



ПОЛЯРНЫЙ
ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ



МУРМАНСКИЙ
АРКТИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

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

Разработка модели солнечного излучения МЕУВМ

Б. Е. Прохоров¹, О. В. Золотов², Ю. В. Романовская², А. А. Татарников^{1,2}, Ю. А. Шаповалова^{1,3}

¹Научно-исследовательская лаборатория «Компьютерное моделирование физических процессов в
околоземной среде», Мурманский арктический университет, г. Мурманск, Россия

²Кафедра информационный технологий, Мурманский арктический университет, г. Мурманск, Россия

³Лаборатория радиопросвещивания, Полярный геофизический институт, г. Мурманск, Россия

г. Москва, 10-14 ноября 2025 г.

Введение

В Мурманском арктическом университете была разработана эмпирическая модель солнечного крайнего ультрафиолетового и далёкого ультрафиолетового излучения **Murmansk Extra-Ultraviolet Model – MEUVM**.

Модель MEUVM описывает спектр солнечного радиоизлучения для диапазона длин волн **0-190 нм** с шагом **1 нм** и использует в качестве входного параметра значение потока солнечного излучения на длине волны **10.7 см** (индекс $F_{10.7}$).

Для построения модели использовались данные о солнечном излучении спутниковой миссии TIMED [1] и данные индекса $F_{10.7}$ из базы данных OMNI [2] за период с **8 февраля 2002 г.** по **31 декабря 2024 г.**

Достоинства модели МЕUVM

1. Описывает спектр солнечного радиоизлучения в диапазоне длин волн 0-190 нм с шагом 1 нм.
2. Осуществляет расчёт спектра потока солнечного радиоизлучения как для одного значения входного параметра, так и для их массива.
3. Сопровождает результаты расчёта метаинформацией, описывающей параметры проведения расчёта, включая:
 - единицы измерения индекса $F_{10.7}$;
 - единицы измерения длин волн спектра;
 - единицы измерения потока солнечного радиоизлучения;
 - значения входных параметров;
 - нижние и верхние границы спектральных интервалов и их центры.
4. Устанавливается стандартным образом с помощью менеджера пакетов PIP [3].
5. Размещена в стандартном репозитории пакетов PyPI [4].

Варианты модели MEUVM

При построении модели рассматривались три варианта реализации, получившие широкое распространение в практике построения эмпирических моделей. Для построения модели MEUVM использовались все три подхода.

- 1) **MEUVM-ВА**: данные для каждой линии спектра разбивались на интервалы упорядочивания по значениям индекса $F_{10.7}$ и для каждого такого интервала модельным расчётом является скалярное значение - взвешенное среднее интервала.
- 2) **MEUVM-BR**: данный подход похож на MEUVM-ВА, но вместо среднего значения в интервале строится модель линейной регрессии.
- 3) **MEUVM-R**: отсутствует разбиение данных на интервалы. Весь набор данных наблюдений аппроксимируется моделью однофакторной линейной регрессии.

Варианты реализации модели MEUVM Murmansk Extra-Ultraviolet Model

Аппроксимация константой
на каждом интервале
для каждой линии

$$F_i = \text{const}_i$$

Аппроксимация линейной
регрессией на каждом
интервале для каждой линии

$$F_i = B_{0i} \cdot F_{10.7} + B_{1i}$$

Аппроксимация линейной
регрессией для каждой линии
для всего диапазона $F_{10.7}$

