

## УСЛОВИЯ ПРИХОДА СОЛНЕЧНЫХ ЭНЕРГИЧНЫХ ПРОТОНОВ НА ЗЕМЛЮ ПОСЛЕ МОЩНЫХ ВСПЫШЕК НА СОЛНЦЕ

### CONDITIONS FOR ARRIVAL OF SOLAR ENERGETIC PROTONS IN EARTH AFTER STRONG SOLAR FLARES

†Г.Н. Кичигин

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия*

М.В. Кравцова 

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, rina@iszf.irk.ru*

В.Е. Сдобнов

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, sdobnov@iszf.irk.ru*

†G.N. Kichigin

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia*

M.V. Kravtsova

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, rina@iszf.irk.ru*

V.E. Sdobnov

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, sdobnov@iszf.irk.ru*

**Аннотация.** Проведен анализ процесса переноса от Солнца до Земли энергичных протонов, ускоренных в солнечных вспышках. Используется модель, в которой предполагается, что протоны движутся к Земле в электромагнитном поле паркеровского представления. В рамках этой модели показано, что регистрация протонов на Земле происходит в том случае, когда протоны, движущиеся от вспышечной области Солнца, попадают в окрестность гелиосферного токового слоя, а Земля находится от нейтральной линии токового слоя на расстоянии, меньшем ларморовского радиуса протонов. Представлен анализ экспериментальных данных о солнечных вспышках в августе–сентябре 2011 г., из которого следует, что отсутствие регистрации энергичных протонов в окрестности Земли для некоторых мощных солнечных вспышек находит объяснение в рамках предложенной модели.

**Ключевые слова:** солнечная вспышка, солнечные протонные события, наземные возрастания интенсивности космических лучей.

**Abstract.** We analyze the Sun-to-Earth transport of energetic protons accelerated in solar flares. We use a model which assumes that protons move earthward in the Parker electromagnetic field. In this model, protons are shown to be recorded on Earth when they, moving away from the solar flare region, reach the vicinity of the heliospheric current sheet, while Earth is at a distance smaller than the proton Larmor radius from the current sheet neutral line. We present the analysis of experimental data on solar flares in August–September 2011. This analysis shows that the absence of energetic protons recording in the vicinity of Earth for some major solar flares can be explained by the proposed model.

**Keywords:** solar flares, solar proton events, ground level enhancements.

## ВВЕДЕНИЕ

Солнечные энергичные протоны (СЭП) — это ускоренные на Солнце во время вспышек и затем убегающие в межпланетное пространство частицы, энергия которых заключена в интервале от нескольких десятков килоэлектронвольт до десятков и сотен мегаэлектронвольт, а иногда и выше. Изучение СЭП чрезвычайно важно — попадающие на Землю СЭП влияют на околоземную среду и земную атмосферу, поскольку солнечные протоны, проникая в атмосферу Земли на высоких широтах, вызывают ионизацию атмосферы и изменение ее химического состава. В настоящее время общепринято [Reames, 1999, 2013; Desai, Giacalone, 2016; Лазутин, 2020], что СЭП, регистрируемые в околоземном пространстве после мощных вспышек на Солнце, подразделяются на две категории: 1) протоны, ускоренные в са-

мой солнечной вспышке; 2) протоны, ускоренные во фронте ударных волн в нижней короне Солнца, обусловленных выбросами корональной массы вещества (КВМ) [Ellison, Ramaty, 1985; Reames, 1999, 2013]. Процессы, в которых образуются протоны первой категории, называют импульсными, второй — постепенными [Reames, 1999; Desai, Giacalone, 2016; Лазутин, 2020]. Количество постепенных событий значительно превосходит число импульсных событий, по энергетике также доминируют постепенные события. Этот факт подтверждается зависимостью долгого распределения числа импульсных и постепенных событий, как показано на рис. 2.3 в [Reames, 1999]. КВМ, как правило, сопровождают мощные вспышечные процессы на Солнце и ярко проявляются в межпланетном и околоземном космическом пространстве [Richardson et al., 2007; Echer et al., 2008; Richardson, 2014].

