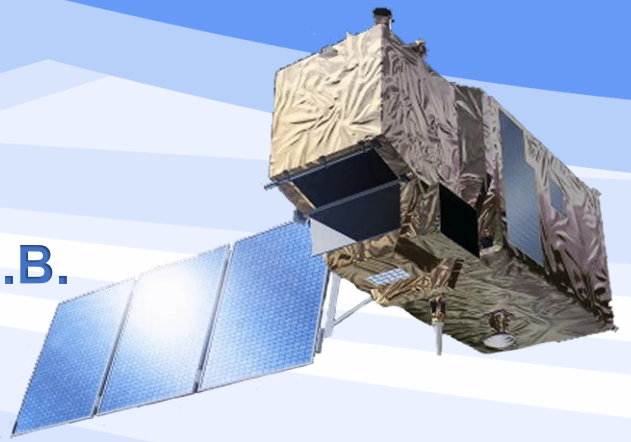
МОСКВА 9-13 НОЯБРЯ 2026
СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА
XXIV
МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ИКИ

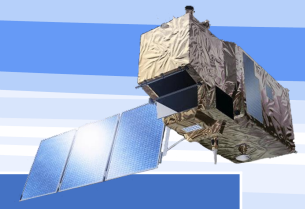


Катковский Л.В., Мартинов А.О., Станчик В.В.

СВЕРХБЫСТРАЯ АТМОСФЕРНАЯ КОРРЕКЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ SENTINEL-2

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

НИИПФП
1971



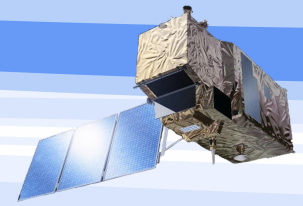
	Каналы Sentinel-2, используемые для атмосферной коррекции (нм)									
Обозначения	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B8A	B9
Центр канала, нм	443	490	560	665	705	740	783	842	865	945

Ввиду различного пространственного разрешения (10, 20, 60 м) указанных каналов Sentinel-2 исходное изображение уровня обработки L1C предварительно ресемплируется к одному разрешению 20 м.

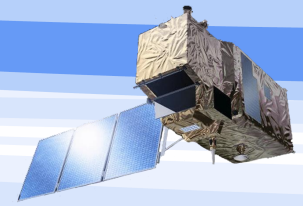
Входные (известные) параметры задачи						
Обозначение определение	θ_0 - зенитный угол Солнца, град	θ - зенитный угол наблюдения, град	ϕ азимутальный угол, град	$\Delta\lambda$- шаг по длине волны в вычислениях, нм	λ_0 - опорная длина волны, нм	λ_1, λ_2 - длины волн для задания альбедо исходного пикселя
Значение	31,009	9,923	126,141	1	550	400, 600

Начальное приближение для альбедо исходного пикселя

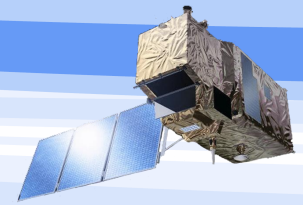
$$\rho_0(\lambda) = \rho_1 + \frac{\rho_2 - \rho_1}{\lambda_2 - \lambda_1}(\lambda - \lambda_1)$$



Перечень входных (известных) функций	
B_λ^*	Спектральная яркость Солнца на верхней границе атмосферы в ед. Вт/(м^2 мкм ср) с шагом Δλ (табличная)
$S_\lambda^{(i)},\ i=1,\ ...,\ 10$	Спектральные чувствительности используемых каналов Sentinel-2 (безразмерные, табличные)
$a_{H_2O}(\lambda)$	Заданная функция λ, используемая в формуле для определения содержание водяного пара в столбе атмосферы (табличная)
$b_{H_2O}(\lambda)$	Заданная функция λ, используемая в формуле для определения содержание водяного пара в столбе атмосферы (табличная)
$T_{O_3}^i(300DU)$	Пропускания озона в каналах Sentinel-2 (безразмерная, десять значений по числу каналов)



Неизвестные параметры задачи										
Обозначение определение	m_{H_2O} содержание водяного пара в столбе атмосферы, г/см^2	m_{O_3} содержание озона в столбе атмосферы в ед. DU	q параметр вклада атмосферной дымки	p параметр вклада атмосферной дымки	τ_{m0} оптическая толщина атмосферы по Рэлеевскому рассеянию на λ_0	τ_{a0} оптическая толщина атмосферы по аэрозольному рассеянию на λ_0	β показатель Ангстрема спектральной зависимости аэрозольной оптической толщины	τ_e оптическая толщина атмосферы по аэрозольному поглощению $\tau_{a\lambda}$	g_a средний косинус аэрозольной индикатрисы рассеяния	ρ_1, ρ_2 два значения альбедо исходного пикселя на λ_1, λ_2
Начальное значение	2,5	300	1,5	1,25	0,101	0,2	2,5	0,04	0,4	0,05, 0,15
Задаваемый диапазон значений	0,5 - 5	280-350	1-6	0,5-2,0	0,09-0,1	0,01-1,5	0-4	0-0,5	0,1-0,8	0-0,8



Исходное уравнение для яркости в канале мультиспектрального изображения:

$$B^{(i)} = \int_0^\infty S_\lambda^{(i)} B_\lambda d\lambda \Big/ \int_0^\infty S_\lambda^{(i)} d\lambda = \int_0^\infty S_{\lambda,\text{отн}}^{(i)} B_\lambda d\lambda \quad (1)$$