$$F = B_0 \cdot F_{10.7} + B_1$$

Схема построения модели MEUVM-VA

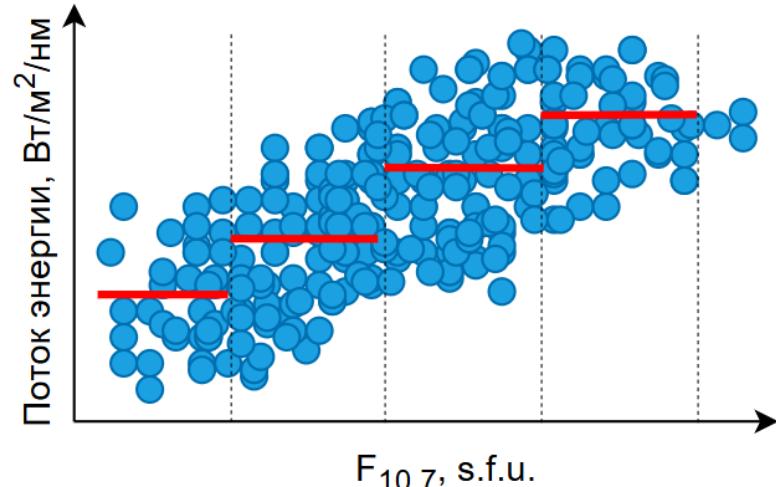


Схема построения модели MEUVM-BR

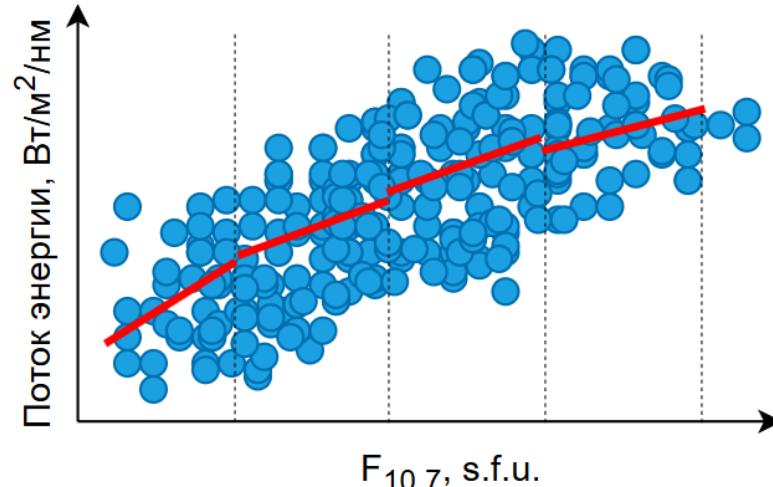
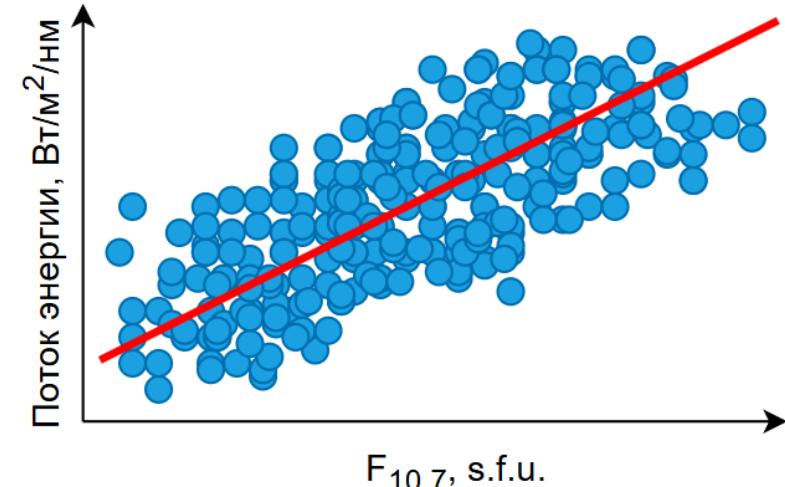
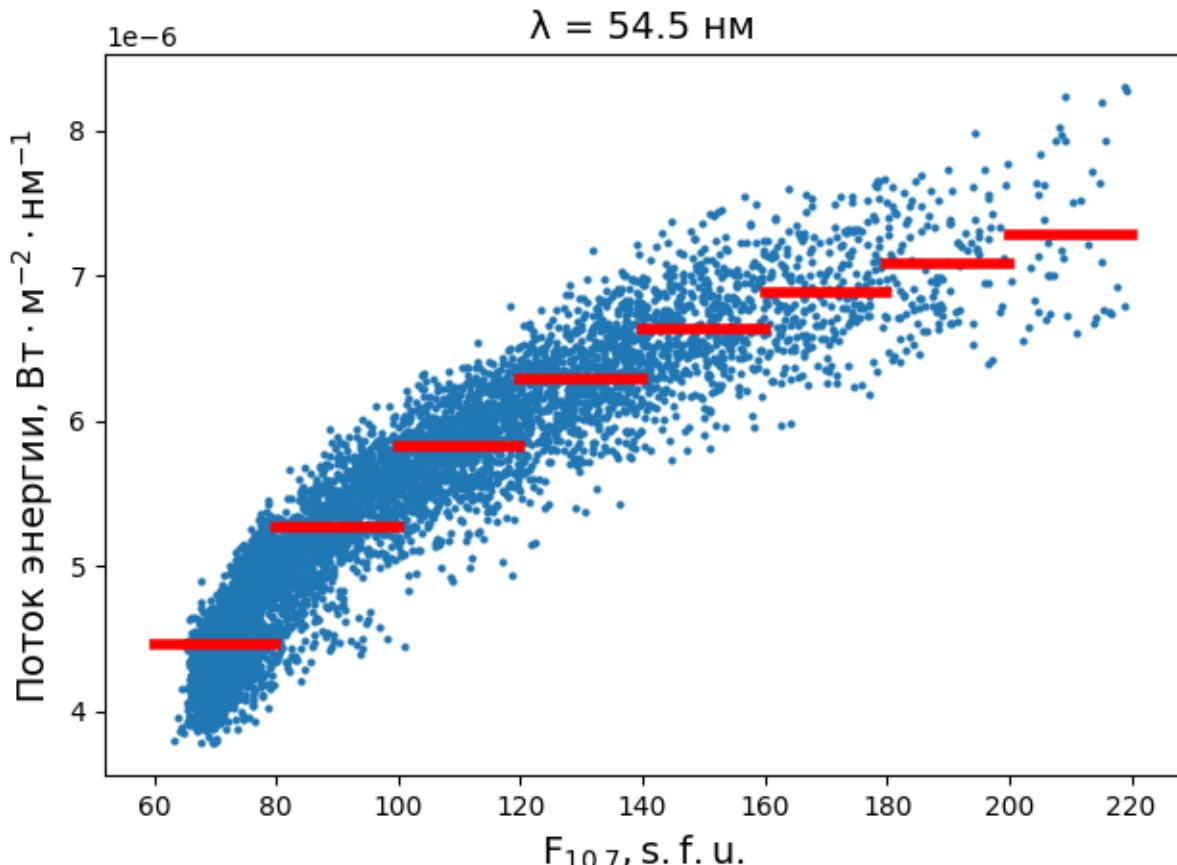


Схема построения модели MEUVM-R

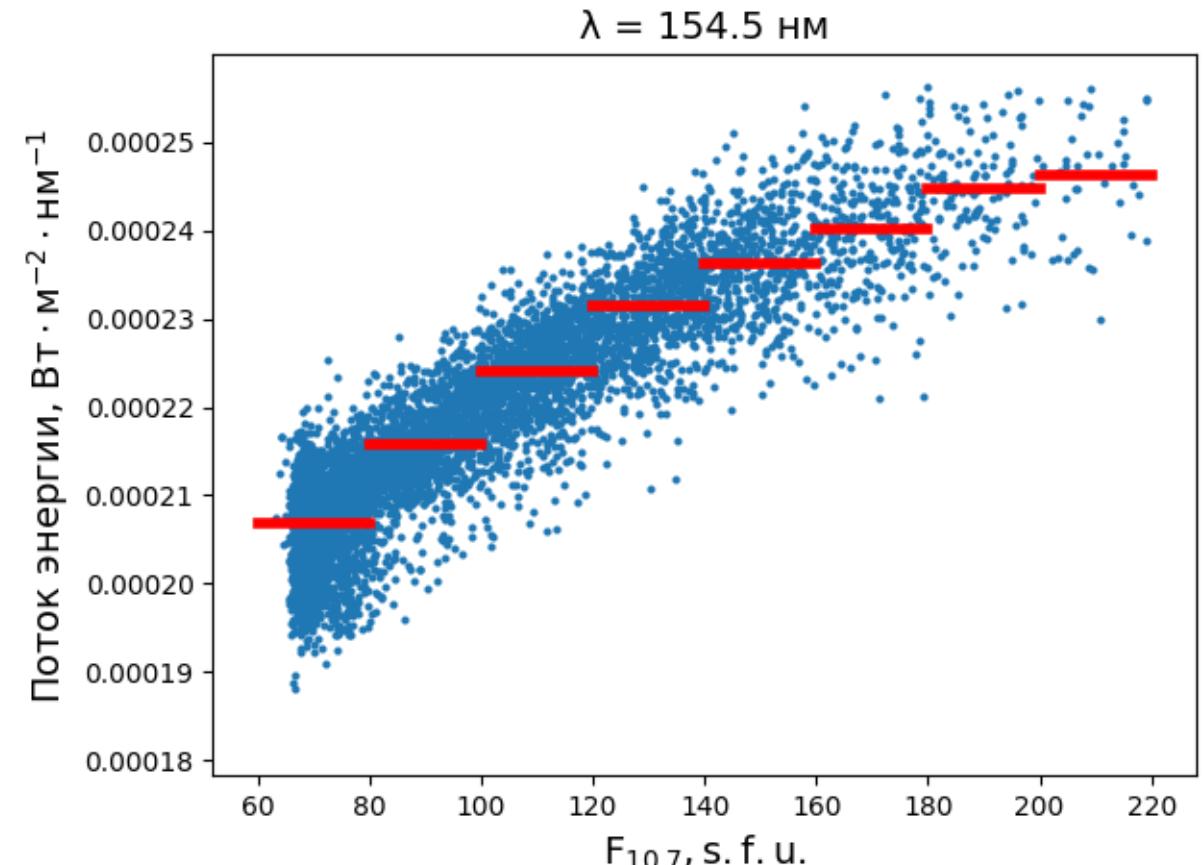


Результаты моделирования с использованием модели MEUVM-VA

Интервал 54-55 нм
(крайнее ультрафиолетовое излучение)

