

## Зависимость величины Форбуш-понижений от параметров солнечных эрупций

И.М. Черток<sup>1\*</sup>, А.В. Белов<sup>2</sup>, В.В. Гречнев<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> ИЗМИРАН, Троицк; ichertok@izmiran.ru

<sup>3</sup> ИСЗФ, Иркутск

### Аннотация

По материалам 23-его цикла показано, что имеет место тесная статистическая связь между количественными параметрами диммингов и аркад, вызываемых солнечными корональными выбросами (СМЕs), с одной стороны, и величиной нерекуррентных Форбуш-понижений, а также временем распространения межпланетных возмущений от Солнца до Земли – с другой. Параметры диммингов и аркад, в частности, суммарный магнитный поток продольного поля в них на уровне фотосферы, определялись по данным телескопа крайнего ультрафиолетового диапазона SOHO/EIT в канале 195 Å и магнитограммам SOHO/MDI. Полученные результаты означают, что масштаб, характеристики и время распространения межпланетных возмущений до Земли в значительной мере определяются измеряемыми параметрами солнечных эрупций и могут оцениваться заблаговременно по наблюдениям диммингов и аркад в крайнем ультрафиолетовом диапазоне.

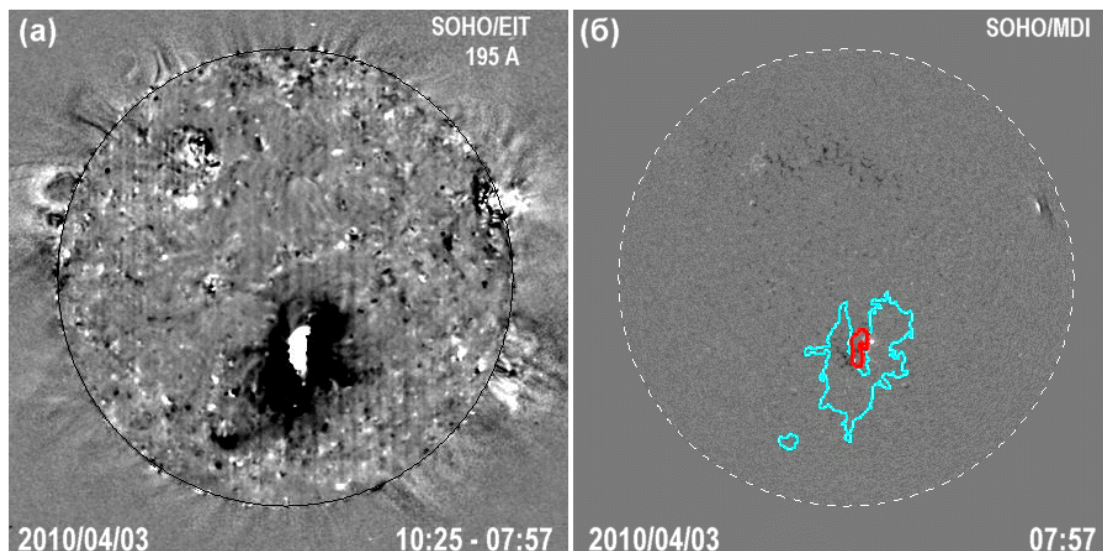
### Введение

Как известно, нерекуррентные возмущения космической погоды в виде геомагнитных бурь и Форбуш-понижений (ФП) вызываются солнечными выбросами (coronal mass ejections; СМЕs), которые при распространении от Солнца трансформируются в межпланетные облака (ICMEs) (см., например, [1,2] и приведенную там литературу). Эрупция крупных СМЕs на Солнце сопровождается формированием постэруптивных (ПЭ) аркад и диммингов (Рис. 1). Увеличивающиеся в размерах аркады ярких петель образуются на месте располагавшегося до эрупции магнитного жгута, выброшенного в виде СМЕ. Они формируются на стадии, когда магнитное поле, сильно возмущенное эрупцией СМЕ, релаксирует к новому квазиравновесному состоянию. Димминги – это крупномасштабные области пониженной яркости крайнего УФ (КУФ) и мягкого рентгеновского излучения, возникающие в короне в результате коронального выброса. Анализ различных данных свидетельствует о том, что образование квазистационарных диммингов (или транзитных, т.е. временных, корональных дыр) обусловлено снижением плотности плазмы вследствие ее истечения в раскрывшихся (вытянувшихся) в результате эрупции корональных магнитных структурах. В качестве основной предпосылки принято, что димминги визуализируют основания крупномасштабных магнитных структур, эруптирующих в виде СМЕs. При этом СМЕ/ICME включает в себя структуры, соединяющие эти димминги. Поэтому при оценках масштаба солнечных эрупций надо учитывать не только количественные параметры диммингов, но и характеристики структур, расположенных между ними, т.е. предэруптивных и ПЭ аркад.

