

## СВЯЗЬ МАГНИТНОГО ПОТОКА СОЛНЕЧНЫХ ЭРУПЦИЙ С ВЕЛИЧИНОЙ ПРОТОННЫХ ВОЗРАСТАНИЙ

<sup>1</sup>Л.А. Трефилова, <sup>1,2</sup>А.А. Абунин, <sup>1</sup>М.А. Абунина, <sup>1</sup>А.В. Белов, <sup>1</sup>С.П. Гайдаш, <sup>1</sup>И.И. Прямушкина

<sup>1</sup>Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Троицк, Москва, Россия  
trefilova@izmiran.ru

<sup>2</sup>Калмыцкий государственный университет им. Б.Б. Городовикова, Элиста, Россия

## RELATION BETWEEN MAGNETIC FLUX OF SOLAR ERUPTIONS AND PROTON ENHANCEMENTS

<sup>1</sup>L.A. Trefilova, <sup>1,2</sup>A.A. Abunin, <sup>1</sup>M.A. Abunina, <sup>1</sup>A.V. Belov, <sup>1</sup>S.P. Gaidash, <sup>1</sup>I.I. Pryamushkina

<sup>1</sup>Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, Troitsk, Moscow, Russia  
trefilova@izmiran.ru

<sup>2</sup>Gorodovikov Kalmyk State University, Elista, Russia

**Аннотация.** В последние годы было показано, что магнитный поток солнечных эрупций, рассчитанный по наблюдениям диммингов и постэруптивных аркад, тесно связан с величиной Форбуш-понижений и силой геомагнитных бурь, являющихся следствием этих эрупций. Поскольку в мощных спорадических событиях наблюдается комплекс взаимосвязанных явлений, включающий вместе с выбросами солнечного вещества эффективное ускорение, естественно ожидать связь магнитного потока эрупций и с величиной протонных возрастаний. В данной работе проверяется это предположение. Полный магнитный поток эрупций, а также его составные части, связанные с диммингами и аркадами сопоставляются с протонными событиями для энергий протонов >10 и >100 МэВ, наблюдавшимися на спутниках GOES, и наземными возрастаниями солнечных космических лучей.

**Ключевые слова:** протонные события, магнитный поток солнечных эрупций, димминги, аркады.

**Abstract.** In recent years, it has been shown that the magnetic flux of solar eruptions, calculated from observations of dimming and post-eruptive arcades, is closely related to the magnitude of Forbush decreases and the strength of geomagnetic storms that are a consequence of these eruptions. Since in powerful sporadic events there is a complex of interrelated phenomena, including, together with the emissions of solar matter, an effective acceleration, it is natural to expect a connection between the magnetic flux of eruptions and the magnitude of proton increases. This assumption is verified in the presented paper. The total magnetic flux of eruptions, as well as its constituent parts associated with dimming and arcades, are compared with proton events for proton energies >10 and >100 MeV observed on GOES SATELLITES and ground-based increases in solar cosmic rays.

**Keywords:** proton enhancements, magnetic flux of solar eruptions, dimming, arcades.

### ВВЕДЕНИЕ

Существует множество солнечных параметров, прямо или косвенно связанных с протонными возрастаниями [Дорман, Мирошниченко, 1968]. Протонные события чаще всего связывают с выбросами солнечного вещества (Coronal Mass Ejections — CMEs). В работе [Gosling, 1993], показано, что величина протонных возрастаний хорошо коррелирует со скоростью CME. Скорость CME, вероятно, непосредственно связана с процессом ускорения, однако у этого параметра есть существенный недостаток — он определяется сравнительно поздно, позже времени наиболее эффективного ускорения. Это ограничивает использование CME в прогнозировании протонных событий. В практическом прогнозировании чаще используются характеристики не CME, а вспышек, поскольку разнообразные вспышечные параметры доступны в числовом виде в реальном времени.

Можно вспомнить, что эрупции, т. е. процесс возникновения CME наблюдается одновременно со вспышками. В работе [Chertok et al., 2013] были предложены количественные характеристики эрупций, а именно эруптивный магнитный поток, изучена связь этого параметра с величиной соответствующих форбуш-эффектов и мощностью геомагнитных бурь и показана прогностическая ценность этих характеристик.

В данной работе проверяется предположение, что имеется связь характеристик эрупций с пара-

метрами протонных возрастаниями. Полный магнитный поток эрупций, а также его составные части, связанные с диммингами и постэруптивными аркадами сопоставляются с протонными событиями для энергий протонов >10 и >100 МэВ, наблюдавшимися на спутниках GOES, и наземными возрастаниями солнечных космических лучей.

Мы надеемся, что изучение связей солнечных параметров с протонными событиями, должно привести, в конечном итоге, к разработке методик прогнозирования протонных возрастаний и связь с эруптивными характеристиками станет частью этой методики.