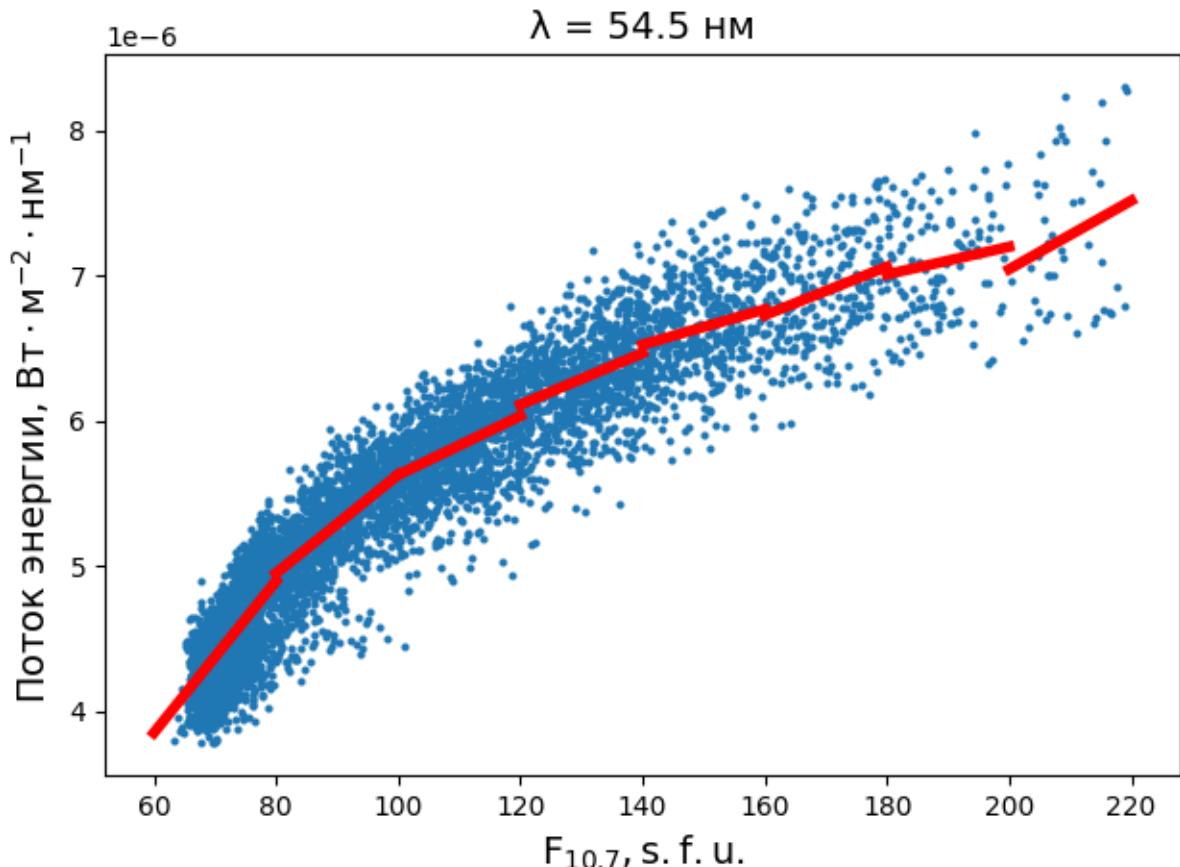


Интервал 154-155 нм
(далёкое ультрафиолетовое излучение)

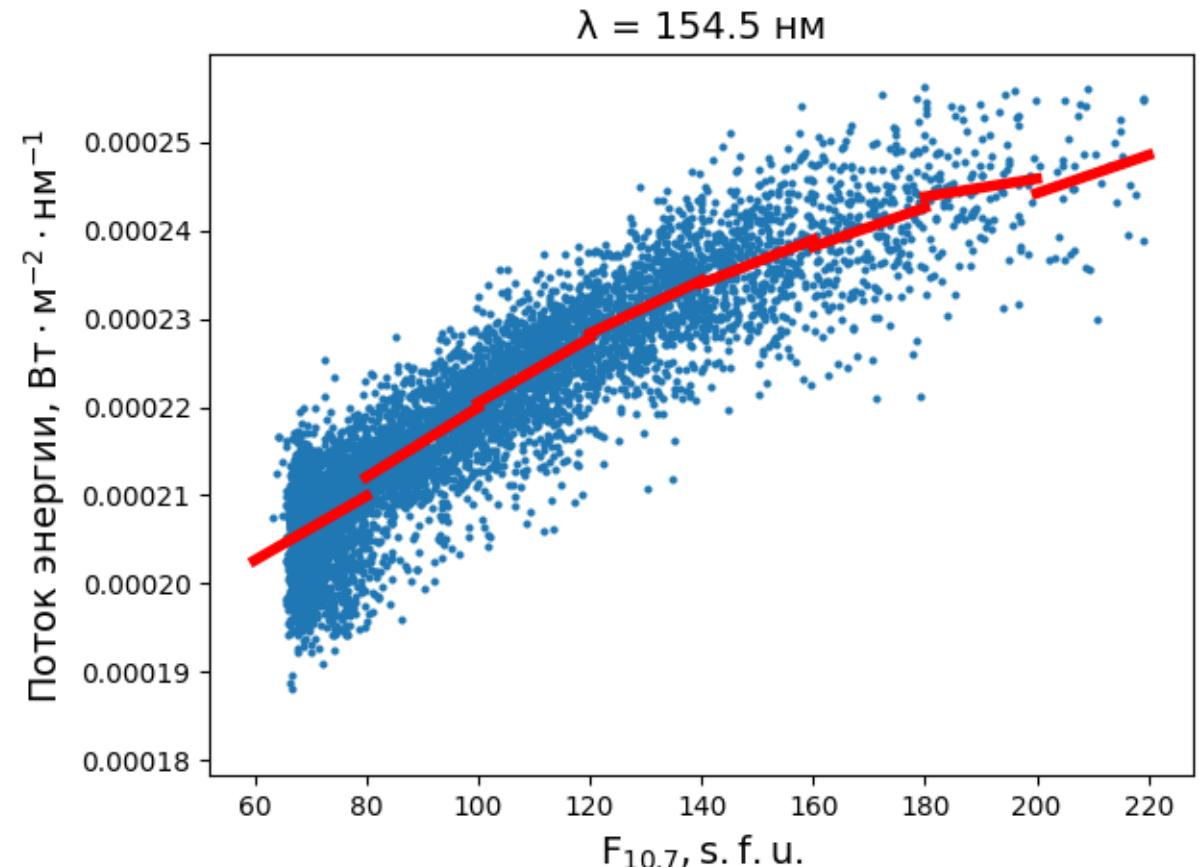


Результаты моделирования с использованием модели MEUVM-BR

Интервал 54-55 нм
(крайнее ультрафиолетовое излучение)

