ВАРИАЦИИ ПОТОКОВ СОЛНЕЧНОГО КУФ-ИЗЛУЧЕНИЯ (ВНЕ ВСПЫШЕК) ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ TIMED В 23 ЦИКЛЕ И SDO/EVE В 24 ЦИКЛЕ В ЛИНИЯХ ВОДОРОДА

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

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, ГАИШ, Москва, Россия

²ИПГ Госкомгидромета им. Е.К. Федорова, Москва, Россия

VARIATIONS OF SOLAR EUV- RADIATION IN HYDROGEN LINES (OUTSIDE OF FLARES) ACCORDING TO TIMED SATELLITE DATA IN 23 CYCLE AND SDO/EVE DATA IN 24 CYCLE

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

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

²Fedorov Institute of Applied Geophysics, Moscow, Russia

Variations of EUV-fluxes in four hydrogen lines of Lyman series and variations of the 10.7 cm radio flux ($F_{10.7}$) which characterizes the level of solar activity were studied in cycles 23–24. The relative changes in the yearly averaged intensity of these lines from the maximum to the minimum of 23 and 24 cycles were investigated. It was showed that maxima of fluxes in the lines and the half-widths of the line profiles in the maximum of activity cycles are greater than in the minimum. This indicates on different conditions of these lines' formation in solar chromosphere.

DOI: 10.31725/0552-5829-2018-75-78

Рассмотрены вариации потоков в линиях водорода серии Лаймана в 23–24 циклах. Исследованы линии L_α ($\lambda = 121.6$ нм); L_β ($\lambda = 102.57$ нм); L_γ ($\lambda = 97.25$ нм); L_δ ($\lambda = 94.97$ нм), а также поток $F_{10.7}$ для характеристики уровня солнечной активности. Данные о распределении температуры среднего спокойного Солнца и о глубинах образования различных солнечных эмиссий, см. [1], рис. 3. На УФ-область спектра приходится около 1% полной энергии солнечного излучения, но это излучение играет важную роль, поскольку оно полностью поглощается в верхних слоях земной атмосферы [2].

Область (1–120 нм) важна для изучения верхней хромосферы, переходной области и короны. Поток в области 1–120 нм является главным источником ионизации земной ионосферы (областей E и F). Источником ионизации другой области ионосферы (области D) является рентгеновское излучение. Поток в области 0.1–0.8 нм меняется на два-три порядка на протяжении солнечного цикла. В периоды низкой активности Солнца поток рентгена не превосходит 10^{-6} Вт/м², и он не играет большой роли в земных процессах. Ионизация области D в этом случае производится линией L_α в верхней ее части и космическими лучами в нижней части ионосферы.

В работе анализируется КУФ-излучение в 23-м и 24-м циклах по измерениям на спутниках: TIMED/SEE и SDO/EVE. Рассмотрены данные TIMED/SEE с 2002 по 2009 гг. (запуск в 2001 г.). Основной задачей эксперимента SEE – изучение энергетических потоков от Солнца, поглощаемых в мезосфере, нижней термосфере и ионосфере (где полностью поглощается излучение с $\lambda < 200$ нм). Вариации УФ-излучения Солнца, возникающие не только в результате вспышек, но и 27-дневного вращения Солнца, а также 11-летнего солнечного цикла, имеет важное значение для модельных исследований атмосферы Земли. Результаты, полученные в нашей работе, показывают, что интенсивность линий при одном и том же уровне солнечной активности значительно отличаются. Линия L_α на 2–3 порядка сильнее остальных линий серии Лаймана.

В 24 цикле активности исследованы данные о потоках в линиях 102.6 нм, 97.3 нм и 95.0 нм. Ежедневные потоки в линиях (вне вспышек) сформированы нами из архивов SDO/EVE (запуск 2010 г.). Данные по линии 121.56 нм соответствуют архивным данным «composite Lyman-alpha», доступные на веб-сайтах LISIRD и SEE <http://lasp.colorado.edu/lisird/> <http://lasp.colorado.edu/home/see/>. Основной задачей эксперимента SDO/EVE является изучение солнечного EUV-излучения и его переменности в 50 линиях и спектральных диапазонах с целью улучшения прогнозирования переменности излучения в крайнем УФ-диапазоне. КУФ-излучение Солнца – основной источник ионизации нейтральных атомов и молекул в атмосфере Земли, формирующий ионосферу. На рис. 1 представлены изменения потоков в линиях водорода в 24 цикле.

