



*Катковский Л.В., Мартинов А.О., Станчик В.В.*

# **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ ТОЛЩИНЫ АТМОСФЕРЫ И ОЦЕНКА КОНЦЕНТРАЦИИ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ**

Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» Белорусского государственного университета, г. Минск, Беларусь



**Предложена методика обработки спектров и изображений, регистрируемых с борта МКС или спутниковыми сенсорами, предназначенная для оперативного оценки значений аэрозольной оптической толщины (АОТ) и на ее основе - количественной оценки загрязнения атмосферы аэрозольными частицами**

Наиболее важными факторами, влияющими на точность определения аэрозолей по космическим изображениям и спектрам, являются:

1. Выбор аэрозольной модели атмосферы
2. Определение отражательной способности поверхности, включая спектральные зависимости.



# МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ АОТ и КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ОЦЕНОК ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ АЭРОЗОЛЬНЫМИ ЧАСТИЦАМИ ПО СПЕКТРАМ ВИДЕОСПЕКТРАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ (ВСС) С БОРТА МКС



Съемка с  
помощью  
ВСС  
поверхности  
Земли

Пересчет  
спектров ВСС  
в СПЭЯ на  
основании  
данных  
лабораторных  
предполетных  
калибровок

Проведение  
атмосферной  
коррекции всех  
выбранных  
спектров ВСС,  
определение  
спектральных  
альbedo  
поверхности

Выбор 2-х  
контрастных  
спектров  
(областей  
интереса)  
СПЭЯ ВСС и  
вычисление  
их разности  
 $V_{изм}$  при  
известных  
спектральных  
альbedo

Усреднение  
найденных в  
результате  
атмосферной  
коррекции  
альbedo по  
выбранным  
спектрам  
(областям  
интереса)

Расчет  
средней  
освещенности  
поверхности по  
аналитической  
формуле с  
использованием  
среднего по  
областям  
интереса  
альbedo

Нахождение  
АОТ (на 550 нм)  
и показателя  
Ангстрема,  
других  
параметров  
атмосферы  
методом МНК

Определение  
массовой  
концентрации  
твердых частиц  
аэрозоля с  
диаметром до  
2,5 мкм по  
значениям АОТ и  
регрессионным  
зависимостям

**Методика основана на аналитическом представлении разности яркостей двух близко расположенных пикселей (или двух однородных областей интереса) различных по отражению поверхностей, в основе которого лежат модель атмосферы и аналитические формулы для спектра уходящего излучения  $B_\lambda(\mu, \mu_0, \varphi)$**

$$(1) \quad B_\lambda(\mu, \mu_0, \varphi) = \left[ B_{\text{atm } \lambda}(\mu, \mu_0, \varphi) + \rho_\lambda E_\lambda(\mu_0, \rho_\lambda) T_\lambda(\mu) \right] T_{g\lambda}$$

$B_{\text{atm } \lambda}(\mu, \mu_0, \varphi)$  - спектральная яркость атмосферной дымки (соответствует равному нулю альбедо поверхности),

$\rho_\lambda$  - спектральное альбедо (КСЯ) исследуемой подстилающей поверхности,

$E_\lambda(\mu_0, \rho_\lambda)$  - спектральная освещенность поверхности Земли Солнцем (поток вниз на нижней границе атмосферы), зависящая от альбедо поверхности и косинуса зенитного угла Солнца,

$T_\lambda(\mu)$  - полное пропускание атмосферы от поверхности к космическому сенсору без учета пропусканий в полосах поглощения газов,

$T_{g\lambda}$  - пропускание в полосах поглощения атмосферных газов (водяной пар, кислород, озон)

Единственным условием работы предлагаемого метода определения АОТ является априорное задание КСЯ (или спектральных альбедо) двух выбранных пикселей, что обеспечивает повышение точности определения АОТ по сравнению с ее определением в методах атмосферной коррекции, поскольку из полученного аналитического выражения ищется только АОТ (меньшее число неизвестных параметров), и указанное выражение разности яркостей двух пикселей не содержит вклада в регистрируемую яркость атмосферной дымки (она сокращается), который трудно аппроксимировать с высокой точностью.

Вычисляем разность спектров (СПЭЯ) двух выбранных контрастных пикселей (площадок)  $i$  и  $j$  (исходных СПЭЯ, измеренных спутниковым сенсором или видеоспектральной системой (ВСС) с борта МКС), получаем разностный спектр (опускаем известные угловые переменные):

$$(2) \quad B_{ij\lambda}^{\text{ИЗМ}} = B_{i\lambda}^{\text{ИЗМ}} - B_{j\lambda}^{\text{ИЗМ}}$$

На основании уравнения (1) теоретическое выражение, соответствующее (2), (целевая функция), имеет вид):

$$(3) \quad B_{ij\lambda}^{\text{теор}} = \frac{1}{\pi} E_{\lambda}(\rho_{e\lambda}) T_{\lambda}^{\text{dir}} [\rho_{i\lambda} - \rho_{j\lambda}] T_{g\lambda} = \frac{1}{\pi} E_{\lambda}(\rho_{e\lambda}) \exp(-\tau_{\lambda}/\mu) [\rho_{i\lambda} - \rho_{j\lambda}] (T_{\text{H}_2\text{O}\lambda}^0)^{m_2} T_{\text{O}_2\lambda} T_{\text{O}_3\lambda}$$