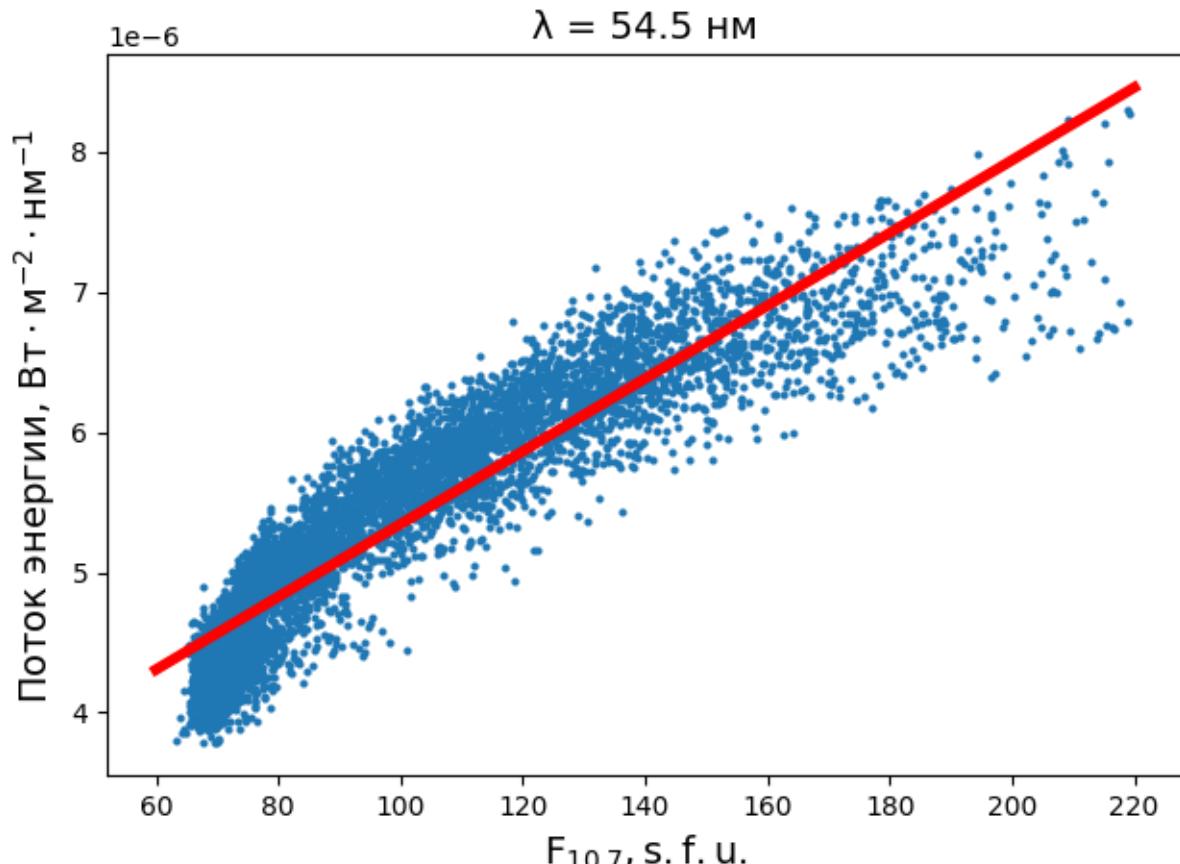


Интервал 154-155 нм
(далёкое ультрафиолетовое излучение)

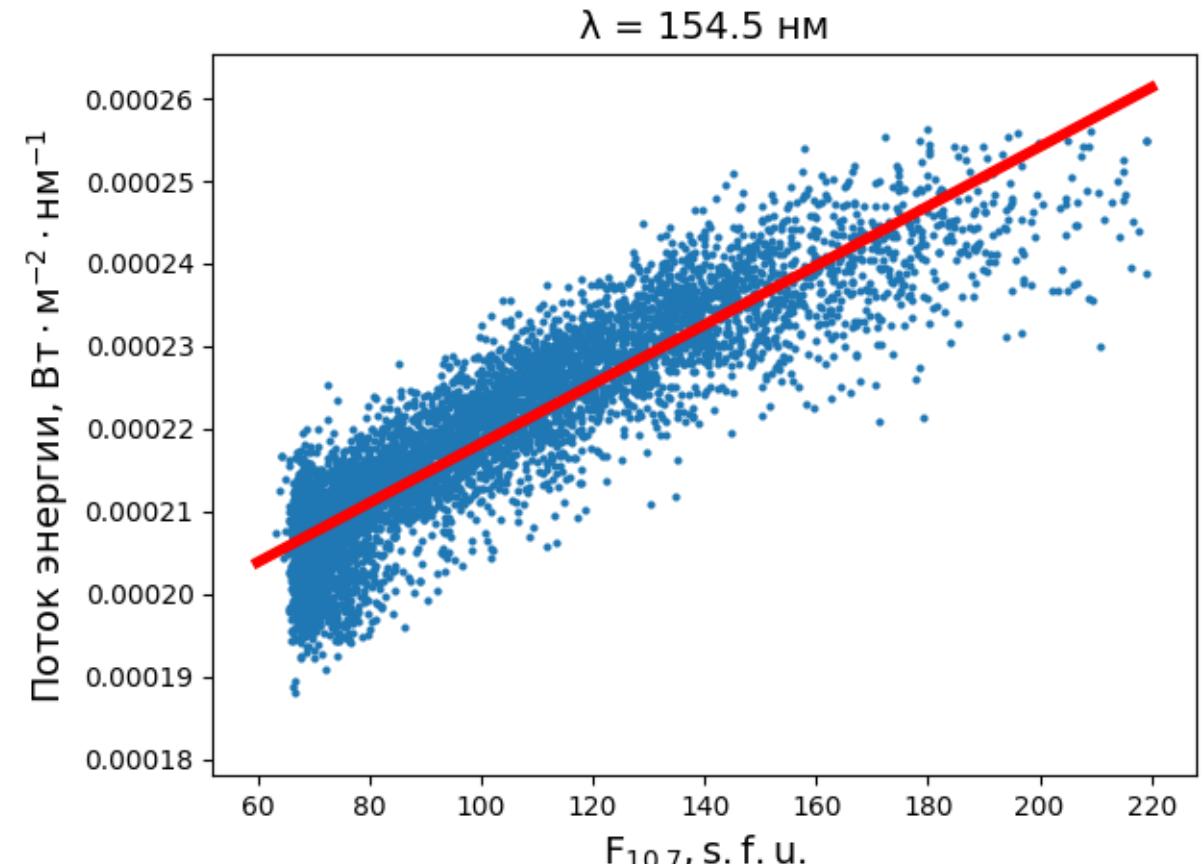


Результаты моделирования с использованием модели MEUVM-R

Интервал 54-55 нм
(крайнее ультрафиолетовое излучение)



