

О СООТВЕТСТВИИ ГЛОБАЛЬНОЙ ИЗОЛИРОВАННОЙ СУББУРИ СТАТИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МАК-ФЕРРОНА

CORRESPONDENCE OF A GLOBAL ISOLATED SUBSTORM TO THE MCPHERRON STATISTICAL MODEL

В.А. Пархомов 

Байкальский государственный университет,
Иркутск, Россия, pekines_41@mail.ru

В.Г. Еселевич 

Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, esel@iszf.irk.ru

М.В. Еселевич 

Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, mesel@iszf.irk.ru

Б. Цэгмэд 

Институт астрономии и геофизики МАН,
Улан-Батор, Монголия, tseg@iaq.ac.mn

С.Ю. Хомутов 

Институт космических исследований
и распространения радиоволн ДВО РАН,
Паратунка, Россия, khomutov@ikir.ru

Т. Райта 

Геофизическая обсерватория Соданкюля Университета Оулу,
Соданкюля, Финляндия, tero.raita@sgo.fi

Г.В. Попов

Байкальский государственный университет,
Иркутск, Россия, popov2898@mail.ru

А.А. Мочалов

Полярный геофизический институт,
Апатиты, Россия, mochalov@pgia.ru

С.В. Пильгаев

Полярный геофизический институт,
Апатиты, Россия, pilgaev@pgia.ru

†Р.А. Рахматулин

Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия

V.A. Parkhomov

Baikal State University,
Irkutsk, Russia, pekines_41@mail.ru

V.G. Eselevich

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, esel@iszf.irk.ru

M.V. Eselevich

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, mesel@iszf.irk.ru

B. Tsegmed

Institute of Astronomy and Geophysics MAS,
Ulaanbaatar, Mongolia, tseg@iaq.ac.mn

S.Yu. Khomutov

Institute of Cosmophysical Research
and Radio Wave Propagation FEB RAS,
Paratunka, Russia, khomutov@ikir.ru

T. Raita

Sodankylä Geophysical Observatory, University of Oulu,
Sodankylä, Finland, tero.raita@sgo.fi

G.V. Popov

Baikal State University,
Irkutsk, Russia, popov2898@mail.ru

A.A. Mochalov

Polar Geophysical Institute RAS,
Apatity, Russia, mochalov@pgia.ru

S.V. Pilgaev

Polar Geophysical Institute RAS,
Apatity, Russia, pilgaev@pgia.ru

†R.A. Rakhmatulin

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia

Аннотация. Показано, что 22.12.2015 на орбиту Земли прибывает диамагнитная структура (ДС) медленного солнечного ветра (СВ), источником которой на Солнце является цепочка стримеров. Взаимодействие этой ДС с магнитосферой Земли происходит в условиях, когда в предшествующем ему невозмущенном СВ продолжительное время сохранялась северная ориентации компоненты B_z межпланетного магнитного поля (ММП). В результате взаимодействия и резкой смены направления B_z на южное происходит генерация изолированной суббури, длительность которой определяется длительностью взаимодействия ДС с магнитосферой. 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. Показано совпадение вариаций параметров СВ и ММП для изолированной суббури, энергетическим источником которой была ДС медленного СВ, а триггером — резкая смена направления вертикальной ком-

Abstract. It is shown that a diamagnetic structure (DS) of the slow solar wind (SW), the source of which on the Sun was a chain of streamers, arrived at Earth's orbit on December 22, 2015. It interacted with Earth's magnetosphere under conditions when the northward B_z component of the interplanetary magnetic field (IMF) remained for a long time in preceding undisturbed SW. The interaction and a sharp change in the direction of B_z to the south generated an isolated substorm whose duration depends on the duration of interaction with the DS. The substorm began at midday with the passage of the DS into the magnetosphere and spread to the east. All phases of the substorm — growth, expansion, and recovery — were observed for two hours. Variations in the SW and IMF parameters are shown to coincide for the isolated substorm whose energy source was the slow solar wind DS, and a trigger was the abrupt change in the direction of the vertical IMF component from north to south. The coincidence is justified by statistical generalizations of the same parameters in 40 % of cases of long-term observations of individual substorms whose trigger was a change in B_z direction.

поненты ММП с северного на южное. Это совпадение подтверждается статистическим обобщением тех же параметров в 40 % случаев длительных наблюдений индивидуальных суббурь, триггером которых была смена направления B_z .

Ключевые слова: диамагнитная структура, глобальная суббуря, смена направления B_z , триггер.

Keywords: diamagnetic structure, global isolated substorm, change in the B_z direction, trigger.

ВВЕДЕНИЕ

Один из главных вопросов физики магнитосферы о факторах, контролирующих поступление энергии в магнитосферу и интенсивность суббурь, в настоящее время остается открытым. Установлено, что источниками энергии магнитосферных суббурь являются плазма солнечного ветра (СВ) и межпланетное магнитное поле (ММП). Наиболее распространена точка зрения, согласно которой главными параметрами, определяющими накопление в хвосте магнитосферы энергии, выделяемой в ходе суббурь, являются ММП и его B_z -компонента. Параметры солнечного ветра — скорость и концентрация плазмы СВ — не рассматриваются отдельно как источники энергии суббуревых возмущений, но входят в различные комбинированные индексы [Akasofu, 2017; Kepko et al., 2015; Vorobjev et al., 2018; Troshichev, Janzhura, 2012].

В работах [Lemaire, Roth, 1981; Pneuman, 1983; Karlsson et al., 2015] введено понятие плазматидов в СВ. Такие структуры в [Еселевич, Еселевич, 2005; Parkhomov et al., 2018] определены как плазменные диамагнитные структуры (ДС). Столкновение диамагнитных структур медленного СВ с магнитосферой может вызывать суббуреподобные магнитосферные возмущения и, в частности так называемые пилообразные суббури (sawtooth substorms). В работах [Еселевич, Еселевич, 2005; Parkhomov et al., 2018; Пархомов и др., 2015, 2020] 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 [Svalgaard et al., 1974; Eselevich et al., 1999] и цепочки стримеров [Eselevich et al., 1999] или псевдостримеры [Wang et al., 2007]. На орбите Земли медленный СВ характеризуется повышенной концентрацией плазмы $N > 10 \pm 2 \text{ см}^{-3}$ и относительно небольшой скоростью $V \approx 250\text{--}450 \text{ км/с}$ по сравнению с быстрым СВ, истекающим из корональных дыр, скорость которого составляет $V \approx 450\text{--}800 \text{ км/с}$ [Borini et al., 1981; Eselevich, Fainshtein, 1991].

И цепочки стримеров в короне, и пояс стримеров выглядят в белом свете как последовательность лучей повышенной яркости (концентрации плазмы), и в них течет медленный СВ примерно с одними и теми же свойствами. Однако цепочки отличаются от пояса тем, что разделяют в короне области с открытыми магнитными силовыми линиями, имеющими одинаковую полярность [Svalgaard et al., 1974].

При этом лучи повышенной яркости 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 B .

В данной работе мы продолжаем исследование природы глобального возмущения магнитосферы, связанного с воздействием 22.12.2015 на магнитосферу Земли ДС, источником которой на Солнце является цепочка стримеров. Эта диамагнитная структура (далее ДС 22.12.2015) вызвала глобальное магнитосферное возмущение в виде мощной изолированной суббури ($AE_{\text{макс}} = 1076 \text{ нТл}$) и слабой магнитной бури ($SYM-H_{\text{макс}} = -37 \text{ нТл}$).

1. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА

В первой части статьи выполнено отождествление источника ДС 22.12.2015 на Солнце, а затем прослеживается динамика движения ДС в солнечном ветре и магнитосфере по наблюдениям на спутниках ACE, Wind, THEMIS, GOES-13, GOES-15, RPSB A, B (Van Allen). Магнитосферный отклик анализируется по данным наземных сетей магнитометров INTERMAGNET, CARISMA, IMAGE и индукционных магнитометров обсерваторий Ивало, Борок, Ловозеро, Монды, Исток, Паратунка. Детали наземного отклика исследуются по наблюдениям на трех меридианах — полуденном, вечернем, полуночном. В качестве показателей геомагнитной активности используются индексы авроральной магнитной активности: глобальный индекс SML, определяемый по измерениям геомагнитного поля на глобальной сети из 300 обсерваторий проекта SuperMag [Gjerloev, 2012], IL — локальный индекс, определяемый по вариациям геомагнитного поля на меридиональной сети магнитометров IMAGE [https://space.fmi.fi/image/www/index.php?page=il_index], и CL -индекс, определяемый по наблюдениям на канадской сети магнитометров CARISMA [<http://carisma.ca/carisma-data/fgm-auroral-indices>].

Список и положение спутников, данные которых используются, приведены на рис. 1, 2 и в табл. 1, а список обсерваторий — в табл. 2.

Нас будет интересовать ДС 22.12.2015, представленная на рис. 3 в виде вариаций составляющих B , B_y , B_z ММП, параметров плазмы СВ V , N , P и индексов геомагнитной активности AL и $SYM-H$ по данным OMNI [<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/eval2.cgi>]. Вертикальным прямоугольником в интервале времени $\approx 09:00\text{--}12:00 \text{ UT}$ выделена ДС, которая определялась по антикорреляции профилей концентрации плазмы N и модуля ММП B . ДС вызвала магнитосферное возмущение в виде изолированной суббури ($AL_{\text{макс}} = 1076 \text{ нТл}$), наблюдавшейся на фазе затухания большой магнитной бури 20.12.2015 $Dst_{\text{макс}} = 155 \text{ нТл}$

Таблица 1

Координаты спутников в 09:40 UT

№	Спутник	x_{GSM}, R_E	y_{GSM}, R_E	z_{GSM}, R_E	R, R_E
1	ACE	239.89	-10.57	24.62	241.38
2	Wind	194.42	-18.66	-11.19	195.63
3	THA	11.52	1.40	-3.47	12.11
4	THB	-4.32	35.59	-4.22	36.10
5	THC	-4.32	37.00	-3.68	37.43
6	THD	-11.95	1.32	-4.41	12.80
7	THE	-11.37	1.37	-4.00	12.13
8	Geotail	-0.24	29.16	1.83	29.22
9	GOES-13	-2.99	-6.08	-0.50	6.80
10	GOES-15	-5.99	1.00	-2.60	6.61
11	RPSB-A	3.54	4.41	0.13	5.66
12	RPSB-B	4.00	3.98	0.20	5.65

Таблица 2

№	Название станции и аббревиатура	Геомагнитные координаты, град.		Местное геомагнитное время, ч	Меридиональная цепочка	Тип магнитометра и частота дискретизации
		N	E			
1	Ловозеро (LOZ)	63.5	126.8	UT+2	IMAGE	индукционный, 40 Гц
2	Борок (BOR)	53.6	123.6	UT+2	ИФЗ	индукционный, 10 Гц
3	Исток (IST)	60.1	166.5	UT+6	ИСЗФ	индукционный, 64 Гц
4	Монды (MND)	42.5	177.5	UT+7	ИСЗФ	индукционный, 64 Гц
5	Паратунка (PET)	46.3	222.6	UT+11	ИКИР	индукционный, 64 Гц
6	Ministik Lake (MSTK)	60.1	309.1	UT-8.1	CARISMA	индукционный, 20 Гц
7	Fort Churchill (FCHU, FCC)	67.4	330.3	UT-6.4	CARISMA	индукционный, 20 Гц феррозондовый, 1 Гц
8	Ivalo (IVA)	65.1	121.1	UT+2	IMAGE	индукционный, 40 Гц
9	О. Визе (VIZ)	70.4	163.5	UT+6	ААНИИ	феррозондовый, 0.0166 Гц
10	Певек (PBK)	70.83	170.90	UT+11	ААНИИ	феррозондовый, 0.0166 Гц
11	Tamanrasset (TAM)	24.45	82.30	UT+1	INTERMAGNET	феррозондовый, 0.0166 Гц
12	Hyderabad (HYB)	8.84	152.23	UT+6	INTERMAGNET	феррозондовый, 0.0166 Гц
13	Guam (GUA)	5.80	216.49	UT+9.6	INTERMAGNET	феррозондовый, 0.0166 Гц
14	San Juan (SJG)	27.78	6.94	UT-4	INTERMAGNET	феррозондовый, 0.0166 Гц

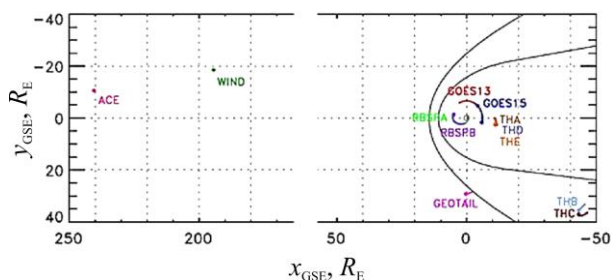


Рис. 1. Положение спутников внутри магнитосферы в GSE-координатах в плоскости XY с 09 до 13 UT 22.12.2015. Точки — начало движения

в 23:00 UT [http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_provisional/201512/index.html]. Приведем доказательства изоли-

рованности и глобальности суббури, вызванной этой ДС. Несмотря на существенные вариации параметров СВ и ММП в течение семи часов до начала суббури, связанной с ДС, средние значения индексов авроральной магнитной активности изменяются незначительно ($AE_{cp} = 136.2 \pm 3.4$ нТл, $AL_{cp} = -50.4 \pm 2.8$ нТл) и суббурь, кроме исследуемой, не наблюдается (см. рис. 3). Таким образом, согласно алгоритму определения изолированности [Vogobjev et al., 2018] суббуря является изолированной. Глобальность суббури подтверждается синхронными изменениями индексов магнитной активности SML , CL и IL и H -компоненты в авроральных и низкоширотных обсерваториях (см. ниже рис. 6).

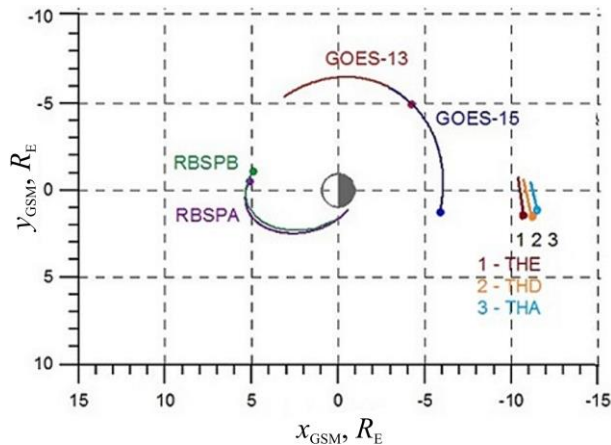


Рис. 2. Положение спутников внутри магнитосферы в GSM-координатах в плоскости XY с 09 до 13 UT

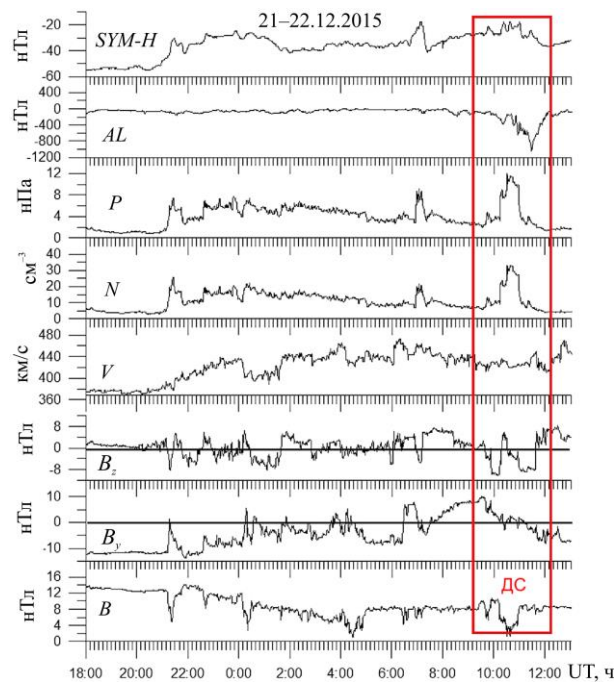


Рис. 3. Вариации составляющих B , B_y , B_z ММП, параметров плазмы СВ V , N , P и индексов геомагнитной активности AL и $SYM-H$ по данным OMNI [<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/eval2.cgi>]. Прямоугольником выделена ДС