Особенностью разностного спектра (3) является его независимость от вклада яркости атмосферной дымки (1)  $B_{\text{atm}\lambda}(\mu, \mu_0, \varphi)$  в регистрируемую из космоса яркость. Полное пропускание атмосферы  $T_{\lambda}(\mu)$  приближенно заменено прямым,  $\exp(-\tau_{\lambda}/\mu)$ ,  $\tau_{\lambda}$  - полная спектральная оптическая толщина, а освещенность вычисляется формулой

$$(4) \quad E_{\lambda} \equiv \frac{4\omega_{\lambda}}{4 + 3(1-g)(1-\rho_{e\lambda})\tau_{\lambda}} \left[ \left( \frac{1}{2} + \frac{3}{4}\mu_0 \right) + \left( \frac{1}{2} - \frac{3}{4}\mu_0 \right) \exp\left(-\frac{\tau_{\lambda}}{\mu_0}\right) \right] + (1-\omega_{\lambda}) \exp(-\tau_{\lambda}/\mu_0)$$

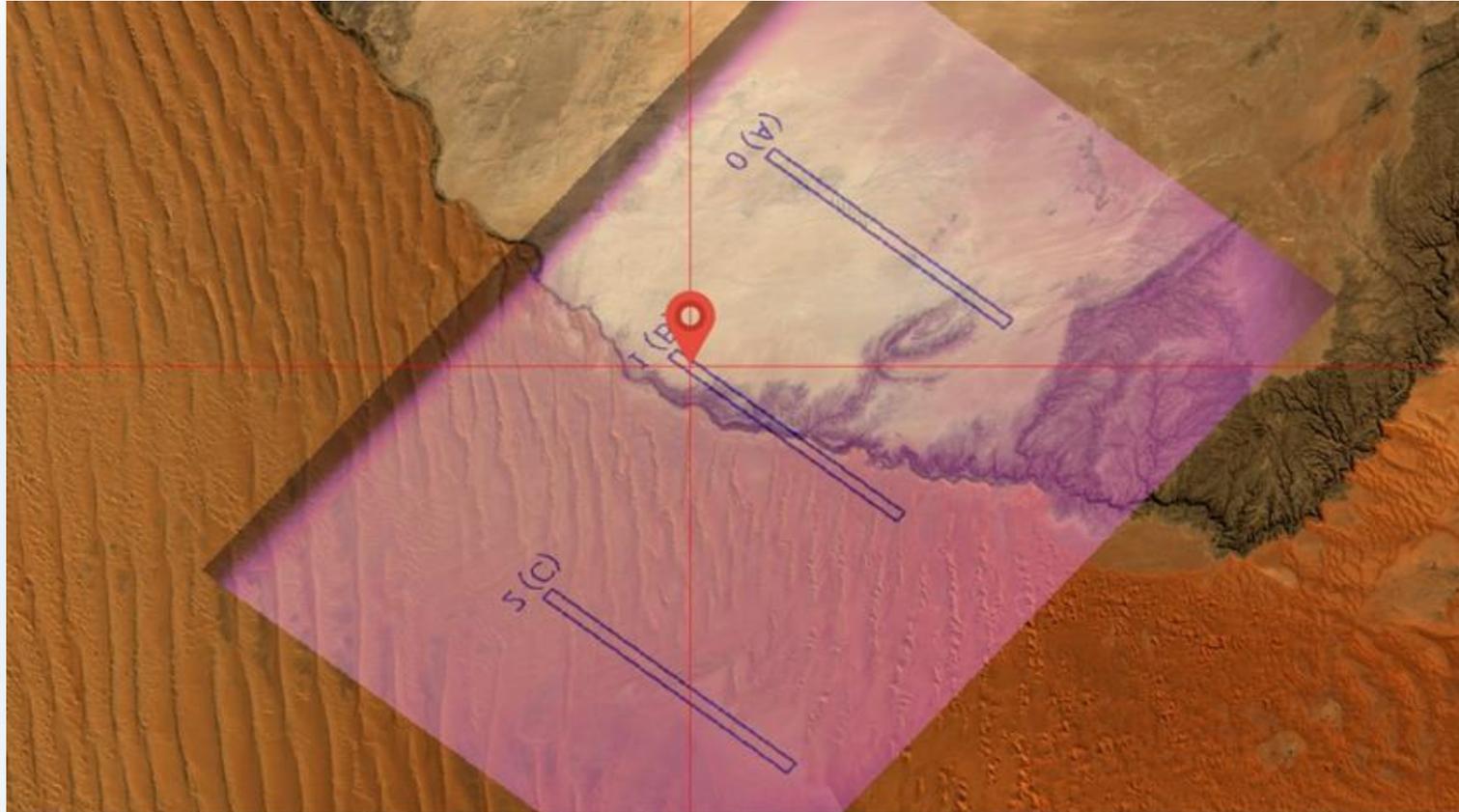
Здесь  $\mu_0$ ,  $\mu$  – косинусы зенитных углов Солнца и наблюдения,  $\omega_{\lambda}$  – альбедо однократного рассеяния,  $g$  – средний косинус индикатрисы

КСЯ двух указанных пикселей  $\rho_{i\lambda}$  и  $\rho_{j\lambda}$  могут быть известны на основании априорных наземных или (аэрокосмических) измерений, если, например, используются стандартные поверхности с известными отражательными характеристиками.

