

Отчет по исследованию солнечного излучения на основе спектральных данных спектрометра SPICAV на борту КА «Венера-Экспресс»

Подготовил: Доронькин Максим Вячеславович,
студент 2 курса факультета физики НИУ ВШЭ

Цели и задачи

- 1) Научиться считывать и обрабатывать спектральные данные в формате FITS.
- 2) Исследовать вид спектра при разных значениях высот измерения.
- 3) Получить очищенный от «темнового» отнормированный на условия наблюдения спектр каждого измерения. Исследовать зону высот 200-250 км от поверхности планеты (зона чистого солнечного света) в диапазоне длин волн 220-300 нм)
- 4) Исследовать изменение интегрального потока солнечного излучения в диапазоне 220-300 нм за всё время наблюдения (2007-2014 гг.)
- 5) Исследовать отдельно изменения положения и глубины линии Mg 2 в спектре и площади каплевидного углубления в спектре в окрестности линии Mg 2.

1) Обзор измерительных данных.

- КА за один виток вокруг Венеры делает два измерения, на восходе Солнца (DEOCCULTATION) и на закате (OCCULTATION).
- В одном файле содержится 5 измерений(bin), мы для исследования выбираем третье, срединное измерение, как самое достоверное из 5
- В каждом измерении содержится какое-то количество спектров для различных высот
- В каждом спектральном массиве содержатся пиксели (384), их погрешности (384) и высота измерения.

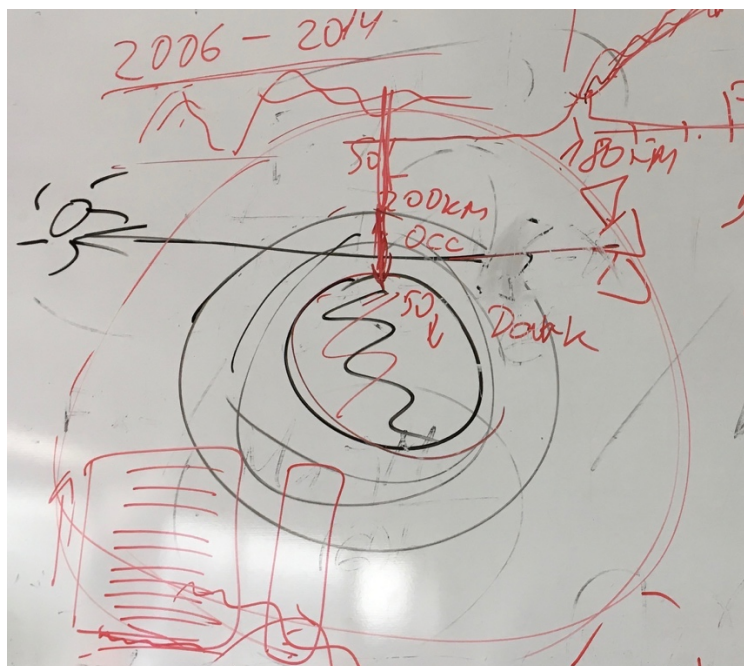


Рисунок 1. Схема проведения спектрального наблюдения SPICAV

- Далее я проанализировал один файл FITS 334 (OCC) и вывожу для него программу, которая дает полную картину по этому измерению. Представлена картина спектра в зависимости от высоты измерения (просто для наглядности). Я выделил три зоны:
 - i. Примерно с высоты в 108 км поглощение атмосферой в этом измерении уже становится заметным (start of absorption)
 - ii. Около высоты в 93 км поглощение становится значительным (start of huge absorption)
 - iii. И, наконец, около 70 км все измерения зануляются по потоку излучения, наступает темнота(darkness)
- Примерно так выглядит любой файл FITS с измерениями, немного меняются лишь значения границ зон:

