

УДК 523.98

О связи солнечных космических лучей с корональными выбросами массы и параметрами радиовсплесков II типа

Ю.Т. Цап, И.Е. Исаева

НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория” КНУ им. Т. Шевченко, Научный,
АР Крым, Украина, 98409
yur@crao.crimea.ua

Поступила в редакцию 30 октября 2013 г.

Аннотация. На основе наблюдательных данных за период с 2001 по 2012 г., полученных на спутниках GOES, SOHO (LASCO) и наземной службой Солнца RSTN, рассмотрена связь между интенсивностью потока протонов I_p с энергиями $E > 30$ МэВ, скоростью корональных выбросов массы $V_{\text{КВМ}}$ и тонкой спектральной структурой метровых-декаметровых радиовсплесков II типа для 60 протонных событий. Степень неоднородности плазмы в окрестности фронта ударной волны характеризовалась относительным расстоянием между соседними полосами на динамических спектрах радиовсплесков. Установлено, что коэффициент корреляции между I_p и произведением $V_{\text{КВМ}}b$ составляет 0.79. Это свидетельствует о важной роли МГД-турбулентности в ускорении протонов.

ON THE RELATIONSHIP OF SOLAR COSMIC RAYS WITH CORONAL MASS EJECTIONS AND PARAMETERS OF TYPE II RADIO BURSTS, *by Yu.T. Tsap, E.A. Isaeva.* On the basis of observed data for the period from 2001 to 2012 obtained with GOES, SOHO (LASCO) satellites as well as the Radio Solar Telescope Network the relationship between the proton flux intensity I_p with energies $E_p > 30$ MeV, velocity of coronal mass ejections (CME) V_{cme} , and fine spectral structure of meter–decameter type II radio bursts for 60 solar energetic events has been considered. The degree of plasma inhomogeneity in the vicinity of the shock front was characterized by the relative distance between neighbor strips at dynamic spectra of radio bursts. It has been established that the correlation coefficient between I_p and the multiplication of bV_{cme} is 0.79. This shows evidence in favor of an important role of MHD turbulence in the course of proton acceleration.

Ключевые слова: солнечные космические лучи, вспышки, ускорение протонов, ударные волны, радиовсплески II типа

1 Введение

Как известно, солнечная активность носит ярко выраженный нестационарный характер и определяет космическую погоду в межпланетном пространстве. Наибольшей геоэффективностью обладают солнечные протонные события (LDE events), которые сопровождаются корональными выбросами массы (КВМ), ударными волнами и потоками солнечных космических лучей (СКЛ), состоящими на 90 % из ускоренных протонов с энергиями E до 10 ГэВ. Именно СКЛ определяют уровень радиации в околоземном космическом пространстве, который может возрасти из-за вспышек на несколько

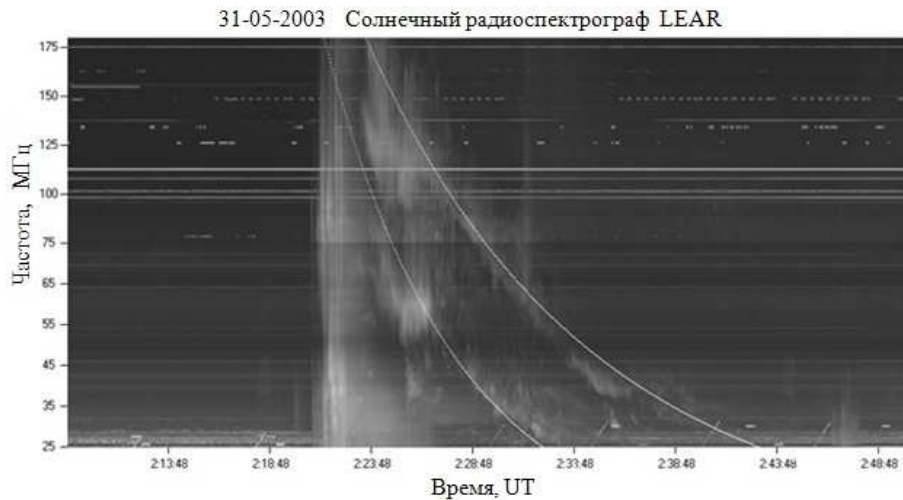


Рис. 1. Динамический спектр радиовсплеска II типа протонного события 31.05.2003, полученный с помощью радиоспектрографа SRS в Лермонте (Западная Австралия)

порядков. Интересно отметить, что протоны даже сравнительно небольших энергий (~ 150 МэВ) могут проникать сквозь алюминиевый экран толщиной 7.5 см (Римс, 2013), что делает защиту от радиации космических аппаратов довольно проблематичной.