Протоны, ускоренные непосредственно во вспышках, вызывают небольшое количество наземных возрастаний СЭП и только в тех случаях, когда вспышка произошла на сопряженных с Землей силовых линиях межпланетного магнитного поля (ММП). Большая же часть наземных возрастаний СЭП вызвана протонами, ускоренными ударной волной, возбужденной КВМ в солнечной короне, причем в этом случае эффективность ускорения, энергия и интенсивность потоков протонов тем выше, чем ближе родительская вспышка к магнитосопряженной точке и чем выше балл вспышки [Ellison, Ramaty, 1985; Reames, 1999, 2013; Лазутин, 2020].

Чтобы объяснить факт появления СЭП в окрестности Земли, необходимо рассмотреть следующие вопросы: 1) как и каким механизмом ускоряются частицы на Солнце; 2) каким образом СЭП, покидая Солнце, попадают в окрестность Земли. В настоящей работе мы акцентируем внимание на процессе переноса СЭП от Солнца до орбиты Земли. До последнего времени такой перенос анализировали в рамках двух подходов к распространению частиц в гелиосфере. В одном из них предполагается, что движение СЭП контролируется их диффузией и конвекцией в плазме гелиосферы. В другом подходе считается, что СЭП движутся в поле Паркера, т. е. в регулярном электромагнитном поле гелиосферы, магнитную компоненту которого обычно называют ММП. В настоящее время большинство исследователей склоняются к тому, что перенос СЭП от Солнца до Земли осуществляется в рамках второго подхода. Мы будем использовать результаты нашей статьи [Kichigin et al., 2019], в которой в рамках второго подхода представлены результаты численных расчетов траекторий протонов, движущихся от Солнца до орбиты Земли.

### КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИСПОЛЬЗУЕМОЙ МОДЕЛИ

В модели [Kichigin et al., 2019] траектория протонов, испускаемых из некоторой точки на поверхности Солнца, находится из численных расчетов уравнения движения ионов в гелиосферном поле Паркера. В модели предполагается, что СЭП движутся в гелиосфере без столкновений. Движение протонов рассматривается с использованием следующих предположений:

- протоны начинают движение в некоторой магнитной трубке, причем их энергия такова, что ларморовский радиус частиц меньше или сравним с радиусом трубки;
- движение протонов в магнитной трубке можно рассматривать в дрейфовом приближении, следовательно, у частиц при этом сохраняется магнитный момент;
- от радиуса Солнца  $R_{\odot}$  до  $20R_{\odot}$  магнитное поле в трубке считается почти радиальным, причем его величина уменьшается с расстоянием  $r$  согласно соотношению  $H = H_{\odot}R_{\odot}^2/r^2$ , где  $H_{\odot}$  — магнитное поле на поверхности Солнца;
- вследствие уменьшения поля и сохранения магнитного момента на расстоянии более  $20R_{\odot}$  от Солнца

протоны в магнитной трубке движутся практически радиально;

- вне сферы радиуса  $R_0 = 20R_{\odot}$  протоны находятся в поле Паркера.

Согласно модели Паркера [Parker, 1958], в сферической системе координат  $r, \theta, \varphi$  на больших расстояниях от Солнца  $r \gg R_{\odot}$  магнитное поле описывается формулами

$$H_R(r, \theta) = \text{sign}(\pi/2 - \theta) H_{\odot} R_{\odot}^2 / r^2, \quad (1)$$

$$H_{\varphi}(r, \theta) = -H_{\odot} \Omega \sin[\text{sign}(\pi/2 - \theta)\theta] R_{\odot}^2 / (ur). \quad (2)$$

В этих формулах  $\Omega$  — угловая скорость вращения Солнца;  $u$  — скорость солнечного ветра. Соотношения (1), (2) представляют магнитное поле в случае, когда оно имеет положительную полярность (направлено от Солнца) в северном полушарии. В этом случае направления векторов механического и магнитного дипольного моментов Солнца совпадают. Когда направление магнитного дипольного момента Солнца меняется на обратное, поле в северном полушарии считается отрицательным.

