

ПРЕДВЕСТНИКИ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК В УФ И РЕНТГЕНОВСКОМ ИЗЛУЧЕНИИ

Чариков Ю.Е.¹, Шохин Т.Д.², Шабалин А.Н.¹

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

UV AND X-RAY PRECURSORS OF SOLAR FLARES

Charikov Yu.E.¹, Shohin T.D.², Shabalin A.N.¹

¹Ioffe Institute, RAS, St. Petersburg, Russia

²Peter the Great SPbPU, St. Petersburg, Russia

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2023-345-348>

This paper examines the "precursors" of solar flares, which are observed phenomena in the active region preceding a flare. The precursors demonstrate the creation of an unstable pre-flare configuration of magnetic field structures in the solar atmosphere, which culminates in a flare and other associated events such as coronal mass ejections. Analysing precursors is vital for comprehending the mechanisms responsible for flare triggering and enhancing their predictions. The identified phenomena comprise amplified UV and X-ray emissions, the emergence of novel magnetic structures, and alterations in plasma parameters within magnetic loops. This study outlines the specific criteria for pre-explosive events and opts to further investigate the GOES M3 event SOL2014-09-23T23:15. To track the active region's evolution, ultraviolet and X-ray images from the SDO/AIA and RHESSI data, respectively, were employed. Additionally, plasma parameter estimates were computed at each stage. Magnetic fields were extracted from the HMI magnetograms via the NLFFF approximation. The paper concludes by presenting a phenomenological model of flare evolution which relies on the magnetic field reconnection between two bipoles.

Введение

Отсутствие синхронных наблюдений с пространственным разрешением ~ 1 угл. с в широком диапазоне энергий и малым временным разрешением ~ 1 с вызывает затруднения при интерпретации динамики солнечных вспышек. Если в ультрафиолетовом (УФ) излучении удастся обнаруживать филаментарную структуру в процессе формирования и развития вспышек, то рентгеновские изображения подобную структуру не выявляют в силу худшего пространственного разрешения. Не меньшая проблема присутствует в определении геометрии магнитного поля, которую удастся восстановить из данных SDO/HMI в приближении бессилового поля на масштабе времен 135–720 с. Тем не менее, об эволюции магнитного поля, приводящей к началу вспышки, можно судить по предвспышечным уярчениям в излучении в УФ и рентгеновском диапазоне. Мы будем рассматривать уярчения в УФ и рентгеновском излучении, регистрируемые на стадии, предшествующей началу вспышки на интервале 1 час. Рассмотрим

динамику УФ и рентгеновского излучения на стадии предвестника солнечных вспышек по данным SDO/AIA и RHESSI. Под «предвестниками» будем понимать комплекс явлений в активной области (АО), наблюдаемых до начала вспышки, свидетельствующих о формировании нестабильной конфигурации магнитных полей в АО в атмосфере Солнца, приводящей впоследствии к вспышке.

Предвестники вспышки SOL2014-09-23T22:58:20

Мощная вспышка GOES класса M3 произошла 23-09-2014 в 22:58:20 UT в АО 2127. Временной профиль ЖР излучения показан на рис. 1.

