

МЕЖПЛАНЕТНЫЕ УДАРНЫЕ ВОЛНЫ И УСКОРЕНИЕ СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Рассмотрена связь метровых (m II) и декаметровых-гектометровых (DH II) радиовсплесков II типа с солнечными протонными событиями (СПС). Анализ, включающий 87 СПС (1989–2005), показывает, что коэффициент корреляции между интенсивностью потока протонов и скоростью дрейфа m II- и DH II- всплесков не превышает 0.40. С увеличением скорости частотного дрейфа поток протонов увеличивался для m II-всплесков, а для DH II-всплесков - уменьшался. Полученные результаты свидетельствуют, что ускорение солнечных космических лучей межпланетными ударными волнами является малоэффективным.

The correlation between meter (m II) and decameter-hectometer (DH II) type II bursts with solar energetic particle (SEP) events has been considered. Analysis including 87 SEP events (1989–2005) shows that the correlation coefficient between the intensity of proton flux and the drift velocity for the type II radio bursts does not exceed 0.40 for 87 SEP events. The proton flux increases with increase of the frequency drift velocity for m II bursts while it decreases for DH II bursts. Obtained results suggest that the SEP acceleration by interplanetary shock waves is not effective.

Введение. Как известно, в годы максимума солнечной активности потоки солнечных космических лучей (СКЛ), состоящих на 90 % из протонов, составляют в среднем у Земли $\sim 10^5$ эрг/(см² год). Это заметно уступает потоку энергии галактических космических лучей $\sim 4 \cdot 10^5$ эрг/(см² год). Причем сильные вспышки могут давать поток протонов $\sim 10^3$ см⁻²·с⁻¹, что соответствует концентрации $\sim 10^{-7}$ см⁻³ [1]. Приведенные значения в 10^4 раз меньше потока энергии и в 10^8 меньше концентрации частиц солнечного ветра. Тем не менее, в ускоренных протонах может содержаться значительная доля энергии вспышки, а частицы с энергией $E_p = 2 \cdot 10^7 - 5 \cdot 10^8$ эВ способны легко проникать не только через обшивки космических аппаратов, но и достигать поверхности Земли, выводя из строя некоторые чувствительные электронные приборы. Поэтому с момента открытия в 1946 г. Форбушом [2] СКЛ им уделяется особое внимание. Однако до сих пор так и не удалось окончательно выяснить, где и как происходит ускорение СКЛ.

В настоящее время считается, что СКЛ могут ускоряться либо в области вспышечного энерговыделения (в токовых слоях), либо на фронтах ударных волн, которые могут генерироваться как вспышками, так и корональными выбросами плазмы. Хотя полученные к настоящему времени результаты не позволяют сделать однозначный вывод о том, какой из сценариев является доминирующим, тем не менее имеющиеся данные убедительно свидетельствуют в пользу важной роли ударных волн [4, 5].

Наиболее надежным индикатором ударных волн в короне Солнца являются радиовсплески II типа. Считается, что за их генерацию ответственен плазменный механизм радиоизлучения (см., например, [3]). Ускоренные на фронте ударной волны неравновесные электроны возбуждают ленгмюровские волны L с частотой близкой к электронной плазменной f_p , которые трансформируются в электромагнитные T путем распада $L \rightarrow T(f_p) + S'$, (S' – ионно-звуковая волна) или слияния ($L + L' \rightarrow T(2f_p)$).

Длительное время из-за поглощения радиоволн земной атмосферой наблюдения радиовсплесков II типа ограничивались диапазоном метровых (m) длин волн, что соответствует высоте $R = (1.5 - 3)R_{sun}$. Однако с запуском спутника Wind в 1994 г. появилась возможность исследовать не только корональные, но и межпланетные ($R > 3 R_{sun}$) ударные волны, исходя из наблюдаемых особенностей радиоизлучения в декаметровом-гектометровом (DH) диапазоне.

