

МАГНИТОСФЕРНЫЙ ОТКЛИК НА ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ДИАМАГНИТНОЙ СТРУКТУРОЙ СПОРАДИЧЕСКОГО СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

MAGNETOSPHERIC RESPONSE TO THE INTERACTION WITH THE SPORADIC SOLAR WIND DIAMAGNETIC STRUCTURE

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***А.В. Дмитриев***Научно-исследовательский институт ядерной физики
им. Д.В. Скобельцина, МГУ,
Москва, Россия, dalexav@mail.ru***А.В. Суворова***Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова,
Москва, Россия, alla_suvorova@mail.ru***С.Ю. Хомутов***Институт космофизических исследований и распростра-
нения радиоволн ДВО РАН,
Паратунка, Россия, khomutov@ikir.ru***Б. Цэгмэд***Институт астрономии и геофизики АН Монголии,
Улан-Батор, Монголия, tseg@iag.ac.mn***Т. Райта***Геофизическая обсерватория Соданкюля, Университет Оулу,
Соданкюля, Финляндия, tero.raita@sgo.fi***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***A.V. Dmitriev***Lomonosov Moscow State University,
Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics,
Moscow, Russia, dalexav@mail.ru***A.V. Suvorova***Lomonosov Moscow State University,
Moscow, Russia, alla_suvorova@mail.ru***S.Yu. Khomutov***Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propa-
gation FEB RAS,
Paratunka, Russia, khomutov@ikir.ru***B. Tsegmed***Institute of Astronomy and Geophysics AS Mongolia,
Ulaan-Baatar, Mongolia, tseg@iag.ac.mn***T. Raita***Sodankyla Geophysical Observatory, University of Oulu,
Sodankyla, Finland, tero.raita@sgo.fi*

Аннотация. Представлены результаты исследования движения от источника на Солнце до поверхности Земли диамагнитной структуры (ДС) солнечного ветра, представляющей собой последовательность микроДС меньших масштабов, которые являются частью коронального выброса массы 18.05.2013. ДС, определяемая по высокому отрицательному коэффициенту корреляции между модулем ММП и концентрацией СВ на спутниках ACE и Wind ($r=-0.9$) вблизи точки Лагранжа, на околоземной орбите на спутниках ТНВ и ТНС ($r=-0.9$) и на спутнике ТНА внутри магнитосферы, переносится от Солнца солнечным ветром до орбиты Земли с сохранением своей тонкой внутренней структуры. 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 $\leq 13 R_E$, проходит через головную ударную волну и магнитопаузу в виде замагниченного плазмоида. При этом концентрация ионов в плазмоиде возрастает от 10 см^{-3} до 90 см^{-3} , а его скорость падает при движении в хвост магнитосферы. При переходе ДС через магнитопаузу генерируется импульсное электрическое поле величиной $\sim 400 \text{ мВ/м}$ с последующими колебаниями с периодом $T \sim 200 \text{ с}$ и амплиту-

Abstract. We report the results of a study on the movement of the solar wind diamagnetic structure (DS), which is a sequence of smaller-scale microDS being part of the May 18, 2013 coronal mass ejection, from a source on the Sun to Earth's surface. DS determined from the high negative correlation coefficient ($r=-0.9$) between the IMF modulus (B) and the SW density (N) on the ACE and Wind satellites at the libration point L1, on the THB and THC satellites ($r=-0.9$) in near-Earth orbit, and on the THA satellite inside the magnetosphere is carried by the solar wind from the Sun to Earth's orbit, while maintaining its fine internal structure. Having a large size in the radial direction ($\approx 763 R_E$, where R_E is the Earth radius), DS flows around the magnetosphere. At the same time, microDS of size $\leq 13 R_E$ passes through the bow shock and magnetopause as a magnetized plasmoid in which the ion concentration increases from 10 cm^{-3} to 90 cm^{-3} , and the velocity decreases as it moves toward the magnetotail. When a microDS passes through the magnetopause, a pulsed electric field of $\sim 400 \text{ mV/m}$ is generated with subsequent oscillations with a period of $T \sim 200 \text{ s}$ and an amplitude of $\sim 50 \text{ mV/m}$. The electric field accelerates charged particles of the radiation belt and produces modulated fluxes of protons in an energy range 95–575 keV on the day side and electrons in 40–475 keV and protons

