ДЛИТЕЛЬНАЯ ВСПЫШКА, НЕ СОПРОВОЖДАВШАЯСЯ СОЛНЕЧНЫМИ ПРОТОНАМИ

Григорьева И.Ю.¹, Струминский А.Б.²

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

THE LONG-TERM FLARE WITHOUT SOLAR PROTONS

Grigoryeva I.Yu.¹, Struminsky A.B.²

¹Main Astronomical (Pulkovo) Observatory RAS, St.-Petersburg, Russia

²Space Research Institute of RAS, Moscow, Russia

The X1.6 flare of October 22, 2014 belongs to the group of long-term events without coronal mass ejections and solar cosmic rays in the interplanetary space has been studied. The acceleration of electrons up to 300 keV, as evidenced by non-thermal emission, took place in a configuration of closed loops limited by the conditions suitable for emission at the plasma frequency of 1.415 GHz. The EPHIN detector on board SOHO observed weak fluxes of these electrons in the 270–700 keV channel for about 20 minutes after the impulse phase near the Earth. It is possible that protons <10 MeV were accelerated in the flare together with electrons, but did not show their traces in the solar atmosphere and could not escape into the interplanetary space.

DOI: 10.31725/0552-5829-2020-77-80

В проблеме ускорения солнечных энергичных частиц (релятивистских электронов и протонов – солнечных космических лучей (СКЛ)) и связанных с ним явлений в атмосфере Солнца и в межпланетном пространстве (МП) отдельного внимания заслуживают события, указанные внизу диаграммы (см. рис. 9, 17) в [1]. Это длительные вспышки различных GOES классов, не сопровождающиеся регистрацией протонов на орбите Земли. Вопрос заключается в том что, если считать, что ускорение происходит во вспышках, и нет связанных с ними корональных выбросов массы (КВМ) (нет всплеска II-типа), но сами события мощные, длительные, постепенные (в мягком рентгеновском (SXR) излучении), то почему тогда не регистрировались СКЛ в них? А в случае вспышки X2.2 6 сентября 2017 года были зарегистрированы только релятивистские солнечные электроны [2].

Одним из необычных периодов наблюдений солнечных вспышек за последние 20 лет оказался конец октября 2014 года. Когда из многих X-, M-, C-вспышек, произошедших в одной активной области, только одна сопровождалась КВМ, но СКЛ в МП не были зарегистрированы вблизи Земли. Этот период в контексте обнаружения СКЛ упоминается в обзоре [3]. В нашей работе исследуется мощная длительная (>40 мин) с постепенным

ростом и спадом SXR излучения X-вспышка 22.10.2014 (X1.6) из этого периода без KBM и СКЛ.

На рис. 1 приведены временные профили вспышки X1.6: SXR-поток (GOES) и отсчеты в 3-х каналах HXR излучения (RHESSI) (a): температура и мера эмиссии вспышечной плазмы (b), микроволны (MW) на частотах RSTN (c). Временная шкала приведена к условному 0 минут согласно /ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices/events/. Вертикальные прямые показывают время GOES SXR события, указанное в списках NOAA относительно указанного 0 (-3 начало, +23 пик, +45 мин конец вспышки). HXR излучение было < 300 keV, максимальная энергия наблюдалась только до (+5) мин и условие soft-hard-harder [4] не выполнено. Видно, что после официального конца вспышки (+45) мин, профили SXR, T , EM постепенно спадают вплоть до начала следующего события (+108) мин. До (+28) мин видны всплески в HXR излучении, второй пик согласуется с профилем T (серая

Рис. 1. Временной профиль вспышки X1.6 22.10.2014: (a) рентгеновское излучение SXR-поток (watts m^{-2}) GOES канал 1–8 Å – штриховая, темп счета HXR-детектора RHESSI – черная, серая и светло-серая сплошные кривые в каналах 25–50, 50–100 и 100–300 keV, соответственно), (b) мера эмиссии EM (10^{49}cm^{-3}) и температура T (MK) по данным GOES, (c) плотность потока (s.f.u.) на MW RSTN частотах 15.4–1.415 GHz. Шкала X: время в минутах от 0 (14:05 UT – начала регистрации на 15.4 GHz). Сплошные вертикальные линии описаны в тексте.

кривая). Такой же ход виден на MW, где излучение регистрировалось последовательно, начиная с высокой частоты 15.4 GHz, но ниже 1.415 GHz не наблюдалось, что отмечено в [5, 6].

