

Научная статья

УДК 523.62_726, 533.9, 537.591, 550.385

EDN TQJLBM

DOI 10.17150/2713-1734.2023.5(1).75-90



В.А. Пархомов

*Байкальский государственный университет,
г. Иркутск, Российская Федерация*

В.Г. Еселевич

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
г. Иркутск, Российская Федерация*

М.В. Еселевич

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
г. Иркутск, Российская Федерация*

Г.В. Семёнов

*Заполярный государственный университет
им. Н.М. Федоровского,
г. Норильск, Российская Федерация*

Магнитные полости в солнечном ветре, их влияние на положение головной околоземной ударной волны и геомагнитную активность

Аннотация. На основании детального исследования спорадического потока солнечного ветра (СВ), зарегистрированного на 1а.е. 15–16.12.2013, а также 13 отобранных спорадических потоков СВ за период 1996–2012 гг. внутри структуры ICME выделена область, называемая «магнитная полость» (“magnetic cavity”). Она характеризуется и определяется по высокой степени антикорреляции концентрации плазмы N и модуля ММП B . На ее передней границе резко падает N и возрастает B , а на задней границе наоборот — резко растет N и падает B . Внутри полости, длительность которой может быть в интервале $\approx 1\text{--}30$ ч N и B мало меняются. По данным измерений на спутниках ТНЕ и ТНВ, расположенных соответственно в дневной и ночной магнитосфере показано, что воздействие полости на головную околоземную ударную волну (ГОУВ) приводит к резкому падению модуля геомагнитного поля по продолжительности соответствующего длительности магнитной полости и к резкому смещению ГОУВ в сторону Солнца.

Ключевые слова. Магнитная полость, головная ударная волна, спорадические потоки солнечного ветра, разряжения плотности, возрастание модуля межпланетного магнитного поля.

Информация о статье. Дата поступления: 11 декабря 2022 г.; дата принятия к публикации: 30 января 2023 г.; дата онлайн-размещения: 3 февраля, 2023 г.

Original article

V.A. Parkhomov

*Baikal State University,
Irkutsk, Russian Federation*

V.G. Eselevich*Institute of Solar-Terrestrial Physics,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russian Federation***M.V. Eselevich***Institute of Solar-Terrestrial Physics,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russian Federation***G.V. Semenov***Fedorovsky Polar State University,
Norilsk, Russian Federation*

Magnetic Cavities in the Solar Wind, Their Influence on the Bow Shock Position and Geomagnetic Activity

Abstract. Based on a detailed study of the sporadic solar wind (SW) recorded at 1 a.u. December 15–16, 2013, as well as 13 selected sporadic SW streams for the period 1996–2012, within the structure ICME, a region referred to as a "magnetic cavity" ("magnetic cavity") is distinguished. It is characterized and determined by a high degree of anticorrelation between the plasma density N and the IMF modulus B . At its front boundary, N sharply drops and B increases, and at the rear boundary, on the contrary, N sharply increases and B falls. Inside the cavity, the duration of which can be in the interval ≈ 1 –30 hours N and B change little. According to measurements on the TNE and TNV satellites located in the daytime and nighttime magnetospheres, respectively, it is shown that the effect of the cavity on the bow shock wave (NESH) leads to a sharp drop in the geomagnetic field modulus along the duration corresponding to the duration of the magnetic cavity and to a sharp shift of the GOAW towards the Sun.

Keywords. Magnetic cavity, bow shock, sporadic solar wind streams, density rarefaction, increase in the modulus of the interplanetary magnetic field.

Article info. Received 11 December, 2022; Accepted 30 January, 2023; Available online 3 February, 2023.

Введение

Головная околоземная ударная волна находится под постоянным воздействием квазистационарного солнечного ветра (СВ) и является результатом его взаимодействия с магнитосферой Земли [1, p. 129]. В отличие от квазистационарного СВ, спорадический СВ, источником которого на Солнце являются корональные выбросы массы (КВМ), на орбите Земли регистрируется в виде последовательности из ударной волны (shock), ударно-нагретой плазмы (sheath) и межпланетного коронального выброса массы (МКВМ) в виде магнитного облака (magnetic cloud (MC), содержащего *магнитную полость (magnetic cavity)* или в виде выброса плазмы (ejecta) [2]. В цитируемой статье выполнен анализ появления каждого из этих событий в течение 1976–2000 гг. и на круговой диаграмме представлены их доли (в процентах). Из диаграммы следует то, что наиболее редко регистрируются MC и Sheath of MC.

Внутри МС или ежета часто регистрируется изгибающийся тонкий магнитный жгут с повышенной плотностью плазмы, являющийся выбросом с поверхности Солнца волокна (или эруптивным протуберанцем). Согласно [3; 4], это волокно является диамагнитной структурой (ДС), которая представляет собой последовательность микро ДС меньших масштабов. Сами ДС определяются по высокому отрицательному коэффициенту корреляции между модулем межпланетного магнитного поля (ММП) и концентрацией СВ в местах их измерений. Имея большой размер в радиальном направлении ($\approx 763 R_E$, где R_E — радиус Земли), ДС обтекает магнитосферу. В то же время микроДС, имея размеры $\leq 13 R_E$, проходят через головную ударную волну и магнитопаузу в виде замагниченного плазмоида. При движении в хвост магнитосферы концентрация ионов в плазмоеде возрастает от 10 см^{-3} до 90 см^{-3} , а его скорость падает.

Кроме того, в МС, часто, регистрируются магнитные дыры (magnetic hole), представляющие собой участки СВ, на которых происходили кратковременные ($\sim 2 \text{ min}$) падения модуля ММП до значений $|B| < 1$. Магнитные дыры были обнаружены на расстояниях от 0.3 до 17 АЕ и изучены в работах [5–7]. Их воздействие на магнитосферу Земли до сих пор до конца не изучено.

