

О СВЯЗИ СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ С РАДИОВСПЛЕСКАМИ II ТИПА

Цап Ю.Т.¹, Исаева Е.А.²

¹*Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Крым, Россия*

²*Радиоастрономический институт НАН Украины, Харьков, Украина*

ON THE RELATIONSHIP SOLAR ENERGETIC PARTICLES WITH TYPE II RADIO BURSTS

Tsap Yu.T.¹, Isaeva E.A.²

¹*Crimean Astrophysical Observatory, Nauchny, Crimea, Russia*

²*Institute of Radio Astronomy, Kharkov, Ukraine*

Based on the solar energetic particle intensities I_p with energy $E_p > 1$ MeV obtained with the GOES satellites and the dynamic spectra of radio emission of type II radio bursts in the range of 25–180 MHz observed with Solar Radio Spectrograph, we analyze 112 proton events for the period from 24 November 2000 to 20 December 2014. The correlation between the intensity of Type II radio bursts I_i and I_p with the Pearson correlation coefficient of about 0.81 was revealed. The correlation coefficient between I_p and I_i reaches the maximum for protons with energy $E_p = 30–100$ MeV and it decreases at $E_p > 100$ MeV. This supports the idea that the non-thermal electrons responsible for type II radio bursts and solar energetic particles are generated by the same shock. The energy of relativistic particles with $E_p > 100$ MeV should be determined by acceleration processes in the region of flare energy release.

DOI: 10.31725/0552-5829-2022-287-290

Введение

В настоящее время считается, что солнечные космические лучи (СКЛ), состоящие в основном из протонов и электронов с энергиями от нескольких десятков кэВ до нескольких ГэВ ускоряются либо в областях вспышечного энерговыделения (в токовых слоях), либо/и на фронтах ударных волн, которые могут генерироваться как вспышками, так и выбросами корональной массы. Полученные к настоящему времени результаты не позволяют сделать однозначный вывод о доминирующем механизме ускорения [1–4], который может зависеть от энергии протонов [5–6].

Одним из наиболее надежных индикаторов ударных волн в солнечной короне являются радиовсплески II типа с отрицательным дрейфом частоты, наблюдаемые диапазоне от метровых до километровых длин волн. На динамических спектрах зачастую они состоят из двух гармонических полос. В метровом диапазоне длин волн примерно для половины радиовсплесков II типа присутствуют гармоники. Между тем вопрос об их связи с СКЛ все еще остается открытым.

Сравнительно недавно Иваи и др. [7] обнаружили, что ширина полосы гектометровых всплесков II типа на динамических спектрах и пиковые ин-

тенсивности СКЛ I_p сравнительно тесно связаны (коэффициент корреляции $r \approx 0.64$). Этот результат свидетельствует о том, что нетепловые электроны, ответственные за генерацию радиовсплесков II типа, и протоны СКЛ ускоряются одними и теми же ударными волнами. Между тем ширина полосы не может служить надежным индикатором силы ударной волны. Более надежной является относительная интенсивность радиовсплесков II типа I_i . Изучению связи между I_p и I_i посвящена настоящая работа.