дой ~ 50 мВ/м. Электрическое поле ускоряет частицы радиационного пояса и вызывает модулированные потоки протонов в диапазоне энергий 95–575 кэВ на дневной стороне магнитосферы и электронов 40–475 кэВ и протонов 95–575 кэВ на ночной. На вечерней стороне магнитосферы (19–23 MLT) наблюдается суббуравая активизация геомагнитных пульсаций и полярных сияний, но без отрицательной магнитной бухты. В послеполуночном секторе (01–05 MLT) наблюдается sawtooth-суббура без предварительной фазы и брейккапа с глубокой модуляцией ионосферного тока и аврорального поглощения. Длительность всех явлений в магнитосфере и на Земле определяется временем взаимодействия ДС с магнитосферой (~ 4 ч). Для интерпретации закономерностей магнитосферного отклика на взаимодействие с ДС рассматриваются альтернативные модели импульсного прохождения ДС из СВ в магнитосферу и классическая модель пересоединения ММП и геомагнитного поля.

Ключевые слова: диамагнитная структура, замагниченный плазмод, импульсное прохождение внутрь магнитосферы, пилообразная суббура.

in 95–575 keV on the night side. In the duskside magnetosphere (19–23 MLT), the substorm activation is observed in geomagnetic pulsations and auroras, but without a magnetic negative bay. In the post-midnight sector (01–05 MLT), a sawtooth substorm occurs without the growth phase and breakup with deep modulation of the ionospheric current and auroral absorption. The duration of all phenomena in the magnetosphere and on Earth is determined by the period of interaction between DS and the magnetosphere (~ 4 hrs). To interpret the regularities of the magnetospheric response to the interaction with DS, we consider alternative models of the impulsive passage of DS from SW to the magnetosphere and the classical model of reconnection of IMF and the geomagnetic field.

Keywords: diamagnetic structure, magnetized plasmoid, impulsive passage to the magnetosphere, sawtooth substorm.

ВВЕДЕНИЕ

Современные методы космических наблюдений и большой объем полученных данных о состоянии Солнца, солнечного ветра (СВ) и магнитосферы Земли позволяют исследовать движение агентов конкретных магнитосферных возмущений на всем пути от источника на Солнце до поверхности Земли. Одним из таких агентов может быть диамагнитная структура (ДС) солнечного ветра. Анализ, проведенный в работах [Еселевич, Еселевич, 2005, Parkhomov et al., 2018], показал, что регистрируемые на орбите Земли продолжения от Солнца лучей повышенной яркости пояса стримеров (гелиосферный плазменный слой) и цепочки стримеров являются диамагнитными трубками или ДС, составляющими основу квазистационарного медленного СВ. ДС, взаимодействуя с магнитосферой Земли, вызывают суббури различных типов [Пархомов и др., 2020]. ДС обладает фрактальной структурой, т. е. представляет собой вложенные друг в друга магнитные трубки (структуры), диаметр которых может уменьшаться почти на два порядка [Еселевич, Еселевич, 2005]. Именно поэтому на различных временных масштабах внутри большей ДС наблюдаются ДС меньших размеров, которые мы условно называем микроДС.

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 (МО) или в виде выброса плазмы (ejecta) [Ермолаев и др., 2009]. Внутри МО или ejecta часто можно наблюдать изгибающийся тонкий магнитный жгут с повышенной плотностью плазмы, который возникает как результат выброса с поверхности Солнца волокна (или

эруптивного протуберанца). Полную картину этого процесса в гелиосфере можно увидеть на схеме, представленной на Figure 1 в статье [Parkhomov et al., 2018].

Упомянутый eruptивный протуберанец представляет собой последовательность микроДС спорадического СВ. Столкновение микроДС с магнитосферой Земли также может вызывать кратковременную (20–40 мин) активизацию магнитосферных процессов, аналогичную суббуравой [Пархомов и др., 2017].

Настоящая работа является продолжением исследования особенностей взаимодействия с магнитосферой диамагнитных структур солнечного ветра. Анализируется событие 18.05.2013: определяется источник ДС спорадического СВ на Солнце, рассматривается появление ДС на орбите Земли как последовательности микроДС и исследуется отклик магнитосферы на ее взаимодействие с микроДС. В данной работе впервые исследуется процесс прохождения микроДС внутрь магнитосферы Земли.