До сих пор в аспекте космической погоды использовалась только качественная информация о диммингах и аркадах как средство выделения СМЕs, образующихся в результате эрупции на видимом солнечном диске. Между тем, исходя из природы диммингов и аркад, можно ожидать статистическую связь их количественных параметров с интенсивностью геомагнитных бурь и ФП фоновых космических лучей [3,4]. Анализ такой связи логично начать именно с ФП, поскольку интенсивность геомагнитных бурь зависит от величины и знака  $B_z$  компоненты магнитного поля в ICMEs, а глубина ФП не зависит от знака  $B_z$  и определяется напряженностью магнитного поля в облаке, а также его скоростью и размерами [5]. В данной статье представлены предварительные результаты сопоставления величин ФП, вызываемых СМЕs/ICMEs, с количественными параметрами соответствующих диммингов и аркад, а также результаты анализа связи между этими параметрами и временем распространения межпланетных облаков от Солнца до Земли (так называемым транзитным временем).

---

\* Автор поддерживается РФФИ, грант 09-02-00115



**Рис. 1.** Эрупция 3 апреля 2010 г. (а) Разностное изображение солнечного диска в канале 195 Å с диммингами (темные области) и ПЭ аркадой (яркая структура). (б) Контуры диммингов и аркады на фоне магнитограммы MDI.

## 1 Данные и методика

Для оценки параметров аркад и диммингов анализировались изображения Солнца в канале 195 Å (преобладающая линия Fe XII, характеристическая температура 1,3 МК), полученных на космическом телескопе КУФ диапазона SOHO/EIT [6]. Эти изображения получают обычно в патрульных наблюдениях с интервалом 12 мин. Солнечное вращение в анализируемых изображениях компенсировалось, и затем из каждого из них вычитался фиксированный кадр до события [7]. В большинстве случаев охватывалось 3–4 часа с начала эрупции. За это время основные димминги и аркады уже полностью формируются, а эволюционных, не относящихся к делу структур такого рода обычно бывает немного.

Обработка данных выполнялась разработанной для этой цели программой IDL, с помощью которой производятся: (а) калибровка исходных FITS-файлов EIT; (б) компенсация солнечного вращения и формирование разностных изображений; (в) выделение диммингов и ПЭ аркады, образующихся в области эрупции анализируемого СМЕ; (г) измерение по выбранным критериям площадей и потоков излучения (суммарной яркости) в областях диммингов и аркад; (д) совмещение полученных изображений диммингов и аркад с магнитограммами SOHO/MDI [8] и вычисление магнитных потоков на фотосфере, соответствующих этим образованиям. Оценки параметров диммингов и аркад осуществлялись по изображениям, приведенным к формату 512 × 512 пикселей.

В ходе анализа выявлены пороги относительных изменений яркости, оптимальные для оценки параметров диммингов и аркад. Относительные значения выбраны для учёта существенных диммингов в структурах, яркость которых до эрупции могла быть невелика. Это также позволило снизить влияние изменений со временем характеристик детекторов SOHO/EIT и изменений в калибровочных процедурах. Наконец, это даёт возможность применения полученных количественных результатов к данным других телескопов КУФ диапазона. В частности, установлено, что критерием выделения существенных диммингов целесообразно считать снижение яркости вследствие эрупции более чем на 40%. При меньших величинах порога на разностных изображениях появляется много удаленных эволюционных диммингов, не связанных с рассматриваемой эрупцией, а при больших пропадают некоторые димминги, расположенные вблизи центра эрупции и явно относящиеся к ней. Для ПЭ аркад оптимальным оказался критерий, выделяющий площадку над центром эрупции, в которой яркость КУФ излучения превышает 5% от максимальной в данный момент времени. Как известно, площадь ПЭ аркады увеличивается со временем. Поэтому, чтобы избежать неоднозначности, выделение ПЭ аркады производилось во время, близкое к моменту максимального потока излучения из обозначившейся площадки.

