

**ВАРИАЦИИ ПОТОКОВ СОЛНЕЧНОГО КУФ-ИЗЛУЧЕНИЯ
В ЛИНИЯХ ГЕЛИЯ (ВНЕ ВСПЫШЕК) ПО ДАННЫМ
SDO/EVE В 24-М ЦИКЛЕ.
ЛАЙМАНОВСКИЕ ДЕКРЕМЕНТЫ ЛИНИЙ ВОДОРОДА И ГЕЛИЯ**

Бруевич Е.А.¹, Казачевская Т.В.², Якунина Г.В.¹

¹*МГУ им. М.В. Ломоносова, Государственный астрономический институт
им. П.К. Штернберга, Москва, Россия*

²*ИПГ Росгидромета им. Е.К. Федорова, Москва, Россия*

**VARIATIONS OF SOLAR EUV-RADIATION FLUXES
IN HELIUM LINES (OUTSIDE THE FLARES) ACCORDING
TO SDO/EVE DATA IN CYCLE 24. LYMAN DECREMENTS
IN HYDROGEN AND HELIUM LINES**

Bruevich E.A.¹, Kazachevskaya T.V.², Yakunina G.V.¹

¹*Lomonosov Moscow State University, Sternberg State Astronomical Institute,
Moscow, Russia*

²*Fedorov Institute of Applied Geophysics, Moscow, Russia*

The data of measurements of fluxes in the lines of neutral helium 58.4 nm, 53.7 nm and ionized helium 30.4 nm, 25.6 nm are investigated. The changes in the intensity of these lines with solar activity variations from the minimum to the maximum of the 24th cycle were estimated. The time series of daily values of radiation fluxes outside the flares in the EUV range has formed by us from the archive of daily observations of SDO/EVE for 2010–2018. The behavior of Lyman decrements in hydrogen and helium lines has studied.

DOI: 10.31725/0552-5829-2019-55-58

Космический аппарат SDO был выведен на орбиту в августе 2010 г. с целью измерения солнечного УФ-излучения. Прибор EVE должен измерять общий поток УФ-фотонов и рентгеновских квантов низких энергий, соответствующих длинам волн от 105 до 0.1 нм. В крайнем ультрафиолете (КУФ) яркость Солнце меняется в сотни и тысячи раз, [1]. КУФ-излучение определяет температуру внешних слоев земной атмосферы. В нашей работе исследуются вариации потоков солнечного КУФ-излучения в линиях гелия (вне вспышек) по данным SDO/EVE в 24-м цикле [2].

Текущий 24-й цикл активности является самым слабым солнечным циклом более чем за последние 100 лет [3]. На рис. 1 и 2 показаны изменения потоков в линиях гелия, видно, что линии по-разному изменяются в этом цикле. Поток в линии HeI ($\lambda = 58.4$ нм) уменьшается примерно на 45%, а в линии HeII ($\lambda = 30.4$ нм) примерно на 25 % от величины в максимуме активности. Важно, что линия He II ($\lambda = 30.4$ нм) является второй по яркости хромосферной эмиссионной линией в спектре Солнца и важнейшей по степени воздействия на ионосферу Земли. Изучение вариаций по-

токов в линиях гелия и их взаимосвязь с текущим уровнем активности Солнца, определяемым по потоку в радиодиапазоне на волне 10.7 см ($F_{10.7}$), является актуальным для прогноза состояния атмосферы Земли.

