

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.010

## ГЛОБАЛЬНАЯ ИЗОЛИРОВАННАЯ СУББУРЯ, ВЫЗВАННАЯ ДИАМАГНИТНОЙ СТРУКТУРОЙ МЕДЛЕННОГО СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА 22.12.2015

В.А. Пархомов<sup>1</sup>, В.Г. Еселевич<sup>2</sup>, М.В. Еселевич<sup>2</sup>, Б. Цэгмэд<sup>3</sup>, С.Ю. Хомутов<sup>4</sup>,  
Р.А. Рахматулин<sup>2</sup>, Т. Райта<sup>5</sup>, А.А. Мочалов<sup>6</sup>, С.В. Пильгаев<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Байкальский государственный университет

<sup>2</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН

<sup>3</sup>Институт астрономии и геофизики АН Монголии

<sup>4</sup>Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН

<sup>5</sup>Геофизическая обсерватория Соданкюля, университета Оулу, Финляндия

<sup>6</sup>ФГБНУ «Полярный геофизический институт», г. Апатиты, Россия

### Аннотация

Показано, что на орбите Земли 22.12.2015 г. взаимодействие диамагнитной структуры (ДС) медленного солнечного ветра с магнитосферой после продолжительной северной ориентации  $V_z$  генерирует изолированную суббурю, длительность которой определяется длительностью ДС. Суббуря начинается в околополуденные часы прохождением ДС в магнитосферу и распространяется к востоку. В течение двух часов наблюдаются все фазы суббури – подготовительная, взрывная и восстановительная. Протоны ДС, генерируясь в области источника, достигают орбиты Земли и, взаимодействуя с частицами радиационных поясов, вызывают генерацию колебаний IPDP в околополуденные часы в большом широтном диапазоне.

### Введение

Один из главных вопросов физики магнитосферы - о факторах, контролирующих поступление энергии в магнитосферу и интенсивность суббурь, в настоящее время остается открытым. Установлено, что источником энергии магнитосферных суббурь является солнечный ветер (СВ) и межпланетное магнитное поле (ММП). Наиболее распространена точка зрения, считающая главным параметром, определяющим накопление энергии в хвосте магнитосферы, выделяемой в ходе суббурь, является  $V_z$  компонента ММП. Параметры солнечного ветра - скорость и концентрация плазмы СВ отдельно не рассматриваются как самостоятельные источники энергии суббуревых возмущений, но входят в различные комбинированные индексы [1-4].

В работах [5] введено понятие плазмоидов. Такие структуры в [6,7] определены как диамагнитные плазменные структуры (ДС). Столкновение диамагнитных структур "медленного" СВ с магнитосферой может вызывать суббуреподобные магнитосферные возмущения и, в частности, так называемые, пилообразные суббури (sawtooth substorms) [6-9]. В них было показано, что ДС, которые вблизи Солнца видны как лучи повышенной яркости, составляют основу "медленного" квазистационарного СВ на орбите Земли. Источниками "медленного" квазистационарного СВ на Солнце являются пояс [10] и цепочки стримеров [11] или псевдостримеры [12]. На орбите Земли "медленный" СВ характеризуется повышенной концентрацией плазмы  $N > (10 \pm 2) \text{ см}^{-3}$  и относительно небольшой скоростью СВ  $V \approx 250 \div 450 \text{ км/с}$  по сравнению с "быстрым" СВ, истекающим из корональных дыр, скорость которых составляет  $V \approx 450 \div 800 \text{ км/с}$  [13,14].

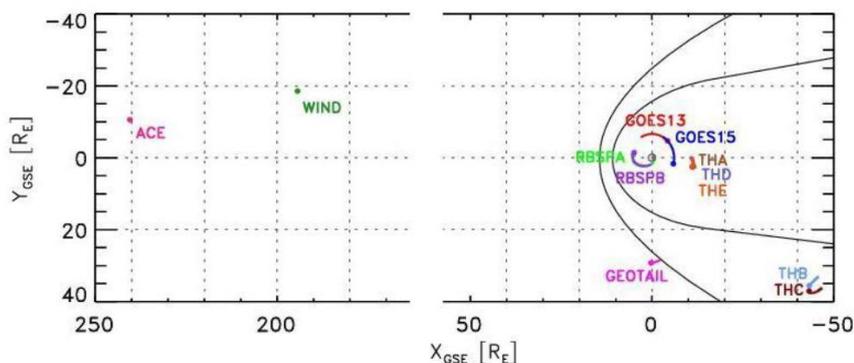
Цепочки стримеров в короне в белом свете выглядят, как и пояс стримеров, в виде последовательности лучей повышенной яркости (концентрации плазмы). В них течет "медленный" СВ, примерно, с теми же свойствами, что и в поясе стримеров. Однако цепочки отличаются от пояса тем, что разделяют в короне области с открытыми магнитными силовыми линиями, имеющими одинаковую полярность поля [10].