ДАнные И МЕТОды АНАЛИЗА

Для решения поставленной задачи использованы результаты наблюдений Солнца, публикуемые на сайте [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/catalog_description.htm], одноминутные значения параметров СВ и ММП, приведенные к положению околоземной головной ударной волны. Используются наблюдения СВ и ММП на спутниках ACE, Wind и серии THEMIS (THA, THB, THC, THD, THE) [https://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp_public], геомагнитные индексы, а также результаты регистрации геомагнитного поля и потоков протонов и электронов на геостационарной орбите на спутниках GOES-13 и GOES-15 [https://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/new_avg]. Орбиты спутников показаны на рис. 1, а их координаты на момент 00 UT

Таблица 1

Спутник	x_{GSE} , км	y_{GSE} , км	z_{GSE} , км	Модуль радиус-вектора положения КА, R_E
ACE	1454660	214414	581098	259.874
Wind	1581700	-482550	116410	259.879
THA	6369	68968	3165	10.8567
THB	32550	388570	-5733	61.4098
THC	13504	387729	-6364	61.1561
THD	6368	7516	917	1.44143
THE	-12618	6363	-1337	6.33477
Geotail	-18910	-187310	21902	29.67
GOES-13	-33187	22040	13631	6.61239
GOES-15	2802	42042	2866	6.61019

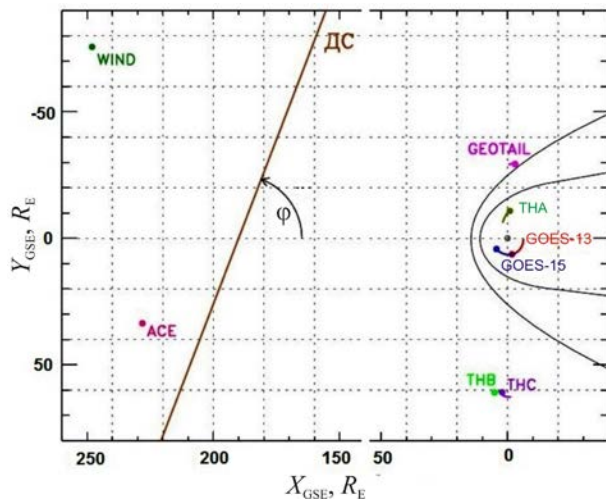


Рис. 1. Орбиты спутников, данные которых использованы в работе: точка — начало траектории спутника. Наклонная линия показывает ориентацию переднего фронта ДС

18.05.2013 представлены в табл. 1: x_{GSE} , y_{GSE} , z_{GSE} — координаты спутников в солнечно-эллиптической системе координат, а также модуль радиус-вектора положения КА в радиусах Земли (R_E).

Использовались наземные данные (табл. 2) геомагнитных наблюдений в обсерваториях сетей INTERMAGNET, IMAGE и CARISMA, а также регистрации геомагнитных пульсаций в обсерваториях «Монды», «Магадан» и «Паратунка» и аврорального поглощения на меридиональной сети IMAGE [<https://www.sgo.fi/Data/Riometer/rioData.php>].

ОТОЖДЕСТВЛЕНИЕ ИСТОЧНИКА ДС

Рассмотрим ДС, идентифицированную по высокому отрицательному коэффициенту корреляции ($r=-0.91$) между вариациями концентрации плазмы N и модуля B межпланетного магнитного поля (ММП), которая была зарегистрирована на орбите спутника Wind 18.05.2013 в 00:45–04:00 UT (рис. 2).

Следует отметить, что перед ДС в ~00:20 UT (18.05.2013) наблюдается ударная волна (shock).