При отсутствии таких априорных данных о КСЯ пары объектов на обрабатываемом изображении на первом этапе метода выполняется быстрая процедура атмосферной коррекции 1\*, найденные на основе которой КСЯ используются в рамках предлагаемого метода для нахождения АОТ.

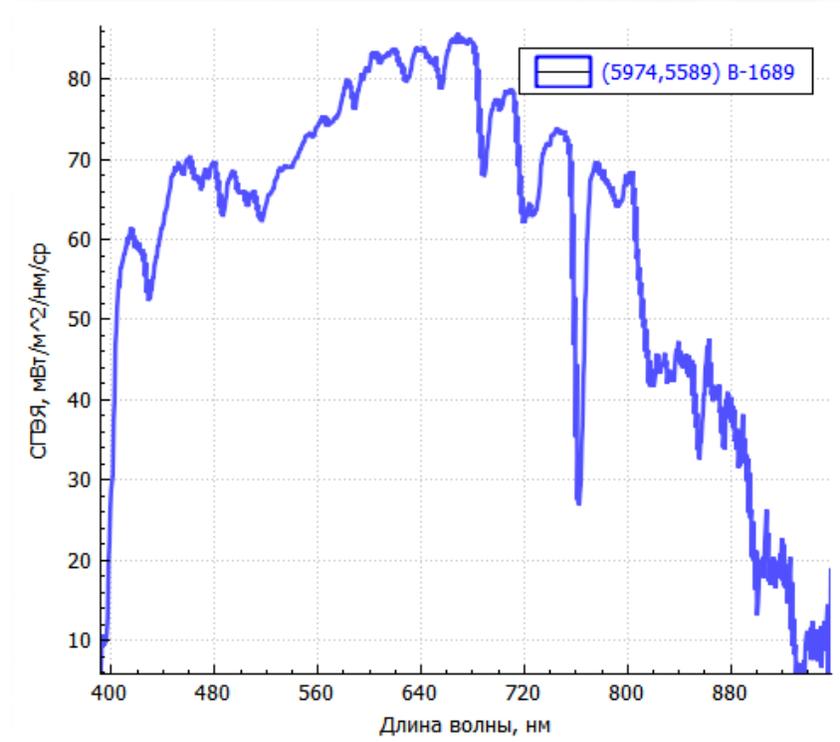
1\* Katkovsky, L.V.; Martinov, A.O.; Siliuk, V.A.; Ivanov, D.A.; Kokhanovsky, A.A. Fast Atmospheric Correction Method for Hyperspectral Data. Remote Sens. 2018, 10, 1698.

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ К СПЕКТРАМ ВИДЕОСПЕКТРАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ (ВСС), ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫМ С БОРТА МКС

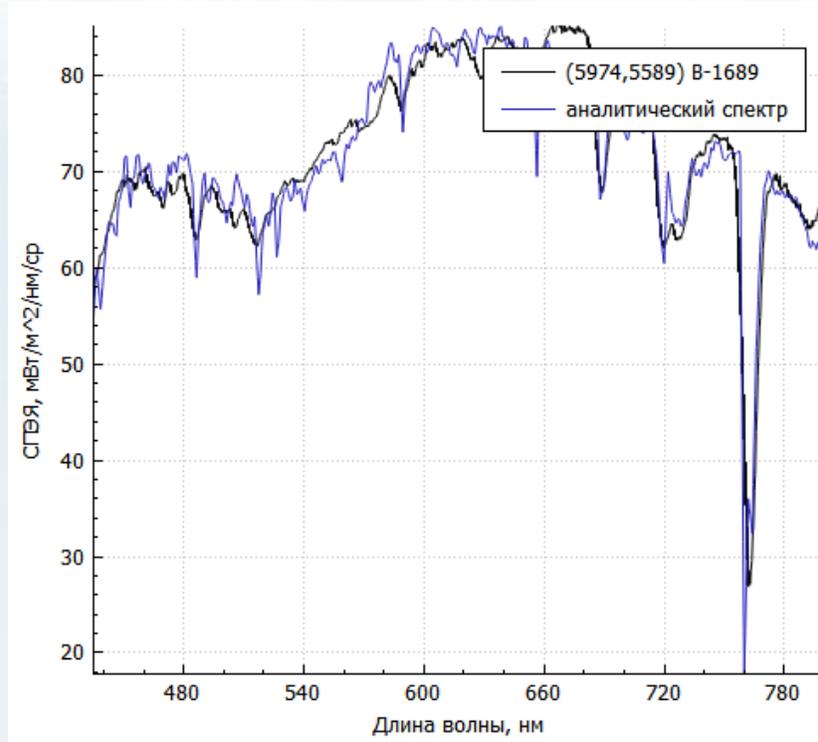


Наложение снимка ВСС (розовый цвет) на карту, а также положение полигона RadCalNet Гобабеб (красная метка)  
Узкие прямоугольники – поля зрения трех спектрометров ВСС. Полигон Гобабеб попал в поле зрения второго спектрометра ВСС.