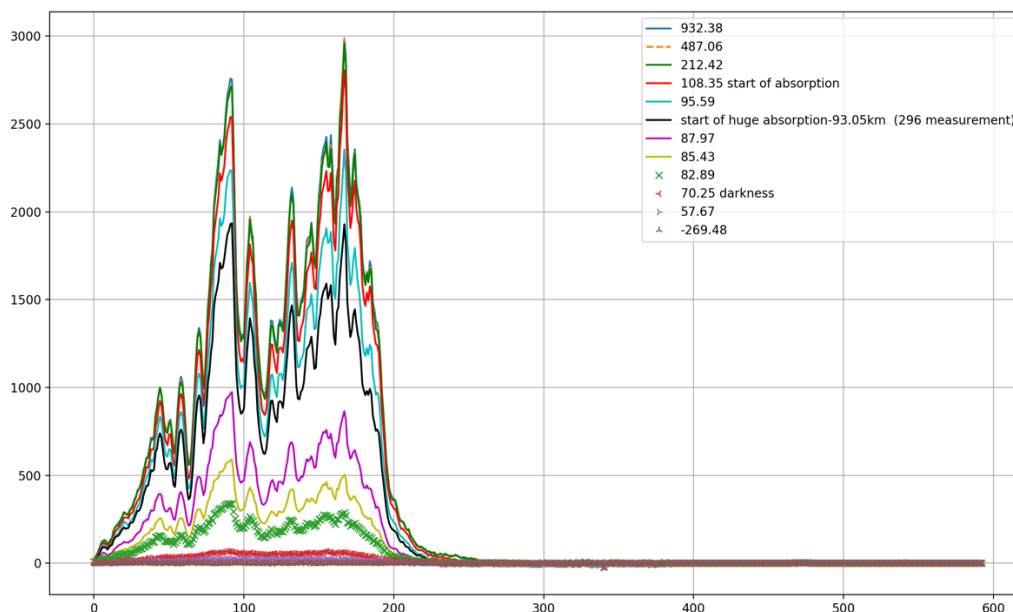


Рисунок 2 Спектры за один сеанс затмения на разных высотах. (Неотнормированные)
 (Примечание: спектрометр SPICAV может регистрировать сигнал только в ограниченной области спектра (110-300нм примерно), поэтому спектр зануляется в определенный момент, на самом деле интенсивность солнечного излучения далее растёт и имеет пик, в соответствии с законом смещения Вина, в более длинноволновой области, чем исследуемая)

2) Получение очищенного отнормированного спектра и исследование изменений в спектральной картине за весь период наблюдения.

- Нормируем ось длин волн следующим образом:
 Зависимость длины волны от номера пикселя приближенно считаем такой:

$$wl = A * x + B,$$

где wl - длина волны [нм], x - номер пикселя (1:384), $A=-0.548$, $B=315.5$.

- Выбираем диапазон 220-300 нм
- Усредненный темновой спектр получим по среднему значению каждого пикселя во всех измерениях с высотой <60 км (выбрал самое оптимальное значение)

Фрагмент кода Python:

```
for general_iteration in range(len(list_of_FITS)):
    hdu_list = fits.open(list_of_FITS[general_iteration])
    datafits = hdu_list[0].data
    measurements_in_one_fits_file = datafits[2]
    one_pixel_dark = []
    Sdark = []
    for number in iterated_measurements:
        for measurement in range(len(measurements_in_one_fits_file)):
            height = measurements_in_one_fits_file[measurement][768]
            if 0 < height < 60:
                pixel = measurements_in_one_fits_file[measurement][number]
                one_pixel_dark.append(pixel)
    meandark = np.mean(one_pixel_dark)
    Sdark.append(meandark)
    one_pixel_dark.clear()
```

- Усредненный спектр чистого солнца получим по среднему значению каждого пикселя во всех измерениях с высотой от 200 до 250 км (выбрал самое оптимальное значение, меньше брать опасно, а больше в принципе и не нужно, так как зачастую уже около 100 км высоты мы имеем спектр практически чистого Солнца (см. пример из пункта 1))

Фрагмент кода:

```
one_pixel_sun = []
Ssun = []
for number in iterated_measurements:
    for measurement in range(len(measurements_in_one_fits_file)):
        height = measurements_in_one_fits_file[measurement][768]
        if 200 < height < 250:
            pixel = measurements_in_one_fits_file[measurement][number]
            one_pixel_sun.append(pixel)
    meansun = np.mean(one_pixel_sun)
    Ssun.append(meansun)
    one_pixel_sun.clear()
```

- Очищенный спектр получаем как разность усредненного значения солнечного потока чистого солнца в каждом пикселе и темнового тока.
- Производим нормировку каждого очищенного спектра на количество строк в матрице в одном спектре и на время накопления сигнала.

Фрагмент кода:

```
S0norm = []

for spectra in S0:
    spectranorm = spectra/(int((bins[general_iteration])) * int(TL[general_iteration]))
    S0norm.append(spectranorm)
S0normDIAPAZON = []

for i in range(len(S0norm)):
    if L <= i <= R:
        S0normDIAPAZON.append(S0norm[i])
```

- Далее, если мы построим спектры в нужном диапазоне от всех измерений, то получим следующую картину:

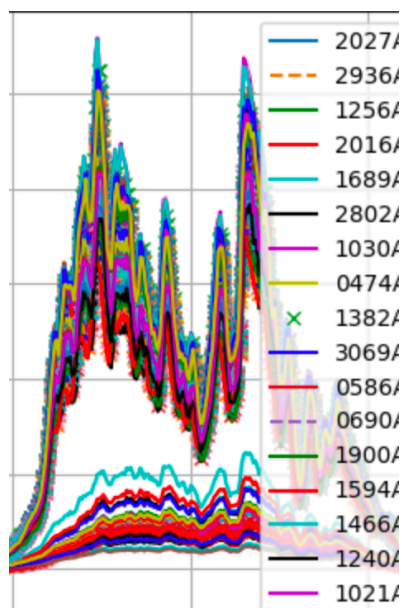


Рисунок 3 кусок графика отнормированных спектров, демонстрирующий выбивающиеся измерения (вероятно, по каким-то причинам, сигнал был слишком слаб