Сравнительно недавно Кливер и др. [4] (см. также [5]) провели детальные исследования связи между потоками СКЛ и m II- и DH II-всплесками для 88 протонных событий (1996–2001 гг.). На основе полученных результатов был сделан вывод о том, что наиболее эффективно ускорение протонов с $E_p \approx 20$ МэВ происходит на фронтах ударных волн, распространяющихся на высотах, превышающих $3R_{sun}$. Но, на наш взгляд, этот вывод нельзя считать убедительным по следующим причинам.

Во-первых, статистические результаты сильно зависят от методики выборки СПС из-за накладки солнечных вспышек при сопоставления их с потоками СКЛ в околоземном пространстве. В годы максимума солнечной активности эта неопределенность характерна приблизительно для половины всех зарегистрированных СПС. Во-вторых, авторами не учитывалось гелиодолготное ослабление потоков протонов, связанное с закрученностью в спираль Архимеда магнитных силовых линий Солнца в межпланетном пространстве. В-третьих, при интерпретации полученных результатов Кливером и др. [4] не принимался во внимание так называемый "синдром большой вспышки", согласно которому мощное вспышечное энерговыделение воздействует на все сопутствующие процессы, что не позволяет сделать однозначный вывод о причинной связи между различными явлениями.

Цель настоящей работы – пересмотреть с учетом изложенных выше замечаний результаты, полученные Кливером и др. [4], а также попытаться выяснить роль межпланетных ударных волн в ускорении энергичных протонов.

Исходные данные и их обработка. При проведении исследований мы воспользовались наблюдательными данными, доступными через Интернет. Независимая выборка включала 107 протонных вспышек за период с 1989 по 2005 г, из которых 87 сопровождалась радиовсплесками II типа в m- и DH-диапазонах. Анализировались оригинальные наблюдения, полученные с помощью наземной сети RSTN (Radio Solar Telescope Network) и космического аппарата WIND.

RSTN – это мировая сеть службы Солнца, созданная Исследовательской лабораторией BBC США (Air Force Research Laboratory) с целью мониторинга солнечных вспышек, шумовых бурь и других проявлений солнечной активности. Она включает систему антенн RIMS (Radio Interference Measurement Set), а также радиоспектрограф SRS (Solar Radio Spectrograph), размещенных в различных частях Земли. В сеть RSTN входят 4 наземные станции: Palehua (Гавайи), San Vito dei Normanni (Италия), Sagamore Hill (Массачусеттс, США), RAAF (Royal Australian Air Force) Learmonth (Западная Австралия), что позволяет проводить непрерывный мониторинг радиоизлучения

Солнца. В представленной работе привлекались данные измерений, полученные на SRS с временным разрешением около 3 с на частотах $f = 25-299$ МГц.

Эксперимент Waves/Wind [6] включает два радиометра, работающих в диапазонах 1.075–13.825 МГц и 20–1040 кГц, что соответствует расстояниям $(1-20)R_{SUN}$ и $20R_{SUN}-1$ AU. Скорость частотного дрейфа $V_{II} = df / dt$ в м- и DH-диапазонах длин волн принималась равной отношению наблюдаемого частотного диапазона к длительности всплеска.

Интегральные спектральные интенсивности потока протонов СКЛ с энергиями $E_p > 0.8-500$ МэВ регистрировались на спутниках серии GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite). Поток протонов определялся по максимальному значению интенсивности в различных спектральных интервалах. При этом для получения реальных значений потока протонов учитывалось гелиодолготное ослабление. Расчет реальных интенсивностей протонов I_p проводился по формуле Очелкова [7]

$$I_p = I_0 k(\lambda), \quad k(\lambda) = 10^{0.01 \cdot |\lambda| - 45}$$

где I_0 – наблюдаемая интенсивность, λ – гелиографическая долгота вспышки, $k(\lambda)$ – коэффициент ослабления (см. рис. 1).