Где СПЭЯ на верхней границе атмосферы представлено следующей аналитической формулой:

$$B_\lambda \equiv B_\lambda(\mu,\mu_0,\varphi) = \left[B_{\text{атм},\lambda}(\mu,\mu_0,\varphi) + \frac{\rho_\lambda}{\pi} E_\lambda(\mu_0,\rho_\lambda) T_\lambda(\mu) \right] T_{\text{H}_2\text{O}}^\lambda\left(m_{\text{H}_2\text{O}}\right) T_{\text{O}_2}^\lambda\left(m_{\text{O}_2}\right) T_{\text{O}_3}^\lambda\left(m_{\text{O}_3}\right) \quad (2)$$

$T_{\text{H}_2\text{O}}^\lambda\left(m_{\text{H}_2\text{O}}\right), T_{\text{O}_2}^\lambda\left(m_{\text{O}_2}\right), T_{\text{O}_3}^\lambda\left(m_{\text{O}_3}\right)$ - пропускания водяного пара, кислорода и озона, соответственно

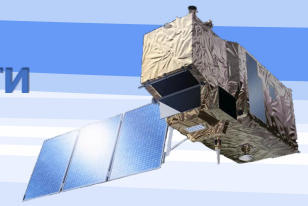
Пропускание водяного пара задается в виде:

$$T_{\text{H}_2\text{O}}^\lambda\left(m_{\text{H}_2\text{O}}\right) = a_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda)\ln\left(m_{\text{H}_2\text{O}}\right) + b_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda)$$

$a_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda), b_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda)$ - заданные таблично (заранее рассчитанные) функции длины волны

Пропускание озона в 10 каналах диапазона 443 – 945 нм имеет вид:

$$T_{O_3}^i(X) = T_{O_3}^i(300DU)\exp\left[-\alpha_i \cdot (X - 300)\right]$$



Аналитические выражения для яркости атмосферной дымки и освещенности поверхности Земли в уравнении (2) имеют следующий вид:

$$B_{\text{атм},\lambda}(\mu,\mu_0,\varphi)=\frac{\omega_\lambda B_\lambda^*}{4}\frac{x_\lambda(\gamma)}{\mu+\mu_0}\left\{1-\exp\left(-\tau_\lambda\left[\frac{1}{\mu_0}+\frac{1}{\mu}\right]\right)\right\}\left[1+q(\omega_\lambda\tau_\lambda)^p\right]$$

$$E_\lambda(\mu_0,\rho_\lambda)=\frac{4\pi\omega_\lambda B_\lambda^*\mu_0}{4+3(1-g_\lambda)(1-\rho_\lambda)\tau_\lambda}\left[\left(\frac{1}{2}+\frac{3}{4}\mu_0\right)+\left(\frac{1}{2}-\frac{3}{4}\mu_0\right)\exp\left(-\frac{\tau_\lambda}{\mu_0}\right)\right]+(1-\omega_\lambda)\pi B_\lambda^*\mu_0\exp(-\tau_\lambda/\mu_0) \qquad (3)$$

Оптические толщины, альбедо однократного рассеяния ω_λ и индикатриса рассеяния $x_\lambda(\gamma)$ рассчитываются следующим образом

$$\tau_\lambda=\tau_{\mathbf{m}\lambda}+\tau_{\mathbf{a}\lambda}+\tau_{\mathbf{e}\lambda} \qquad \tau_{\mathbf{m},\lambda}=\tau_{\mathbf{m0}}(\lambda_0/\lambda)^4 \qquad \tau_{\mathbf{a}\lambda}=\tau_{\mathbf{a0}}(\lambda_0/\lambda)^\beta \qquad \omega_\lambda=(\tau_{\mathbf{m}\lambda}+\tau_{\mathbf{a}\lambda})/(\tau_{\mathbf{m}\lambda}+\tau_{\mathbf{a}\lambda}+\tau_{\mathbf{e}\lambda})$$

$$x_\lambda(\gamma)=x_{\mathbf{m}}(\gamma)\tau_{\mathbf{m}\lambda}/(\tau_{\mathbf{m}\lambda}+\tau_{\mathbf{a}\lambda})+x_{\mathbf{a}}(\gamma)\tau_{\mathbf{a}\lambda}/(\tau_{\mathbf{m}\lambda}+\tau_{\mathbf{a}\lambda}) \qquad \gamma=-\mu\mu_0+\sqrt{(1-\mu^2)(1-\mu_0^2)}\cos\varphi$$

