



УДК 523.985

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

Е. А. Бруевич^{1,2}, Т. В. Казачевская¹, Г. В. Якунина²¹Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова, Россия, г. Москва²МГУ им. М.В. Ломоносова, Государственный астрономический институт им. П.К.Штернберга, г. Москва

В работе проведено исследование крайнего ультрафиолетового излучения Солнца (КУФ-излучения). Были использованы архивные данные наблюдений на Solar Dynamics Observatory SDO/EVE. Временной ряд ежедневных значений потоков излучения вне вспышек в КУФ-диапазоне сформирован нами из архива ежедневных наблюдений SDO/EVE за 2010–2018 гг. В работе анализируются данные измерений потоков в линиях нейтрального He I 58.4 нм, 53.7 нм и ионизованного гелия He II 30.4 нм, 25.6 нм, сформированный нами из архива SDO/EVE. Оценено изменение интенсивности этих линий с солнечной активностью от минимума до максимума 24-го цикла.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: КУФ-потоки излучения, 24-й цикл солнечной активности.

1. ВВЕДЕНИЕ

Солнечное УФ-излучение формируется в верхней хромосфере и переходной области; потоки в этом диапазоне составляют сравнительно небольшую долю в общем потоке излучения. К УФ-области спектра электромагнитных волн относится диапазон от 5 до 400 нм. При этом исследования в ультрафиолетовой (УФ) являются необходимыми при прогнозе состояния ионосферы Земли. УФ-фотоны поглощаются в верхних слоях атмосферы Земли, вызывают ионизацию и диссоциацию компонентов атмосферы, приводящих к образованию ионосферы. В крайнем УФ (4–105 нм) Солнце исключительно переменное, его яркость в этом диапазоне меняется в сотни и тысяч раз. Потоки в крайнем ультрафиолетовом излучении (КУФ) определяют температуру внешних слоев земной атмосферы. В 24-м цикле активности мы исследовали КУФ-излучение Солнца, используя данные Solar Dynamics Observatory SDO/EVE. Временной ряд ежедневных значений потоков излучения вне вспышек в КУФ-диапазоне сформирован нами из архива ежедневных наблюдений SDO/EVE за 2010–2018 гг. Данные доступны на сайте SDO (<https://sdo.gsfc.nasa.gov/data/dataaccess.php>).

Эксперимент SDO/EVE ставит следующие задачи:

- Изучение солнечного КУФ-излучения более чем в 50 линиях и спектральных диапазонах;
- Изучение переменности КУФ-излучения на разных временных шкалах с целью улучшения возможности для прогнозирования переменности излучения в КУФ-диапазоне;

- Изучение всплывающей активности и вариаций фонового потока в разных EUV-линиях и EUV-диапазонах.

В работе исследуются данные измерений потоков в линиях нейтрального HeI 58.4 нм, 53.7 нм и ионизованного гелия He II 30.4 нм, 25.6 нм, сформированный нами из архива SDO/EVE. Оценено изменение интенсивности этих линий с солнечной активностью от минимума до максимума 24-го цикла.

Также проведено исследование Лаймановских декрементов в линиях нейтрального водорода H I в 24-м цикле и во время вспышки класса X1.9, произошедшей 03.11.2011. Декременты сильно зависят от условий в излучающей среде, их используют при изучении в качестве индикатора переменности параметров излучающей среды, в нашем случае — это переменность параметров излучающей солнечной плазмы.

Мы использовали наблюдения потоков в УФ линиях водорода серии Лаймана из архива наблюдений SDO/EUV, 121.6 нм ($L\alpha$), 102.6 нм ($L\beta$), 97.3 нм ($L\gamma$), 95.0 нм ($L\delta$). Эти наблюдения доступны с 1 мин. временным разрешением.