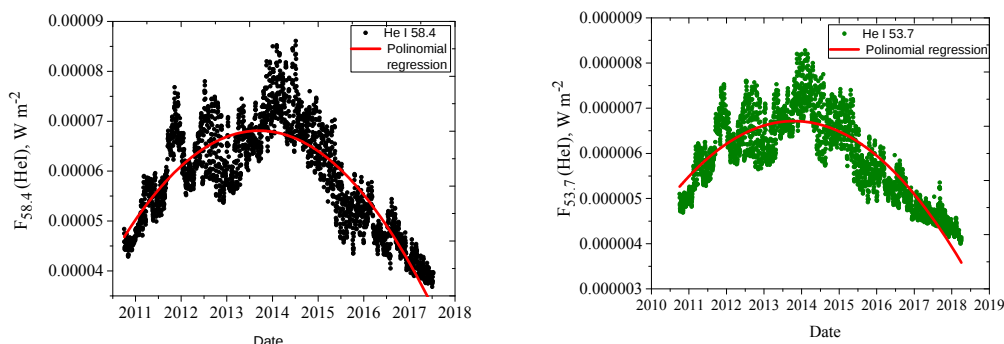


Рис. 1. Вариации ежедневных значений потоков в линиях нейтрального гелия $F_{58.4}$ (слева) и $F_{53.7}$ (справа) в 24-м цикле. Показаны линии квадратичной регрессии.

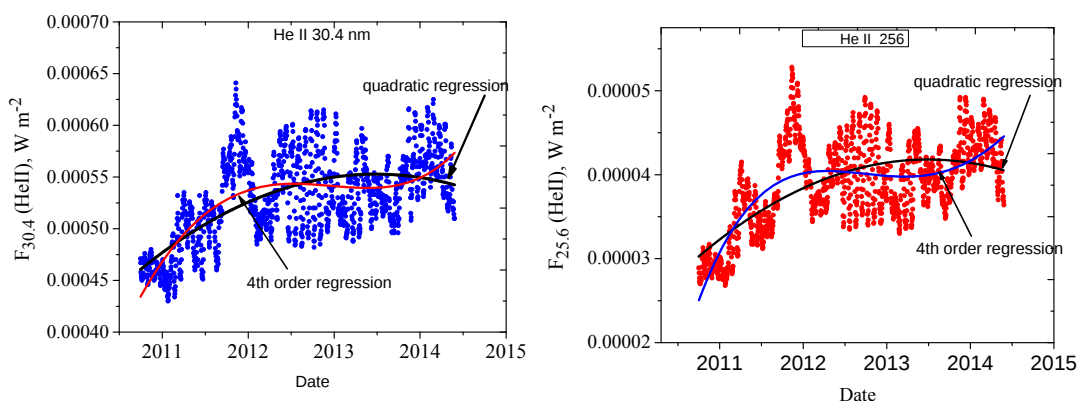


Рис. 2. Вариации ежедневных значений потока $F_{30.4}$ (слева) и потока $F_{25.6}$ (справа) в 24-м цикле. Указаны линии квадратичной и регрессии 4-го порядка.

Из ежедневных данных SDO/EVE [2] нами получены регрессионные зависимости потоков в четырех линиях гелия от текущего значения индекса $F_{10.7}$. Это позволяет с высокой точностью восстановить потоки в линиях гелия для разных уровней активности Солнца. Величины потоков в линиях HeI (58.4, 53.7 нм) и HeII (30.4, 25.6 нм) являются входными параметрами для многих ионосферных моделей.

Таблица 1.

$F_{\text{Line}} \leftrightarrow F_{10.7}$	A	B1	B2
$F_{58.4} \leftrightarrow F_{10.7}$	$-9.11\text{E-}6 \pm 1.1\text{E-}6$	$8.6\text{E-}7 \pm 2.3\text{E-}8$	$-2.2\text{E-}9 \pm 9.1\text{E-}11$
$F_{53.7} \leftrightarrow F_{10.7}$	$3.2\text{E-}7 \pm 1.1\text{E-}8$	$7.6\text{E-}8 \pm 2.0\text{E-}9$	$-2.1\text{E-}10 \pm 8.2\text{E-}12$
$F_{30.4} \leftrightarrow F_{10.7}$	$1.9\text{E-}4 \pm 1.3\text{E-}5$	$4.2\text{E-}6 \pm 2.0\text{E-}7$	$-1.2\text{E-}8 \pm 7.8\text{E-}10$
$F_{25.6} \leftrightarrow F_{10.7}$	$9.9\text{E-}6 \pm 2.3\text{E-}7$	$6.6\text{E-}7 \pm 2.8\text{E-}8$	$-2.0\text{E-}9 \pm 1.1\text{E-}10$