При этом лучи цепочек стримеров, как и пояса стримеров, представляют собой квазистационарные диамагнитные структуры "медленного" СВ, которые определяются по наличию отрицательного коэффициента корреляции между скачками концентрации СВ  $N$  и модуля ММП - $V$ .

Целью данной работы является продолжение исследования природы магнитосферных возмущений, связанных с воздействием на магнитосферу Земли диамагнитной структуры (ДС) 22.12.2015 г., источником которой на Солнце является цепочка стримеров. Главное внимание уделяется анализу передачи энергии от ДС в магнитосферу по характеру магнитосферных процессов, стимулированных ДС, в различных долготных секторах магнитосферы.

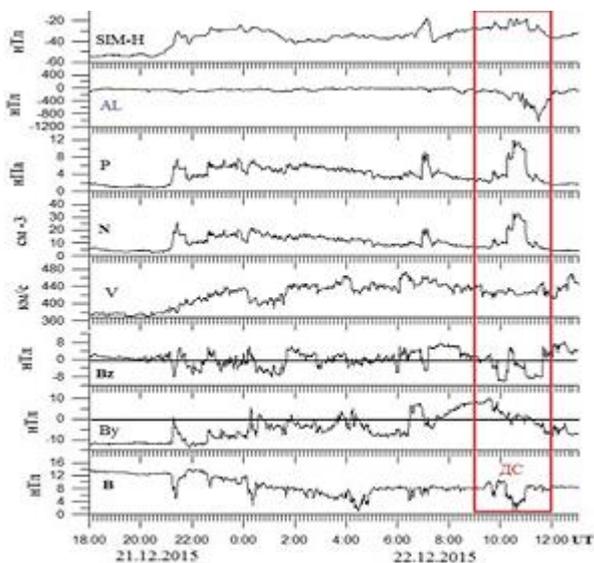
### Данные и методы анализа

Для оценки динамики движения ДС в солнечном ветре и магнитосфере используются результаты наблюдений на спутниках ACE, Wind, THEMIS, GOES-13, GOES-15, RBSP A, B (рис. 1). Магнитосферный отклик по наблюдениям в четырёх долготных секторах (полуденном, вечернем, полуночном. и утреннем) анализируется по данным наземных магнитометров сетей INTERMAGNET, THEMIS, IMAGE и индукционных магнитометров обсерваторий Ивало (IVA,  $\Phi=68^{\circ}.56$ ,  $\Lambda=27^{\circ}.29$ ), Ловозеро (LOZ,  $\Phi=67^{\circ}.97$ ,  $\Lambda=35^{\circ}.08$ ), Исток (IST,  $\Phi=69^{\circ}.35$ ,  $\Lambda=88^{\circ}.19$ ), Паратунка (PET,  $\Phi=52^{\circ}.94$ ,  $\Lambda=158^{\circ}.25$ ) и Ministik Lake (MSTK,  $\Phi=53^{\circ}.35$ ,  $\Lambda=247^{\circ}.03$ ).



**Рисунок 1.** Положение спутников внутри магнитосферы в GSE координатах в плоскости (XY) с 09 до 13UT 22.12.2015 г. Точки – начало движения.