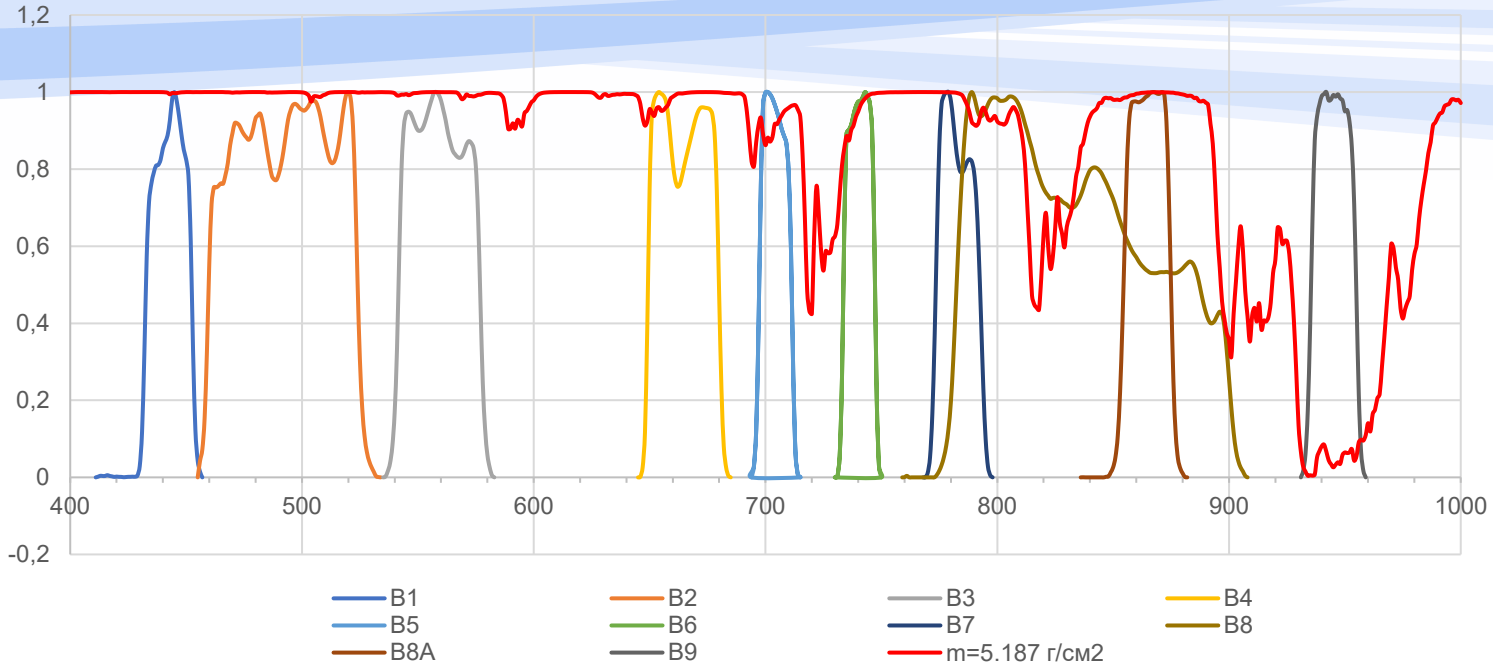
$$x_{\mathrm{m}}(\gamma)=\frac{3}{4}(1+\gamma^2) \qquad x_{\mathrm{a}}(\gamma)=(1-g_a^2)/(1+g_a^2-2g_a\gamma)^{3/2}$$

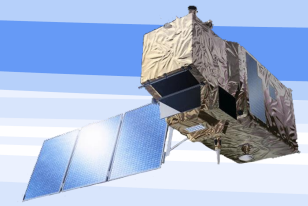
Для пропускания $T_\lambda(\mu)$ используем аналитические аппроксимации в следующем виде

$$T_\lambda(\mu)=T_\lambda^{dir}+T_\lambda^{dif} \qquad T_\lambda^{dir}=\exp(-\tau_\lambda/\mu) \qquad T_\lambda^{dif}=\tau_\lambda\exp(-u-\nu\tau_\lambda-w\tau_\lambda^2)$$

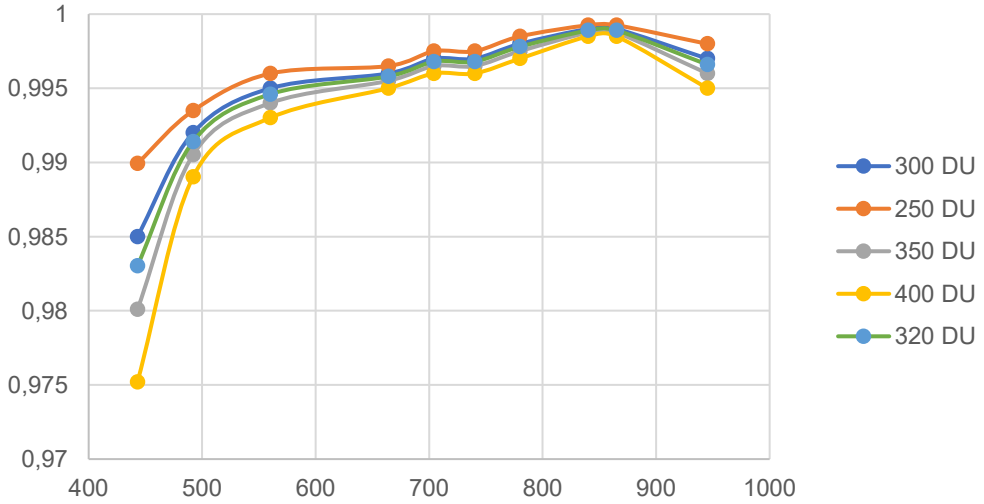
Параметры u, ν, w зависят только от косинуса зенитного угла наблюдения, μ и среднего косинуса индикатрисы

