

ЛАЙМАНОВСКИЕ ДЕКРЕМЕНТЫ ЛИНИЙ НЕЙТРАЛЬНОГО ВОДОРОДА В СПЕКТРЕ СОЛНЦА ПО НАБЛЮДЕНИЯМ SDO/EVE. ВАРИАЦИИ В ТЕЧЕНИЕ 24-го СОЛНЕЧНОГО ЦИКЛА И В ОТДЕЛЬНЫХ ВСПЫШКАХ КЛАССОВ М И Х

Е.А.БРУЕВИЧ, В.В.БРУЕВИЧ

Поступила 6 февраля 2019

Принята к печати 29 мая 2019

Анализируются данные спутниковых наблюдений потоков в линиях серии Лаймана и их относительные вариации как в течение 24-го цикла, так и в отдельных вспышках классов М и Х. Декремент $D1$ ($D1 = F(L_{\alpha})/F(L_{\beta})$) изменяется в течение солнечного 24-го цикла активности примерно на 25% от своих максимальных значений до минимальных в 2014г., когда в 24-м цикле был вторичный максимум согласно основным индексам. Декремент $D2$ ($D2 = F(L_{\gamma})/F(L_{\beta})$) изменяется в цикле примерно на 10%, а декремент $D3$ ($D3 = F(L_{\delta})/F(L_{\beta})$) изменяется в цикле примерно на 5%. $D1$, $D2$ и $D3$ также с меньшими амплитудами изменяются в цикле с периодами, аналогичными периодам квазидвухлетних вариаций основных индексов активности. Во вспышках рентгеновских классов от М до Х вариации лаймановских декрементов составляют от 2% до 20%, причем для вспышек с большей энергией в мягком рентгене вариации декрементов в среднем больше.

Ключевые слова: *Солнце: циклы активности: эмиссионные линии водорода: 24-й цикл: лаймановские декременты: Вспышки: лаймановские декременты*

1. *Введение.* Эмиссионные линии водорода наблюдаются в спектрах различных астрономических объектов, включая Солнце и звезды. Изучение относительных интенсивностей водородных линий является важнейшим инструментом для определения параметров излучающей среды (см. [1,2]).

Для случая, когда имеет место состояние полной термализации атомных уровней (такие состояния наблюдаются в спектрах звездных и солнечных вспышек), расчеты термодинамических характеристик водородной плазмы и отношения интенсивностей $I(L_{\alpha})/I(H_{\alpha})$ выполнены в [3]. В [4] изучаются бальмеровские и лаймановские декременты для диагностики межзвездных пылевых облаков, модельные расчеты сравниваются с наблюдениями. В [5] проведен статистический анализ наблюдений лаймановских декрементов солнечных протуберанцев и сравнение этих наблюдений с модельными расчетами. В [6] изучаются термодинамические характеристики водородного

газа вблизи состояния термализации. Диагностика излучающего газа основана на анализе линий бальмеровских и лаймановских серий.

С развитием спутниковых наблюдений в ультрафиолетовой области, в частности на обсерватории SDO, стали доступны для анализа длинные ряды наблюдений потоков от солнечного диска в линиях серии Лаймана [7].

Эти наблюдения позволяют рассмотреть вариации декремента $F(L_\alpha)/F(L_\beta)$, обозначим его как D1, декремента $F(L_\gamma)/F(L_\beta)$ - D2 и декремента $F(L_\delta)/F(L_\beta)$ - D3. Данные о потоках в 4-х линиях серии Лаймана в течение всего срока эксперимента SDO/EVE охватывают 24-й цикл практически полностью. Эти потоки доступны с 1-минутным временным разрешением, что позволяет сравнивать величины D1, D2 и D3 не только в 11-летнем цикле, но и во вспышках разных мощностей. Исследование декрементов линий водорода очень важно для диагностики излучающей среды, так как населенность электронных энергетических уровней зависит от оптических свойств излучающего водородного газа в частотах спектральных линий и его электронной концентрации.

Целью настоящей работы является изучение вариаций лаймановских декрементов от Солнца вне вспышек (для ежедневных величин фоновых потоков в линиях L_α , L_β , L_γ и L_δ), а также вариаций лаймановских декрементов во вспышках рентгеновских классов M и X.