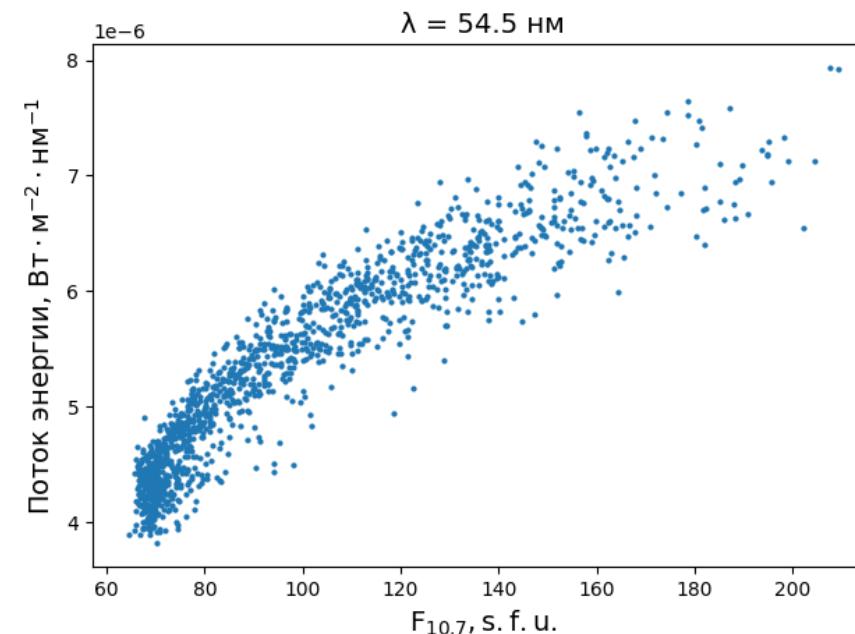
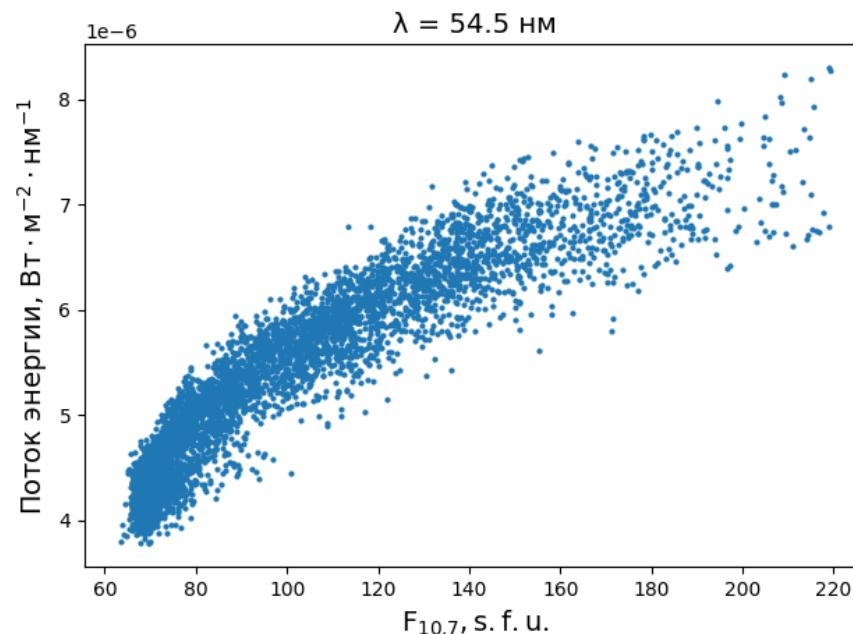
Интервал 154-155 нм
(далёкое ультрафиолетовое излучение)



Оценка качества модели

В качестве критерия оценки качества построенных моделей использовался коэффициент детерминации R^2 .

Весь набор данных был разделён на тренировочную и тестовую выборки в соотношении 80% / 20%. По тренировочной выборке строилась модель, по тестовой выборке оценивалось качество модели.



Тренировочная (слева) и тестовая (справа) выборки для данных из интервала 54-55 нм

Оценка качества модели МЕУВМ-ВА

Метрика R^2 для модели МЕУВМ-ВА

R^2

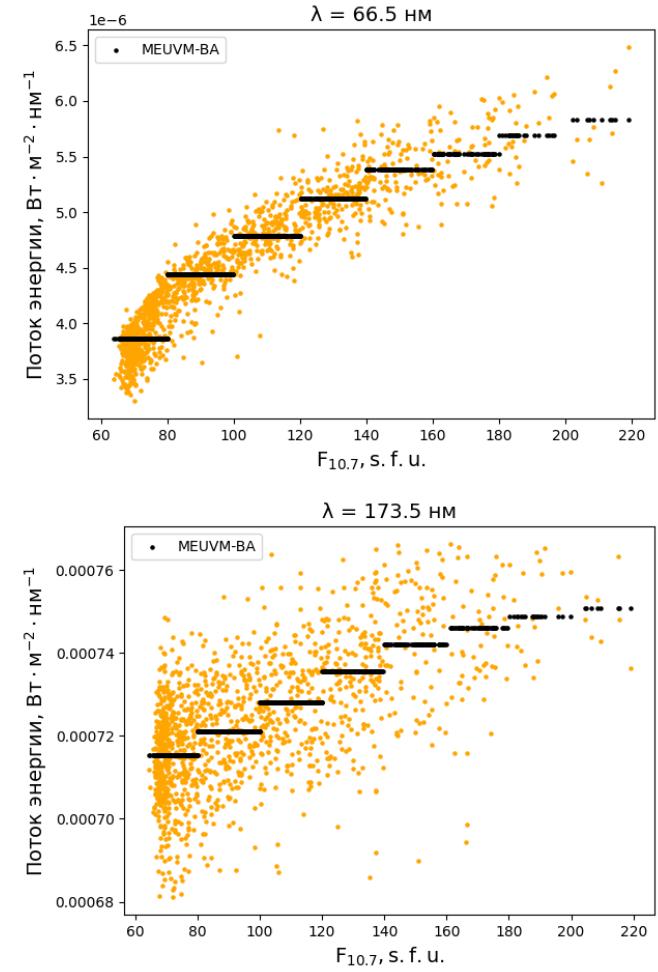
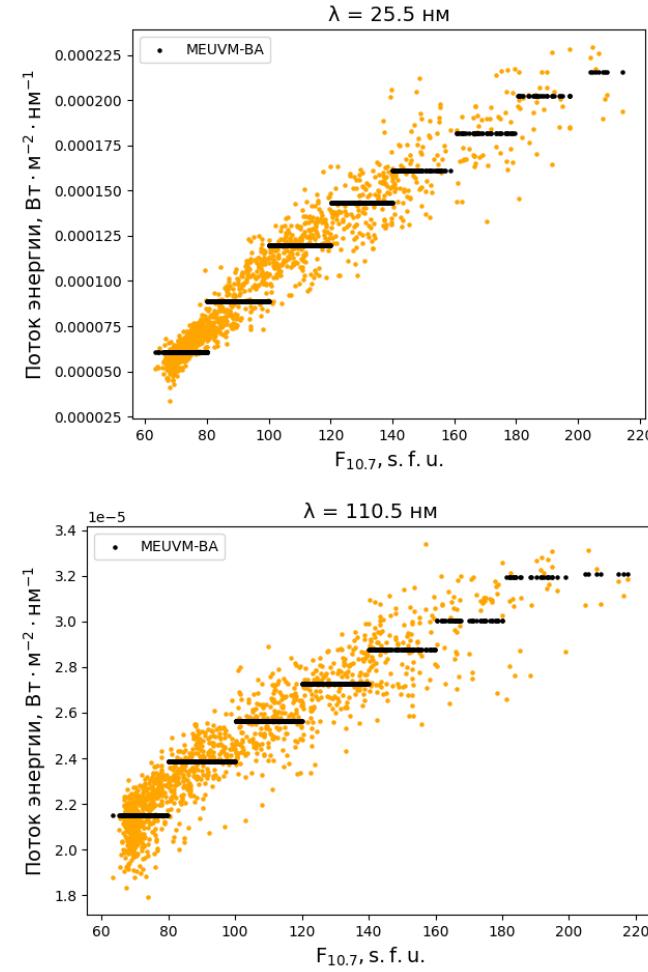
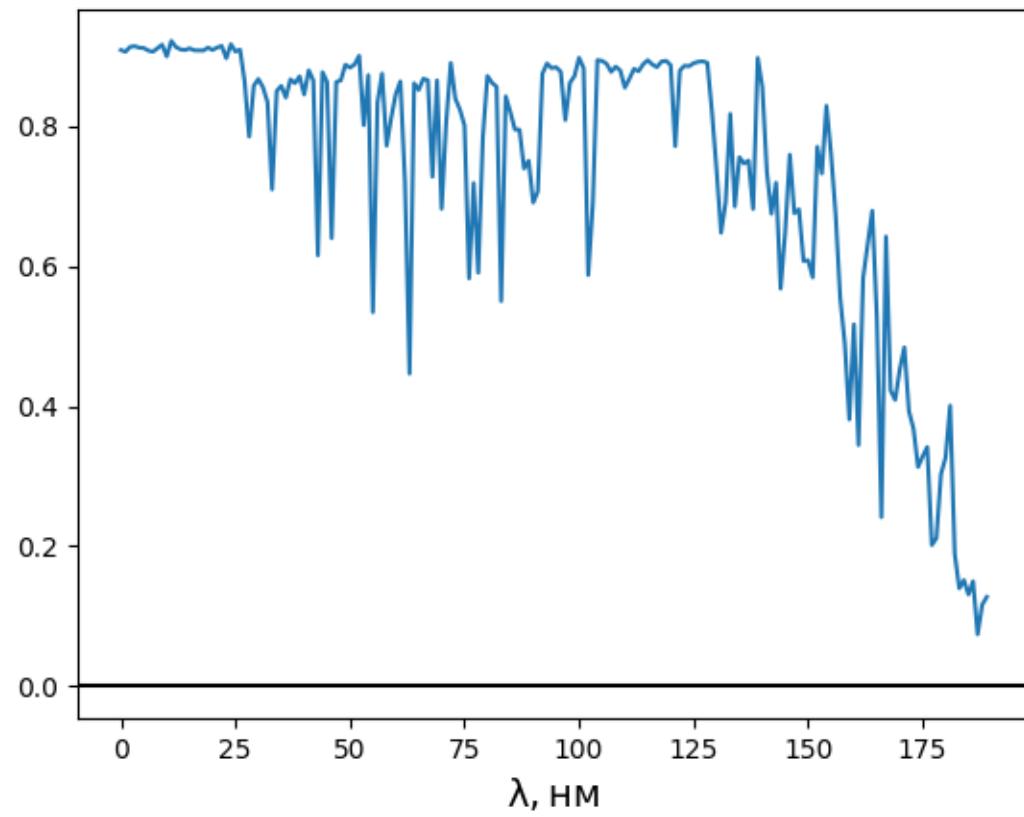