Далее приводятся основные выводы, следующие из решения задачи о движении СЭП в поле Паркера гелиосферы и приведенные в работе [Kichigin et al., 2019].

1. Вместе с движением вдоль магнитных силовых линий ММП протоны смещаются в направлении против вектора электрического поля гелиосферы вследствие дрейфа в ММП. Эффект такого смещения заряженных частиц был отмечен еще в 80-х гг. прошлого века в работе [Bazilevskaya et al., 1981].

2. Дрейф приводит к тому, что СЭП в окрестности Земли могут наблюдаться только в случае, когда протоны эжектируются из вспышек, расположенных в северном (южном) полушарии Солнца, при условии, что проекция ММП на это полушарие имеет положительную (отрицательную) полярность. Влияние дрейфа наглядно видно на рис. 1 из нашей работы [Kichigin et al., 2019], на котором для двух противоположных полярностей ММП на северном полушарии Солнца приведены траектории протонов с энергией 10 ГэВ.

В реальной ситуации, как это обычно бывает по разным причинам, необходимо допустить некоторые отклонения СЭП от расчетной траектории. Из наблюдательных данных [Reames, 1999; Desai, Giacalone, 2016; Лазутин, 2020] следует, что долготные углы, в пределах которых СЭП, эжектированные непосредственно из области вспышек и попадающие в окрестность Земли, имеют хотя и малый, но конечный интервал  $\approx 30^\circ$ . Одна из возможных причин — тот факт, что глобальное магнитное поле формируется далеко от поверхности Солнца [Schatten et al., 1969; <http://wso.stanford.edu/synsourcel.html>]. Поэтому существует большая вероятность небольшого рассеяния СЭП на отрезке их траектории из области вспышки до силовых линий глобального магнитного поля, сформированных на некотором расстоянии  $R^*$  от Солнца ( $R^* > 2R_{\odot}$ ). На части траектории от поверхности Солнца до радиуса  $R^*$  к рассеянию заряженных частиц могут приводить и кулоновские столкновения, и нерегулярные магнитные поля, и неод-

нородности корональной плазмы, и т. п. Еще одна из причин — конечный ларморовский радиус СЭП на траектории к Земле. Как следует из нашей модели [Kichigin et al., 2019], протоны попадают на Землю, двигаясь по нижней траектории, показанной на рис. 1. Следовательно, регистрация протонов на Земле происходит в том случае, когда протоны, движущиеся от вспышечной области Солнца, попадают в окрестность гелиосферного токового слоя, а Земля находится от нейтральной линии токового слоя на расстоянии, меньшем ларморовского радиуса протонов. Поэтому можно считать, что линии теоретических траекторий протонов — это средние значения координат частиц, движущихся к Земле, т. е. на самом деле СЭП могут находиться в окрестности координат расчетных линий на расстоянии  $\sim 1R_{\odot}$ . Учитывая этот факт, а также предполагая, что есть какие-то отклонения реального глобального поля Солнца от теоретических значений, будем полагать, что рассеяние реальных траекторий СЭП около расчетных значений может быть  $\sim 1R_{\odot}$ . Учитывая рассеяние протонов около расчетных траекторий, необходимо признать, что предлагаемая нами модель описывает некоторую усредненную по ларморовскому радиусу картину процесса переноса СЭП от Солнца до Земли.

## ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ

Для проверки нашей модели мы проанализировали вспышечные события на фазе роста 24-го цикла солнечной активности в августе–сентябре 2011 г. Мы использовали следующие характеристики: изображение ММП на поверхности Солнца [<http://wso.stanford.edu/synsourcel.html>], наличие или отсутствие СЭП в окрестности Земли, а также местоположение, балл вспышки и данные о наличии

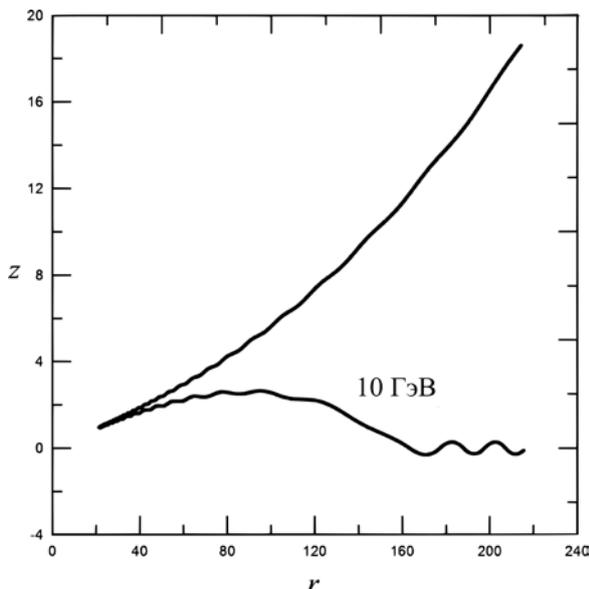


Рис. 1. Траектории протонов с энергией 10 ГэВ для положительной (нижняя кривая) и отрицательной (верхняя кривая) полярности магнитного поля в северном полушарии Солнца, эжектированных из сферы радиуса  $R_0 = 21.4R_{\odot}$  с начальным расстоянием от оси  $z = 0.999R_{\odot}$  (широтный угол  $\theta = 2.5^\circ$ ). Расстояния по осям отложены в радиусах Солнца. Обе кривые обрываются на расстоянии от Солнца, равном радиусу орбиты Земли  $R_E = 214R_{\odot}$

или отсутствии КВМ для каждой конкретной вспышки [[https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/sepe](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/sepe)].

Отбор вспышечных событий проводился с обязательным выполнением трех главных условий: 1) рентгеновский балл вспышки должен быть больше M1; 2) местоположение вспышки должно быть западнее  $W30^\circ$  на видимом диске Солнца; 3) исключение из рассмотрения вспышек, которые сопровождались КВМ типа гало.

Некоторые характеристики этих событий приведены в таблице [Logachev et al., 2019].

Таким образом, нас интересовали мощные вспышки, положение которых на поверхности Солнца соответствовало области, в которой находились сопряженные с Землей силовые линии ММП. Из 12 вспышек, выбранных нами, больше половины (8 случаев) не сопровождались КВМ. События, вызываемые такими вспышками, согласно терминологии [Reames, 1999; Desai, Giacalone, 2016; Лазутин, 2020] можно отнести к категории импульсных. Отметим, что по определению в таких событиях СЭП генерируются непосредственно в месте расположения самой вспышки.

Естественно было ожидать, что те четыре вспышки, которые сопровождались КВМ, вызовут возрастание потоков СЭП на Земле, поскольку хорошо известно [Reames, 2013; Бережко, Крымский, 1988; Berezhko et al., 1997; Reames, 1995; Ng et al., 2003], что ударные волны, возбуждаемые КВМ, как правило, приводят к ускорению частиц, которые, попадая на Землю, вызывают такое возрастание. Однако в нашем случае эти КВМ были узконаправленными и распространялись в сторону от Земли, поэтому поток СЭП от них понизился до уровня галактического фона и возрастание потоков СЭП около Земли не было зарегистрировано.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

На рис. 2 изображена карта коронального магнитного поля Солнца, на которой отмечены координаты отобранных нами мощных вспышек. Оно рассчитано по наблюдениям фотосферного поля с помощью модели потенциального поля [<http://wso.stanford.edu/synsourcel.html>]. Предполагается, что поле в фотосфере радиальное, а положение поверхности источника находится на расстоянии  $3.25R_{\odot}$ .

