

УДК 524.1.352

## ОСНОВНЫЕ ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВАРИАЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ И СОПУТСТВУЮЩИХ ПАРАМЕТРОВ В МАГНИТНЫХ ОБЛАКАХ

© 2024 г. М. А. Абунина<sup>1</sup>\*, А. В. Белов<sup>1</sup>, Н. С. Шлык<sup>1</sup>, А. А. Абунин<sup>1</sup>, А. А. Мелкумян<sup>1</sup>,  
И. И. Прямушкина<sup>1</sup>, В. А. Оленева<sup>1</sup>, В. Г. Янке<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н. В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Москва, Троицк, Россия  
\* e-mail: abunina@izmiran.ru

Поступила в редакцию 15.05.2023 г.

После доработки 23.06.2023 г.

Принята к публикации 28.09.2023 г.

Исследованы вариации основных параметров межпланетной среды, космических лучей и геомагнитной активности во время прохождения магнитных облаков мимо Земли (466 событий за период с 1967 по 2021 гг.). Рассмотрены распределения по времени указанных параметров внутри магнитных облаков. Показано, что максимальные значения скорости солнечного ветра, величины межпланетного магнитного поля и индексов геомагнитной активности чаще регистрируются в передней части магнитного облака, в то время как минимальные значения температурного индекса, плотности и экваториальной составляющей анизотропии космических лучей могут наблюдаться в любой части исследуемой структуры.

DOI: 10.31857/S0016794024010048, EDN: GQQPUX

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Магнитные облака (МО) изучаются довольно давно, еще в 80-х годах было введено определение МО и началось их активное исследование. Магнитное облако – это часть коронального выброса массы (КВМ) с особыми характеристиками, главными из которых являются плавное вращение компонент магнитного поля на большие углы и пониженная температура. Также из-за часто наблюдаемой повышенной величины магнитного поля и низких протонных температур МО свойственны низкие значения плазменной бета ( $\beta < 1$ ) [Burlaga et al., 1981, 1982; Klein and Burlaga, 1982; Gosling et al., 1990].

Влияние межпланетных возмущений, вызванных КВМ, и в частности магнитных облаков, на вариации плотности космических лучей (КЛ) исследовалось многими авторами. Отметим, что изменение плотности и анизотропии потока КЛ под влиянием межпланетных возмущений принято называть Форбуш-эффектом (ФЭ) [Forbush, 1937; Lockwood, 1971; Belov et al., 2001]. Например, Lockwood et al. [1991] показали, что роль МО в образовании ФЭ довольно не-

значительна, но если перед магнитным облаком была зарегистрирована ударная волна или оно было связано с выбросом типа гало, то его влияние на модуляцию КЛ более заметно [Badrudin et al., 1986; Parnahaj and Kudela, 2015]. Другие авторы указывают, что межпланетные выбросы корональной массы, содержащие магнитные облака, наоборот, значительно эффективнее модулируют космические лучи [Zhang and Burlaga, 1988; Burlaga, 1991; Richardson and Cane, 2011; Kumar and Badruddin, 2014; Belov et al., 2015; Masías-Meza et al., 2016; Fadaaq and Badruddin, 2021; Белов и др., 2015; Абунина и др., 2021]. Также есть работы, в которых показано, что межпланетные возмущения с магнитными облаками имеют в среднем большие значения основных параметров солнечного ветра (СВ), межпланетного магнитного поля (ММП) и геомагнитной активности (ГА) [Fadaaq and Badruddin, 2021b; Мелкумян и др., 2022a].

Чтобы изучить поведение основных параметров межпланетной среды и космических лучей, некоторые исследователи рассматривали отдельно межпланетные возмущения, содержащие

структуры магнитных облаков, с предшествующими им ударными волнами и без них. Так, Wu and Lepping [2016] показали, что средние значения скорости СВ и модуля ММП, а также продолжительность МО и интенсивность геомагнитных возмущений для магнитных облаков с предшествующей ударной волной выше (или больше), чем для тех же параметров в межпланетных возмущениях с магнитными облаками, но без ударной волны. Fadaaq and Badruddin [2021a] рассматривали также влияние МО с ударной волной и без нее на поток галактических КЛ (ГКЛ) и сделали вывод, что МО с ударными волнами эффективнее модулируют ГКЛ, причем ФЭ развивается как двухступенчатый, и первая и большая часть понижения регистрируется в области взаимодействия, а вторая — внутри МО. Однако в межпланетных возмущениях с МО без ударной волны регистрируемый ФЭ значительно меньше, и вся модуляция наблюдается именно внутри магнитного облака.

Также проводились исследования некоторых временных параметров ФЭ, но чаще всего рассматривались только продолжительность фазы спада и время восстановления потока КЛ. Например, Badruddin et al. [1986] установили, что длительность фазы спада не зависит от продолжительности МО, а время восстановления, наоборот, зависит при учете скорости и/или размера МО. Мелкумян и др., [2022b] рассматривали группы ФЭ, связанные с различными солнечными источниками, и исследовали другие временные параметры развития Форбуш-эффектов — время от начала события до момента регистрации: минимальной плотности космических лучей; максимального часового уменьшения плотности космических лучей; максимальной экваториальной анизотропии космических лучей; максимальной скорости СВ; максимальной индукции ММП; минимального *Dst*-индекса. Авторы показали, что развитие Форбуш-эффектов во времени существенно различается для исследуемых групп событий.

Некоторые авторы в своих исследованиях использовали метод наложения эпох [Badruddin et al., 1986; Fadaaq and Badruddin, 2021a,b], который не очень удобно применять, когда исследуемые события имеют разную продолжительность. В других работах [Hidalgo et al., 2002; Wang et al., 2003] рассматриваются единичные случаи с подробным описанием каждого магнитного облака.

Цель статьи — изучение временных распределений различных характеристик магнитных облаков, в частности основных параметров сол-

нечного ветра, межпланетного магнитного поля, космических лучей и геомагнитной активности за 1967—2021 гг.