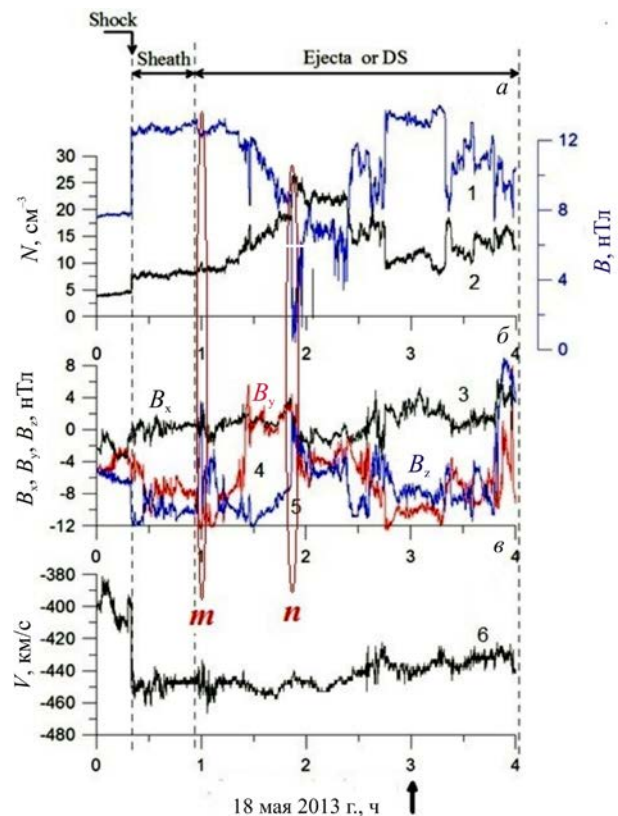


Рис. 2. Параметры СВ по данным спутника Wind для ДС 18.05.2013 в 00:00–04:00 UT с временным разрешением 3 с: модуль B ММП (1), концентрация N плазмы СВ (2), компоненты ММП B_x (3), B_y (4), B_z (5), скорость СВ V (6). Вертикальными штриховыми линиями отмечены моменты появления ударной волны (shock), ударно-нагретой плазмы (sheath) и выброшенной от Солнца структуры (ejecta), фактически являющейся последовательностью микроДС различных масштабов. Вертикальной стрелкой внизу рисунка обозначено расчетное время прихода ДС на орбиту Земли; m , n — выделенные для исследования микроструктуры ДС

За ней следует область ударно-нагретой плазмы, регистрируемой в интервале ~00:20–00:45 UT. Согласно классификации типов потоков СВ по каталогу [Ермолаев и др., 2009], эта область называется sheath. За ней следует область ejecta (00:45–04:00 UT),

Таблица 2

№	Название станции	Географическая широта, град	Географическая долгота, град	Тип магнитометра, частота дискретизации
1	Abisco (ABI)	68.4	18.8	риометр, 30 МГц
2	Chibougamau (CHBG)	49.8	285.6	камера всего неба
3	Guam (GUA)	70.2	15.8	феррозонд, 1 мин
4	Dawson (DAWS)	64.0	220.8	индукционный, 20 Гц; феррозонд, 1 Гц
5	Fort Churchill (FCHU)	58.7	265.9	индукционный, 20 Гц; феррозонд, 1 Гц
6	Magadan (MGD)	59.9	150.8	индукционный, 64 Гц; феррозонд, 1 Гц
7	Mondy (MND)	52.1	104.4	индукционный, 64 Гц
8	Pello (PEL)	66.9	24.1	феррозонд, 1 Гц
9	Pevek (PBK)	70.1	170.9	феррозонд, 1 мин
10	Paratunka (PET)	52.9	158.2	индукционный, 64 Гц; феррозонд, 1 Гц
11	Pinava (PINA)	50.2	263.9	индукционный, 20 Гц; феррозонд, 1 Гц
12	Tamanrasset (TAM)	22.8	5.5	феррозонд, 1 мин
13	Thief River Falls (THRF)	48.0	263.6	индукционный, 20 Гц

которая включает интересующую нас ДС, точнее, последовательность микроДС различных масштабов. Согласно [Ермолаев и др., 2009], ejecta — один из вариантов проявления межпланетного коронального выброса массы, когда магнитное облако не регистрируется. Это происходит, если источник МКВМ на Солнце располагается вблизи лимба.