Пропускание H_2O и чувствительности каналов

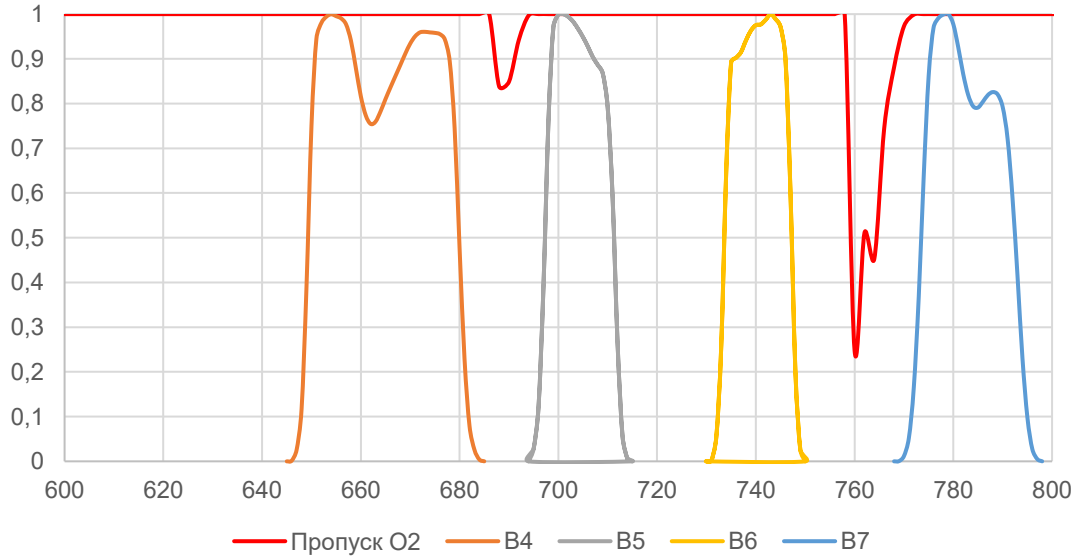


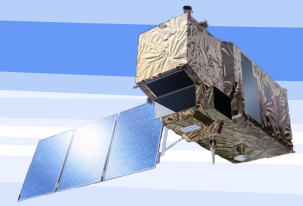


Пропускание озона



Пропускание кислорода и 4 канала Sentinel 2





Базовая точка (пиксель) на изображении, по которой определяются неизвестные параметры атмосферы может выбираться двумя способами. В первом способе используется темная водная поверхность (при наличии на снимке), на которой выбирается некоторая область интереса и рассчитывается ее средний спектр СПЭЯ, используемый для определения параметров атмосферы. Во втором способе проводится поиск по исходному изображению пикселя, СПЭЯ которого с наибольшей точностью аппроксимируется линейной функцией по длине волны λ.

Первым этапом алгоритма является определение содержания водяного пара в столбе атмосферы, которое определяется по соотношению сигналов MSI в каналах B8A, B9 (вне и в полосе поглощения H_2O, соответственно) над базовым пикселем.

На втором этапе атмосферной коррекции осуществляется поиск неизвестных параметров атмосферы и альбедо базового пикселя путем решения системы уравнений, число которых равного числу мультиспектральных каналов сенсора:

$$B^{(i)}_{\text{Sentinel}} = B^{(i)}, \quad i = 1,...,10 \qquad (4)$$

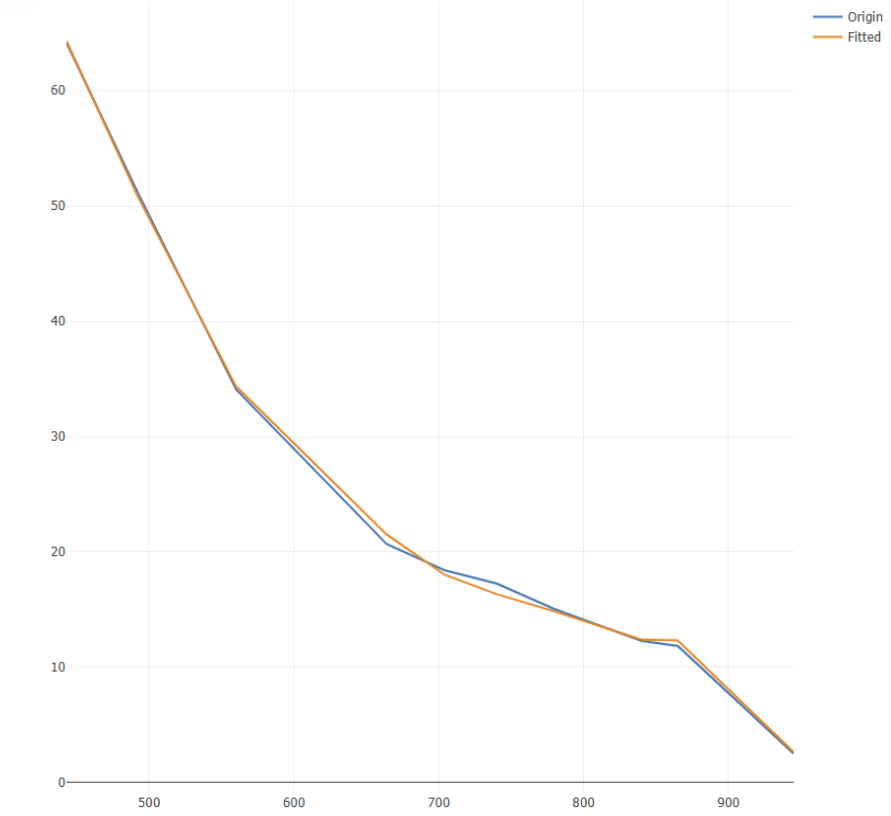
$B^{(i)}_{\text{Sentinel}}$ - СПЭЯ выбранной начальной точки, измеренное спутником, $B^{(i)}$ - теоретическое СПЭЯ (формулы (1), (2)).

В результате решения системы находятся следующие неизвестные параметры:

$$\text{X}, q, p, \tau_{\text{m0}}, \tau_{\text{a0}}, \beta, \tau_{\text{e}}, g_a, \rho_1, \rho_2 .$$

Последним этапом алгоритма является решение квадратного уравнения, (получаемого из (1) - (4), если в (3) пренебречь зависимостью от альбедо в знаменателе выражения для освещенности, $(1-\rho_\lambda) \approx 1$) для нахождения альбедо ρ_λ в каждом канале для каждого пикселя изображения (в предположении ламбертовского отражения поверхности) по его СПЭЯ при известных параметрах атмосферы.