2. ОТОЖДЕСТВЛЕНИЕ ДС НА ОРБИТЕ ЗЕМЛИ 22.12.2015 И ЕЕ ИСТОЧНИКА НА СОЛНЦЕ

Установим источник этой ДС на Солнце и рассмотрим события, которые предшествовали ее появлению на орбите Земли, на расстоянии 1 а.е. С этой целью данные по ММП и СВ (см. рис. 3) представим на более длительном временном интервале 16–23 декабря 2015 г. (рис. 4). Из рис. 4 следует, что перед появлением ДС наблюдались ударная волна (19.12.2015, ~16:05 UT), которой соответствует SSC [<http://www.obsebre.es/en/rapid>], а за ней — область ударно-нагретой плазмы и магнитное облако, или межпланетный корональный выброс массы (ICME). Скорость ударного фронта на расстоянии 1 а.е. $V_s \approx 470$ км/с. Согласно [Eselevich, 1990], время пролета

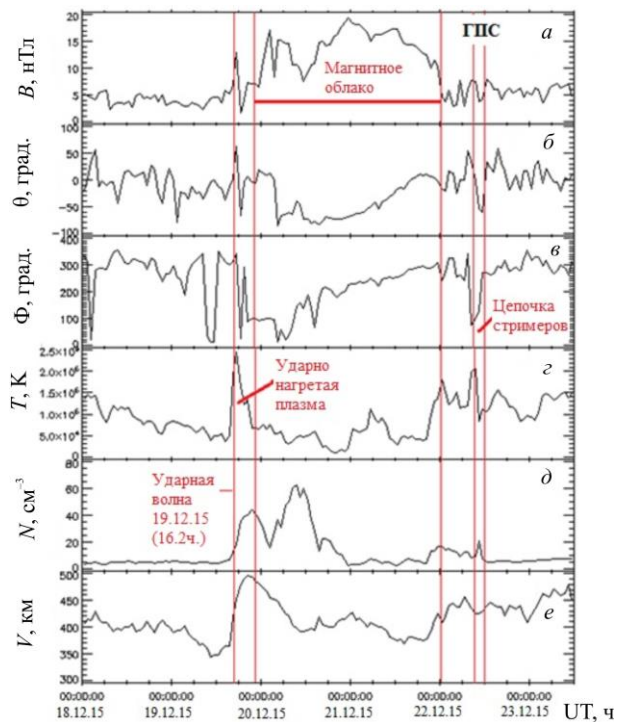


Рис. 4. Параметры межпланетного магнитного поля и плазмы солнечного ветра: модуль ММП (а); долготный угол θ ММП (б); азимутальный угол Φ ММП (в); температура плазмы СВ T (г); концентрация плазмы N (д); скорость СВ V (е). Участки пояса стримеров на орбите Земли и гелиосферный плазменный слой (ГПС) выделены вертикальными линиями. По данным OMNI [<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/eval2.cgi>]

Δt такого фронта от Солнца до Земли можно оценить по формуле

$$\Delta t \approx 215 R_{\odot} / (1.5 V), \quad (1)$$

где $R_{\odot} \approx 6.9 \cdot 10^6$ км — радиус Солнца.

Для $V_s \approx 470$ км/с по формуле (1) получаем $\Delta t \approx 2$ сут 10 ч. Отсюда следует, что корональный выброс массы (КВМ), который стал источником ICME и ударной волны, возник на Солнце 17.12.15 в ~16:00 UT. Согласно каталогу КВМ [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list], ближайший по времени и по максимальной скорости КВМ типа гало произошел на Солнце в точке с координатами S13W04 в ~09:36 UT 16.12.2015 и сопровождался рентгеновской вспышкой класса C7. Его начальная радиальная скорость V_0 оценивается из соотношения [Schwenn et al., 2005]:

$$V_0 \approx V_e / 0.88 = 740 \text{ км/с},$$

где $V_e \approx 650$ км/с — максимальная скорость гало-КВМ в картинной плоскости вблизи Солнца по данным [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list].

Очевидно, что с точностью по времени около суток этот КВМ является единственным возможным источником рассматриваемых нами ударной волны и ICME на расстоянии 1 а.е., поскольку в декабре 2015 г. в течение как минимум недели подобных быстрых гало-КВМ больше нет [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list].

Как следует из рис. 4, ДС 22.12.2015 прибыла на расстояние 1 а.е. тогда, когда все эти события закончились. Возникает вопрос: что является ее ис-

точником на Солнце? Прежде чем ответить на этот вопрос, отметим, что, согласно рис. 4, эта ДС характеризуется следующими особенностями:

- 1) повышенной концентрацией плазмы $N \approx 30\text{--}35 \text{ см}^{-3}$;
- 2) небольшой скоростью СВ $V \approx 430 \text{ км/с}$;
- 3) наличием в ее пределах четного числа изменения знака ММП, поскольку изменение азимутального угла Φ происходит примерно на 180° (от $\approx 320^\circ$ до $\approx 140^\circ$) и обратно, т. е. знак ММП меняется сначала от «-» (направление к Солнцу) к «+» (от Солнца), а затем обратно.

Такие особенности характерны для потоков СВ, истекающих из цепочек стримеров [Eselevich et al., 2007]. Чтобы отождествить источник на Солнце ДС 22.12.2015, обратимся к рис. 5. На нем по результатам расчетов Г.В. Руденко [<http://bdm.iszf.irk.ru>] в потенциальном приближении для $\sim 20:31 \text{ UT } 15.12.2015$ приведены положения оснований открытых магнитных трубок, соответствующих корональным дырам (КД) в сферических координатах (а) и синоптическая карта кэррингтоновского оборота CR2171 (б).

Нас будет интересовать участок пересечения цепочки стримеров (штриховая кривая) с эклипстикой, отмеченный на синоптической карте рис. 5, б буквой «О» (вблизи долготы $\approx 112^\circ$) и вертикальной стрелкой. Рассматриваемая цепочка стримеров разделяет основания корональных дыр, обозначенных а и б на рис. 5, а. Положение центрального меридиана в $\sim 20:31 \text{ UT } 15.12.2015$ показано вертикальной толстой линией на рис. 5, б. Вследствие вращения Солнца, как видно из рис. 5, б, точка О пересечет центральный меридиан, когда тот сместится влево по долготе примерно на 15° , что соответствует интервалу времени $\sim 1 \text{ сут } 3 \text{ ч}$ (поворот на 13.3° происходит за 1 сут), т. е. 17.12.20 в момент времени $t_0 \approx 00:00 \text{ UT}$ точка О будет находиться на центральном меридиане. На орбите Земли область СВ с четным числом изменений знака азимутального угла ММП, повышенной концентрацией плазмы $N \approx 30\text{--}35 \text{ см}^{-3}$ и сравнительно небольшой скоростью $V \approx 430 \text{ км/с}$ наблюдалась 22.12.2015 во временном интервале 08:00–12:00 UT

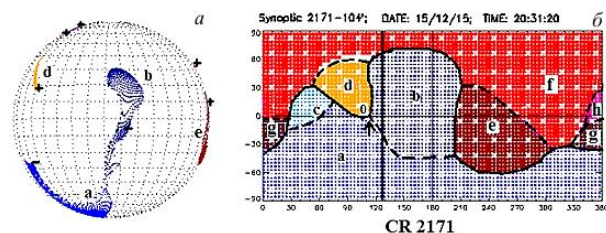


Рис. 5. Результаты расчетов Руденко Г.В. [<http://bdm.iszf.irk.ru>] в потенциальном приближении для 15.12.2015 ($\sim 20:31 \text{ UT}$): а — положений оснований открытых магнитных трубок, соответствующих корональным дырам (КД) в сферических координатах («+» — полярность магнитного поля, направленная от Солнца, «-» — к Солнцу); б — синоптическая карта кэррингтоновского оборота CR2171, на которой показаны положения нейтральной линии (сплошная кривая) и цепочек стримеров (штрихи) на поверхности источника ($R = 2.5R_\odot$); толстая вертикальная прямая соответствует положению центрального меридиана для 15.12.2015 ($\sim 22:31 \text{ UT}$). Разными цветами и латинскими буквами а–h обозначены области радиального магнитного поля из различных корональных дыр