2. Вариации лаймановских декрементов потоков солнечного излучения вне вспышек в течение 24-го цикла. В работе исследуются данные измерений потоков в линиях нейтрального водорода, серии Лаймана 121.6 нм, 102.6 нм, 97.3 нм, 95.0 нм из архива данных наблюдений Solar Dynamics Observatory - SDO/EVE в 24-м цикле активности. Эксперимент SDO/EVE ставит следующие задачи: изучение солнечного EUV- излучения более чем в 50 линиях и спектральных диапазонах; изучение его переменности на разных временных шкалах с целью улучшения возможности для прогнозирования переменности излучения в крайнем УФ-диапазоне, а также изучение вспышечной активности и вариаций фонового потока в разных EUV- линиях и EUV- диапазонах.

Согласно нашим оценкам, потоки в линиях серии Лаймана - $F_{121.6}$, $F_{102.6}$, $F_{97.3}$, $F_{95.0}$, полученные из архивов SDO/EVE (усредненные за день и не учитывающие потоки от вспышек), очень тесно связаны со средним уровнем активности Солнца по измерениям на волне 10.7 см ($F_{10.7}$). Коэффициенты линейной корреляции Пирсона между $F_{121.6}$ и $F_{10.7}$ составляют 0.94, между $F_{102.6}$ и $F_{10.7}$ - 0.87, между $F_{97.3}$ и $F_{10.7}$ - 0.82, между $F_{95.0}$ и $F_{10.7}$ - 0.78.

Временные ряды ежедневных значений декрементов D1, D2 и D3 по наблюдениям, охватывающих период с 2010 по 2018гг., представлены на

рис.1-3 (верхние панели).

На рис.1 (верхняя панель) показано изменение величины D1 по данным наблюдений эксперимента SDO/EVE, а также линия квадратичной регрессии. Видно, что в 2014г., когда наблюдался вторичный максимум активности (по различным индексам активности он превосходил первичный максимум 2012г.), имели место минимум значений D1, примерно на 25% отличающихся от величины D1 в 2018г., когда индексы активности достигли своих минимальных значений в конце 24-го цикла. Видны циклические колебания с меньшими

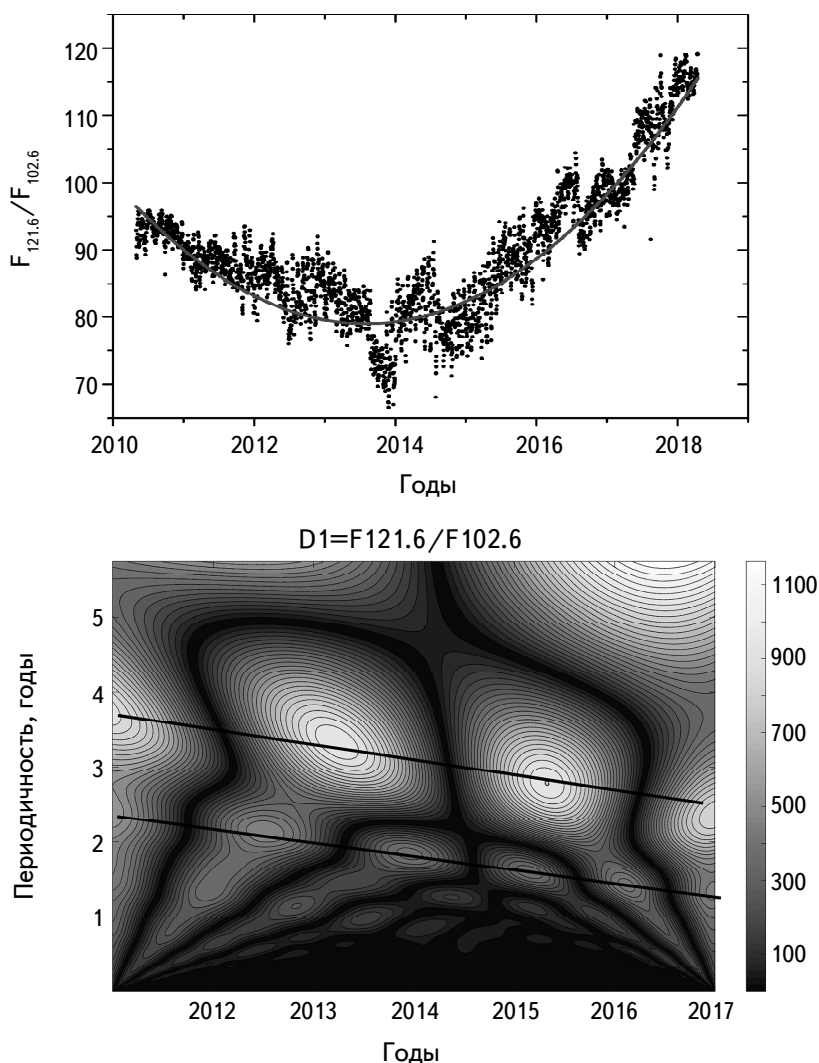


Рис.1. Вариации лаймановского декремента $F(L_{\alpha})/F(L_{\beta}) = D1$ в течение 24-го цикла активности - верхняя панель; вейвлет-отображение вторичной периодичности D1 - нижняя панель.