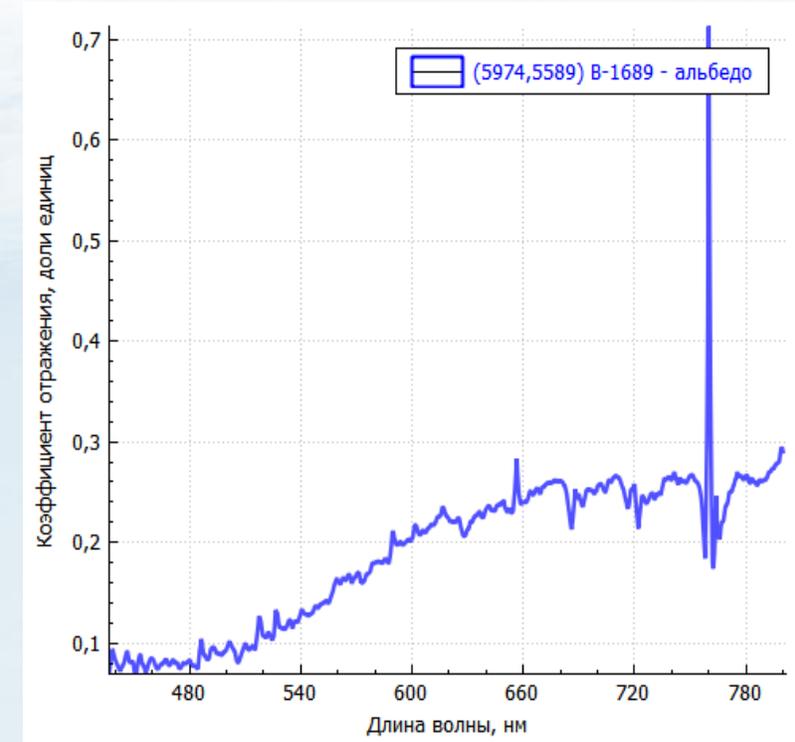
# АТМОСФЕРНАЯ КОРРЕКЦИЯ СПЕКТРОВ ВСС



Спектр СПЭЯ ВСС, соответствующий полигону Гобабеб, полученный после радиометрической коррекции

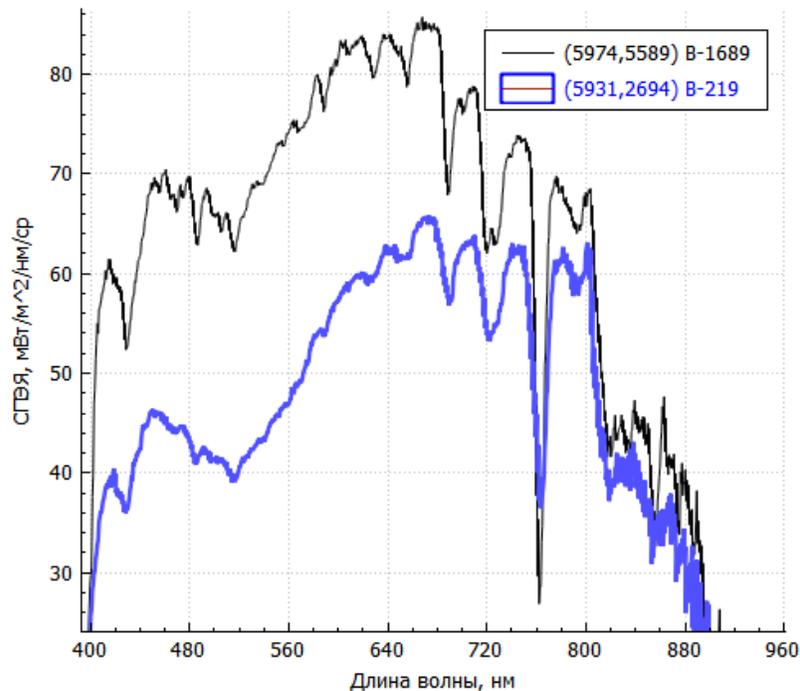


Результат фитирования спектра СПЭЯ аналитическим спектром при выполнении процедуры атмосферной коррекции



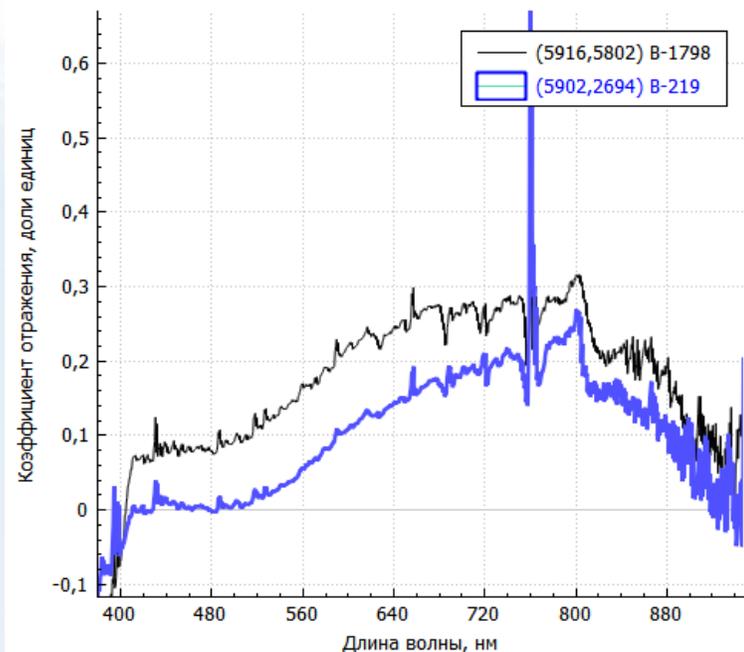
Спектр КСЯ песка Гобабеб, полученный в результате атмосферной коррекции

# ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ К СПЕКТРАМ ВИДЕОСПЕКТРАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫМ С БОРТА МКС