- Видны сильно выделяющиеся из общей картины измерения, вероятно, это те измерения, в которых сигнал был очень слабым, отобрав их, выкинем их из общей картины.
- Тогда получим финальный график, на котором выведем все очищенные отнормированные спектры за всё время наблюдения.

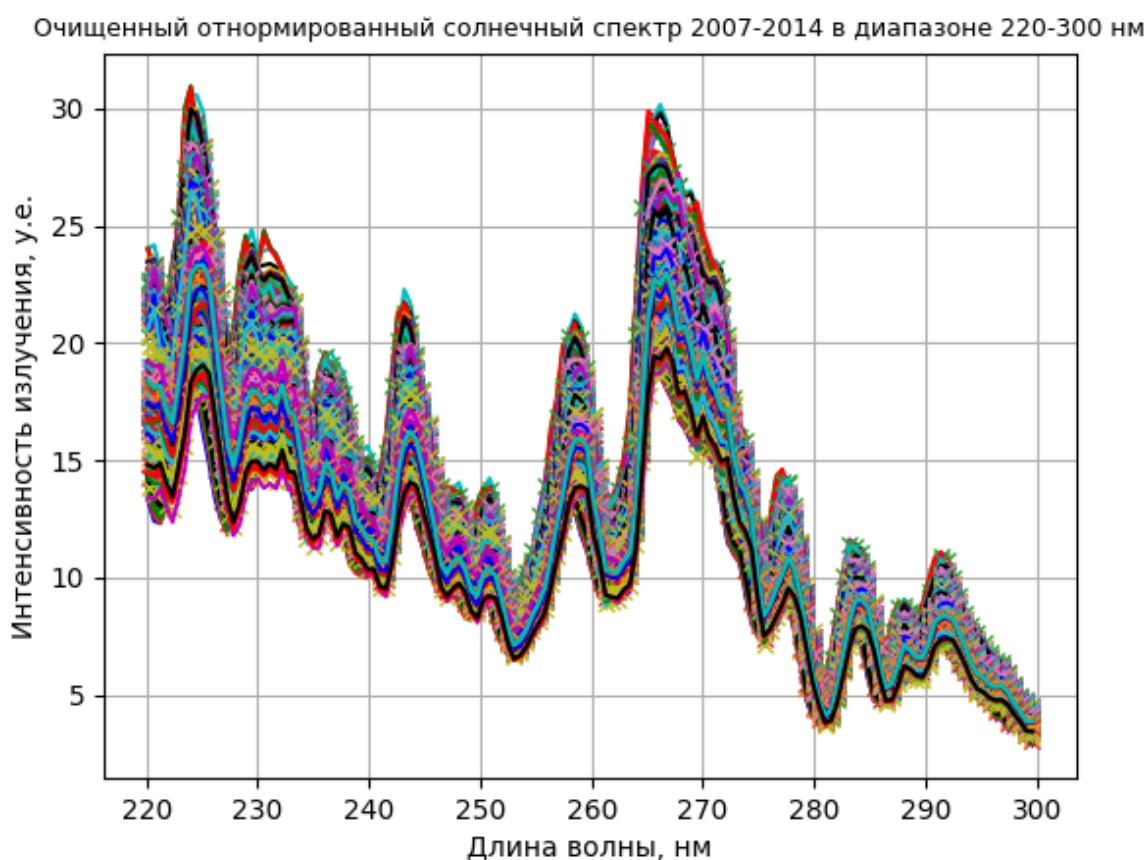


Рисунок 4 Финальный график очищенных отнормированных спектров

3) Исследование изменения интегрального потока солнечного излучения в диапазоне 220-300 нм за всё время наблюдения (2007-2014 гг.)