периодами и меньшими периодами вокруг линии квадратичной регрессии. Для более точной оценки их периодов и вариаций этих периодов в 24-м цикле проведен вейвлет-анализ временного ряда D1, представленного на верхней панели рис.1.

Согласно вейвлет-отображению на рис.1 (нижняя панель), колебания величины D1 с меньшими периодами образуют две последовательности с периодами 3.7 - 2.8 и 2.3 - 1.5 года. Примерно такие же последовательности

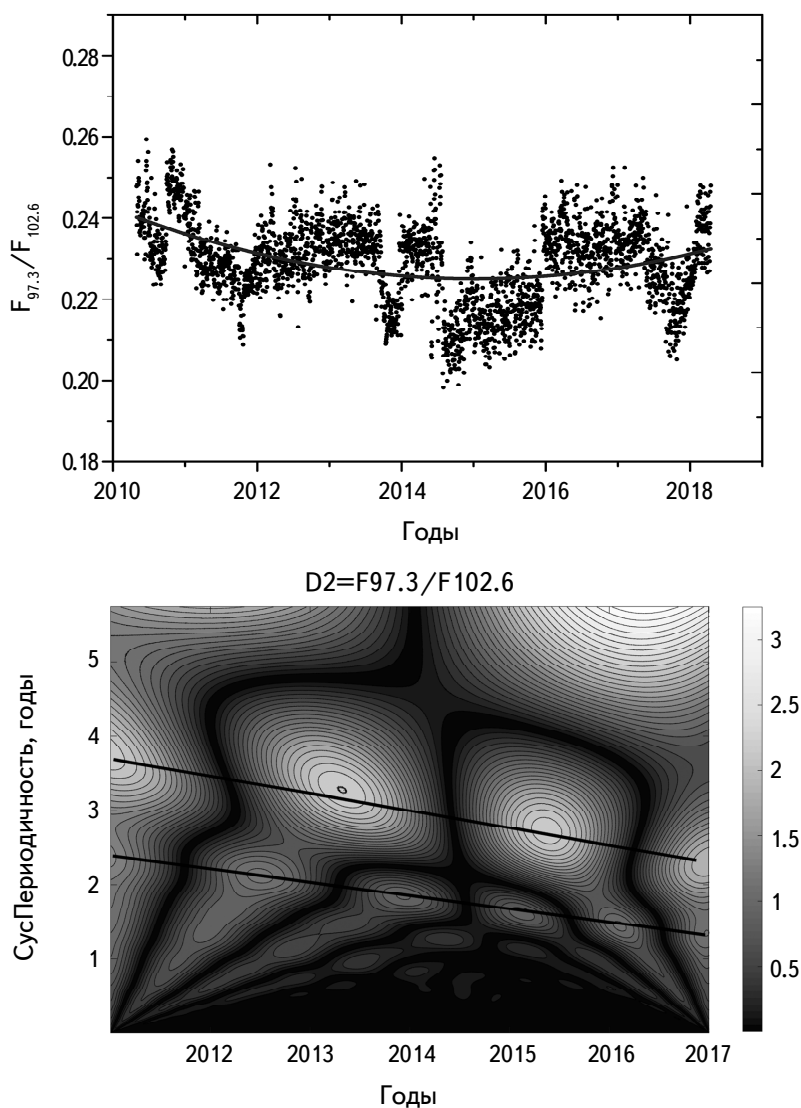


Рис.2. Вариации лаймановского декремента $I(L_{\gamma})/I(L_{\beta}) = D2$ в течение 24-го цикла активности - верхняя панель; вейвлет-отображение периодичности D2 - нижняя панель.

с изменяющимися малыми периодами внутри одного 11-летнего цикла показывают квазидвухлетние колебания основных солнечных индексов, таких как числа Вольфа и $F_{10.7}$, [8].