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

2. ВАРИАЦИИ ПОТОКОВ КУФ-ИЗЛУЧЕНИЯ В 24-М ЦИКЛЕ В ЛИНИЯХ НЕЙТРАЛЬНОГО ГЕЛИЯ HE I 58.4 НМ И 53.7 НМ (2010–2018 ГГ.) И ИОНИЗОВАННОГО ГЕЛИЯ HE II 30.4 НМ И 25.6 НМ (2010–2015 ГГ.)

Текущий 24й цикл активности является самым слабым солнечным циклом более чем за последние 100 лет, [1]. Линии гелия по-разному изменяются в этом цикле. Поток в линии He I ($\lambda=58.4$ нм) в 24-м цикле уменьшается примерно на 45%, в линии He II ($\lambda=30.4$ нм) примерно на 25% от величины в максимуме активности. Поток в линии He II $\lambda=30.4$ нм уменьшается примерно на 18% от величины в максимуме активности, (Рис. 1, Рис. 2).

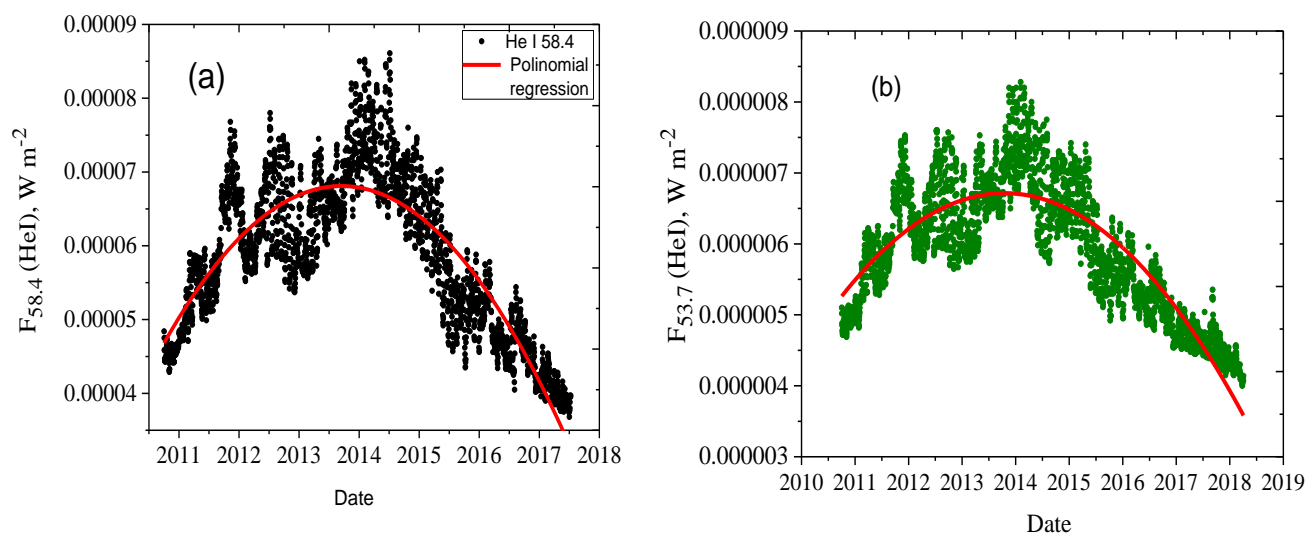


Рис. 1. (a) Вариации ежедневных значений потока $F_{58.4}$ в 24-м цикле; (b) Вариации ежедневных значений потока $F_{53.7}$ в 24-м цикле. Указаны линии квадратичной регрессии.

