

СВЯЗЬ МАГНИТНОГО ПОТОКА СОЛНЕЧНЫХ ЭРУПЦИЙ С ВЕЛИЧИНОЙ ПРОТОННЫХ ВОЗРАСТАНИЙ

Л. А. Трефилова¹, А. А. Абуни^{1,2}, М. А. Абунина¹, А. В. Белов¹, С. П. Гайдаш¹,
И. И. Прямушкина¹, И. М. Черток¹

¹ Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН), Троицк, Россия,

² Калмыцкий государственный университет имени Б. Б. Городовикова (КалмГУ) Элиста, Россия

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 представляемой 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

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). 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, наблюдаются одновременно со вспышками. И. М. Черток и В. В. Гречнев предложили количественные характеристики эрупций, а именно магнитные эруптивные потоки, а в работах (Chertok et al., 2013) изучена связь эруптивных характеристик с величиной форбуш-эффектов и мощностью геомагнитных бурь, а также показана прогностическая ценность этих характеристик.

Трефилова Людмила Александровна — вед. инженер, trefilova@izmiran.ru

Абуни Артём Анатольевич — ст. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук, abunin@izmiran.ru

Абунина Мария Александровна — ст. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук, abunina@izmiran.ru

Белов Анатолий Владимирович — вед. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук, abelov@izmiran.ru

Гайдаш Сергей Петрович — ст. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук, gaidash@izmiran.ru

Прямушкина Ирина Ивановна — мл. науч. сотр., abunin@izmiran.ru

Черток Илья Моисеевич — вед. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук, ichertok@izmiran.ru

В представляемой работе проверяется предположение, что имеется связь характеристик эрупций и с протонными возрастаниями. Полный магнитный поток эрупций, а также его составные части, связанные с диммингами и аркадами, сопоставляются с протонными событиями для энергии протонов >10 и >100 МэВ, наблюдавшимися на спутниках GOES (*англ.* Geostationary Operational Environmental Satellite — геостационарный эксплуатационный спутник наблюдения за окружающей средой), 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 Институте земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН). Информация о характеристиках протонных возрастаний была взята из базы данных рентгеновских вспышек и протонных возрастаний (Белов, 2017), основанная на наблюдениях с космических аппаратов серии GOES (GOES-5–15, 1975 г. — наст. вр.) (García, 1994). Эта база данных ежедневно обновляется и на текущий момент содержит информацию по более 75 000 рентгеновским вспышкам и более 1400 протонным событиям. В данном анализе рассматривались протонные возрастания в двух интегральных каналах — P_{10} и P_{100} (максимальные потоки частиц с энергиями >10 и >100 МэВ соответственно). Для анализа отбирались только те протонные возрастания, которые были надёжно отождествлены со своим солнечным источником. Таким образом, всего из базы 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) (Абунин и др., 2018; Belov et al., 2017). На сайте Центра прогнозов космической погоды ИЗМИРАН (<http://spaceweather.izmiran.ru/rus/dbs.html>) выложена открытая версия каталога и базы данных FEID. Эта база данных охватывает период в 60 лет (1957–2017) и содержит информацию по более 7500 межпланетным возмущениям. В зависимости от ряда факторов каждое возмущение описывается несколькими десятками параметров (до сотни).

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

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; Narra et al., 2011; Hudson et al., 2001; Thompson et al., 1998).

Что касается постэруптивных (ПЭ) 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; Hudson et al., 2001; Kahler, 1977; Sterling et al., 2000; Tripathi et al., 2004). ПЭ-аркады формируются

на стадии, когда магнитное поле в обширной области короны, сильно возмущённое эрупцией СМЕ, релаксирует к новому квазиравновесному состоянию посредством магнитного пересоединения.

В работах Чертока и др. (Chertok et al., 2013, 2017) представлена методика расчёта значений магнитных потоков диммингов и ПЭ-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 располагались в центральной зоне видимой солнечной полушеры в пределах $\pm 45^\circ$ от центрального меридиана. Это позволило свести к минимуму все проекционные эффекты. С другой стороны, эффективной гелиодолготой для протонного возрастания является более западная долгота (Белов, 2017). Поэтому две выборки (эрупций и протонных возрастаний) имеют совершенно разное гелиодолготное распределение и перекрываются только частично. Тем не менее, нашлось 42 надёжно отождествлённых со своими солнечными источниками протонных возрастания (таблица), для которых были рассчитаны и эруптивные параметры. Для этих событий мы искали связь между эруптивными магнитными потоками и величиной протонных возрастаний. Эти связи в дальнейшем анализируются.