Отметим, что сами ряды D1, D2 и D3 выглядят по-разному в 24-м цикле и у них четко определяется минимум величин в 2014г. При этом вейвлет-анализ с помощью материнской функции Добеши 10 показывает практически идентичный набор малых периодов и их изменений в 24-м цикле. Отличаются

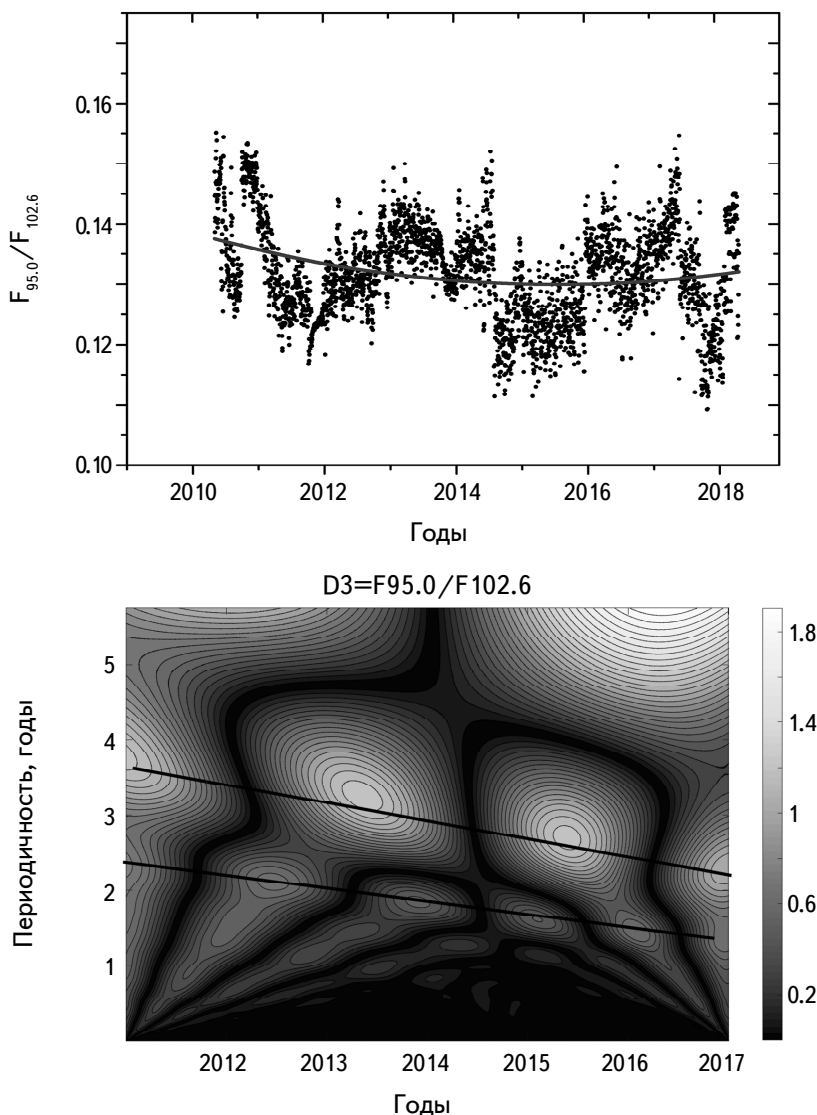


Рис.3. Вариации лаймановского декремента $I(L_{\delta})/I(L_{\beta}) = D3$ в течение 24-го цикла активности - верхняя панель; вейвлет-отображение периодичности D3 - нижняя панель.

только шкалы, находящиеся справа от вейвлет-отображения, которые характеризуют величину вероятности того, что в данной точке вейвлет-картинки существует соответственная периодичность. Различие в шкалах на вейвлет-отображениях рядов D1, D2 и D3 объясняется тем, что величины вейвлет-коэффициентов на трехмерной картинке (третье измерение характеризуется интенсивностью цвета, см. шкалу справа) вычисляются с помощью свертки значений D1, D2 и D3 с материнским вейвлетом.

На рис.2 (верхняя панель) показано изменение величины D2 по данным наблюдений эксперимента SDO/EVE. Сплошная линия - линия квадратичной регрессии. Видно, что с 2014 по 2015гг., с момента вторичного максимума активности, имеет место не очень явный минимум значений D2, примерно на 10% отличающийся от величины D2 в 2010г., когда индексы активности были близки к своим минимальным значениям в начале 24-го цикла. С 2015 по 2018гг. величина D2 характеризуется практически постоянным значением, увеличиваясь к концу цикла в 2017-2018гг. примерно на 4-5%. Колебания величины D2 согласно рис.2 (нижняя панель) с меньшими периодами составляют 3.8 - 2.8 и 2.3 - 1.8 года.