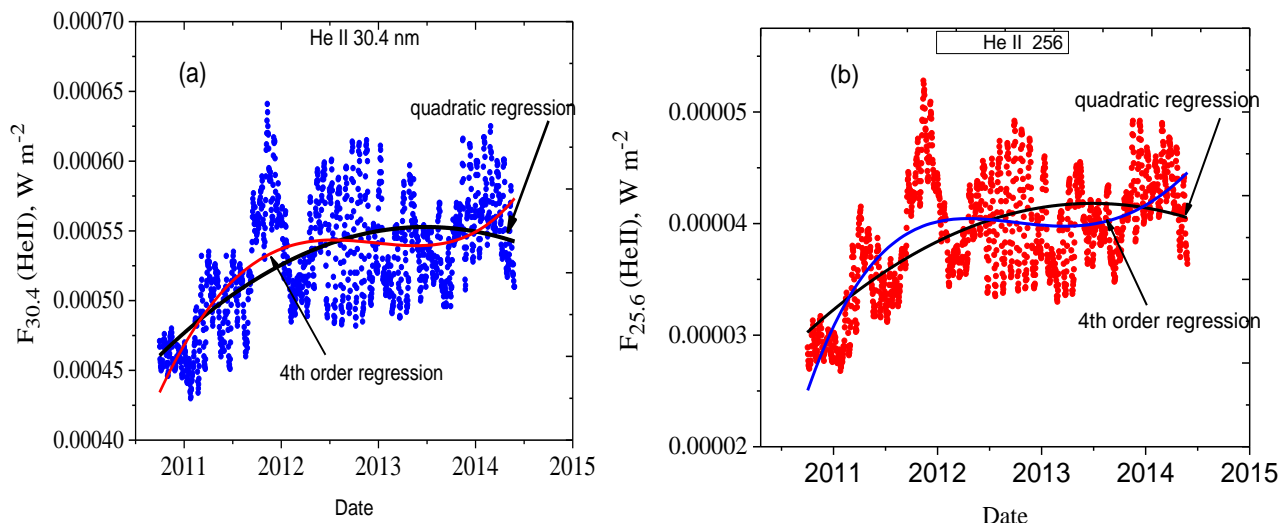


Рис. 2. (a) Вариации ежедневных значений потока $F_{30.4}$ в 24-м цикле; (b) Вариации ежедневных значений потока $F_{25.6}$ в 24-м цикле. Указаны линии квадратичной и регрессии 4-го порядка.

3. ЗАВИСИМОСТЬ ПОТОКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ В КУФ-ЛИНИЯХ НЕ I и НЕ II ОТ УРОВНЯ АКТИВНОСТИ СОЛНЦА (ИНДЕКС $F_{10.7}$)

Изучение вариаций потоков в линиях гелия и их взаимосвязь с текущим уровнем активности Солнца, определяемым по потоку в радиодиапазоне на волне 10.7 см ($F_{10.7}$), актуально для прогноза состояния атмосферы Земли. 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, (Рис. 1, 2, 3).

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 He I (58.4, 53.7 нм) и He II (30.4, 25.6 нм) — входные параметры многих ионосферных моделей. Мы используем регрессионные уравнения второго порядка, так как в случае квадратичной регрессии величина RSS (Residual Sum of Squares) заметно меньше, чем в случае линейной регрессии (т.е. линия квадратичной регрессии более точно описывает массив наблюдений). В таблице приведены коэффициенты квадратичной регрессии для зависимостей потоков в четырех линиях гелия серии Лаймана от уровня активности Солнца (индекс $F_{10.7}$) в 24-м цикле.

В таблице 1 приведены коэффициенты квадратичной регрессии для зависимостей потоков в четырех линиях гелия серии Лаймана от индекса $F_{10.7}$ в 24-м цикле.

Таблица 1. Коэффициенты квадратичной регрессии для зависимостей потоков в четырех линиях гелия серии Лаймана от уровня активности Солнца (индекс $F_{10.7}$) в 24-м цикле.