Попытаемся установить источник этого ejecta (или ДС) на Солнце. В качестве наиболее вероятного источника рассмотрим КВМ, который произошел на восточном лимбе и наблюдался в белом свете в поле зрения коронографа C2 LASCO 15.05.2013 в 01:48–02:24 UT. Последовательность его разностных изображений представлена на рис. 3, а–в. На рис. 3, а, б внутри белого круга, соответствующего поверхности Солнца, показаны разностные изображения в ультрафиолетовом канале 193 Å. Хорошо видно, что с этим КВМ связаны локальный всплеск яркости в канале 193 Å (через него проведена черная прямая на рис. 3, а, б) и всплеск рентгеновского излучения X1.2 (координаты вспышки N12E64) с максимумом в ~01:40 UT (рис. 3, в). Средняя скорость этого КВМ в плоскости лимба на участке $2R_{\odot} < R < 25R_{\odot}$ (R_{\odot} — радиус Солнца) составляет $V_{0 \text{ limb}} \approx 1370$ км/с [https://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/new_avg/]. В соответствии с результатами [Schwenn et al., 2005] в направлении линии Солнце–Земля средняя начальная скорость участка этого КВМ будет следующей: $V_{0 \text{ S-E}} \approx V_{0 \text{ limb}} / 1.8 \approx 761$ км/с. Зная начальную скорость КВМ в направлении Земли вблизи Солнца $V_{0 \text{ S-E}}$, можно оценить время прибытия этого участка КВМ на орбиту Земли, а также его скорость на орбите Земли. Согласно [Еселевич, Еселевич, 2004], средняя скорость $V_{\text{av S-E}}$ рассматриваемого участка

КВМ на пути от Солнца до расстояния 1 а.е. оценивается соотношением

$$V_{\text{av S-E}} \approx 3/4 V_{0 \text{ S-E}}, \quad (1)$$

а его скорость $V_{e \text{ S-E}}$ на расстоянии 1 а.е.:

$$V_{e \text{ S-E}} \approx V_{0 \text{ S-E}} / 2. \quad (2)$$

По формулам (1) и (2) найдем $V_{\text{av S-E}} \approx 570$ км/с, $V_{e \text{ S-E}} \approx 380$ км/с.

Оценим время ΔT движения этого участка КВМ от Солнца до Земли:

$$\Delta T \approx 215R_{\odot} / V_{\text{av S-E}} \approx 1.5 \cdot 10^8 \text{ [км]} / 570 \text{ [км/с]} \approx 73 \text{ ч} \approx 3 \text{ сут } 1 \text{ ч}.$$

Время возникновения рассматриваемого КВМ на Солнце $t_0 \approx 01:48$ UT 15.05.2013; время прибытия на расстояние 1 а.е. $t_e \approx t_0 + \Delta T \approx 03:00$ UT 18.05.2013 (на рис. 2 отмечено вертикальной стрелкой). При этом рассчитанная скорость СВ на расстоянии 1 а.е. $V_{e \text{ S-E}} \approx 380$ км/с незначительно отличается от регистрируемой скорости ~440 км/с. Таким образом, на Солнце источником интересующего нас ДС является лимбовый КВМ, возникший в $t_0 \approx 01:48$ UT 15.05.2013.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ДС В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ

По данным спутника Wind, модуль ММП и концентрация СВ изменяются в противофазе. Средний коэффициент корреляции между рядами N и B , вычисленный в интервале времени 01:15–04:00 UT, $r = -0.91$ (рис. 4, а), что позволяет определить рассматриваемые вариации СВ и ММП как ДС [Еселевич, Еселевич, 2005]. Сформировавшись в короне вблизи поверхности Солнца, ДС движется в солнеч-

