

# Алгоритм восстановления спектра яркости солнечного излучения высокого разрешения по данным мультиспектрального сенсора для применения в спектральных измерениях с борта БПЛА

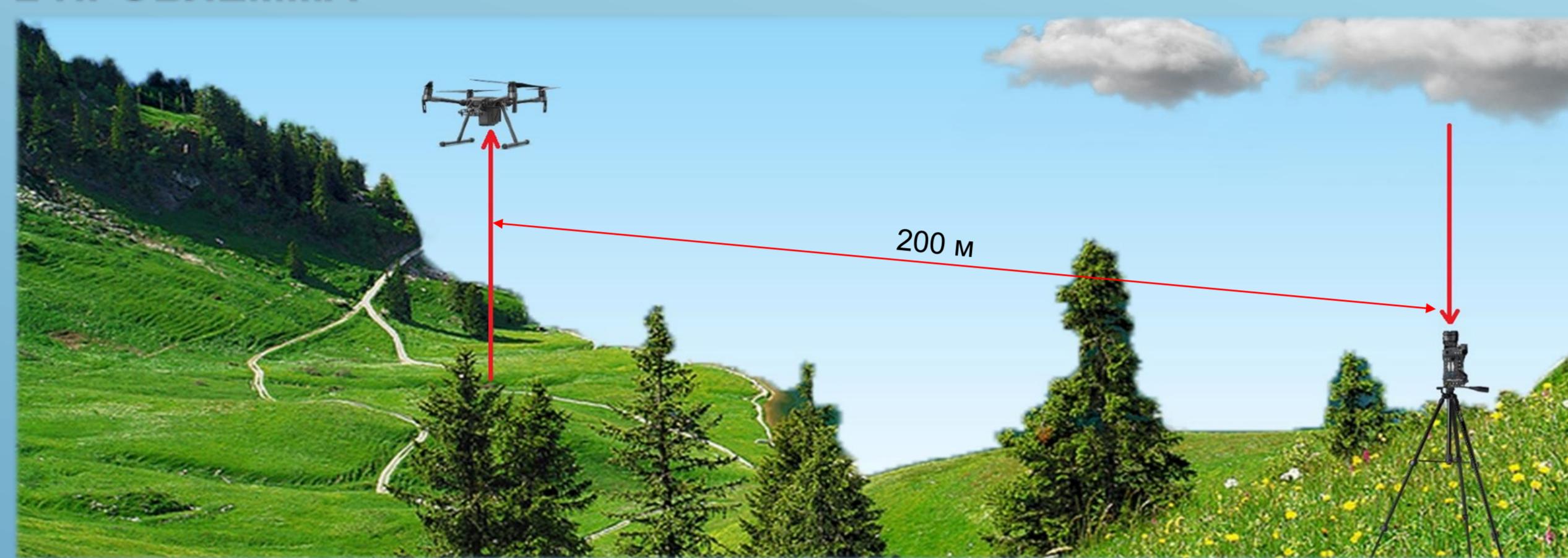
Гринадёров О.Д. Ломако А.А. Литвинович Г.С.

НИИ «Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко» Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь

## 1 ВВЕДЕНИЕ

В спектрометрических измерениях коэффициентов отражения естественных объектов (КСЯ) существует проблема географической удаленности спектрометра для измерения падающего излучения (эталонного спектра солнца) и спектрометра регистрирующего отражённое от исследуемого объекта излучение, что снижает точность расчетов КСЯ из-за вероятности получения различных условий регистрации. Дополнительно ограничения по полезной нагрузке беспилотных летательных аппаратов затрудняют установку традиционных спектрометров и дополнительного оборудования, прямо на БПЛА. Для решения этих проблем предложено применение компактного мультиспектрального детектора AS7341 массой около 8 г (с электрической связью) для интеграции в спектрометрическую систему на БПЛА. Основным ограничением данного сенсора является наличие всего 11 спектральных каналов, что затрудняет получение солнечного спектра высокого разрешения. В связи с этим актуальной задачей становится разработка алгоритмов восстановления спектра высокого разрешения на основе многоканальных данных. Применение таких методов позволяет компенсировать ограниченное число каналов, обеспечивая восстановление спектров солнечного излучения с высоким спектральным разрешением и делая спектрометрические измерения на борту беспилотных платформ применимыми на практике.