Прежде всего, приведём доказательство изолированности ДС, которая определяется по антикорреляции кривых В и N на рис. 2, в интервале времени  $\approx 09:00-12:00$  UT 22.12.2015 (выделено вертикальным прямоугольником). ДС вызвала магнитосферное возмущение в виде изолированной суббури (AE макс = 1076 нТл), которая наблюдалась на фазе затухания большой магнитной бури ( $Dst_{max} 20.09.2015 = 155$  нТл в 20 UT). Действительно, несмотря на существенные вариации концентрации СВ и вертикальной компоненты  $B_z$  ММП в течение 7 час до начала суббури, связанной с ДС, средние значения индексов авроральной магнитной активности  $AE_{cp} = 146$  нТл,  $AL_{cp} = -50.4$  нТл изменяются незначительно и суббуря кроме исследуемой не наблюдается (рис. 2). Т.е. суббуря является изолированной согласно алгоритма определения изолированности [3].



**Рисунок 2.** Вариации составляющих В,  $B_y$ ,  $B_z$  ММП, параметров плазмы солнечного ветра V, N, P, и индексы геомагнитной активности AL и SYM-H по данным OMNI (<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/eval2.cgi>). Прямоугольником выделена ДС.

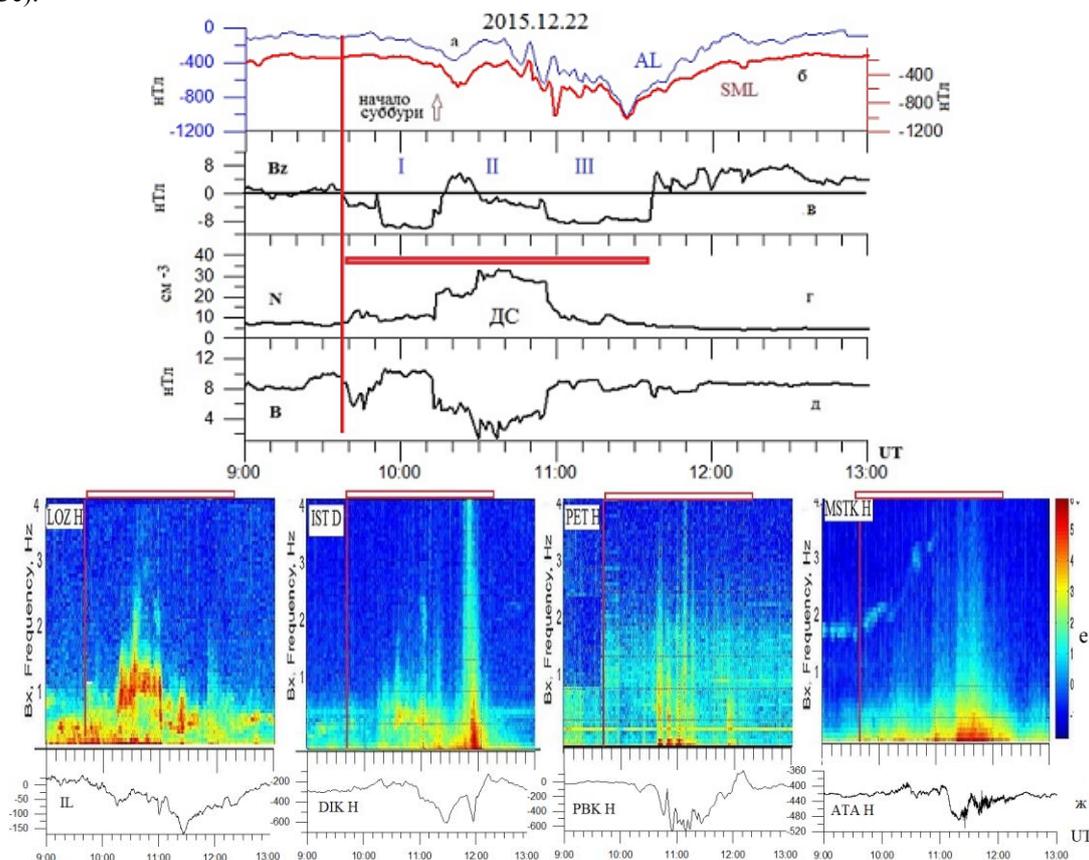
### Отождествление источника ДС на Солнце и на орбите Земли 22.12.2015 г.