Теперь проинтегрируем по всему спектру от 220 до 300 нм каждый полученный спектр и построим зависимость интегрального потока излучения от порядкового номера измерения (что почти совпадает с зависимостью от номера орбиты, но не является одним и тем же, так как обычно за один виток совершается два измерения (occultation и deoccultation))

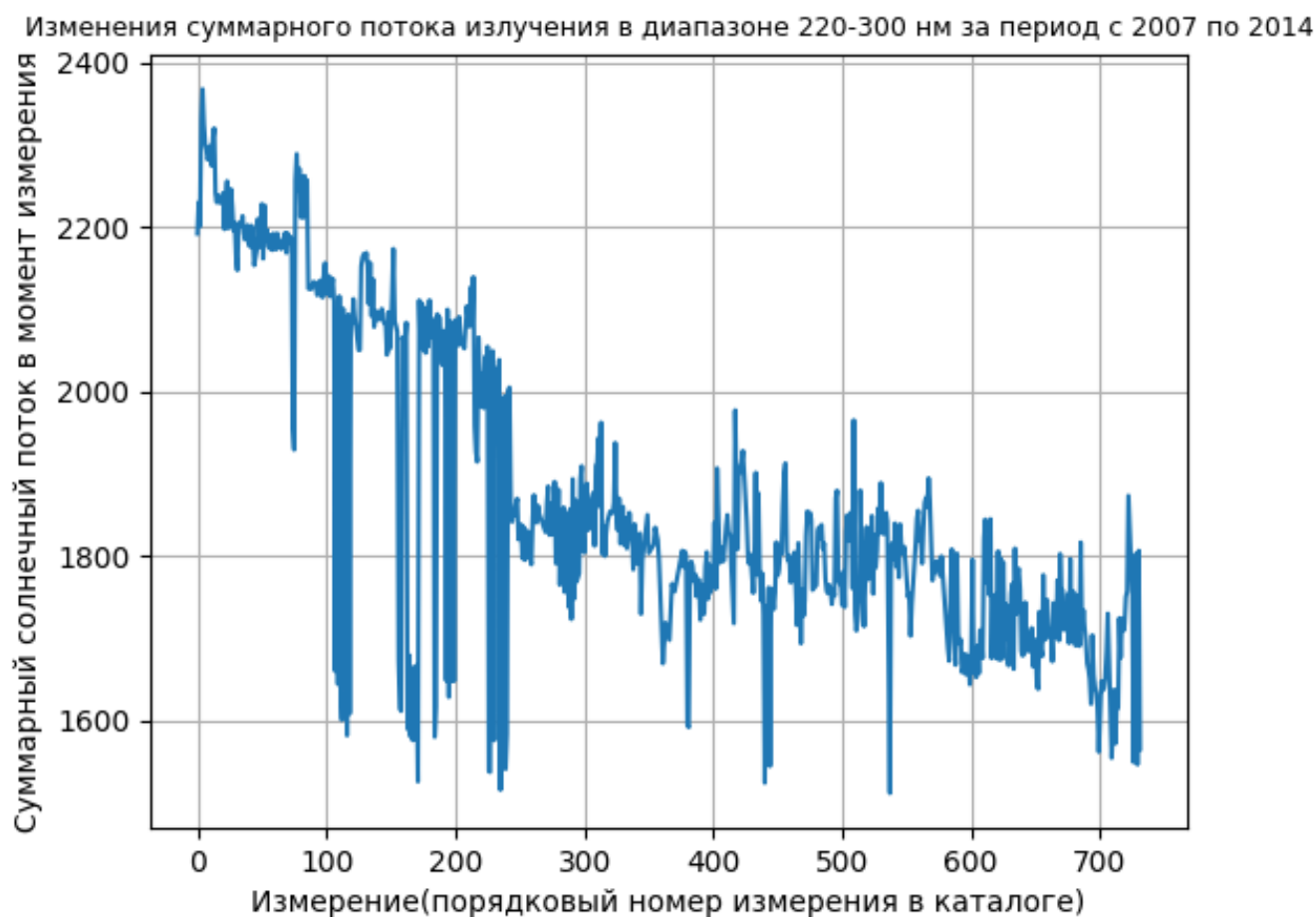


Рисунок 5 Изменение суммарного потока излучения за всё время наблюдения

На основании полученного графика можно сделать весьма неоднозначные выводы. Видно, что в целом значение суммарного потока падает подобно затухающей экспоненте со временем, в первые годы наблюдения он почти в полтора раза выше, чем в последние. Соответственно, можно предположить, на мой взгляд, два возможных объяснения этому:

- 1) Либо дело в измерительном приборе (например, аппарат спустился со временем на более низкую орбиту, и сигнал там на исследуемых нами высотах уже стал загрязнен атмосферными эффектами)
- 2) Либо интенсивность солнечного излучения в исследуемом диапазоне действительно уменьшалась в период с 2007 по 2014 годы.

Итак, первый вариант кажется неправдоподобным из-за того, что орбита не менялась так резко, и вряд ли бы настолько быстро падала интенсивность сигнала, однако у меня нет точных данных о высотах и других параметрах орбит, так что точно сказать не смогу.

Второй вариант интереснее, и я решил рассмотреть изменения солнечной активности в эти годы, детектируемые с Земли. Я смог найти график зависимости чисел Вольфа (числа солнечных пятен) от года, и он поставил меня в тупик.