## 2 ПРОБЛЕММА



В спектрометрических измерениях коэффициентов отражения естественных объектов (КСЯ) возникает проблема, связанная с пространственным разнесением приборов: спектрометр, измеряющий падающее (эталонное) солнечное излучение, и спектрометр, регистрирующий отражённый от объекта сигнал, часто расположены на значительном расстоянии друг от друга. Это приводит к различию условий регистрации и, как следствие, снижает точность вычисления КСЯ.

## 4 МОДЕЛИРОВАНИЕ ДАННЫХ

Для проведения модельного эксперимента были использованы солнечные спектры высокого разрешения, зарегистрированные с помощью спектрометра FCP-05.

Для получения спектральных значений, соответствующих диапазонам чувствительности каналов мультиспектрального сенсора AS7341, исходный спектр  $\text{Spec}(\lambda)$  был преобразован в соответствии со следующей формулой:

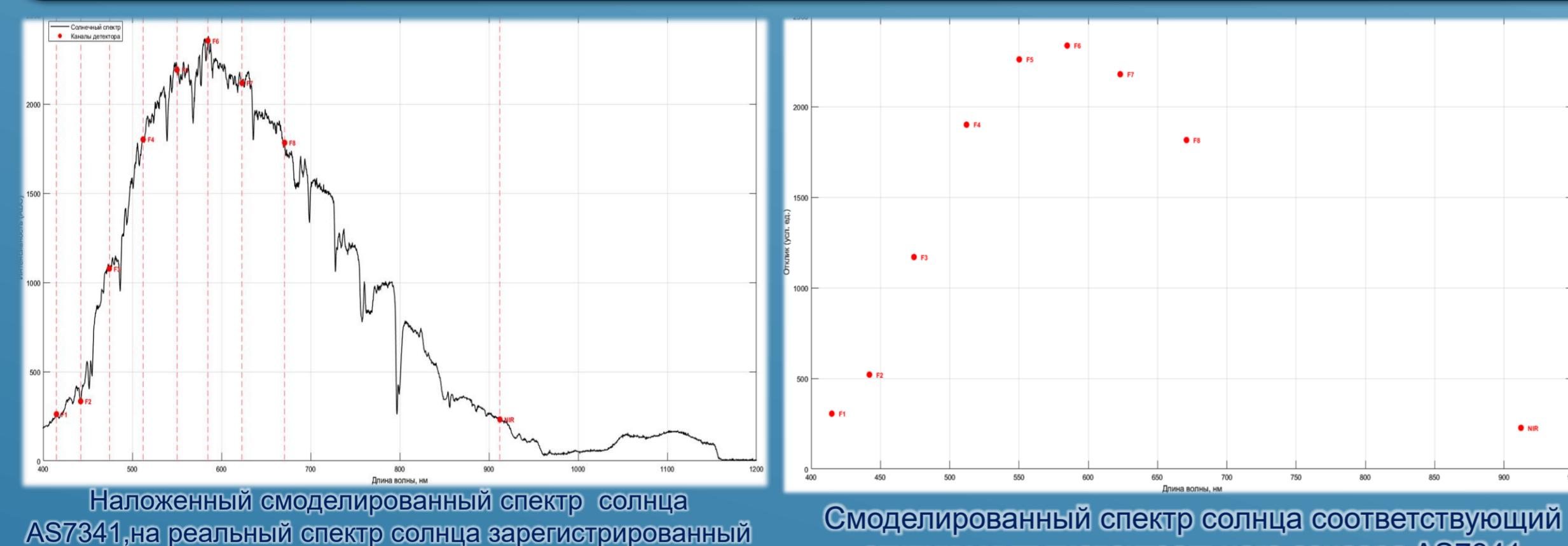
$$\frac{\sum_{\lambda} (\text{Spec}(\lambda) \cdot R(\lambda))}{\sum_{\lambda} P(\lambda)} = B(\lambda)$$