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

Коэффициенты квадратичной регрессии A , $B1$, $B2$ соответствуют уравнению (1):

$$F_{Line} = A + B1 \cdot F_{10.7} + B2 \cdot F_{10.7}^2 \quad (1)$$

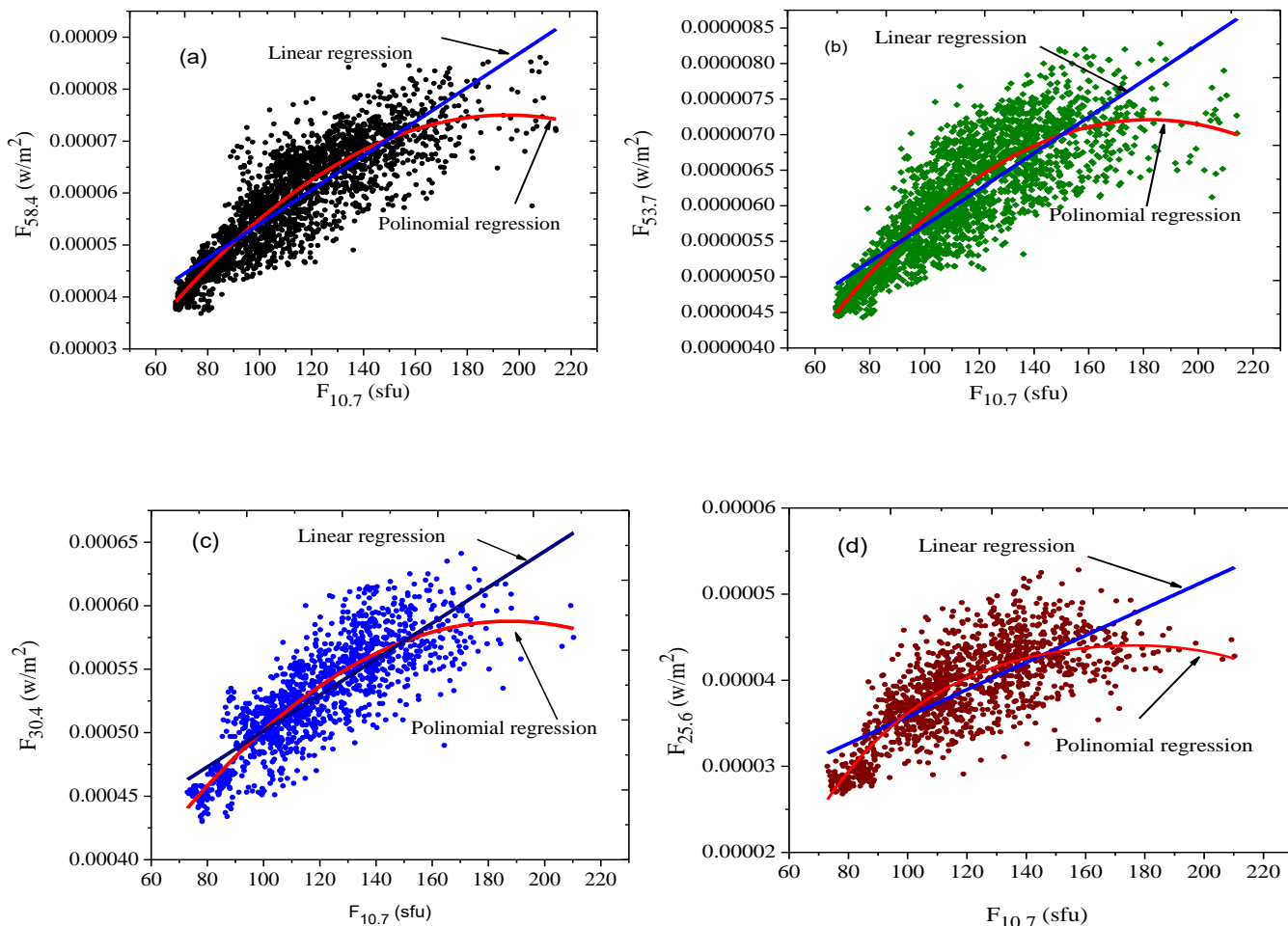


Рис. 3. Зависимость потоков излучения в КУФ-линиях He I и He II от $F_{10.7}$: (a) He I 58.4 nm; (b) He I 53.7 nm; (c) He II 30.4 nm; (d) He II 25.6 nm. Синяя линия — линейная регрессия, красная линия — квадратичная регрессия.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАЙМАНОВСКИХ ДЕКРЕМЕНТОВ В ЛИНИЯХ НЕЙТРАЛЬНОГО ВОДОРОДА H β В 24-М ЦИКЛЕ И В ТЕЧЕНИЕ КОРОТКОГО ПЕРИОДА (МЕНЕЕ ЧАСА) ВО ВРЕМЯ ВСПЫШКИ