В таблице приведены параметры анализируемых протонных возрастаний и отождествлённых с ними солнечных эрупций, здесь F_{AR} и F_{DIM} — магнитные потоки постэруптивной аркады и диммингов соответственно; F_{SUM} — полный магнитный поток солнечной эрупции ($F_{SUM} = F_{AR} + F_{DIM}$); P_{10} и P_{100} — максимальные потоки частиц с энергиями >10 и >100 МэВ соответственно.

Параметры анализируемых протонных возрастаний

| Дата (год-месяц-день), время вспышки UTC | F_{AR} | F_{DIM} | F_{SUM} | Балл вспышки | P_{10} | P_{100} |
|---|----------|-----------|-----------|-----------------|----------|-----------|
| 1997-04-07, 13:50:00 | 35,2 | 39,6 | 73,5 | C6.8 | 0,8 | — |
| 1997-05-12, 04:42:00 | 19,7 | 75,2 | 94,9 | C1.3 | 0,9 | 0,02 |
| 1997-11-04, 05:52:00 | 52,4 | 123,8 | 161 | X2.1 | 72 | 2,57 |
| 1998-04-29, 16:06:00 | 122,3 | 42,8 | 165,2 | M6.8 | 2,3 | — |
| 1998-05-02, 13:31:00 | 127,8 | 92,2 | 220 | X1.1 | 150 | 9,23 |
| 1998-11-05, 19:00:00 | 170,5 | 105,6 | 276,1 | M8.4 | 8 | 0,2 |
| 1999-06-24, 12:04:00 | 32 | 30 | 61,9 | C4.1 | 1,1 | — |
| 2000-02-12, 03:51:00 | 37,7 | 19,8 | 57,5 | M1.7 | 2 | — |
| 2000-06-06, 14:58:00 | 122,5 | 422 | 482,3 | X2.3 | 44 | 0,299 |
| 2000-06-10, 16:40:00 | 57,5 | 79,6 | 136,8 | M5.2 | 40 | 1,54 |
| 2000-07-14, 10:03:00 | 348,6 | 121 | 469,6 | X5.7 | 8400 | 623,0 |
| 2000-09-12, 11:31:00 | 64,7 | 161,4 | 208,9 | M1.0 | 300 | 0,552 |
| 2000-09-16, 04:06:00 | 188,7 | 45,9 | 234,1 | M5.9 | 2 | — |
| 2000-10-09, 23:19:00 | 33,4 | 88,3 | 121,6 | C6.7 | 0,3 | — |
| 2000-11-24, 04:55:00 | 52,3 | 95,5 | 139,8 | X2.0 | 8 | 0,599 |
| 2000-11-25, 09:06:00 | 107,9 | 40,5 | 148,5 | M3.5 | 5 | 0,02 |
| 2001-03-29, 09:57:00 | 324,2 | 88,2 | 411,2 | X1.7 | 35 | 0,271 |
| 2001-04-09, 15:20:00 | 183,2 | 72,5 | 255,7 | M7.9 | 6 | 0,5 |
| 2001-04-10, 05:06:00 | 221,4 | 72,8 | 294,2 | X2.3 | 355 | 0,468 |
| 2001-04-26, 11:26:00 | 135,9 | 52,7 | 185,7 | M7.8 | 57 | — |
| 2001-08-14, 11:30:00 | 17,4 | 50,4 | 67,7 | C2.3 | 0,7 | — |