## 2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Сейчас доступны многочисленные источники информации о данных солнечного ветра, межпланетной среды и геомагнитной активности. В предыдущих исследованиях [Абунина и др., 2021; Мелкумян и др., 2022] наша группа изучала свойства магнитных облаков, выделенных за период современных наблюдений, т.е. с 1995 г., когда стали доступны данные космического аппарата SOHO (<https://soho.nascom.nasa.gov/data/data.html>). В настоящем исследовании мы значительно расширили список магнитных облаков за счет данных, взятых из опубликованных в 1980—1990 гг. статей [Klein and Burlaga, 1982; Burlaga et al., 1982, 1987; Zhang and Burlaga, 1988; Tsurutani et al., 1988; King et al., 1982; Lepping et al., 1990; Lockwood et al., 1991; Bothmer and Schwenn, 1998]. Также использованы данные по МО из [Lynch et al., 2003, 2005; Wang et al., 2003; Huttunen et al., 2005; Marubashi and Lepping, 2007; Gopalswamy et al., 2010; Richardson and Cane, 2010; Kim et al., 2013] и интернет-каталогов:

- 1) <http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm>;
- 2) <http://www.iki.rssi.ru/omni/>;
- 3) [https://wind.nasa.gov/mfi/mag\\_cloud\\_public.html](https://wind.nasa.gov/mfi/mag_cloud_public.html);
- 4) [https://wind.nasa.gov/mfi/mag\\_cloud\\_S1.html](https://wind.nasa.gov/mfi/mag_cloud_S1.html);
- 5) [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/meetings/2010\\_flux-rope/LWS\\_CDAW2010\\_ICMETbl.html](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/meetings/2010_flux-rope/LWS_CDAW2010_ICMETbl.html).

Таким образом был составлен каталог из 466 магнитных облаков за период 1967—2021 гг., содержащий значения величины и времени регистрации экстремальных значений основных параметров СВ, ММП, ГА и КЛ внутри МО. Изменения межпланетных параметров, характерных для магнитных облаков, описаны различными авторами [Burlaga et al., 1981, 1982; Klein and Burlaga, 1982; Gosling et al., 1990; Kim et al., 2013; Ермолаев и др., 2009], основными являются: возросшая напряженность ММП, уменьшение вариаций магнитного поля, ненормально низкая температура протонов, спад скорости солнечного ветра, понижение плотности плазмы, возросшее отношение Fe/O, двунаправленный поток электронов. Эти признаки могут проявляться не все одновременно, но присутствие двух-трех из них уже выделяет структуру МО из

окружающего солнечного ветра (см., напр., [Gosling, 1990]).

Отметим, что авторы данной статьи не определяют границы и продолжительность магнитных облаков, а используют уже опубликованные результаты из указанных источников. Поскольку разные авторы используют несколько различающиеся критерии для определения структуры и границ МО, время начала и конца магнитных облаков может различаться на несколько часов. В такой ситуации мы выбирали один из этих источников с помощью сравнительного анализа и во многом субъективно.

Каждое из выделенных магнитных облаков было частью выброса корональной массы, в результате влияния которого был зарегистрирован Форбуш-эффект в данных нейтронных мониторов (НМ). Данные по ФЭ и сопутствующим параметрам СВ (скорость, плотность, температура, плазменная бета и др.), ММП, КЛ и ГА, а также многие рассчитываемые параметры (например, температурный индекс ( $KT$ ), времена регистрации экстремальных значений различных параметров) включены в базу данных Форбуш-эффектов и межпланетных возмущений (FEID – *Forbush Effects and Interplanetary Disturbances*, <https://tools.izmiran.ru/feid/>), созданную и поддерживаемую в ИЗМИРАН. Отметим, что температурный индекс подробно описан в [Мелкумян и др., 2020; Melkumyan et al., 2021] и представляет собой отношение наблюдаемой температуры к ожидаемой, которая, в свою очередь, рассчитывается из наблюдаемой скорости солнечного ветра:  $KT = T_{\text{obs}}/T_{\text{exp}}, \lg T_{\text{exp}} = a + b \lg V$ .

В FEID параметры СВ и ММП используются из базы данных OMNI (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>), список ударных волн (SSC) из <http://isgi.unistra.fr/data/download.php>, данные корональных выбросов массы из <https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CMElist/>. Данные по ГА брались из <ftp://ftp.gfz-potsdam.de/pub/home/obs/kp-ap/wdc/> [Matzka et al., 2021] и <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst/dir/index.html>. Параметры КЛ (вариации плотности, составляющие векторной анизотропии) рассчитывались методом глобальной съемки (GSM – *Global Survey Method*, [Белов и др., 2018]) по данным мировой сети НМ (NMDB – *Neutron Monitor Data Base*, <http://www01.nmdb.eu/>) для частиц с жесткостью 10 ГВ. Список исследуемых ФЭ с различными параметрами, в том числе рассчитанными для магнитных облаков, доступен по ссылке: ([http://spaceweather.izmiran.ru/dbs/mc/list\\_mc\\_466.pdf](http://spaceweather.izmiran.ru/dbs/mc/list_mc_466.pdf)).

В данной работе мы исследуем распределение по времени различных параметров межпланет-

ных возмущений внутри МО, используя продолжительность магнитного облака в процентах (продолжительность МО, независимо от его длительности в часах, принимается за 100%). Поэтому сравнение временных характеристик становится возможным без дополнительных сложностей, которые неизменно возникают, если рассматривать продолжительность магнитного облака в часах, поскольку структуры МО, наблюдаемых у Земли, имеют продолжительность от 3 до 83 ч.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В данной работе рассматриваются временные распределения различных параметров (в процентах), а именно – время регистрации экстремальных значений от начала МО: скорости СВ ( $TV_{\text{max}}$ ), напряженности ММП ( $TB_{\text{max}}$ ), индексов геомагнитной активности ( $TAp_{\text{max}}$ ,  $TKp_{\text{max}}$ ,  $TDst_{\text{min}}$ ), основных характеристик КЛ (амплитуды ФЭ  $-T_{\text{min}}$ , экваториальной составляющей анизотропии КЛ  $-TAx_{\text{max}}$ ), а также параметр  $TKT_{\text{min}}$  – время регистрации минимального значения температурного индекса. Все эти параметры мы рассматриваем внутри магнитных облаков, выражая время в процентах, чтобы можно было сравнивать все МО независимо от их продолжительности.