Сравнение атмосферной коррекции (типичный результат) : зеленая кривая – предлагаемый метод (CATI), желтая – метод Sen2Cor для **КСЯ пикселя лиственного леса** (на фоне чувствительностей каналов и пропускания H_2O)



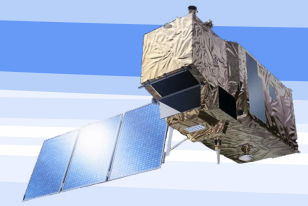
Результат фитирования при решении уравнения (4) спектра СПЭЯ базового пикселя (водной поверхности) Sentinel-2 и теоретического спектра (формулы (1), (2)).

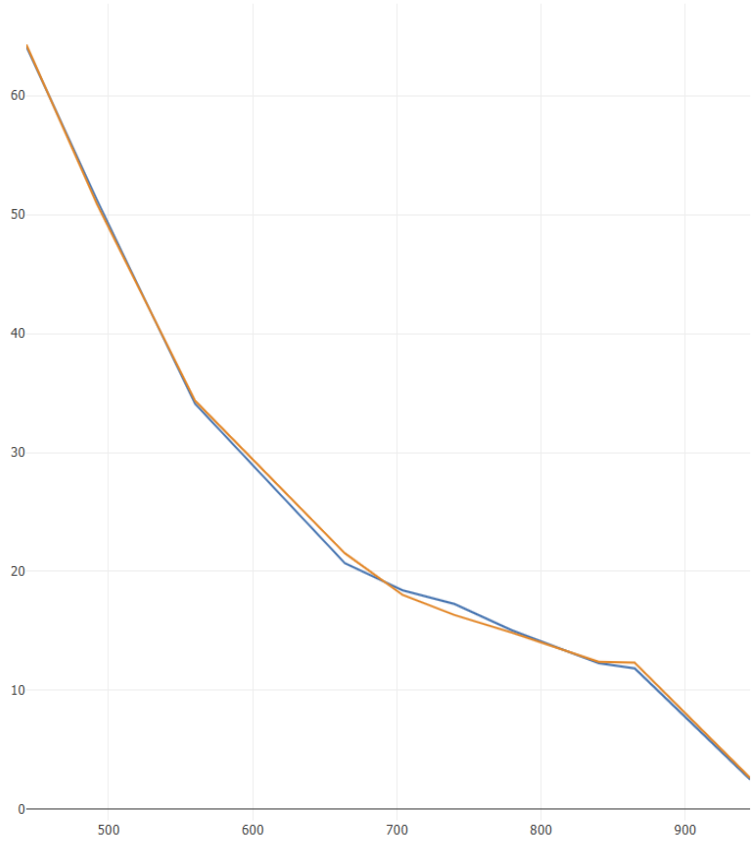


Зенитный угол солнца	Азитмутальный угол солнца	Зенитный угол съёмки	Азимутальный угол съёмки	mH2O	λ1	λ2
30,751°	160,571°	3,141°	218,404°	3,217	400	665

--	X	q	p	H2O_pow	Tau_a0	Beta	Tau_e	g_a	p_1	p_2
Старт	300.00	2.00	1.25	1.000	0.20	2.00	0.04	0.60	0.05	0.15
Диапазон	280 - 350	1 - 6	0.5 - 2.0	0.8 - 2	0.01 - 1.5	0 - 4	0 - 0.5	0.1 - 0.8	0 - 0.8	0 - 0.8
Результат	350.00	1.54	1.00	0.83	0.17	2.80	0.10	0.80	0.03	0.04

Сравнение атмосферной коррекции (типичный результат) : зеленая кривая – предлагаемый метод (CATI), желтая – метод Sen2Cor для **КСЯ терриконов отработанных горных пород** возле г. Солигорска, РБ





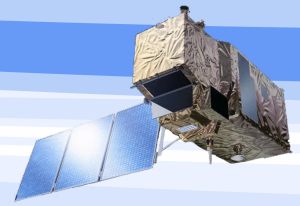
Фитирование исходного спектра СПЭЯ базового пикселя и модельного (теоретического) спектра