Используя методику и формулы, приведенные в [5,10], а также результаты расчетов в потенциальном приближении Руденко (<http://bdm.iszf.irk.ru/>) положений на Солнце нейтральной линии глобального магнитного поля и цепочек стримеров, можно показать, что источником рассматриваемого на орбите Земли ДС в 09:00-12:00UT является участок пересечения цепочки стримеров с эклиптической на Солнце, который проходит через центральный меридиан Солнца в момент времени  $\approx 00:00$  UT.

Диамангнитная структура движется со скоростью медленного СВ 430 км/с к орбите Земли и имеет ряд особенностей. Прежде всего, в интервале 05:00–09:36UT  $B_z$  имеет преимущественно северное направление со средним значением 2.3 нТл, а с 07:10 до 09:36 среднее значение  $B_z$  составило 6.1 нТл. Важно отметить, что  $B_y$  и  $B_x$  также имеют положительные значения, скорость падает от 470 до 420 км/с, а давление и концентрация солнечного ветра остаются на одном уровне с 07UT. Это указывает на то, что накопления энергии в магнитосфере за счёт пересоединения магнитосферного магнитного поля и ММП не происходит.

### Глобальный геомагнитный отклик магнитосферы на взаимодействие с ДС 22.12.2015 г.

Геомагнитный отклик на взаимодействие ДС с магнитосферой рассмотрим в вариациях индексов геомагнитной активности AL и SML (рис. 3а, б) и долготных особенностях режима геомагнитных пульсаций (Рис. 3е).



**Рисунок 3.** Вариации индексов AL (а) и SML (б), Bz ММП (в), плотности СВ (г) модуля напряжённости ММП по измерениям на Wind (д), спектрограммы геомагнитных пульсаций в различных долготных секторах (е), магнитограммы обсерваторий, соответствующие часам местного времени спектрограмм (ж). Горизонтальным прямоугольником обозначена ДС. Сплошная вертикальная линия - начало взаимодействия с ДС. Стрелкой показано начало суббури по [15], фазы отмечены римскими цифрами.

Начало суббури связано со сменой знака Bz (рис. 3в), что предполагает этот момент как включение триггера, открывающего поступление энергии внутрь магнитосферы. По вариациям (началу возрастания величины) AL индекса авроральной магнитной активности (рис. 3а) и индекса SML (рис. 3б), начало суббури можно определить в 09:38 UT (показано вертикальной красной линией). По вариациям индексов можно выделить три фазы суббури, обозначенные римскими цифрами. В первой фазе 09:38–10:14 UT возрастание AL индекса от -60 до -360 нТл (рис. 3а) и SML индекса от -170 до -480 нТл (рис. 3б) совпадает с возрастанием концентрации СВ от 5 до 10.6 см<sup>-3</sup> (рис. 3г) и изменением Bz от 0 до -10 нТл (рис. 3в). Вторая фаза суббури начинается резким скачком концентрации от 9 до 31 см<sup>-3</sup>, падением модуля ММП с 11 до 5 нТл и изменения Bz от -10 до +10 нТл. Максимальное значение индексов совпадает по времени (11:27 UT) и величине (1036 нТл), после чего значение индексов резко возвращается к невозмущённому уровню. Таким образом, продолжительность суббури и её энергетика определяются длительностью взаимодействия ДС с магнитосферой или поступлением энергии СВ, вносимой ДС в магнитосферу.

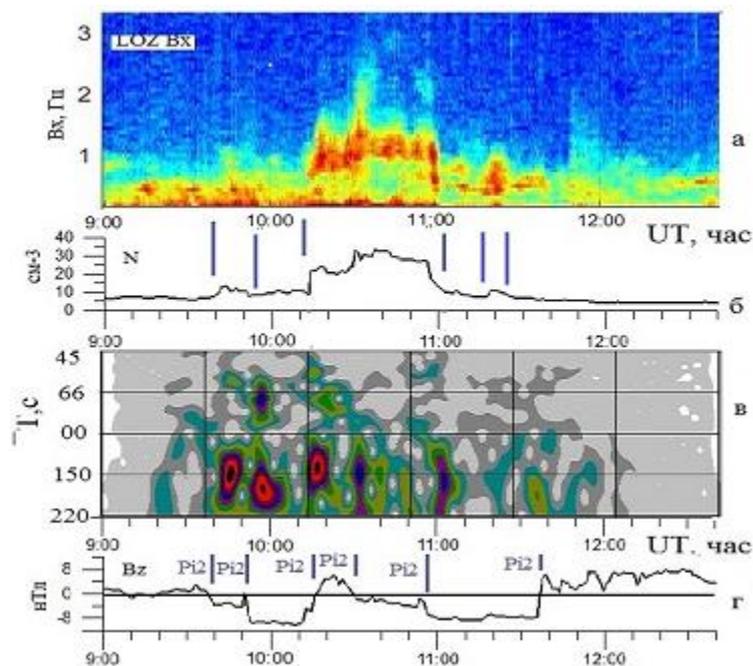
Другая важная деталь – диамагнитная структура проникает в магнитослой и магнитосферу и примерно через 15 мин последовательно наблюдается на спутниках ТНВ, ТНС в магнитослое и на спутниках ТНА, ТНД, ТНЕ в деформированном виде в плазменном слое хвоста магнитосферы на расстояниях ~ 44.5 и ~ 11.4 Re, соответственно. Динамика движения ДС детально показана на рис. 5.