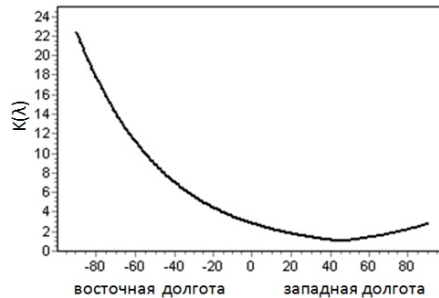


Рис. 1. Зависимость коэффициента ослабления потока протонов СКЛ от гелиодолготы [7]

Связь между частотой появления протонных событий и всплесками II типа. Следуя Кливеру и др. [4], мы построили зависимость числа протонных событий от солнечной гелиодолготы (рис. 2). В отличие от соответствующего рисунка в работе [4], где на всех гелиодолготах вероятность появления СПС для DH II-всплесков приблизительно в 2 раза выше, чем для m II-всплесков, рассматриваемая корреляция в обоих диапазонах на различных долготах оказалась приблизительно одинаковой.

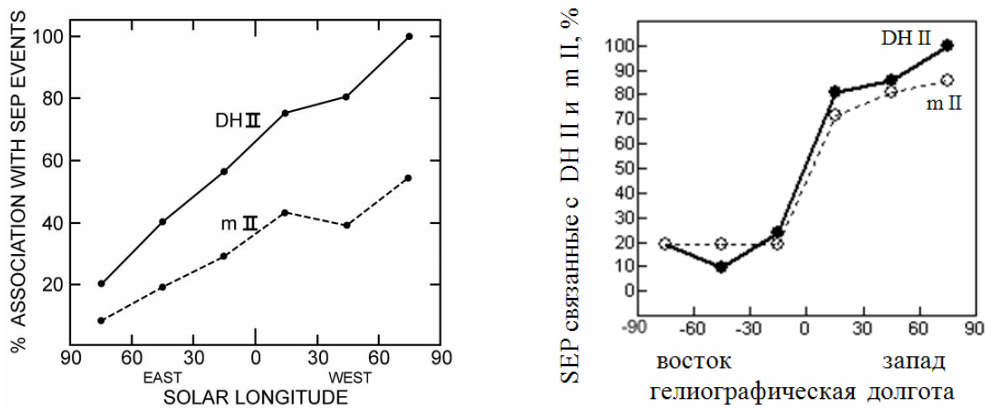


Рис. 2. Количество протонных событий в %, связанных с m II- и DH II-всплесками в зависимости от гелиографической долготы: слева - по данным из работы Кливера и др. [4]; справа - по нашим данным

Существенную разницу обнаруживает также характер связи между числом СПС, сопровождаемых m II- и DH II-всплесками, и максимальными значениями интенсивности протонов. Как видно из рис.3, кривые для разных диапазонов практически совпадают, что не согласуется с результатами Кливера и др. [4].

Таким образом, как следует из полученных нами результатов, вывод Кливера и др. [4] о доминирующей роли межпланетных ударных волн в ускорении СКЛ нельзя считать обоснованным. Имеются лишь свидетельства о тесной связи между m II- и DH II-всплесками. Это, в частности, предполагает, что межпланетные ударные волны являются продолжением ударных волн солнечной короны.

Интенсивность потока протонов и скорость частотного дрейфа m II- и DH II-всплесков. Мы также исследовали связь между интенсивностью потока протонов разных энергий и скоростью частотного дрейфа m II- и DH II-всплесков.

Как видно из рис.4 для низкоэнергичных протонов она является достаточно слабой. В среднем значение коэффициента корреляции оказалось равным ≈ 0.4 . Однако наиболее интересная особенность состоит в том, что знак $\text{tg} \alpha$, где α угол наклона регрессионной прямой, зависит от рассматриваемого диапазона длин волн. Если для m II-всплесков $\text{tg} \alpha > 0$, то для DH II-всплесков $\text{tg} \alpha < 0$. Это означает, что с увеличением скорости дрейфа m II-всплесков в среднем поток протонов также увеличивается, тогда как для DH II-всплесков, наоборот, уменьшается.