График слева – график оценки R^2 для модели МЕУВМ-ВА.

Графики справа – модельные спектры, полученные по моделям

Оценка качества модели MEUVM-BR

Метрика R^2 для модели MEUVM-BR

R^2

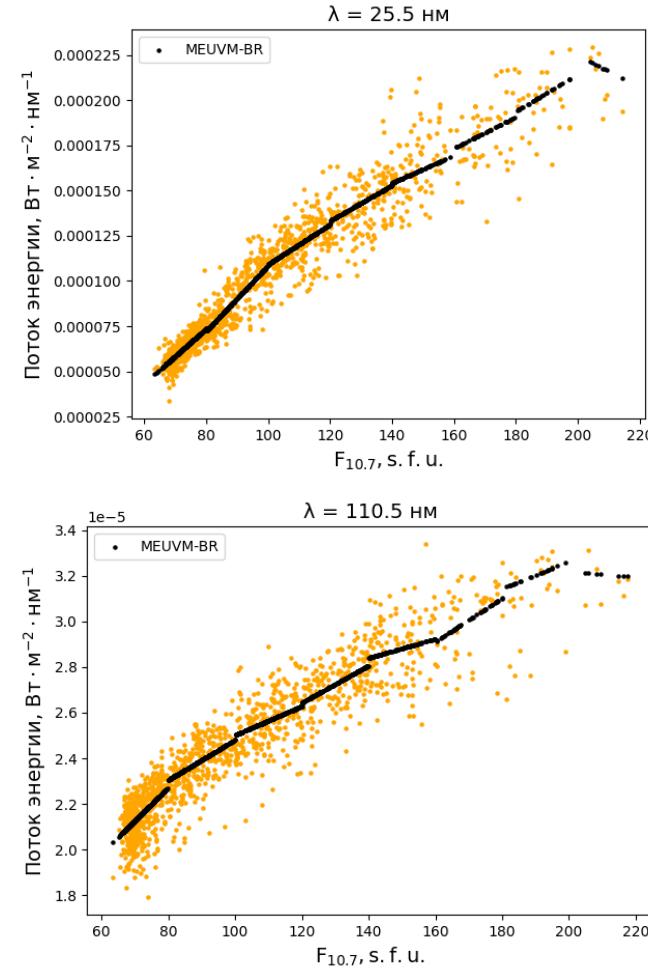
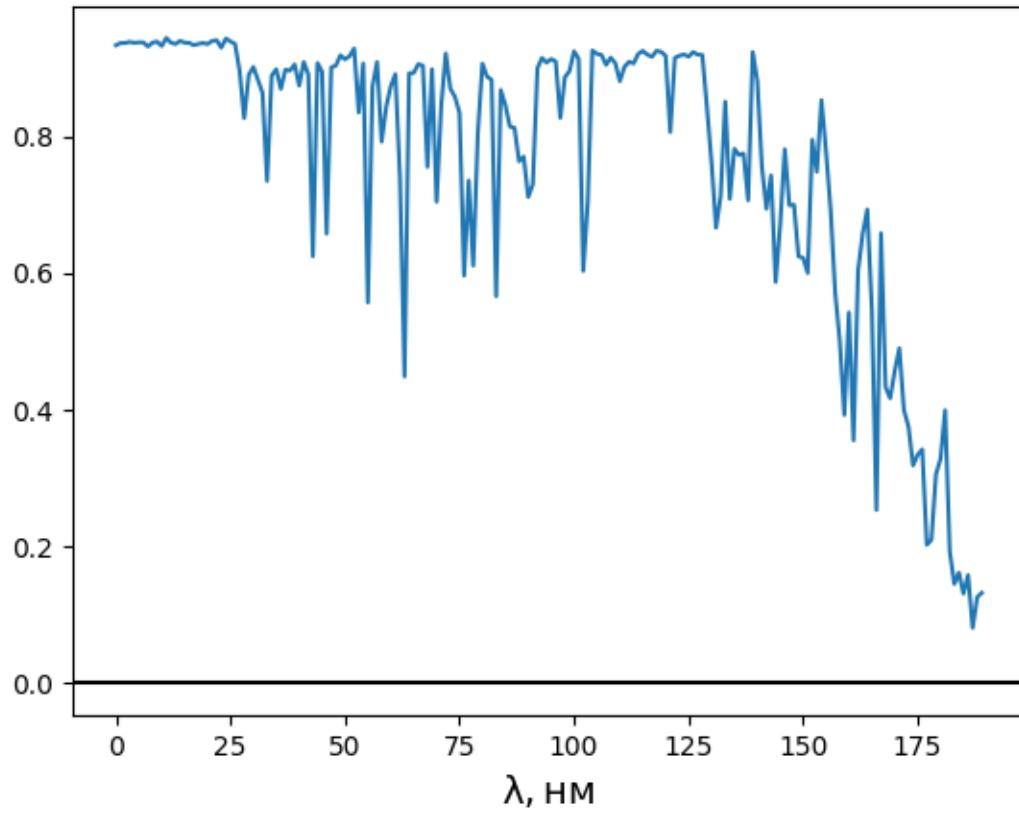


График слева – график оценки R^2 для модели MEUVM-BR.