Вопреки сложившимся представлениям, взаимодействие ДС с магнитосферой приводит к генерации суббури, которая начинается не на ночной, а на дневной стороне авроральной зоны, и распространения её в хвост магнитосферы по мере движения ДС, прошедшей в магнитосферу, что отражается в смене режимов геомагнитных пульсаций в различных долготных секторах (рис. 3е) и вариациям ионосферных токов. Рассмотрим смену режимов от полуденных к полуночным и утренним часам. В околополуденном секторе

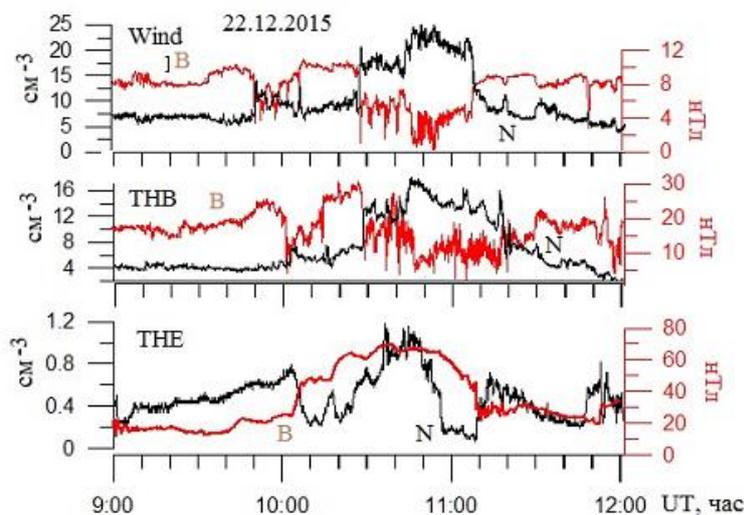
(обсерватория Ловозеро – LOZ H) наблюдаются колебания с нестационарным спектром (IPDP) и усиление западного тока, отразившееся в возрастании  $I_L$  индекса, определяемого по вариациям  $H$ -компоненты на меридиональной сети магнитометров, до  $-200$  нТл (рис. 3ж). В вечернем секторе 16–18 MLT происходит кратковременная интенсификация аврорального тока (отрицательная бухта на обсерватории Диксон  $H \sim - (600)$  нТл) и регистрируется широкополосный всплеск пульсаций  $Pi1-2$  (обсерватория Исток – IST D) (рис. 3ж, е). В околополуночном секторе резко возрастает интенсивность западной электроструи ( $H \sim -(700)$  нТл) и регистрируются последовательные широкополосные всплески  $Pi 1-2$ . В послеполуночном секторе (02–06 MLT) наблюдаются обычные явления, составляющие суббури – мощный западный ток ( $H = -500$  нТл), пульсации, свойственные восстановительной фазе суббури, (на обсерваториях сети CARISMA) и  $PiC$  пульсации (на обсерваториях MSTK, АТА). Завершающей фазой динамики взаимодействия ДС с магнитосферой может быть последовательность смены режимов пульсаций и начала усиления ионосферных токов к востоку от полуденного меридиана. Эта закономерность противоречит классическим результатам [1,2], утверждающим, что несмотря на различие моделей начала магнитосферной суббури, все они включают основные элементы токового клина суббури, который перемещается к западу от полуночного меридиана и обеспечивает основной путь для связи реконфигурации магнитосферы с динамикой ионосферы.