На рис. 2 показана активность на временном интервале от начала вспышки (-3) мин до выхода на фоновый уровень записи EPHIN/SOHO. (a) динамика T и EM (производные по времени), где после основного 2-го всплеска производная T отрицательная. Видна фаза нагрева без роста EM (серая кривая, до 0 мин). Первый пик производной EM совпадает с самым жестким импульсом в HXR (рис. 2b, возрастание счета ACS SPI). Превышение потока электронов над фоном видно только в одном канале с (+8) до (+28) мин (рис. 2b, EPHIN/SOHO, пустые кружки и черная толстая кривая – усреднение по 5 мин). Вертикальные линии – начало на 15.4 GHz и GOES-пик в канале 1–8 Å (0 и (+23) мин).

Рис. 2. (a) Производные по времени всплывающего профиля T и EM (GOES, черная и серая кривые). (b) Временной профиль потока солнечных электронов в канале 270–700 keV (EPHIN/SOHO, пустые кружки, толстая черная линия – усреднение за 5 мин); темп счета частиц за 50 ms (ACS SPI, черная – усреднение за 1 с (20 точек) и серая кривая – за 1 мин (1200 точек)). Шкала X: время в минутах от 0 (14:05 UT начала регистрации на 15.4 GHz). Сплошные вертикальные линии описаны в тексте статьи.

Спад эффективной T может быть связан с тем, что новые горячие петли не вносят заметный вклад в интегральное излучение, несмотря на продолжение выделения энергии. Учет дифференциальной EM может показать существование петель с высокой T , но малой EM . Изменение EM начинается вместе с видимыми изменениями HXR спектра (RHESSI, рис. 1a), что подтверждается ACS SPI (рис. 2b).

Время запаздывания 270–700 keV электронов относительно электромагнитного излучения ~ 5 мин при пути в 1.2 а.е. Поэтому слабое превышение интенсивности в низко энергичном канале EPHIN/SOHO показывает, что электроны, ускорившиеся во вспышке до сотен keV, выходили в МП, начиная $\sim c$ (+3) до (+23) мин во время продолжения вспышечной активности. Так как ядерные γ -линии не регистрировались, и не было протонов в МП, то реализовывалась только первая фаза ускорения [2], как это было показано в событии X2.2 06.09.2017.

Таким образом, рассмотренные наблюдения показывают, что ускорительные процессы были, область взаимодействия электронов и плазмы ограничивалась условиями генерации MW на 1.415 GHz [7]. Возможно, отсутствие КВМ и связанной с ним ударной волны не позволило организовать длительный процесс стохастического ускорения электронов до релятивистских энергий и протонов ~ 100 MeV как предложено в [2], о чем свидетельствует невыполнение условия soft-hard-harder [4]. Однако эти факты не исключают того, что протоны ускорялись до энергий меньших порога генерации γ -линий (< 10 MeV). По-видимому, существование замкнутой магнитной конфигурации (благоприятное условие для захвата и удержания протонов), но отсутствие КВМ (эффективное пересоединение магнитных силовых линий активной области и МП) не создали условий для выхода протонов. Учет низко энергичных протонов может изменить представления об энергетике вспышечного процесса таких вспышек в целом [8, 9].

Работа, выполненная Григорьевой И.Ю. (ГАО РАН), осуществлена за счет субсидии программы «Энерговыделение», Струминским А.Б. (ИКИ РАН) – за счет субсидии программы «Плазма».

Литература

1. Cliver, E.W.; Kahler, S.W.; Kazachenko, M.; et al. // ApJ, 2019, vol. 877, id: 11 (17 pp).
2. Струминский А.Б., Григорьева И.Ю., Логачев Ю.И. и др. // Физика Плазмы, 2020, 46 (2), 139.
3. Klein K.-L., Dalla S. // Space Sci. Rev., 2017, V. No 3-4, P.1107.
4. Kiplinger, A.L. // ApJ, 1995, v.453, p.973.
5. Thalmann, J.K., Su, Y., Temmer, M., et al. // ApJ, 2015, vol. 80, L23 (5 pp).
6. Sun, X.; Bobra, M.G.; Hoeksema, J.T., et al. // ApJ, 2017, vol. 804, L28, (6 pp).
7. Rieger, E.; Treumann, R.A.; and Karlicky, M. // Sol. Phys., 1999, vol. 187(1), p. 59.
8. Hudson, H. // Proc. ICRC, 1985, 4, 58H.
9. Miller J.A., Cargill P.J., Emslie A., et al. // J. Geophys. Res., 1997, vol. 102, p. 14631.