Графики справа – модельные спектры, полученные по моделям

Оценка качества модели MEUVM-R

Метрика R^2 для модели MEUVM-R

R^2

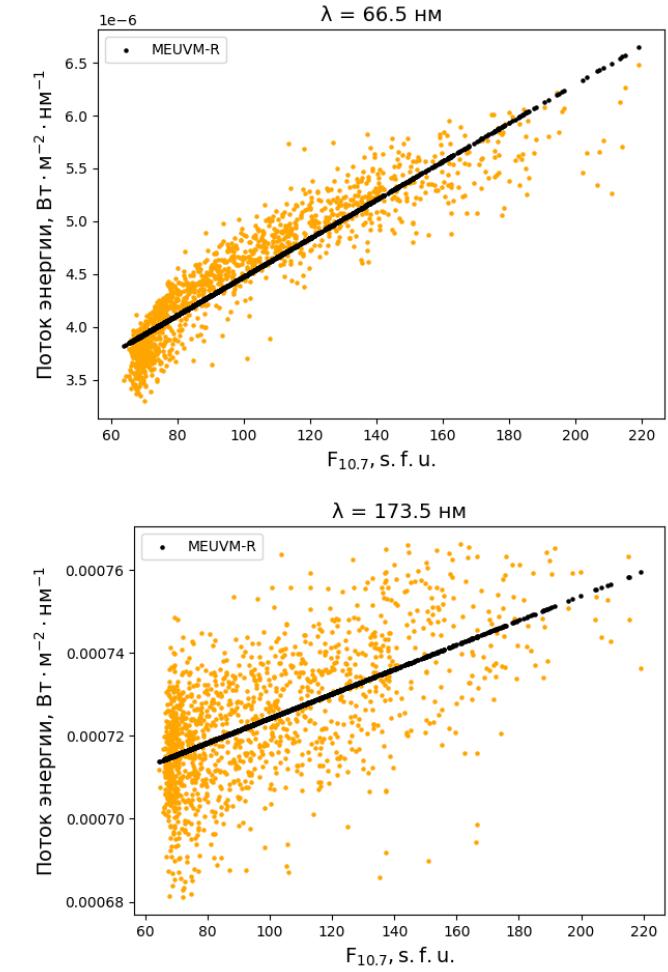
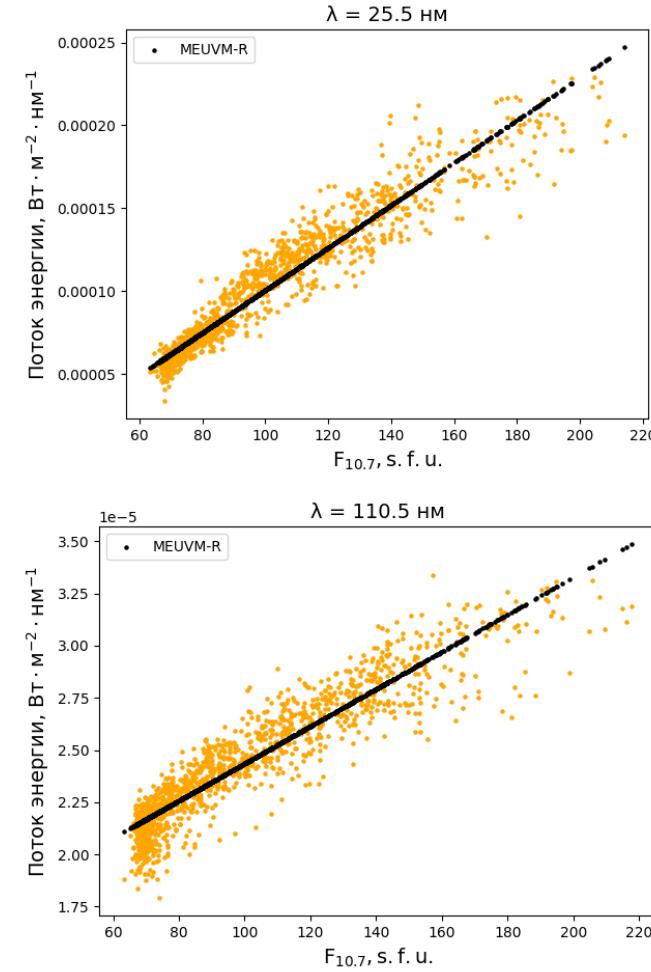
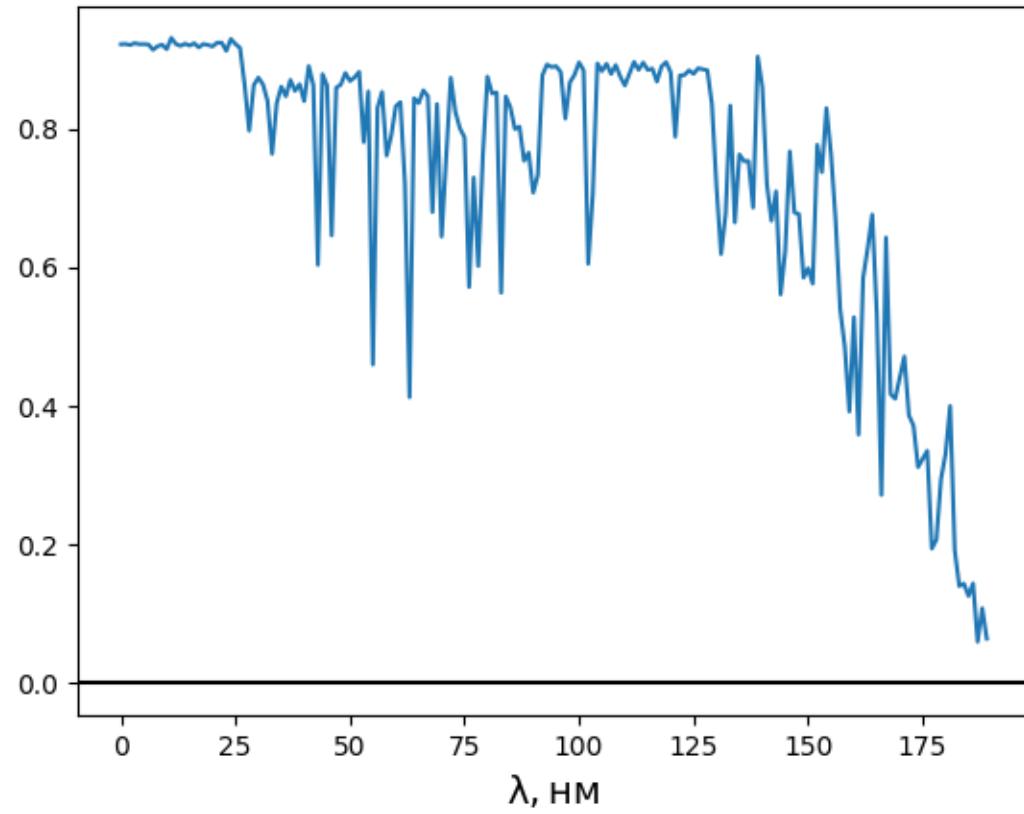