(см. рис. 5). Это и есть интересующая нас ДС. По формуле $t_{\text{Earth}} \approx [t_0 + 4.6 \cdot 10^4/V]$ из статьи [Eselevich et al., 2007] можно оценить время прибытия на орбиту Земли плазмоида, являющегося продолжением участка О цепочки стримеров, пересекающей центральный меридиан на рис. 5, б в момент $t_0 \approx 00:00 \text{ UT } 17.12.20$, полагая $V \approx 430 \text{ км/с}$: $\Delta t_{\text{Earth}} \approx 4.6 \cdot 10^4/V \approx 107 \text{ ч} \approx 4 \text{ сут } 11 \text{ ч}$. Отсюда $t_{\text{Earth}} \approx 21.12.2015 (11:00 \text{ UT})$. Это с точностью $\approx 1 \text{ сут}$ согласуется с наблюдаемым временем появления ДС на расстоянии 1 а.е. 22.12.2015 (08:00–12:00 UT).

Таким образом, мы приходим к выводу, что источником на Солнце ДС, зарегистрированной 22.12.2015 (08:00–12:00 UT), является цепочка стримеров.

Диаманитная структура движется к орбите Земли со скоростью медленного СВ 430 км/с и имеет ряд особенностей. Прежде всего, в течение $\sim 4.5 \text{ ч}$ (05:00–09:36 UT) вертикальная компонента ММП имеет преимущественно северное направление и среднее значение 2.3 нТл, а с 07:10 до 09:36 UT среднее значение B_z составило 6.1 нТл. Важно отметить, что B_y - и B_x -компоненты ММП также имеют положительные значения. Эти факты говорят о том, что накопления энергии в магнитосфере за счет пересоединения магнитосферного магнитного поля и ММП не происходит.

Среднее значение концентрации плазмы СВ в интервале 07:10–09:40 UT было $N = 8.4 \text{ см}^{-3}$. В 09:40 произошел скачок до $N \approx 13 \text{ см}^{-3}$, в 10:13 концентрация возросла до $\sim 21 \text{ см}^{-3}$, а в 10:40 UT достигла максимального значения 33 см^{-3} . Характерно, что модуль ММП меняется в противофазе с концентрацией ($r = -0.74$), что является, как уже отмечалось выше, признаком диаманитной структуры [Parkhomov et al., 2018].

3. ГЛОБАЛЬНЫЙ ГЕОМАГНИТНЫЙ ОТКЛИК МАГНИТОСФЕРЫ НА ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ДС 22.12.2015

Рассмотрим геомагнитный отклик на взаимодействие ДС с магнитосферой в вариациях индексов SML, IL, CL (рис. 6, а, д), в долготных особенностях режима геомагнитных пульсаций (рис. 6, е) и вариациях горизонтальной компоненты геомагнитного поля (см. рис. 6, ж). Согласно [Gjerloev, 2012], суббури началась в 10:14 UT (стрелка 1 на рис. 6, а, д). Однако по изменениям IL-индекса (рис. 6, а, д, синие кривые) начало суббури можно определить в $\sim 09:38 \text{ UT}$. В это же время происходит смена знака B_z (отмечено вертикальной красной линией), что предполагает включение триггера, открывающего поступление энергии внутрь магнитосферы. По вариациям индексов можно выделить три фазы суббури (обозначены I, II, III). На первой фазе 09:38–10:14 UT изменения IL-индекса от -0 до -60 нТл (рис. 6, а, д, синие кривые), CL-индекса от -50 до -80 нТл (рис. 6, д, красная кривая) и SML-индекса от -230 до -400 нТл (рис. 6, а, красная кривая) совпадают с изменением B_z от 0 до -10 нТл (рис. 6, б) и возрастанием концентрации плазмы СВ от 5 до 10.6 см^{-3} (рис. 6, в). Вторая фаза

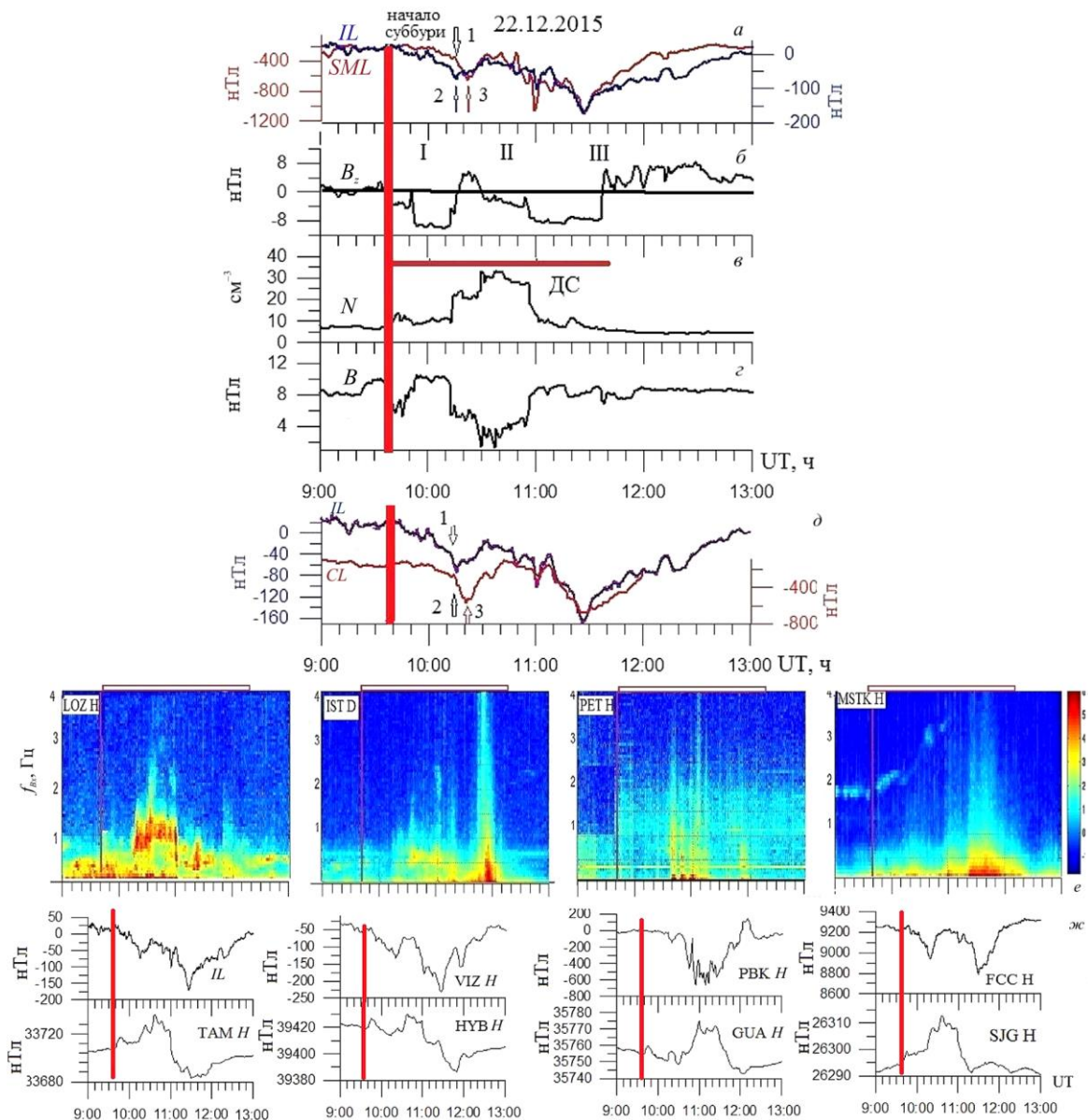


Рис. 6. Вариации индексов SML и IL (а), B_z ММП (б), плотности СВ (в), модуля напряженности ММП по измерениям на Wind (г), индексов IL и CL (д), спектрограммы геомагнитных пульсаций в различных долготных секторах (е), магнитограммы авроральных и низкоширотных обсерваторий в одном долготном интервале, соответствующем долготам обсерваторий, в которых получены спектрограммы (ж). Горизонтальным прямоугольником обозначена ДС. Сплошная вертикальная линия — начало взаимодействия с ДС. Стрелками показаны: 1 — начало суббури по [Gjerloev, 2012]; 2 и 3 — максимумы по абсолютной величине IL -индекса и CL -индекса соответственно. Римскими цифрами обозначены фазы суббури: I — подготовительная; II — взрывная; III — восстановительная