В каталоге [2; 8] содержатся события, названные RARE (области разрежения), характеризующиеся резким падением плотности солнечного ветра до

$1.7 \pm 1.8 \text{ см}^{-3}$. Отметим расхождение между диаграммой, приведенной в статье [2] и каталогом [8; 9]. На диаграмме в статье они не представлены и им не дается детального описания.

В данной работе рассматривается участок в составе спорадического потока СВ, называемый *магнитная полость (magnetic cavity)*, и анализируются эффекты ее воздействия на магнитосферу Земли.

Особенности обнаруженной структуры в быстром потоке солнечного ветра рассмотрим на примере магнитных полостей, зарегистрированных на 1 а.е. 15.12.2013 и 19.10.1998, а затем рассмотрим статистические данные.

Данные и методы анализа

Для решения поставленной задачи использованы одноминутные значения параметров СВ и ММП, приведенные к положению околоземной головной ударной волны по данным ОМНИ¹. Также использованы наблюдения СВ и ММП на спутниках ACE, Wind, Geotai и серии THEMIS (THA, THB, THC, THD, THE), а также результаты регистрации геомагнитного поля и потоков протонов и электронов на геостационарной орбите на спутниках GOES-13 и GOES-15². Гео-

1 1 URL: https://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp_public.

2 URL: https://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/new_avg.

магнитная активность оценивалась индексами AE, AL, SYMH, PC по данным OMNI. Орбиты спутников, данные которых использованы для описания свойств магнитной полости показаны на рис. 1.

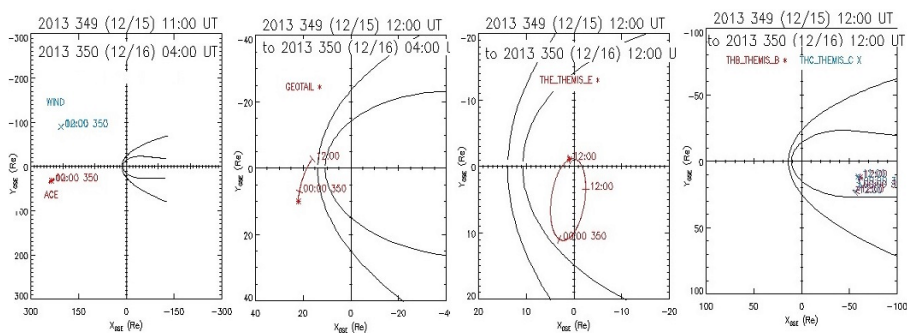


Рис. 1. Положения спутников в солнечном ветре и внутри магнитосферы во время регистрации магнитной полости 15–16.12.2013

Свойства магнитной полости на примере события 15.12.2013 г.

Определение и первый предварительный анализ понятия «магнитная полость» дадим на примере события 15.12.2013 г., приведенного на рис. 2а, б. На нем представлены результаты регистрации потока квазистационарного быстрого солнечного ветра из корональной дыры с максимальной скоростью $V_{\max} \approx 580$ км/с на орбите Земли в течение (14–16).12.2013 гг. Согласно каталога наблюдений выбросов корональной массы на спутнике Wind ICME Catalogue 1995–2021 [ICME Catalogue Browse.pdf] после этого потока СВ в интервале времени, начиная, с момента $\approx 16:47$ UT 15.12.2013 и по $\approx 05:30$ UT 16.12.2013 наблюдается межпланетный корональный выброс массы (ICME). Внутри этого ICME, начиная с момента $\approx 17:30$ UT (15.12.2013) и кончая моментом $\approx 02:00$ UT (16.12.2013) длительностью ≈ 8 ч 30 мин регистрируется необычная область, свойства которой, не смотря на длительные наблюдения СВ, ранее не исследовались. Об этом свидетельствует тщательный просмотр нами литературы и поиски в справочно-информационных системах. Эта область нами названа «магнитная полость» и выделена красным прямоугольником на рис. 2а.

Она характеризуется особенностями в поведении модуля ММП В, плотности СВ N, температуры T и кинетического давления плазмы P. С резким импульсным изменением параметров СВ критически связано поведение положения X/Re лидирующей части головной околоземной ударной волны (ГОУВ), а значит и состояние магнитосферы Земли: усиливается авроральная магнитная активность и скачком возрастает кольцевой ток.