### ДАнные

Для выявления связей между параметрами протонных возрастаний и характеристиками соответствующих солнечных эрупции использовался ряд баз данных, которые были созданы и поддерживаются в ИЗМИРАН. Информация о характеристиках протонных возрастаниях была взята из базы данных рентгеновских вспышек и протонных возрастаний [Белов, 2017], основанной на наблюдениях с космических аппаратов серии GOES (GOES 5–15, 1975 г. — настоящее время) [Garcia, 1994]. В данном анализе рассматривались протонные возрастания в двух интегральных каналах — P10 и P100 (максимальные потоки частиц с энергиями >10 и >100 МэВ соответственно). Для анализа отбирались только те протон-

ные возрастания, которые были надежно отождествлены со своим солнечным источником. Таким образом, всего из баз данных было выделено 793 события.

Информация о магнитных потоках солнечных эрупций получена из базы данных Форбуш-эффектов и межпланетных возмущений (FEID — database of Forbush-Effects and Interplanetary Disturbances) [Belov et al., 2017; Абуни и др., 2018]. На сайте Центра прогнозов космической погоды ИЗМИРАН [<http://spaceweather.izmiran.ru/rus/dbs.html>] выложена открытая версия каталога и базы данных FEID.

Одними из таких параметров являются магнитные потоки диммингов и постэруптивных аркад солнечных эрупций, которые были рассчитаны (к сожалению, только для небольшой части событий) в работах.

Димминги представляют собой крупномасштабные области пониженной яркости крайнего ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучения, возникающие в короне в результате коронального выброса (СМЕ) и имеющие время жизни несколько часов. Другими словами, димминги — это транзитные корональные дыры, которые располагаются рядом с центром солнечной эрупции [Chertok et al., 2013].

Что касается постэруптивных аркад, то они образуются в виде ярких петель на месте располагавшегося до эрупции магнитного жгута, выброшенного в виде коронального выброса массы [Chertok et al., 2013]. Постэруптивные аркады формируются на стадии, когда магнитное поле в обширной области короны, сильно возмущенное эрупцией СМЕ, релаксирует к новому квазиравновесному состоянию посредством магнитного пересоединения.

В работах [Chertok et al., 2013, 2017] представлена методика расчета значений магнитных потоков диммингов и постэруптивных аркад солнечных эрупций. Именно таким методом была получена информация о магнитных потоках, которая впоследствии была помещена в базу данных FEID.

Важно отметить, что магнитные потоки рассчитывались только для тех эрупций, которые распола-

гались в центральной зоне видимой солнечной полушеры в пределах  $45^\circ$  от центрального меридиана. Это позволило свести к минимуму все проекционные эффекты. С другой стороны, эффективными гелиодолготами для протонных возрастаний являются более западные долготы [Белов, 2017]. Поэтому две выборки (эрупций и протонных возрастаний) имеют совершенно разные гелиодолготные распределения и перекрываются только частично. Тем не менее, нашлось 42 надежно отождествленных со своими солнечными источниками протонных возрастания. Для этих событий мы искали связь между эруптивными магнитными потоками и величиной протонных возрастаний. Эти связи в дальнейшем анализируются.

Анализировались следующие параметры протонных возрастаний и отождествленных с ними солнечных эрупций:  $F_{AR}$  и  $F_{DIM}$  — магнитные потоки постэруптивной аркады и диммингов соответственно;  $P_{10}$  и  $P_{100}$  — максимальные потоки частиц с энергиями  $>10$  и  $>100$  МэВ соответственно.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Чтобы выбрать оптимальный долготный интервал мы меняли нижнюю границу гелиодолготы (сверху наша выборка заранее ограничена долготой W45). Наилучшая корреляция получена для интервала E10-W45.

На рис. 1 представлены логарифмические зависимости максимальной величины протонных возрастаний для частиц с энергиями более 10 МэВ ( $P_{10}$ ) от: а) — величины магнитного потока диммингов ( $F_{DIM}$ ), б) — величины магнитного потока постэруптивных аркад ( $F_{AR}$ ). Рассматривалась так же зависимость максимальной величины протонного возрастания для частиц с энергиями более 100 МэВ ( $P_{100}$ ) от величины магнитного потока диммингов ( $F_{DIM}$ ), величины магнитного потока постэруптивных аркад ( $F_{AR}$ ). Но в данной работе мы ограничимся анализом первой зависимости, так как последующие аналогичны.

