СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ В КУФ И РЕНТГЕНОВСКОМ ДИАПАЗОНАХ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ SDO И TIMED

Бруевич Е.А., Якунина Г.В.

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

SOLAR FLARES IN THE EUV AND X-RAY RANGES ACCORDING BY SDO AND TIMED SATELLITE DATA

Bruevich E.A., Yakunina G.V.

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

In this work observational data of the Solar Dynamics Observatory (SDO) and TIMED spacecraft (Thermosphere, Ionosphere, Mesosphere Energetics and Dynamics) have been studied simultaneously with radiation in the 0.1–0.8 nm X-ray range from GOES-15 satellite observations. Fluxes in the Lyman series spectral lines and their variations in solar cycles 23 and 24 are analyzed. The analysis of five flares (X-class) according to GOES-15 and SDO/EVE observational data in 24-th cycle of solar activity (2011–2012) has been done.

DOI: 10.31725/0552-5829-2020-29-32

Космический аппарат SDO был выведен на орбиту в августе 2010 г. для измерения солнечного коротковолнового УФ-излучения (КУФ-излучения). Один из его приборов EVE (The Extreme Ultraviolet Variability Experiment) проводит наблюдения с высоким спектральным разрешением, получает изображения каждую секунду с высокой точностью. Измерения проводятся в спектральном диапазоне 0,1–105 нм и позволяют детально изучать как вспыхивающую активность Солнца, так и изменчивость фонового потока в диапазоне EUV в 24 цикле [1]. Яркость Солнца в этой области меняется в сотни и тысячи раз. Данные SDO/EVE характеризуются однородностью и высоким пространственным, спектральным (0,1 нм) и временным разрешением (10 сек).

Наиболее длительные ряды потоков во вспышках (с 1978 г.) доступны из наблюдений в линиях рентгеновского излучения на спутниках серии GOES. Спутник GOES-15 проводит наблюдения вспышек с начала 2010 г. В работе использованы данные о вспышках в SXR излучении в диапазоне 1–8 Å одновременно с данными о вспышках, наблюдаемых на SDO. EUV (Extreme Ultra Violet) и рентгеновское излучение Солнца – основные факторы, которые существенно меняют свойства верхней атмосферы Земли. Мы исследовали потоки во вспышках в водородных линиях серии Лаймана и их изменения в 23-м и 24-м циклах солнечной активности.

Результаты исследований SDO позволят более глубоко понять роль, которую играют вариации Солнца в изменениях химического состава ат-

мосферы и климата Земли. Ранее важность подобных измерений для прогнозов космической погоды была продемонстрирована на спутнике TIMED/SEE) в области спектра 27–105 нм (запуск 2001 г.) [2]. Основной задачей эксперимента SEE (Solar EUV Experiment) являлось изучение изменений КУФ-излучения Солнца, поглощаемого в ионосфере Земли, важное для модельных исследований атмосферы Земли. Результаты измерений КУФ-излучения Солнца на спутнике TIMED/SEE за период 2002–2009 гг. приведены в работе [3]. Показано, что излучение в этой спектральной области изменяется по-разному для разных линий от максимума до минимума в 23 цикле. Поток излучения в линии L_{α} снизился от максимума к минимуму примерно в 1,8 раза в 23 цикле и в 1,5 раза в 24 цикле, см. рис. 2 в [3]. Вариации солнечной активности сопровождались изменениями не только интенсивностей линий, но изменялись их профили: полуширины, наличие “крыльев” и т.д.

В работе [4] проанализированы 115 больших вспышек классов M5 – X7. Большинство крупных вспышек произошло в фазе подъема и в максимуме 24 цикла. Для самой большой вспышки на ветви роста 24 цикла (X6.9 09.08.2011 г.) показано, что наблюдается сдвиг моментов начала вспышки в КУФ линиях относительно момента начала вспышки в области 0,1–0,8 нм. Для линий 9,4 нм и 13,3 нм сдвиг составил около 3–4 мин, около 5–6 мин относительно времени начала вспышки в спектральной линии 30,4 нм и около 7–8 мин относительно времени начала вспышки в спектральных линиях 30,4 нм, 17,1 нм, 19,5 нм, 28,4 нм и 33,5 нм.

Водородные линии серии Лаймана дают важную диагностическую информацию о динамике хромосферы, но систематических исследований их изменчивости во время вспышек было мало. В настоящей работе мы приводим результаты исследования пяти вспышек в 24 цикле солнечной активности в линиях нейтрального водорода: L_{α} (121.6 nm), L_{β} (102.57 nm), L_{γ} (97.25 nm) and L_{δ} (94.97 nm).

Таблица 1. EUV-поток в линиях нейтрального водорода.

