

СТАТИСТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАПАЗДЫВАНИЯ ВСПЫШЕК В ОПТИЧЕСКОМ И РЕНТГЕНОВСКОМ ДИАПА- ЗОНАХ СПЕКТРА

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдения солнечных вспышек в различных диапазонах длин волн указывают, что их энергия высвобождается в корональной части магнитных петель и посредством какого-то механизма (например, ускорение электрическим полем в области пересоединения) расходуется на ускорение частиц. Эти частицы движутся вдоль силовых линий магнитного поля и, достигая плотных слоёв хромосферы в основании петель, генерируют жёсткое (с энергией фотонов преимущественно 25–100 кэВ) тормозное рентгеновское излучение (HXR). Согласно модели толстой мишени [2,6] эмиссия HXR является тормозным электрон-ионным излучением потока электронов, сталкивающегося с плотными слоями более низкой короны, переходного слоя и хромосферы. Модель предполагает, что только незначительная часть энергии нетепловых электронов теряется через излучение. Большая её часть идёт на нагрев окружающей плазмы. Из-за специфики зависимости функции потерь на излучение от температуры в области значений 0,1–10 МК хромосфера быстро нагревается. При этом давление увеличивается, и горячая плотная плазма быстро расширяется в корону. Этот процесс известен как хромосферное испарение [1].

Горячая плотная плазма, поднимающаяся в корону, вследствие теплового тормозного излучения увеличивает поток эмиссии мягкого (с энергией фотонов 1–20 кэВ) рентгена (SXR). Таким образом, модель предсказывает, что эмиссия жёсткого рентгена непосредственно связана с потоком ускоренных электронов, тогда как эмиссия мягкого рентгена связана с накопленной тепловой энергией, принесённой тем же самым нетепловым электронным потоком. На-

гретое до высоких температур вещество излучает мягкий рентген и постепенно остывает. Постепенное увеличение эмиссии SXR до начала жёсткого рентгена предполагает тепловое происхождение первой фазы вспышки. Такое постепенное нагревание перед импульсным ускорением частиц должно быть связано с перестройкой магнитных полей, предшествующих вспышке. Кроме того, эта начальная фаза может также определять последующую импульсную фазу вспышки.

Статистическое исследование разности времён начала и максимума излучений в HXR и H_{α} было выполнено Verma и Pande [9]. Они нашли, что импульсные вспышки производят эмиссию HXR в основном за 1 минуту до и на 2 минуты после начала H_{α} эмиссии. В статье на основе большого статистического материала [10] найдено, что эмиссия в SXR начинается раньше чем в HXR в среднем на 3 минуты.

В этой статье мы исследуем поведение во времени солнечных вспышек, наблюдаемых в жёстком рентгене (HXR), мягком рентгене (SXR), и H_{α} . Мы рассмотрим: разность моментов начала вспышки в H_{α} и в HXR, а также в SXR и HXR; разность моментов наступления максимума вспышки в SXR и HXR; разность моментов максимума в SXR и окончание излучения в HXR. В рассмотрение включены 402 H_{α} вспышки, сопровождающиеся всплеском жёсткого рентгена за период 1987–1989 гг. и 380 вспышек за период январь–июнь 1988 г, наблюдаемых в мягком и жёстком рентгене. Полученные результаты интерпретируются в терминах модели, использующей механизмы ускорения электронов и нагрева атмосферы.

ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ

В статье используются данные о вспышках в мягком рентгеновском излучении со спутника GOES в диапазоне 1–8 А (1,6–12 кэВ). Данные о жёстком рентгеновском излучении получены прибором HXRBS, регистрирующим излучение в диапазоне энергий 25–438 кэВ (эти первоначальные значения в течение периода работы спутника SMM увеличивались в сторону высоких энергий и в 1987–89 гг. нижняя граница была 36–52 кэВ). Детальное описание прибо-

ра HXRBS приведено в работе [7]. Данные об H_{α} -вспышках взяты из бюллетеня SOLAR GEOPHYSICAL DATE. Так как в нём приводятся данные наблюдений нескольких обсерваторий, то соответствующие моменты могут различаться. Если различие больше двух минут, то такая вспышка исключалась из рассмотрения.