Приведем пример межпланетного возмущения, содержащего структуру магнитного облака (рис. 1). На верхней панели рис. 1 показаны часовые значения параметров межпланетной среды: индукция ММП и ее компоненты (левая шкала, общее поле  $B$  – сплошная кривая;  $Bx$  – треугольники вверх;  $By$  – треугольники вниз;  $Bz$  – ромбы) и скорость СВ (правая шкала, верхняя серая кривая  $V$ ). На второй панели приведены изменения температурного индекса. На третьей панели показаны изменения плотности КЛ ( $A_0$ , левая шкала) и экваториальной составляющей анизотропии ( $Ax$ , правая шкала). На нижней панели приведены индексы геомагнитной активности ( $Kp$ , левая шкала;  $Dst$ , правая шкала). Начало Форбуш-эффекта отмечено вертикальной темно-серой линией, заштрихованная область – регистрация магнитного облака.

Для примера был выбран самый значительный Форбуш-эффект за последние 10 лет. Это событие было зарегистрировано 3–5 ноября 2021 г., когда орбиты Земли достиг быстрый межпланетный корональный выброс массы, источником которого был КВМ (в 02:48 UT,  $V_0 = 1473$  км/с), ассоциированной с солнечной

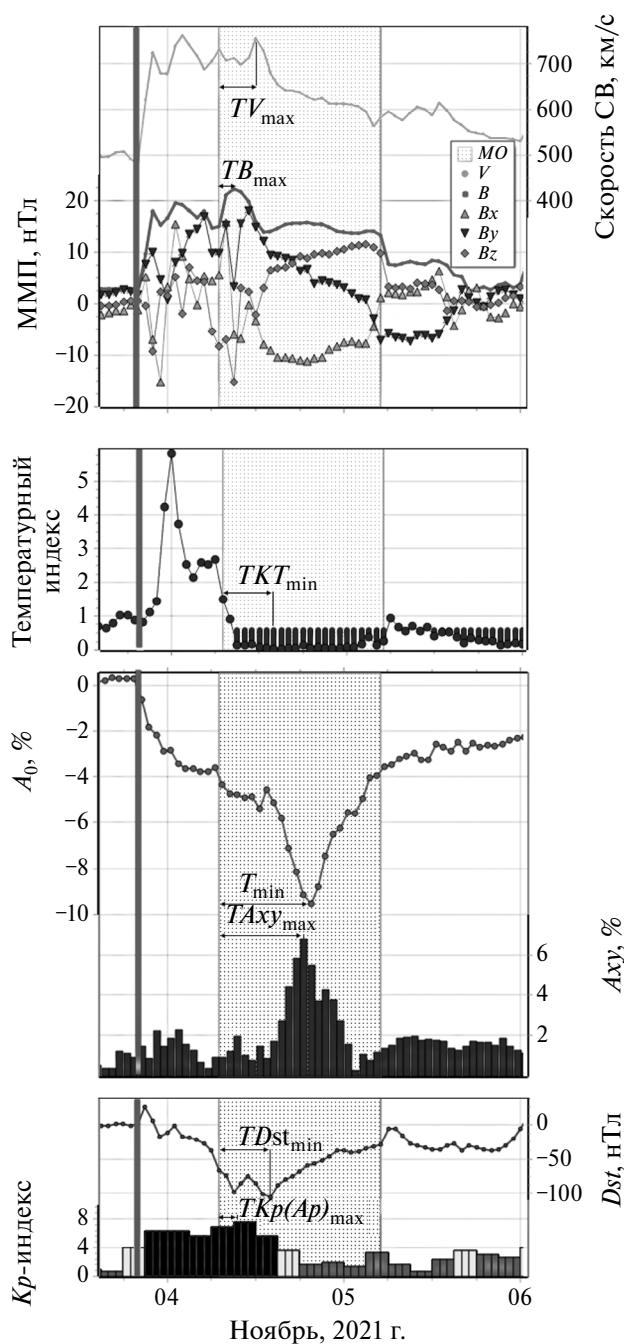


Рис. 1. Вариации основных параметров СВ, ММП, КЛ и ГА во время Форбуш-эффекта 3–5 ноября 2021 г.

вспышкой  $M1.7$  (с координатами N14E01) 2 ноября 2021 г. В результате был зарегистрирован ФЭ с амплитудой 9.8% и  $A_{xy_{max}} = 6.77\%$ . Во время этого события наблюдалась очень большая магнитная буря ( $Kp_{max} = 8-$ ,  $Dst_{min} = -105$  нТл) – одна из наиболее мощных в текущем солнечном цикле, а также значительные экстремальные пара-

метры межпланетной среды:  $V_{max} = 762$  км/с и  $B_{max} = 22.3$  нТл. На рис. 1 указаны моменты регистрации экстремальных значений всех перечисленных параметров. В показанном событии границы магнитного облака указаны в соответствии с данными интернет-каталога (<http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm>). Продолжительность данного МО – 22 ч, в течение этого периода амплитуда вариаций КЛ составила 5.8%, максимальное значение скорости СВ (757 км/с) внутри МО было зарегистрировано через 5 ч после начала облака, а максимальное значение ММП (22.3 нТл) – через 2 ч.

### 3.1. Параметры СВ и ММП

На рис. 2 приведены распределения времени достижения максимальных значений скорости СВ (рис. 2а) и индукции ММП (рис. 2б) внутри МО. Напомним, что в данной работе продолжительность МО независимо от его длительности в часах принимается за 100%, поэтому указание на временные части МО приводится в процентах. Подобные распределения уже были показаны в предыдущей работе [Абунина и др., 2021], здесь они построены на большем количестве событий, но в целом хорошо согласуются с опубликованными ранее. Из рис. 2 видно, что максимальные значения скорости СВ часто наблюдаются (в 46% событий) в первые 10% времени от начала МО (первые два столбца гистограммы), а максимальные значения ММП – в начале (в каждом пятом МО) и в середине МО (в промежутке от 25 до 55 % времени – в 28% событий). Те немногие события, в которых максимальные значения скорости СВ и индукции ММП зарегистрированы в последние часы (последние 10% времени МО), связаны с взаимодействием со следующим, более скоростным, “набегающим” межпланетным возмущением.