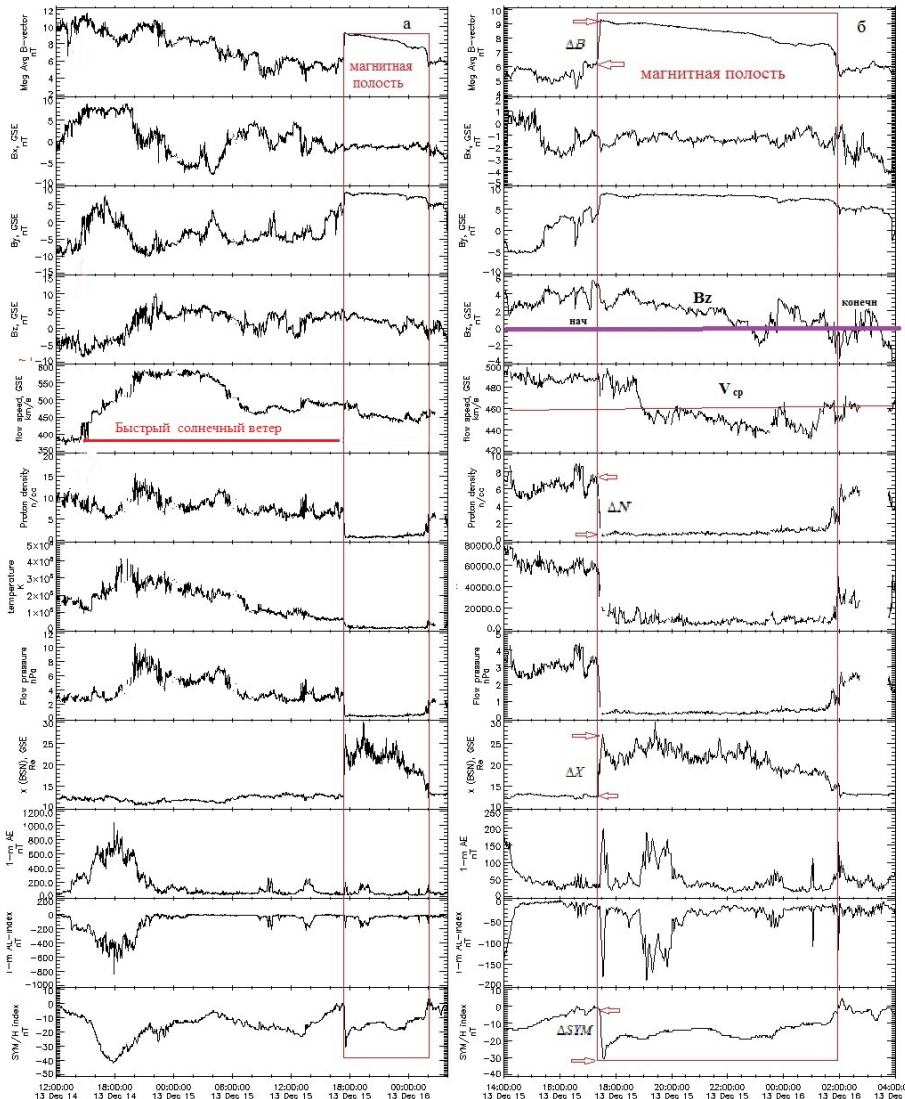


Рис. 2. а) Вариации параметров межпланетного магнитного поля (B , B_x , B_y , B_z), параметров солнечного ветра (V , N , T , P), положения лидирующей части головной ударной волны (X/Re — координата) и индексов магнитной активности (AE , AL , SYM/H) для выброса межпланетной корональной массы 14–16.12.2013, внутри которого наблюдалась магнитная полость. б) То же самое для участка магнитной полости в интервале 14:00 15.12.2013 ÷ 04:00 16.12.2013 (по данным OMNI).

На рис. 2б видно, что в интервале $\approx 17:30$ UT (15.12.2013) и до $\approx 02:00$ UT (16.12.2013) ГОУВ резко удаляется от Земли на расстояние до $X/Re \approx 25-30$. А затем до $\approx 02:00$ UT (16.12.2013) ме-

нее резко возвращается к прежнему положению $X/Re \approx 13$. В этом же интервале скачком усиливается слабая магнитная буря и также возрастает западный ток суббури. Весьма важно, что B_z компонента ММП в течение всего интервала наблюдения ICME и магнитной полости имеет северную ориентацию. Вероятно, поэтому межпланетный выброс вызвал малую магнитную бурю с внезапным началом 14.12.2015 в 13.20 UT и максимумом главной фазы в 47 нТл в 18:00 UT 14.12.2015 (нижняя кривая на рис. 2а). Индекс авроральной магнитной активности после внезапного начала бури достиг 950 нТл, а после смены направления B_z упал до минимального уровня в 50 нТл. Воздействие полости на магнитосферу отразилось в резком скачке интенсивности кольцевого тока — индекс SYM-H достиг -30 нТл и оставался на уровне ~ -10 нТл до момента окончания контакта с магнитной полостью в ~ 02 UT 16.12.2012 (нижняя кривая на рис. 2б).

Перечислим особенности поведения указанных параметров в этой области: а) на ее передней границе происходит резкое возрастание параметров B и X/Re и, наоборот, резкое падение параметров N , T и P ; б) в то же время профили параметров внутри области между передним и задним скачками испытывают сравнительно слабые изменения рис. 2б. Примечательно, что этот день в каталоге [2] отсутствует интервал СВ, обозначаемый “rare”. Главные особенности этой области, такие, как, повышенное квазипостоянное магнитное поле B и пониженная квазипостоянная плотность плазмы позволяют дать ей название магнитная полость. Коэффициент корреляции между B и N по одномоментным данным для рассматриваемой магнитной полости составляет $r(N, B) \approx -0.94$ (табл. 1).

Решающее влияние полости на положение X/Re лидирующей части ГОУВ очевидно из рис. 2 и табл. 1 коэффициентов корреляции между параметрами магнитной полости.

Таблица 1

**Коэффициенты корреляции между параметрами
магнитной полости 15.12.2013**

Параметр	N	B	X/Re	$SYM-H$ нТл	V_{cp} км/с	B_z
N	1	-0.94	0.734	0.77	464	2.1
B	-0.94	1	-0.85	0.80	464	2.1
X/Re	0.734	-0.85	1	-0.72	464	2.1
$SYM-H$ нТл	0.77	0.80	-0.72	1	464	2.1

Именно эти качества важны для дальнейшего выделения и анализа магнитных полостей, поскольку сильные изменения SYMH и R_x/Re в результате контакта полостей с ГОУВ показывают заметные реакции в магнитосфере Земли.

Параметры полости вблизи магнитосферы

Рассмотрим свойства магнитной полости по данным спутника Geotail, который в момент регистрации полости двигался из магнитосферы в солнечный ветер и находился на расстоянии $\sim 20 R_E$ вблизи линии Солнце-Земля (рис. 1).

Как видно на рис. 3 продолжительность полости вблизи магнитосферы на расстоянии $\sim 20 R_E$ идентична длительности полости на Wind. Однако имеются существенные различия в вариациях параметров. Так, если модуль В ММП на Wind изменяется в пределах $6 \div 9$ нТл, то на Geotail на фронте полости регистрируется импульс модуля напряженности межпланетного магнитного поля амплитудой $8 \div 29$ нТл и вариации В на среднем уровне ~ 20 нТл. В хвостовой части полости регистрируются скачки параметров неизвестной природы. Подчеркнем также наличие флуктуаций параметров на всем интервале регистрации полости.