На рис.3 (верхняя панель) показано изменение величины D3 по данным наблюдений эксперимента SDO/EVE. Сплошная линия - линия квадратичной регрессии. Видно, что в 2014г., в момент вторичного максимума активности имеет место не очень явный минимум значений D3, примерно на 5% отличающийся от величины D3 в 2010г., когда индексы активности были близки к своим минимальным значениям в начале 24-го цикла. С 2014 по 2018гг. величина D3 характеризуется практически постоянным значением до конца цикла в 2018г. Колебания величины D3 согласно рис.3 (нижняя панель) с меньшими периодами составляют 3.7 - 2.7 и 2.4 - 1.5 года, такая периодичность, как и в случае с величиной D2, соответствует квазидвухлетним колебаниям величин солнечных индексов в 11-летнем цикле.

3. Вариации лаймановских декрементов потоков солнечного излучения во вспышках. Для иллюстрации изменения потоков в линиях лаймановской серии во время вспышек мы выбрали довольно сильную вспышку рентгеновского класса X1.9 и оптического класса 2B, произошедшую 03.11.2011.

На рис.4 представлены временные контуры изучаемых линий в течение вспышки. Видно, что эти потоки хорошо соответствуют друг другу, за исключением того, что в линии 121.6нм вторичный максимум вспышки, произошедший через несколько минут после первичного, выше, а в остальных линиях он заметно ниже. В линиях 97.3 нм и 95.0 нм максимумы гораздо более резкие, чем в линиях 121.6 и 102.6 нм.

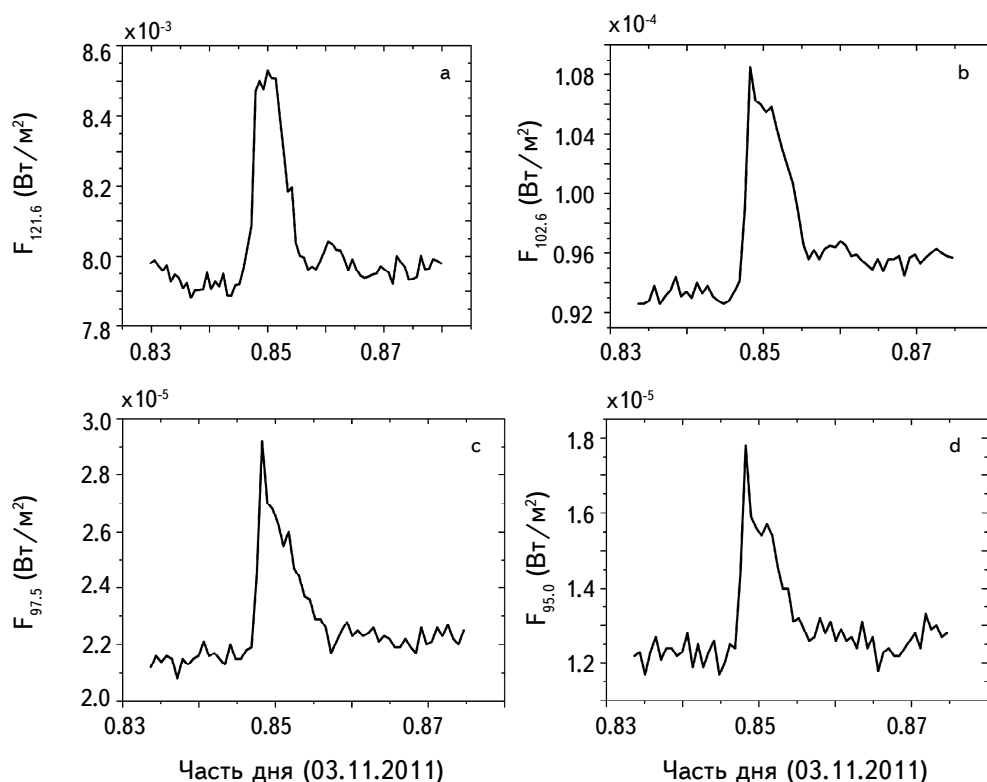


Рис.4. Вариации потоков в линиях водорода серии Лаймана во вспышке 03.11.2011 рентгеновского класса X1.9 (2B); a, b, c и d соответствуют потокам $F_{121.6}$, $F_{102.6}$, $F_{97.3}$ и $F_{95.0}$.