Далее мы построили аналогичные гистограммы, убрав из рассмотрения те события, в которых после окончания регистрации структуры МО следующее межпланетное возмущение началось меньше чем через 5 ч (рис. 3). Поскольку взаимодействие со следующим возмущением – явление нередкое (см. напр., [Shlyk et al., 2022]), из исследуемой выборки осталось 300 МО, т.е. примерно в каждом третьем случае новое межпланетное возмущение начиналось практически сразу после исследуемого, а иногда даже во время еще не закончившегося. Из рис. 3 видно, что в целом форма распределений не изменилась и в процентном соотношении сохранилась: в половине случаев максимальная скорость (рис. 3а) регистрируется в первые 10% времени, а макси-

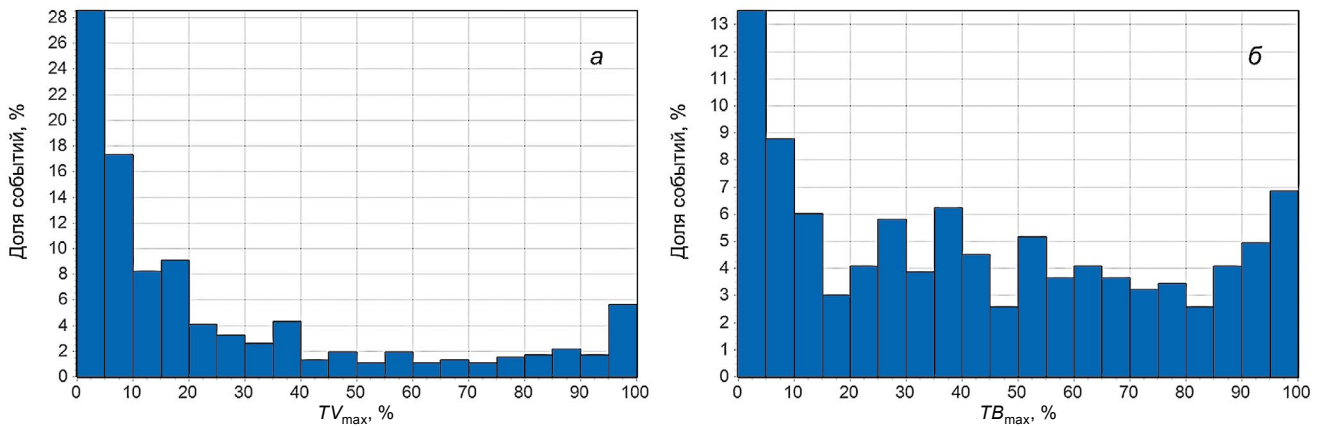


Рис. 2. Распределения максимальных значений скорости СВ (а) и индукции ММП (б) внутри МО.

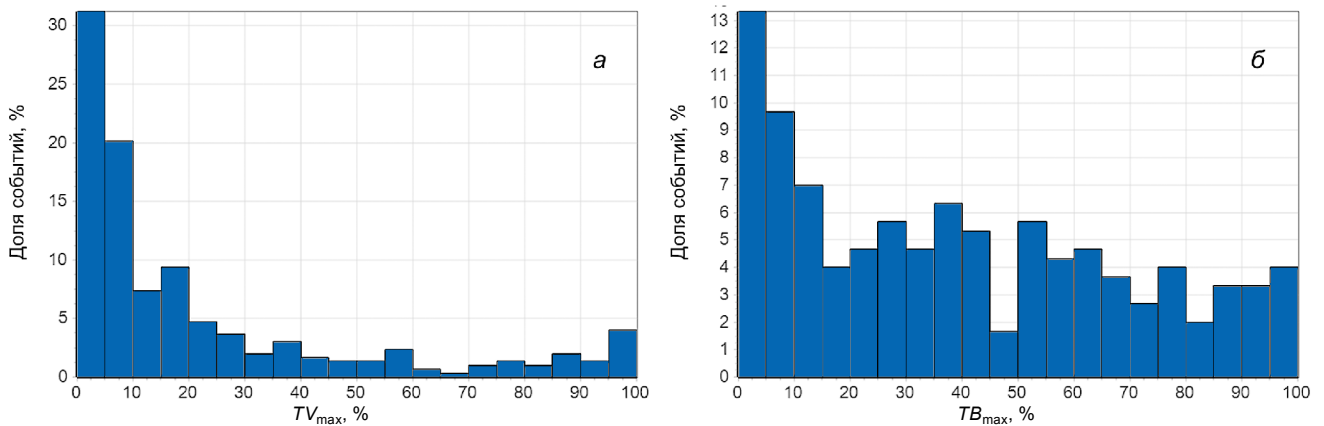


Рис. 3. Распределения максимальных значений скорости СВ (а) и индукции ММП (б) внутри МО в межпланетных возмущениях без взаимодействия со следующим событием.

мум ММП (рис. 3б) часто наблюдается в начале (в 23% событий) и в середине (в промежутке от 25 до 55% времени – в 29% событий) МО, а событий с максимальными значениями скорости СВ и индукции ММП в конце МО (последние два столбца гистограмм) практически не осталось.

В данной работе мы рассматриваем еще один (рассчитываемый) параметр солнечного ветра – температурный индекс (*KT*). Одним из основных способов применения индекса является возможность идентификации типа солнечного источника: в [Мелкумян и др., 2022] было показано, что межпланетные возмущения, вызванные КВМ, имеют меньшие значения температурного индекса, чем межпланетные возмущения, вызванные высокоскоростными потоками из корональных дыр. Из определения магнитного облака также следует, что это обычно структуры с пониженной температурой, поэтому в рас-

пределении минимальных значений температурного индекса внутри МО наблюдается довольно ровная картина – минимальные значения могут наблюдаться в любой части МО (в интервале до 80% времени для каждого пятипроцентного интервала события с минимальными значениями температурного индекса распределены довольно равномерно – от 3 до 8%). Только для промежутка 90–100% количество МО с самыми низкими температурами падает до 2.0–2.5%, что также связано со взаимодействием со следующим межпланетным возмущением или с более быстрым фоновым ветром (в результате взаимодействия температура повышается).