Коэффициенты квадратичной регрессии приведены в таблице 1 для зависимостей потоков в четырех линиях гелия серии Лаймана от индекса $F_{10.7}$ в 24-м цикле. Коэффициенты квадратичной регрессии A , $B1$, $B2$ соответствуют следующему уравнению: $F_{\text{Line}} = A + B1 \cdot F_{10.7} + B2 \cdot F_{10.7}^2$

Исследование декрементов УФ-линий водорода и гелия важно для диагностики излучающей среды, т.к. населенность энергетических уровней зависит от свойств излучающего водородного-гелиевого газа в частотах спектральных линий и его электронной концентрации.

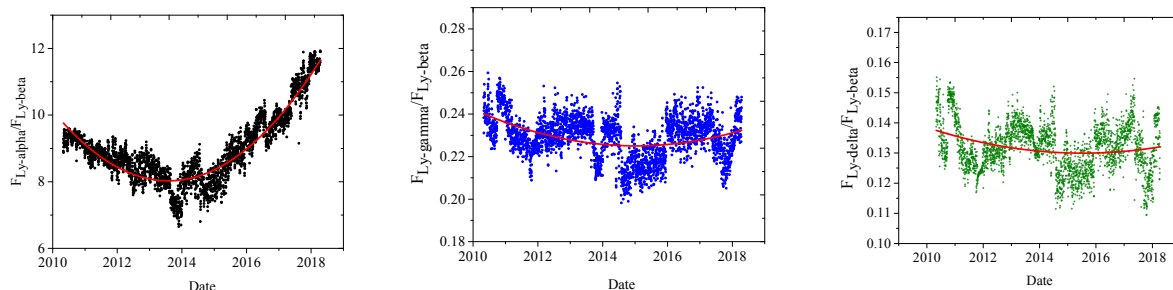


Рис. 3. Вариации ежедневных значений декрементов $D1 = F(L_\alpha)/F(L_\beta)$, $D2 = F(L_\gamma)/F(L_\beta)$ и $D3 = F(L_\delta)/F(L_\beta)$ в 24-м цикле.

Декремент $D1 = F(L_\alpha)/F(L_\beta)$ изменяется в 24-м цикле активности примерно на 25% от максимума в начале цикла до минимума в 2014 г., $D2 = F(L_\gamma)/F(L_\beta)$ – на 10% и $D3 = F(L_\delta)/F(L_\beta)$ – на 5%, (рис. 3).

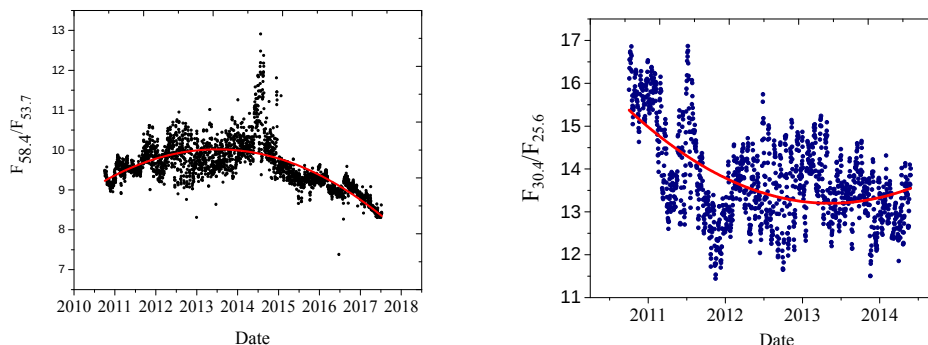


Рис. 4. Вариации ежедневных значений декрементов линий гелия $D1\text{HeI} = F_{58.4}/F_{53.7}$ (слева) и $D1\text{HeII} = F_{30.4}/F_{25.6}$ (справа) в 24-м цикле.