На рис.5 представлены вариации декрементов D1, D2, D3 во вспышке 03.11.2011. 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. На рис.5 отмечены уровни значений декрементов D1, D2, D3 вне вспышки (фоновые значения) для того, чтобы оценить относительные вариации декрементов во вспышке.

Мы оценили относительные вариации декрементов во вспышках разных классов от M2.0 до X6.9. Результаты этих оценок представлены в табл.1.

Оказалось, что есть тенденция к увеличению относительных вариаций декрементов во вспышках с увеличением рентгеновского класса вспышки, однако эта зависимость очень слабая (коэффициент корреляции менее 0.5).

В табл.1 приводятся различные характеристики 36 вспышек классов от M2.0 до X6.9, произошедших в 24-м цикле: рентгеновский и оптический классы вспышек, величины $D1 = F_{121.6}/F_{102.6}$, $D2 = F_{97.3}/F_{102.6}$ и $D3 = F_{95.0}/F_{102.6}$ в

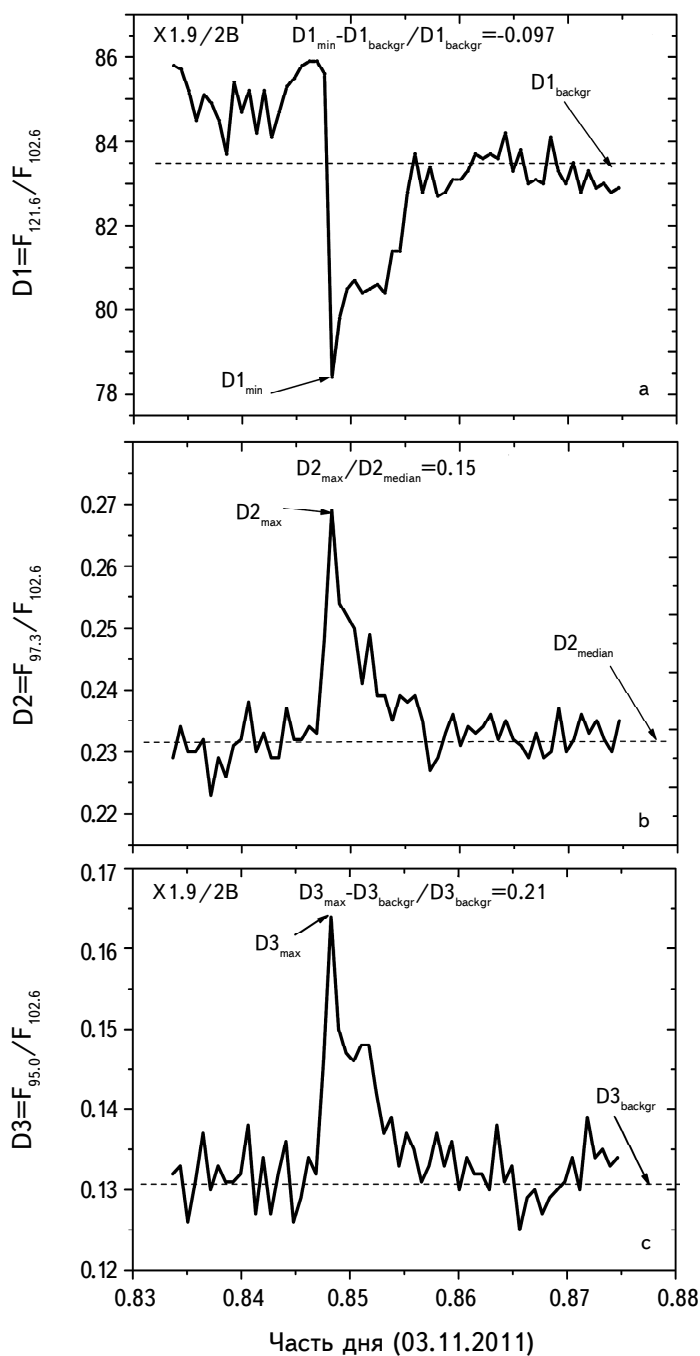


Рис.5. Вариации декрементов серии Лаймана водорода в солнечной вспышке 03.11.2011 рентгеновского класса X1.9 (2B); а, б и с соответствуют D1, D2, D3, $D1_{min}$, $D2_{max}$, $D3_{max}$ - моменты экстремумов декрементов, совпадающие с моментом максимума вспышки. $D1_{backgr}$, $D2_{backgr}$, $D3_{backgr}$ - фоновые значения декрементов вне вспышки.