### 3.2. Геомагнитная активность

Далее мы рассмотрели временные распределения экстремальных значений геомагнитных

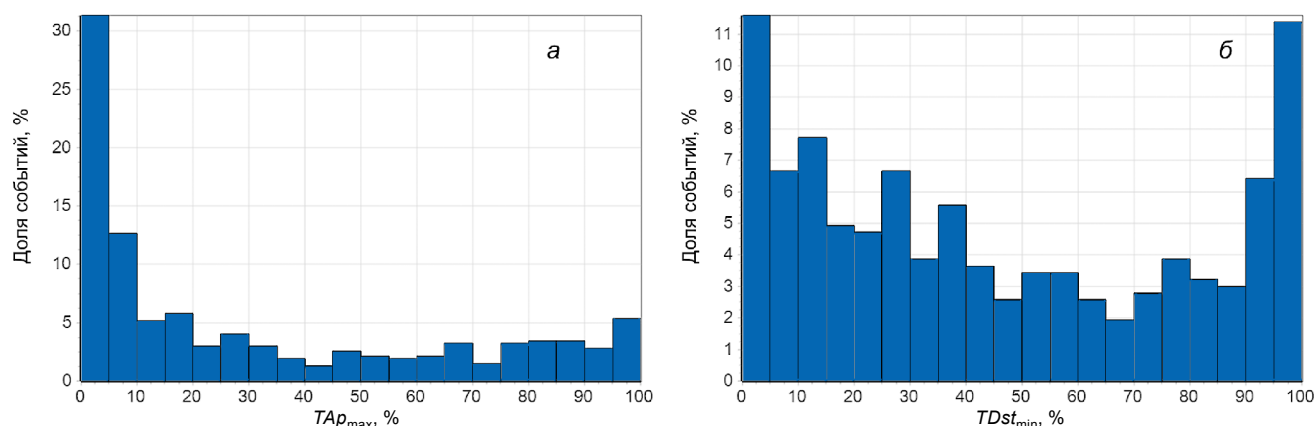


Рис. 4. Распределения экстремальных значений геомагнитных индексов внутри МО: (а)  $A_p$ -индекса и (б)  $Dst$ -индекса.

индексов внутри МО (см. рис. 4). Во многих исследуемых событиях (44%) максимальный  $A_p$ -индекс регистрировался в первые 10% времени (см. рис. 4а). И если рассмотреть только те события, в которых  $TB_{\max} \leq 10\%$  (108 событий), то в 83% случаев  $A_{p_{\max}}$  наблюдается именно в начале МО (в первые 20% времени – первые четыре столбца гистограммы). Это вполне ожидаемый результат из-за тесной связи геомагнитной активности и величины ММП в межпланетном возмущении (напр., [Tsurutani and Gonzalez, 1997]). Однако в распределении минимального значения  $Dst$ -индекса наблюдается несколько иная картина (см. рис. 4б): есть два явно выраженных пика: регистрация минимальных значений в самом начале МО (85 событий, в первые 10% времени) и в самом конце МО (83 события, в последние 10% времени). Мы дополнительно рассмотрели те магнитные облака (21 событие), в которых минимальное значение  $Dst$ -индекса было зарегистрировано в самом конце МО (в последние 10% времени), а максимальное значение  $A_p$ -индекса, наоборот, в первые часы МО (в первые 10% времени). Все эти события можно разделить на две группы: 1) 13 МО, внутри которых вариации  $A_p$  и  $Dst$  индексов были незначительны ( $Kp_{\max} \leq 4$ , среднее  $|Dst\_range| \approx 26$  нТл, где  $Dst\_range$  – это изменение  $Dst$  индекса внутри МО); 2) 8 МО, во время прохождения которых были зарегистрированы магнитные бури, и величина  $Kp_{\max}$  в начале события оказалась немного больше, чем в конце. Таким образом, выявленная для небольшого количества событий особенность объясняется флуктуациями геомагнитных индексов при сравнительно равномерном их распределении внутри МО.

### 3.3. Вариации космических лучей

Далее мы рассмотрели распределение времени достижения минимума плотности КЛ внутри МО (рис. 5). Из соображений масштаба на рис. 5 не приведены события с амплитудами  $>7\%$  (для частиц с жесткостью 10 ГВ), но треугольниками указаны времена регистрации максимальных вариаций плотности КЛ внутри МО. Эти ФЭ были зарегистрированы 17.02.1978 г., 06.11.2001 г., 30.10.2003 г., 28.10.1991 г., 29.10.2003 г. и 26.07.2004 г. с амплитудами внутри МО 16.9; 10.0; 10.1; 9.5; 11.6; 11.0 % соответственно.

Из рис. 5 видно, что минимум плотности КЛ внутри МО может достигаться в любой части МО. Группа с минимумом плотности КЛ в середине облака связана с главным механизмом его создания – магнитной ловушкой, в центре которой формируется ФЭ. Нельзя забывать, что ФЭ создается и областью взаимодействия, и ударной волной, поэтому минимум может наблюдаться и в начале МО. В связи с этим мы подробнее рассмотрели те магнитные облака, в которых максимальные значения скорости СВ и индукции ММП были зарегистрированы в самом начале МО (события ( $TV_{\max} \leq 10\%$ ,  $TB_{\max} \leq 10\%$ ). Всего таких МО получилось 60. Для выбранных событий оказалось, что в 70% случаев минимум плотности КЛ наблюдался в первые 30% времени от момента регистрации МО.