суббури начинается скачком концентрации плазмы от 9 до 31 cm^{-3} , падением модуля ММП с 11 до 5 нТл и изменения B_z от -10 до $+10$ нТл. Этот момент совпадает с определенным в [Gjerloev, 2012] моментом начала суббури 10:14 UT. В активной фазе суббури с 10:55 UT все индексы изменяются синхронно, наблюдается два одновременных экстремума индексов SML , IL , CL в 11:00 и 11:27 UT. В 11:30 UT начинается восстановительная фаза — ослабление интенсивности ионосферных токов и возврат значений всех индексов к невозмущенному уровню. Отмеченная закономерность указывает на общую глобальную причину модуляции аврорального электроджета.

Такой причиной является взаимодействие с магнитосферой ДС, характеризующейся вариациями концентрации СВ и вертикальной компоненты ММП B_z . Продолжительность суббури и ее энергетика определяются длительностью (показана горизонтальной красной прямой на рис. 6) взаимодействия ДС с магнитосферой или поступлением энергии СВ, вносимой ДС в магнитосферу. Однако поступление энергии регулируется вариацией вертикальной компоненты ММП B_z .

Рассчитаем энергию $E_{\text{кин}}$, вносимую в магнитосферу ДС 22.12.2015 в течение $\Delta t \approx 40$ мин (2400 с) с 10:15 по 10:55 UT. Средние параметры СВ для

этого интервала: $N \approx 25 \text{ см}^{-3}$, $V_{sw} \approx 430 \text{ км/с}$. Диаметр ДС: $d \approx \Delta t V_{sw} \approx 2400 \cdot 430 \approx 1.03 \cdot 10^6 \text{ км}$. Площадь сечения ДС: $S \approx \pi d^2/4 \approx 8.4 \cdot 10^{11} \text{ км}^2$.

Длина ДС, воздействующей на магнитосферу: $L \approx 30 R_E \approx 1.9 \cdot 10^5 \text{ км}$.

Получаем объем структуры: $SL \approx 1.6 \cdot 10^{17} \text{ км}^3$ ($\sim 1.6 \cdot 10^{32} \text{ см}^3$).

$$E_{\text{кин}} = Nm_p V_{sw}^2$$

$$E_{\text{кин}} = Nm_p V_{sw}^2 SL \approx 6.14 \cdot 10^{24} \text{ эрг} (6.14 \cdot 10^{14} \text{ Дж}).$$

Полученное значение сравнимо с оценками энерговыделения во время суббурь в «Краткосрочном прогнозе космической погоды» ИКИ РАН [<http://spaceweather.ru/ru/node/32>]. Для оценки поступившей в магнитосферу энергии за 90 мин используется параметр $\varepsilon = 2 \cdot 10^7 V_i B^2 \sin(\theta/2)^4 \text{ [Вт]}$, где B — магнитное поле в нТл; V_i — скорость солнечного ветра в км/с; θ — часовой угол ММП в плоскости YZ. По оценкам [<http://spaceweather.ru/ru/node/32>], в магнитосферу за 90 мин при уровне «спокойно» поступает $E_{90} < 10^{14} \text{ Дж}$, а при уровне «слабые суббури» — $E_{90} = 10^{14} - 10^{15} \text{ Дж}$, что сравнимо с энергией ДС 22.12.2015.

Рассмотрим особенности режимов геомагнитных пульсаций от полуденных к полуденным и утренним часам, поскольку ультранизкочастотные излучения, отражением которых они являются, служат хорошим индикатором магнитосферных процессов, связанных с суббурями [Saito, 1969; Nishida, 1980; Kangas et al., 1998]. В околополуденном секторе наблюдаются колебания в частотном диапазоне Pc1 с нестационарным спектром (рис. 6, е, LOZ H), которые сопровождаются усилением западного тока, отразившимся в возрастании до -200 нТл IL-индекса (рис. 6, д), определяемого по вариациям H -компоненты на меридиональной сети магнитометров IMAGE. К востоку в вечернем секторе 16–18 MLT происходит кратковременная интенсификация аврорального тока (отрицательная бухта $\sim -600 \text{ нТл}$ на рис. 6, ж, VIZ H) и регистрируется широкополосный всплеск пульсаций Pi1-2 в $\sim 10:20 \text{ UT}$ (рис. 6, е, IST D). В околополуденном секторе (21–23 MLT, RBK) резко возрастает интенсивность западной электроструи ($H \sim -700 \text{ нТл}$), на среднеширотной станции этого меридиана PET регистрируются последовательные широкополосные всплески Pi1-2, характерные для предварительной фазы суббури (см. рис. 6, е, ж) [Рахматулин и др., 1984; Karlsson et al., 2015]. В послеполуденном секторе (02–06 MLT) наблюдаются обычные явления, составляющие суббурю — мощный западный ток ($H = -500 \text{ нТл}$), пульсации PiC, свойственные восстановительной фазе суббури (в обсерваториях MSTK, FCC сети CARISMA). Смена вдоль долготы режимов и типов наблюдаемых геомагнитных пульсаций отражает динамику взаимодействия ДС с магнитосферой и показывает одновременное возбуждение пульсаций разного типа, что является, в свою очередь, отражением различных механизмов генерации МГД-волн. Кроме того, наблюдается запаздывание максимумов усиления ионосферных токов к востоку от полуденного меридиана (см. рис. 6, стрелки 2, 3). Отмеченные закономерности смены режимов пульсаций вдоль долготы

не укладываются в существующие модели генерации типов геомагнитных пульсаций, сопровождающих суббурю, и противоречат классическим результатам [Akasofu, 2017; Kerko et al., 2015]. Все классические модели начала магнитосферной суббури включают основные элементы токового клина суббури, который перемещается к западу от полуночного меридиана и обеспечивает основной путь для связи реконфигурации магнитосферы с динамикой ионосферы.