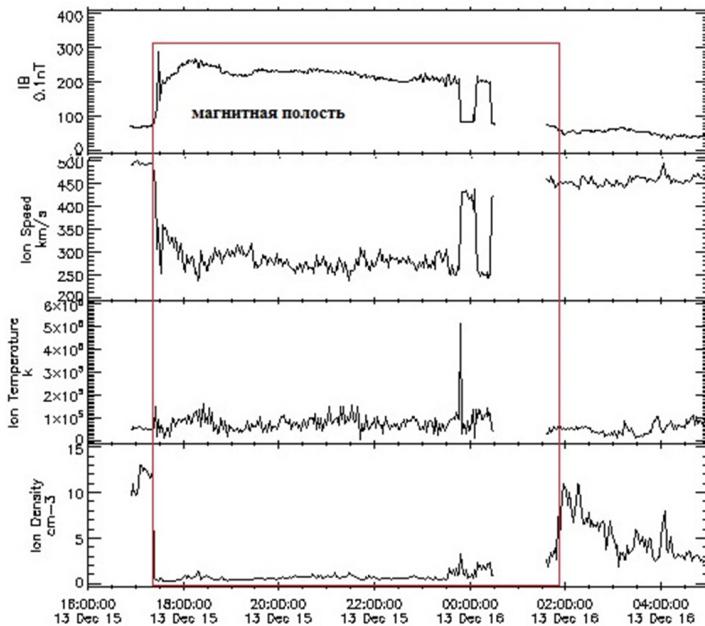


Рис. 3. Вариации модуля межпланетного магнитного поля (В), параметров солнечного ветра (V, N, T) по наблюдениям на спутнике Geotail в солнечном ветре вблизи магнитосферы на расстоянии $\sim 20 R_E$.

Отклик магнитосферы на контакт с магнитной полостью

Зависимости между параметрами по всему временному интервалу магнитной полости $\Delta t = 15.12.2013$ (14:00 UT) — $16.12.2013$ (02:00 UT) с высоким временным разрешением (1 минута), представленные на рис. 4а, б, в, г свидетельствуют о том, что при воздействии полости на магнитосферу существует однозначная связь (с малым

разбросом значений): между R_x/Re и $P(a)$, между R_x/Re и $N(b)$, а также линейная связь кинетического давления P и концентрации плазмы $N(b)$, что обусловлено постоянством скорости СВ в магнитной полости. Именно эти качества важны для дальнейшего выделения и анализа магнитных полостей, поскольку сильные изменения R_x/Re в результате контакта с ГОУВ вызывают их заметное воздействие на магнитосферу Земли.

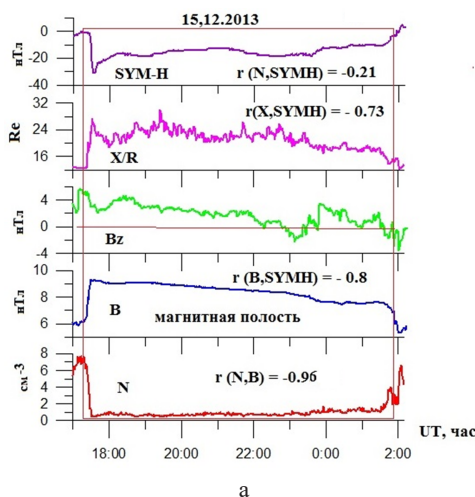


Рис. 4а. Вариации параметров магнитной полости B , B_z , N и магнитосферных откликов X/R и $SYM-H$ в интервале $\Delta t = 15.12.2013$ (16:00 UT) — 16.12.2013 (02:00 UT)

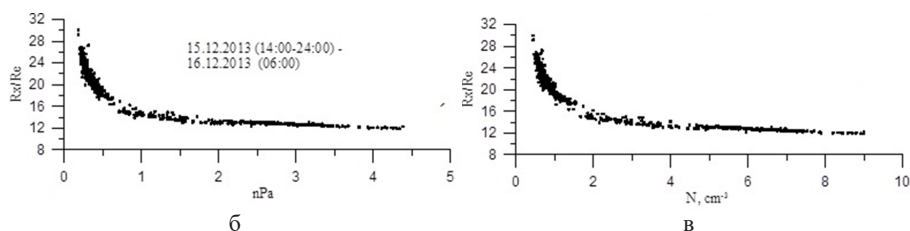


Рис. 4б, в. Зависимость положения ГОУВ от давления и концентрации СВ в магнитной полости.

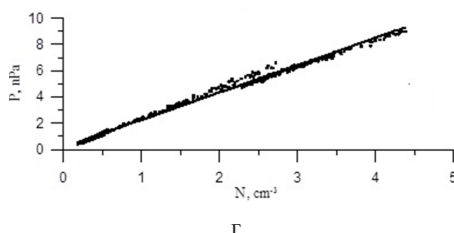


Рис. 4г. Зависимость давления от концентрации плазмы СВ в магнитной полости в том же временном интервале

Рассмотрим отклик на контакт с полостью по наблюдениям на спутниках внутри магнитосферы. Спутник THE находился внутри магнитосферы в дневном секторе (рис. 5а, б, в, г), а THV в ночном (рис. 6а, б, в, г).