	Координаты АО	L_{α} 10^{-3} 121.6 нм	L_{β} 10^{-4} 102.6 нм	L_{γ} 10^{-5} 97.3 нм	L_{δ} 10^{-5} 95.0 нм
03.11.11 X1.9/2B	N22E63 AR 11339	8.3	1.08	2.9	1.8
15.02.11 X2.2/2B	S20W15 AR11158	7.6	0.91	2.35	1.44
05.03.12 X1.1/2B	N17E52 AR11429	7.8	0.89	2.1	1.2
07.03.12 X5.4/2B	N17E27 AR11429	8.6	1.2	2.35	2.2
h09.08.11 X6.9/2B	N17W69 AR11263	7.6	0.76	1.8	1.07

В таблице 1 представлены изменения EUV-потоков в исследуемых вспышках на ветви роста 24 цикла. В течение вспышки потоки заметно меняются. Высокое временное разрешение позволяет исследовать поведение линий водорода во время вспышек. Изменение линий происходит по-разному. По-видимому, это связано с изменениями физических условий излучающей среды во вспышках разных баллов.

Исследуемые вспышки в КУФ-диапазоне показывает основной максимум через несколько минут после излучения в SXR, наблюдаемого на GOES-15. Также в этих вспышках выделяется вторичный максимум в EUV-диапазоне через несколько минут после основного (EUV-максимум смещен на 3–7 мин после максимума основного в SXR, в вторичный EUV-максимум смещен еще на 5 мин).

Солнечные вспышки представляют собой взрывной процесс высвобождения большого количества энергии. Они вызывают изменения в структуре магнитных полей в соответствующей активной области (АО) и процесс их перестройки. В течение вспышки магнитное поле высвобождает энергию и перестраивается в более простую конфигурацию. Появляется все больше доказательств, подтверждающих, что магнитное пересоединение в солнечной короне – основной источник вспышек [5–7].

В качестве примера на рис. 1 приведено изменение КУФ-потоков в линиях нейтрального водорода во вспышке **15.02.11 X2.2**. Видно, что профили линий заметно отличаются. Отличаются и интенсивности и полуширина линий. Возможно, это указывает не только на неоднородность излучающей среды, но и на переменность самих неоднородностей.

Рис. 1. Потоки в линиях водорода во вспышке 15.02.2011: а) L_α (121.6 нм), б) L_β (102.6 нм), в) L_γ (97.3 нм) и д) L_δ (95.0 нм). Основной максимум в EUV наблюдался через 2 мин после излучения в SXR. Продолжительность вспышки в SXR около 30 мин.

Совместные наблюдения SDO/EVE с другими космическими аппаратами и наземными приборами помогут понять нерешенные проблемы выделения и переноса энергии во время солнечных вспышек. В течение последних лет эксперимент по исследованию ультрафиолетового излучения на борту SDO/EVE позволяет следить также за изменениями в ионосфере и термосфере Земли. Диапазон SDO/EVE содержит много линий, которые являются важными для диагностики самой нижней солнечной атмосферы во время импульсной фазы вспышки. Кроме того, эмиссионные линии могут использоваться для отслеживания изменений температуры и плотности

в короне. Высокая точность наблюдений EVE имеет решающее значение для понимания ускорения частиц и механизмов передачи энергии во время солнечных вспышек, и их геоэффективности.

Водородные линии серии Лаймана дают важную диагностическую информацию о динамике хромосферы, но систематических исследований их изменчивости во время вспышек было мало. Одновременные наблюдения линий нейтрального водорода (L_α с L_β , L_γ , L_δ) и других хромосферных линий могут быть ценным инструментом исследования нагрева нижней солнечной атмосферы [5]. На фазе спада в КУФ-излучении солнечных вспышек появляется второй пик через десятки минут и до нескольких часов после пика в SRX. Впервые он был замечен в эксперименте по изменению EUV излучения на борту обсерватории SDO. Излучение на поздней фазе происходит из второго набора более длинных петель, которые выше, чем основные вспышечные петли [6]. Длительный процесс охлаждения в поздних вспышечных петлях можно хорошо объяснить наличием эмиссии на поздней фазе EUV. Но может быть, это дополнительный нагрев в длительной фазе спада [7]. Можно предположить, что существует длительный процесс охлаждения в поздних вспышечных петлях.

Выводы

1. Продолжительность вспышек в EUV-диапазоне в линиях водорода значительно больше, чем в рентгеновском диапазоне, по-разному изменяются интенсивности линий, их профили, ширина.

2. Основной максимум наблюдается через несколько минут после излучения в SXR. Выделяется вторичный максимум в EUV-диапазоне через несколько минут после основного (в исследуемых вспышках EUV-максимум смещен на 3–7 мин после максимума основного в SXR, вторичный смещен еще на 5 мин).

3. Не все корональные петли в АО связаны со вспышкой. Петли существуют на разных высотах. На поздней фазе вспышки наблюдаются более высокие петли.

Литература

1. Woods T.N. et al. // Solar Phys., 2012, **275**, 115.
2. Woods, T.N. et al. // Space Phys., 2005, **110**, no. A1, id A01312.
3. Bruevich E.A., Kazachevskaya T.V., Yakunina G.V. // G&A, 2019, **59**, 1048.
4. Bruevich E.A., Kazachevskaya T.V., Yakunina G.V. // G&A, 2017, **57**, 1077.
5. Milligan R., Chamberlin P. // A & A, **587**, A123.
6. Li Y. et al. // Aph. J., 2014, **793**:85 (11 pp).
7. Brown S.A., Fletcher L., and Labrosse N. // A&A, 2016, **596**, A51.