

ПОТОК МАГНИТНОГО ПЕРЕСОЕДИНЕНИЯ ВО ВРЕМЯ ДВУХ ВСПЫШЕК 6 СЕНТЯБРЯ 2017 Г

Гопасюк О.С., Вольвач А.Е., Якубовская И.В.

Крымская Астрофизическая Обсерватория РАН, Научный, Республика Крым, Россия

MAGNETIC RECONNECTION FLUX DURING TWO FLARES ON SEPTEMBER 6, 2017

Gopasyuk O.S., Volvach A.E., Yakubovskaya I.V.

Crimean Astrophysical Observatory of RAS, Nauchny, Crimea, Russia

The energy-release process of two flares that occurred on September 6, 2017 in the NOAA 12673 active region was studied using chromospheric data in the 1600 Å band (SDO/AIA) and photospheric magnetograms (SDO/HMI). Microwave temporal profiles (KRIM, RSTN) were used as observable indicators of the flare energy release rate. From the past studies it is understood that the surface magnetic flux swept by the flare ribbons is related to the global reconnection rate. Therefore, in order to measure the reconnection magnetic flux and its rate of change, such observable parameters as the newly brightened flare area and the magnetic field of the area were calculated. The cumulative positive and negative magnetic fluxes involved in the reconnection process turned out to be well balanced. The change in the magnetic reconnection rate is compared with the observed nonthermal flare emission. We have obtained a good temporal relationship between the calculated magnetic reconnection rate and the observed nonthermal emission, which once again confirms the importance of magnetic reconnection for accelerating electrons in solar flares.

DOI: 10.31725/0552-5829-2022-61-64

Считается, что солнечные вспышки вызваны пересоединением силовых линий магнитного поля, во время которого происходит преобразование магнитной энергии в кинетическую энергию ускоренных частиц и тепловую энергию. Быстрые электроны, которые движутся по спирали вниз вдоль пересоединенных силовых линий, генерируют микроволновое излучение (MW), а когда они отдают свою энергию в основаниях пересоединенных силовых линий создается жесткое рентгеновское излучение (HXR). Таким образом, наблюдаемые потоки MW и HXR излучения действуют как индикаторы скорости ускоренных электронов, которые несут большую часть общей энергии, высвобождаемой во время вспышки и могут быть использованы в качестве прокси для скорости выделения энергии. Тогда и скорость изменения магнитного потока должна демонстрировать такую же временную эволюцию, как и наблюдаемые потоки HXR и MW излучения. Для проверки этого предположения мы провели исследование энерговыделения во время вспышек X2.2 и X9.3, произошедших 6 сентября 2017 г. в активной области NOAA 12673.

Нами были использованы данные нескольких инструментов. Последовательность изображений Солнца в полосе 1600 Å получена SDO/AIA. Магнитные характеристики вспышечных лент изучены с помощью нормальной компоненты магнитного поля B_n , которая вычислена из предвспышечных SDO/HMI вектор-магнитограмм. MW данные на частотах 8800 и 15400 МГц были получены радиоастрономическим диагностическим комплексом солнечной активности Крымской астрофизической обсерватории РАН (KRIM) и радиоастрономической сети RSTN.

Пока процесс пересоединения в короне не может быть измерен напрямую, его можно проследить по временной и пространственной эволюции области вспышки в магнитных полях в нижних слоях атмосферы. Исходя из предположений, что магнитный поток от фотосферы к короне сохраняется и временная шкала эволюции фотосферных магнитных полей намного длиннее, чем временная шкала пересоединения, скорость магнитного пересоединения в короне может быть измерена следующим образом (например, [1]):

$$\dot{\phi} = \frac{\partial}{\partial t} \int B_c dA_c = \frac{\partial}{\partial t} \int B_n dA_{ribbon},$$

где B_c и dA_c – магнитное поле и площадь пересоединения в короне; B_n – нормальная составляющая фотосферного магнитного поля в области хромосферных вспышечных лент, являющихся основаниями пересоединенных в короне силовых линий магнитного поля. dA_{ribbon} – площадь вспышечных лент. Таким образом, из наблюдений можно получить величину магнитного потока, участвовавшего в пересоединении в короне во время вспышки:

$$\phi_{ribbon} = \int \dot{\phi} dt = \int B_n dA_{ribbon}.$$

Для идентификации вспышечных лент и определения потока магнитного пересоединения и скорости его изменения мы использовали методику, представленную в работе [2]. Рис. 1 демонстрирует временную эволюцию вычисленных параметров магнитного пересоединения отдельно для областей положительной (сплошная кривая) и отрицательной полярности (пунктирная кривая) для вспышек X2.2 и X9.3. На верхней панели рис. 1 представлены потоки магнитного пересоединения, на нижней – скорости его изменения. Кумулятивные магнитные потоки пересоединения увеличиваются со временем. К концу вспышки отношение потоков $|\phi_+|/|\phi_-|$ составило 1.6 (X2.2) и 1.3 (X9.3). Это говорит о том, что магнитные потоки пересоединения были хорошо сбалансированы. Общий поток пересоединения во вспышке, который определялся как среднее из абсолютных значений потоков пересоединения в обеих полярностях, в конце временного ряда достиг $3.5 \cdot 10^{21}$ Мх (X2.2) и $7.9 \cdot 10^{21}$ Мх (X9.3), что составило примерно 12% (X2.2) и 28% (X9.3) общего магнитного потока активной области. Максимальная скорость магнитного пересоединения определялась как среднее максимальных абсолютных значений скорости в обеих полярно-

стях. Она составила $18.5 \cdot 10^{18}$ Мх/с во вспышке X2.2 и $39.6 \cdot 10^{18}$ Мх/с во вспышке X9.3.

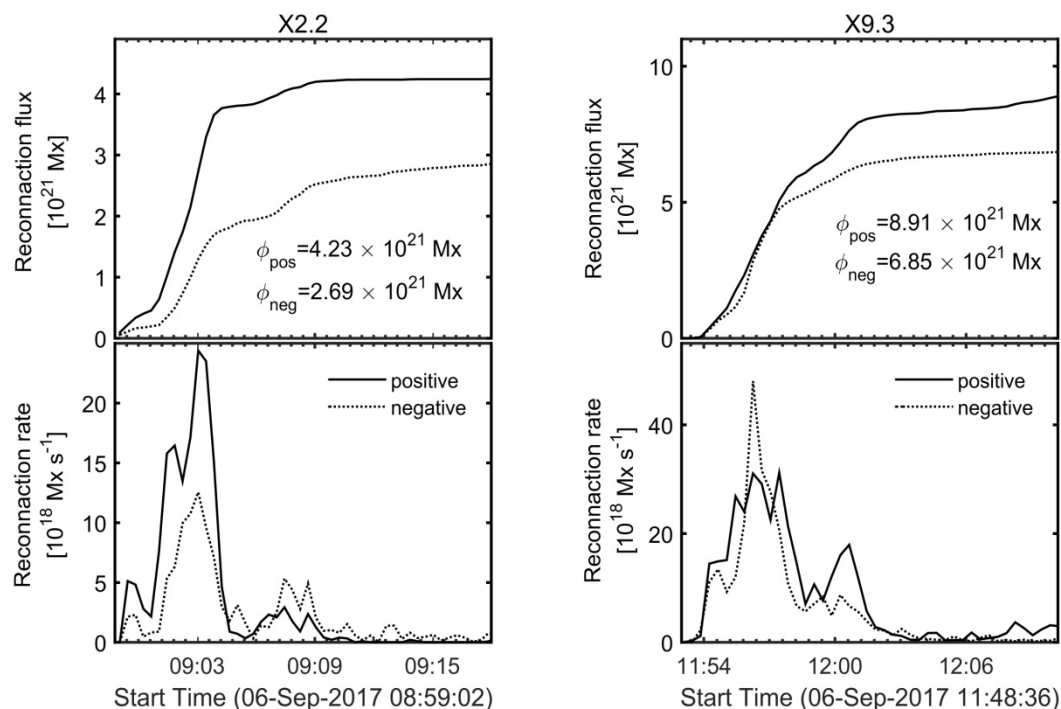


Рис. 1.

Общая скорость магнитного пересоединения, т.е. средняя из абсолютных значений скорости изменения потоков пересоединения в обеих полярностях, во вспышках X2.2 и X9.3 в сравнении с нетепловой эмиссией вспышки, представленной данными MW излучения на частотах 8800 МГц и 15400 МГц, показана на рис. 2.