Отличия рассматриваемой изолированной глобальной суббури от классической подтверждаются также рис. 7, а–е, где представлены параметры СВ и ММП, спектрограммы геомагнитных пульсаций в обсерваториях Ивало (низкочастотная часть спектра 0.022–0.0045 Гц) и Ловозеро (высокочастотная часть 0.1–4 Гц), вариации парциальной плотности протонов внутри магнитосферы на расстоянии $\sim 5 R_E$ на спутнике RBSPA и осциллограмма геомагнитных пульсаций, отфильтрованных в частном диапазоне 0.1–5 Гц, в обсерватории Ивало. Как видно на рис. 7, в,

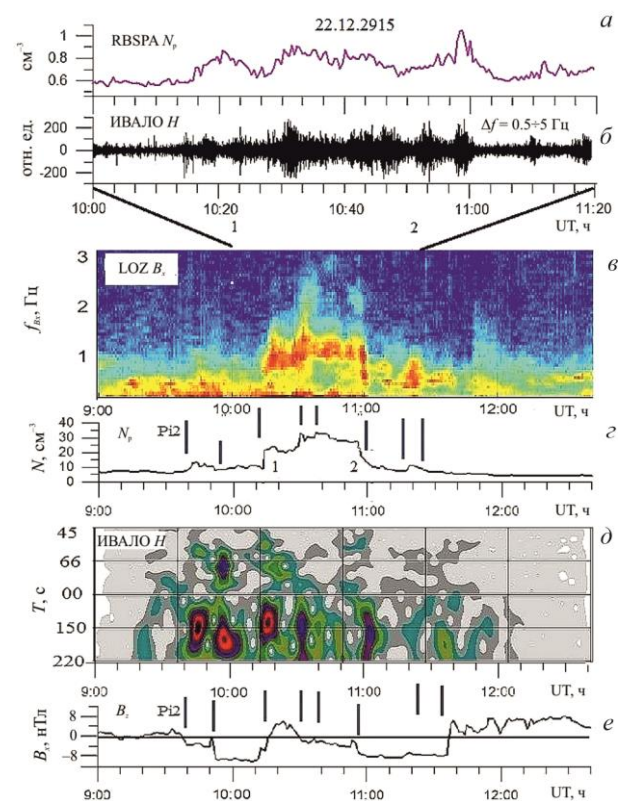


Рис. 7. Суббури в геомагнитных пульсациях в околополуденные часы, генерированная ДС: парциальная плотность протонов на спутнике RBSPA (а); вариация интенсивности геомагнитных пульсаций в частотном диапазоне 0.5–5 Гц (б); спектрограмма геомагнитных пульсаций высокочастотного диапазона Pc1 (IPDP) в обсерватории Ловозеро (в); вариация концентрации протонов СВ в ДС (г); спектрограмма геомагнитных пульсаций в частотном диапазоне 45–220 с в обсерватории Ивало (д); вариация B_z ММП (е). Вертикальными линиями отмечены интервалы соответствия возрастания концентрации протонов в СВ и генерации IPDP (в, г) и соответствия генерации Pi2 при переходе через 0 значения B_z (д, е). Цифрами 1, 2 отмечено соответствие интервалов возрастания концентрации протонов в солнечном ветре, вариации парциальной плотности протонов внутри магнитосферы на расстоянии $\sim 5 R_E$ и интенсивности геомагнитных пульсаций

в низкочастотной части спектра наблюдаются всплески (обозначено вертикальными отрезками) пульсаций Pi2 со средним периодом $T \sim 150$ с. Напомним, что пульсации Pi2 являются общепризнанным индикатором начала суббури. Однако 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 .

Напрашивается вывод о раздельном воздействии изменений ММП и скачков концентрации протонов на режим геомагнитных пульсаций. Всплески пульсаций Pi2 связаны с резкой сменой направления B_z -компоненты с северного на южное или наоборот, предположительно, вследствие пересоединения ММП и геомагнитного поля на магнитопаузе, генерации джетов в магнитослое и их импульсного прохождения внутрь магнитосферы. Подобная закономерность впервые обнаружена в [Dmitriev, Suvorova, 2015] и отмечена нами в [Пархомов и др., 2021], где показано, что всплески Pc4–5–Pi2 (100–200 с) могут быть связаны с прохождением МГД-волн из СВ в магнитосферу при проникновении ДС в магнитослой. Подтверждение этого предположения можно найти в [Katsavliasi et al., 2021], где показано, что Pi2-пульсации наблюдались в магнитослое и с задержкой 140 с внутри магнитосферы, что, по мнению авторов, связано с распространением джетов, генерирующих пульсации, в магнитослое с альфвеновской скоростью и прохождением волн через магнитопаузу. Как отмечалось нами в [Пархомов и др., 2021], возможным механизмом прохождения волн через магнитопаузу может быть импульсное прохождение согласно механизму [Echim, Lemaire, 2000].

Рассмотрим особенности пульсаций в частотном диапазоне 0.5–5 Гц (рис. 7, б, в). На рис. 7, в показаны пульсации Pc1 с нестационарным спектром. В спектре видны участки нарастания и падения частоты, которые по времени совпадают с нарастанием и падением концентрации плазмы СВ в ДС. Кроме того, огибающая амплитуды пульсаций (рис. 7, б) модулируется вариациями парциальной плотности протонов внутри магнитосферы (рис. 7, а). В работах [Yahnina et al., 2008; Яхнин и др., 2019] в качестве источника подобных колебаний рассматривалась циклотронная неустойчивость ионов кольцевого тока, стимулированная импульсным сжатием магнитосферы скачками давления СВ. Однако обратим внимание на особенности спектров колебаний, которые по морфологическим признакам близки к излучениям с нестационарным спектром типа IPDP, связанным с циклотронной неустойчивостью протонов, инжектируемых в радиационный пояс во время суббурь в предполуденные часы [Kangas et al., 1998].

Рассмотрим теперь явления в хвосте магнитосферы. По наблюдениям параметров плазмы и магнитного поля на спутниках THB, THC и THA, THD, THE можно проследить движение и трансформацию ДС 22.12.2015 на расстояниях $\sim 44.5R_E$ и $\sim 11.4R_E$ соответственно. Отметим важную деталь — ДС проникает в магнитослой, воздействует на магнитосферу

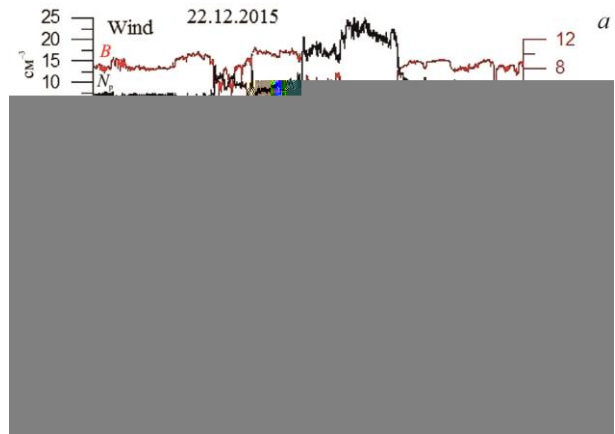


Рис. 8. Вариации модуля напряженности магнитного поля B (черная кривая) и концентрации протонов N_p (красная кривая): а — в солнечном ветре по данным спутника WIND; б — в магнитослое по данным спутника THB; в — в магнитосфере по данным спутника THE

и примерно через 15 мин последовательно наблюдается на спутниках THB, THC в магнитослое ($\sim 44.5R_E$) и, в деформированном виде, на спутниках THA, THD, THE в центральной части плазменного слоя хвоста магнитосферы ($\sim 11.4R_E$).

На рис. 8 детально показана динамика ДС. Примечательным фактом является сохранение структуры и временных масштабов ДС и антикорреляции профилей B и N_p при движении от спутника WIND ($\sim 200R_E$) к Земле и проникновении ДС в магнитослой на расстояниях вплоть до $\sim 44.5R_E$ (рис. 8 а, б). В области плазменного слоя хвоста магнитосферы на расстоянии $\sim 10R_E$ (THE) картина кардинально меняется. Наблюдаемые структуры уже не являются ДС, поскольку отсутствует антикорреляция B и N_p (рис. 8, в). При этом N_p уменьшается практически в десять раз (по сравнению с магнитослоем), а B возрастает примерно в пять раз. Все это, по-видимому, отражает диссипативные процессы, которые инициируются воздействием ДС на замагниченную плазму хвоста магнитосферы.

4. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Взаимодействие ДС с магнитосферой после длительного периода северной ориентации B_z генерирует изолированную глобальную суббурю, продолжительность которой определяется продолжительностью взаимодействия. Суббуря начинается в околополуденные часы вследствие воздействия ДС на магнитосферу и распространяется к востоку. Триггером суббури является резкая смена направления B_z -компоненты.

2. В течение двух часов наблюдаются все фазы суббури — подготовительная, взрывная и восстановительная, которые определяются совместным воздействием вариаций концентрации плазмы СВ и резких изменений направления вертикальной компоненты ММП.