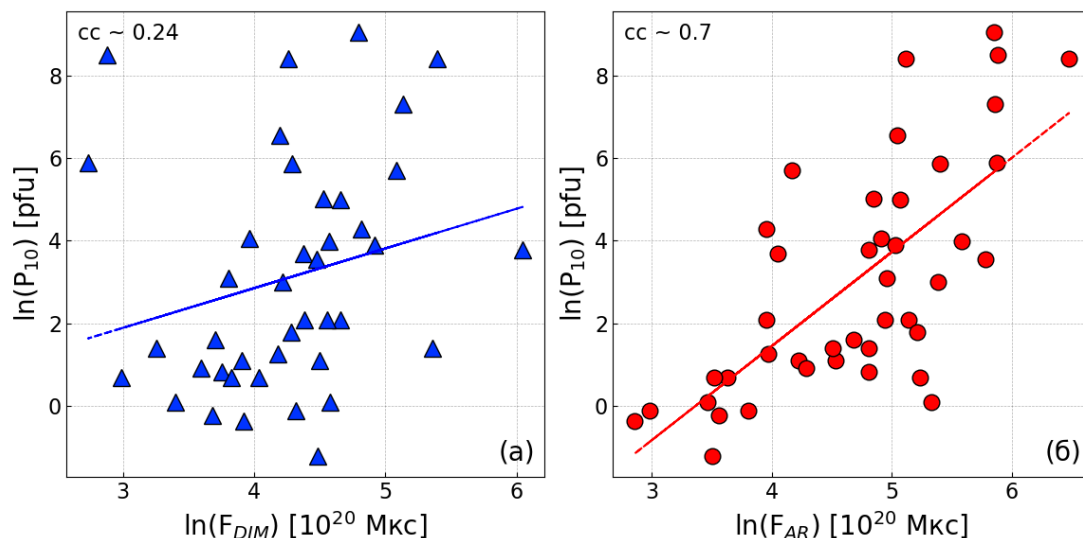


Рис. 1. Зависимость максимальной величины протонного возрастания для частиц с энергиями более 10 МэВ ( $P_{10}$ ) от: величины магнитного потока диммингов ( $F_{DIM}$ ) (а); величины магнитного потока постэруптивных аркад ( $F_{AR}$ ) (б)

Как видно из рис. 1, *a* между  $P_{10}$  и  $F_{DIM}$  связь почти отсутствует. Коэффициент корреляции в данном случае всего 0.24. В то время когда между  $P_{10}$  и  $F_{AR}$  наблюдается достаточно хорошая зависимость (рис. 1, *б*). В этом случае коэффициент корреляции равен 0.7. В аналитическом виде представленные зависимости выглядят следующим образом:

$$\ln(P_{10}) = -0.99 + 0.96 \ln(F_{DIM}),$$

$$\ln(P_{10}) = -7.66 + 2.27 \ln(F_{AR}).$$

Похожая ситуация наблюдается, если сравнивать магнитные потоки солнечных эрупций с максимальными значениями протонных возрастаний частиц с энергиями более 100 МэВ ( $P_{100}$ ).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе анализа проведено сопоставление параметров протонных возрастаний для энергий >10 МэВ и >100 МэВ с магнитными потоками диммингов и постэруптивных аркад соответствующих солнечных эрупций. Показано, что между магнитным потоком постэруптивных аркад и величиной протонного возрастания наблюдается достаточно сильная связь. Связь же между магнитным потоком диммингов и параметрами протонных возрастаний существенно слабее.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абунин А.А., Абунина М.А., Белов А.В. и др. Возможности базы данных для изучения форбуш-эффектов и межпланетных возмущений // Солнечная и солнечно-земная физика. 2018. С. 23–27.
- Белов А.В. Вспышки, выбросы, протонные события // Геомагнетизм и аэрономия. 2017. Т. 57, № 6. С. 783–793.
- Дорман Л.И., Мирошниченко Л.И. Солнечные космические лучи. М.: Физматгиз, 1968. 468 с.
- Belov A., Abunin A., Eroshenko E., et al. Database on the Forbush-effects and interplanetary disturbances to study Earth-affecting solar transients // VarSITI Newsletter. 2017. V. 14. P. 8–10.
- Garcia H.A. Temperature and emission measure from goes soft X-ray measurements // Solar Phys., 1994. V. 154, I. 2. P. 275–308.
- Chertok I.M., Grechnev V.V., Belov A.V., Abunin A.A. Magnetic flux of EUV arcade and dimming regions as a relevant parameter for early diagnostics of solar eruptions — sources of non-recurrent geomagnetic storms and Forbush decreases // Solar Phys. 2013. V. 282. P. 175–199.
- Chertok I.M., Grechnev V.V., Abunin A.A. An early diagnostics of the geoeffectiveness of solar eruptions from photospheric magnetic flux observations: the transition from SOHO to SDO // Solar Phys. 2017. V. 292. I. 4. P. 62.
- Gosling J.T. The solar flare myth // J. Geophys. Res. 1993. V. 98, N A11. P. 18937–18949