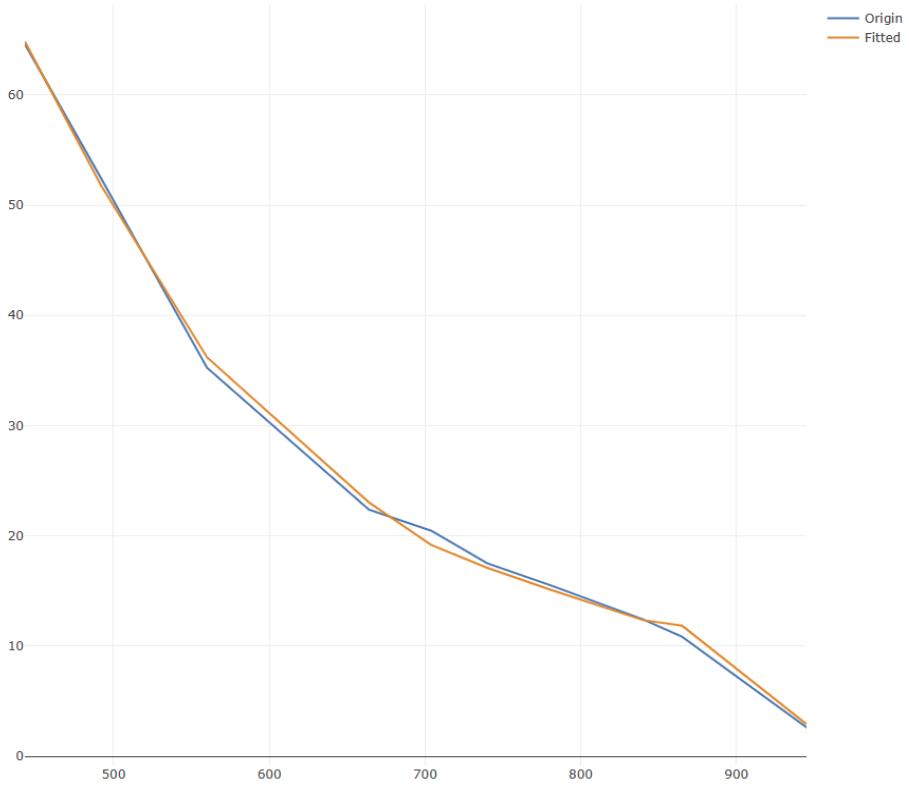


Зенитный угол солнца	Азитмутальный угол солнца	Зенитный угол съёмки	Азимутальный угол съёмки	mH2O	λ1	λ2
30,751°	160,571°	3,141°	218,404°	2,799	400	665

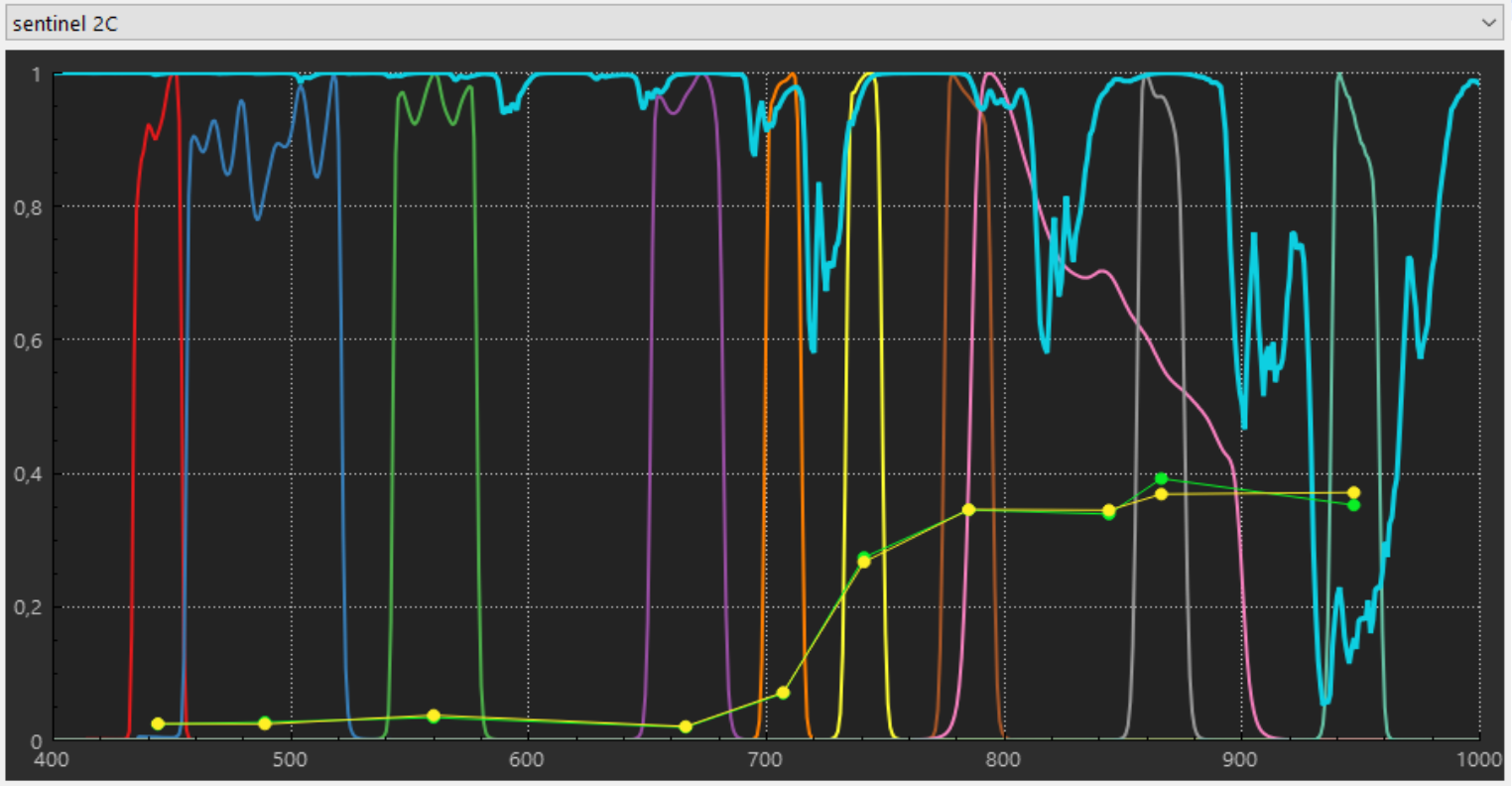
--	X	q	p	H2O_pow	Tau_a0	Beta	Tau_e	g_a	p_1	p_2
Старт	300.00	2.00	1.25	1.000	0.20	2.00	0.04	0.60	0.05	0.15
Диапазон	280 - 350	1 - 6	0.5 - 2.0	0.8 - 2	0.01 - 1.5	0 - 4	0 - 0.5	0.1 - 0.8	0 - 0.8	0 - 0.8
Результат	350.00	1.54	1.00	0.83	0.17	2.80	0.10	0.80	0.03	0.04

Сравнение атмосферной коррекции (типичный результат) : зеленая кривая – предлагаемый метод (CATI), желтая – метод Sen2Cor **для КСЯ пикселя хвойного леса**