| Дата (год-месяц-день), время вспышки UTC | F_{AR} | F_{DIM} | F_{SUM} | Балл вспышки | P_{10} | P_{100} |
|---|----------|-----------|-----------|-----------------|----------|-----------|
| 2001-10-09, 10:46:00 | 52,9 | 65,2 | 118,1 | M1.4 | 3,5 | — |
| 2001-10-19, 16:13:00 | 140,1 | 79,9 | 220 | X1.6 | 8 | 0,3 |
| 2001-10-22, 14:27:00 | 93,4 | 49,8 | 135,8 | M6.7 | 3 | 0,2 |
| 2001-10-22, 17:44:00 | 142,7 | 44,9 | 147,2 | X1.2 | 22 | 0,5 |
| 2001-10-25, 14:42:00 | 207,3 | 97,2 | 293 | X1.3 | 1,1 | — |
| 2001-11-22, 22:32:00 | 166,4 | 70,7 | 237,1 | M9.9 | 4500 | 4,0 |
| 2002-03-15, 22:09:00 | 122,5 | 212 | 334,5 | M2.2 | 4 | — |
| 2002-04-17, 07:46:00 | 218,2 | 68 | 286,2 | M2.6 | 20 | 0,05 |
| 2002-08-16, 11:32:00 | 90,7 | 26 | 116,7 | M5.2 | 4 | — |
| 2003-10-28, 09:51:00 | 651 | 219,6 | 870,6 | X17.2 | 4500 | 186,0 |
| 2003-10-29, 20:37:00 | 351,3 | 169,2 | 520,5 | X10.0 | 1500 | 100,0 |
| 2004-07-25, 14:19:00 | 266,9 | 96,5 | 362,6 | M1.1 | 54 | 0,1 |
| 2004-10-30, 06:08:00 | 44,9 | — | 44,9 | M4.2 | 0,9 | 0,04 |
| 2004-11-07, 15:42:00 | 153 | 137,1 | 290,2 | X2.0 | 49 | 0,5 |
| 2004-12-02, 23:44:00 | 68,4 | 89,7 | 157,5 | M1.5 | 3 | — |
| 2005-01-15, 22:25:00 | 356 | 15,4 | 371,4 | X2.6 | 362 | 0,7 |
| 2005-01-17, 06:59:00 | 359,8 | 17,8 | 377,7 | X3.8 | 4900 | 28,0 |
| 2005-05-13, 16:13:00 | 159,9 | 105,7 | 265,7 | M8.0 | 146 | 0,15 |
| 2005-07-09, 21:47:00 | 73,1 | 36,4 | 109,5 | M2.8 | 2,5 | — |
| 2006-07-06, 08:13:00 | 33,9 | 56,6 | 90,5 | M2.5 | 2 | 0,1 |
| 2006-12-13, 02:14:00 | 155,7 | 66,5 | 222,3 | X3.4 | 695 | 89,0 |

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Поскольку величина протонных возрастаний может зависеть от долготы, связь этой величины с любым другим параметром будет тем лучше проявляться, чем уже долготный интервал. Однако при этом уменьшается количество событий, которых у нас и без того немного. 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 (см. с. 177) представлены логарифмические зависимости максимальной величины протонных возрастаний для частиц с энергиями более 10 МэВ (P_{10}) от магнитного потока диммингов F_{DIM} (а), постэруптивных аркад F_{AR} (б) и суммарного магнитного потока диммингов и постэруптивных аркад соответствующих солнечных эрупций F_{SUM} (в).

Как видно на рис. 1а, между P_{10} и F_{DIM} связь почти отсутствует. Коэффициент корреляции в данном случае всего 0,24. В то же время между P_{10} и F_{AR} , а также между P_{10} и F_{SUM} наблюдаются достаточно хорошие зависимости (рис. 1б и 3а). В этих случаях коэффициенты корреляции равны 0,7 и 0,72 соответственно. В аналитическом виде представленные зависимости выглядят следующим образом:

$$\ln(P_{10}) = -0,99 + 0,96\ln(F_{DIM}),$$

$$\ln(P_{10}) = -7,66 + 2,27\ln(F_{AR}),$$

$$\ln(P_{10}) = -12,84 + 3,02\ln(F_{SUM}).$$

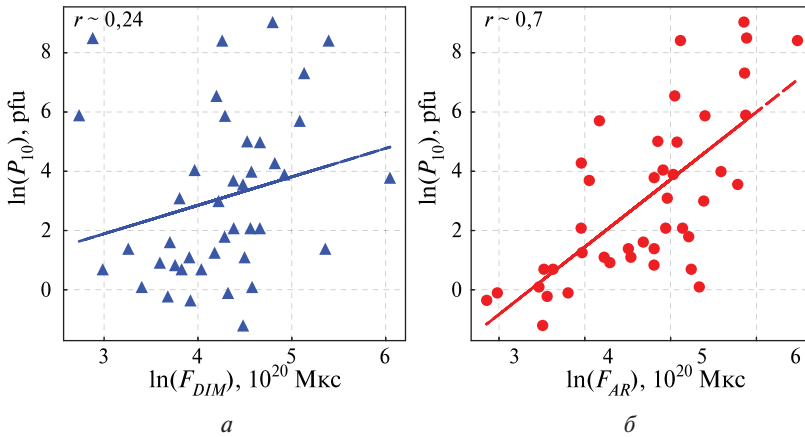


Рис. 1. Зависимость максимальной величины протонного возрастания для частиц с энергиями более 10 МэВ (P_{10}) от величины магнитного потока диммингов F_{DIM} (а) и постэруптивных аркад F_{AR} (б)

Похожая ситуация наблюдается, если сравнивать магнитные потоки солнечных эрупций с максимальными значениями протонным возрастаний частиц с энергиями более 100 МэВ (P_{100}) (рис. 2а, б, 3б).