Рис. 1. Вариации излучения Солнца в линиях водорода серии Лаймана в 24 цикле. По оси X – время (годы), по оси Y – поток в Вт/м^2 в логарифмической шкале. Поток в линии L_α на 2–3 порядка больше потоков в других линиях водорода серии Лаймана.

Интенсивность линий уменьшается с изменением активности от максимума к минимуму по-разному для разных линий. В 23 цикле потоки в L_α (121.6 нм) уменьшается примерно на 40% от величины в максимуме активности, заметнее всего уменьшаются потоки в линии L_β (102.57 нм) примерно на 60%, см. рис. 2а. За единицу принят поток в максимуме 23 цикла (2002 г.). На более коротких временных масштабах (месяц, сутки) эти вариации потоков могут быть и больше. Отметим, что с изменением

солнечной активности изменяется не только интенсивность линии, но и их профили.

Рис. 2. Относительные изменения среднегодовых потоков в линиях водорода и потока $F_{10.7}$, нормированные к максимумам 23 цикла в 2002 г. (а) и 24 цикла 2014 г. (б).

Максимумы потока и полуширина профилей спектральных линий в максимуме активности больше, чем в минимуме, заметно изменяясь в зависимости от фазы цикла. Бленды L_{γ} и L_{δ} – линии иона углерода CIII и иона кремния SiIX (соответственно) сильнее, чем линии водорода, что свидетельствует о разных уровнях формирования излучения этих линий в солнечной атмосфере. На рис. 2б приведены вариации среднегодовых величин потоков в линиях водорода серии Лаймана в 24 цикле активности. За единицу принят поток в максимуме цикла в 2014 г.

Рис. 3. Зависимости потоков излучения в линиях L_{β} , L_{γ} , L_{δ} от уровня активности Солнца (индекс $F_{10.7}$). Приведены линейная и квадратичная регрессии.

Для 24 цикла нами получены зависимости потоков излучения в линиях L_{β} , L_{γ} , L_{δ} от уровня активности Солнца (индекс $F_{10.7}$), рис. 3. Анализ показал наличие тесной связи излучения в исследуемых линиях

EUV-диапазона с потоком $F_{10.7}$. Коэффициенты корреляции для линейных зависимостей у этих соотношений составляют более 0.8. Это позволяет достаточно точно восстанавливать соответствующие потоки в линиях по величине $F_{10.7}$.

Рис. 4. Зависимости потоков излучения в линиях L_α в 23 (а) и 24 (б) циклах от уровня активности Солнца (индекс $F_{10.7}$). Приведены линейная и квадратичная регрессии.

Внеатмосферный поток в линии L_α в минимуме активности (в 23 и 24 циклах) составил $3,5 \times 10^{11}$ фотон·см⁻²·сек⁻¹, в максимуме 23 цикла и 24 цикла – 6×10^{11} фотон·см⁻²·сек⁻¹ и 5×10^{11} фотон·см⁻²·сек⁻¹, (соответственно), см. рис. 4 а, б, похожие результаты были получены в работах [3–5].

Выводы

1. Исследования потоков спектральных линий серии Лаймана показали, что линии по разному изменяются в 23–24 циклах. В зависимости от фазы цикла изменяются и максимальные потоки в линиях, и их полуширина.

2. Поток в линии L_α в 23 цикле уменьшился примерно на 40% от величины в максимуме активности, а линии в L_β примерно на 60%.

3. Поток излучения в L_α между солнечным максимумом и минимумом падает примерно в 1.8 раза в 23 цикле и в 1.5 раза в 24 цикле.

Собранные авторами ежедневные данные о прямых измерениях линий водорода позволяют уточнить вариации физических условий в переходном слое для разных фаз солнечного цикла.

Литература

1. *Lean, J.* // Journal of Geophysical Research, 1987, **92**, P. 839.
2. *Видаль-Мадьяр А.* / В кн. Поток энергии Солнца и его изменения – М.: Мир, 1980. – 558 с.
3. *Дышлевский С.В., Беликов Ю.Е.* // Гелиогеофизические исследования, 2018, **17**, С. 64.
4. *Kockarts G.* // Annales Geophysicae, 2002, **20**, P. 585.
5. *Tobiska K.W., Woods T. et al.* // J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 2000, **62**, P. 1233.