

УДК 523.62-726

ПОИСКИ ИСТОЧНИКОВ СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В СОБЫТИЯХ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

© 2023 г. Г. А. Базилевская¹, Е. И. Дайбог^{2, *}, Ю. И. Логачев²

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

“Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук”, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”,

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Москва, Россия

*E-mail: daibog@srd.sinp.msu.ru

Поступила в редакцию 25.12.2022 г.

После доработки 12.02.2023 г.

Принята к публикации 29.03.2023 г.

Некоторые слабые солнечные протонные события, регистрируемые земным наблюдателем, в которых наблюдались протоны с энергией $E \geq 10$ МэВ, являются частицами, ускоренными ударной волной в межпланетном пространстве. Им можно сопоставить вспышку и корональный выброс массы за десятки часов до наблюдаемого возрастания потоков протонов, которые обеспечивают инжекцию частиц в процесс их последующего ускорения в межпланетном пространстве.

DOI: 10.31857/S0367676523701764, EDN: ORZTRP

ВВЕДЕНИЕ

Солнечное протонное событие (СПС) — явление в межпланетной среде потоков солнечных космических лучей (СКЛ) в результате взрывного энерговыделения на Солнце. Одна из главных задач изучения СПС — определение источника, т.е. явления, в котором были генерированы частицы высоких энергий. Главными факторами, инициирующими СПС, являются солнечная вспышка и корональный выброс массы (КВМ), вклад которых в ускорение заряженных частиц до сих пор остается дискуссионным [1–3]. Солнечная вспышка и КВМ — отдельные явления, не зависящие друг от друга. Далеко не все КВМ связаны с вспышками, и большинство вспышек не сопровождается КВМ [4]. Однако в солнечных событиях с большим энерговыделением, к которым относятся мощные события с генерацией СКЛ, практически всегда присутствуют и вспышка, и КВМ, а также интенсивные электромагнитные излучения в радио, рентгеновском и гамма-диапазонах [5–9]. Согласно Каталогам [10, 11], не удастся однозначно найти определенный источник частиц для $\sim 35\%$ солнечных протонных событий с $(J \geq 10 \text{ МэВ}) \geq \sim 1\text{--}3 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ (pfu). Большинство этих событий — слабые. Рассмотрение таких событий необходимо для создания целостной картины генерации и поведения потоков космических лучей в гелиосфере, что послужило мотивацией для данной работы.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПОТОКИ СКЛ, НАБЛЮДАЕМЫЕ В МЕЖПЛАНЕТНОЙ СРЕДЕ

Рассмотрение временных профилей СКЛ, приходящих на орбиту Земли, позволяет выделить события с гладким временным ходом, предполагающим ускорение частиц на Солнце и последующее распространение в межпланетном пространстве (МП). Однако во многих случаях временной профиль потоков СКЛ с энергиями $< \sim 30$ МэВ указывает на наличие дополнительных частиц, причем максимум этих потоков достигается в момент SC (sudden commencement) — внезапного начала геомагнитной бури, которое как правило ассоциируется с приходом к Земле ударной волны [12]. Совпадение времени максимума потока частиц с прохождением фронта волны свидетельствует о локальном источнике ускорения. Частицы, ускоренные ударной волной в МП, получили название “энергичные штормовые частицы” (англ. energetic storm particles, ESP). Ранее было неоднократно показано, что ударная волна, ускоряющая частицы в МП, связана с КВМ, сопровождающим вспышку [13–16].

ИЗОЛИРОВАННЫЕ ESP СОБЫТИЯ

В большинстве случаев ESP наблюдаются на фоне частиц, ускоренных на Солнце, но иногда они наблюдаются и как изолированные события, в которых трудно заметить вклад частиц, уско-

ренных на Солнце. Временные профили таких событий коррелируют с межпланетными параметрами — индукцией межпланетного магнитного поля (ММП), B , и скоростью солнечного ветра, V . Такие СПС как правило сопровождаются геомагнитными бурями. Мы предполагаем, что в некоторых СПС, наблюдаемых как изолированные события в потоках протонов с $E \geq 10$ МэВ, основным источником частиц является ускорение не на Солнце, а в МП. В настоящей работе мы сделали попытку найти источник таких событий.