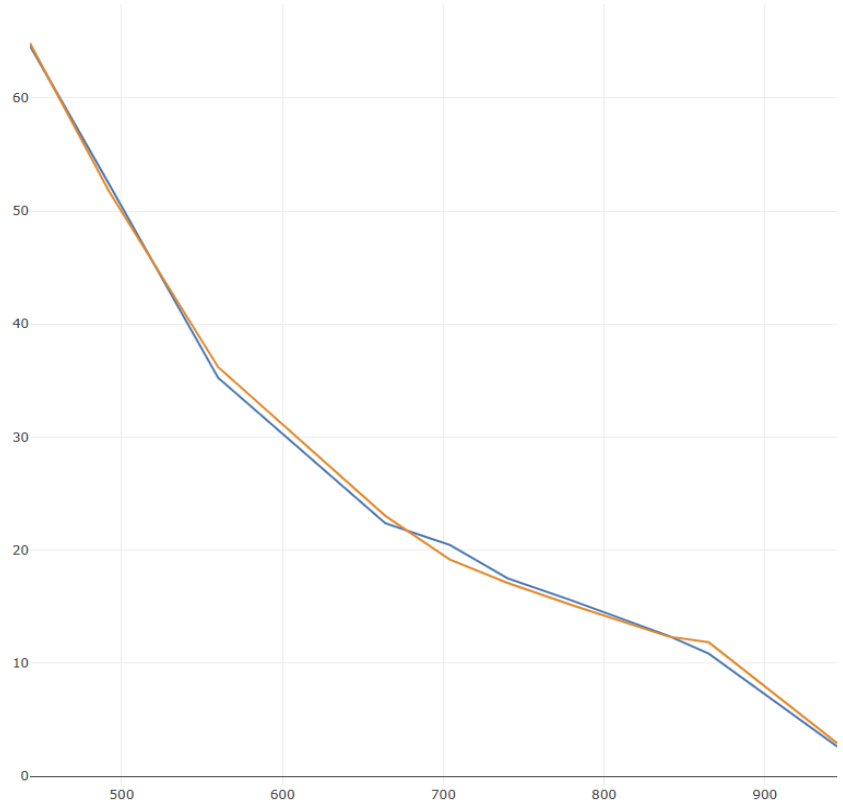
Результат фитирования при решении уравнения (4) спектра СПЭЯ базового пикселя (водной поверхности) Sentinel-2 и теоретического спектра (формулы (1), (2)).



Зенитный угол солнца	Азитмутальный угол солнца	Зенитный угол съёмки	Азимутальный угол съёмки	mH2O	λ1	λ2
30,751°	160,571°	3,141°	218,404°	2,696	400	665

--	X	q	p	H2O_pow	Tau_a0	Beta	Tau_e	g_a	p_1	p_2
Старт	300.00	2.00	1.25	1.000	0.20	2.00	0.04	0.60	0.05	0.15
Диапазон	280 - 350	1 - 6	0.5 - 2.0	0.8 - 2	0.01 - 1.5	0 - 4	0 - 0.5	0.1 - 0.8	0 - 0.8	0 - 0.8
Результат	350.00	2.50	1.58	0.76	0.10	0.00	0.10	0.64	0.04	0.04

Сравнение атмосферной коррекции (типичный результат) : зеленая кривая – предлагаемый метод (CATI), желтая – метод Sen2Cor **для КСЯ пикселя пашни**



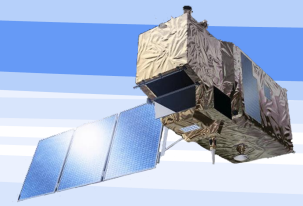
Фитирование исходного спектра СПЭЯ базового пикселя и модельного (теоретического) спектра

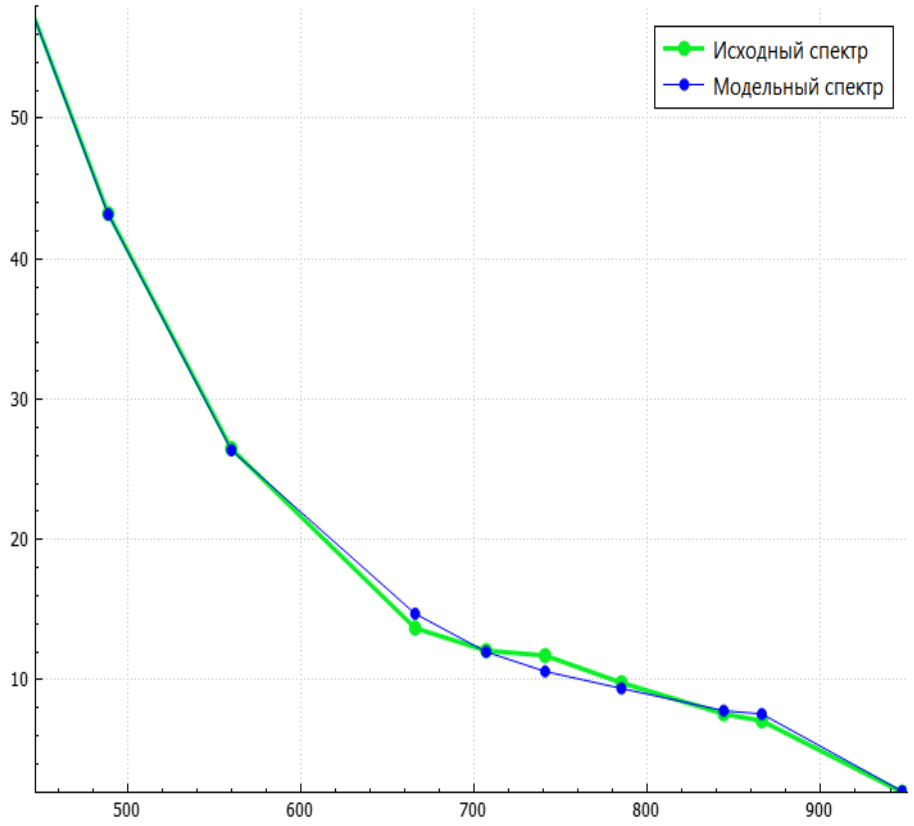


Зенитный угол солнца	Азитмутальный угол солнца	Зенитный угол съёмки	Азимутальный угол съёмки	mH2O	λ1	λ2
30,751°	160,571°	3,141°	218,404°	2,664	400	665