3. Сжатие магнитосферы приводит к высыпанию протонов на расстоянии $\sim 5R_E$ и возбуждению циклотронной неустойчивости в радиационном поясе, что

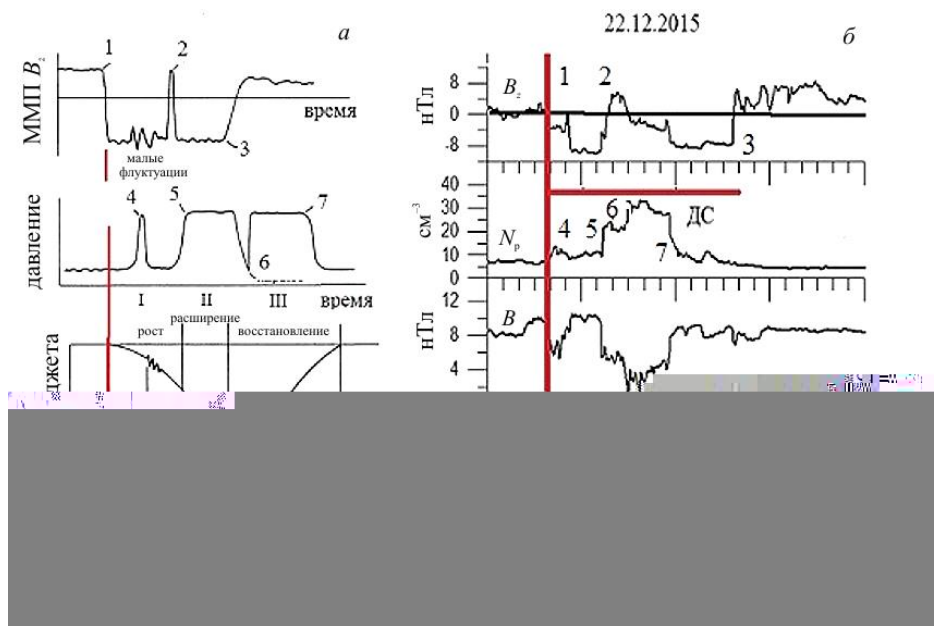


Рис. 9. Статистическая модель связи между вариациями параметров СВ и ММП во время изолированной суббури (а, сверху вниз): B_z ММП, давления СВ и AL -индекса. Вариации параметров СВ и ММП во время изолированной суббури 22.12.2015 г. (б, сверху вниз): вертикальной компоненты B_z , концентрации протонов СВ N_p , модуля напряженности ММП, индексов SML и IL . Арабскими цифрами обозначены характерные моменты суббури (см. рис. 1 из [McPherron et al., 1986]), римскими — фазы суббури

отражается в генерации колебаний $Pc1$ (IPDP) в околополуденные часы в большом широтно-долготном диапазоне.

4. ДС проходит в магнитосферу, и ее воздействие наблюдается в магнитослое и плазменном слое хвоста.

Полученные нами результаты и результаты исследований взаимодействия ДС с магнитосферой, опубликованные в статьях [Пархомов и др., 2015, 2020, 2021], могут получить объяснение в рамках модели [McPherron et al., 1986], представленной на рис. 9, а. Модель построена на основании большой статистики наблюдений глобальных изолированных суббурь, триггером которых была резкая смена длительно наблюдавшейся (~ 2 ч) северной ориентации B_z -компоненты ММП на южную. Суббури определялись по резкому стойкому снижению AL -индекса, совпадавшему с началом геомагнитных пульсаций $Pi2$. Верхняя панель рис. 9, а иллюстрирует изменения вертикальной компоненты ММП. Средняя панель иллюстрирует изменение давления СВ, а нижняя панель отражает вариации индекса AL западного электроджета в течение изолированной суббури. На нижней панели рис. 9, а представлена схема развития суббури. Важно подчеркнуть, что начало суббури связано с резким поворотом B_z -компоненты ММП к югу (обозначено красной вертикальной линией). Важно отметить также, что фазы суббури в модели определяются совместным изменением ММП и давления СВ. Этапы развития суббури на рис. 9 обозначены цифрами 1–7.

Теперь обратимся к рис. 9, б, где представлены те же параметры ММП, но вместо давления СВ взята концентрация протонов. Поскольку скорость СВ в рассмотренном событии остается постоянной (410 ± 12 км/с), вариация давления СВ будет определяться вариацией концентрации. Вместо AL -индекса

авроральной магнитной активности, используемого в цитируемых статьях, мы используем глобальный SML -индекс и локальный IL -индекс, вычисляемый по той же методике, что и AL .

На рис. 9, а, б видно удивительное совпадение деталей 1–7 в модели и исследуемой глобальной изолированной суббуре, генерированной взаимодействием с магнитосферой ДС 22.12.2015 медленного СВ. Согласно [Hsu, McPherron, 2003], подобная картина наблюдается в 44 % изолированных суббурь. В статье [Пархомов и др., 2020] показано, что 24 % изолированных суббурь связаны с ДС в медленном СВ. Однако эффекты взаимодействия ДС с магнитосферой, как было показано в [Пархомов и др., 2021], одинаковы для медленного и спорадического СВ, что может приблизить нашу статистику к статистике [Hsu, McPherron, 2003].

Авторы выражают искреннюю благодарность NASA CDAWEB за предоставление данных спутников ACE, Wind, Geotail, THEMIS, RBSPA, RBSPB, GOES-13, GOES-15, Интербол. Авторы благодарят руководителей, разработчиков приборов и руководителей экспериментов, проводимых на этих спутниках, за возможность использования данных. Авторы выражают благодарность I.R. Mann, D.K. Milling и другим работникам команды CARISMA за возможность использования данных. Благодарим также Г.В. Руденко за данные его расчетов. Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» [<http://ckp-rf.ru/ckp/3056>].

Работа В.А. Пархомова выполнена в рамках государственной темы ФГБОУ ВО «БГУ» на 2021–2022 гг. «Системный анализ и методы обработки информации в космических исследованиях». Работа В.Г. Еселевича и М.Г. Еселевича выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России. Работа Б. Цэгмэда

В.А. Пархомов, В.Г. Еселевич, М.В. Еселевич, Б. Цэгмэд,
С.Ю. Хомутов, Т. Райта, Г.В. Попов, А.А. Мочалов,
С.В. Пильгаев, Р.А. Рахматулин

V.A. Parkhomov, V.G. Eselevich, M.V. Eselevich, B. Tsegmed,
S.Yu. Khomutov, T. Raita, G.V. Popov, A.A. Mochalov,
S.V. Pilgaev, R.A. Rakhmatulin

поддержана грантом АН Монголии ШУАГ_2017/17 и проектом Министерства образования, науки и спорта Монголии ШУСС-2017/65; работа С.Ю. Хомутова поддержана темой «Физические процессы в системе ближнего космоса и геосфер при солнечных и литосферных воздействиях», № АААА-А21-121011290003-0. Измерения с помощью индукционных магнитометров обсерватории Паратунка выполняются в рамках «Соглашения по академическому обмену между ИКИР ДВО РАН и Исследовательским институтом Нагойи (Япония)» при поддержке проекта PWING (JSPS KAKENHI 16H06286).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Еселевич М.В., Еселевич В.Г. Фрактальная структура геосферного плазменного слоя на орбите Земли. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2005. Т. 45, № 3. С. 347–358.

Нишида А. *Геомагнитный диагноз магнитосферы*. М.: Мир, 1980, 222 с.

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. *Космические исследования*. 2015. Т. 53, № 6. С. 449. DOI: [10.7868/S002342061505009X](https://doi.org/10.7868/S002342061505009X).

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](https://doi.org/10.12737/szf-64202004).

Пархомов В.А., Еселевич В.Г., Еселевич М.В. и др. Магнитосферный отклик на взаимодействие с диамагнитной структурой спорадического солнечного ветра. *Солнечно-земная физика*. 2021. Т. 7, № 3. С. 12–30. DOI: [10.12737/szf-73202102](https://doi.org/10.12737/szf-73202102).

Рахматулин Р.А., Пархомов В.А., Луковникова В.И. О появлении пульсаций P1 в предварительную фазу суббури. *Магнитосферные исследования*. 1984. № 5. С. 111–120.