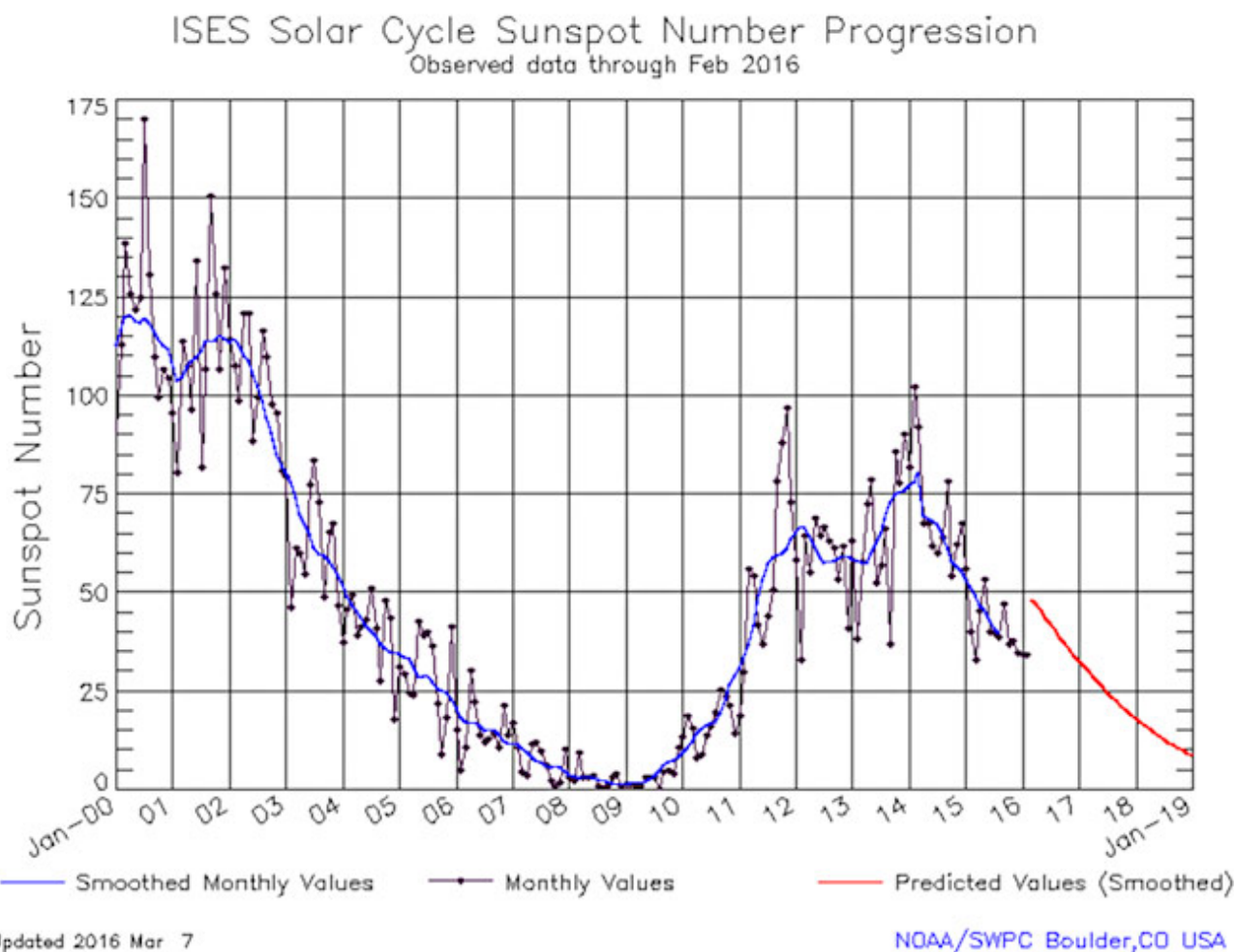


Рисунок 6 Gismeteo.ru : график количества солнечных пятен от времени

Как видно из приведенного выше графика, солнечная активность должна иметь пик(антипик) в районе 2009-2010 года, а на нашем графике со SPICAV (2007-2014) такого пика не наблюдается, интегральный поток просто монотонно уменьшается в исследуемый период, никаких точек локального экстремума не наблюдается.