Идентификация событий основана на временном совпадении. Вспышки в различных длинах волн считаются совпадающими, если они начинаются в пределах окна времени 10 минут.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис.1 показано распределение числа вспышек в зависимости от величины разности времени начала вспышек в SXR и HXR, а на рис.2 – в H_{α} и HXR.

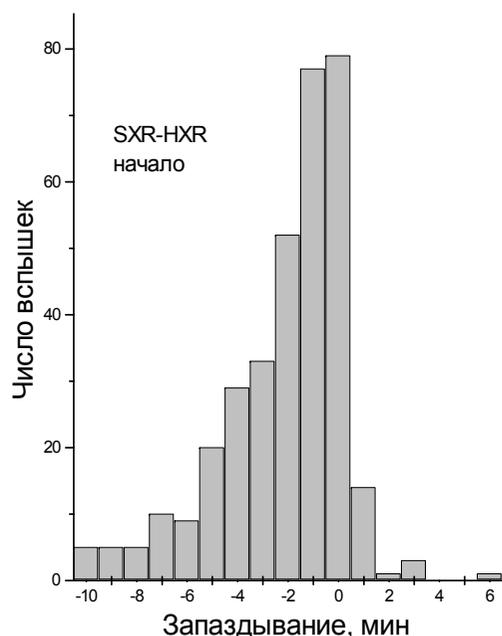


Рис.1. Распределение числа вспышек по времени запаздывания их начала в SXR и HXR

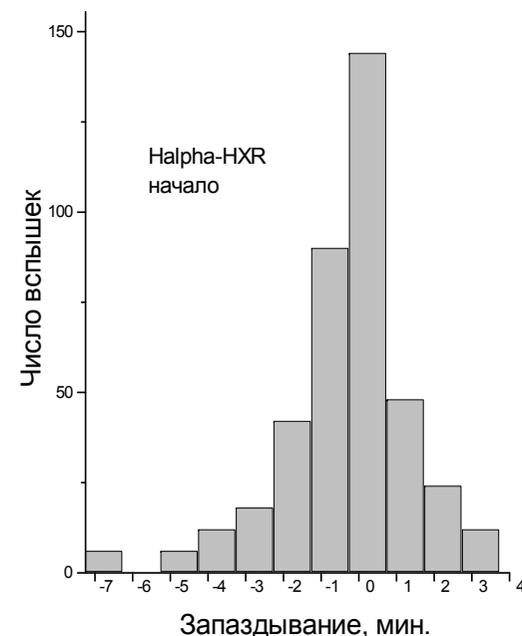


Рис.2. Распределение числа вспышек по времени запаздывания их начала в H_{α} и HXR

Из рис.1 видно, что в больше чем 90 % проанализированных событий эмиссия SXR начинается перед эмиссией HXR по крайней мере за 1 мин.. Из гистограммы, приведённой на рис. 1 видно, что для некоторых вспышек SXR начинается раньше HXR на 10 мин. Только в 4 % событий эмиссия SXR начинается позже чем HXR (рис. 1). Эти полученные данные позволяют предположить, что предшествование эмиссии SXR можно интерпретировать в терминах теплового предварительного нагрева атмосферы вспышки до импульсного ускорения частиц, и что такой предварительный нагрев происходит почти во всех вспышках. Появление мягкого рентгеновского излучения, предшествующего импульсной фазе вспышки, по-видимому, противоречит модели электронного потока в толстой мишени. Если принять, что на этой стадии нагрев осуществляется потоком электронов, то он должен содержать энергию, достаточную

для нагрева и генерации SXR, но недостаточную для генерации HXR. Другой подход заключается в том, что такой нагрев обеспечивается другим механизмом, не связанным с потоком электронов, например нагрев хромосферы потоком протонов без излучения жёсткого рентгена [8] или нагрев тепловыми электронами вследствие аномальной теплопроводности [11].