Таблица 1

ПАРАМЕТРЫ 36 ВСПЫШЕК 24 ЦИКЛА

Дата вспышки	Рентгеновский класс вспышки/балл в Н α /длит. в Н α	D1 ^{max} / Δ D1 (%)	D2 ^{max} / Δ D2 (%)	D3 ^{max} / Δ D3 (%)	индекс XI, (Дж/м ²)	E _{0.1-0.8} , (Дж/м ²)
13.02.2011	M6.6/1N/72 мин	89.5/3.1	0.268/3.2	0.164/5.8	XI9.56E-2	0.072
15.02.2011	X2.3/2N/60 мин	89.73/1.8	0.253/9.4	0.159/18.4	XI3.24E-1	0.2628
18.02.2011	M6.6/1F/20 мин	88.3/3.5	0.242/2.5	0.138/7.0	XI2.77E-2	0.053
24.02.2011	M3.5/1F/19 мин	84.6/2.0	0.235/3.4	0.139/5.2	XI4.62E-2	0.042
07.03.2011	M3.7/1F/90 мин	85.0/3.5	0.250/8	0.140/9.7	XI2.59E-1	0.179
08.03.2011	M5.3/1F/20 мин	87.2/4.2	0.242/3.8	0.148/10.4	XI1.30E-1	0.0806
08.03.2011	M4.4/1F/23 мин	87.0/4.5	0.240/3.0	0.144/8.2	XI1.32E-1	0.081
09.03.2011	X1.5/2B/63 мин	85.0/3.0	0.244/4.1	0.140/6.9	XI1.3E-1	0.107
14.03.2011	M4.2/1N/45 мин	84.0/2.0	0.245/6.1	0.146/12.3	XI1.51E-2	0.028
03.08.2011	M5.3/2B/60 мин	88.8/3.1	0.238/3.5	0.137/7.1	XI1.92E-1	0.148
04.08.2011	M9.3/2B/84 мин	89.5/2.7	0.262/12.9	0.155/6.6	XI1.18E-1	0.112
09.08.2011	X6.9/2B/72 мин	90.6/3.1	0.264/12.5	0.154/19.2	XI2.96E-1	0.2574
06.09.2011	X2.1/2B/55 мин	89.9/3.0	0.260/11.0	0.141/13.7	XI1.67E-1	0.118
07.09.2011	X1.8/3B/74 мин	86.0/2.0	0.241/7.5	0.144/16.0	XI1.30E-1	0.101
08.09.2011	M6.7/1N/60 мин	86.0/3.5	0.245/6.8	0.138/11.2	XI6.65E-2	0.059
22.09.2011	X1.5/2N/118 мин	84.9/7.2	0.241/6.2	0.141/14.2	XI9.27E-1	0.756
24.09.2011	X1.9/2B/49 мин	85.6/3.5	0.263/10.2	0.161/20.0	XI1.87E-1	0.143
25.09.2011	M7.4/2N/70 мин	83.8/4.0	0.240/4.6	0.157/22.0	XI1.69E-1	0.094
03.11.2011	X1.9/2B/84 мин	78.2/9.7	0.244/15.5	0.148/25.1	XI1.96E-1	0.168
26.12.2011	M2.3/SF/37 мин	77/2.5	0.241/4.4	0.135/5.0	XI4.00E-2	0.045
31.12.2011	M2.4/1F/19 мин	76/2.0	0.240/7.1	0.150/15.0	XI1.73E-2	0.025
23.01.2012	M8.7/2B/135 мин	86/6.6	0.253/7.5	0.175/25.0	XI4.43 E-1	0.389
12.07.2012	X1.4/2B/250 мин	89/5.5	0.251/7.8	0.168/12.0	XI9.1 E-1	0.792
20.10.2012	M9.1/SF/30 мин	91/6.0	0.255/9.5	0.169/20.5	XI6.35E-2	0.064
23.10.2012	X1.9/1F/90 мин	79/4.0	0.235/3.5	0.138/7.6	XI1.04 E-1	0.119
06.09.2017	X9.3/2B/40 мин	77/21.0	0.227/35.0	0.270/45.0	XI1.12E0	0.343
10.09.2017	X8.2/3B/120 мин	78/7.5	0.223/8.2	0.121/9.3	XI2.73E0	2.62

моменты максимума вспышек и их максимальные относительные вариации в максимуме вспышки, вспышечный индекс XI, введенный в [9] и полная энергия вспышки $E_{0.1-0.8}$.