где:

- $\text{Spec}(\lambda)$  - спектр солнечного излучения, зарегистрированный спектрометром FCP-05;
- $R(\lambda)$  - функция спектральной чувствительности соответствующего канала сенсора AS7341;
- $P(\lambda)$  - площадь под кривой функции чувствительности данного канала.

Таким образом был смоделирован спектр, регистрируемый сенсором AS7341.

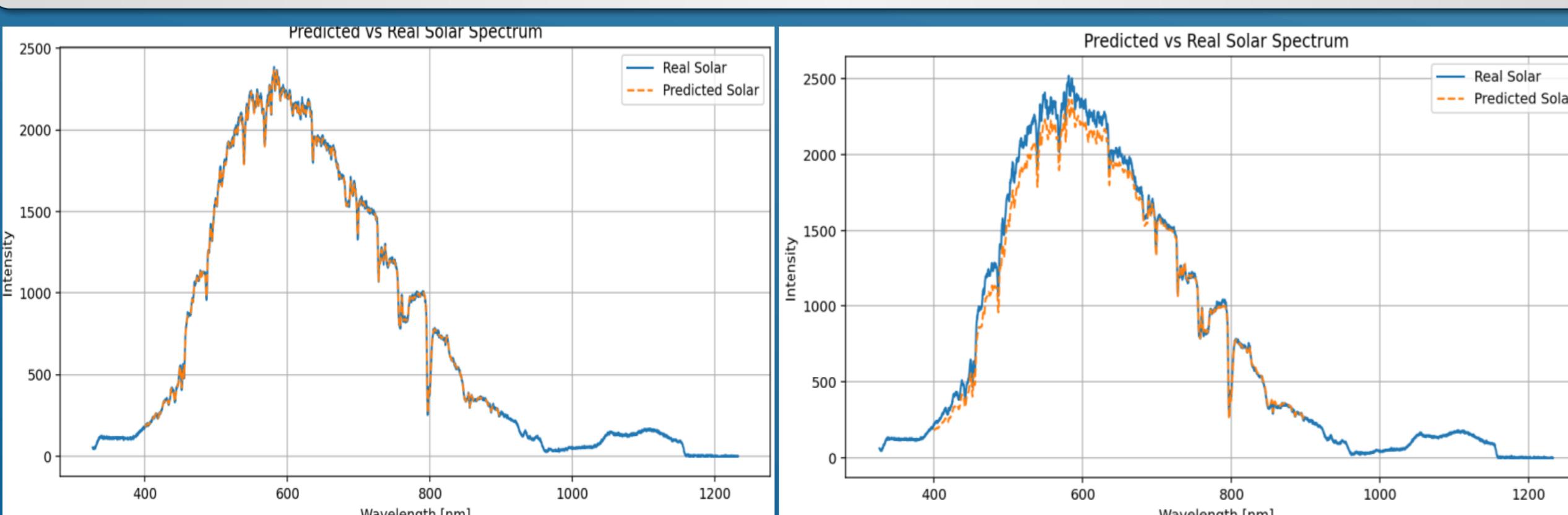
На рисунке ниже приведено сравнение эталонного солнечного спектра, зарегистрированного спектрометром FCP-05, и смоделированного спектра, соответствующего отклику мультиспектрального сенсора AS7341.