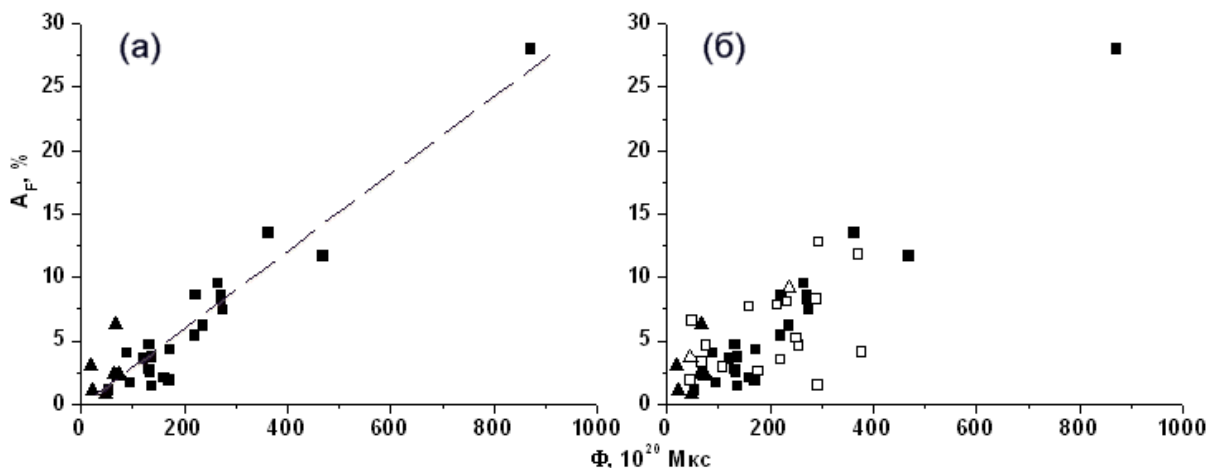
На первом этапе проанализированы около 70 крупных событий 23-его цикла (1997–2008 гг.), в которых, по данным Coordinated Data-Analysis Workshop (CDAW; см. [9]), наряду с ФП, имели место геомагнитные бури с индексом  $|Dst| > 100$  нТл, с большой долей вероятности отождествленные с эрупцией конкретных СМЕs из центральной зоны видимой полусферы Солнца в пределах  $\pm 45^\circ$  от центрального меридиана. Большинство этих эрупций происходило в активных областях, но некоторая часть событий была связана с эрупцией волокон вне активных областей. В ходе рассмотрения производилась проверка и некоторые уточнения привязки геомагнитных бурь (ФП) к

соответствующим солнечным выбросам с учетом базы данных, созданной в ИЗМИРАН [5], и имеющегося комплекса наземных и космических наблюдений. В качестве характеристики ФП принималась его максимальная величина, соответствующая жесткости 10 ГВ, которая определялась по данным мировой сети станций с использованием метода глобальной съемки [10,11].

## 2 Величина Форбуш-понижений

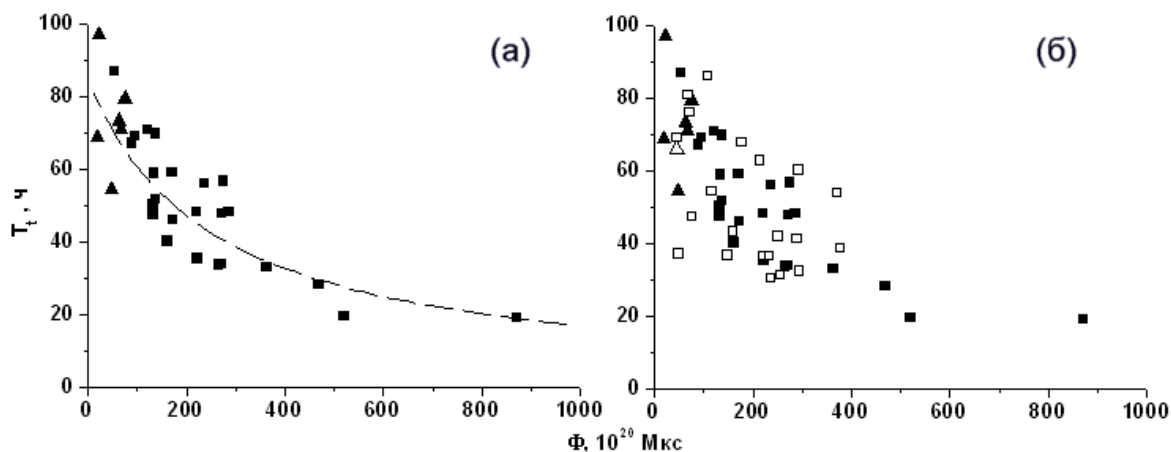
Наиболее информативным для данного анализа параметром диммингов и аркад является их суммарный магнитный поток продольного поля на уровне фотосферы ( $\Phi$ ). Результаты его сопоставления с величиной ФП ( $A_F$ ) представлены на Рис. 2. Здесь и далее все рассматриваемые события разделены на группы в зависимости от характера эрупции и надежности отождествления ФП (геомагнитной бури) с эруптивным источником на Солнце. Будем различать эрупции, происходящие в активных областях, обозначая их квадратами (■, □), и эрупции вне активных областей, обозначенные треугольниками (▲, △). Зачернённые символы (■, ▲) относятся к одиночным ФП, уверенно отождествлённым с одной конкретной эрупцией в центральной зоне солнечного диска. Незачернёнными символами (□, △) обозначены сложные события, связанные с несколькими CMEs/ICMEs, и/или события, не отождествлённые однозначно с солнечным источником. Для событий этой категории в тех случаях, когда это было возможно, выделялось наиболее сильное ФП, а в качестве его вероятного источника принималась наиболее мощная эрупция, подходящая по времени.