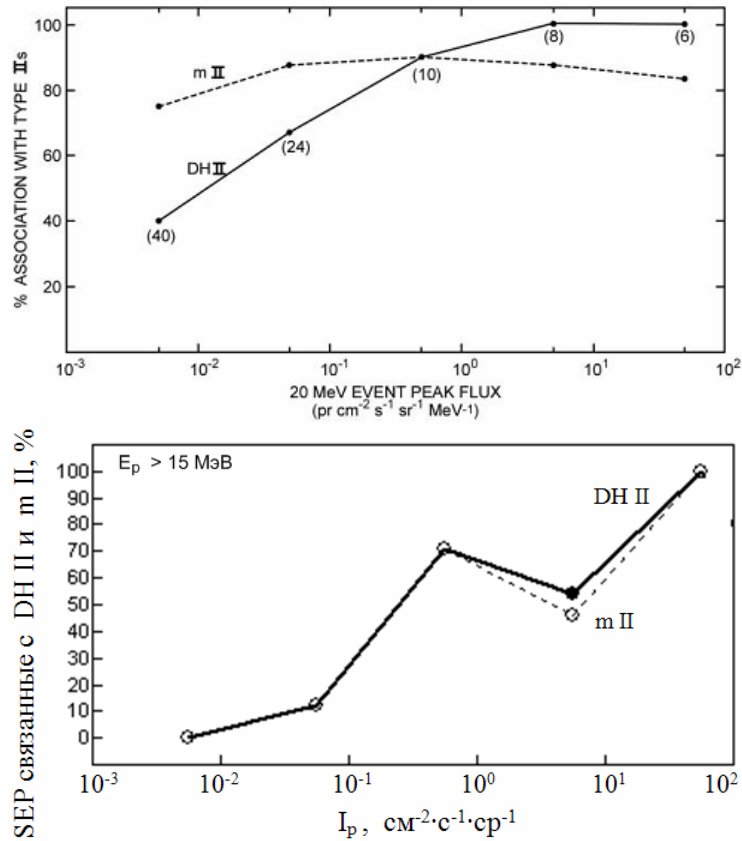


Рис. 3. Количество протонных событий в %, связанных с m II- и DH II-всплесками в зависимости от максимальных значений потоков протонов: слева - по данным из работы Кливера и др. [4]; справа - по нашим данным

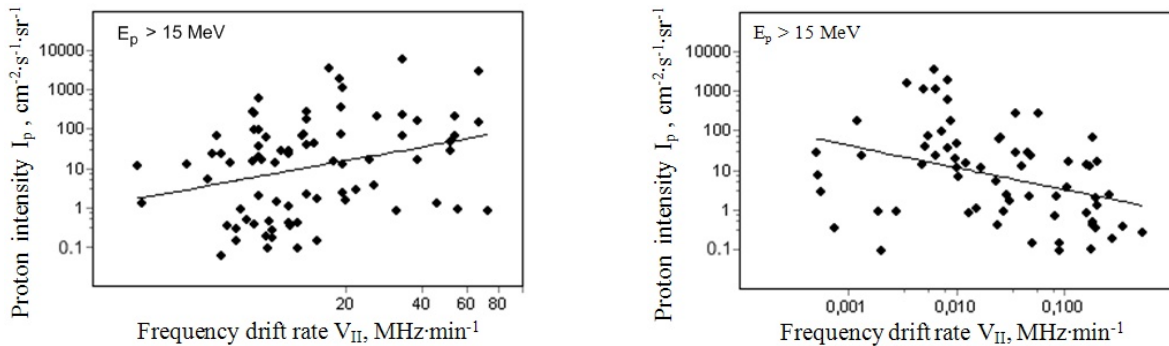


Рис. 4. Зависимости интенсивности потока протонов I_p СКЛ от скорости дрейфа V_{II}: слева для m II-всплесков; справа для DH II-всплесков

Исходя из представлений о дрейфовом и диффузионном механизмах ускорения, нетрудно показать, что темп набора энергии заряженными частицами на фронтах ударных волн $dE/dt \propto u^\gamma$, где u - скорость распространения волны и показатель степени $\gamma = 1-2$. Откуда следует, поскольку плазменная частота $f_p \propto \sqrt{n}$, где n - концентрация электронов, то $V_{II} \propto u \propto (dE/dt)^{1/\gamma}$. Поэтому рис.4 свидетельствует, с одной стороны, об ускорении СКЛ на фронтах ударных волн в диапазоне высот $R=(1.5-3)R_{sun}$, а с другой, о значительном снижении эффективности этого процесса в межпланетном пространстве.