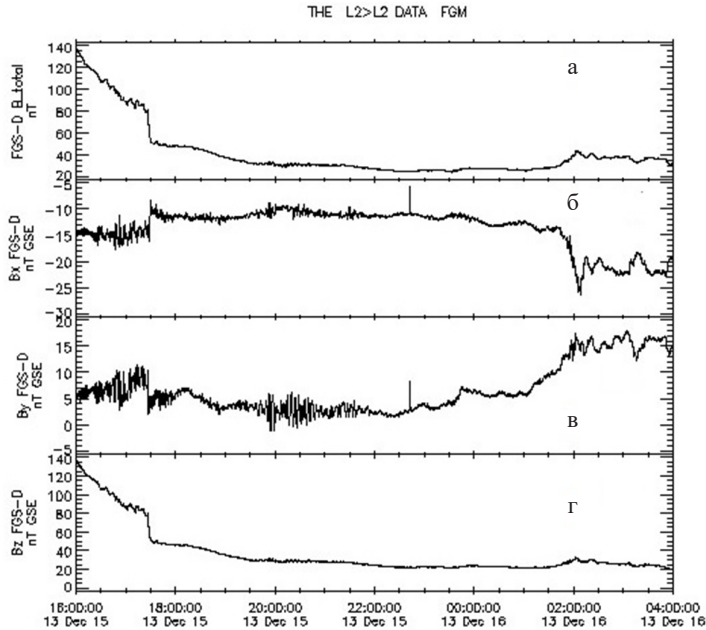


Рис. 5а. Вариации модуля магнитного поля B и его компонент, зарегистрированные спутником THE (б, в, г), расположенном в дневной магнитосфере Земли

На рис. 5а, б, в, г приведены вариации модуля B и его компонент, зарегистрированных спутником THE расположенном в дневной магнитосфере (рис. 1). На THE рис. 5а видно, что на THE профиль B и его компоненты B_x и B_z испытывают резкое уменьшение в том же интервале времени, начиная с $\approx 17:30$ UT (15.12.2013) и кончая моментом $\approx 02:00$ UT (16.12.2013), что и профиль увеличения смещения положения ГОУВ X/Re на рис. 2. Это свидетельствует о резком расширении магнитосферы, так как, именно, в результате него может происходить глобальное уменьшение величины внутри магнитосферного модуля B , которое подтверждается наблюдаемым смещением к Солнцу положения ГОУВ, т.е. возрастанием X/Re в подсолнечной магнитосфере.

На рис. 6а, б, в, г виден, интересный эффект прекращения колебаний геомагнитного поля: перед воздействием полости на магнитосферу модуль B и его компоненты внутри магнитос-

феры перед Землей и вблизи плазменного слоя хвоста магнитосферы испытывают заметные колебания, предположительно, вызванные неустойчивостями потоков энергичных протонов и электронов. После резкого расширения магнитосферы в интервале времени воздействия полости из-за охлаждения магнитосферной плазмы вследствие увеличения объема и вероятного падения величины потоков частиц горячей плазмы амплитуда колебаний резко уменьшается до полного их прекращения. Аналогичное прекращение колебаний наблюдается и на спутнике ТНС, который также находится в плазменном слое (рис. 1). Такой эффект прекращения дневных устойчивых колебаний описан в статье [10] и интерпретируется как срыв циклотронной неустойчивости протонов, отраженных от магнитопаузы в околополуденной магнитосфере. Однако заметим, что в нашем случае эффект прекращения геомагнитных пульсаций в диапазоне периодов $\sim 100 \div 300$ с (рис. 6а) наблюдается в плазменном слое хвоста магнитосферы на расстоянии около 60 Re, в то время как на спутнике Геотейл перед ГОУВ на расстоянии ~ 20 Re волновая активность наблюдается.

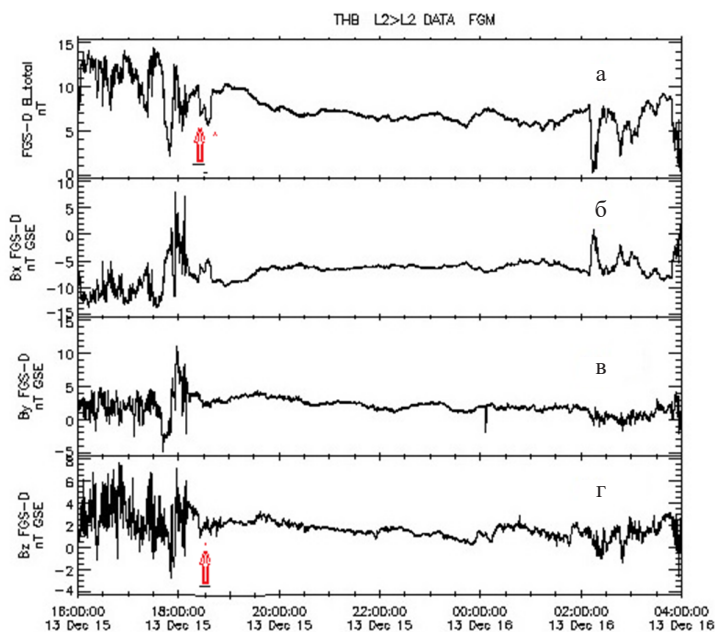
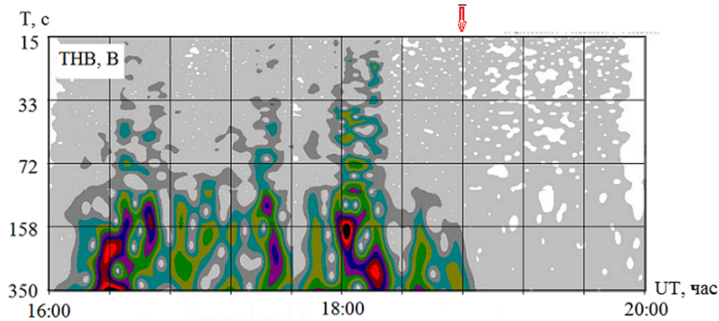


Рис. 6а. Вариации модуля магнитного поля B и его компонент (б, в, г), зарегистрированные спутником ТНВ, расположенном в плазменном слое хвоста магнитосферы. Стрелкой обозначен момент прекращения волновой активности.