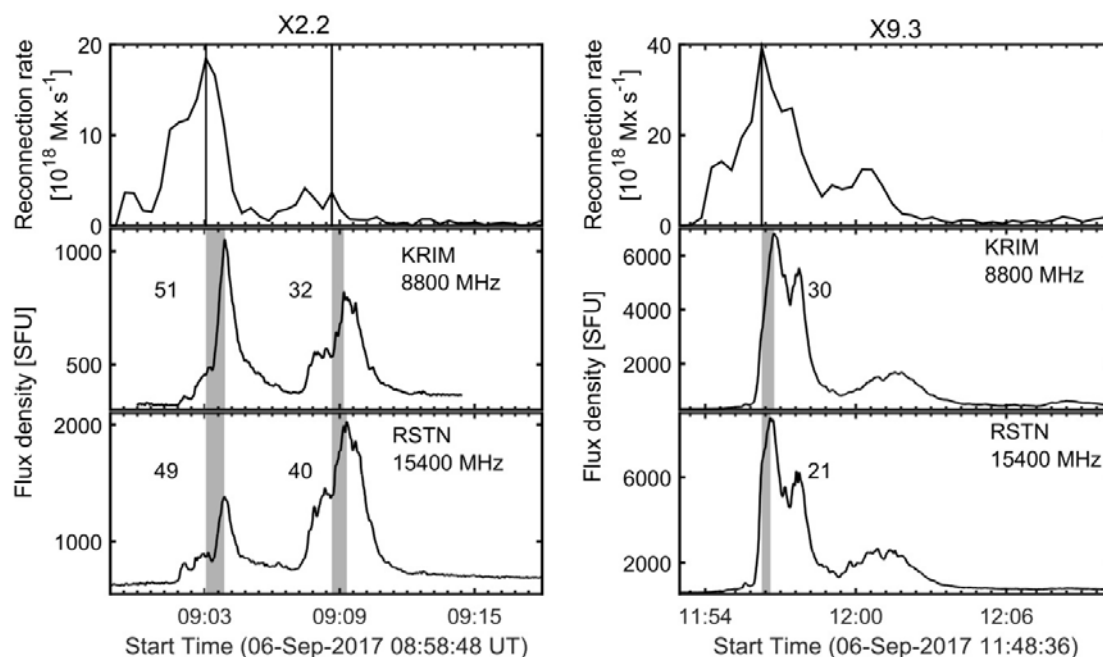


Рис. 2.

Как можно видеть из графика, скорости изменения потока коррелируют во времени с нетепловой эмиссией вспышки. В MW излучении наблюдались пики, которые также очевидны и в профилях скорости пересоединения, что теоретически ожидается и может продемонстрировать существенную роль магнитного пересоединения в создании этих событий. Однако, однозначно сопоставить мы смогли только два пика для X2.2 и один пик для X9.3. MW пики немного задерживаются. Временные задержки указаны слева в секундах. Задержка пиков MW излучения на 20–50 секунд может быть следствием разницы во времени ускорения энергичных электронов в области вспышки.

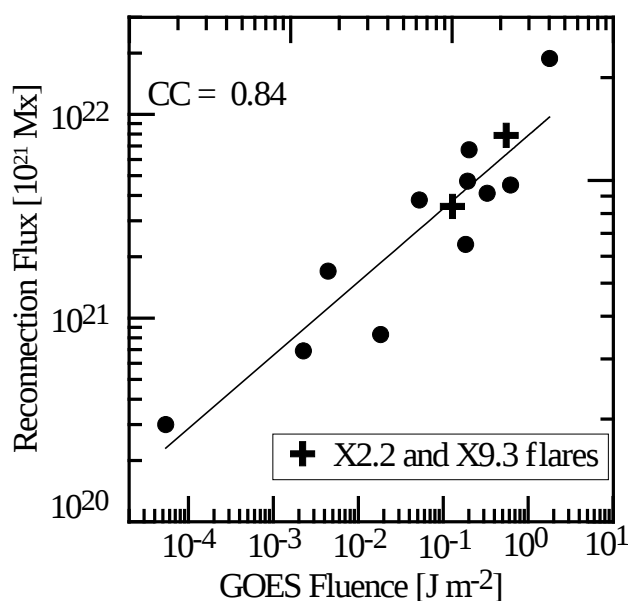


Рис. 3.

Мы объединили наши результаты с результатами исследований магнитного потока пересоединения других авторов [3–6]. В двойной логарифмической шкале была получена зависимость потока магнитного пересоединения от интегрированного потока SXR (GOES Fluence) (рис. 3) с коэффициентом корреляции 0.83, т.е. величина магнитного потока, участвующего в процессе пересоединения, больше в более мощных событиях, чем в более слабых.

Литература

1. Forbes T.G., Priest E.R. // Solar Phys., 1984, vol. 94, № 2, p. 315.
2. Gopasyuk O.S., Volvach A.E., Yakubovskaya I.V. // Geomagnetism and Aeronomy, 2022, vol. 7.
3. Qiu J., Hu Q., Howard T.A., Yurchyshyn V.B. // Astroph. J., 2007, vol. 659, p.758.
4. Miklenic C.H., Veronig A.M., Vršnak B. // Astron. Astrophys., 2009, vol. 499, p. 893.
5. Hu Q., Qiu J., Dasgupta B. et al. // Astrophys. J., 2014, vol. 793, id. 53, pp. 21.
6. Veronig, A.M., Polanec, W. // Solar Phys., 2015, vol. 290, p. 2923.