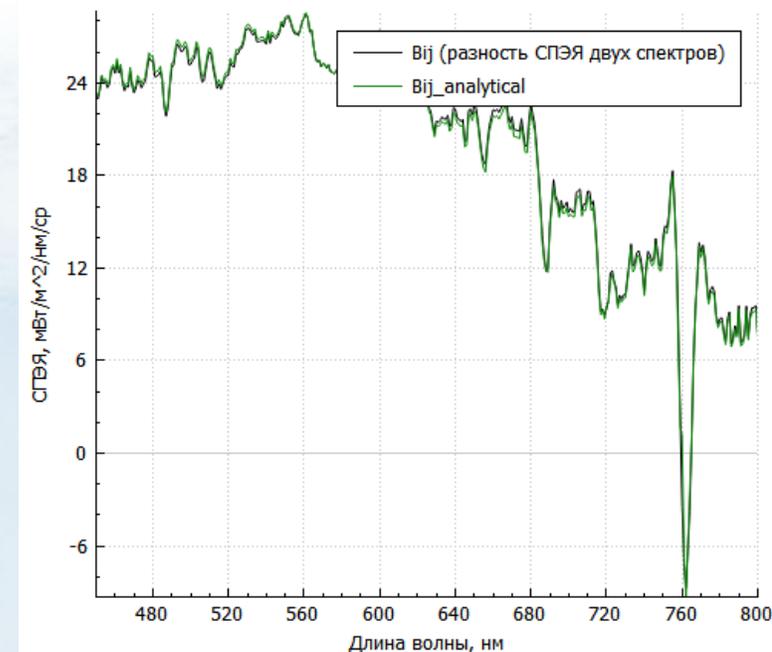
Два контрастных спектра СПЭЯ песка для определения АОТ по их разности

Найденное значение  
**АОТ: 0,043**



Соответствующие спектры КСЯ песка для определения АОТ по их разности

Найденная концентрация аэрозольных частиц в атмосфере по линейной регрессии  $ТЧ_{2.5} = a \cdot АОТ + b$   
**ТЧ 2,5: 0,0056 мг/м³**



Фитирование разности спектров СПЭЯ аналитическим спектром разности при определении АОТ

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ К ИЗОБРАЖЕНИЯМ SENTINEL-2

Для мультиспектрального изображения МНК не применим, в этом случае решается система уравнений, число которых равно числу имеющихся спектральных каналов для выбранной пары пикселей  $i$  и  $j$ .

В частности, для **Sentinel-2** берем четыре спектральных канала с разрешением 10м и модель атмосферы с числом неизвестных параметров не более четырех, например:  $\tau_{\text{abs},a}$ ,  $\tau_{\text{sca},a0}$ ,  $\beta$ ,  $g$  - аэрозольная оптическая толщина на опорной длине волны (например, 550 нм) по поглощению, по рассеянию, показатель Ангстрема, средний косинус индикатрисы, соответственно.

Система уравнений  $B_{ij\lambda}^{\text{изм}} - B_{ij\lambda}^{\text{теор}} = 0, \lambda=1,2,3,4$

Возможны и другие схемы расчетов.