Декремент — отношение интенсивностей спектральных линий. Обычно интенсивность линии L_{β} водорода принимают за единицу, при этом интенсивности других линий сравнивают с ней. Исследование декрементов КУФ-линий водорода и гелия важно для диагностики излучающей среды, т. к. населенность энергетических уровней зависит от свойств излучающего водородно-гелиевого газа в частотах спектральных линий и его электронной концентрации.

На рисунке 4 видны циклические колебания вокруг линии квадратичной регрессии. Декремент $D1 = F(L_{\alpha}) / F(L_{\beta})$ изменяется в 24-м цикле активности примерно на 25% от максимальных значений до минимальных в 2014 г., когда в 24-м цикле был вторичный максимум. Декремент $D2 = F(L_{\gamma}) / F(L_{\beta})$ изменяется в цикле примерно на 10%. Декремент $D3 = F(L_{\delta}) / F(L_{\beta})$ изменяется в цикле примерно на 5%.

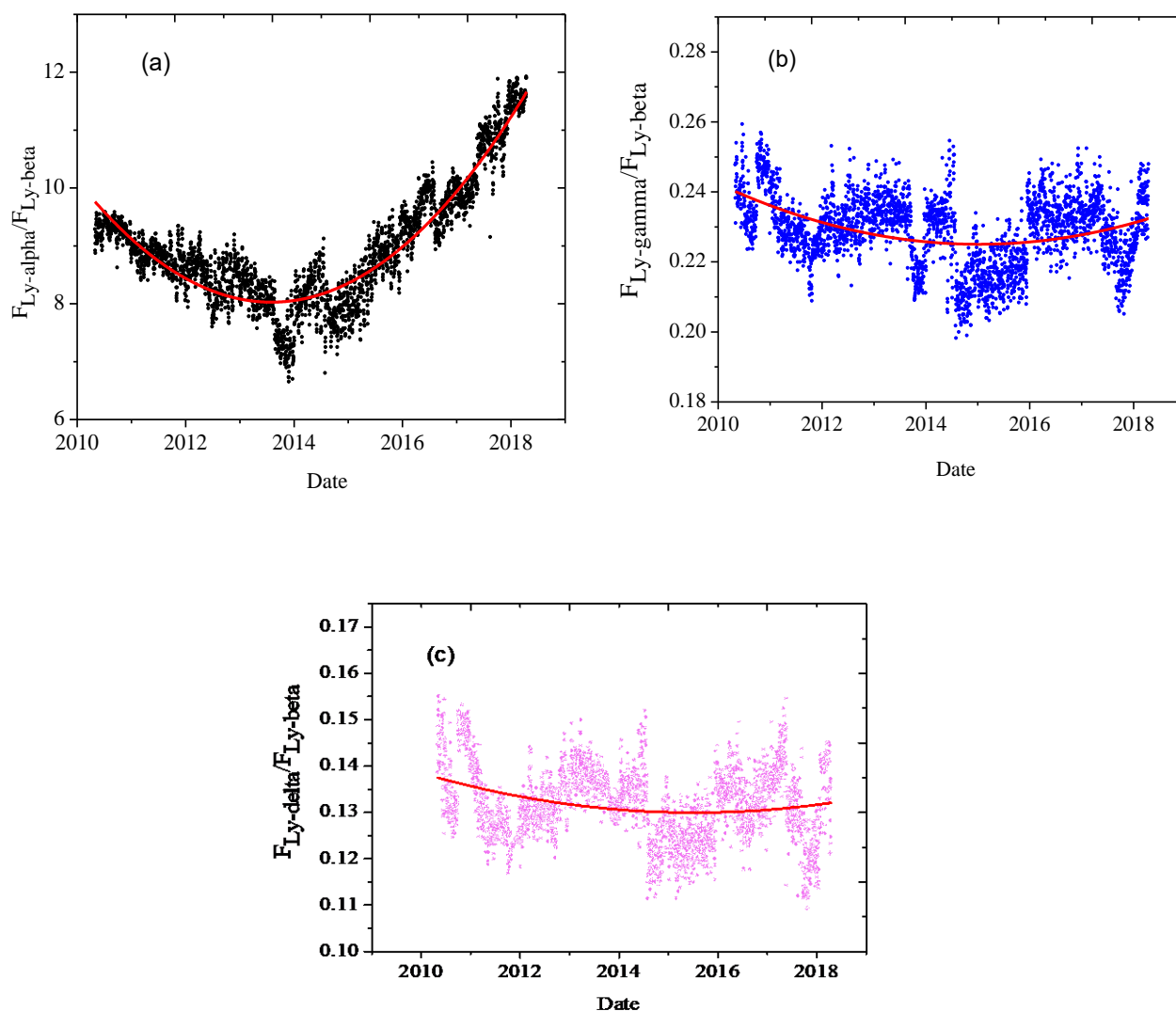


Рис. 4. Вариации ежедневных значений декрементов (a) $D1=F(L_{\alpha}) / F(L_{\beta})$, (b) $D2=F(L_{\gamma}) / F(L_{\beta})$ и (c) $D3=F(L_{\delta}) / F(L_{\beta})$ в 24-м цикле. Указаны линии квадратичной регрессии.

Данные SDO/EVE с временным разрешением в 1 мин. дают возможность изучить поведение водородных декрементов во вспышках, [2, 3]. Из рисунка 5 видно, что $D1$ имеет резкий минимум, совпадающий по времени с моментом максимума вспышки. Декременты $D2$ и $D3$ имеют резкие максимумы, также совпадающие с моментом максимума вспышки. По продолжительности вариации декрементов во вспышке соответствуют времени длительности вспышки.

Отношение потоков в эмиссионных линиях зависят от соответствующих коэффициентов излучения ε_{ik} , [4]. Эти коэффициенты при переходе $i - k$ описываются формулой (2):

$$\varepsilon_{ik} = N_k \cdot A_{ki} \cdot h \cdot \nu_{ik} \cdot \beta_{ik} / 4p \quad (2)$$

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.