В настоящее время все еще активно дискутируется вопрос об относительной роли различных механизмов в ускорении протонов СКЛ. В частности, достаточно широко распространена точка зрения о том, что основное ускорение происходит в области вспышечного энерговыделения. Также остается до конца не выясненным вопрос о происхождении ударных волн и их связи с КВМ (Римс, 1999, 2013).

Наиболее надежным индикатором ударных волн в короне Солнца являются радиовсплески II типа. За их генерацию ответствен плазменный механизм радиоизлучения (см., например, Кэрнс, 2003), суть которого состоит в следующем. Ускоренные на фронте ударной волны неравновесные электроны возбуждают ленгмюровские моды l с частотой, близкой к электронной плазменной f_e , которые затем трансформируются в наблюдаемые электромагнитные t путем распада ($l \rightarrow t(f_e) + s'$, s' – ионно-звуковая волна) или слияния ($l + l' \rightarrow t(2f_e)$) волн. Это предполагает, что на динамических спектрах мы должны обнаруживать две полосы, соответствующие первой и второй гармонике. Причем, поскольку генерация излучения может происходить как впереди, так и позади ударного фронта, где плотность может отличаться в разы, то в идеале должно наблюдаться расщепление полосок, позволяющее диагностировать важные физические параметры (Вржнжак и др., 2004).

На практике полоски на динамических спектрах радиовсплесков II типа неоднородны, а иногда даже трудноразличимы на фоне континуальных всплесков (рис. 1). При этом расстояние между ними зачастую весьма условно можно соотносить с гармониками, поскольку отношение соответствующих частот заметно отличается от 2. По нашему мнению, это в значительной мере обусловлено неоднородностью плазмы в области излучения из-за ее турбулизации. Определенный вклад вносит также расширение полосок, обусловленное генерацией излучения как перед фронтом, так и за фронтом ударной волны (Цап, Исаева, 2013). Если учесть, что ускорение протонов СКЛ может происходить на ударных волнах посредством диффузионного механизма и в результате действия стохастического механизма ускорения (Мелроуз, 2009), то следует ожидать наличие корреляции между потоком частиц и тонкой структурой радиовсплесков II типа. В частности, должна существовать связь эффективного расстояния между полосками на динамических спектрах, характеризующего неоднородность плазмы, с потоками протонов СКЛ.

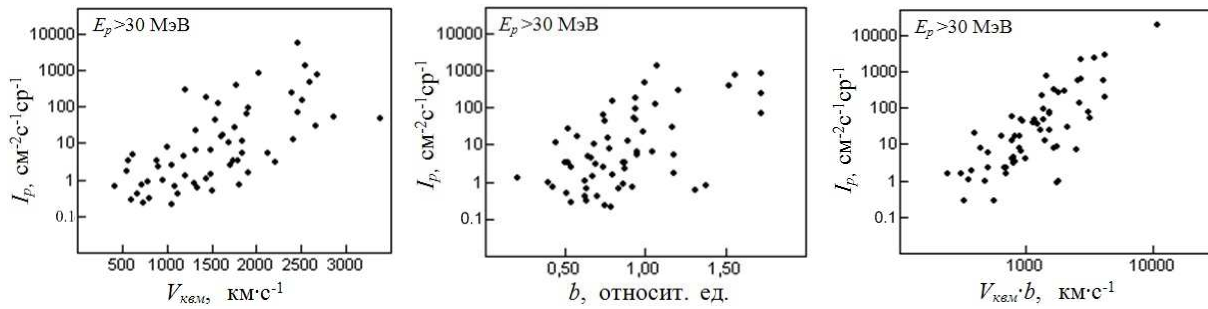


Рис. 2. Диаграммы рассеяния интенсивности потока протонов СКЛ I_p и скорости $V_{\text{КВМ}}$, I_p и относительной расстройки b , а также I_p и произведения $bV_{\text{КВМ}}$. Коэффициенты корреляции $r(I_p, V_{\text{КВМ}})$, $r(I_p, b)$ и $r(I_p, bV_{\text{КВМ}})$ соответственно равны 0.65, 0.59 и 0.75