Д

Рис. 6д. Динамический спектр геомагнитных пульсаций, зарегистрированных спутником ТНВ 15.12.2013 в плазменном слое хвоста магнитосферы на расстоянии ~ 60 Re. Геомагнитные пульсации прекращаются в 18:35 UT (обозначено стрелкой)

Статистические результаты

Нами выбрано и исследовано за период 1996–2012 гг. 13 магнитных полостей с целью понять и оценить их основные количественные параметры. Эти параметры указаны на рис. 26 белыми горизонтальными стрелками. Перечислим их:

1. Магнитная полость составляет часть спорадического потока СВ.

2. Относительное скачкообразное уменьшение плотности в ней может быть $\Delta N/N \approx 2,5\text{--}15$ раз, в то время как возрастание магнитного поля составляет лишь $\Delta B/B \approx 1,06\text{--}2,0$ раз.

3. Скорость СВ варьирует в области полости $V_{\text{ср.}} \approx 340\text{--}510$ км/с.

Предварительный анализ всех выбранных полостей показал зависимость магнитной активности, определяемой SYMH индексом от ориентации вертикальной компоненты ММП. Поэтому все случаи наблюдений были разбиты на 2 подмассива по направлению ориентации вертикальной компоненты МММ (табл. 2)

Таблица 2

Bz положительная					
	Bz _{ср}	SYMH _{ср}	V _{ср}	N _{ср}	длит. мин
01.11.2012	8	25	350	7	80
13.11.2013	1,6	7	370	1,8	300
14.04.2013	7	–35	42	4,08	720
24.12.1998	5	–20	360	7,5	120
07.01.1998	9,5	–10	390	2	23
24.01.1998	5,6	–10	415	6	70
24.01.1998	3,8	–8	410	5	40
02.09.2000	6,1	–7	370	2	315
07.11.2000	14	–10	510	2,2	80
13.11.2012	8	–5	400	2,3	310
Ср. знач.	6,86	–7,3	361,7	1,2	205,8

Таблица 3

Bz отрицательная					
	Bz_{cp}	$SYMН_{cp}$	V_{cp}	N_{cp}	длит. мин
01.11.2012	-9	-78	380	1	480
13.11.2013	-10	-60	350	2	540
03.08.1997	-5	-30	450	3	1790
10.10.1998	-12	-80	400	2	120
10.01.1997	-20	-90	460	1,5	480
22.07.2004	-13	-30	650	0,2	120
13.07.2004	-11	-120	600	1	60
23.07.2004	-12	-130	650	0,2	360
12.03.2012	-5	-65	700	0,4	1200
Ср. знач	-11,5	-77,2	492,5	1,4	572,2

На рис. 7 приведены зависимости интенсивности магнитных бурь (индекс SYMH) от величины и направления Bz компоненты ММП, построенные по данным табл. 2 и 3. Как видно на графиках, при положительных значениях Bz интенсивность магнитных возмущений (значение интенсивности кольцевого тока) не зависит от самой величины Bz в то время как при южной ориентации вертикальной компоненты ММП, особенно при смене знака ориентации, тенденция к такой зависимости появляется.

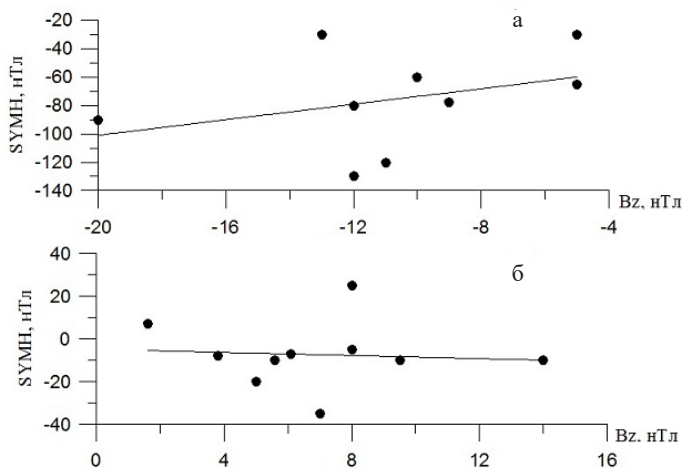


Рис. 7а, б. Зависимости интенсивности магнитных бурь (индекс SYMH) от величины и направления Bz компоненты ММП для событий, представленных в табл. 2, 3.

Еще один пример классического спорадического потока СВ (выбран из списка в 13 потоков) представлен на рис. 8 в виде последовательности ударной волны, ударно нагретой сжатой плазмы и межпланетного магнитного облака (ММО) на орбите Земли. Красным квадратом внутри ММО показана магнитная полость. Главное разли-

чие магнитных полостей, представленных на рис. 2а, б и на рис. 8а, б заключается в том, что они наблюдаются при различных ориентациях вертикальной компоненты B_z . Первое событие наблюдается при исключительно северной ориентации, а второе при южной. Вероятно, с этим фактом, подтверждающим тенденцию зависимости интенсивности бури от ориентации B_z компоненты ММП (рис. 7а), можно связать большую разность в начальном скачке индекса SYMH (30 и 70 нТл соответственно) на переднем фронте магнитных полостей (рис. 2б и 8б).

