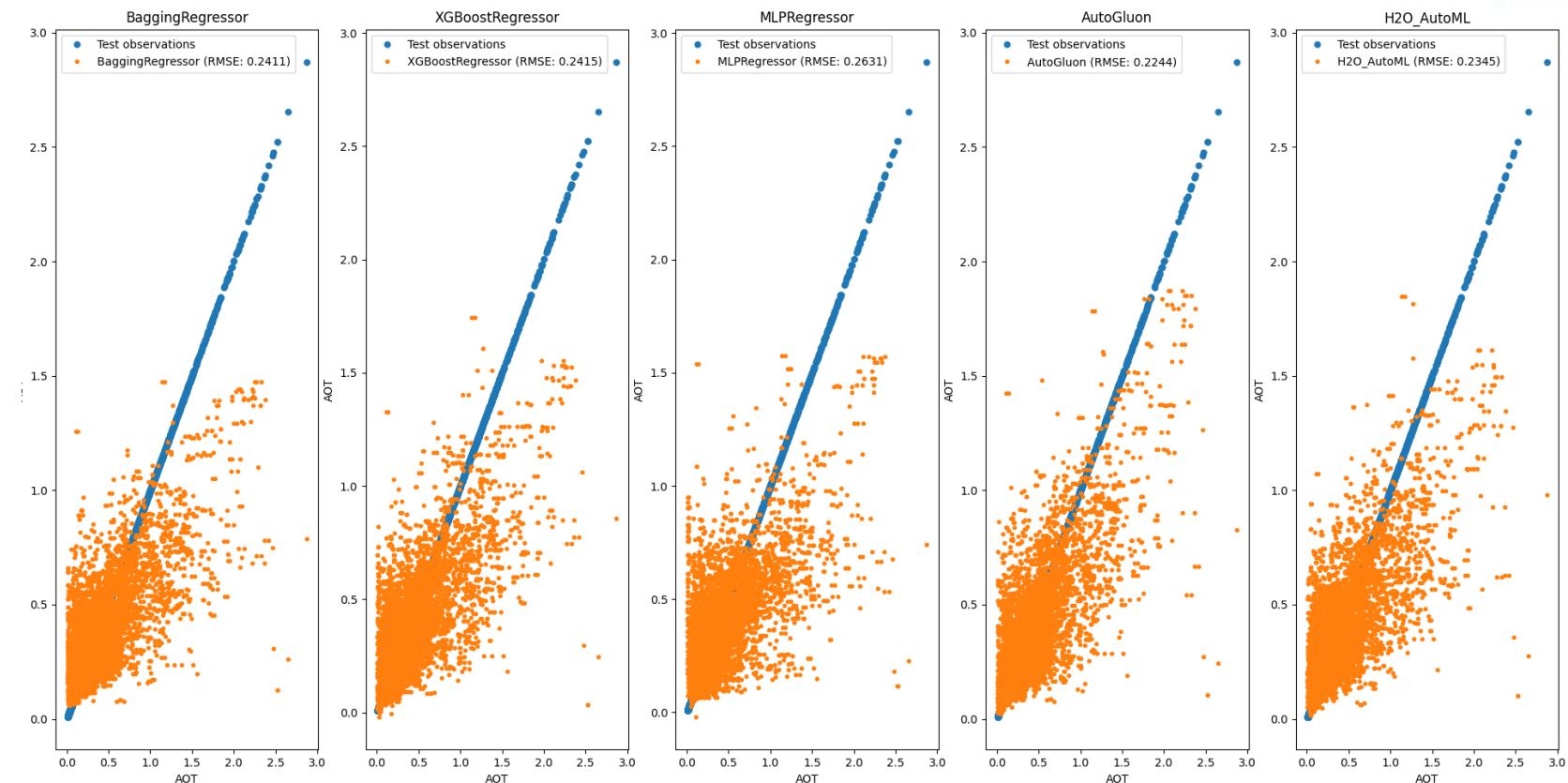
- DecisionTreeRegressor
- RandomForestRegressor
- GradientBoostingRegressor
- AdaBoostRegressor
- BaggingRegressor
- ExtraTreesRegressor
- SVR
- HistGradientBoostingRegressor
- MLPRegressor

Тестируемые библиотеки МО:

- XGBoost
- CatBoost
- AutoGluon
- H2O

- Тип аэрозоля: континентальный
- Деление выборки: каждый третий день уходит в тестовую выборку