Мы рассматривали временные профили потоков СКЛ на орбите Земли по данным Каталогов СПС за 23 и 24 циклы солнечной активности [10, 11], где собраны данные об СПС, в которых потоки протонов в максимуме события $J(\geq 10$ МэВ) были выше 1 pfu. и солнечные источники которых не удалось отождествить с хорошей надежностью. Нами изучались СПС, которые развивались на фоне сильных изменений параметров МП, а также индекса геомагнитной возмущенности Dst [17]. Практически во всех этих событиях максимум интенсивности частиц достигался одновременно с внезапным началом геомагнитной бури SC [18]. Мы попытались найти для этих событий КВМ, который мог инициировать ударную волну — источник ESP [19]. Главная неопределенность при этом связана с плохой точностью оценки времени распространения КВМ от Солнца до земного наблюдателя. В МП КВМ могут двигаться с ускорением или замедлением, подвергаться влиянию солнечного ветра и структур ММП [4, 20]. Дополнительная неопределенность связана с тем, что КВМ наблюдаются в картинной плоскости. Поэтому точность определения времени прихода КВМ на орбиту Земли разными исследователями оценивается с большим разбросом, максимальная ошибка — 17.7 ± 0.85 ч [21]. Мы рассматривали все КВМ по данным [19] за 6 дней до изучаемого события СКЛ и оценивали время их распространения до орбиты Земли; отбирали КВМ, пришедшие к наблюдателю в разумных пределах от времени максимума события и подбирали подходящую ударную волну в базе данных [22].

Среди КВМ, предположительно пришедших на орбиту Земли во время СПС, выбирался наиболее быстрый и с большим угловым размером, сопровождавший данную вспышку, т.е. находился комплекс событий, отвечающий требованиям к источникам СПС, сформулированным в [10, 11].

Рассмотрим пример такого события 26 июня 1999 г. Солнечные частицы пришли в начале 26 июня, и согласно Каталогу [10], предполагаемым источником была вспышка C4.1, N29W13 24 июня, в 1204 UT. Запаздывание прихода частиц от западной вспышки более 36 ч делают этот источник маловероятным. Событие сопровождалось двумя внезапными началами геомагнитной бури (SC) 26 июня в 0325 UT и в 1616 UT, которые ассоциируются с приходом ударных волн к Зем-

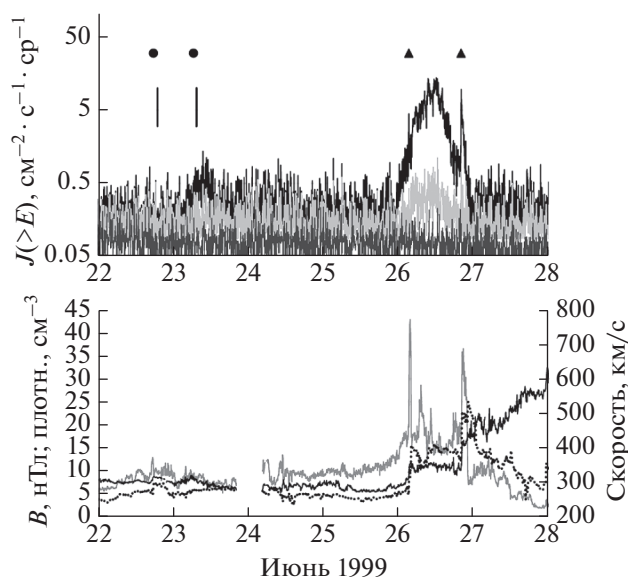


Рис. 1. Временной ход параметров в протонном событии 26 июня 1999 г. Верхняя панель: вспышки (кружочки), КВМ (вертикальные отрезки), SC (треугольники), потоки протонов — с энергией (сверху вниз) $E > 5, 10$ и 30 МэВ соответственно. Нижняя панель: индукция ММП (пунктир), скорость солнечного ветра V (черная линия), плотность межпланетной плазмы (серая линия).