В нескольких сложных событиях на фоне начинающегося спада одного сильного ФП наблюдалось второе существенное ФП. Это имело место, например, 18 и 20 апреля 2002 г., 30 и 31 октября 2003 г. В таких случаях рассматривались и наносились на графики данные только первого события, поскольку истинную величину второго ФП определить трудно из-за ряда факторов, влияющих в таких случаях на регистрируемую интенсивность космических лучей.



**Рис. 2.** Зависимость величины Форбуш-понижения ( $A_F$ ) от суммарного магнитного потока диммингов и аркад на уровне фотосферы ( $\Phi$ ). (а) Одиночные события, уверенно отождествленные с одной конкретной солнечной эрупцией (зачернённые символы ■, ▲). Пунктир – линия регрессии. (б) Все события, включая сложные, связанные с несколькими CMEs/ICMEs, и/или с вероятным отождествлением с солнечным источником (незачернённые символы □, △). Квадраты относятся к эрупциям в активных областях, треугольники – к эрупциям вне активных областей.

Из Рис. 2а видно, что для однозначно отождествленных событий имеет место вполне определенная зависимость величины ФП от суммарного магнитного потока диммингов и аркад. При увеличении  $\Phi$  от  $3 \times 10^{21}$  до  $10^{23}$  Мкс ожидаемая амплитуда ФП  $A_F$  возрастает от 0,8 до 30 %. Коэффициент корреляции между  $\Phi$  и  $A_F$  составляет 0,94. Зависимость между суммарным магнитным потоком диммингов и аркад и величиной ФП описывается следующим соотношением линейной регрессии  $A_F$  (%) =  $-0,08 + 0,03 \times \Phi$  ( $10^{20}$  Мкс). Зависимость между  $\Phi$  и  $A_F$  проявляется, в целом, примерно таким же образом, когда к одиночным и уверенно отождествленным событиям добавляются сложные события, в том числе с неоднозначным, но вероятным отождествлением (Рис. 2б). Здесь, как и следовало ожидать, разброс точек увеличивается, а коэффициент корреляции понижается до 0,85. Заметим, что события, связанные с эрупцией волокон вне активных областей (треугольники), характеризуются небольшими значениями магнитного потока и сосредоточены, в основном, в области небольших величин ФП.



**Рис. 3.** Зависимость транзитного времени ( $T_t$ ) от суммарного магнитного потока диммингов и аркад на уровне фотосферы ( $\Phi$ ). (а) Одиночные события, уверенно отождествленные с одной конкретной солнечной эрупцией. (б) Все события, включая сложные, связанные с несколькими СМЕs/ICMEs, и/или с вероятным отождествлением с солнечным источником. Обозначения такие же, как на Рис. 2.

### 3 Транзитное время

На величину ФП существенно влияет скорость ICMEs. По этой причине в ряде исследований используется комбинация нескольких параметров, характеризующих магнитное поле и скорость межпланетных возмущений [5]. Первоначально и в рамках настоящего анализа предполагалось использовать подобную комбинацию, основываясь, как это обычно делается, на скорости СМЕs в картинной плоскости, измеряемой по наблюдениям на коронографах в белом свете (см. [1,2,12]). Однако оказалось, что параметры диммингов и аркад, в том числе суммарный магнитный поток продольного поля на уровне фотосферы  $\Phi$  содержит информацию и о скорости эруптировавших СМЕs и, следовательно, о транзитном времени распространения межпланетных возмущений от Солнца до Земли.

