

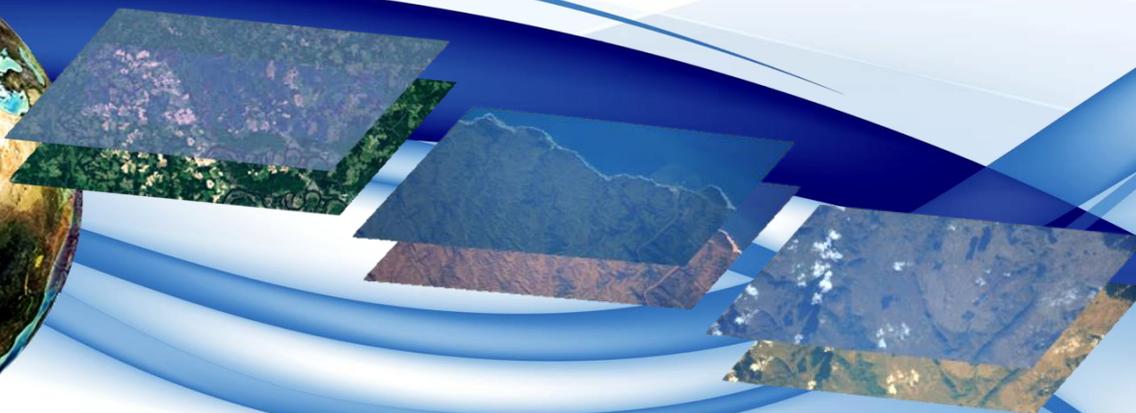


*Катковский (1), Иванов Д.А. (1), Мельникова И.Н. (2)*

# **БЫСТРАЯ МЕТОДИКА АТМОСФЕРНОЙ КОРРЕКЦИИ ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ ИЗ КОСМОСА СПЕКТРОВ И ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИТИЧЕСКИХ ФОРМУЛ**

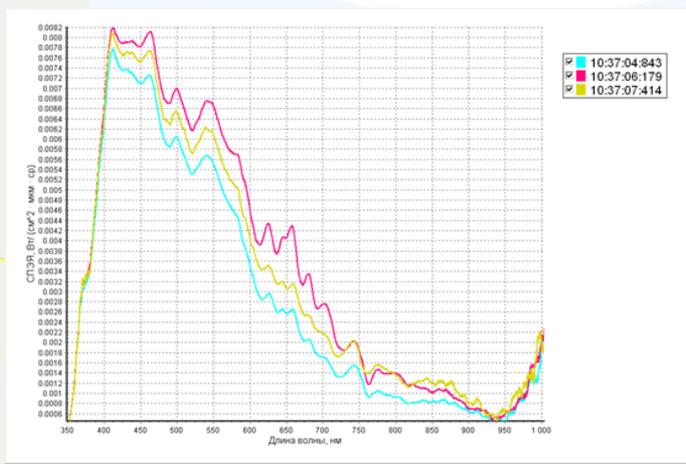
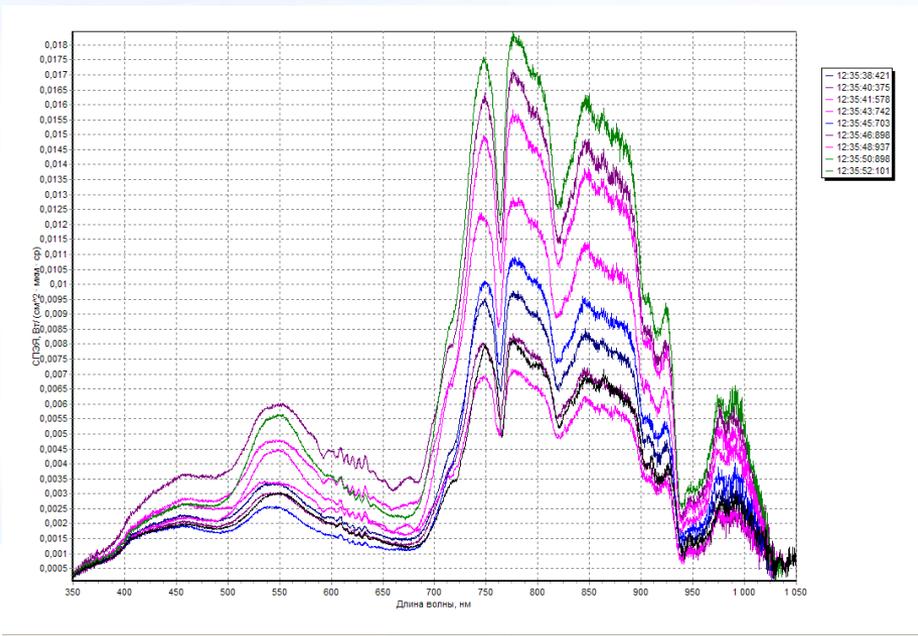
*<sup>1</sup>НИУ «Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко» БГУ, г. Минск*