Из таблицы и рис. 2 видно, что все отобранные нами вспышки расположены на Солнце в области, где начинаются сопряженные с Землей силовые линии ММП. Девять вспышек располагались в северном полушарии Солнца в области отрицательной полярности ММП, а три вспышки наблюдались в южном полушарии с положительной полярностью.

Согласно рис. 1, показывающему траектории протонов, рассчитанные в рамках нашей модели, для вспышек в северном полушарии все протоны, ускоренные и эжектированные из области вспышки, будут двигаться по верхней траектории, т. е. будут удаляться от экваториальной плоскости и потому не попадут в окрестность Земли, что и подтверждается отсутствием в этом случае возрастаний интенсивности СЭП на Земле. СЭП, ускоренные во вспышках

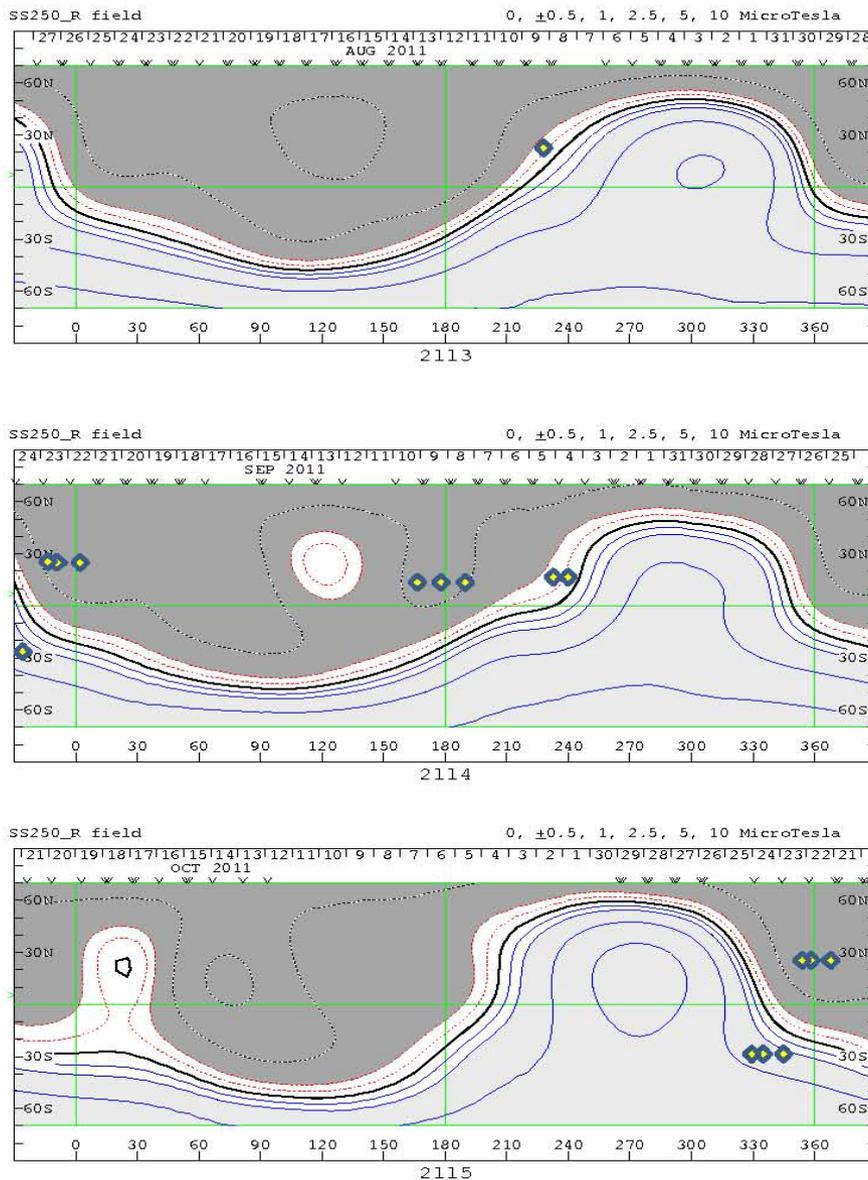


Рис. 2. Карта коронального магнитного поля Солнца [<http://wso.stanford.edu/synsourcel.html>]. Синие изолинии и светлое затенение — области с положительной полярностью, черный — нейтральная линия. Ромбами показаны координаты вспышек, мощность которых была не меньше класса M1 и которые располагались на долготах, откуда исходят сопряженные с Землей силовые линии ММП

Солнечные события в августе–сентябре 2011 г.

№	Дата	Координаты	Xray/opt	Активная область	KBM $t_0 / v / T / p_a$