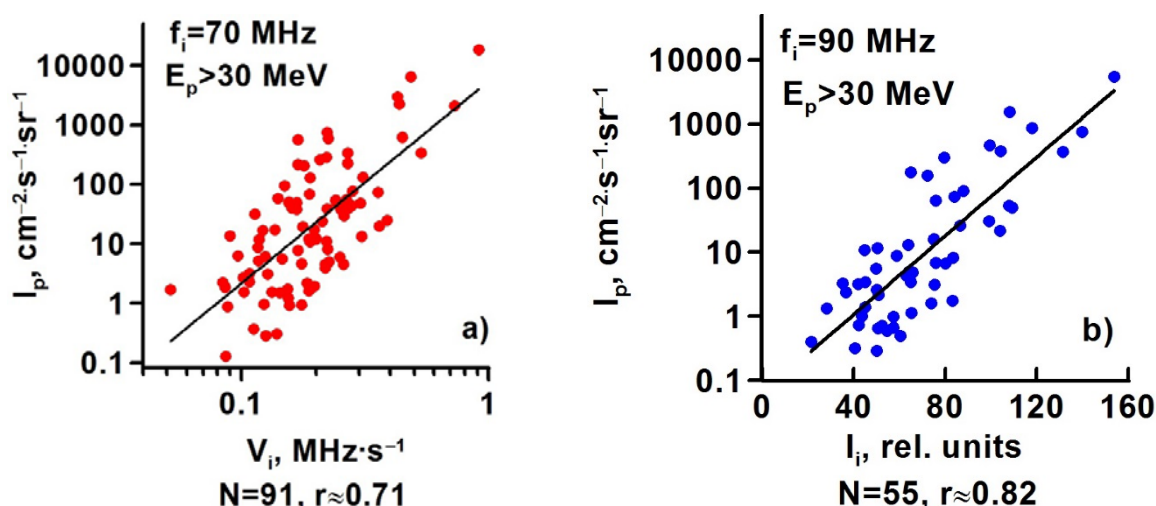


Рис. 1. а) Связь интенсивности протонов I_p и скоростью дрейфа V_i соответственно на частотах 70 ГГц. б) Связь интенсивности протонов I_p с интенсивностью радиовсплесков II типа I_i .

Наблюдения и результаты

Были проанализированы наблюдения, полученные наземной сетью RSTN (Radio Solar Telescope Network). RSTN – это всемирная сеть обслуживания Солнца, созданная Исследовательской лабораторией BBC (США) с целью мониторинга солнечных вспышек, шумовых бурь и других проявлений солнечной активности. Он включает в себя антенную систему RIMS (Radio Interference Measurement Set), а также SRS (Solar Radio Spectrograph), расположенные в различных частях Земли.

Измерения интегральных интенсивностей I_p протонных событий проводились на спутниках серии GOES. Для анализа использовались максимальные значения I_p в различных спектральных интервалах.

Мы выбрали 112 протонных событий, наблюдавшихся в период с 24 ноября 2000 г. по 20 декабря 2014 г., поскольку только для этих событий были оригинальные записи радиовсплесков II типа в диапазоне 25–180 МГц. Этим объясняется, в частности, сравнительно небольшое количество изученных протонных событий за указанный выше период. Кроме того, для некоторых очень сильных событий не всегда удавалось достаточно точно различить гармоники радиовсплесков на фоне мощного континуума (например, событие 29 октября 2003 года), поэтому такие события были

также исключены из рассмотрения. Мы идентифицировали радиоизлучения II типа, интенсивность которых равна или превышает 30% от фонового уровня. Необходимо подчеркнуть, что для всех протонных событий нулевой момент времени соответствовал началу всплеска II типа на второй гармонике на частоте 180 ГГц.

В результате детальных исследований связи потока протонов СКЛ с параметрами радиовсплесков II типа была обнаружена достаточно сильная связь интенсивности потока протонов I_p с $E_p > 30$ МэВ с интенсивностью всплесков II типа I_i . (рис.1), для которой коэффициент корреляции r на частоте $f_i = 90$ МГц оказался приблизительно равным 0.82. Причем обнаруженная связь I_p с I_i заметно превосходит корреляцию со скоростью дрейфа V_i (рис.1), которая на частоте $f_i = 90$ МГц достигает $r \approx 0.72$. Отметим, что при определении скорости частотного дрейфа мы исходили из следующей регрессионной зависимости

$$\log_{10} f_i = a \cdot \sqrt{t_i} + c,$$

где f_i – частота радиовсплеска II типа на второй гармонике в заданный момент времени t_i , a и c – линейные регрессионные коэффициенты.