*<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург*



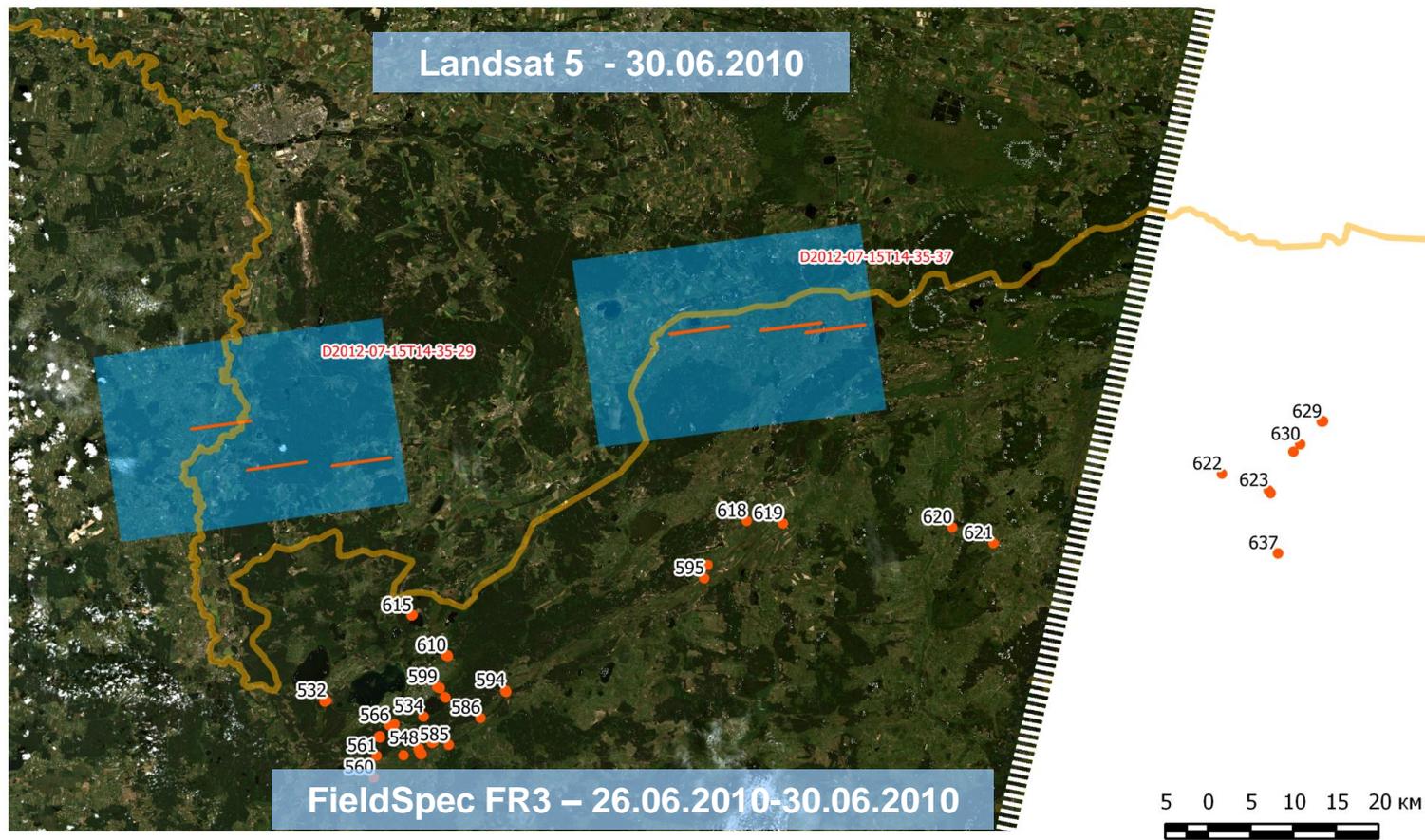


# Примеры авиационной и космической съемки ФСС (R,G,B-изображение и спектры отдельных областей снимка)



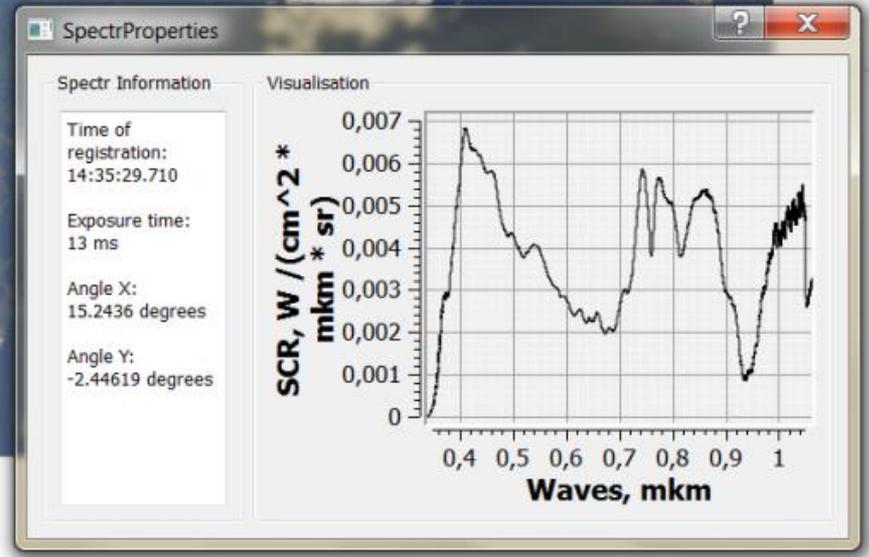


# Многоуровневые измерения растительности Шацкого подспутникового полигона



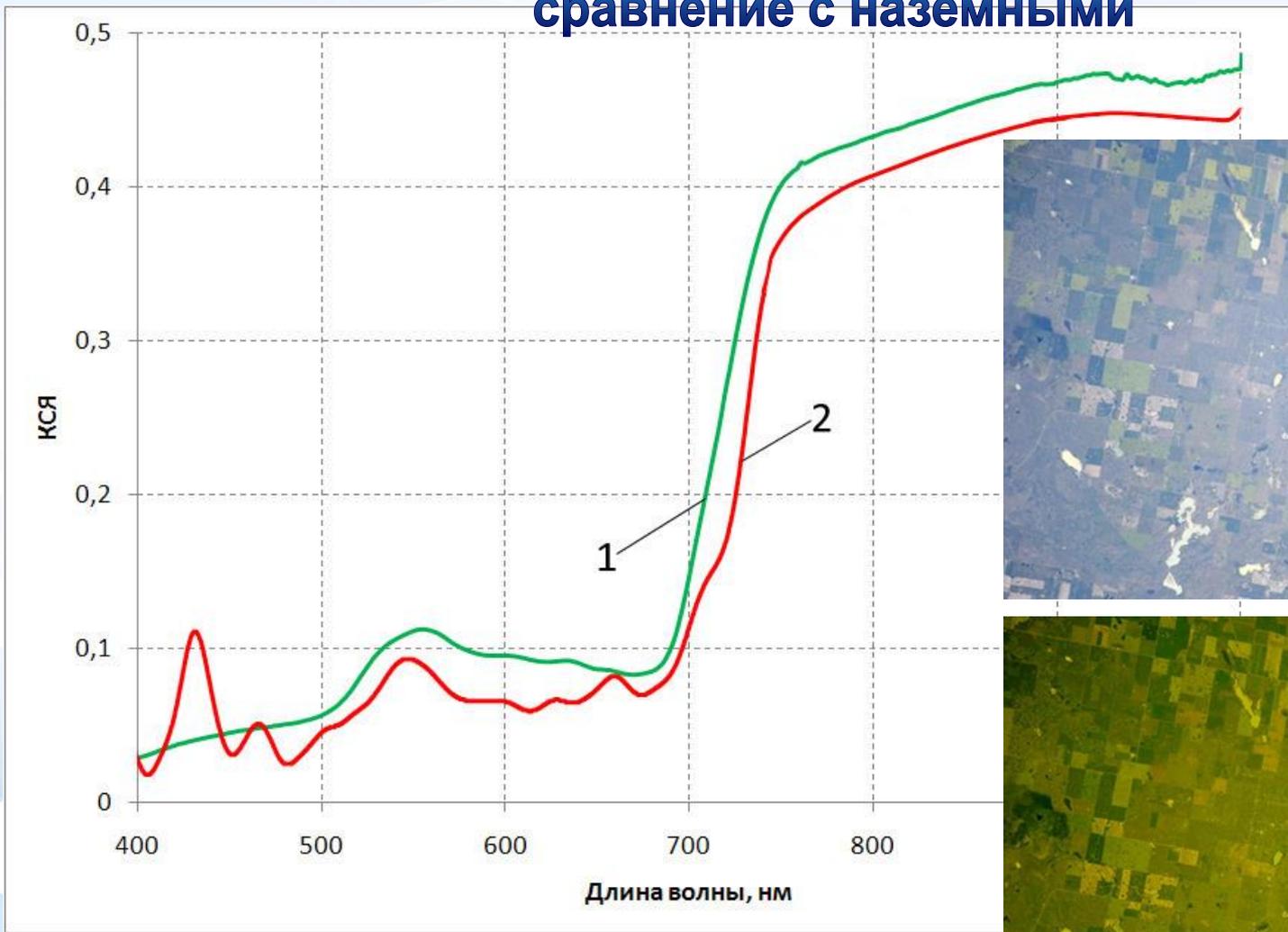


# СПЭЯ луговой растительности в пойме реки Припять, измерения





# Альbedo луговой растительности в пойме реки Припять, сравнение с наземными



— наземные данные — ФСС



# Основные уравнения

Обычно используемое выражение для спектральной плотности энергетической яркости (**СПЭЯ**) излучения на пикселе спутникового сенсора  $L(\lambda, \mu, \mu_0, \varphi)$  над однородной Ламбертовской поверхностью

$$L(\lambda, \mu, \mu_0, \varphi) = L_{\text{атм}}(\lambda, \mu, \mu_0, \varphi) + \frac{A_\lambda \rho(\lambda)}{1 - \rho_{\lambda e} s} + \frac{B_\lambda \rho_e(\lambda)}{1 - \rho_{\lambda e} s}$$

$\rho(\lambda)$  - искомое спектральное альbedo подстилающей поверхности (пикселя);  
 $L_{\text{атм}}(\lambda, \mu, \mu_0, \varphi)$  - это яркость излучения, рассеянного атмосферой, которое не взаимодействовало с поверхностью (яркость атмосферной дымки).

Мы используем следующее выражение для **СПЭЯ уходящего излучения**

$$L(\lambda, \mu, \mu_0, \varphi) = L_{\text{атм}}(\lambda, \mu, \mu_0, \varphi) + \frac{\rho(\lambda)}{\pi} E(\lambda, \mu_0) T(\lambda, \mu)$$

$T(\lambda, \mu)$  – полное пропускание атмосферы от поверхности Земли до спутника;  
 $E(\lambda, \mu_0)$  – освещенность поверхности Земли.

$$T(\lambda, \mu) = T_\lambda^{dir} + T_\lambda^{dif} = \exp(-\tau_\lambda / \mu) + T_\lambda^{dif}(\lambda, \mu)$$

Для неоднородной подстилающей поверхности (изображения)

$$L_\lambda = \left[ L_{\text{атм}}^\lambda \left( T_{\text{H}_2\text{O}}^\lambda \right)^{m_1} + E_\lambda \left( T_\lambda^{dir} \rho_\lambda + \rho_{\lambda e} T_\lambda^{dif} \right) \left( T_{\text{H}_2\text{O}}^\lambda \right)^{m_2} \right] T_{\text{O}_2}^\lambda T_{\text{O}_3}^\lambda$$



# Аппроксимации функций в уравнении для СПЭЯ уходящего излучения

**Освещенность** рассчитывается в приближении Эддингтона с поправкой на учет вероятности выживания кванта  $\Lambda_\lambda$ , отличной от 1:

$$E(\lambda, \mu_0) = \Lambda_\lambda E_{\text{Эд}}(\lambda, \mu_0) + (1 - \Lambda_\lambda) \pi S_\lambda \mu_0 \exp(-\tau_\lambda / \mu_0)$$

$$E_{\text{Эд}}(\lambda, \mu_0) \equiv \frac{4\pi S_\lambda \mu_0}{4 + 3(1 - g)(1 - \rho_\lambda)\tau_\lambda} \left[ \left( \frac{1}{2} + \frac{3}{4} \mu_0 \right) + \left( \frac{1}{2} - \frac{3}{4} \mu_0 \right) \exp\left(-\frac{\tau_\lambda}{\mu_0}\right) \right]$$

**Яркость атмосферной дымки** представляется в виде произведения приближения однократного рассеяния на квазилинейный множитель от произведения оптической толщины и альбедо однократного рассеяния

$$L_{\text{атм}}(\lambda, \mu, \mu_0, \varphi) = \left[ 1 + \alpha (\Lambda_\lambda \tau_\lambda)^{1,25} \right] L_{\text{атм}}^{\text{одн}} \equiv \left[ 1 + \alpha (\Lambda_\lambda \tau_\lambda)^{1,25} \right] \frac{\Lambda_\lambda}{4} \frac{x(\gamma)}{\mu + \mu_0} \left\{ 1 - \exp\left(-\tau_\lambda \left[ \frac{1}{\mu_0} + \frac{1}{\mu} \right]\right) \right\}$$

**Функция диффузного пропускания** снизу вверх представлена численной аппроксимацией из работы: *Kokhanovsky A.A., Mayer B., Rozanov V.V. A parameterization of the diffuse transmittance and reflectance for aerosol remote sensing problems // Atmos. Res. 2005. №73. P. 37–43.*

$$T_\lambda^{\text{dif}} = \tau_\lambda \exp(-u - v\tau_\lambda - w\tau_\lambda^2)$$
$$u = \sum_{i=0}^3 h_i \mu^i, \quad v = p_0 + p_1 \exp(-p_2 \mu), \quad w = q_0 + q_1 \exp(-q_2 \mu)$$

Параметры  $h_i, p_i, q_i$  представляются в виде полиномов третьей и четвертой степени от среднего косинуса индикатрисы  $g$ . 7



## Параметры оптической модели атмосферы:

$$\tau_A(\lambda) = \tau_m(\lambda) + \tau_a(\lambda) + \tau_e$$

- вертикальная оптическая толщина безоблачной атмосферы

$\tau_m(\lambda) = \tau_0^R \left( \frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^4$  - оптическая толщина молекулярного (рэлеевского) рассеяния  
 $\tau_0^R$  - оптическая толщина на длине волны  $\lambda_0 = 550 \text{ nm}$   
 $\tau_a(\lambda) = \tau_0^a \left( \frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^n$ ,  $0 < n \leq 4$  - оптическая толщина аэрозольного рассеяния  
 $\tau_0^a$  - оптическая толщина на длине волны  $\lambda_0 = 550 \text{ nm}$   
 $\tau_e$  - оптическая толщина аэрозольного поглощения

$$\Lambda_\lambda = \frac{[\tau_m(\lambda) + \tau_a(\lambda)]}{[\tau_m(\lambda) + \tau_a(\lambda) + \tau_e]}$$

- альbedo однократного рассеяния

$S_\lambda$  - солнечная постоянная на верхней границе атмосферы

$$x(\gamma) = (1 - g^2) / (1 + g^2 - 2g\gamma)^{3/2}$$

$\gamma$  – косинус угла рассеяния,  $x(\gamma)$  – индикатриса рассеяния Хеньи-Гринштейна,  
 $g$  – средний косинус индикатрисы рассеяния



## Алгоритм атмосферной коррекции

1. Выбор «темного» (с низким альбедо) пикселя на гиперспектральном изображении или пикселя с приблизительно известной спектральной зависимостью альбедо.

2. Нахождение среднего альбедо участка поверхности (для учета затем помехи бокового подсвета) и набора неизвестных оптико-физических параметров атмосферы. Формула для СПЭЯ на верхней границе атмосферы для этого случая может быть записана в виде (полагаем  $\rho_\lambda = \rho_{\lambda e}$ ):

$$\bar{L}_\lambda = \left[ L_{\text{атм}}^\lambda (T_{\text{H}_2\text{O}}^\lambda)^{m_1} + E_\lambda \rho_{\lambda e} (T_\lambda^{\text{dir}} + T_\lambda^{\text{dif}}) (T_{\text{H}_2\text{O}}^\lambda)^{m_2} \right] T_{\text{O}_2}^\lambda T_{\text{O}_3}^\lambda$$

3. Нахождение альбедо искомого «темного» пикселя  $\rho_\lambda$ . В этом случае осуществляется фитирование спектра «темного» пикселя целевой функцией

$$L_\lambda = \left[ L_{\text{атм}}^\lambda (T_{\text{H}_2\text{O}}^\lambda)^{m_1} + E_\lambda (T_\lambda^{\text{dir}} \rho_\lambda + \rho_{\lambda e} T_\lambda^{\text{dif}}) (T_{\text{H}_2\text{O}}^\lambda)^{m_2} \right] T_{\text{O}_2}^\lambda T_{\text{O}_3}^\lambda$$

среднее альбедо поверхности здесь является постоянным и равным найденному на предыдущем этапе.

4. Вычисление функций спектрального альбедо для всех остальных пикселей гиперспектрального изображения (в цикле, в том числе для исходного «темного» пикселя) из следующей аналитической формулы:

$$\rho_\lambda = \left[ \frac{L_\lambda^{\text{эсп}}}{T_{\text{O}_2}^\lambda T_{\text{O}_3}^\lambda} - L_{\text{атм}}^\lambda (T_{\text{H}_2\text{O}}^\lambda)^{m_1} - \rho_e E_\lambda T_\lambda^{\text{dif}} (T_{\text{H}_2\text{O}}^\lambda)^{m_2} \right] \cdot \left[ E_\lambda T_\lambda^{\text{dir}} (T_{\text{H}_2\text{O}}^\lambda)^{m_2} \right]^{-1}$$



## Входными данными для вычислений на этапах 2 и 3 являются:

1. Средний спектр участка изображения вокруг темного пикселя (или всего изображения)

2. Спектр «темного» пикселя.