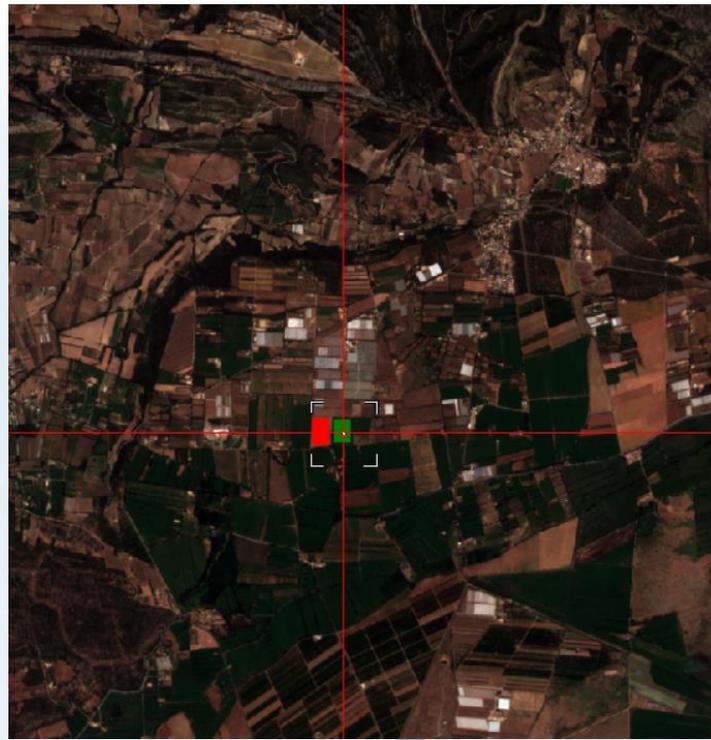


Исходное изображение Sentinel-2,  
Южная Франция, 2021.06.16

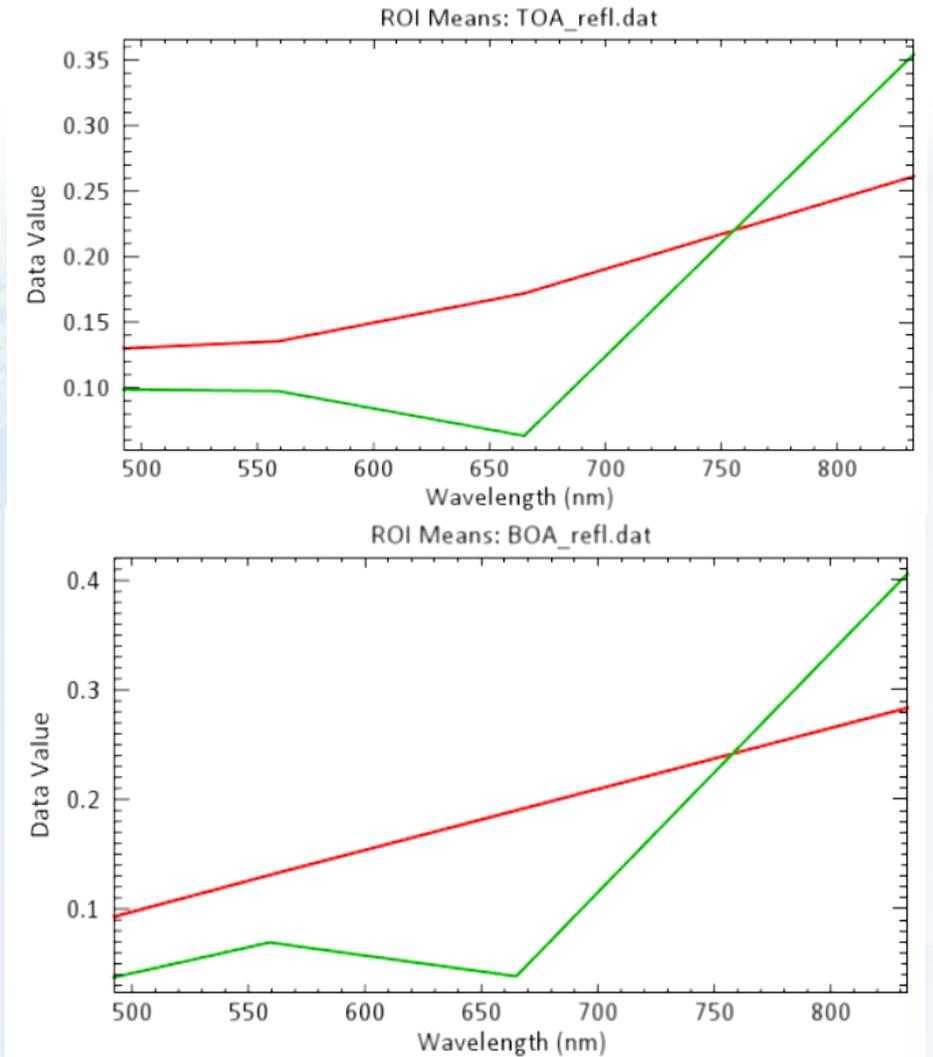
## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ К ИЗОБРАЖЕНИЯМ SENTINEL-2



Фрагмент изображения BOA reflectance, с выделенными ROI: пашня (красный цвет), лес (зеленый)



Фрагмент изображения TOA reflectance с выделенными ROI: пашня (красный цвет), лес (зеленый)

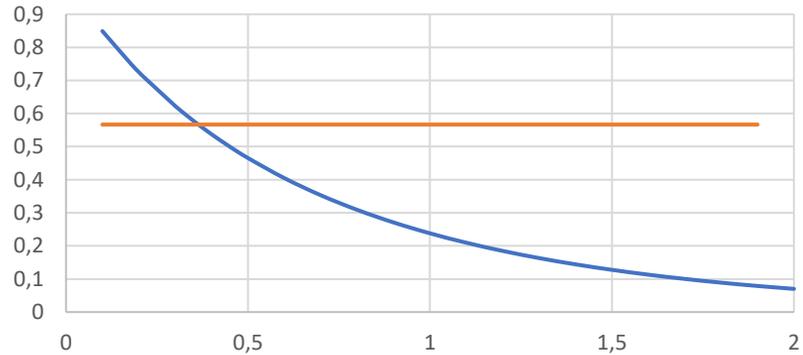


Средние спектры отражения 2-х ROI (пашни – красный, леса – зеленый, по 4 каналам):  
вверху – на верхней границе атмосферы (TOA),  
внизу - на нижней границе атмосферы (BOA)

# ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ К ИЗОБРАЖЕНИЯМ SENTINEL-2

$$\frac{\Delta R_{\lambda}^{TOA}}{\Delta R_{\lambda}^{BOA}}$$

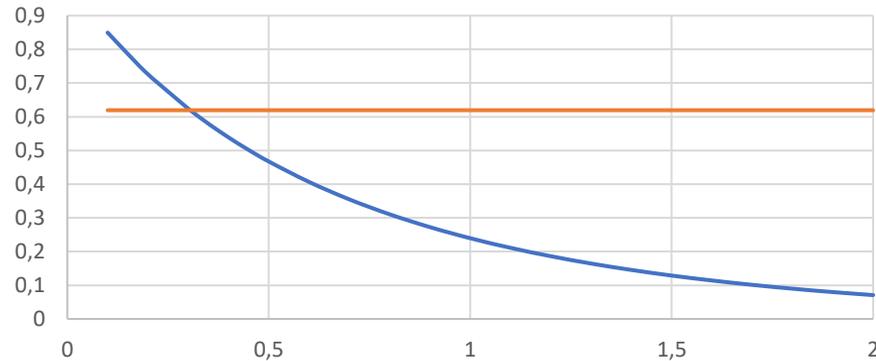
Канал В2 (492,7 nm)