В итоге, пока что для меня остается загадкой такое поведение графика интегрального потока. Приведем здесь также те измерения, которые выбиваются из общей тенденции, в которых сигнал был сильно слабее обычного (сложно сказать о реальной причине наличия таких измерений, я полагаю, дело в неправильной работе датчика SPICAV), для этого выделим те измерения, в которых значение интегрального потока было <1000 (разумеется, на приведенном выше графике изменения интегрального потока, мы их заблаговременно выкинули, так как они не представляют научного интереса):

Таблица 1 Выбывающиеся измерения (слишком слабый сигнал)

Порядковый номер измерения	Название файла FITS	Дата измерения
33	FITS/SPIV_1AU_0458A08b_S.FITS	2007-07-23
38	FITS/SPIV_1AU_0462A12b_S.FITS	2007-07-27
87	FITS/SPIV_1AU_0667A08_S.FITS	2008-02-17
89	FITS/SPIV_1AU_0669A08_S.FITS	2008-02-19
91	FITS/SPIV_1AU_0671A09_S.FITS	2008-02-21
125	FITS/SPIV_1AU_0793A04_S.FITS	2008-06-22
296	FITS/SPIV_1AU_1377A06_S.FITS	2010-01-27
297	FITS/SPIV_1AU_1377A07_S.FITS	2010-01-27
298	FITS/SPIV_1AU_1378A05_S.FITS	2010-01-28
299	FITS/SPIV_1AU_1378A06_S.FITS	2010-01-28
319	FITS/SPIV_1AU_1460A07_S.FITS	2010-04-20
331	FITS/SPIV_1AU_1475A08_S.FITS	2010-05-05
341	FITS/SPIV_1AU_1494A09_S.FITS	2010-05-24
342	FITS/SPIV_1AU_1494A10_S.FITS	2010-05-24
356	FITS/SPIV_1AU_1589A01_S.FITS	2010-08-27
358	FITS/SPIV_1AU_1592A02_S.FITS	2010-08-30
383	FITS/SPIV_1AU_1681A06_S.FITS	2010-11-27
384	FITS/SPIV_1AU_1682A04_S.FITS	2010-11-28
385	FITS/SPIV_1AU_1683A04_S.FITS	2010-11-29
388	FITS/SPIV_1AU_1686A04_S.FITS	2010-12-02
389	FITS/SPIV_1AU_1688A04_S.FITS	2010-12-04
390	FITS/SPIV_1AU_1689A04_S.FITS	2010-12-05
393	FITS/SPIV_1AU_1692A01_S.FITS	2010-12-08
396	FITS/SPIV_1AU_1697A03_S.FITS	2010-12-13
397	FITS/SPIV_1AU_1698A04_S.FITS	2010-12-14
399	FITS/SPIV_1AU_1700A04_S.FITS	2010-12-16
401	FITS/SPIV_1AU_1703A03_S.FITS	2010-12-19
402	FITS/SPIV_1AU_1704A04_S.FITS	2010-12-20
404	FITS/SPIV_1AU_1706A04_S.FITS	2010-12-22
406	FITS/SPIV_1AU_1708A03_S.FITS	2010-12-24
408	FITS/SPIV_1AU_1710A03_S.FITS	2010-12-26
409	FITS/SPIV_1AU_1711A02_S.FITS	2010-12-27
410	FITS/SPIV_1AU_1712A02_S.FITS	2010-12-28
411	FITS/SPIV_1AU_1714A02_S.FITS	2010-12-30
412	FITS/SPIV_1AU_1718A01_S.FITS	2011-01-03
441	FITS/SPIV_1AU_1826A08_S.FITS	2011-04-21
443	FITS/SPIV_1AU_1828A08_S.FITS	2011-04-23
452	FITS/SPIV_1AU_1902A03_S.FITS	2011-07-06
453	FITS/SPIV_1AU_1904A04_S.FITS	2011-07-08
460	FITS/SPIV_1AU_1922A01_S.FITS	2011-07-26
462	FITS/SPIV_1AU_1928A05_S.FITS	2011-08-01
463	FITS/SPIV_1AU_1930A07_S.FITS	2011-08-03
468	FITS/SPIV_1AU_2015A09_S.FITS	2011-10-27
517	FITS/SPIV_1AU_2179A04a_S.FITS	2012-04-08

4) Исследование изменения положения и глубины линии Mg2 в спектре и площади каплевидного углубления в спектре в окрестности линии Mg2 за всё время наблюдения.

1) Линия Mg2 представляет интерес для астрофизиков, изучающих излучение Солнца. Эта линия находится в районе 280 нм, и спектр в этой области имеет характерное углубление, с глубочайшей точкой, в области линии Mg2. Рассмотрим наши спектры в указанной области.