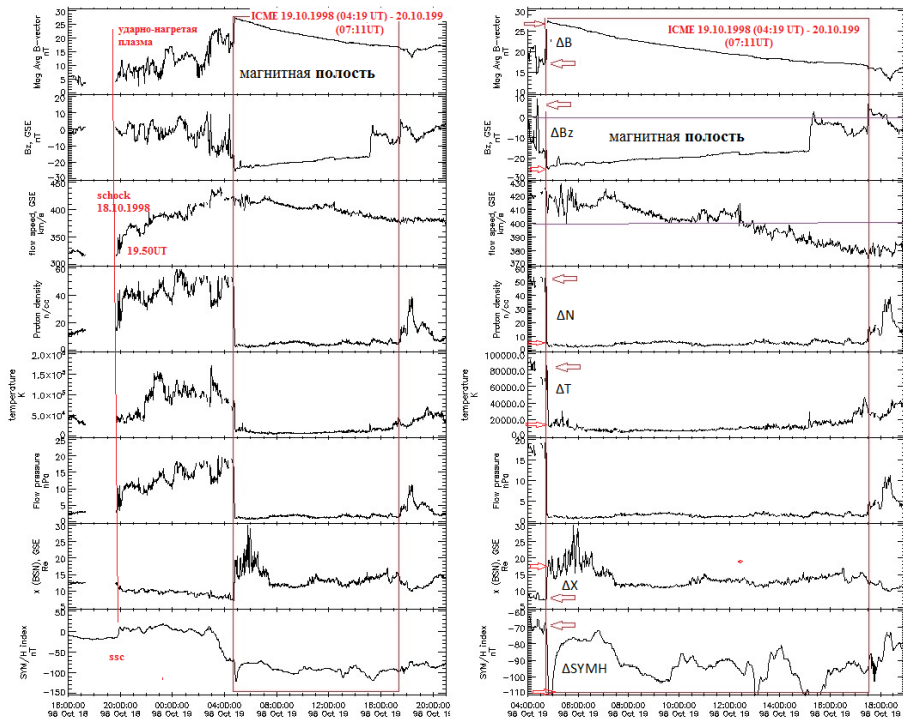


Рис. 8. Вариации параметров межпланетного магнитного поля (B , V_x , V_y , B_z), параметров солнечного ветра (V , N , T , P), положения лидирующей части головной ударной волны (X — координата) и индексов магнитной активности ($SYMH$) для классического спорадического потока с межпланетным корональным выбросом (ICME) в течение 18.10.1998 (16:00 UT) — 19.10.1998 (21:00 UT).

Внутри ICME красным прямоугольником выделена магнитная полость

Обсуждение результатов

На основании детального исследования спорадического потока СВ, зарегистрированного на 1а.е. 15–16.12.2013, а также 13 отобранных спорадических потоков СВ за период 1996–2012 гг.

показано существование ранее не известной структуры внутри ICME, которая названа «магнитная полость». Она характеризуется и определяется по высокой степени антикорреляции концентрации плазмы N и модуля ММП B (коэффициент $r(N, B) = -0,94$ в табл. 1). На ее передней границе резко падает N и возрастает B , а на задней границе резко N растет и падает B . Внутри полости, временная длительность которой может быть в интервале $\approx 1-30$ ч, обычно, N и B мало меняются. С помощью измерений, выполненных на спутниках TNE и THV, расположенных соответственно в дневной и ночной магнитосфере показано, что воздействие полости на ГОУВ приводит к резкому расширению магнитосферы и к резкому смещению к Солнцу положения ГОУВ.

Выводы

1. Экспериментально подтверждено существование внутри ICME «магнитной полости», характеризующейся пониженной концентрацией плазмы по сравнению с окружающим СВ.
2. Воздействие «магнитной полости» приводит к резкому расширению магнитосферы и к резкому смещению к Солнцу положения ГОУВ.
3. Обнаружен эффект прекращения геомагнитных пульсаций в плазменном слое хвоста магнитосферы при ее резком расширении после контакта с магнитной полостью.

Список использованной литературы

1. Kivelson M.G. Introduction to Space Physics / M.G. Kivelson, C.T. Russell. — New York : Cambridge University Press, 1995. — 568 p.
2. Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976-2000 гг. / Ю.И. Ермолаев, Н.С. Николаева, И.Г. Лодкина, М.Ю. Ермолаев. — EDN KZYKCD // Космические исследования. — 2009. — Т. 47, № 2. — С. 99–113.
3. Магнитоферный отклик на взаимодействие с диамагнитной структурой спорадического солнечного ветра / В.А. Пархомов, В.Г. Еселевич, М.В. Еселевич [и др.]. — DOI 10.12737/szf-73202102. — EDN FXMMUR // Солнечно-земная физика. — 2021. — Т. 7, № 3. — С. 12–30.
4. О соответствии глобальной изолированной суббури статистической модели Мак-Ферона / В.А. Пархомов, В.Г. Еселевич, М.В. Еселевич [и др.]. — DOI 10.12737/szf-82202206. — EDN OIHQB // Солнечно-Земная физика. — 2022. — Т. 8, № 2. — С. 41–51.
5. Magnetic Holes in the Solar Wind / J.M. Turner, L.F. Burlaga, N.F. Ness, J.F. Lermaire // Journal of Geophysical Reserach. — 1977. — Vol. 82, no. 13. — P. 1921–1924.
6. Sperveslage K.F. Ness Magnetic holes in the solar wind between 0.3 AU and 17 AU / K.F. Sperveslage, N. Neubauer. — DOI 10.5194/NPG-7-191-2000 // Nonlinear Processes in Geophysics. — 2000. — Vol. 7, iss. 3-4. — P. 191–300.
7. Magnetic holes in the solar wind and magnetosheath near Mercury / Karlsson T., Heyner D., Volwerk M. [at al.]. — DOI 10.1029/2020JA028961 // Journal of Geophysical Reserach: Space Physics. — 2021. — Vol. 126, no. 5.

8. Richardson I.G. Near-Earth Interplanetary Coronal Mass Ejections During Solar Cycle 23 (1996 — 2009): Catalog and Summary of Properties / I.G. Richardson, H. Cane. — DOI 10.1007/s11207-010-9568-6 // *Solar Physics*. — 2010. — Vol. 264, no. 1. — P. 189–237.