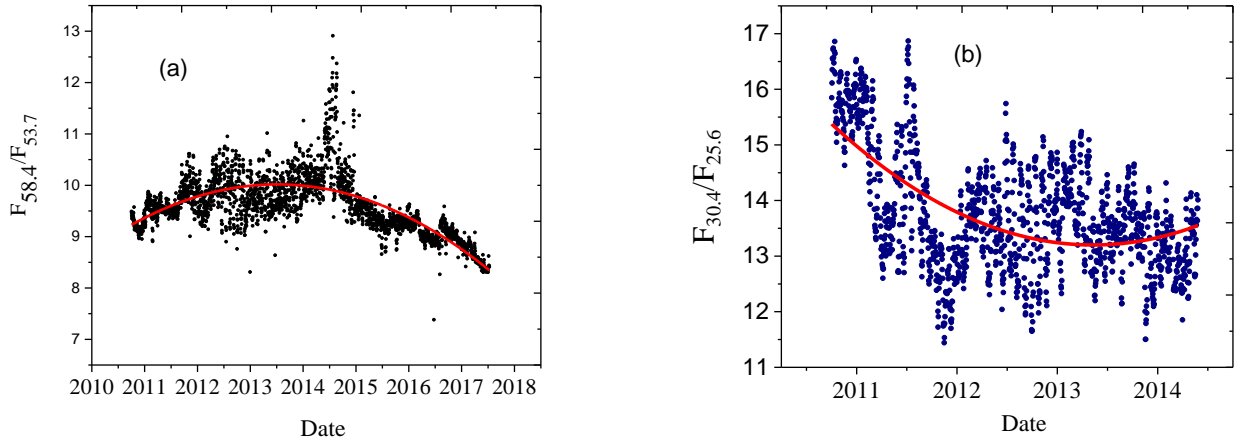


Рис. 5. Вариации ежедневных значений декрементов (а) $D1\text{He I} = F_{58.4}/F_{53.7}$; (б) $D1\text{He II} = F_{30.4}/F_{25.6}$ в 24-м цикле. Указаны линии квадратичной регрессии.