Также есть довольно большая группа событий (73 МО) с минимумом плотности КЛ в конце МО ( $T_{\min} \geq 90\%$ ). В этой группе более чем в половине случаев (в 44 МО)  $B_{\max}$  регистрируется во второй половине МО, величина ММП повышенная (среднее значение:  $14.7 \pm 0.6$  нТл), скорость СВ – невысокая (среднее значение:  $444 \pm 10$  км/с), и не регистрируются большие амплитуды вариаций

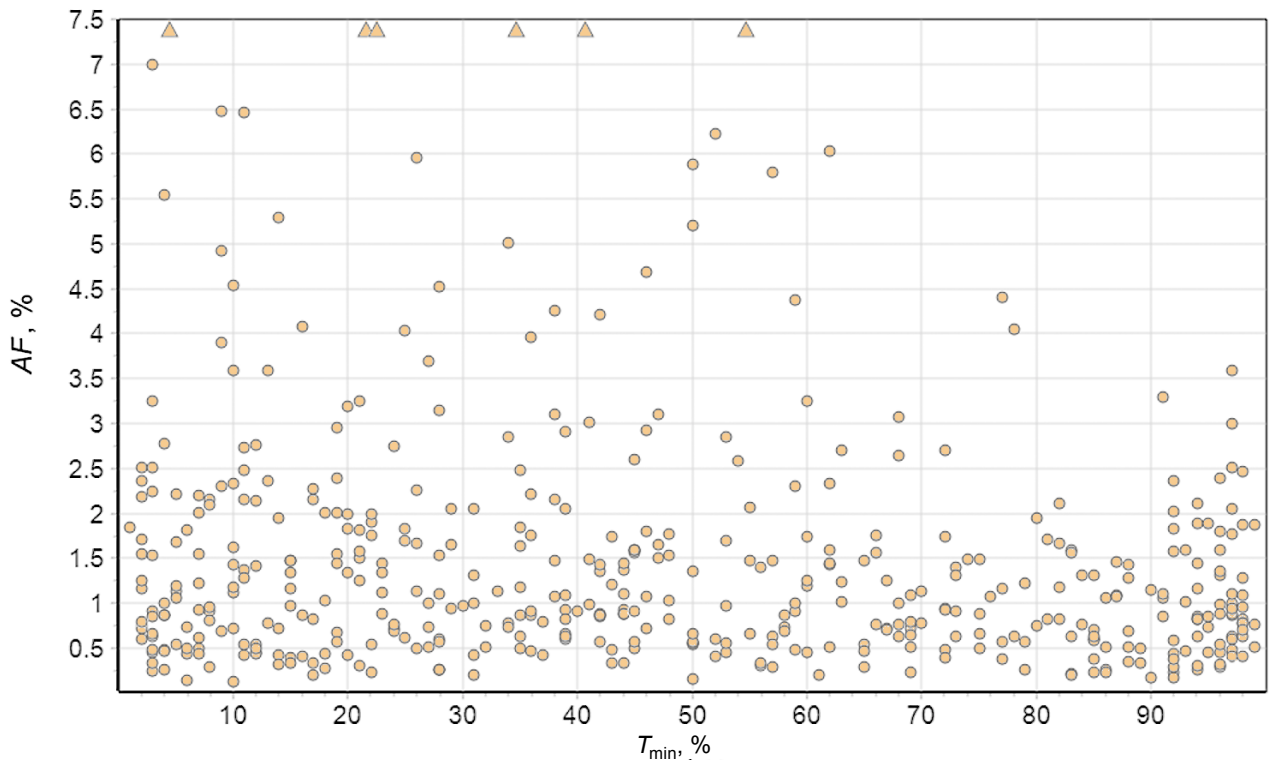


Рис. 5. Связь максимальных значений вариаций плотности КЛ внутри МО и времени их регистрации. Треугольниками указаны времена максимальных вариаций плотности КЛ внутри МО для ФЭ величиной  $>7\%$ .

ций КЛ (среднее значение:  $1.1 \pm 0.09\%$ ). К тому же в части событий (28 МО) регистрация минимальных значений плотности КЛ в конце МО связана с взаимодействием со следующим событием.

Еще одним из основных параметров КЛ является анизотропия. Мы рассмотрели время регистрации максимального значения экваториальной составляющей анизотропии КЛ внутри МО и получили, что только в 19% случаев максимум достигается в первые 10% времени от момента регистрации МО. В остальное время распределение довольно равномерное: от 2 до 7% в каждый пятипроцентный интервал времени.

#### 4. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Был составлен каталог, содержащий данные об основных параметрах межпланетной среды, космических лучей и геомагнитной активности при прохождении мимо Земли 466 межпланетных возмущений, содержащих структуру магнитного облака, за 1967–2021 гг. ([http://spaceweather.izmiran.ru/dbs/mc/list\\_mc\\_466.pdf](http://spaceweather.izmiran.ru/dbs/mc/list_mc_466.pdf)).

Все рассмотренные магнитные облака весьма разнообразны. Было показано, что в 35% случаев межпланетные возмущения, содержащие МО, взаимодействуют с другими межпланетными возмущениями (время до регистрации следующего возмущения составляет менее 5 ч).

Были изучены временные характеристики основных параметров СВ, ММП, ГА и КЛ внутри МО и показано, что:

- максимальные значения скорости СВ, напряженности ММП и геомагнитной активности чаще наблюдаются в начале МО;
- минимальные значения плотности КЛ и максимальная анизотропия КЛ могут наблюдаться в любой части МО;
- при регистрации максимальных значений скорости СВ и напряженности ММП в начале МО минимум плотности КЛ также регистрируется в первой половине магнитного облака;
- при регистрации максимального значения ММП во второй половине МО и невысоких скоростях СВ минимальные значения плотности КЛ регистрируются в конце магнитного облака.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абунина М.А., Белов А.В., Шлык Н.С., Абунин А.А., Оленева В.А., Прямушкина И.И., Янке В.Г. Форбуш-эффекты, созданные выбросами солнечного вещества с магнитными облаками // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 61. № 5. С. 572–582. 2021.  
<https://doi.org/10.31857/S0016794021050023>
- Белов А.В., Абунин А.А., Абунина М.А., Ерошенко Е.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Вариации плотности галактических космических лучей в магнитных облаках // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 55. № 4. С. 445–456. 2015.  
<https://doi.org/10.7868/S0016794015040021>
- Белов А.В., Ерошенко Е.А., Янке В.Г., Оленева В.А., Абунина М.А., Абунин А.А. Метод глобальной съемки для мировой сети нейтронных мониторов // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 58. № 3. С. 374–389. 2018.  
<https://doi.org/10.7868/S0016794018030082>
- Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю. Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2000 гг. // Космич. исслед. Т. 47. № 2. С. 99–113. 2009.
- Мелкумян А.А., Белов А.В., Абунина М.А., Шлык Н.С., Абунин А.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Сходство и различие Форбуш-понижений, связанных с потоками из корональных дыр, волоконными выбросами и выбросами из активных областей // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 62. № 3. С. 283–301. 2022а.  
<https://doi.org/10.31857/S0016794022030117>
- Мелкумян А.А., Белов А.В., Абунина М.А., Шлык Н.С., Абунин А.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Особенности поведения временных параметров Форбуш-понижений, связанных с разными типами солнечных и межпланетных источников // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 62. № 2. С. 155–170. 2022б.  
<https://doi.org/10.31857/S0016794022010138>
- Мелкумян А.А., Белов А.В., Абунина М.А., Абунин А.А., Ерошенко Е.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Поведение скорости и температуры солнечного ветра в межпланетных возмущениях, создающих Форбуш-понижения // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 60. № 5. С. 547–556. 2020.  
<https://doi.org/10.31857/S0016794020040100>
- Badruddin, Yadav R.S., Yadav N.R. Influence of magnetic clouds on cosmic ray intensity variation // Solar Phys. V. 105. № 2. P. 413–428. 1986.  
<https://doi.org/10.1007/BF00172057>
- Belov A.V., Eroshenko E.A., Oleneva V.A., Struminsky A.B., Yanke V.G. What determines the magnitude of Forbush decreases? // Adv. Space Res. V. 27. P. 625–630. 2001.
- Belov A., Abunin A., Abunina M., Eroshenko E., Oleneva V., Yanke V., Papaioannou A., Mavromichalaki H. Galactic cosmic ray density variations in magnetic clouds // Solar Phys. V. 290. P. 1429–1444. 2015.  
<https://doi.org/10.1007/s11207-015-0678-z>
- Bothmer V., Schwenn R. The structure and origin of magnetic clouds in the solar wind // Ann. Geophys. V. 16. P. 1–24. 1998.
- Burlaga L., Sittler E., Mariani F., Schwenn R. Magnetic loop behind an interplanetary shock: Voyager, Helios, and IMP 8 observations // J. Geophys. Res. V. 86. P. 6673–6684. 1981.  
<https://doi.org/10.1029/JA086iA08p06673>
- Burlaga L.F., Behannon K.W. Magnetic clouds: Voyager observations between 2 and 4 AU // Solar Phys. V. 81. P. 181–192. 1982.  
<https://doi.org/10.1007/BF00151989>
- Burlaga L.F., Behannon K.W., Klein L.W. Compound Streams, Magnetic Clouds, and Major Geomagnetic Storms // J. Geophys. Res. V. 92. № A6. P. 5725–5734. 1987.
- Burlaga L. Magnetic Clouds / Physics of the Inner Heliosphere II. Physics and Chemistry in Space (Space and Solar Physics). V. 21. Eds. Schwenn R., Marsch E. Berlin, Heidelberg: Springer, 1991. 352 p.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-642-75364-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-75364-0_1)
- Fadaaq M., Badruddin B. Modulation of galactic cosmic rays due to magnetic clouds and associated structures in the interplanetary space: 1996–2018 // Astrophys. J. V. 64. № 2. P. 210–218. 2021а.  
<https://doi.org/10.1007/s10511-021-09682-3>
- Fadaaq M., Badruddin B. Study of transient modulation of galactic cosmic rays due to interplanetary manifestations of coronal mass ejections: 2010–2017 // Astrophys. Space Sci. V. 366. Article ID 10. 2021b.  
<https://doi.org/10.1007/s10509-021-03918-6>
- Forbush S.E. On the Effects in Cosmic-Ray Intensity Observed During the Recent Magnetic Storm // Phys. Rev. V. 51. P. 1108–1109. 1937.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRev.51.1108.3>
- Gopalswamy N., Xie H., Mäkelä P., Akiyama S., Yashiro S., Kaiser M.L., Howard R.A., Bougeret J.-L. Interplanetary shocks lacking type II radio bursts // Astrophys. J. V. 710. P. 1111–1126. 2010.  
<https://doi.org/10.1088/0004-637X/710/2/1111>
- Gosling J.T. Coronal Mass Ejections and Magnetic Flux Ropes in Interplanetary Space // Geophys. Monogr. Ser. V. 58. P. 343–364. 1990.
- Gosling J.T., Bame S.J., McComas D.J., Phillips J.L. Coronal mass ejections and large geomagnetic storms // Geophys. Res. Lett. V. 17. № 7. P. 901–904. 1990.  
<https://doi.org/10.1029/GL017i007p00901>
- Hidalgo M.A., Cid C., Viñas A.F., Sequeiros J. A non-force-free approach to the topology of magnetic clouds in the solar wind // J. Geophys. Res. V. 107. № A1. P. SSH1-1–SSH 1-7. 2002.  
<https://doi.org/10.1029/2001JA900100>
- Huttunen K., Schwenn R., Bothmer V., Koskinen H. Properties and geoeffectiveness of magnetic clouds in the rising, maximum and early declining phases of solar cycle 23 // Ann. Geophys. V. 23. P. 625–641. 2005.  
<https://doi.org/10.5194/angeo-23-625-2005>
- Kim R.-S., Gopalswamy N., Cho K.-S., Moon Y.-J., Yashiro S. Propagation Characteristics of CMEs Associated with Magnetic Clouds and Ejecta // Solar Phys. V. 284. P. 77–88. 2013.  
<https://doi.org/10.1007/s11207-013-0230-y>