Яхнин А.Г., Титова Е.Е., Демехов А.Г. и др. Одновременные наблюдения ЭМИЦ- и КНЧ-волн и высыпаний энергичных частиц во время множественных сжатий магнитосферы. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2019. Т. 59, № 6. С. 714–726. DOI: [10.1134/S0016794019060142](https://doi.org/10.1134/S0016794019060142).

Akasofu S.-I. Auroral substorms: Search for processes causing the expansion phase in terms of the electric current approach. *Space Sci. Rev.* 2017. Vol. 212. P. 341–381. DOI: [10.1007/s11214-017-0363-7](https://doi.org/10.1007/s11214-017-0363-7).

Borini G., Wilcox J.M., Gosling J.T., et al. Solar wind helium and hydrogen structure near the heliospheric current sheet: a signal of coronal streamer at 1 AU. *J. Geophys. Res.* 1981. Vol. 86. P. 4565.

Dmitriev A.V., Suvorova A.V. Large-scale jets in the magnetosheath and plasma penetration across the magnetopause: THEMIS observations. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2015. Vol. 120, iss. 6. DOI: [10.1002/2014JA020953](https://doi.org/10.1002/2014JA020953).

Echim M.M., Lemaire J.F. Laboratory and numerical simulations of the impulsive penetration mechanism. *Space Sci. Rev.* 2000. Vol. 92. P. 56–601.

Eselevich V.G. Solar flares: geoeffectiveness and the possibility of a new classification. *Planet. Space Sci.* 1990. Vol. 38, iss. 2. P. 189–206. DOI: [10.1016/0032-0633\(90\)90083-3](https://doi.org/10.1016/0032-0633(90)90083-3).

Eselevich V.G., Fainshtein V.G. The heliospheric current sheet (HCS) and high-speed solar wind: interaction effects. *Planet. Space Sci.* 1991. Vol. 39. P. 737–744. DOI: [10.1016/0032-0633\(91\)90163-5](https://doi.org/10.1016/0032-0633(91)90163-5).

Eselevich V.G., Fainshtein V.G., Rudenko G.V. Study of the structure of streamer belts and chains in the solar corona.

Solar Phys. 1999. Vol. 188. P. 277–297. DOI: [10.1023/A:1005216707272](https://doi.org/10.1023/A:1005216707272).

Eselevich M., Eselevich V., Fujiki K. Streamer belt and chains as the main sources of quasi-stationary slow solar wind. *Solar Phys.* 2007. Vol. 240. P. 135–151. DOI: [10.1007/s11207-006-0197-z](https://doi.org/10.1007/s11207-006-0197-z).

Gjerloev J.W. The SuperMAGdata processing technique. *J. Geophys. Res.* 2012. Vol. 117, iss. A9, A09213. DOI: [10.1029/2012JA017683](https://doi.org/10.1029/2012JA017683).

Hsu T.-S., McPherron R.L. Occurrence frequencies of IMF triggered and nontriggered substorms. *J. Geophys. Res.* 2003. Vol. 108, iss. A7, 1307. DOI: [10.1029/2002JA009442](https://doi.org/10.1029/2002JA009442).

Kangas J., Guglielmi A., Pokhotelov O. Morphology and physics of short-period magnetic pulsations (A Review). *Space Sci. Rev.* 1998. Vol. 83. P. 435–510. DOI: [10.1023/A:1005063911643](https://doi.org/10.1023/A:1005063911643).

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. Vol. 120, iss. 9. P. 7390–7403. DOI: [10.1002/2015JA021487](https://doi.org/10.1002/2015JA021487).

Katsavriasi C., Rapits S., Daglis L.A., et al. On the generation of Pi2 pulsations due to plasma flow patterns around magnetosheath jets. *Geophys. Res. Lett.* 2021. Vol. 48, iss. 15, e2021GL093611. DOI: [10.1029/2021GL093611](https://doi.org/10.1029/2021GL093611).

Kepko L., McPherron R.L., Amm O., et al. Substorm Current Wedge Revisited. *Space Sci. Rev.* 2015. Vol. 190. P. 1–46. DOI: [10.1007/s11214-014-0124-9](https://doi.org/10.1007/s11214-014-0124-9).

Lemaire J., Roth M. Differences between solar wind plasmoids and ideal magnetohydrodynamic filaments. *Planet. Space Sci.* 1981. Vol. 29, iss. 8. P. 843–849.

McPherron R.L., Terasawa T., Nishida A.J. Solar wind triggering of substorm expansion onset. *J. Geomag. Geoelectr.* 1986. Vol. 38, iss. 11. P. 1089–1108. DOI: [10.5636/jgg.38.1089](https://doi.org/10.5636/jgg.38.1089).

Parkhomov V.A., Borodkova N.L., Eselevich V.G., et al. Solar wind diamagnetic structures as a source of substorm-like disturbances. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2018. Vol. 181. P. 55–67. DOI: [10.1016/j.jastp.2018.10.010](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.10.010).

Pneuman G.W. Ejection of magnetic fields from the sun. Acceleration of a solar wind containing diamagnetic plasmoids. *Astrophys. J.* 1983. Vol. 265. P. 468–482.

Saito T. Geomagnetic pulsations. *Space Sci. Rev.* 1969. Vol. 10, iss. 3. P. 319–412.

Schwenn R., Dal Lago A., Huttunen E., Gonzalez W.D. The association of coronal mass ejections with their effects near the Earth. *Ann. Geophys.* 2005. Vol. 23. P. 1033–1059. DOI: [10.5194/angeo-23-1033-2005](https://doi.org/10.5194/angeo-23-1033-2005).

Svalgaard L.J., Wilcox W., Duvall T.L. A model combining the solar magnetic field. *Solar Phys.* 1974. Vol. 37. P. 157.

Troshichev O.A., Janzhura A. *Space Weather Monitoring by Ground-Based Means: PC Index*. Springer-Verlag, 2012. 287 p. DOI: [10.1007/978-3-642-16803-1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-16803-1).

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. Vol. 70. P. 148. DOI: [10.1186/s40623-018-0922-5](https://doi.org/10.1186/s40623-018-0922-5).

Wang Y.M., Sheeley N.R., Rich N.B. Coronal pseudo-streamers. *Astrophys. J.* 2007. Vol. 685, no. 2. P. 1340–1348. DOI: [10.1086/511416](https://doi.org/10.1086/511416).

Yahnina T.A., Frey H.U., Bössinger T., Yahnin A.G. Evidence for subauroral proton flashes on the dayside as the result of the ion cyclotron interaction. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2008. Vol. 113, iss. A7. DOI: [10.1029/2008JA013099](https://doi.org/10.1029/2008JA013099).

URL: https://space.fmi.fi/image/www/index.php?page=il_index (дата обращения 15 февраля 2022 г.).

URL: <http://carisma.ca/carisma-data/fgm-auroral-indici> (дата обращения 15 февраля 2022 г.).

URL: <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/eval2.cgi> (дата обращения 15 февраля 2022 г.).

URL: http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_provisional/201512/index.html (дата обращения 15 февраля 2022 г.).

URL: <http://www.obsebre.es/en/rapid> (дата обращения 15 февраля 2022 г.).

URL: https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list (дата обращения 15 февраля 2022 г.).

URL: <http://bdm.iszf.irk.ru> (дата обращения 15 февраля 2022 г.).

URL: <http://spaceweather.ru/ru/node/32> (дата обращения 15 февраля 2022 г.).

URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/3056> (дата обращения 15 февраля 2022 г.).

Как цитировать эту статью:

Пархомов В.А., Еселевич В.Г., Еселевич М.В., Цэгмэд Б., Хомутов С.Ю., Райта Т., Попов Г.В., Мочалов А.А., Пильгаев С.В., Рахматулин Р.А. О соответствии глобальной изолированной суббури статистической модели Мак-Феррона. *Солнечно-земная физика*. 2022. Т. 8, № 2. С. 41–51. DOI: [10.12737/szf-82202206](https://doi.org/10.12737/szf-82202206).