Оптическая толщина в канале В2

$$\frac{\Delta R_{\lambda}^{TOA}}{\Delta R_{\lambda}^{BOA}}$$

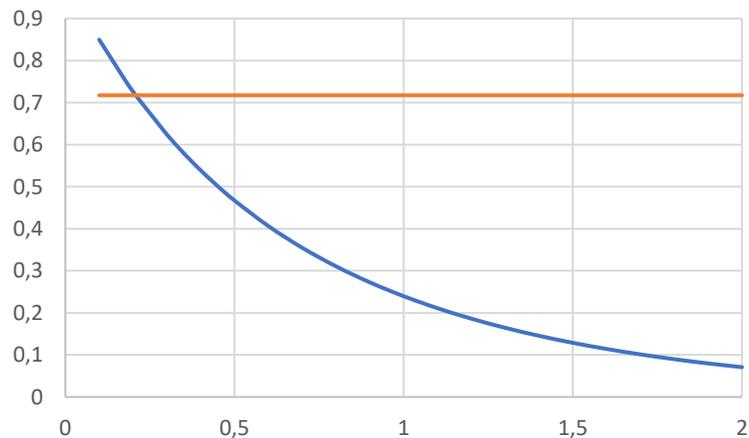
Канал В3 (559,8 nm)



Оптическая толщина в канале В3

$$\frac{\Delta R_{\lambda}^{TOA}}{\Delta R_{\lambda}^{BOA}}$$

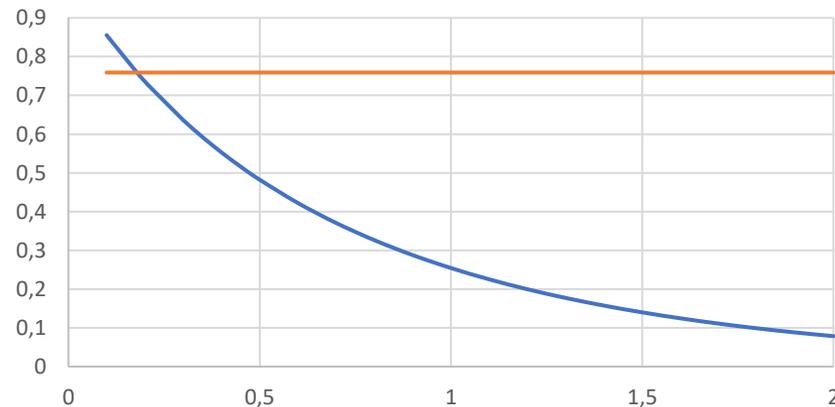
Канал В4 (664,6 nm)



Оптическая толщина в канале В4

$$\frac{\Delta R_{\lambda}^{TOA}}{\Delta R_{\lambda}^{BOA}}$$

Канал В8 (832,8 nm)