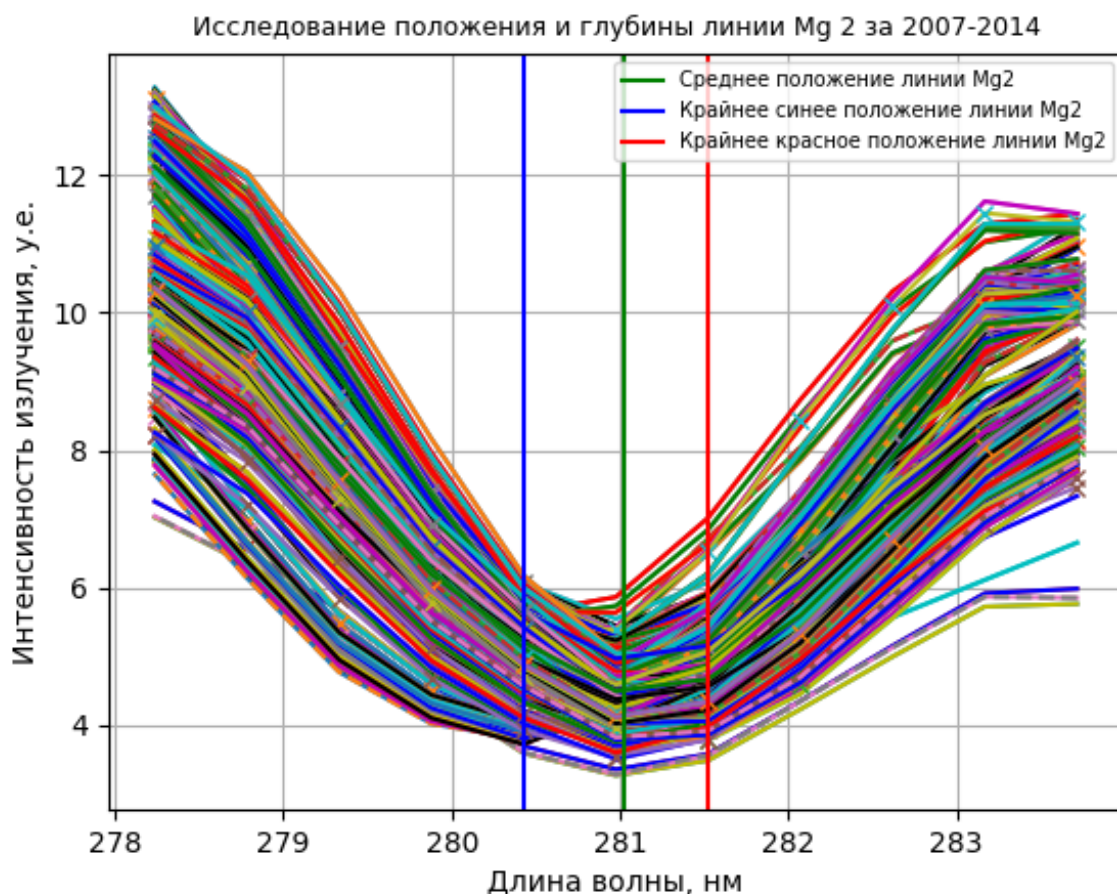


Рисунок 7 Область спектра в районе линии Mg2 и изменения положения этой линии (крайнее красное положение соответствует максимальной длине волны (смещение в длинноволновую область), крайнее синее, соответственно, в коротковолновую)

```
max = 2007-04-13 max WL = 280.976
min = 2007-12-07 min WL = 280.976
vertical delta = 2.3709764268663194
meanWL = 281.02379069767443
min wl of min = 280.428
max wl of min = 281.524
horizontal delta = 1.0960000000000036
```

Рисунок 8 вывод программой данных об изменениях глубины (первые 3 строки) и положения (последние 4 строки) линии Mg2

Vertical delta, в приведенном выше выводе программы, есть максимальная разница по интенсивности излучения в единицах измерения SPICAV, она довольно невелика и, как можно заметить по графику для диапазона 220-300 нм (рис.4), относительно общего изменения интегрального потока, изменения в районе исследуемой линии не отличаются особенностями.

По положению можно заметить, что, хотя линия Mg2 находится в районе 280-280.5 нм, наши спектры в среднем выдают её положение на 281 нм. Это может быть связано с несовершенством используемой зависимости длины волны от номера пикселя, так как она может меняться от орбиты к орбите. По той же причине и изменение положения в пределах около 1 нм (horizontal delta) тоже не представляет, на мой взгляд, научного интереса.

Значения max и min соответствуют датам, когда было зафиксировано минимальное и максимальное значение интенсивности излучения (как видно, они выпали, как ни странно, на один год, 2007, хотя как нам известно, интегральный поток в последние годы наблюдения был сильно ниже, это свидетельствует о том, что на интегральный поток не оказывала существенного влияния исследуемая нами область, интенсивность в ней менялась незначительно.