В данном случае транзитное время ( $T_t$ ) рассчитывалось как интервал между моментом максимума мягкого рентгеновского всплеска, связанного с рассматриваемой эрупцией, и временем прихода к Земле соответствующей ударной волны, которое определялось, в том числе, по внезапному началу геомагнитной бури (SC). Рис. 3а демонстрирует отчетливую связь между суммарным магнитным потоком  $\Phi$  и транзитным временем  $T_t$ , которая имеет место для одиночных, однозначно отождествленных событий. При увеличении  $\Phi$  в интервале  $(30-300) \times 10^{20}$  Мкс  $T_t$  резко уменьшается в среднем от 75 до 40 ч. При дальнейшем росте магнитного потока транзитное время продолжает постепенно уменьшаться и при самых больших ожидаемых значениях магнитного потока  $\Phi \approx 10^{23}$  Мкс достигает  $T_t \approx 18-20$  ч. В целом зависимость между  $\Phi$  и  $T_t$  может быть описана следующим соотношением (пунктир на Рис.3а)  $T_t$  (ч) =  $85/(1+0,004\Phi)$ , здесь  $\Phi$  в  $10^{20}$  Мкс. При этом коэффициент корреляции между расчетными и наблюдаемыми величинами  $T_t$  составляет 0,73. Для всего ансамбля рассматриваемых событий, включая сложные события с вероятным отождествлением (Рис. 3б), разброс, как и следовало ожидать, увеличивается, но общий характер зависимости транзитного времени от магнитного потока диммингов и аркад остается прежним. Здесь снова события, связанные с эрупциями волокон вне активных областей (треугольники), при малых значениях магнитного потока характеризуются, в основном, большим транзитным временем. Тот факт, что между  $T_t$  и  $\Phi$  имеет место вполне определенная зависимость, позволяет заключить, что при сопоставлении величины ФП с магнитным потоком диммингов и аркад нет необходимости привлекать дополнительную информацию о скорости СМЕ/ICMEs.

### Заключение

По-видимому, величина ФП и транзитное время зависят от ряда солнечных и межпланетных факторов. Представленные здесь результаты показывают, что, несмотря на это, величина нерекуррентных ФП и транзитное время распространения межпланетных возмущений от Солнца до Земли в значительной степени определяются характером и параметрами солнечных эрупций. Оказывается, что и величина ФП ( $A_F$ ), и транзитное время ( $T_t$ ) тесно связаны с параметрами наблюдаемых в КУФ диапазоне диммингов и аркад, которые формируются при эрупции крупных СМЕs, в частности, с таким комплексным параметром, как суммарный магнитный поток в области этих структур на уровне фотосферы ( $\Phi$ ). Эти результаты важны для понимания природы солнечных эрупций и их межпланетных и геофизических

последствий. Зависимость транзитного времени от эруптивного потока, конечно, применима не только к ФП, но и к другим нерекurrentным возмущениям космической погоды, в частности, к геомагнитным бурям. Наличие статистической зависимости между величиной ФП и эруптивным магнитным потоком дает основание ожидать, что при надлежащем учете факторов, определяющих появление отрицательной южной компоненты магнитного поля  $B_z$  в приходящих к Земле ICMEs, аналогичная связь может иметь место и для интенсивности нерекurrentных геомагнитных бурь. Это подтверждается уже проведенным предварительным анализом, результаты которого будут опубликованы отдельно.

Результаты настоящего анализа дают инструмент для диагностики геоэффективности солнечных эрупций и краткосрочного прогнозирования нерекurrentных возмущений космической погоды. По изображениям КУФ диапазона и магнитограммам солнечного диска можно определять количественные параметры диммингов, включая их суммарный магнитный поток на уровне фотосферы, и по нему с заблаговременностью от 1 до 4 суток оценивать ожидаемые величину и время начала ФП и геомагнитных бурь. Следует только иметь в виду, что приведенные здесь зависимости получены по значительным эрупциям, с которыми были связаны геомагнитные бури с индексом  $|Dst| > 100$  нТл.