1	09. 08.2011	N18W68	M2.5/1B	11263	0348/1146/141/272
2	04. 09.2011	N18W84	M3.2/SF	11286	—
3	05. 09.2011	N18W87	M1.6/SF	11286	—
4	08. 09.2011	N14W40	M6.7/1N	11283	1636/0214/037/311
5	09. 09.2011	N13W52	M1.2/1F	11283	—
6	10. 09.2011	N12W61	M1.1/SN	11283	0848/0610/169/257
7	22. 09.2011	N24W55	M1.04	—	—
8	23. 09.2011	N25W63	M1.6/1N	11295	—
9	23. 09.2011	N23W73	M1.6/SF	11295	2348/0337/021/326
10	24. 09.2011	S29W67	M1.2/SF	11303	—
11	25. 09.2011	S28W71	M1.5	11303	—
12	25. 09.2011	S28W75	M2.2/SF	11303	—

Xray/opt — рентгеновский класс и оптическая значимость вспышечного события.

KBM — корональный выброс массы:  $t_0$  — первое появление C2;  $v$  — линейная скорость, [км/с];  $T$  — тип: гало или частичный гало (гало соответствует 360°);  $p_a$  — позиционный угол, измеренный от северного полюса Солнца в градусах (против часовой стрелки)

южного полушария, согласно нашей модели, также будут удаляться от экваториальной плоскости и также не будут регистрироваться около Земли.

Основной вывод работы можно сформулировать следующим образом: для всех наблюдаемых в рентгеновском диапазоне мощных солнечных вспышек на Солнце отсутствие в окрестности Земли ускоренных во вспышках энергичных протонов адекватно объясняется в рамках предложенной нами [Kichigin et al., 2019] модели распространения СЭП в гелиосфере.