Такой предвспышечный нагрев плазмы можно объяснить также джоулевым нагревом в тонких токовых слоях, вытянутых в направлении магнитного поля петли. В работе [4] приводятся следующие формулы для величин темпа джоулева нагрева Q и темпа ускорения электронов \mathcal{N} (электронов/сек):

$$Q = 1,11 \times 10^{21} n_s A_{18} B_2 T_7^{1/2} v_e (E/E_D) \text{ эрг} \cdot \text{сек}^{-1}, \quad (1)$$

$$\mathcal{N} = 2,83 \times 10^{29} n_s A_{18} B_2 T_7^{-1/2} v_e (E_D/E)^{1/8} \times \exp[-(2E_D/E)^{1/2} - (E_D/4E)] \quad (2)$$

где n_s - число отдельных токовых слоёв, A - площадь отдельных слоёв в см^2 , B, E - напряжённость магнитного и электрического полей, $E_D = 7 \times 10^{-6} n_9 T_7^{-1} B \cdot \text{см}^{-1}$ - напряжённость электрического поля Дрейсера, $v_e = 10 n_9 T_7^{-3/2} \text{ сек}^{-1}$ - частота столкновений. Число в нижнем индексе означает порядок соответствующей величины (например, $A_{18} = A/10^{18}$). Принимая эмпирическое соотношение между интенсивностью нетеплового жёсткого рентгеновского излучения F_{HXR} и величиной \mathcal{N} , а именно, $F_{\text{HXR}} = a \mathcal{N}$, где $a = \text{const}$, можно считать, что при заданных n_e и T_e отношение \mathcal{N}/Q , являющееся функцией $f(x)$, где $x = E/E_D$, характеризует распределение энергии между ускорением электронов и джоулевым нагревом. На рис.3 показан вид этой функции для $n_9=100$ и $T_7=2$.

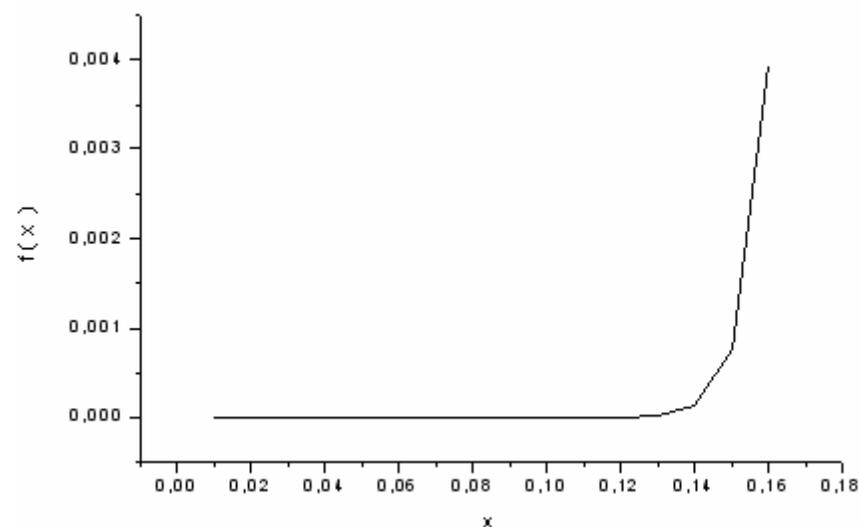


Рис. 3. Зависимость отношения темпа ускорения электронов к темпу джоулева нагрева от величины $x=E/E_D$

Из рис.3 видно, что пока величина $x \leq 0,14$ поступающая энергия идёт на нагрев плазмы. При $x > 0,14$ становится эффективным механизм ускорения электронов, их количество резко увеличивается, что наблюдается как импульсная фаза вспышки.