Результаты валидации на тестовой выборке



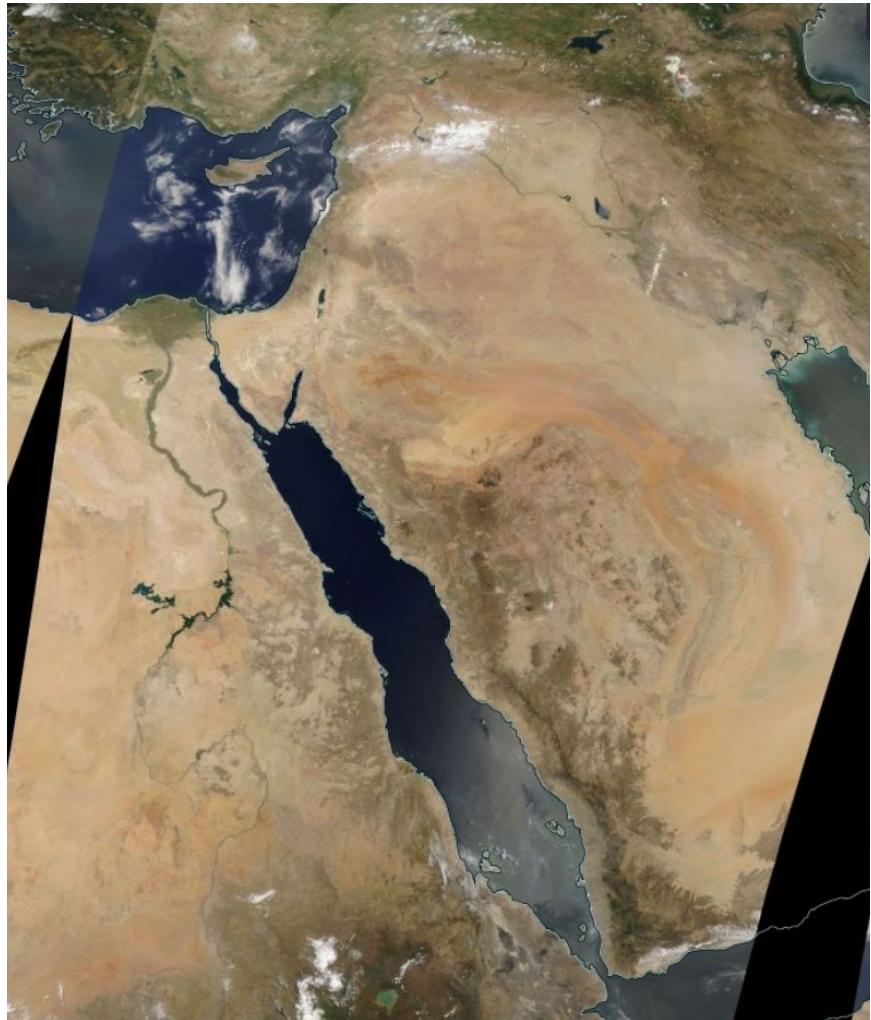
Итоговый алгоритм: получен с помощью библиотеки AutoGluon (RMSE = 0.2244, R=76.54%)