Выводы. В представленной работе благодаря детальному исследованию связи между СПС и СКЛ были получены результаты, которые ставят под сомнение правомерность некоторых заключений, приведенных в работе Кливера и др. [4]. Среди наиболее важных сделанных нами выводов отметим следующие:

1. Статистические исследования связи СПС и СКЛ сильно зависят от выборки событий из-за наложения вспышек по времени.
 2. Корональные и межпланетные ударные волны тесно связаны между собой, свидетельствуя в пользу того, что межпланетные ударные волны являются продолжением корональных.
- Ускорения СКЛ межпланетными ударными волнами является малоэффективным.

1. Грайзен К. Физика космических рентгеновских лучей, гамма-лучей и частиц высокой энергии. - М: 1975. 2. Bougeret J.L., Kaiser M.L., Kellogg P.J. et al. Waves: the radio and plasma waves investigation on the WIND spacecraft // Space Sci. Rev. –1995.– Vol. 71.– P. 231–263. 3. Cairns I.H., Knock S.A., Robinson P.A., Kuncic Z. The II solar radio bursts: theory and space weather implications // Space Sci. Rev. – 2003. – Vol.107.– P. 27–34. 4. Cliver E.W., Kahler S.W., Reames D.V. Coronal shocks and solar energetic proton events // Astrophys. J. – 2004. – Vol.605. – P. 902–910. 5. Forbush, S.E. The unusual cosmic-ray increases possibly due to charged particles from the Sun // Phys. Rev. – 1946.– Vol. 70. – P. 771–772. 6. Gopalswamy N., Yashiro S., Michalek G. et al. Interacting coronal mass ejections and solar energetic particles // Astrophys. J. – 2002. – Vol. 572. – P. 103–107. 7. Очелков Ю.П. Гелиодолготная зависимость интенсивности солнечных протонных событий // Геомагнетизм и аэрономия. – 1986. – Т.26, № 6. – С.1007–1009.

Надійшла до редколегії 20.06.11

УДК 523.98

В. Криводубський, д-р фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.,
В. Єфіменко, канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.

ДОСЛІДЖЕННЯ І ПРОГНОЗУВАННЯ СОНЯЧНОЇ АКТИВНОСТІ В АСТРОНОМІЧНІЙ ОБСЕРВАТОРІЇ КИЇВСЬКОГО УНІВЕРСИТЕТУ ВПРОДОВЖ ТРЬОХ СОНЯЧНИХ ЦИКЛІВ (1968–2011 РР.)

Присвячується пам'яті Павла Родіоновича Романчука

Описано проведені в Астрономічній обсерваторії Київського університету (в 1968–2011 рр.) дослідження активності Сонця і розроблені методи прогнозування основних характеристик сонячної активності з різною завбачливістю: параметрів 11-річних циклів, відносних чисел сонячних плям, спалахової активності та ін. Подано деякі результати прогнозування різних індексів сонячної активності, які використовувалися для потреб фундаментальної науки та різних галузей народного господарства.

Study of solar activity and developed methods for forecasting the basic characteristics of solar activity with different advance times (the 11 years cycle parameters, the relative numbers of sunspot, flare activity, et al.), fulfilled in the Astronomical Observatory of Kiev University (1968–2011), are described. Some of the prediction results of different indices of solar activity, which were utilized for the needs of fundamental science and various branches of the economics, are given.