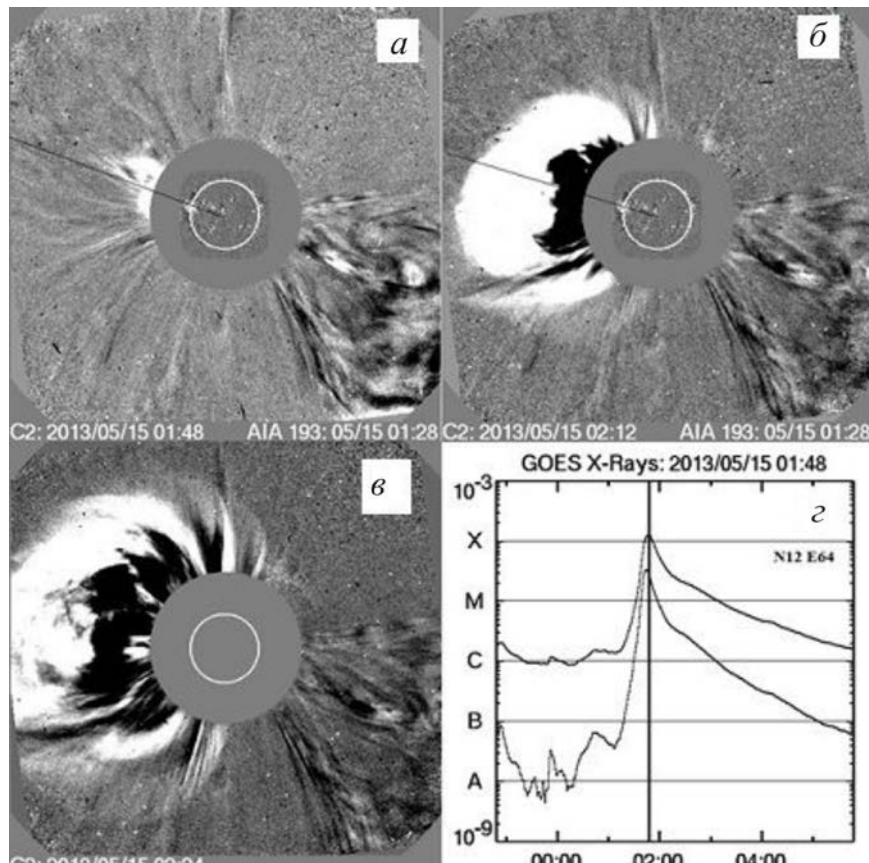


Рис. 3. Последовательность разностных изображений белой короны по данным коронографа C2 LASCO (а, б, в). Внутри белого круга, соответствующего поверхности Солнца, показаны разностные изображения в канале 193 Å. Профили рентгеновского излучения по данным GOES (z) в диапазонах 1.0–8.0 Å (верхний) и 0.5–4.0 Å (нижний). Данные получены на сайте [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/catalog_description.htm]

ном ветре как целое с сохранением пространственных неоднородностей концентрации СВ (или фрактальной структуры, см. ниже) и модуля ММП до орбиты Земли. На рис. 4, а–z представлена последовательность наблюдений ДС на различных расстояниях от Солнца. Большой отрицательный коэффициент корреляции между вариациями концентрации СВ и модуля ММП сохраняется до орбиты Земли и далее (рис. 4, в–д), что является свидетельством устойчивости и сохранения макро- и микроструктуры ДС на больших расстояниях от Солнца.

Яркий пример сохранения микроструктуры ДС на больших расстояниях от Солнца представлен на рис. 4, д, е. Из него видно, что коэффициент корреляции r даже несколько возрастает при движении микроДС от орбиты Wind до орбиты ТНВ (см. значения r на нижних панелях рис. 4, д, е), что означает устойчивость микроструктуры ДС (m на рис. 5) при распространении.

Рассматриваемая ДС располагается в плоскости эклиптики (XY на рис. 1) преимущественно вдоль оси OY. Ее угол наклона ϕ к оси OX (рис. 1) определяется по разности моментов начала регистрации на спутниках Wind и ACE характерных деталей ДС, соединенных прямыми на рис. 4, б. Начало регистрации ДС на ACE запаздывает относительно начала регистрации на Wind на $\Delta t \sim 612$ с. При скорости СВ $V \approx 435$ км/с это соответствует смещению $\Delta x = 2.66 \cdot 10^5$ км. Расстояние вдоль оси Y между ACE

и Wind $\Delta y = 6.97 \cdot 10^5$ км. Отсюда $\text{tg} \phi = 2.62$, а угол наклона ДС к оси X $\phi = 69^\circ$ (рис. 1). Движение ДС с такой же скоростью в СВ вблизи орбиты Земли видно по запаздыванию на спутниках ТНВ и ТНС тех же деталей структуры, что и на спутниках Wind и ACE. Расстояние между спутниками по координате x составляет $\sim 3R_E$, что при скорости 440 км/с дает запаздывание ~ 1 мин.

ОТКЛИК В МАГНИТОСФЕРЕ

Динамику явлений в магнитосфере рассмотрим по данным о геомагнитном поле и потоках частиц, полученным на спутниках ТНА, GOES-13 и GOES-15. ТНА изначально находился в утреннем секторе, двигался от магнитопаузы к Земле и за время наблюдения ДС сместился от $9.25R_E$ до $7.77R_E$. GOES-15 находился в послеполуденном секторе (15–20 ч), а GOES-13 — в предполуночном секторе (19–24 ч) (рис. 1).