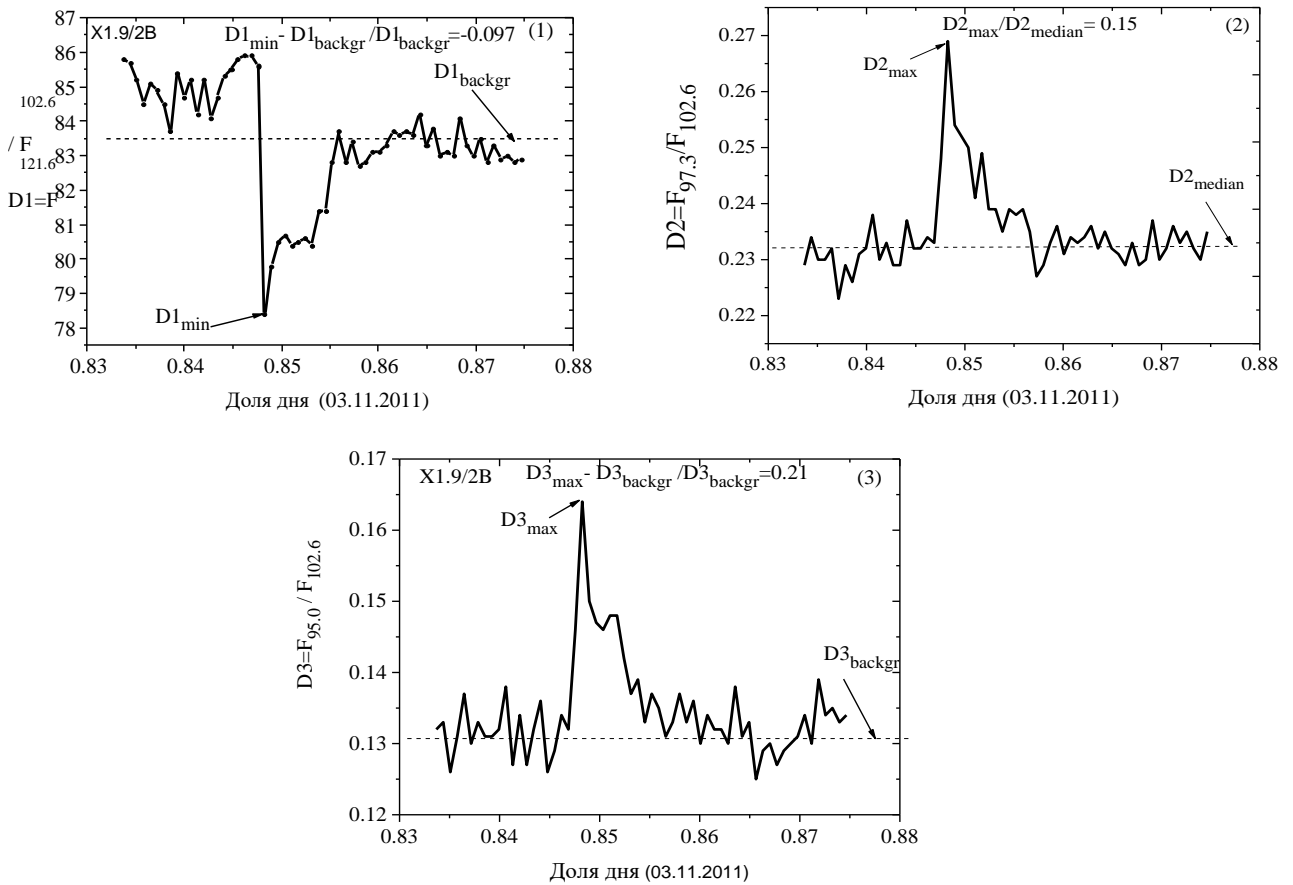


Рис. 6. Вариации значений лаймановских декрементов во вспышке 03.11.2011. (1) $D1 = F(L_\alpha) / F(L_\beta)$; (2) $D2 = F(L_\gamma) / F(L_\beta)$; (с) $D3 = F(L_\delta) / F(L_\beta)$ во вспышке X1.9/2B от 03.11.2011.

Отношения потоков в линиях водорода $F(L_\alpha) / F(L_\beta) = \epsilon_{21} / \epsilon_{31}$ ($D1$), $F(L_\gamma) / F(L_\beta) = \epsilon_{41} / \epsilon_{31}$, ($D2$) и $F(L_\delta) / F(L_\beta) = \epsilon_{51} / \epsilon_{31}$, ($D3$) заметно изменяются в течение 11-летнего цикла активности. На 25% декремент $D1$, на 10% декремент $D2$ и на 5% декремент $D3$.

При пренебрежении изменениями величины β_{ik} в цикле, а также во вспышках вариации декрементов связаны с относительными изменениями населенностей соответствующих уровней в эмиссионных линиях.

Во вспышках разных классов декременты изменяются значительно по величине, что говорит о заметном изменении параметров среды во вспышках.

Эти изменения во вспышках носят (как и сами потоки в линиях) кратковременный характер, порядка десятка — нескольких десятков минут, после чего среда согласно поведению декрементов, возвращается в до вспышечного состояния.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Исследованы потоки в спектральных линиях He I и He II и их вариации в 24-м цикле солнечной активности. Получено, что разные линии по-разному изменяются с изменением солнечной активности.