## 6 ВОСТАНОВЛЕНИЕ ДАННЫХ

Ниже приведены результаты восстановления солнечных спектров высокого разрешения по данным мультиспектрального сенсора AS7341. На графиках показано сравнение восстановленных спектров с эталонными спектрами, зарегистрированными на FCP-05.

Визуальный анализ графиков показывает, что восстановленные спектры хорошо повторяют форму эталонных, что свидетельствует о корректном извлечении спектральных особенностей. Однако наблюдается вертикальное смещение, то есть интенсивность восстановленного сигнала несколько отличается от эталонного.



Тестовая выборка 1, восстановленный спектр солнца наложенный на эталонный

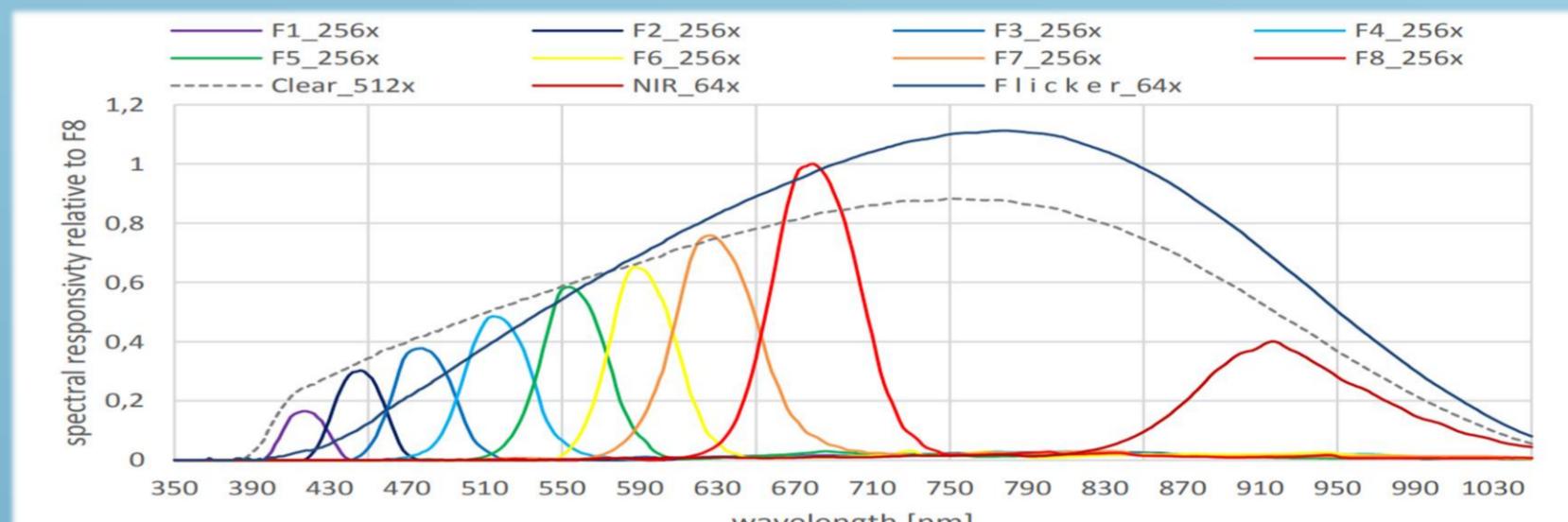
Тестовая выборка 2, восстановленный спектр солнца наложенный на эталонный

## 3 МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫЙ СЕНСОР

AS7341 – 11-канальный спектральный датчик

Характеристики:

- Диапазон чувствительности: 350–1000 нм
- 8 каналов - видимый диапазон, 1 NIR, 1 интегральный, 1 для обнаружения мерцания (50/60 Гц)
- Интегрированные нанооптические фильтры (CMOS-технология)
- I<sup>2</sup>C-интерфейс для управления и передачи данных
- Компактный корпус: 3.1 × 2.0 × 1.0 мм, 8 г (с электрической связью)