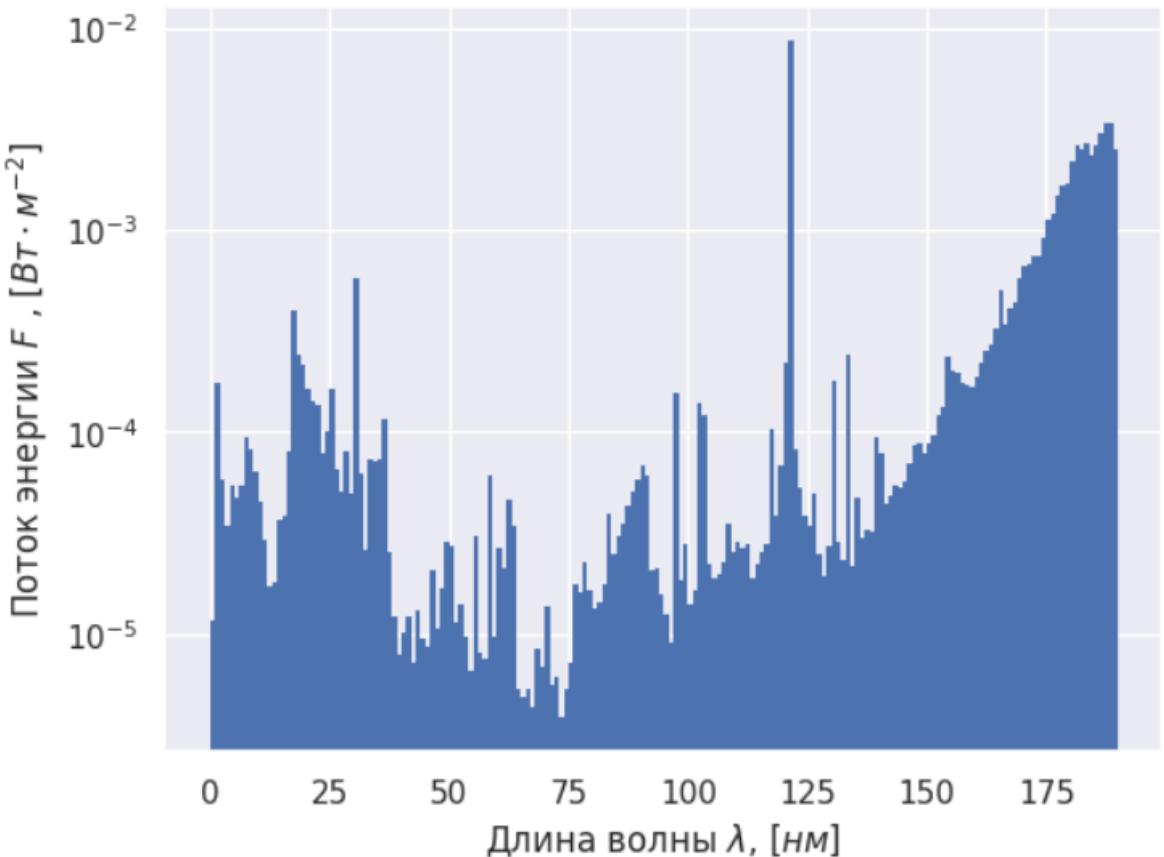
График слева – график оценки R^2 для модели MEUVM-R.

Графики справа – модельные спектры, полученные по моделям

Пример расчёта спектра потока солнечного излучения по модели MEUVM-BR

```
1 # (1) Импорт модели MEUVM-BR в текущее пространство имен
2 from meuvm import MeuvmBr
3
4 # (2) Создание экземпляра модели MEUVM-BR
5 meuvmbr = MeuvmBr()
6
7 # (3) Расчёт спектральных интервалов
8 bands = meuvmbr.get_spectra(f107=150.0)
9
10 # (4) Подключение необходимых библиотек для отрисовки графиков
11 import numpy as np
12 import matplotlib.pyplot as plt
13 import seaborn as sns; sns.set_theme()
14
15 # (5) Преобразование спектральных интервалов в массивы numpy
16 lband = bands['lband'].to_numpy()
17 uband = bands['uband'].to_numpy()
18 euv_flux = bands['euv_flux_spectra'].to_numpy()
19 euv_flux = euv_flux.flatten()
20
21 # (6) Создание массива точек отрисовки графика
22 spectrum_edges = np.hstack([lband, uband[-1]])
23
24 # (7) --
25 plt.xlabel(r'Длина волны  $\lambda$ , [нм]')
26 plt.ylabel(r'Поток энергии  $F$ , [ $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ '])
27 plt.yscale('log')
28 plt.stairs(values=euv_flux, edges=spectrum_edges, fill=True)
29 plt.show()
```

Спектр потока излучения при $F_{10.7} = 150$ s.f.u.



Заключение

1. На основе спутниковых данных миссии TIMED разработана новая модель солнечного радиоизлучения MEUVM в трёх вариантах реализации.
2. Модель MEUVM моделирует спектр излучения в диапазоне длин волн 0-190 нм, спектр представлен интервалами равной ширины 1 нм. MEUVM параметризуется суточным значением индекса $F_{10.7}$.
3. Для оценки качества модели MEUVM применялся критерий R^2 . Критерий показал, что вариант реализации MEUVM-BR наиболее точно описывает данные наблюдений.
4. Для варианта реализации MEUVM-BR остаётся открытым вопрос о моделировании на границах интервалов разбиения.

Работа выполнена при поддержке Мурманского арктического университета в рамках проекта №125011100116-9.

Список литературы

1. TIMED [Электронный ресурс] // NASA : [сайт]. URL: <https://science.nasa.gov/mission/timed/>.
2. OMNIWeb [Электронный ресурс] // Space Physics Data Facility : [сайт]. URL: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>.
3. Pip Installs Packages [Электронный ресурс] // PyPA : [сайт]. URL: <https://pip.pypa.io/en/stable/>.
4. The Python package index [Электронный ресурс] // PyPI : [сайт]. URL: <https://pypi.org/>.
5. Xarray [Электронный ресурс] // PyPI : [сайт]. URL: <https://pypi.org/project/xarray/>.
6. LISIRD [Электронный ресурс] // LASP Interactive Solar Irradiance Datacenter : [сайт]. URL: <https://lasp.colorado.edu/lisird/>.

Спасибо за внимание!