С другой стороны, (рис.2) эмиссия в H_α и в HXR начинается в большинстве случаев одновременно. Распределение показывает очень острый пик в нуле, и симметричное распределение для положительных и отрицательных значений запаздывания во времени. Это свидетельствует о том, что начало H_α эмиссии связано с импульсивной фазой ускорения частиц, в котором хромосфера непосредственно нагревается электронной бомбардировкой. Из сравнения этих рисунков можно сделать вывод, что SXR и H_α излучения возникают вследствие нагрева различными механизмами. H_α излучение появляется в результате нагрева хромосферы потоком ускоренных электронов, которые генерируют HXR излучение, а предшествующее импульсной фазе вспышки SXR излучение возникает в токовом слое в результате джоулева нагрева.

Таким образом, начальную фазу развития вспышки можно представить следующим образом. Пока величина x остаётся небольшой, происходит нагрев плазмы, сопровождающийся излучением мягкого рентгена. Когда же достигается значение $x \approx 0,14$, т.е. величина напряжённости электрического поля становится $E \approx 3 \cdot 10^{-3} \text{ В} \cdot \text{м}$, начинается фаза ускорения электронов, сопровождающаяся всплеском жесткого рентгена. При этом возникает важный вопрос: являются ли ускоренные электроны единственным источником нагрева плазмы, ответственного за излучение мягкого рентгена после импульсной фазы вспышки, или имеются также другие источники нагрева? На рис.3 приведено распределение разностей времён максимумов вспышек в мягком и жёстком рентгеновском излучениях (SXR-HXR максимум), а на рис.4 – разность времён максимума SXR и окончания HXR.

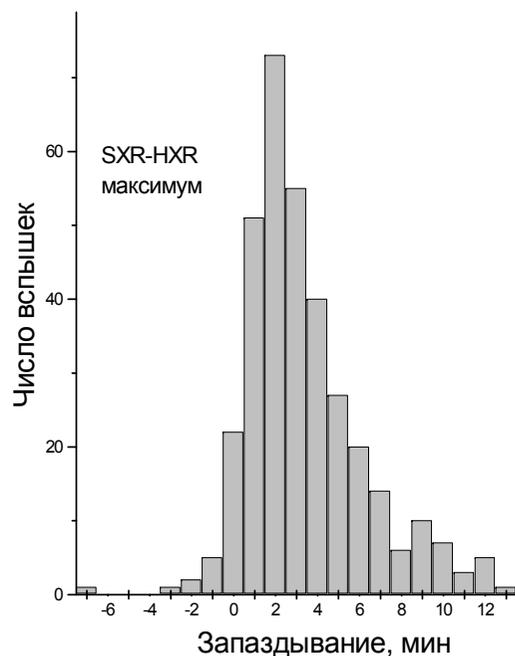


Рис.4. Распределение числа вспышек по времени запаздывания их максимума в SXR и HXR

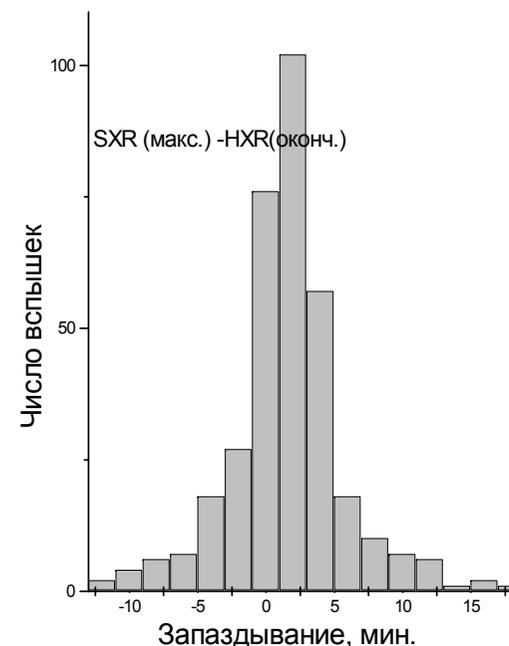


Рис.5. Распределение числа вспышек по разности времени максимума в SXR и окончания в HXR