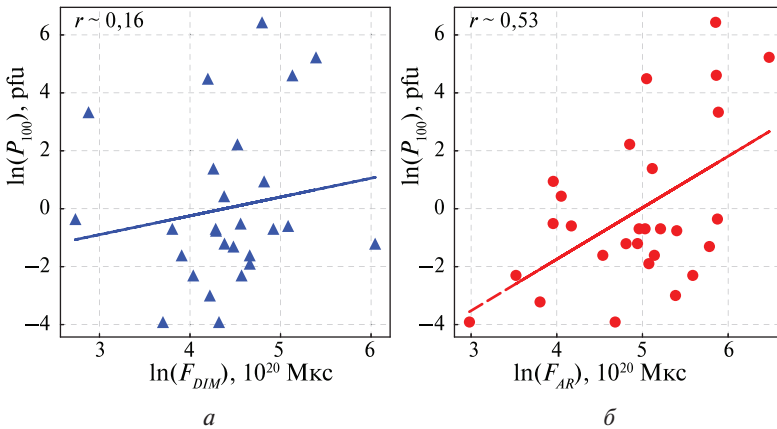


Рис. 2. Зависимость максимальной величины протонного возрастания для частиц с энергией более 100 МэВ (P_{100}) от магнитного потока диммингов F_{DIM} (а) и постэруптивных аркад F_{AR} (б)

В данном случае анализировалось 28 событий. На рис. 2а видно, что связь между P_{100} и F_{DIM} также слабая (коэффициент корреляции $\sim 0,16$). Коэффициенты корреляции между P_{100} и F_{AR} , а также между P_{100} и F_{SUM} равны 0,53 и 0,56 соответственно (рис. 3б). В аналитическом виде эти зависимости выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} \ln(P_{100}) &= -2,84 + 0,65\ln(F_{DIM}) \\ \ln(P_{100}) &= -8,86 + 1,78\ln(F_{AR}) \\ \ln(P_{100}) &= -13,63 + 2,48\ln(F_{SUM}) \end{aligned}$$

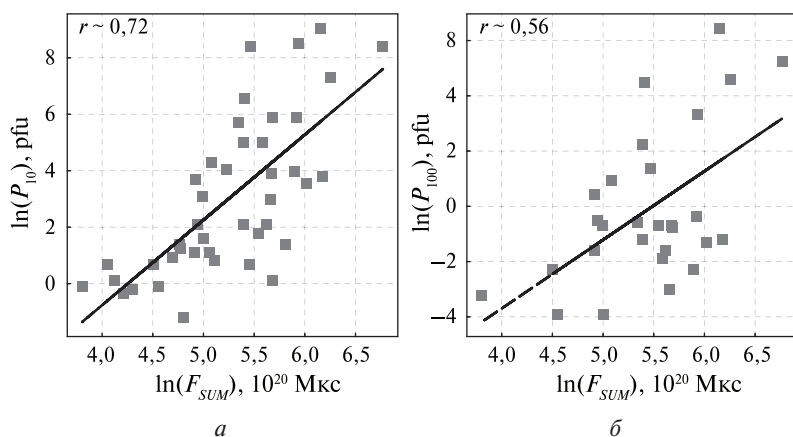


Рис. 3. Зависимость величины суммарного магнитного потока диммингов и постэруптивных аркад соответствующих солнечных эрупций F_{SUM} от частиц с энергиями более 10 МэВ (P_{10}) (а) и более 100 МэВ (P_{100}) (б)