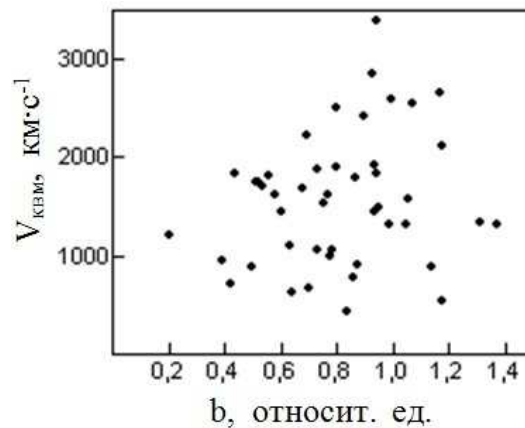


Рис. 3. Диаграмма рассеяния скорости КВМ $V_{\text{КВМ}}$ и относительной расстройки b . Коэффициент корреляции $r(V_{\text{КВМ}}, b) \approx 0.30$

Целью настоящей работы является поиск зависимостей между КВМ, параметрами радиовсплесков II типа и потоками протонов СКЛ с учетом плазменной неоднородности, вызванной МГД-турбулентностью в короне Солнца.

2 Наблюдательные данные и их обработка

При проведении статистического анализа использовались оригинальные записи интенсивности потока протонов I_p с энергией $E_p > 1$ МэВ, полученные на спутниках GOES, а также динамические спектры в диапазоне 25–180 МГц, построенные по данным радиоспектрографов SRS службы Солнца RSTN BBC США с временным разрешением около 3 с. Скорость КВМ находилась из каталога коронографа LASCO, установленного на спутнике SOHO (http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/UNIVERSAL/text_ver/).

За рассматриваемый период с 04.11.1997 по 31.08.2012 гг. было зарегистрировано 173 протонных события, из которых 147 (85 %) сопровождалась КВМ, 105 (61 %) – метровыми всплесками II типа в диапазоне 25–180 МГц, 94 (54 %) – одновременно КВМ и всплесками mII. В работе мы ограничились исследованием событий, сопровождавшихся КВМ и радиовсплесками II типа. В связи

с тем, что оригинальные записи динамических спектров доступны в Интернете с 2000 г., то исследуемая выборка включала всего 60 протонных событий, зарегистрированных с 2001 по 2012 гг., которые одновременно сопровождались КВМ, континуальными всплесками IV типа в диапазоне 245–15400 МГц и радиовсплесками II типа.

СКЛ характеризовались максимальной интенсивностью потока протонов I_p , а КВМ – скоростью $V_{\text{КВМ}}$ на расстоянии $20R_{\odot}$ от поверхности Солнца.

На рис. 1 приведен типичный пример радиовсплеска II типа. Как видно, можно выделить две полосы, соответствующие основной и второй гармонике. Они достаточно хорошо аппроксимируются функциями вида: $\lg f_{i,j} = k_j \lg t_i + d_j$ (светлые линии на рис. 1), где t_i – время, соответствующее максимальной интенсивности всплеска II типа на частоте $f_{i,j}$, k_j и d_j – коэффициенты линейной регрессии, $i = 1, 2 \dots n$ – номера отсчета, $j = 1, 2$ – номера гармоник. По полученной таким образом эмпирической зависимости вычислялось значение скорости частотного дрейфа V_{mII} и расстройки b на момент времени t_i

$$V_{mII} = \frac{f_{i+1,j} - f_{i,j}}{t_{i+1} - t_i}, \quad b = \frac{f_{i,2} - f_{i,1}}{f_{i,1}}.$$

При построении диаграмм рассеяния использовались усредненные по всему временному интервалу значения расстройки b и скорости частотного дрейфа V_{mII} , которые находились по приведенным выше формулам.