Оба распределения схожи по форме. Для подавляющего большинства событий эти разности положительны. Они отрицательны только для 2% событий на рис.3 и для 19% событий на рис.4. Это указывает на то, что нагрев продолжается длительное время после окончания импульсной фазы. Если модель хромосферного испарения справедлива, тепловое излучение не должно увеличиваться после окончания HXR. т.к. прекращается поступление энергии от нетепловых электронов. Следовательно, можно предположить, что существует механизм, обеспечивающий поступление энергии длительное время после прекращения процесса ускорения. Здесь, однако, следует учитывать, что на фазе охлаждения испарение, обусловленное теплопроводностью, может увеличить плотность атмосферы настолько, что поток SXR увеличится, несмотря на уменьшение

температуры [3]. Наблюдения с высоким временным и пространственным разрешением также показывают, что относительная роль потоков нетепловых частиц, теплопроводности и излучения сильно изменяется на различных фазах вспышки [6].

ВЫВОДЫ

1. Для большинства рассмотренных вспышек наблюдается предварительный тепловой нагрев атмосферы вспышки, регистрируемый в мягких рентгеновских лучах до импульсивной фазы ускорения частиц. В среднем, излучение SXR начинается за 2–3 минуты до HXR.

2. Излучение в H_{α} и в HXR начните предпочтительно одновременно, указывая, что начало H_{α} вспышки связано с импульсивной фазой ускорения частиц.

3. Максимум теплового излучения (SXR) в большинстве случаев наступает после окончания нетеплового (HXR) излучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Antonucci E., Gabriel A.H., and Dennis B.R.* The energetics of chromospheric evaporation in solar flares// *Astrophys. J.*1984. V.287. P.917-925
2. *Brown J.C.* The deduction of energy spectra of non-thermal electrons in flares from the observed dynamic spectra of hard X-ray bursts//*Solar Phys.* 1971. V.18.P. 489-502
3. *Cargill P.J., Mariska J.T., and Antiochos S.K.* Cooling of solar flare plasmas.1. Theoretical considerations// *Astrophys.J.*1995. V.439. P.1034-1043
4. *Holman G.D., Kundu M.R., and Kane S.R.* Soft X-ray, Microwave, and hard X-ray emission from a solar flare: implication for electron heating and acceleration in current channels // *Astrophys. J.* 1989. V.345. P.1050-1059.
5. *Lin R.P., and Hudson H.S.* 10-100 keV electron acceleration and emission from solar flares // *Solar Phys.*1971. V.17. P.412-435
6. *Lin R.P., and Hudson H.S.* Non-thermal processes in large solar flares // *Solar Phys.* 1976. V. 50. P. 153-178
7. *Orwig L.E., Frost K.J., and Dennis B.R.* The hard X-ray spectrometer on the solar maximum mission// *Solar Phys.* 1980. V.65. P.25-37
8. *Simnet G.M., and Haines M.G.* On the production of hard X-rays in solar flares // *Solar Phys.* 1990. V. 130. P.253-263

9. *Verma, V. K. and Pande, M. C.* Time delay between H_{α} and hard X-ray emissions during impulsive solar flares// *Solar Phys.* 1985. V. 97. P.107-112

10. *Veronig A., Vrsnak B., Temmer M. and Hanslmeier A.* Relative timing of solar flares observed at different wavelengths// *Solar Phys.* 2002. V.208. P.297-315.

11. *Zarro D.M., Mariska J.T., and Dennis B.R.* Testing the DC-electric field model in a solar flare observed by *YOHKON* and the *COMPTON GAMMA-RAY OBSERVATORY* // *Astrophys.J.*1995.V.440.P.888-893.