- King J.H., Lepping R.P., Sullivan J.D. On the Complex State of the Interplanetary Medium of July 28–29, 1977 // *J. Geophys. Res.* V. 87. № A8. P. 5881–5887. 1982.
- Klein L., Burlaga L. Interplanetary magnetic clouds at 1 AU // *J. Geophys. Res.* V. 87. № A2. P. 613–624. 1982. <https://doi.org/10.1029/JA087iA02p00613>
- Kumar A., Badruddin Interplanetary coronal mass ejections, associated features, and transient modulation of galactic cosmic rays // *Solar Phys.* V. 289. P. 2177–2205. 2014. <https://doi.org/10.1007/s11207-013-0465-7>
- Lepping R.P., Jones J.A., Burlaga L.F. Magnetic Field Structure of Interplanetary Magnetic Clouds at 1 AU // *J. Geophys. Res.* V. 95. № A8. P. 11957–11965. 1990.
- Lockwood J.A. Forbush decreases in the cosmic radiation // *Space Sci. Revs.* V. 12. № 5. P. 658–715. 1971. <https://doi.org/10.1007/BF00173346>.
- Lockwood J.A., Webber W.R., Debrunner H. Forbush decreases and interplanetary magnetic field disturbances: Association with magnetic clouds // *J. Geophys. Res.* V. 96. № A7. P. 11587–11604. 1991. <https://doi.org/10.1029/91JA01012>
- Lynch B.J., Zurbuchen T.H., Fisk L.A. Internal structure of magnetic clouds: Plasma and composition // *J. Geophys. Res.* V. 108. № A6. P. SSH6-1–SSH 6-14. 2003. <https://doi.org/10.1029/2002JA009591>
- Lynch B.J., Gruesbeck J.R., Zurbuchen T.H., Antiochos S.K. Solar cycle–dependent helicity transport by magnetic clouds // *J. Geophys. Res.* V. 110. Article ID A08107. 2005. <https://doi.org/10.1029/2005JA011137>
- Marubashi K., Lepping R. Long-duration magnetic clouds: a comparison of analyses using torus–and cylinder-shaped flux rope models // *Ann. Geophys.* V. 25. № 11. P. 2453–2477. 2007. <https://doi.org/10.5194/angeo-25-2453-2007>
- Masías-Meza J.J., Dasso S., D’emoulin P., Rodriguez L., Janvier M. Superposed epoch study of ICME sub-structures near Earth and their effects on Galactic cosmic rays // *Astronomy & Astrophysics.* V. 592. Article ID A118. 2016. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201628571>
- Matzka J., Stolle C., Yamazaki Y., Bronkalla O., Morschhauser A. The geomagnetic Kp index and derived indices of geomagnetic activity // *Space Weather.* V. 19. № 5. Article ID e2020SW002641. 2021.
- Melkumyan A.A., Belov A.V., Abunina M.A., Abunin A.A., Eroshenko E.A., Yanke V.G., Oleneva V.A. Solar wind temperature-velocity relationship over the last five solar cycles and Forbush decreases associated with different types of interplanetary disturbance // *MNRAS.* V. 500. P. 2786–8797. 2021. <https://doi.org/10.1093/mnras/staa3366>
- Parnahaj I., Kudela K. Forbush decreases at a middle latitude neutron monitor: relations to geomagnetic activity and to interplanetary plasma structures // *Astrophys. Space Sci.* V. 359. Article ID 35. 2015. <https://doi.org/10.1007/s10509-015-2484-3>
- Richardson I.G., Cane H.V. Near-Earth Interplanetary Coronal Mass Ejections during Solar Cycle 23 (1996–2009): Catalog and summary of properties // *Solar Phys.* V. 264. P. 189–237. 2010. <https://doi.org/10.1007/s11207-010-9568-6>
- Richardson I.G., Cane H.V. Galactic Cosmic Ray Intensity Response to Interplanetary Coronal Mass Ejections/Magnetic Clouds in 1995–2009 // *Solar Phys.* V. 270. P. 609–627. 2011. <https://doi.org/10.1007/s11207-011-9774-x>
- Shlyk N.S., Belov A.V., Abunina M.A., Abunin A.A., Oleneva V.A., Yanke V.G. Forbush decreases caused by paired interacting solar wind disturbances // *MNRAS.* V. 511. № 4. P. 5897–5908. 2022. <https://doi.org/10.1093/mnras/stac478>
- Tsurutani B., Gonzalez W., Tang F., Akasofu S.I., Smith E.J. Origin of interplanetary southward magnetic fields responsible for major magnetic storms near solar maximum (1978–1979) // *J. Geophys. Res.* V. 93. № A8. P. 8519–8531. 1988.
- Tsurutani B., Gonzalez W. The Interplanetary Causes of Magnetic Storms: A Review. Eds. Tsurutani B.T., Gonzalez W.D., Kamide Y., Arballo J.K. *Geophys. Monogr. Ser. / Wash. DC Am. Geophys. Union.* P. 77–89. 1997. <https://doi.org/10.1029/GM098p0077>
- Wang Y.M., Ye P.Z., Wang S. Multiple magnetic clouds: Several examples during March–April 2001 // *J. Geophys. Res.* V. 108. № A10. Article ID 1370. 2003. <https://doi.org/10.1029/2003JA009850>
- Wu C.-C., Lepping R.P. Relationships Among Geomagnetic Storms, Interplanetary Shocks, Magnetic Clouds, and Sunspot Number During 1995–2012 // *Solar Phys.* V. 291. P. 265–284. 2016. <https://doi.org/10.1007/s11207-015-0806-9>
- Zhang G., Burlaga L. Magnetic clouds, geomagnetic disturbances, and cosmic ray decreases // *J. Geophys. Res.* V. 93. № A4. P. 2511–2518. 1988. <https://doi.org/10.1029/JA093iA04p02511>

## **Main time characteristics of cosmic ray variations and related parameters in magnetic clouds**

**M. A. Abunina<sup>1, \*</sup>, A. V. Belov<sup>1</sup>, N. S. Shlyk<sup>1</sup>, A. A. Abunin<sup>1</sup>, A. A. Melkumyan<sup>1</sup>,  
I. I. Pryamushkina<sup>1</sup>, V. A. Oleneva<sup>1</sup>, V. G. Yanke<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup> Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of Russian Academy of Sciences (IZMIRAN), Moscow, Troitsk, Russia*

*\* e-mail: abunina@izmiran.ru*

The behavior of the main parameters of the interplanetary medium, cosmic rays, and geomagnetic activity during the passage of magnetic clouds past the Earth (465 events over the period from 1967 to 2021) has been studied. Time distributions of these parameters inside magnetic clouds are considered. It is shown that the maximum values of the solar wind velocity, interplanetary magnetic field strength, and geomagnetic activity indices are more often recorded at the beginning of the magnetic cloud, while the minimum values of the temperature index, cosmic ray density and equatorial component of anisotropy can be observed in any part of the structure under study.