И в первом, и во втором случае показано, что связь протонных возрастных с магнитным потоком постэруптивных аркад гораздо сильнее, чем с магнитным потоком диммингов от соответствующих солнечных эрупций. Это можно объяснить следующим образом. Характеристики протонных возрастных зависят, прежде всего, от величины магнитных полей, вовлечённых в процесс эрупций. Чем сильнее поле, тем большая доля энергии при его диссипации может передаваться высокоэнергичным частицам. Кроме того, и верхняя энергия ускоренных частиц будет определяться напряжённостью магнитного поля. При этом неважно, где происходит ускорение частиц (во вспышечном процессе или на ударной волне от коронального выброса). В большинстве случаев во время вспышечных эрупций значения магнитного потока ПЭ аркад гораздо больше значений магнитного потока диммингов в этом же событии. ПЭ аркады располагаются непосредственно в сильных полях над активной областью, в то время как димминги, хоть и имеют большую площадь, располагаются на периферии, там, где магнитные поля значительно слабее и где трудно обеспечить эффективное ускорение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе анализа проведено сопоставление параметров протонных возрастных для энергий >10 и >100 МэВ с магнитными потоками диммингов и постэруптивных аркад соответствующих солнечных эрупций.

Показано, что магнитные потоки постэруптивных аркад эрупции хорошо коррелируют с величиной протонных возрастных. Корреляция эруптивных потоков диммингов с протонными возрастаниями практически отсутствует. Полученные результаты могут стать основой полноценной прогностической модели. Создание такой модели будет задачей следующей работы.

Работа частично поддержана РФФИ (проект № 17-02-00508) и РНФ (проект № 15-12-20001).

ЛИТЕРАТУРА

- Абунин А. А., Абунина М. А., Белов А. В. и др. (2018) Возможности базы данных для изучения Форбуш-эффектов и межпланетных возмущений // 22-я Всерос. ежегодная конф. по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика — 2018»: тр. С. 23–27. DOI: 10.31725/0552-5829-2018-23-26.
- Белов А. В. Вспышки, выбросы, протонные события // Геомагнетизм и аэронавигация. 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.
- Chertok I. M., Grechnev V. V., Belov A. V. et al. 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 Physics. 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 physics. 2017. V. 292. Iss. 4. Paper 62. DOI: 10.1007/s11207-017-1081-8.
- Garcia H. A. Temperature and emission measure from goes soft X-ray measurements // Solar Physics. 1994. V. 154. Iss. 2. P. 275–308. DOI: 10.1007/BF00681100.
- Harra L. K., Mandrini C. H., Dasso S. et al. Determining the solar source of a magnetic cloud using a velocity difference technique // Solar Phys. 2011. V. 268. P. 213–230.
- Hudson H. S., Cliver E. W. Observing coronal mass ejections without coronagraphs // J. Geophysical Research. 2001. V. 106. P. 25,199–25,214.
- Kahler S. The morphological and statistical properties of solar X-ray events with long decay times // Astrophysical J. 1977. V. 214. P. 891–897.
- Sterling A. C., Hudson H. S., Thompson B. J. et al. Yohkoh SXT and SOHO EIT observations of sigmoid-to-arcade evolution of structures associated with halo coronal mass ejections // Astrophysical J. 2000. V. 532. No. 1. P. 628–647.
- Thompson B. J., Plunkett S. P., Gurman J. B. et al. SOHO/EIT observations of an Earth-directed coronal mass ejection on May 12, 1997 // Geophysical Research. Letters. 1998. V. 25. P. 2465–2468.
- Tripathi D., Bothmer V., Cremades H. The basic characteristics of EUV post-eruptive arcades and their role as tracers of coronal mass ejection source regions // Astronomy and Astrophysics. 2004. V. 422. P. 337–349.

RELATION BETWEEN MAGNETIC FLUX OF SOLAR ERUPTIONS AND PROTON ENHANCEMENTS

L. A. Trefilova¹, A. A. Abunin^{1,2}, M. A. Abunina¹, A. V. Belov¹, S. P. Gaidash¹, I. I. Pryamushkina¹, I. M. Chertok¹

¹ Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences (IZMIRAN), Troitsk, Russia,

² Kalmyk State University (KalmSU), Elista, Russia

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

Trefilova Lyudmila Aleksandrovna — leading engineer, trefilova@izmiran.ru

Abunin Artem Anatolyevich — senior researcher, PhD, abunin@izmiran.ru

Abunina Mariya Aleksandrovna — senior researcher, PhD, abunina@izmiran.ru

Belov Anatoly Vladimirovich — leading researcher, PhD, abelov@izmiran.ru

Gaidash Sergey Petrovich — senior researcher, PhD, gaidash@izmiran.ru

Pryamushkina Irina Ivanovna — research assistant, abunin@izmiran.ru

Chertotok Ilya Moiseevich — leading researcher, PhD, ichertok@izmiran.ru