### 3. Углы, характеризующие геометрические параметры съемки:

• Зенитный угол Солнца  $\theta_0$  или его косинус  $\mu_0 = \cos\theta_0$

(определяется географическими координатами и временем съемки);

• Зенитный угол съемки  $\theta$  (направление земля-сенсор), косинус  $\mu = \cos\theta$ ;

• Азимутальный угол съемки  $\varphi$ .

### 4. Следующие спектральные функции:

• Размерная функция яркости Солнца на верхней границе атмосферы  $S_\lambda$  [Вт/м<sup>2</sup>/мкм/ср];

• Функция пропускания кислорода (безразмерная)

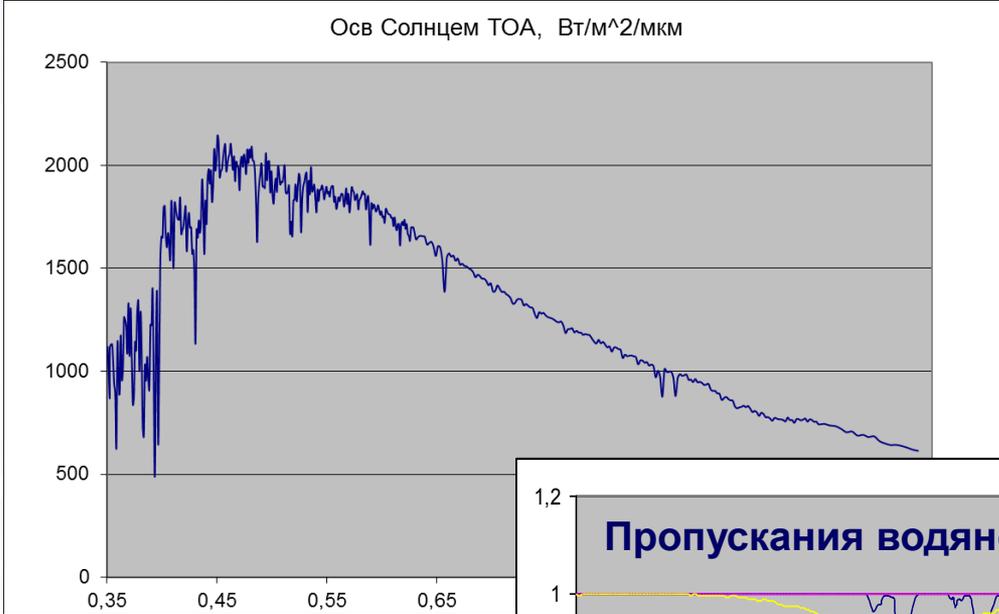
• Функция пропускания озона (безразмерная)

• Функция пропускания водяного пара, (безразмерная) .

№	Неизвестные параметры атмосферы и поверхности	Обозначение
1	Среднее альbedo сцены (вокруг и включая темный пиксель)	$\rho_e$
2	Альbedo «темного» пикселя	$\rho_\lambda$
3	Показатель степенной зависимости аэрозольной оптической толщи по рассеянию от длины волны	$n$
4	Оптическая толщина по поглощению (константа)	$\tau_e$
5	Оптическая толщина по рассеянию на опорной длине волны 0,55 мкм	$\tau_0^a$
6	Средний косинус индикатрисы рассеяния	$g$
7	Параметр величины вклада многократного рассеяния в дымку	$\alpha$
8	Показатель степени в функции пропускания воды для дымки	$m_1$
9	Показатель степени в функции пропускания воды для отражения от пикселя	$m_2$