Новий етап наукових досліджень. В 1972 р., коли директором Астрономічної обсерваторії Київського державного університету (АО КДУ) було призначено доц. П. Р. Романчука, розпочався новий етап наукової діяльності обсерваторії. З цього часу набули поширення дослідження природи циклічності сонячної активності, теоретичні і експериментальні вивчення магнітних полів і спалахів на Сонці, дослідження впливу сонячної активності та інших космічних факторів на зміни клімату та погодні явища [1]. З іменем Романчука П. Р. пов'язано початок систематичного прогнозування різних індексів сонячної активності. Зростання інтересу до вивчення впливу сонячної активності на геофізичні, біологічні та метеорологічні явища, необхідність вибору сприятливих періодів щодо радіаційної обстановки в навколосезонному просторі при запуску космічних апаратів з людьми на борту висувають в цей час Астрономічну обсерваторію в коло провідних наукових центрів Радянського Союзу з досліджень закономірностей циклічності сонячної активності та сонячно-земних зв'язків, а також практичного прогнозування сонячної активності. З метою розуміння основних процесів, що викликають сонячну активність, в обсерваторії велося вивчення природи глобального та маломасштабного магнетизму, фізики сонячних спалахів, статистичних закономірностей виникнення та еволюції активних областей на Сонці та спалахової діяльності. Завдяки зусиллям Романчука П. Р. Держкомітет з науки і техніки СРСР і Рада Міністрів УРСР виділили Київському університету додаткові асигнування для розвитку сонячних досліджень. В АО КДУ було створено кілька нових наукових відділів, завдання яких полягало в дослідженні і прогнозуванні сонячної активності. На той час в структурі обсерваторії було п'ять сонячних відділів: фізики Сонця (завідувач відділу Яковкін М. А.), сонячної активності (Полупан П. М.), фізики спалахів (Курочка Л. М.), довгострокових прогнозів сонячної активності (Романчук П. Р.) і короткострокових прогнозів хромосферних спалахів (Тельнюк-Адамчук В. В.). На основі проведених досліджень було розроблено низку прогностичних методів, які використовувалися в оперативному прогнозуванні різних індексів сонячної активності для потреб фундаментальної науки та різних галузей народного господарства, в першу чергу, для космічної галузі.

В рамках Геліогеофізичної служби СРСР, в завдання якої входило забезпечення радіаційної безпеки польотів пілотованих космічних кораблів, в АО КДУ в 1974 р. було створено робочу групу з прогнозування сонячної активності, яка здійснювала оперативне прогнозування різних індексів сонячної активності на основі розроблених в обсерваторії методів (голова групи – Романчук П. Р., заступник голови – Криводубський В. Н., секретар – Земанек Є. М.). Науковцями відділів довгострокових прогнозів сонячної активності і короткострокових прогнозів спалахів було розроблено більше десяти наукових методів прогнозування актуальних індексів активності: чисел Вольфа (відносних чисел сонячних плям), сонячних спалахів, розвитку активних центрів на сонячному диску і тривалості існування груп плям (див. далі).

В 1975 р. на засіданні Бюро Ради "Сонячно-атмосферні зв'язки в прогнозах клімату" Астрономічну обсерваторію Київського університету було визнано головною установою по прогнозуванню сонячної активності в системі Ради, а Романчука П. Р. включено до складу Ради. В 1976 р. в Астрономічній обсерваторії відбулася радянсько-американська нарада з питань прогнозування сонячної активності, фізичних механізмів зв'язків сонячна активність – нижня атмосфера, обміну й використання сонячної і геофізичної інформації.

Довгострокові прогнози чисел Вольфа. З 1968 р. в АО КДУ (коли Романчук П. Р. керував тут невеликою науково-дослідною групою прогнозистів) розпочалося прогнозування одного з основних індексів сонячної активності – чисел Вольфа на різні часові проміжки і з різною завбачливістю (півмісяця і півроку).

Оперативне прогнозування розвитку декадного числа Вольфа. Метод базується на прогнозі тривалості існування і розвитку впродовж декади груп сонячних плям, спостережених на диску Сонця в день прогнозування, а