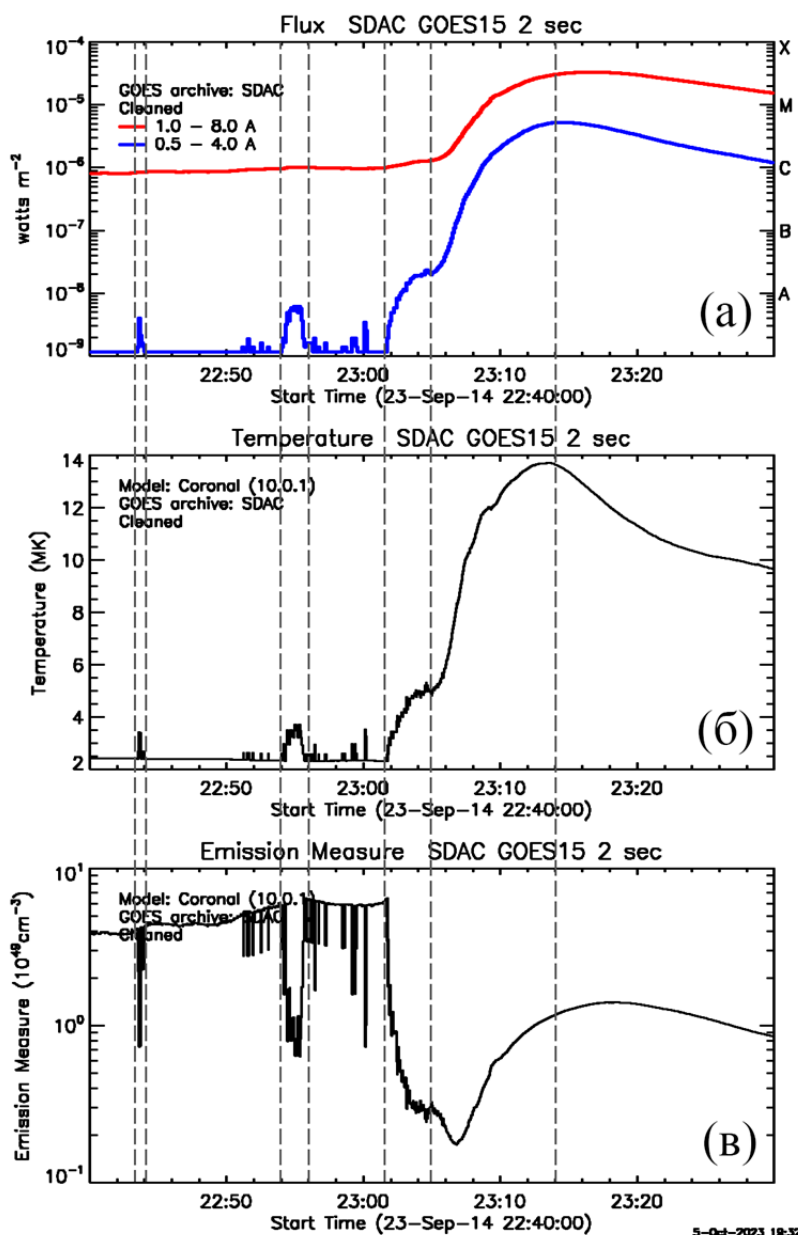


Рис. 1. Вспышка GOES M3 SOL2014-09-23T22:58 в рентгеновском диапазоне по измерениям GOES (а) – рентгеновский поток в Вт/м²; (б) – температура в МК; (в) – мера эмиссии в 10⁴⁹ см⁻³. Вертикальными линиями выделены интервалы, соответствующие предвестникам.

Наиболее отчетливое повышение скорости счета происходит за 10 минут до начала вспышки. Рассчитанная по данным GOES в 2-х каналах температура плазмы обнаруживает подобное превышение, а мера эмиссии в момент предвестника наоборот уменьшается. Подобное поведение температуры и потока рентгеновского излучения свидетельствует о тепловом тормозном механизме. Следовательно, в момент предвестника происходило превращение энергии магнитного поля в тепловую энергию плазмы. Высокотемпературная плазма может проявлять себя так же и в УФ излучении в линиях высокоионизованных элементов. Рассмотрим УФ излучение в этой вспышке

УФ изображения на стадии предвестника и вспышки 2014-09-23T22:58

На рис. 2 показана эволюция АО в различные моменты развития вспышки в УФ линии $94\text{\AA}$ (излучение линии ионизованного Fe X при $T = 6.3 \text{ MK}$). Отметим, что аналогичные значения температуры плазмы получены из данных GOES (рис. 16).