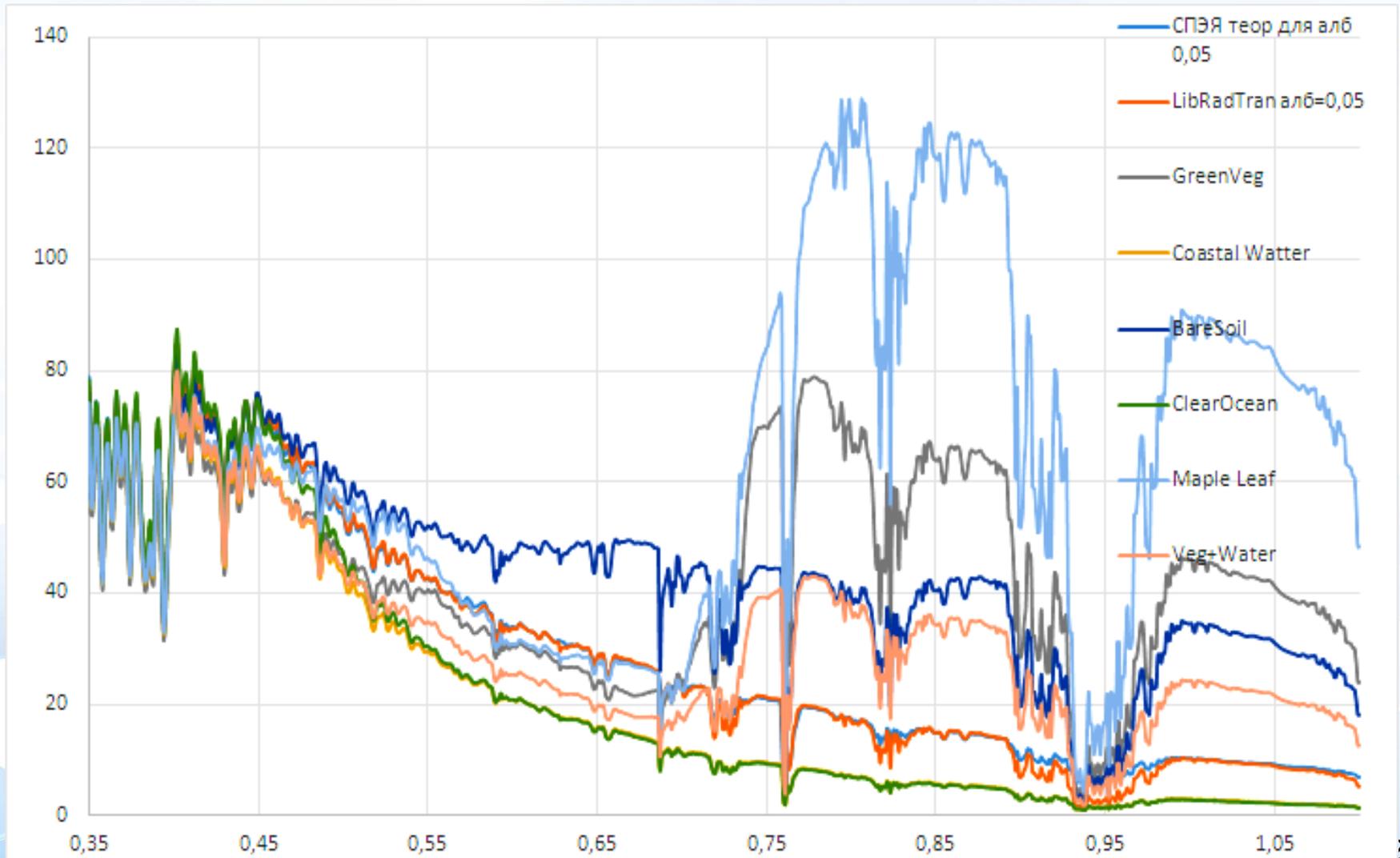


# Спектральная освещенность Солнцем ТОА и пропускания газовых компонент атмосферы



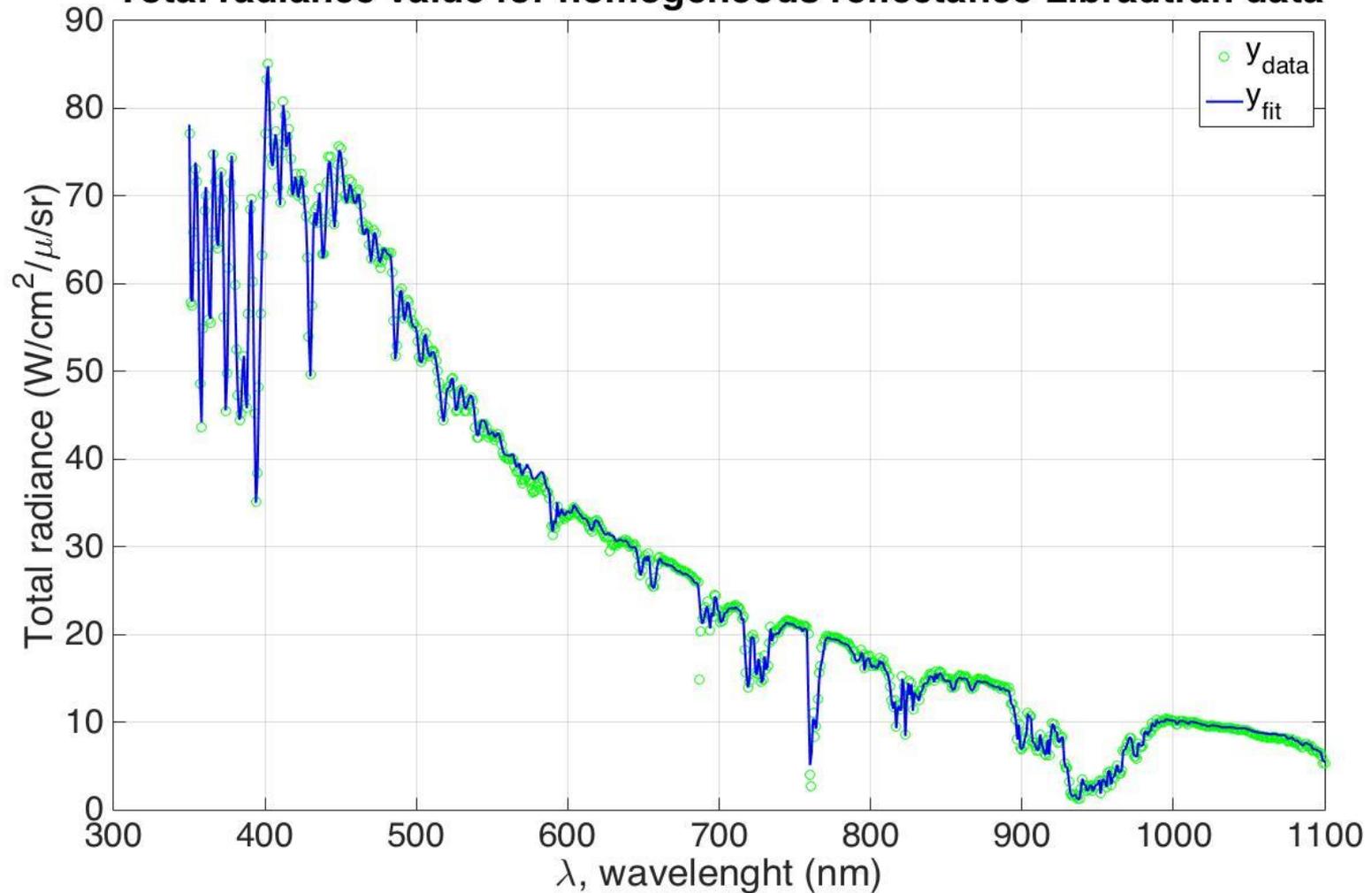


## Результаты расчета СПЭЯ уходящего излучения для различных подстилающих поверхностей





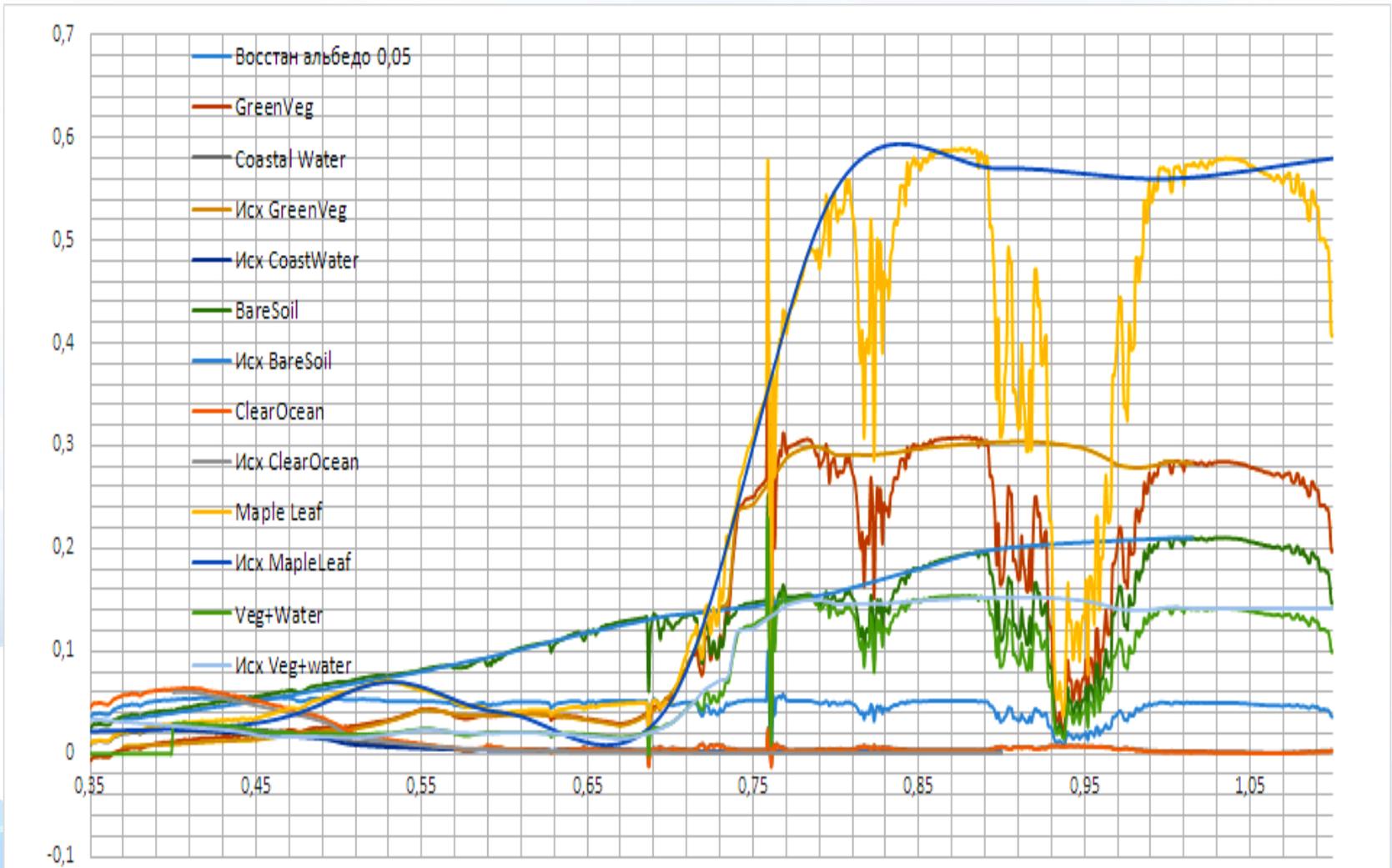
### Total radiance value for homogeneous reflectance Libradtran data



Фитирование СПЭЯ на ТОА, рассчитанной по LibRadTran, аналитической функцией для пикселя с постоянным альбедо 0,05 методом наименьших квадратов Левенберга-Марквордта . 13