ExtraTrees * 0.5 + NeuralNetFastAI * 0.286 + CatBoost * 0.214

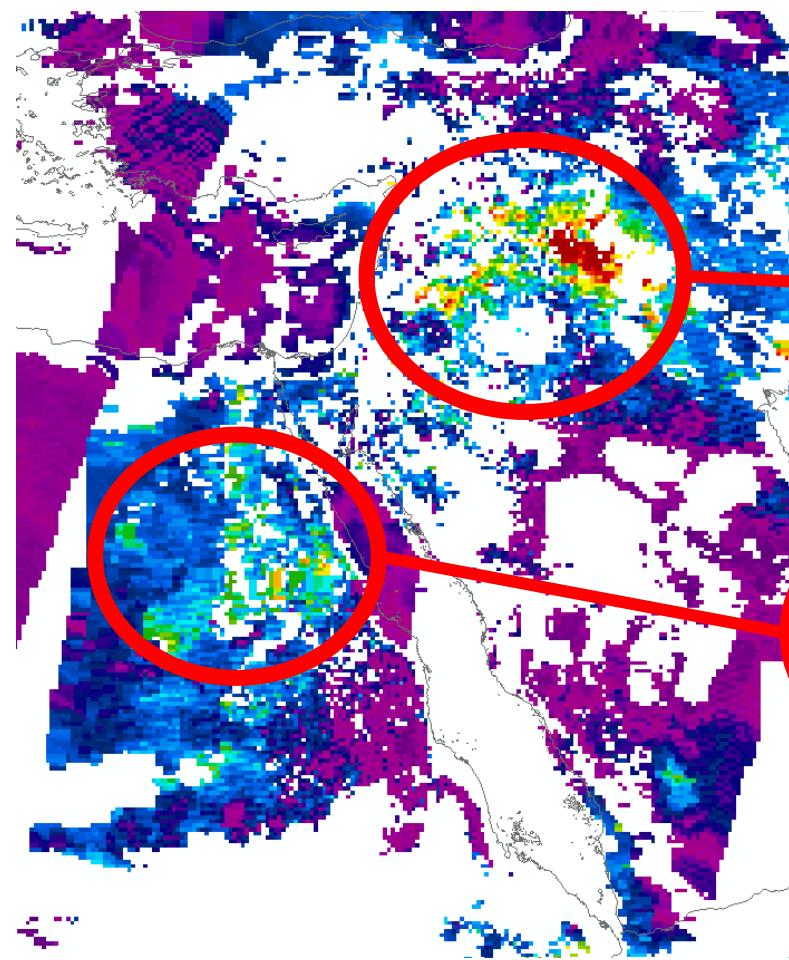
Визуальное сравнение с MODIS

2025.06.11

Изображение с
worldview.earthdata.nasa.gov



АОТ по данным MODIS

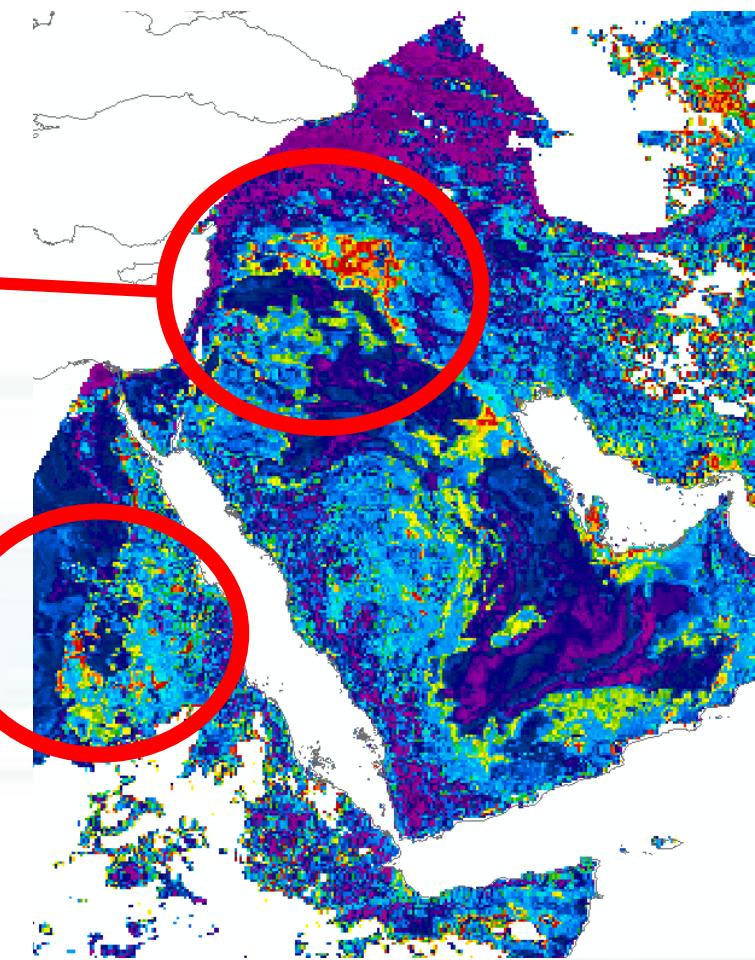


0

0,5

1

АОТ по данным МСУ-ГС



Планы

1. Валидация на большем временном промежутке, уточнение используемого метода расчета АОТ
2. Адаптация к данным других отечественных аппаратов (ЭлектроЛ № 4, Арктика-М № 1, Арктика-М № 2, Метеор-М № 2-4)
3. Атмосферная коррекция данных Арктика-М № 1,2 и ее валидация на полигоне RadCalNet в Северной Америке - Railroad Valley Playa (который посчитан усреднением на 1x1 км)
4. Построение композитов NDVI -> Расчет типов подстилающей поверхности (аналог продукта по MODIS - MCD12)
5. Расчет Emissivity только на собственных данных, без использования карт MCD12
6. Расчет температуры подстилающей поверхности

Заключение

В ходе исследования разработан автоматический алгоритм по расчету АОТ над сушей по данным Электро-Л № 3 С применением аналитических формул и методов машинного обучения, не уступающий по точности зарубежным аналогам



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

Дальневосточный центр ФГБУ «НИЦ «Планета»
Россия, г. Хабаровск, ул. Ленина, д. 18
тел.: +7-(4212) 21-43-11
факс: +7-(4212) 21-40-07
e-mail: m.kuchma@dvrcpod.ru
<https://www.dvrcpod.ru>