--	X	q	p	H2O_pow	Tau_a0	Beta	Tau_e	g_a	p_1	p_2
Старт	300.00	2.00	1.25	1.000	0.20	2.00	0.04	0.60	0.05	0.15
Диапазон	280 - 350	1 - 6	0.5 - 2.0	0.8 - 2	0.01 - 1.5	0 - 4	0 - 0.5	0.1 - 0.8	0 - 0.8	0 - 0.8
Результат	350.00	2.50	1.58	0.76	0.10	0.00	0.10	0.64	0.04	0.04

Сравнение атмосферной коррекции (типичный результат) : зеленая кривая – предлагаемый метод (CATI), желтая – метод Sen2Cor **для КСЯ пикселя зеленого поля**



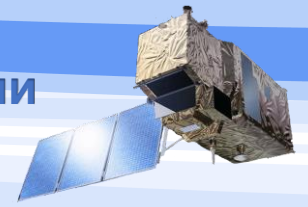


Фитирование исходного спектра СПЭЯ базового пикселя и модельного (теоретического) спектра



енитный угол солнц	тмутальный угол сол	енитный угол съёмк	мутальный угол съёи	mH2O	λ1	λ2
30,751°	160,571°	3,141°	218,404°	3,050	400	665

--	X	q	p	H2O_pow	Tau_a0	Beta	Tau_e	g_a	p_1	p_2
Старт	300.00	2.00	1.25	1.000	0.20	2.00	0.04	0.60	0.05	0.15
Диапазон	280 - 350	1 - 6	0.5 - 2.0	0.8 - 2	0.01 - 1.5	0 - 4	0 - 0.5	0.1 - 0.8	0 - 0.8	0 - 0.8
Результат	350.00	1.79	1.12	0.80	0.10	2.80	0.10	0.80	0.01	0.02



Статистические параметры сравнения результатов двух методов атмосферной коррекции

(по каналам): предлагаемого (CATI) и Sen2Cor по всем пикселям изображения

На дату 11.06.2026 на территорию Беларуси (центр кадра - район г. Солигорска), файл S2C_MSIL1C_20260611T092031_N0512_R093_T35UNU_20260611T113209.SAFE

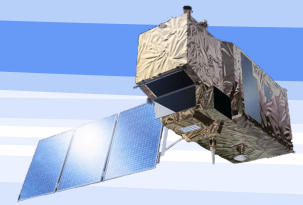
Метрики сравнения точности методов:

1. Среднеквадратическая ошибка (root mean squared error, RMSE)
2. Средняя абсолютная ошибка (mean absolute error, MAE)
3. Симметричная средняя абсолютная процентная ошибка (symmetric mean absolute percentage error, SMAPE)
4. Коэффициент детерминации (R2)
5. Среднее смещение оценки КСЯ (Bias)

Канал	RMSE	MAE	SMAPE (%)	R2 Score	Bias
B1	0.01124	0.01042	33.957	0.6357	-0.00991
B2	0.00319	0.00227	5.975	0.9798	-0.00162
B3	0.00611	0.00500	7.701	0.9541	-0.00446
B4	0.00332	0.00244	6.234	0.9920	0.00167
B5	0.00408	0.00306	3.101	0.9907	0.00130
B6	0.01778	0.01680	6.875	0.9537	0.01629
B7	0.01497	0.01360	5.046	0.9789	0.01238
B8	0.01132	0.00960	3.664	0.9879	0.00731
B8A	0.03971	0.03837	11.307	0.8565	0.03891
B9	0.04969	0.03802	11.155	0.7424	-0.02683

Pixel Distribution Breakdown:

Vegetation: 23064841(90.49%)
Not Vegetation: 2008708 (7.88%)
Water: 301140 (1.18%)
Unclassified: 113081 (0.44%)
Dark area pixels: 1217 (0.00%)
Skipped: 4651113 (15.43% of total image)



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Точность получаемых результатов атмосферной коррекции в сравнении с результатами поставщика данных (уровня обработки L2A) методом Sen2Cor достаточно высокая.
В частности, коэффициент детерминации по каналам, как правило, превышает значение 0,97 если сравнения проводить по отдельным классам изображений, на которые выполняется классификация данных Sentinel-2. (Vegetation, Not Vegetation, Water, Unclassified, Dark area pixels).

В отдельных случаях наблюдаются несколько большие по параметрам точности отклонения в двух каналах: B1 (443 нм) и B9 (945 нм), что объясняется недостаточным для неоднородных подстилающих поверхностей пространственным разрешением (60 м) в этих каналах и сложностью корректного учета поглощения водяного пара в канале B9.

Поскольку методика основывается на аналитических формулах, вычисления осуществляются с высокой скоростью (примерно 1 минута по сравнению с 18 минутами у Sen2Cor на офисном ПК для одного снимка)
При этом в нашем методе нет заранее насчитанных таблиц поиска, look-up-table.

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
Сайт: 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

НИИПФП
1971