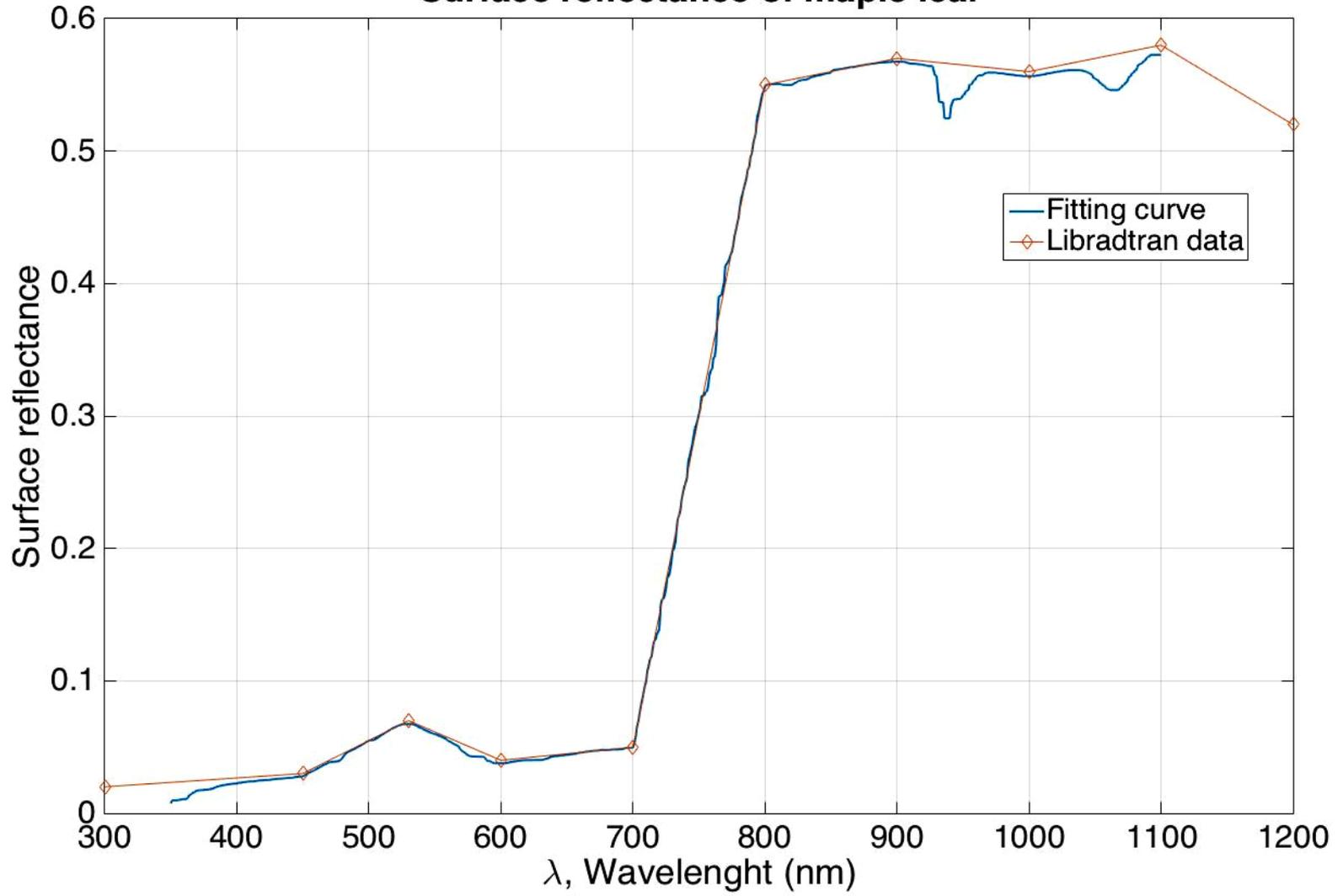


## Первоначальные результаты восстановления альbedo различных подстилающих поверхностей (быстрая атмосферная коррекция)



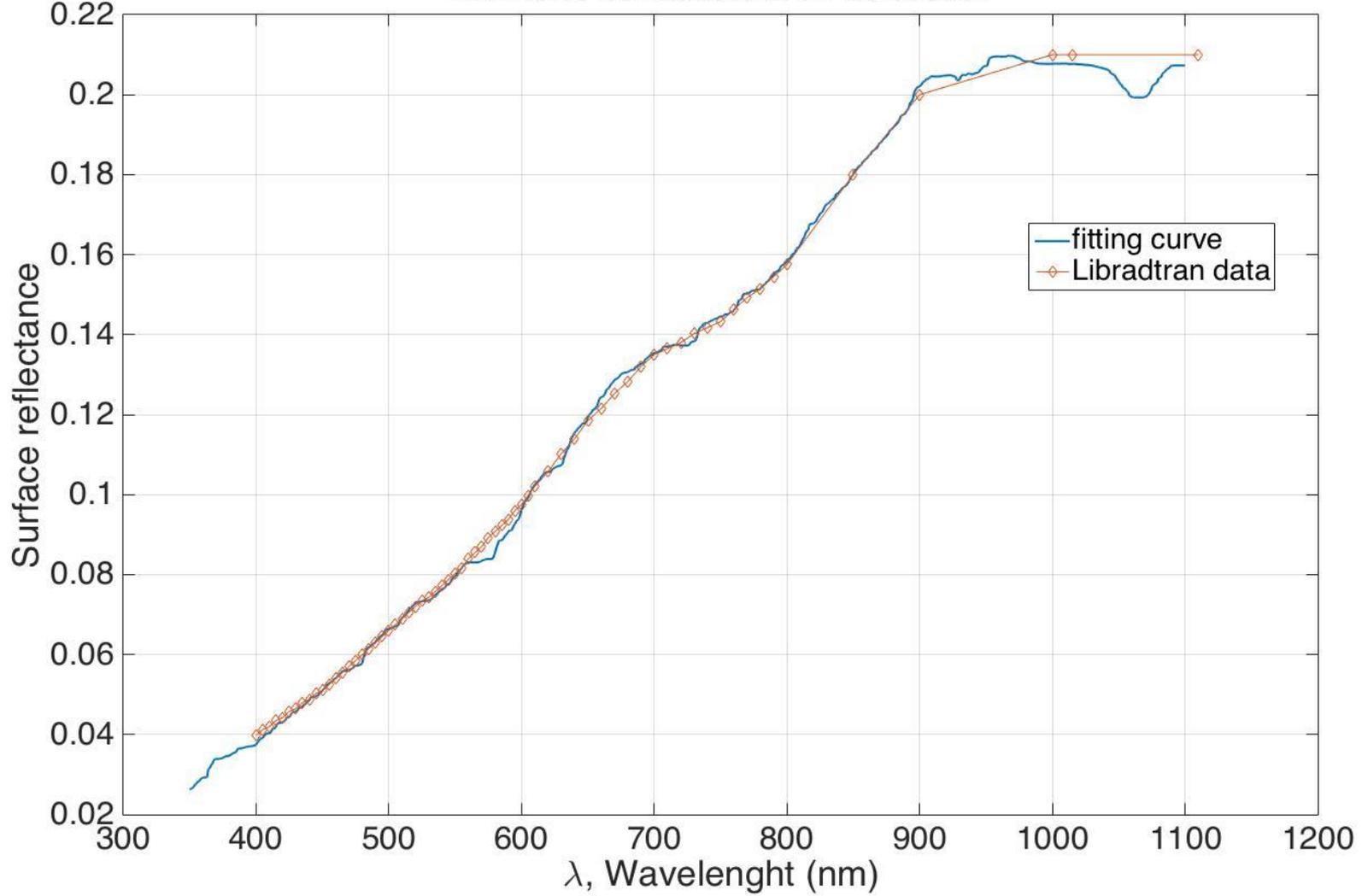


### Surface reflectance of maple leaf



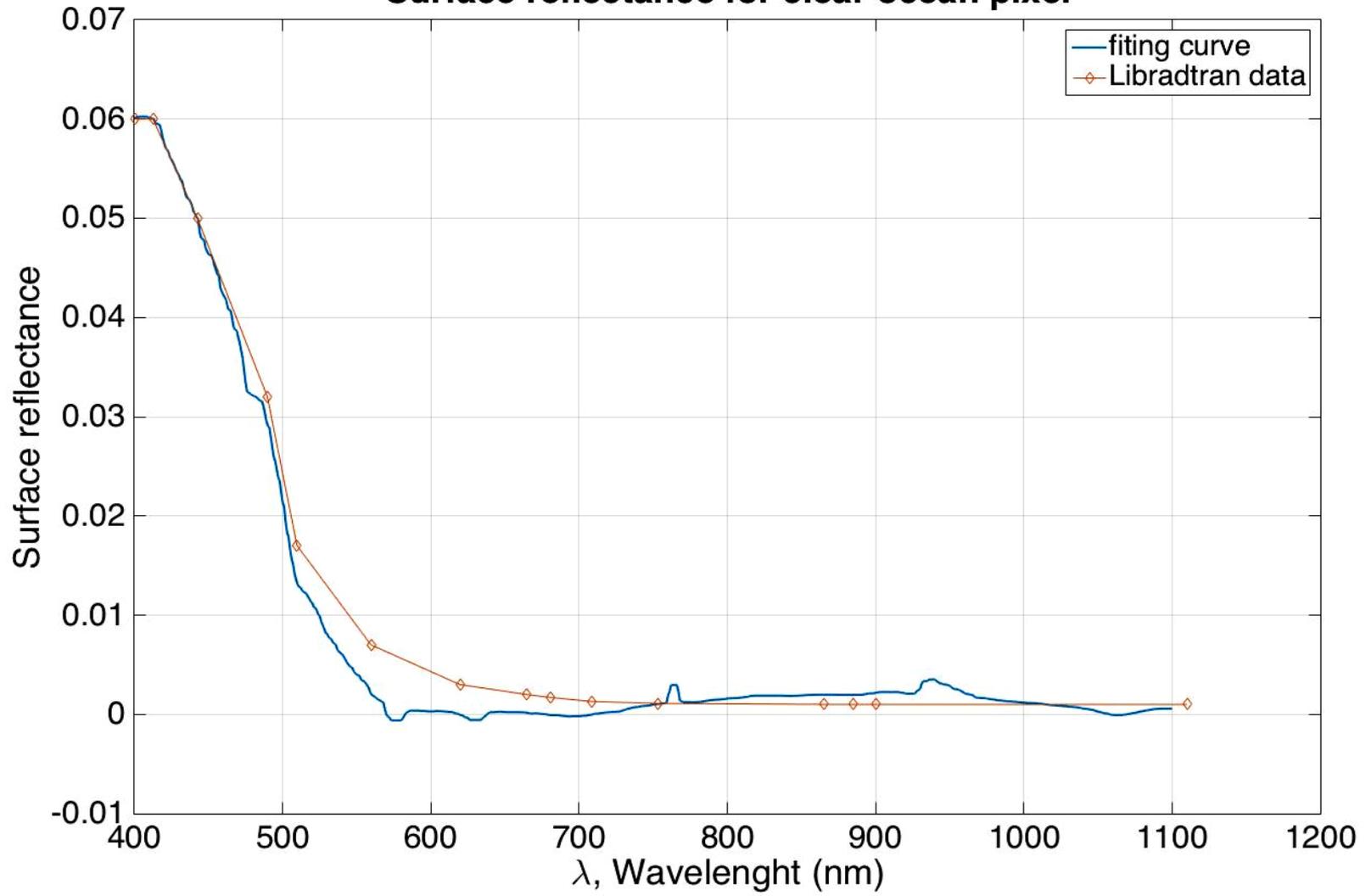


### Surface reflectance of bare soil



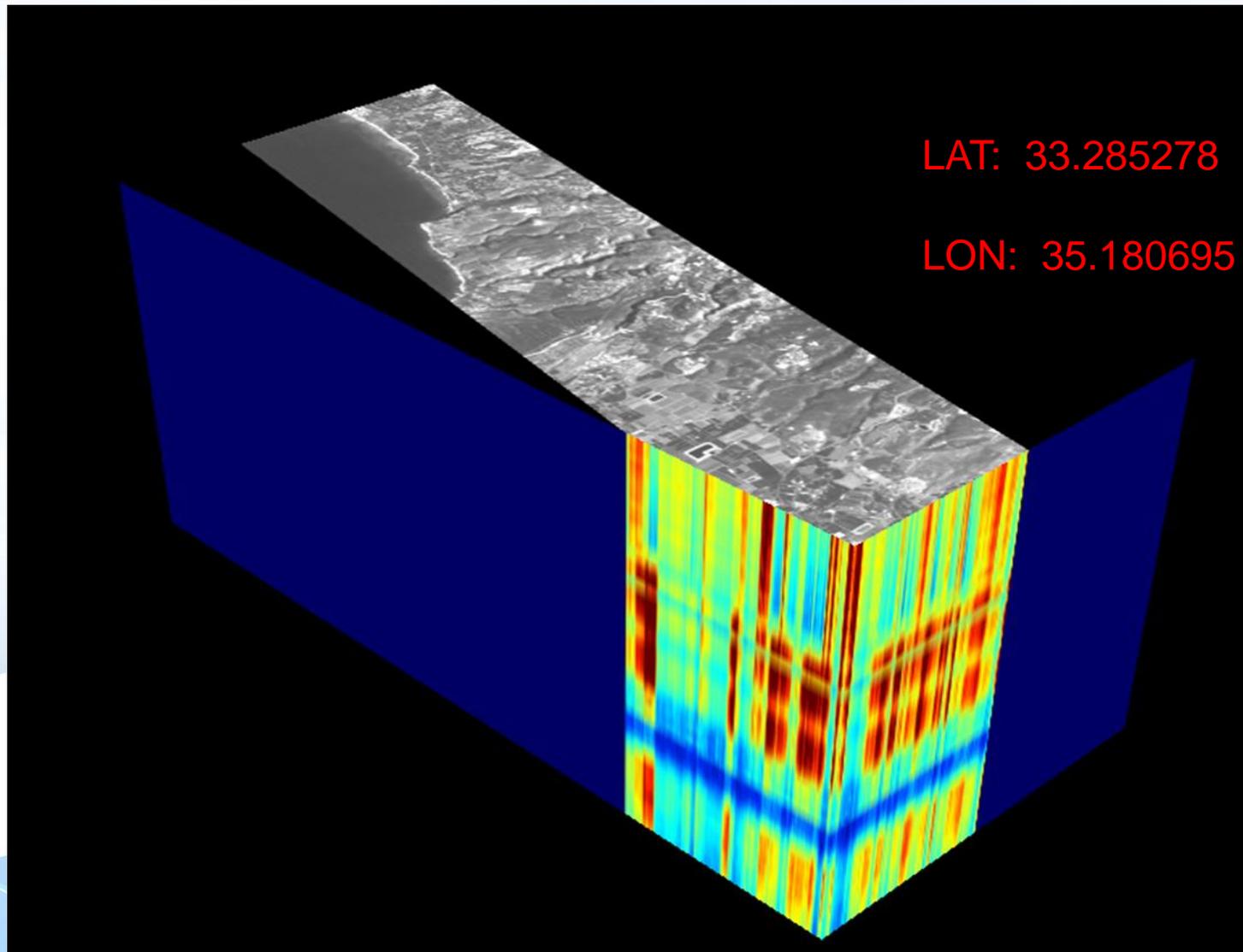


### Surface reflectance for clear ocean pixel



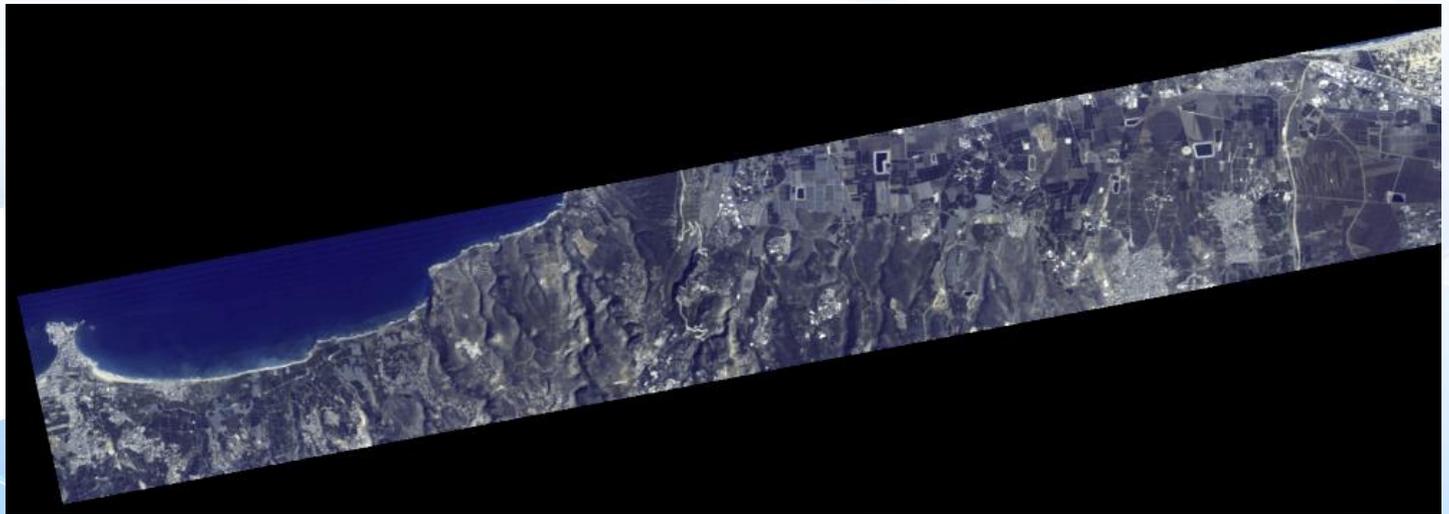
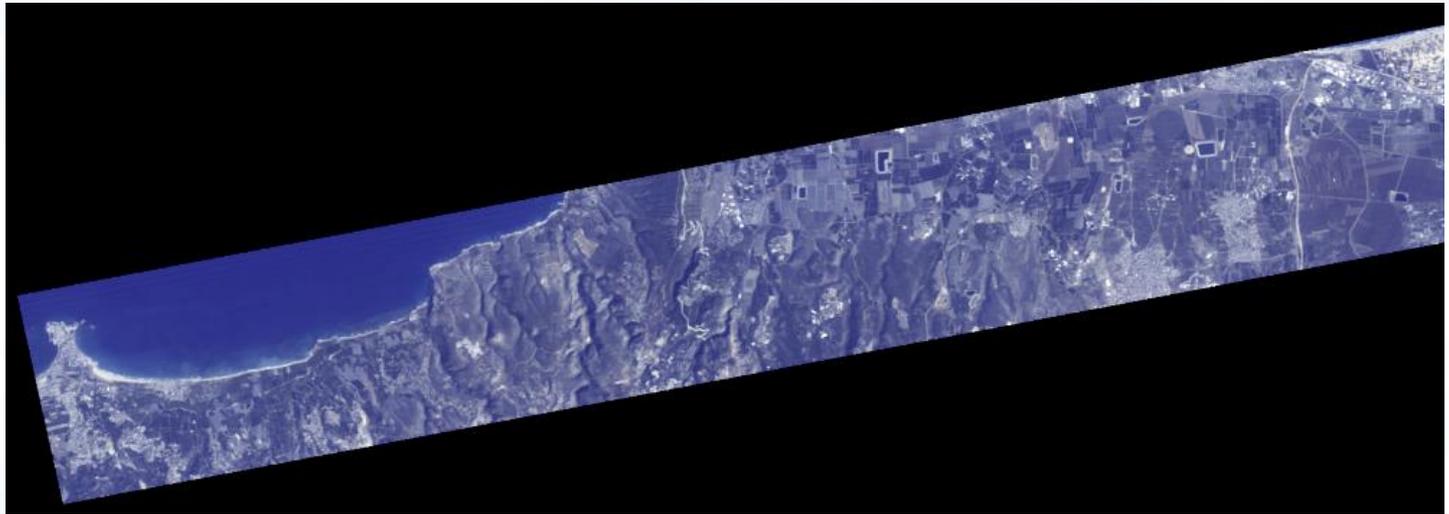