3 Связь интенсивности I_p со скоростью КВМ $V_{\text{КВМ}}$ и расстройкой b

Для того, чтобы лучше понять происхождение протонов СКЛ, мы рассмотрели связь потока протонов I_p со скоростью КВМ $V_{\text{КВМ}}$ и относительной расстройкой b (рис. 2). Было установлено, что коэффициент корреляции $r(I_p, V_{\text{КВМ}})$ между I_p и $V_{\text{КВМ}}$ составляет 0.65. Это достаточно хорошо согласуется с результатами, полученными ранее Калером (2001), что свидетельствует о важной роли КВМ в ускорении протонов СКЛ. В свою очередь, коэффициент корреляции $r(I_p, b)$ хотя и не превышает 0.59, тем не менее позволяет сделать вывод о заметном влиянии МГД-турбулентности на ускорительные процессы в короне Солнца. Последнее предположение становится особенно очевидным, если мы построим зависимость I_p от произведения $V_{\text{КВМ}}b$. Как видно из правого рис. 2, в этом случае корреляция существенно возрастает и $r(I_p, V_{\text{КВМ}}b)$ достигает 0.75.

Для того, чтобы оценить влияние КВМ на развитие МГД-турбулентности, мы исследовали связь между $V_{\text{КВМ}}$ и b . Как следует из полученных результатов (рис. 3), какая-либо зависимость между КВМ и магнито-плазменными неоднородностями скорее отсутствует – коэффициент корреляции $r(V_{\text{КВМ}}, b) \approx 0.30$.

4 Обсуждение результатов и выводы

В представленной работе мы рассмотрели связь потоков интенсивности протонов СКЛ I_p со скоростью КВМ $V_{\text{КВМ}}$ и относительной расстройкой b радиовсплесков II типа. Было установлено, что необходимым условием эффективного ускорения протонов является не только высокая скорость КВМ, обеспечивающая формирование интенсивных ударных волн, но и наличие турбулентной среды, которая может обеспечивать как эффективное рассеяние энергичных протонов на магнитных неоднородностях, так и их ускорение посредством стохастического механизма.

Связь между КВМ и степенью турбулизации корональной плазмы оказалась довольно слабой. Это предполагает, что формирование плазменных неоднородностей может происходить, например, из-за выбросов плазмы в виде джетов, образуемых вследствие пересоединения магнитных силовых линий. Важную роль могут также играть расширяющиеся магнитные структуры различных масштабов. Необходимо проводить более детальные исследования корональных неоднородностей вблизи поверхности Солнца на фазе формирования КВМ с привлечением инструментов, обеспечивающих высокую чувствительность, пространственное и временное разрешение.

Полученные результаты не позволяют сделать однозначный вывод о роли корональных магнитных неоднородностей в ускорении протонов СКЛ. Не следует исключать, что помимо ударных волн стохастические механизмы также могут давать заметный вклад в этот процесс (Бомбардиери и др., 2008). Данный вопрос требует отдельного рассмотрения.

Работа выполнена при частичной поддержке Государственного фонда фундаментальных исследований Украины (проект N 53.2/099).

Литература

- Бомбардиери и др. (Bombardieri D.J., Duldig M.L., Humble J.E., Michael K.J.) // *Astrophys. J.* 2008. V. 682. P. 1315.
- Вржнак и др. (Vrsnak B., Magdalenic J., Zlobec P.) // *Astron. Astrophys.* 2004. V. 413. P. 753.
- Калер (Kahler S.W.) // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. P. 20947.
- Кэрнс и др. (Cairns I.H., Knock S.A., Robinson P.A., Kuncic Z.) // *Space Sci. Rev.* 2003. V. 107. P. 27.
- Мелроуз (Melrose D.B.) // *Acceleration Mechanisms.* 2009. eprint arXiv:0902.1803.
- Римс (Reames D.V.) // *Space Sci. Rev.* 1999. V. 90. P. 413.
- Римс (Reames D.V.) // *Space Sci. Rev.* 2013. V. 175. P. 53.
- Цап, Исаева (Tsap Yu.T., Isaeva E.A.) // *Cosmic Res.* 2013. V. 51. P. 108.