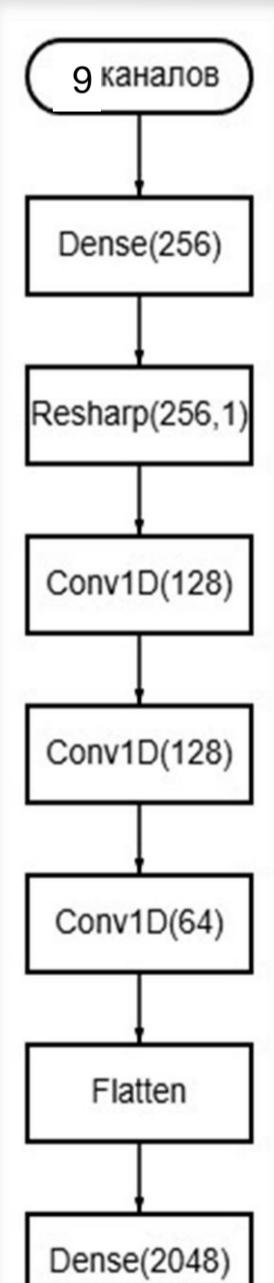


Спектральная чувствительность мультиспектрального сенсора AS7341

## 5 ОБУЧЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ

На основе полученных пар спектров - эталонных (зарегистрированных спектрометром FCP-05) и соответствующих им спектров, смоделированных по отклику мультиспектрального сенсора AS7341, была сформирована обучающая выборка, содержащая 1500 пар спектров. Для решения задачи восстановления спектров высокого разрешения по данным мультиспектрального сенсора была разработана и обучена сверточная нейронная сеть (CNN) на основе архитектуры ResNet.

Архитектура нейросетевой модели включает следующие слои: Вход (9 каналов) – подаются данные, исключая каналы мерцания и интегральный; Dense (256) - полно связанный слой, увеличивающий размерность признакового пространства до 256 нейронов; Reshape (256, 1) - преобразование данных для подачи в сверточные слои; Conv1D (128) - первый сверточный слой, выделяющий локальные закономерности с помощью 128 фильтров; Conv1D (128) - второй сверточный слой, усиливающий детекцию сложных признаков; Conv1D (64) - слой, уменьшающий размерность признаков при сохранении информативности; Flatten — преобразует многомерный тензор признаков в одномерный вектор; Dense (2048) - финальный полно связанный слой, объединяющий выделенные признаки и формирующий выходной спектр.



## 7 КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ

Количественная оценка точности восстановления показала, что во всех трёх выборках коэффициент детерминации  $R^2$  находится в диапазоне от 0.9822 до 0.9998, что указывает на практически полное совпадение формы восстановленных и эталонных спектров. Значения среднеквадратической ошибки (RMSE) варьируются от 8.45 до 98.32, что в относительных единицах (RMSE деленное на среднее значение сигнала  $\bar{y}$  и умноженное на 100%) составляет от 0.68% до 7.45%. Во второй выборке наблюдается увеличение RMSE, обусловленное вертикальным смещением восстановленного спектра относительно эталонного. Таким образом, количественный анализ показывает, что форма спектрального сигнала воспроизводится корректно, однако в отдельных случаях отмечается вертикальное смещение

1. Среднеквадратичная ошибка (RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

2. Коэффициент детерминации ( $R^2$ )

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}$$

где:  
 $y_i$  - истинные значения  
 $\hat{y}_i$  - предсказанные значения  
 $\bar{y}$  -  $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$  - среднее значение реальных данных  
 $N$  - количество точек спектра

Тестовая выборка	RMSE	$R^2$	Вывод
1	8.45 (0.68%)	0.9998	Почти идеальное совпадение
2	98.32 (7.45%)	0.9822	Форма спектра совпадает, но есть вертикальное смещение
3	9.93 (0.75%)	0.9988	Почти идеальное совпадение