Взаимосвязь между индексом XI (являющимся упрощенным и легко вычисляемым аналогом энергии $E_{0.1-0.8}$) и вариациями декрементов во вспышках оказалась более тесной, коэффициенты линейной корреляции составляют 0.55-0.73. То есть, наблюдается следующая тенденция: чем больше энергия вспышки (или XI), тем больше относительные вариации лаймановских декрементов во вспышках.

4. *Обсуждение результатов и выводы.* Согласно оценкам, прове-

денным в [2,3,6], отношения потоков в эмиссионных линиях зависят от соответствующих эффективных коэффициентов излучения ε_{ik} . Этот коэффициент при переходе $i-k$ выражается формулой

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

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.

Отношения потоков в линиях $F(L_\alpha)/F(L_\beta) = \varepsilon_{21}/\varepsilon_{31}$ (D1), $F(L_\gamma)/F(L_\beta) = \varepsilon_{41}/\varepsilon_{31}$ (D2) и $F(L_\delta)/F(L_\beta) = \varepsilon_{51}/\varepsilon_{31}$ (D3) заметно изменяются в течение 11-летнего цикла активности: на 25% декремент D1, на 10% декремент D2 и на 5% декремент D3. В самом грубом приближении, при пренебрежении изменениями величины β_{ik} в цикле, а также во вспышках, вариации декрементов связаны с относительными изменениями населенностей соответствующих уровней в эмиссионных линиях. Отметим, что во вспышках разных классов декременты изменяются порой очень значительно по величине, что говорит о заметном изменении параметров среды во вспышках. Эти изменения носят (как и сами потоки в лаймановских линиях) кратковременный характер, порядка десятка - нескольких десятков минут, после чего среда, согласно поведению декрементов, возвращается в довспышечное состояние.

Государственный астрономический институт им. П.К.Штернберга,
МГУ им. М.В.Ломоносова, Россия, e-mail: red-field@yandex.ru
brouev@sai.msu.ru

LYMAN DECREMENTS OF NEUTRAL HYDROGEN LINES IN THE SPECTRUM OF THE SUN BY SDO/EVE OBSERVATIONS. ANALYSIS OF VARIATIONS DURING THE 24TH SOLAR CYCLE AND IN INDIVIDUAL FLARES OF CLASSES M AND X

E.A.BRUEVICH, V.V.BRUEVICH

The data of satellite observations of the fluxes in the lines of the Lyman series and their relative variations both during the 24th cycle and in individual flares of the classes M and X are analyzed. The decrement D1 ($D1 = F(L_\alpha)/F(L_\beta)$) changes during solar 24th cycle of activity by about 25% of its maximum values to its minimum values in 2014, when in the 24th cycle there was a secondary

maximum according to the main indices. The decrement $D2$ ($D2 = F(L_\gamma)/F(L_\beta)$) changes in the cycle by about 10%, and the decrement $D3$ ($D3 = F(L_\delta)/F(L_\beta)$) changes in the cycle by about 5%. $D1$, $D2$, and $D3$ also change in a cycle with periods similar to the periods of quasi-biennial variations of the main activity indices. In flares of X-ray classes M-X the variations of the Lyman decrements range from 2% to 20%, and for flares with more energy in the soft X-ray, the variations of decrements are on average more.

Keywords: *Sun: activity cycles: hydrogen emission lines: 24th cycle: Lyman decrements: Flares: Lyman decrements*

ЛИТЕРАТУРА

1. *Р.Е.Гершберг, Э.Э.Шноль*, Известия КрАО, **50**, 122, 1974.
2. *V.P.Grinin, N.A.Katysheva*, Bulletin of the Crimean Astrophysical Observatory, **62**, 52, 1980.
3. *V.P.Grinin, N.A.Katysheva*, Bulletin of the Crimean Astrophysical Observatory, **62**, 47, 1980.
4. *L.Binette, J.Wang, M.Villar-Martin et al.*, Astrophys. J., **414**, 535, 1993.
5. *S.Gunár, P.Schwartz, B.Schmieder et al.*, Astron. Astrophys., **514**, A43, 2010.
6. *Н.А.Катышева, Т.А.Ермолаева, В.П.Гринин*, Астрофизика, **60**, 579, 2017, (Astrophysics, **60**, 532, 2017).
7. SDO/EVE DATA, <http://sdo.gsfc.nasa.gov/data/dataaccess.php>.
8. *E.A.Bruevich, V.V.Bruevich, B.P.Artamonov*, Research in Astron. Astrophys., **18**, N7, 72, 2018.
9. *E.A.Bruevich*, Astro-ph SR, 1805.07158, 2018.