- Регрессионные зависимости потоков в линиях серии Лаймана (ежедневные измерения SDO/EVE) позволяют с высокой точностью восстановить потоки по величине индекса $F_{10.7}$.
- Вариации декрементов линий гелия He I и He II, а также в линиях водорода H I в 24-м цикле активности (в первом приближении связанные с вариациями населенностей возбужденных уровней в течение солнечного цикла), показывают, что экстремумы вариаций декрементов соответствуют второму максимуму 24-го цикла.
- Обнаружено заметное уменьшение декрементов в середине цикла — максимуме активности. Исключение составляет декремент в линиях нейтрального гелия $D1\text{HeI} = F_{58.4}/F_{53.7}$. В этом случае в максимуме цикла наблюдается небольшое увеличение величины декремента.
- Временные профили декрементов во вспышках примерно повторяют временные профили потоков вспышечного излучения, по окончании вспышки декременты возвращаются к своим до-вспышечным фоновым значениям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Y. Kleeorin., N. Safiullin, N. Kleeorin, S. Porshnev, I. Rogachevskii, D. Sokolov// Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2016, P. 460, 3960;
2. SDO - http://lasp.colorado.edu/eve/data_access/service/plot_averages/index.html;
3. GOES-15 — http://www.n3kl.org/sun/noaa_archive/;
4. Н. А. Катышева, Т. А. Ермолаева, В. П. Гринин // Астрофизика, 60, Вып. 4, С. 579, 2017.

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., Kazachevskaya T.V., Yakunina G.V.

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.

KEYWORDS: EUV-RADIATION FLUXES, THE 24TH CYCLE OF SOLAR ACTIVITY.