Дополнительные подтверждения этого вывода представлены на рис. 4, где представлены параметры СВ и ММП и динамический спектр геомагнитных пульсаций на обс. Ивало. Как видно на рис. 4, в низкочастотной части спектра наблюдается несколько всплесков пульсаций  $Pi2$  (с периодом порядка 150 с). Напомним, что  $Pi2$  пульсации являются общепризнанным индикатором начала суббури. Но рассматриваемая картина наблюдается в околополуденные часы на субавроральных широтах. Видно, что каждый всплеск совпадает с моментом перехода  $B_z$  через 0 и с резкими пиками  $B_z$ .

В верхней части рисунка показаны пульсации с нестационарным спектром типа  $Pc1$ . Как видно, они связаны с вариациями потока протонов СВ в ДС. Напрашивается вывод о раздельном воздействии ММП и концентрации протонов на режим геомагнитных пульсаций.  $B_z$  генерирует всплески пульсаций, предположительно вследствие пересоединения ММП и геомагнитного поля на магнитопаузе. В это же время протоны (или альфа-частицы) проникают в магнитосферу и вызывают неустойчивость в радиационных поясах и генерируют электромагнитные ионно-циклотронные волны, наблюдаемые на Земле как излучения с нестационарным спектром, по морфологическим признакам близким к колебаниям типа IPDP [16]. Такие колебания сопровождают суббури, наблюдаются обычно в предполуночные часы и связаны с циклотронной неустойчивостью протонов, инжектируемых в радиационный пояс во время суббури. В [17] источником подобных колебаний также рассматривалась циклотронная неустойчивость, но ионов кольцевого тока, стимулированная импульсным сжатием магнитосферы скачками давления СВ.



**Рисунок 4.** Суббури в геомагнитных пульсациях, генерированная ДС, в околополуденные часы: а) спектрограмма высокочастотного диапазона геомагнитных пульсаций (IPDP) на обсерватории Ловозеро; б) вариация концентрации протонов СВ в ДС; в) динамический спектр геомагнитных пульсаций в частотном диапазоне 45 – 220 с на обсерватории Ивало; г) вариация  $B_z$  ММП. Вертикальными линиями отмечены интервалы соответствия возрастания концентрации протонов в СВ и генерации IPDP (б) и соответствия генерации  $Pi2$  при переходе через 0 значения  $B_z$ .



**Рисунок 5.** Вариации модуля напряжённости магнитного поля В (чёрная кривая) и концентрации протонов  $N_p$  (красная кривая): а) в солнечном ветре по данным спутника WIND; б) в магнитослое по данным спутника THB; в) в магнитосфере по данным спутника THE.

Примечательным фактом является сохранение структуры ДС, ее временных масштабов и антикорреляция профилей В и N при движении от WIND к Земле и проникновении ДС в магнитослой по данным спутника THB на расстояниях вплоть до  $\sim 44.5 R_e$  (рис. 5а, б). В области хвоста магнитосферы на расстоянии  $\sim 10 R_e$  (THE) картина кардинально меняется. Наблюдаемые структуры уже не являются ДС, т.к. отсутствует антикорреляция В и N (рис. 5в). При этом величина N уменьшается практически в 10 раз (по сравнению с магнитослоем), а величина В возрастает примерно в 5 раз. Все это, по-видимому, отражает проявление диссипативных процессов, которые инициируются воздействием ДС на замагниченную плазму в хвосте магнитосферы.

## Выводы

1. Взаимодействие ДС с магнитосферой после длительной северной ориентации  $B_z$  генерирует изолированную суббуру, продолжительность которой определяется продолжительностью ДС. Суббура начинается в околополуденные часы прохождением ДС в магнитосферу и распространяется к востоку.
2. В течение двух часов наблюдаются все фазы суббуры – подготовительная, взрывная и восстановительная.
3. Протоны ДС, генерируясь в области источника, достигают орбиты Земли и, взаимодействуя с частицами радиационных поясов, вызывают генерацию колебаний IPDP в околополуденные часы в большом широтном диапазоне.
4. ДС проходит в магнитосферу и наблюдается в магнитослое и плазменном слое хвоста.