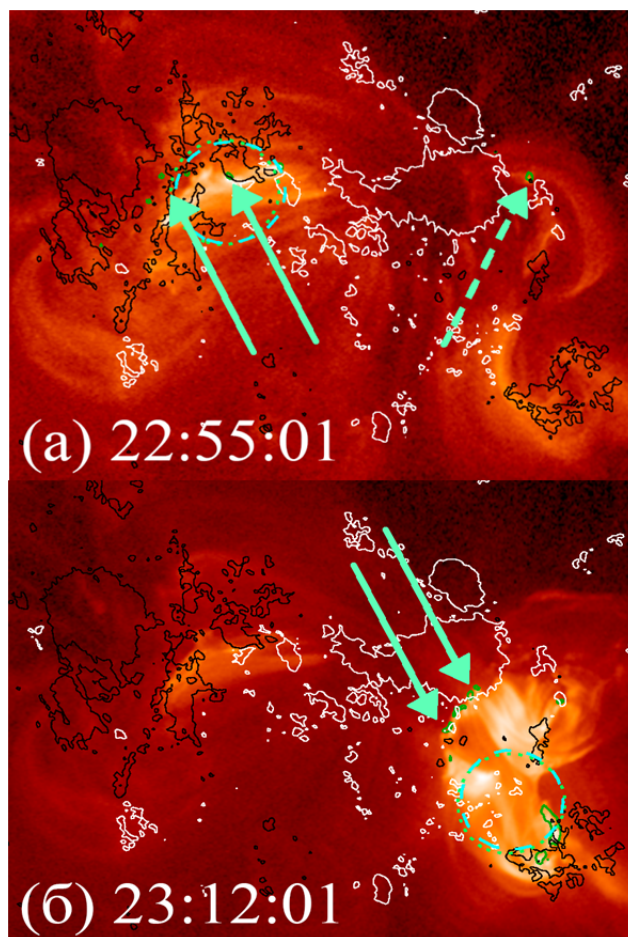


Рис. 2. Эволюция АО события **M3 SOL2014-09-23T22:58** в УФ линии $94\text{\AA}$ (данные SDO/AIA): (a) – в момент рентгеновского предвестника; (б) – в момент пика вспышки. Поверх нанесены контуры УФ линий, соответствующие холодной плазме ($1600\text{\AA}$), контуры LOS магнитограммы разных полярностей и контуры источников рентгеновского излучения (3–6, 6–12 кэВ). Стрелками обозначены уярчения в линии $1600\text{\AA}$, соответствующей излучению ионизованного C^{IV} + континуум при $T = 100\,000 \text{ K}$.

АО 2127 состояла из 2-х крупных пятен отрицательной полярности с общей областью положительной полярности. Первоначальное возгорание УФ происходило в области левого пятна (рис. 2а), а спустя примерно 5 мин происходила перестройка УФ филаментов в области правого пятна (рис. 2б), приводящая к полному изменению конфигурации с возможным выбросом плазмы. Области локализации предвестника и вспышки удалены на расстояние порядка 50–100 арксекунд. Время, прошедшее от пика предвестника до начала взрывной фазы составляет ~5 минут. Если предположить, что энерговыделение в области предвестника вызвало возмущение в атмосфере Солнца, которое привело к дестабилизации и последующей эрупции магнитного волокна в области вспышки, можно получить оценку скорости распространения такого возмущения $\sim(120\text{--}240)$ км/с. Подобные скорости возмущений наблюдаются непосредственно в УФ диапазоне в случаях взаимодействия двух разнесенных областей (см., например, [3]).

Заключение

Сложная динамика магнитных полей на этапах накопления и высвобождения энергии в солнечной вспышке приводит к большому числу способов трансформации накопленной энергии в генерацию волн, нагрев плазмы, ускорение заряженных частиц (см. Aschwanden, 2002). Анализ возможных причинно-следственных связей между предвестником и вспышкой является необходимым звеном для понимания физики вспышечных процессов.

Работа Шабалина А.Н. поддержана Грантом РФФИ № 20-72-10158. Работа Чарикова Ю.Е. выполнена по теме ГБ № 0040-2019-0025.

Литература

1. *Aschwanden, M.* Physics of the solar corona: an introduction with problems and solutions // Springer Science & Business Media, – 2005.
2. *Charikov Yu.E.* // Phys. Chem. Earth Pt. C-Solar-Terr. Planet. Sci., 2000, v.25, N5-6, p. 407.
3. *Carley, E.P. et al.* // Nature Communications, 2019, 10 (1): 2276.