ле, в том числе и к точке либрации L1, где проводилась регистрация потоков частиц, 26 июня в 0235 UT и 1926 UT.

Среди КВМ, указанных в [19], мы отобрали те, которые предположительно могли прийти к Земле в пределах ± 24 ч относительно зарегистрированных моментов SC. Среди 9 отобранных КВМ оказалось 2 выдающихся: 22 июня — типа гало в 1854 UT, скорость $V = 1133$ км/с, и 23 июня, типа гало 0731 UT, $V = 1006$ км/с. Оба КВМ наблюдались на фоне восточных вспышек: 22 июня в 1737 UT, M1.7, N22E37 и 23 июня в 0649 UT, M1.7, N23E42 [23]. Обе вспышки сопровождались радиоизлучением II типа. На верхней панели рис. 1 мы видим 2 вспышки (кружочки), соответствующие КВМ (вертикальные отрезки), SC (треугольники) и потоки частиц с энергиями $E > 5, > 10$ и > 30 МэВ [24]. Можно заметить, что восточные вспышки произвели слабое возрастание потоков протонов с $E > 5$ МэВ и > 10 МэВ 23 июня, которые дошли до Земли настолько ослабленными, что практически не отличались от фона. Моменты SC подтверждаются приходом к Земле межпланетных ударных волн, которые видны на нижней панели рис. 1 как скачки B , V и плотности межпланетной плазмы [17]. Потоки протонов распространялись в МП между двумя фронтами ударных волн, причем в окрестности второй из них наблюдались дополнительно ускоренные частицы — пик во время второго SC. Время распространения КВМ до орбиты Земли составляло ~ 80 и 85 ч.

Подобные события, по нашим оценкам, могут составлять ~7% всех солнечных протонных событий, включенных в каталоги [10, 11]. Следует отметить, что в диапазоне протонов <1 МэВ изолированные ESP события наблюдаются довольно часто [25–27].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, некоторые слабые солнечные протонные события, регистрируемые земным наблюдателем, в которых интенсивность протонов с $E > 10$ МэВ была порядка $1 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$, являются энергичными штормовыми частицами (ESP), ускоренными ударной волной в межпланетном пространстве. Соответствующие вспышка и КВМ произошли за десятки часов до наблюдаемого СПС, но потоки связанных с ними частиц были слишком слабы и не регистрировались на Земле как СПС.