# Гиперкуб изображения EO-1 HYPERION Mon Oct 27 22:03:17 2014



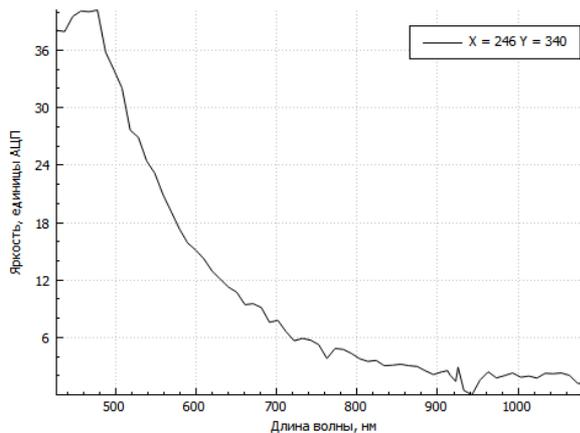


# (R,G,B)- изображения исходного гиперкуба Hyperion и спектрального альbedo

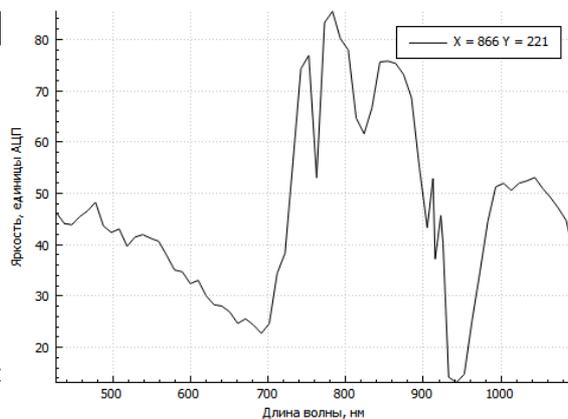


# Спектры трех пикселей исходного изображения Nuregion и спектры их альбедо, полученные описанным методом атмосферной коррекции

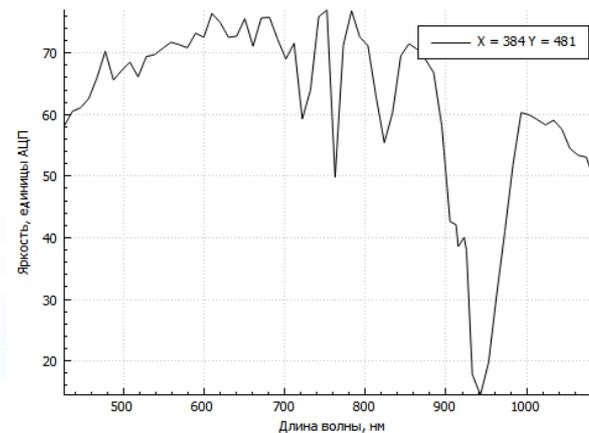
## СПЭЯ воды



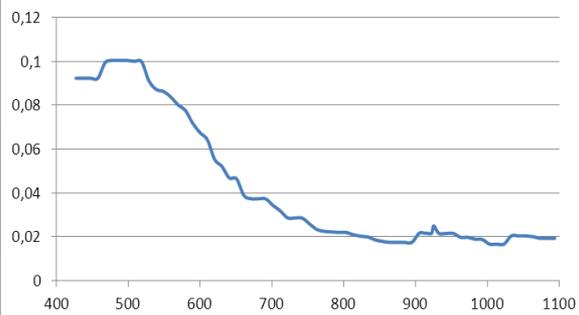
## СПЭЯ зеленой растительности



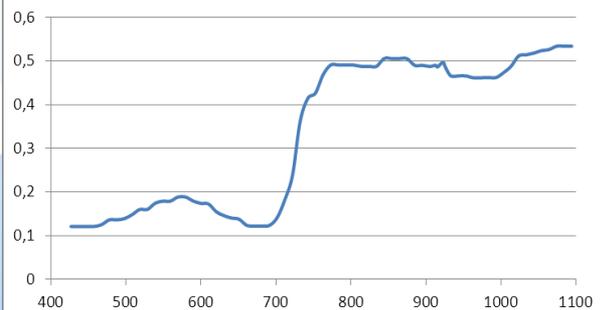
## СПЭЯ песка



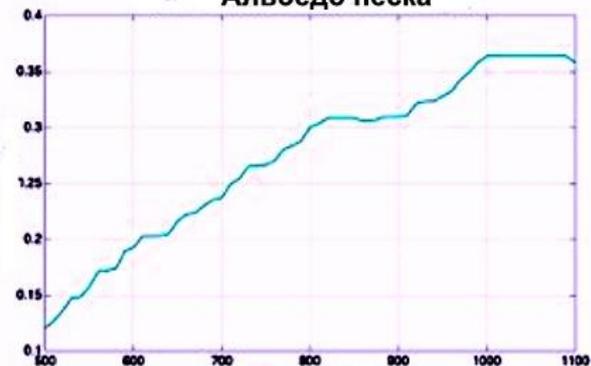
## Альbedo воды



## Альbedo зеленой растительности



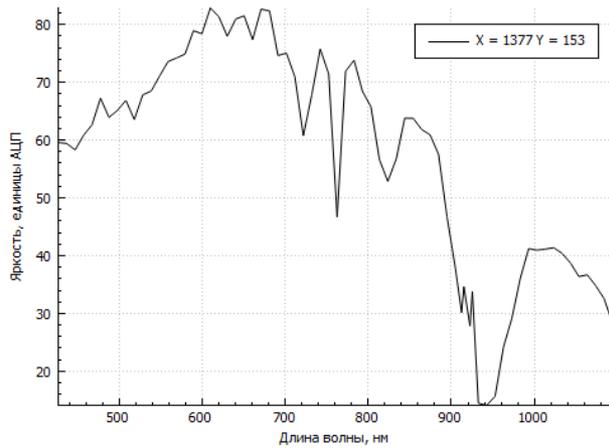
## Альbedo песка



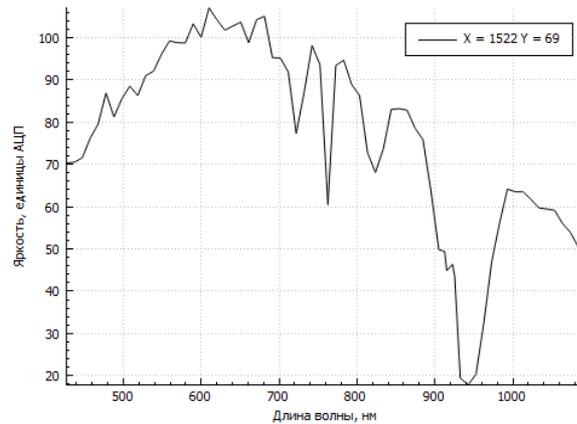


# Спектры трех пикселей исходного изображения Нурегіон и спектры их альbedo, полученные описанным методом атмосферной коррекции

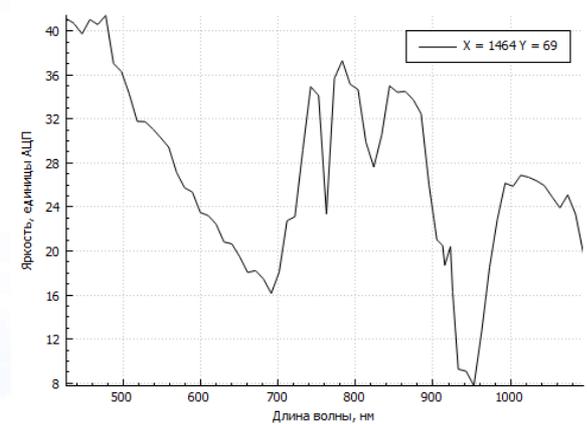
## СПЭЯ дороги



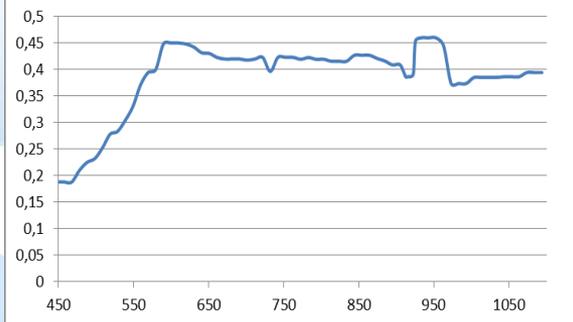
## СПЭЯ здания (бетон)