9. Peculiarities of the Heliospheric State and the Solar-Wind/Magnetosphere Coupling in the Era of Weakened Solar Activity / Y.I. Yermolaev, I.G. Lodkina, A.A. Khokhlachev, M.Y. Yermolaev. — DOI 10.3390/universe8100495 // *Universe*. — 2022. — Vol. 8, no. 6. — P. 495.

10. Троицкая В.А. Эффект внезапного прекращения пульсаций типа Pc2–4 / В.А. Троицкая, Р.В. Щепетнов, А.В. Гульельми // *Геомагнетизм и аэронаука*. — 1969. — № 9. — С. 363.

References

1. Kivelson M.G.; Russell C.T. *Introduction to Space Physics*. New York, Cambridge University Press, 1995. 568 p.

2. Yermolaev Yu.I., Nikolaeva N.S., Lodkina I.G., Yermolaev M.Yu. Catalog of Large-Scale Solar Wind Phenomena During 1976–2000. *Kosmicheskie issledovaniya = Cosmisk Research*, 2009, vol. 47, no. 2, pp. 99–113. (In Russian). EDN: KZYKCD.

3. Parkhomov V.A., Eselevich V.G., Eselevich M.V., Dmitriev A.V., Suvorova A.V., Khomutov S.Yu., Tsegmed B., Raita T. Magnetospheric Response to the Interaction with the Sporadic Solar Wind Diamagnetic Structure. *Solnechno-zemnaya fizika = Solar-Terrestrial Physics*, 2021, vol. 7, no. 3, pp. 12–30. (In Russian). EDN: FXMMUR. DOI: 10.12737/szf-73202102.

4. Parkhomov V.A., Eselevich V.G., Eselevich M.V., Tsegmed B., Khomutov S.Yu., Raita T., Popov G.V., Mochalov A.A., Pilgaev S.V., Rakhmatulin R.A. Correspondence of a Global Isolated Substorm to the McPherron Statistical Model. *Solnechno-zemnaya fizika = Solar-Terrestrial Physics*, 2022, vol. 8, no. 2, pp. 41–51. (In Russian). EDN: OIHHQB. DOI: 10.12737/szf-82202206.

5. Turner J.M., Burlaga L.F., Ness N.F., Lermaire J.F. Magnetic Holes in the Solar Wind. *Journal of Geophysical Research*, 1977, vol. 82, no.13, pp. 1921–1924.

6. Sperveslage K.F. Neubauer N. Ness Magnetic Holes in the Solar Wind between 0.3 AU and 17 AU. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2000, vol. 7, iss. 3-4, pp. 191–300. DOI: 10.5194/NPG-7-191-2000.

7. Karlsson T., Heyner D., Volwerk M., Plaschke F., Goetz C., Hadid L. Magnetic Holes in the Solar Wind and Magnetosheath near Mercury. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, vol. 126, no. 5. DOI: 10.1029/2020JA028961.

8. Richardson I.G., Cane H. Near-Earth Interplanetary Coronal Mass Ejections During Solar Cycle 23 (1996 — 2009): Catalog and Summary of Properties. *Solar Physics*, 2010, vol. 264, no. 1, pp. 189–237. DOI: 10.1007/s11207-010-9568-6.

9. Yermolaev Y.I., Lodkina I.G., Khokhlachev A.A., Yermolaev M.Y. Peculiarities of the Heliospheric State and the Solar-Wind/Magnetosphere Coupling in the Era of Weakened Solar Activity. *Universe*, 2022, vol. 8, no. 6, pp. 495. DOI: 10.3390/universe8100495.

10. Troitskaya V.A., Shchepetnov R.V., Gul'el'mi A.V. Effect of sudden cessation of Pc2–4 type pulsations. *Geomagnetizm i aeronomiya = Geomagnetism and Aeronomy*, 1969, no. 9, pp. 363. (In Russian).

Информация об авторах

Пархомов Владимир Александрович — доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры математических методов и цифровых технологий, Байкальский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: pekines_41@mail.ru.

Еселевич Виктор Григорьевич — доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: esel@iszf.irk.ru.

Еселевич Максим Викторович — кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: mesel@iszf.irk.ru.

Семёнов Георгий Валентинович — кандидат педагогических наук, доцент, доцент кафедры физико-математических дисциплин, Заполярный государственный университет им. Н.М. Федоровского, Норильск, Российская Федерация, e-mail: sgv@mail.ru.

Information about the Authors

Vladimir A. Parkhomov — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Professor of the Department of Mathematical Methods and Digital Technologies, Baikal State University, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: pekines_41@mail.ru.

Victor G. Eselevich — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, Institute of Solar-Terrestrial Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: esel@iszf.irk.ru.

Maksim V. Eselevich — PhD in Physical and Mathematical Sciences, Head of the Lab, Institute of Solar-Terrestrial Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: mesel@iszf.irk.ru.

Georgy V. Semenov — PhD in Pedagogical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Physics and Mathematics, Fedorovsky Polar State University, Norilsk, Russian Federation, e-mail: sgv@mail.ru.

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the Authors

The authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Для цитирования

Магнитные полости в солнечном ветре, их влияние на положение головной околоземной ударной волны и геомагнитную активность / В.А. Пархомов, В.Г. Еселевич, М.В. Еселевич, Г.В. Семёнов. — DOI 10.17150/2713-1734.2023.5(1).75-90. — EDN TQJLBM // System Analysis & Mathematical Modeling. — 2023. — Т. 5, № 1. — С. 75–90.

For Citation

Parkhomov V.A., Eselevich V.G., Eselevich M.V., Semenov G.V. Magnetic Cavities in the Solar Wind, Their Influence on the Bow Shock Position and Geomagnetic Activity. *System Analysis & Mathematical Modeling*, 2023, vol. 5, no. 1, pp. 75–90. (In Russian). EDN: TQJLBM. DOI: 10.17150/2713-1734.2023.5(1).75-90.