Мы благодарим всех исследователей, представляющих через Интернет свои данные о СКЛ (<https://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/avg/1999/06/goes08/csv/>), вспышках (<https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-flares/x-rays/goes/xrs/>); КВМ (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/) и параметрах межпланетной среды (https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/omni_min.html; <https://www.obsebre.es/en/rapid#ssc>; <http://ipshocks.fi/database/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dierckx M., Tziotziou K., Dalla S. et al.* // *Sol. Phys.* 2015. V. 290. No. 3. P. 841.
2. *Белов А.В.* // *Геомагн. и аэроном.* 2017. Т. 57. № 6. С. 783; *Belov A.V.* // *Geomagn. Aeron.* 2017. V. 57. No. 6. P. 727.
3. *Reames D.V.* *Solar energetic particles. A modern primer on understanding sources, acceleration and propagation.* Springer Int. Publ., 2021. 202 p.
4. *Webb D.F., Howard T.A.* // *Living Rev. Solar Phys.* 2012. V. 9. No. 3. Art. Irs-2012-3.
5. *Вашенюк Э.В., Балабин Ю.В., Германенко А.В., Гвоздевский Б.Б.* // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2009. Т. 73. № 3. С. 318; *Vashenyuk E.V., Balabin Yu.V., Germanenko A.V., Gvozdevsky B.B.* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2009. V. 73. No. 3. P. 301.
6. *Белов А.В., Ерошенко Е.А., Крякунова О.Н. и др.* // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2015. Т. 79. № 5. С. 615; *Belov A.V., Eroshenko E.A., Kryakunova O.N. et al.* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2015. V. 79. No. 5. P. 561.
7. *Базилевская Г.А., Логачёв Ю.И., Вашенюк Э.В. и др.* // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2015. Т. 79. № 5. С. 629; *Bazilevskaya G.A., Logachev Yu I., Vashenyuk E.V. et al.* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2015. V. 79. No. 5. P. 627.
8. *Базилевская Г.А., Дайбог Е.И., Логачев Ю.И. и др.* // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2021. Т. 85. № 8. С. 1128; *Bazilevskaya G.A., Daibog E.I., Logachev Yu I. et al.* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2021. V. 85. No. 8. P. 911.
9. *Струминский А.Б., Садовский А.М., Григорьева И.Ю., Логачев Ю.И.* // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2021. Т. 85. № 8. С. 1180; *Struminsky A.B., Sadovskii A.M., Grigorieva I.Y., Logachev Y.I.* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2021. V. 85. No. 8. P. 907.
10. *Логачёв Ю.И., Базилевская Г.А., Вашенюк Э.В. и др.* *Каталог солнечных протонных событий 23-го цикла солнечной активности (1996–2008 гг.).* Москва, 2016.
11. *Логачёв Ю.И., Базилевская Г.А., Вашенюк Э.В. и др.* *Каталог солнечных протонных событий 24-го цикла солнечной активности (2009–2019 гг.).* Москва: Мировой центр данных по солнечно-земной физике, 2022. 970 с.
12. *Bryant D.A., Cline T., Desai U.D., McDonald F.B.* // *J. Geophys. Res.* 1962. V. 67. No. 13. P. 4983.
13. *Gopalswamy N., Yashiro S., Lara A. et al.* // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30. No. 12. Art. No. SEP 3.
14. *Yashiro S., Gopalswamy N., Akiyama S. et al.* // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. Art. No. A12S05.
15. *Lee M.A., Mewaldt R.A., Giacalone J.* // *Space Sci. Rev.* 2012. V. 173. P. 247.
16. *Battarbee M., Guo J., Dalla S. et al.* // *Astron. Astrophys.* 2018. V. 612. Art. No. A116.
17. https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/omni_min.html.
18. <https://www.obsebre.es/en/rapid#ssc>.
19. https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list.
20. *Gopalswamy N., Lara A., Lepping R.P. et al.* // *Geophys. Res. Lett.* 2000. V. 27. No. 2. P. 145.
21. *Vourlidis A., Patsourakos S., Savani N.P.* // *Phil. Trans. Royal Soc. A.* 2019. V. 377. No. 2148. Art. No. 20180096.
22. <http://ipshocks.fi/database>.
23. <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-flares/x-rays/goes/xrs>.
24. <https://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/avg/1999/06/goes08/csv>.
25. *Mäkelä P., Gopalswamy N., Akiyama S. et al.* // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. No. A8. Art. No. A08101.
26. *Cohen C.M.S., Christian E.R., Cummings A.C. et al.* // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 2020. V. 246. No. 2. Art. No. 20.
27. *Chiappetta F., Laurenza M.L., Lepreti F.L., Consolini G.* // *Astrophys. J.* 2021. V. 915. No. 1. Art. No. 8.

Search for sources of solar cosmic rays in weak events

G. A. Bazilevskaya^a, E. I. Daibog^{b, *}, Yu. I. Logachev^b

^a*Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia*

^b*Lomonosov Moscow State University, Skobel'syn Institute of Nuclear Physics, Moscow, 119991 Russia*

*e-mail: daibog@srd.sinp.msu.ru

Some of the weak solar proton events recorded by the Earth observer, in which protons with energy $E > 10$ MeV were observed, are really particles accelerated by a shock wave in interplanetary space. They can be associated with a flare and a coronal mass ejection ten of hours before the observed proton event, which ensure the injection of particles into the process of their subsequent acceleration in interplanetary space.