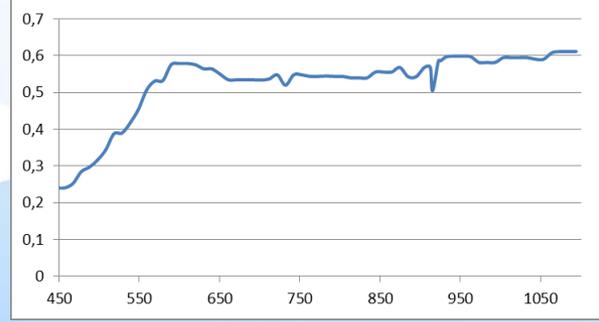
## СПЭЯ, смешанный пиксель



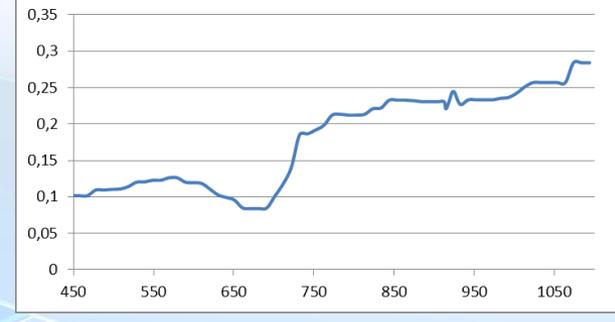
## альbedo дороги



## альbedo здания (бетон)



## альbedo, смешанный пиксель





**Исходное изображение Нурегион, вывод в псевдоцветах (R,G,B) в ENVI**

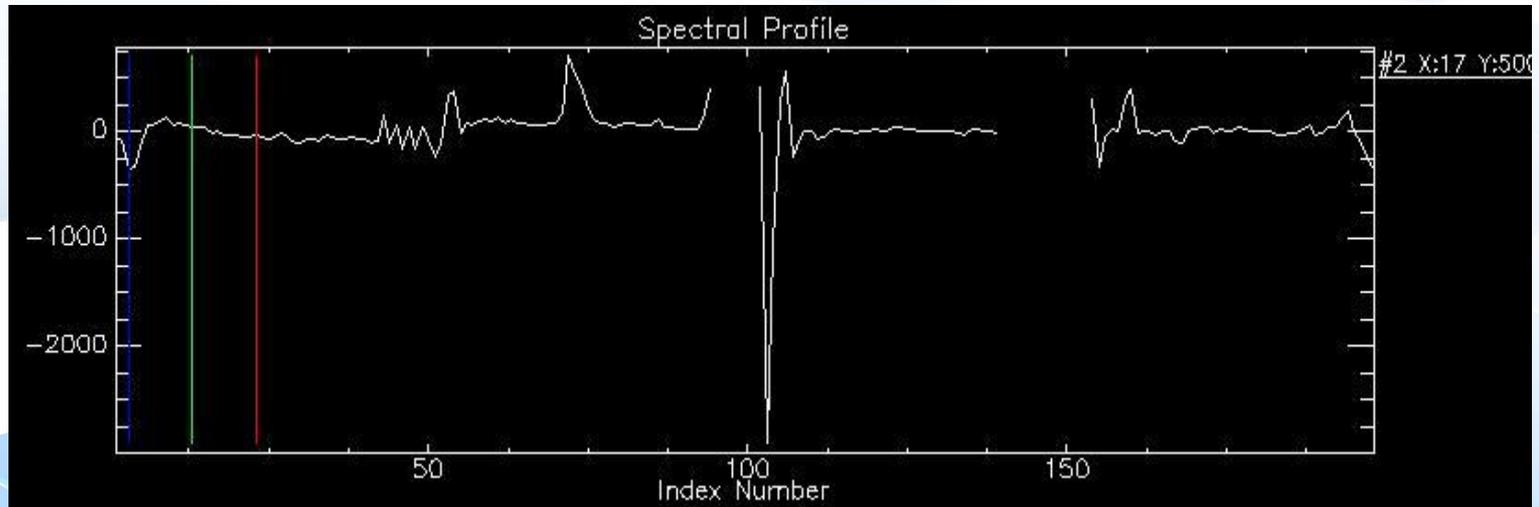
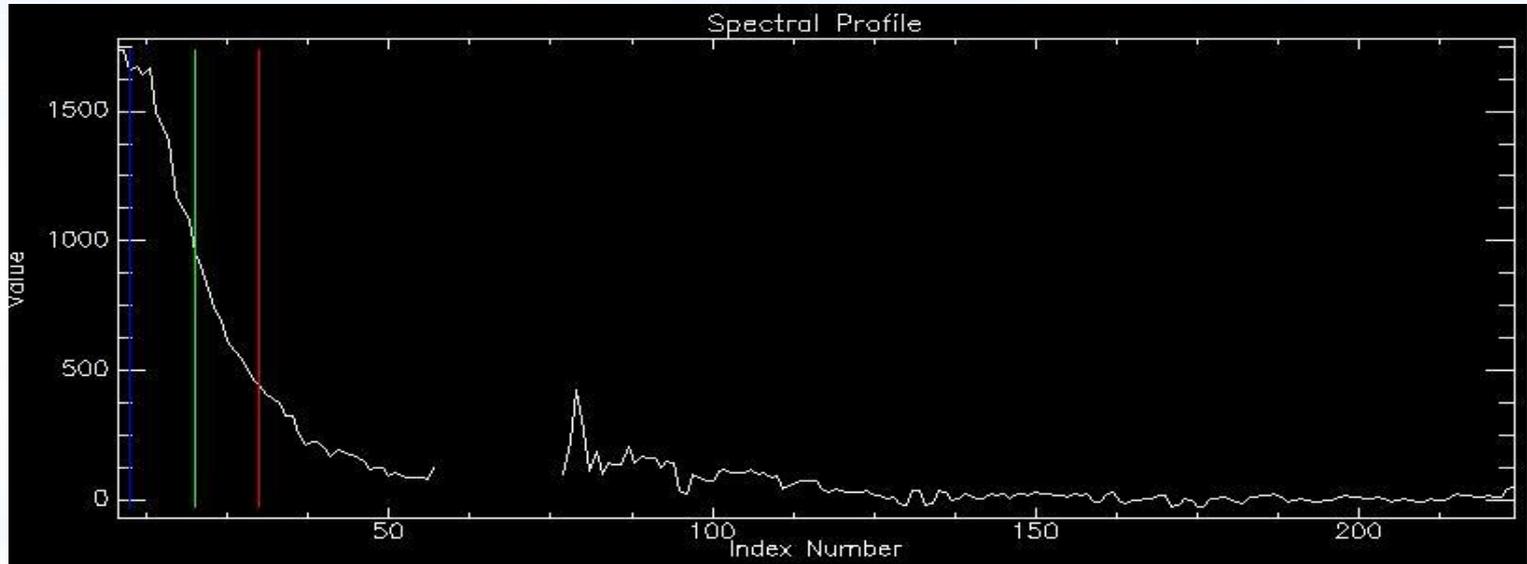


**Изображение Нурегион, после атмосферной коррекции в модуле FLAASH ENVI, вывод в псевдоцветах (R,G,B)**



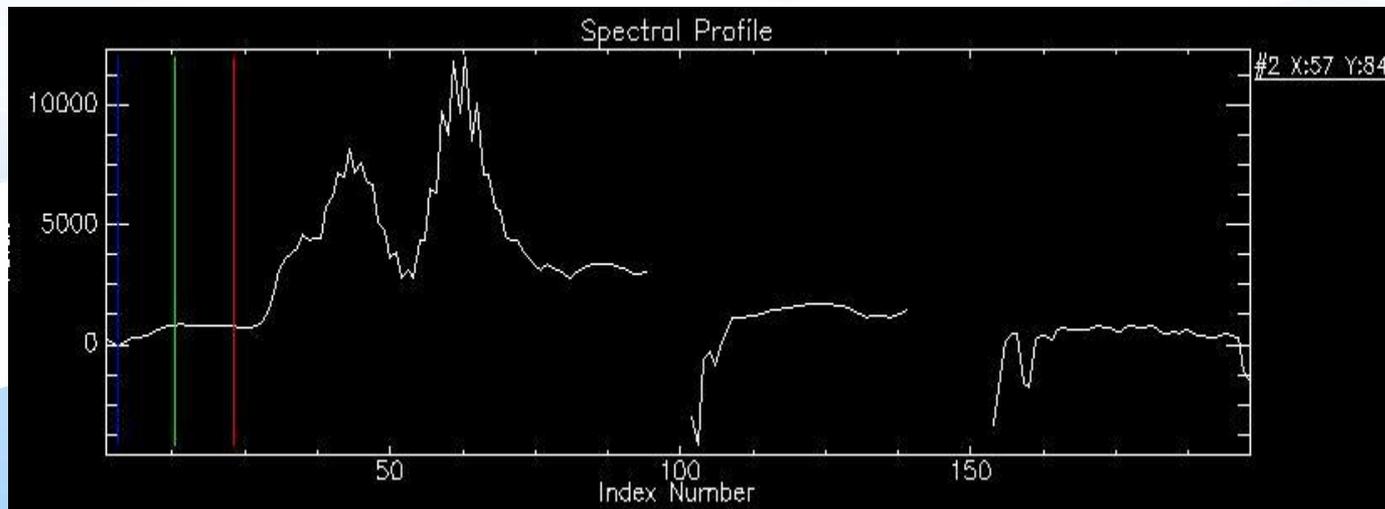
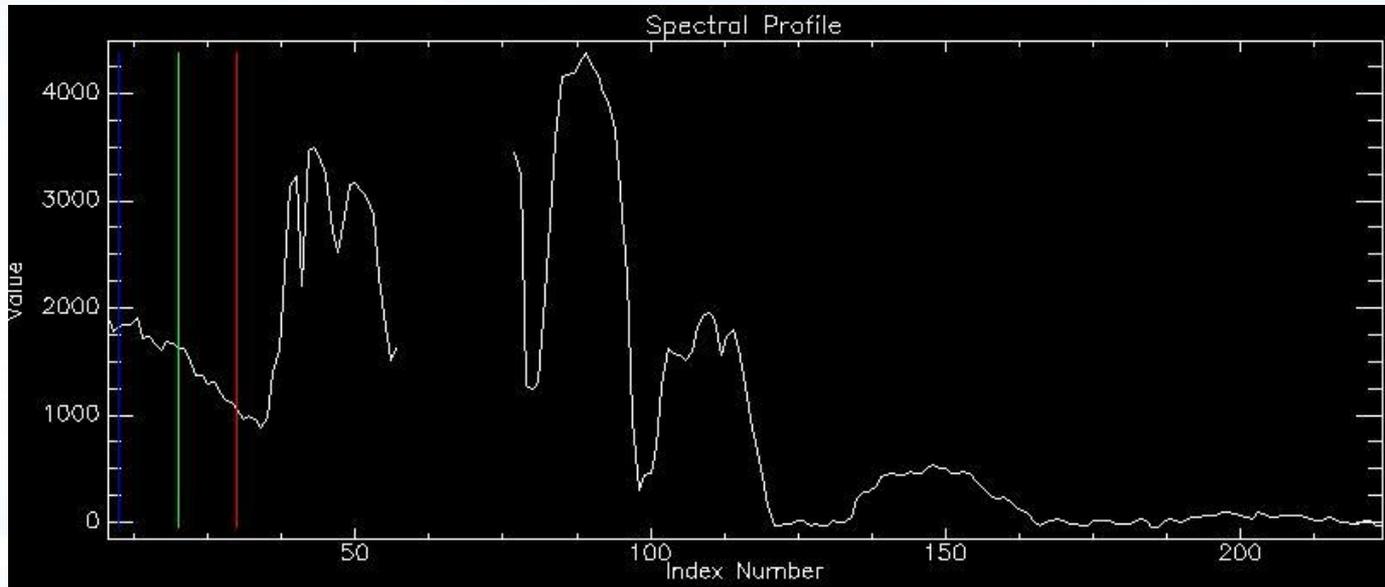