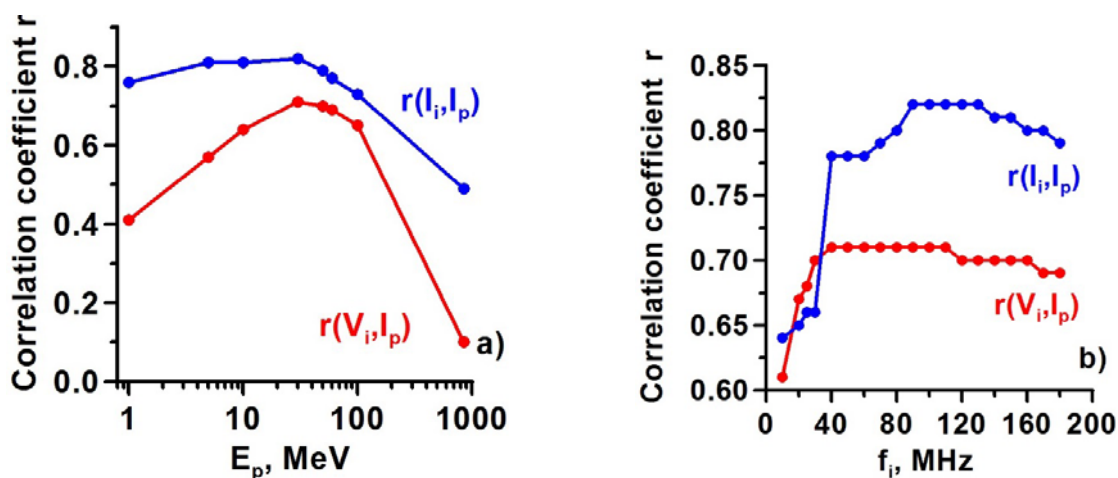


Рис. 2. а) Зависимость коэффициентов корреляции между интенсивностями I_i и I_p (синяя кривая), а также V_i и I_p (красная кривая) от энергии протонов. б) То же, что и на левом графике, но для зависимости от частоты радиовсплесков II типа f_i .

Связь коэффициентов корреляции $r(I_i, I_p)$ и $r(V_i, I_p)$ с энергией протонов $E_p = 1-850$ МэВ также была исследована. Сравнительный анализ показал, что $r(I_i, I_p)$ и $r(V_i, I_p)$ в значительной степени зависят от энергии протонов E_p . На рис. 2 видно, что наибольшая связь наблюдается для умеренно релятивистских протонов с $E_p > 1-60$ МэВ и резко уменьшается для протонов с энергией $E_p > 100$ МэВ. Это свидетельствует об определяющем вкладе в ускорение протонов процессов вспышечного энергвыделения, что хорошо согласуется с некоторыми результатами [8].

Выводы

Кратко сформулируем основные выводы работы.

1. Проведен детальный анализ связи интенсивности I_i и скорости дрейфа V_i радиовсплесков II типа от интенсивности протонов СКЛ I_p с энергией $E_p > 1$ МэВ.

2. Установлено, что максимальные коэффициенты корреляции между I_i и I_p , а также между V_i и I_p приблизительно равны 0.82 и 0.71, что свидетельствует в пользу ускорения протонов с $E_p < 100$ МэВ и нетепловых электронов, генерирующих радиовсплески II типа, на одних и тех же ударных волнах.

3. Зависимость поведения коэффициентов корреляции $r(I_i, I_p)$ и $r(V_i, I_p)$ от E_p свидетельствует в пользу ускорения протонов с $E_p > 100$ МэВ в области вспышечного энерговыделения.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ (N20-52-26006), РНФ (No. 22-12-0030) и Минобрнауки (НИР №0831-2019-0006).

Литература

1. Gopalswamy N., Yashiro, S., Michalek G. et al. // *ApJ.*, 2002, 572, 103.
2. Cliver E.W., Kahler S.W., Reames D.V. // *ApJ*, 2004, 605, 902.
3. Cliver E.W. // *Proc. IAU Symp.*, 2009, 257, 401.
4. Reames D.V. // *Space Science Rev.*, 2015, 194, 303.
5. Trotter, G., S. Samwel K.-L. Klein et al. // *Solar Phys.*, 2015, 290, 819.
6. Dierckxens M., Tziotziou K., Dalla S. et al. // *Solar Phys.* 2015, 290, 841.
7. Iwai K., Yashiro S., Nitta N.V., Kubo Y. // *ApJ*, 2020, 888, 50.
8. Kiselev V.I., Meshalkina N.S., Grechnev V.V. // *Solar Phys.*, 2022, 297, 53.