В качестве эксперимента такое краткосрочное прогнозирование возмущений космической погоды по результатам диагностики солнечных эрупций проводится в текущем году в реальном времени в центре прогнозов ИЗМИРАН. Было рассмотрено несколько эрупций начавшегося 24-ого цикла из центральной зоны солнечного диска. По параметрам диммингов и аркад они были относительно небольшими и, согласно оценкам, должны были приводить к довольно слабым возмущениям космической погоды, что и подтвердилось. Самая крупная из имевших место до сих пор эрупций 2010 года произошла 3 апреля. На Рис. 1 показаны димминги и аркада, наблюдавшиеся именно в этой эрупции. Суммарный магнитный поток в данном случае был  $1,1 \times 10^{22}$  Мкс. Такому потоку соответствуют ожидаемое транзитное время  $T_t \approx 59$  ч, величина ФП  $A_F \approx 3\%$  и интенсивность геомагнитной бури  $Dst \approx -100$  нТл. Реально наблюдавшиеся величины оказались достаточно близкими к прогнозированным:  $T_t \approx 47$  ч,  $A_F \approx 3,5\%$ ,  $Dst \approx -84$  нТл.

Авторы благодарны коллективам SOHO EIT и MDI, а также CDAW за данные, использованные при анализе (SOHO – проект международного сотрудничества ESA и NASA). Работа выполнена при поддержке РФФИ и программ фундаментальных исследований РАН “Плазменная гелиофизика” и “Солнечная активность и физические процессы в системе Солнце-Земля”.

## Список литературы

- [1] Bothmer V., Zhukov A. The Sun as the prime source of space weather. // Space Weather – Physics and Effects. Ed. by V. Bothmer and I.A. Daglis. Springer. 2007. P. 31–102.
- [2] Gopalswamy N. Coronal mass ejections and space weather. // Climate and Weather of the Sun-Earth System (CAWSES): Selected Papers from the 2007 Kyoto Symposium. Ed. by T. Tsuda, R. Fujii, K. Shibata, and M. A. Geller. TERRAPUB, Tokyo. 2009. P. 77–120.
- [3] Черток И.М., Гречнев В.В. Корональные выбросы массы в аспекте космической погоды: II. Ультрафиолетовые димминги и геомагнитные бури. // Известия РАН. Серия физ. 2006. Т. 70 (10). С. 1499–1501.
- [4] Черток И.М. Солнечные вспышки и корональные выбросы в аспекте космической погоды. // Изменения окружающей среды и климата. Ред. Н.П. Лаверов. Том 8: Солнечная активность и физические процессы в системе Солнце-Земля. Ред. Г.А. Жеребцов. М: ИСЗФ СО РАН, ИФЗ РАН. 2008. 52–58.
- [5] Belov A.V. Forbush effects and their connection with solar, interplanetary and geomagnetic phenomena. // Universal Heliophysical Processes. Proceedings of IAU Symposium No. 257. 2009. P. 439–450.
- [6] Delaboudinière J.-P., Artzner G.E., Brunaud J. et al. EIT: Extreme-ultraviolet Imaging Telescope for the SOHO mission. // Solar Phys. 1995. V. 162 (1–2). P. 291–312.
- [7] Chertok I.M., Grechnev V.V. Large-scale activity in the Bastille day 2000 solar event. // Solar Phys. 2005. V. 229 (1). P. 95–114.
- [8] Scherrer P.H., Bogart R.S., Bush R.I. et al. The solar oscillations investigation – Michelson Doppler Imager. // Solar Phys. 1995. V. 162 (1–2). P. 129–188.
- [9] Zhang J., Richardson I.G., Webb D.F. et al. Correction to “Solar and interplanetary sources of major geomagnetic storms ( $Dst \leq -100$  nT) during 1996–2005.” // J. Geophys. Res. 2007. V. 112, A12103, doi: 10.1029/2007JA012891.
- [10] Крымский Г.Ф., Кузьмин А.И., Кривошапкин П.А. и др. Космические лучи и солнечный ветер. Новосибирск: Наука, СО АН СССР. 1981. 224 с.
- [11] Belov A., Baisultanova L., Eroshenko E. et al. Magnetospheric effects in cosmic rays during the unique magnetic storm on November 2003 // J. Geophys. Res. 2005. V. 110, A09S20, doi:10.1029/2005JA011067.
- [12] Vršnak B., Žic T., Falkenberg T.V. et al. The role of aerodynamic drag in propagation of interplanetary coronal mass ejections. // Astronomy and Astrophysics. 2010. V. 512, A43, doi: 10.1051/0004-6361/200913482.