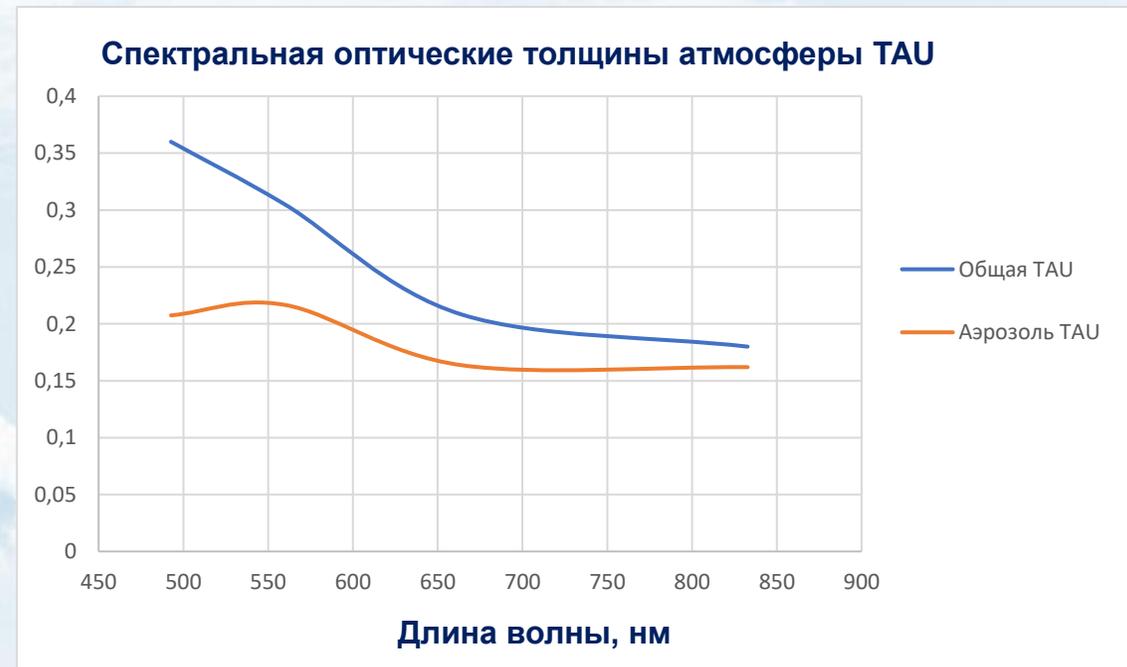
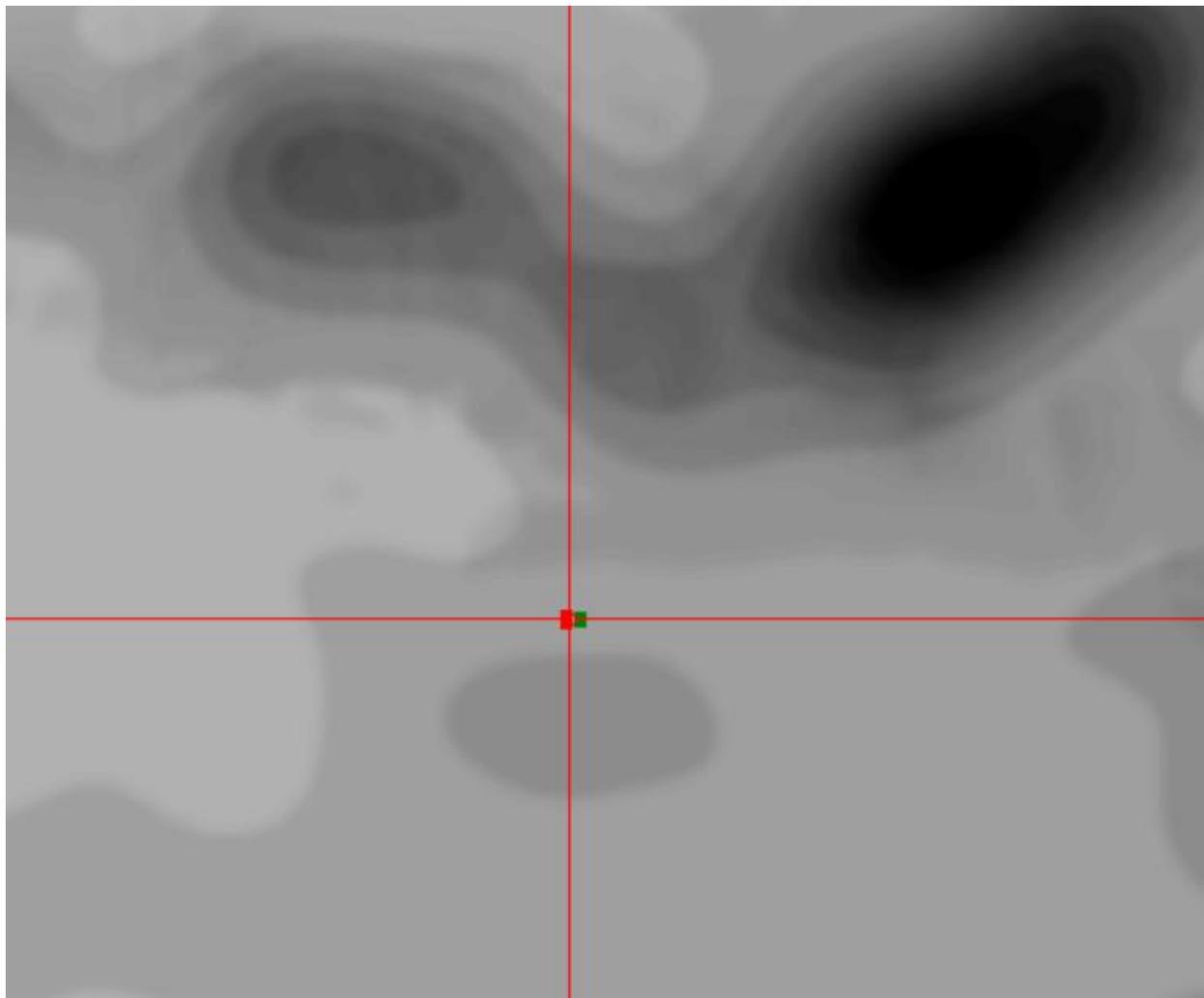
Оптическая толщина в канале В8

На графиках показаны отношения  $\Delta R_{\lambda}^{TOA} / \Delta R_{\lambda}^{BOA}$  разности КСЯ (коэффициентов отражения) двух рассматриваемых ROI (пашни и леса) на верхней границе атмосферы (TOA) к разности КСЯ этих поверхностей на нижней границе атмосферы (BOA) для 4-х каналов Sentinel-2 в зависимости от спектральной оптической толщины атмосферы в каждом канале.

Графики соответствуют параметрам атмосферы  $g=0,634$

$$\omega_{\lambda} = 0,893$$

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ К ИЗОБРАЖЕНИЯМ SENTINEL-2



Фрагмент изображения слоя AOT Sentinel-2. Значения оптической толщины атмосферы на длине волны 550 нм показаны оттенками серого. Значение AOT по данным поставщика данных Sentinel-2 в месте расположения обоих ROI (пашни и леса – красный и зеленый квадратики) равно 0,22, что соответствует графику справа, построенному по основе применения предложенной методики.

# СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ



КООРДИНАТЫ ДЛЯ СВЯЗИ:

## ОТДЕЛ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Телефон: + 375 17 396 44 09

Факс: + 375 17 398 32 46

E-mail: [remsens@mail.ru](mailto:remsens@mail.ru)

Сайт: [www.remsens.by](http://www.remsens.by)

Научно-исследовательское учреждение  
«ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ ИМЕНИ А.Н.СЕВЧЕНКО»  
Белорусского государственного университета

Республика Беларусь, 220045, г. Минск, ул. Курчатова, 7