## Благодарности

Работа Пархомова В.А. выполнена в рамках госбюджетной темы ФГБОУ ВО «БГУ» на 2021–202 гг. «Системный анализ и методы обработки информации в космических исследованиях».

## Литература

1. Akasofu S.-I. Auroral substorms: Search for processes causing the expansion phase in terms of the electric current approach. *Space Sci. Rev.* 2017. V. 212. P. 341–381. DOI: 10.1007/s11214-017-0363-7
2. Kepko L., McPherron R.L., Amm O., Apatenkov S., Baumjohann W., Birn J., Lester M., Nakamura R., Pulkkinen T.I., Sergeev V. Substorm current wedge revisited. *Space Sci. Rev.* 2015. V. 190. P.1–46.
3. Vorobjev V.G., Antonova E.E., Yagodkina O.I. How the intensity of isolated substorms is controlled by the solar wind parameters. *Earth, Planets and Space.* 2018. V. 70. P. 148. DOI: 10.1186/s40623-018-0922-5
4. Troshichev O.A., Janzhura A. Space weather monitoring by ground-based means: PC index. Springer Verlag. 2012. DOI 10.1007/978-3-642-16803-1
5. Karlsson T., Kullen A., Liljeblad E., et al. On the origin of magnetosheath plasmoids and their relation to magnetosheath jets. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2015. V. 120, Is. 9. P. 7390–7403. DOI: 10.1002/2015JA021487
6. Еселевич М.В., Еселевич В.Г. Фрактальная структура гелиосферного плазменного слоя на орбите Земли. *Геомагнетизм и аэрономия.* 2005. Т. 45, № 3. С. 347-358.
7. Parkhomov V.A., Borodkova N.L., Eselevich V.G., Eselevich M.V., Dmitriev A.V., Chilikin V.E. Solar wind diamagnetic structures as a source of substorm – like disturbances. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* 2018. V. 181. P. 55-67. DOI: 10.1016/j.jastp.2018.10.010
8. Пархомов В.А., Бородкова Н.Л., Еселевич В.Г., Еселевич М.В. Резкие изменения концентрации в спорадическом солнечном ветре и их воздействие на магнитосферу Земли. *Космич. исслед.* 2015. Т. 53, № 6. С.449.

9. Пархомов В.А., Еселевич В.Г., Еселевич М.В. и др. Классификация магнитосферных откликов на взаимодействие с диамагнитными структурами медленного солнечного ветра. *Солнечно-земная физика*. 2020. Т. 6, № 4. С. 26–41. DOI: 10.12737/szf-64202004
10. Svalgaard L.J., Wilcox W., Duvall T.L. A model combining the solar magnetic field. *Solar Phys.* 1974. V. 37. P. 157.
11. Eiselevich V.G., Fainshtein V.G., Rudenko G.V. Study of the structure of streamer belts and chains in the solar corona. *Solar Phys.* 1999. V. 188. P. 277.
12. Wang Y.M., Sheeley N.R., Rich N.B. Coronal pseudostreamers. *Astrophys. J.* 2007. V. 685. P. 1340.
13. Borrini G., Wilcox J.M., Gosling J.T., Bame S.J., Feldman W.C. Solar wind helium and hydrogen structure near the heliospheric current sheet; a signal of coronal streamer at 1 AU. *J. Geophys. Res.* 1981. V. 86. P. 4565.
14. Eiselevich V.G., Fainshtein V.G. The heliospheric current sheet (HCS) and high-speed solar wind: interaction effects. *Planet. Space Sci.* 1991. V. 39. P. 737- 744.
15. Gjerloev J.W. The SuperMAGdata processing technique. *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. A09213. doi:10.1029/2012JA017683.
16. Kangas J., Guglielmi A., Pokhotelov O. Morphology and physics of short-period magnetic pulsations (A Review). *Space Sci. Rev.* 1998. V. 83. P. 435–510.
17. Yahnina T.A., Frey H.U., Bösinger T., Yahnin A.G. Evidence for subauroral proton flashes on the dayside as the result of the ion cyclotron interaction. *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. A07209. doi:10.1029/2008JA013099