Значения max of wl min и min of wl min это длины волн крайнего синего и крайнего красного положения линии Mg2

2) Наконец, теперь рассмотрим изменение в зависимости от времени площади углубления вокруг линии Mg2. Для этого используем метод интерполяции приведенной поточечной зависимости изменения области вокруг линии Mg2, а затем численно проинтегрируем интерполирующую функцию в диапазоне 280-282 нм (большую область проинтегрировать сложнее, интерполирующие функции труднее поддаются интегрированию, да и на итоговую зависимость интегралов от времени это не сильно повлияет. Для получения интерполирующей функции и её численного интегрирования были использованы функции модуля **scipy**: **scipy.interpolate.interp1d** и **scipy.integrate.quad**. Приведем график зависимости инвертированной площади подграфика в районе 280-282 нм (инверсию используем для того, чтобы построить примерную зависимость именно изменения площади углубления от времени, так как чем меньше подсчитываемый нами интеграл, тем больше площадь ямы (в первом приближении)):

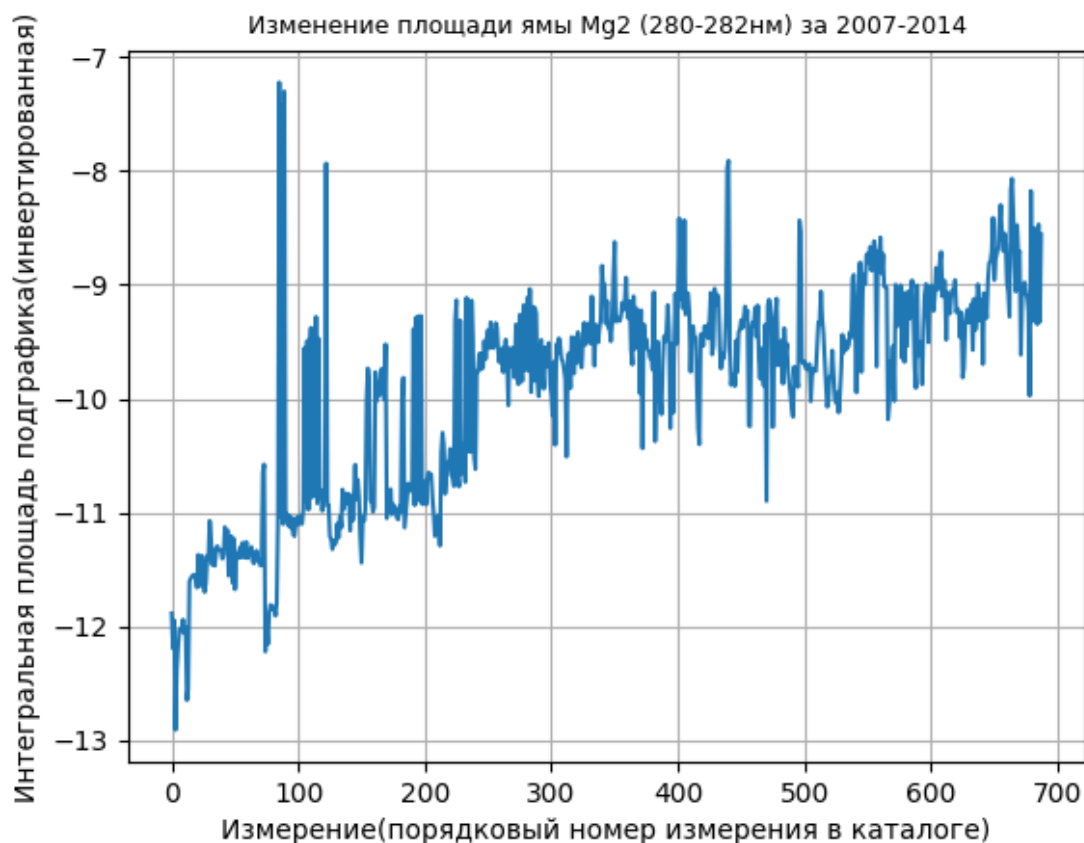


Рисунок 9 График изменения площади углубления (в первом приближении, так как нам важно увидеть общую закономерность) от порядкового номера измерения

На основании приведенного графика можно сделать вывод о том, что площадь ямы со временем возрастает (площадь подграфика падает примерно также, как падает интегральный поток (см. рис. 5))

Итого, мы изучили поведение спектра вблизи линии Mg2 и каких-то особенностей обнаружено не было, кроме тех, что следуют из особенностей для всей области спектра, регистрируемой SPICAV, о которых было сказано ранее.

В работе применялись следующие библиотеки Python:

- 1) **astropy.io.fits**, **os** и **pandas** – для чтения данных FITS и подготовки их для дальнейшей обработки
- 2) **matplotlib.pyplot** – для визуализации (построение графиков)
- 3) **numpy** – работа с массивами данных (усреднение и очистка спектров (np.mean))
- 4) **scipy.interpolate** и **scipy.integrate** – библиотеки машинного обучения, были необходимы для интерполяции и численного интегрирования (последний пункт исследования)