## Атмосферная коррекция изображения Nuregion в модуле FLAASH, вода



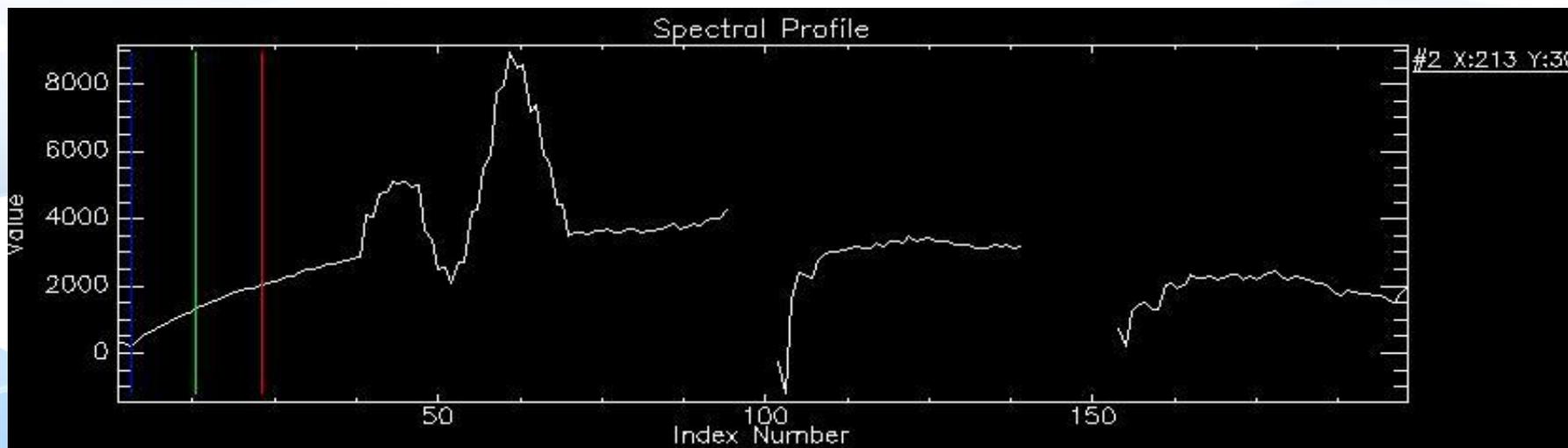
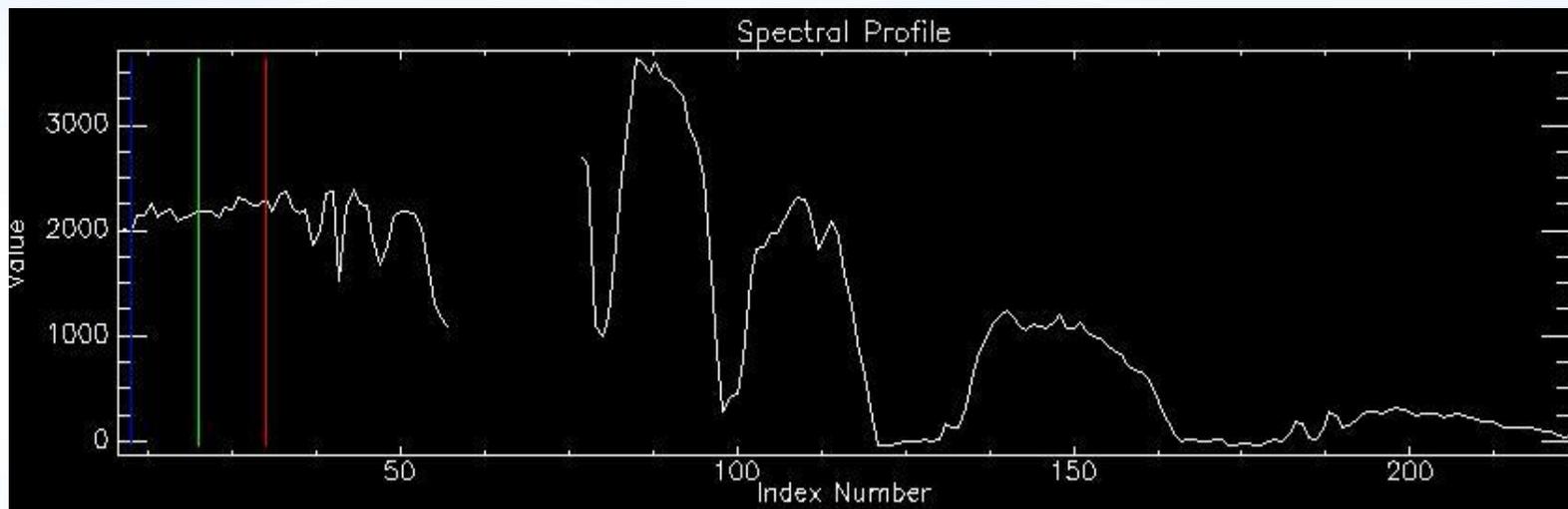


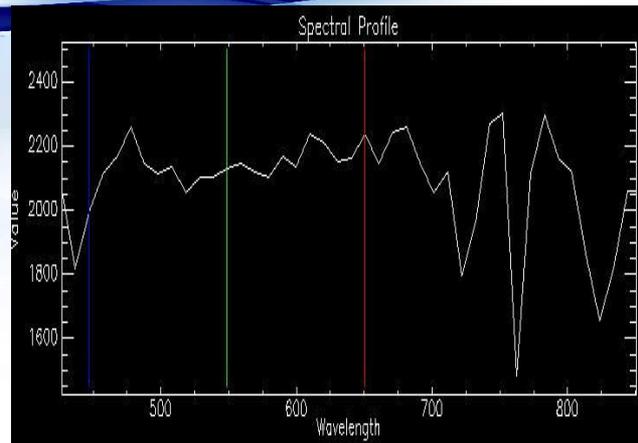
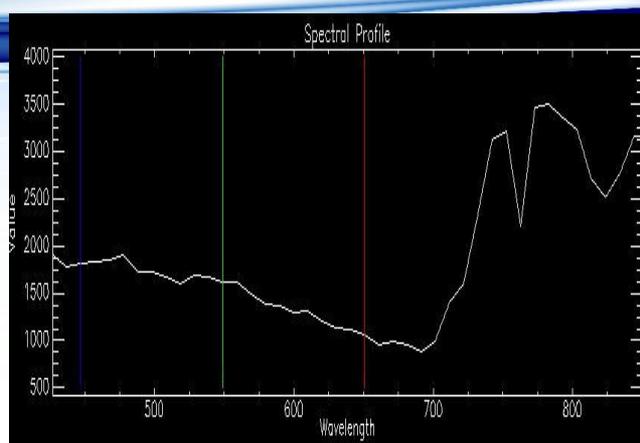
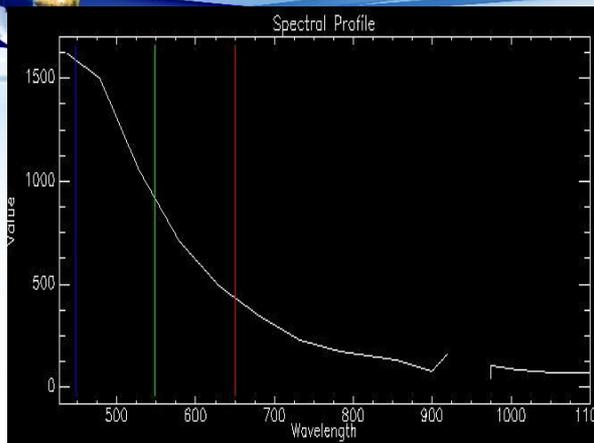
# Атмосферная коррекция изображения Nuregion в модуле FLAASH, растительность



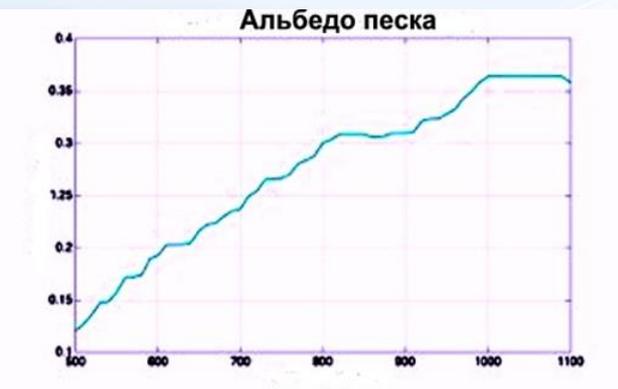
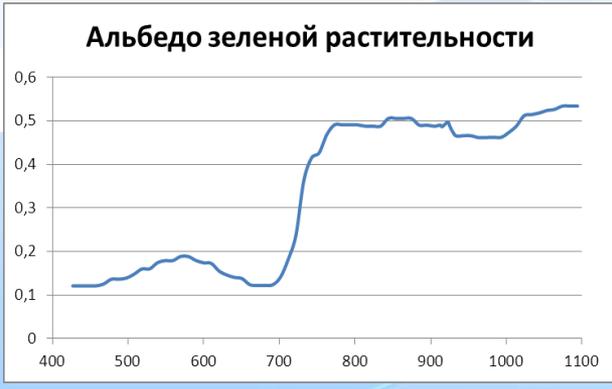
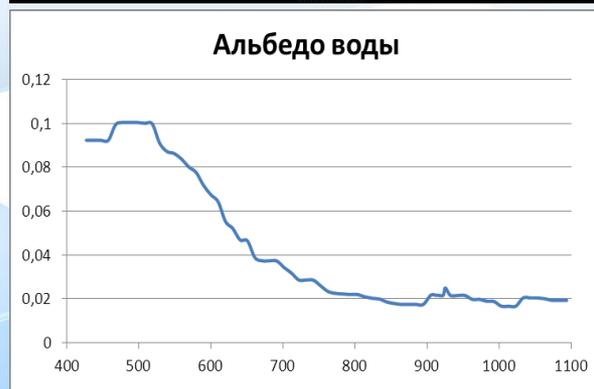
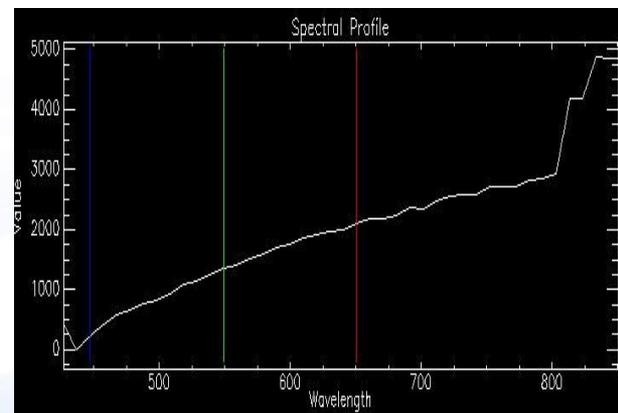
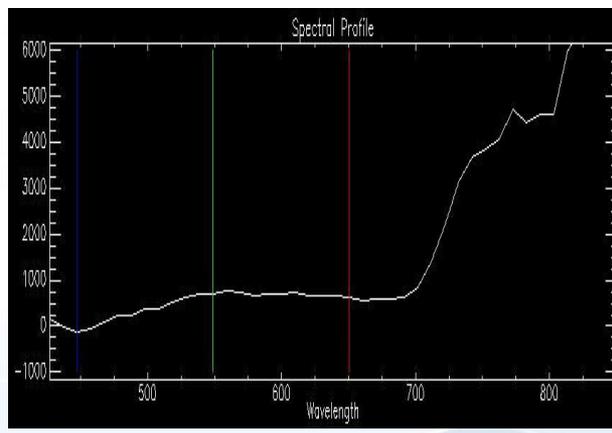
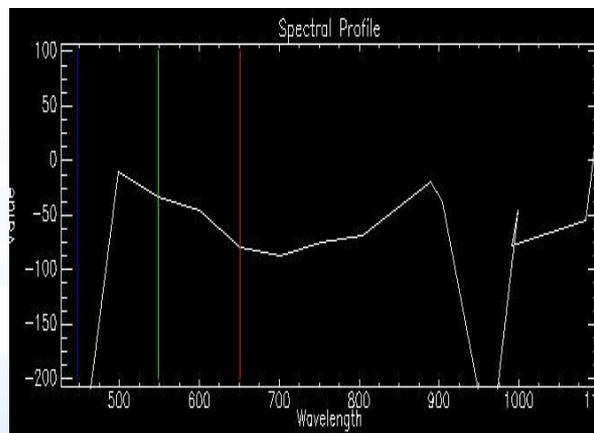


## Атмосферная коррекция изображения Hyperion в модуле FLAASH, песок





## Сравнение результатов FLAASH с быстрой методикой для диапазона 400-1100нм



# Спасибо за внимание!



**Институт прикладных физических проблем им. А.Н.Севченко  
Белорусского государственного университета,  
Минск, Беларусь.**

## **Отдел аэрокосмических исследований**



**Телефон: + 375 17 396 44 09  
Факс: + 375 17 396 57 26  
Сайт: <http://remsens.by>  
E-mail: [katkovskyl@gmail.com](mailto:katkovskyl@gmail.com)**