Мы посвящаем эту статью памяти д.ф.-м.н. Г.Н. Кичигина (1939–2021 гг.). Это последнее научное исследование нашего выдающегося теоретика.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бережко Е.Г., Крымский Г.Ф. Ускорение космических лучей ударными волнами. *УФН*. 1988. Т. 154. С. 49–91.
- Лазутин Л.Л. Возрастания энергичных протонов СКЛ на земле и их связь с источниками на Солнце. *Солнечно-земная физика*. 2020. Т. 6, № 4. P. 46–50. DOI: [10.12737/szf-64202006](https://doi.org/10.12737/szf-64202006).
- Bazilevskaya G.A., Krainev M.B., Machmutov V.S. The effects of the drift in the regular interplanetary magnetic field on the parameters of the solar cosmic rays. *Proc. 17<sup>th</sup> International Cosmic Rays Conference*, Paris, France. 1981. Vol. 3. P. 393–396.
- Berezhko E.G., Petukhov S.I., Taneev S.N. Particle acceleration by interplanetary shocks. *Proc. 25<sup>th</sup> International Cosmic Rays Conference*. Durban, South Africa. 1997. Vol. 1. P. 257–260.
- Desai M., Giacalone J. Large gradual solar energetic particle events. *Living Rev. Solar Phys.* 2016. Vol. 13, no. 3. DOI: [10.1007/s41116-016-0002-5](https://doi.org/10.1007/s41116-016-0002-5).
- Echer E., Gonzalez W.D., Tsurutani B.T., Gonzalez A.L.C. Interplanetary conditions causing intense geomagnetic storms ( $Dst \leq -100$  nT) during solar cycle 23 (1996–2006). *J. Geophys. Res.* 2008. Vol. 113. A05221. DOI: [10.1029/2007JA012744](https://doi.org/10.1029/2007JA012744).
- Ellison D.C., Ramaty R. Shock acceleration of electrons and ions in solar flares. *Astrophys. J.* 1985. Vol. 298. P. 400–408.
- Kichigin G.N., Kravtsova M.V., Sdobnov V.E. Global solar magnetic field and cosmic ray ground level enhancement. *Solar Phys.* 2019. Vol. 294. P. 116. DOI: [10.1007/s11207-019-1516-5](https://doi.org/10.1007/s11207-019-1516-5).
- Logachev Yu.I., Bazilevskaya G.A., Daibog E.I., et al. List of Solar Proton Events in the 24 Cycle of Solar Activity (2009–2019). *Geophys. Center RAS*. Moscow, Russia, 2019. DOI: [10.2205/ESDB-SAD-P-007](https://doi.org/10.2205/ESDB-SAD-P-007).
- Ng C.K., Reames D.V., Tylka A.J. Modeling shock-accelerated solar energetic particles coupled to interplanetary Alfvén waves. *Astrophys. J.* 2003. Vol. 591. P. 461–485. DOI: [10.1086/375293](https://doi.org/10.1086/375293).
- Parker E.N. Dynamics of the interplanetary gas and magnetic fields. *Astrophys. J.* 1958. Vol. 128. P. 664. DOI: [10.1086/146579](https://doi.org/10.1086/146579).
- Reames D.V. What are the sources of solar energetic particles? *Rev. Geophys.* 1995. Vol. 33. P. 585. DOI: [10.1007/s11214-015-0210-7](https://doi.org/10.1007/s11214-015-0210-7).
- Reames D.V. Particle acceleration at the Sun and in the heliosphere. *Space Sci. Rev.* 1999. Vol. 90. P. 413–491. DOI: [10.1023/A:1005105831781](https://doi.org/10.1023/A:1005105831781).
- Reames D.V. The two sources of solar energetic particles. *Space Sci. Rev.* 2013. Vol. 175. iss. 1-4. P. 53–92. DOI: [10.1007/s11214-013-9958-9](https://doi.org/10.1007/s11214-013-9958-9).
- Richardson I.G. Identification of interplanetary coronal mass ejections at Ulysses using Multiple Solar Wind Signatures. *Solar Phys.* 2014. Vol. 289. P. 3843–3894. DOI: [10.1007/s11207-014-0540-8](https://doi.org/10.1007/s11207-014-0540-8).
- Richardson I.G., Webb D.F., Zhang J., et al. Correction to “Major geomagnetic storms ( $Dst \leq -100$  nT) generated by corotating interaction regions”. *J. Geophys. Res.* 2007. Vol. 112, iss. A12. DOI: [10.1029/2007JA012332](https://doi.org/10.1029/2007JA012332).
- Schatten K.H., Wilcox J.M., Ness N.F. A model of interplanetary and coronal magnetic fields. *Solar Phys.* 1969. Vol. 6, iss. 3. P. 442–455.  
URL: <http://wso.stanford.edu/synsourcel.html> (дата обращения 1 декабря 2021 г.).  
URL: [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/sepe](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/sepe) (дата обращения 1 декабря 2021 г.).
- Как цитировать эту статью:*  
Кичигин Г.Н., Кравцова М.В., Сдобнов В.Е. Условия прихода солнечных энергичных протонов на Землю после мощных вспышек на Солнце. *Солнечно-земная физика*. 2022. Т. 8, № 3. С. 24–28. DOI: [10.12737/szf-83202203](https://doi.org/10.12737/szf-83202203).