Видно, что декремент $D1\text{HeI}$ изменяется в течение 24-го цикла активности Солнца примерно на 10% от своего минимального значения до максимального в 2014 г., декремент $D1\text{HeII}$ изменяется в цикле примерно на 15%, (рис. 4).

Данные SDO/EVE с временным разрешением в 1 мин дают возможность изучить поведение водородных декрементов во вспышках [2]. Декремент $D1$ (рис. 5) имеет резкий минимум, совпадающий по времени с моментом максимума вспышки. Декременты $D2$ и $D3$ имеют резкие максимумы, также совпадающие с моментом максимума вспышки. По про-

должительности вариации декрементов во вспышке соответствуют времени длительности вспышки.

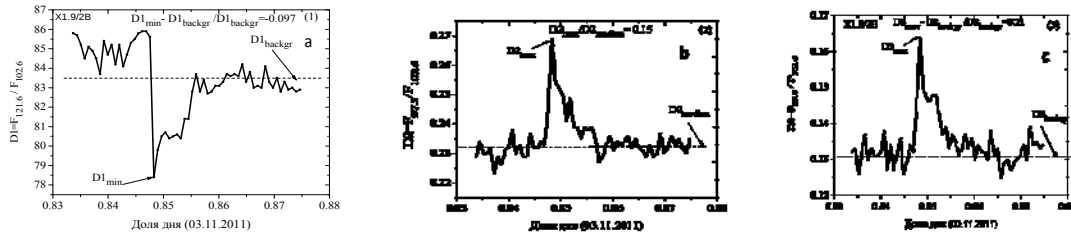


Рис. 5. Вариации ежедневных значений декрементов (а) – $D1 = F(L_\alpha)/F(L_\beta)$, (б) – $D2 = F(L_\gamma)/F(L_\beta)$ и (с) – $D3 = F(L_\delta)/F(L_\beta)$ во вспышке X1.9/2B от 03.11.2011 г.

Отношение потоков в эмиссионных линиях зависят от соответствующих коэффициентов излучения ϵ_{ik} [4]. Эти коэффициенты при переходе $i - k$ описываются формулой

$$\epsilon_{ik} = N_k A_{ki} h \nu_{ik} \beta_{ik} / 4\pi ,$$

где N_k – населенность верхнего уровня, A_{ki} – вероятность спонтанного перехода, h – постоянная Планка, ν_{ik} – частота перехода, β_{ik} – вероятность выхода кванта из среды. Таким образом, вариации декрементов связаны с относительными изменениями населенностей соответствующих уровней в эмиссионных линиях.

Выводы

1. Потоки в спектральных линиях He I и He II относительно по-разному изменяются с изменением солнечной активности.
2. Полученные регрессионные зависимости изучаемых потоков от индекса $F_{10.7}$ позволяют с высокой точностью восстановить их для разных уровней солнечной активности.
3. Обнаружено заметное уменьшение декрементов в линиях водорода и гелия в середине 24-го цикла – максимуме активности.
4. Временные профили декрементов во вспышках примерно повторяют временные профили потоков вспышечного излучения, по окончании вспышки декременты возвращаются к своим довыспышечным фоновым значениям.

Литература

1. Woods T.N. et al. // Solar Phys., 2012, **275**, 115.
2. SDO - http://lasp.colorado.edu/eve/data_access/service/plot_averages/index.html
3. Kleeorin Y. et al. // MNRAS, 2016, **460**, 3960.
4. Катыева Н.А., Ермолаева Т.А., Гринин В.П. // Астрофизика, 2017, **60**, 4, 579.