Рассмотрим последовательно отклик магнитосферы на приход межпланетной ударной волны (МУВ) и ДС. Как видно на рис. 5, наблюдается качественное совпадение между временным ходом концентрации плазмы в СВ и в магнитосфере на временном интервале, соответствующем приходу на орбиту Земли МУВ и диамагнитной структуры СВ. После прохождения МУВ в солнечном ветре происходит резкое возрастание модуля B и концентрации ионов

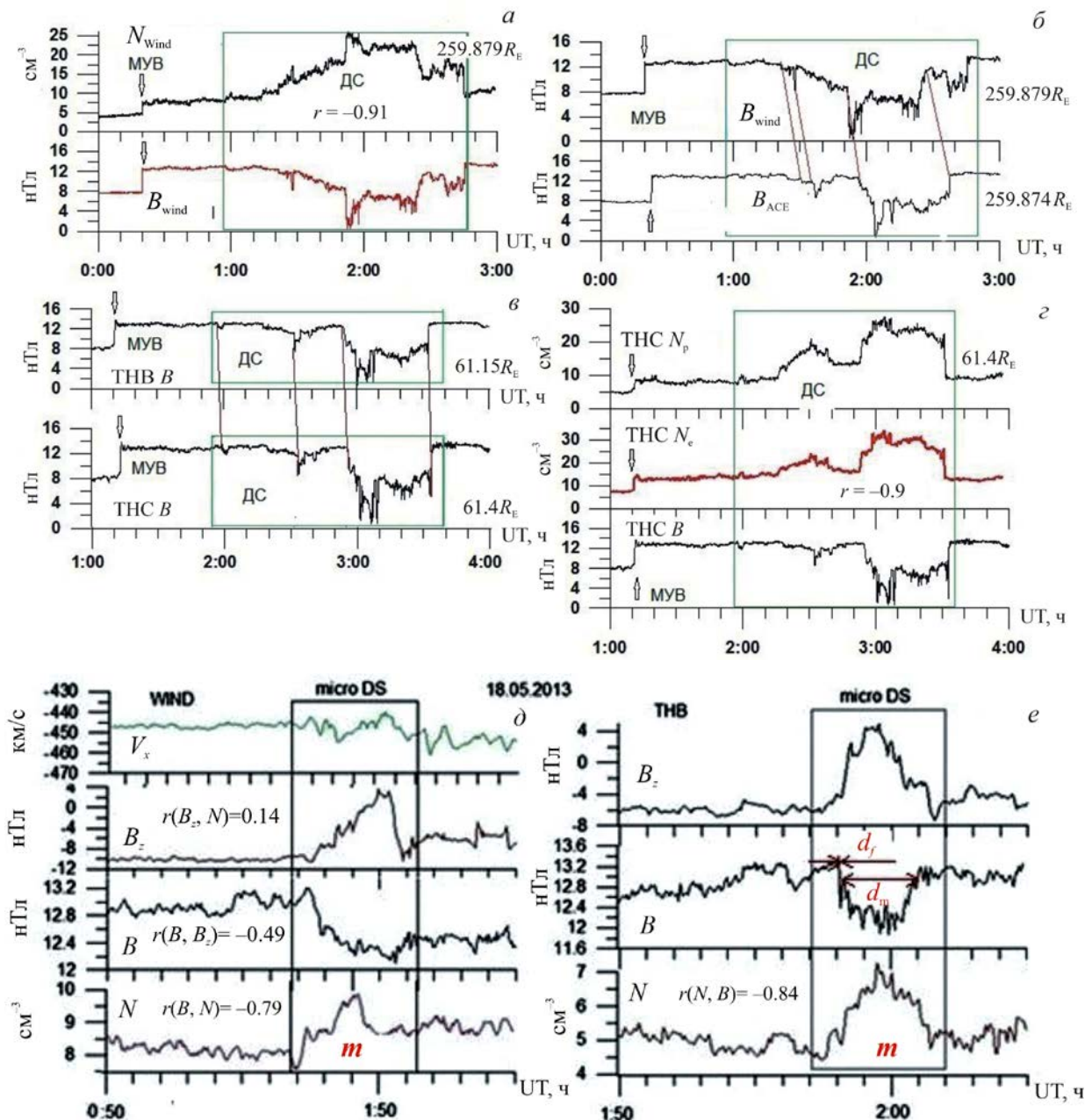


Рис. 4. Распространение ДС в солнечном ветре: а — вариации концентрации СВ (N) и модуля ММП (B) по данным Wind; б — вариации модуля B ММП по данным Wind и ACE; в — вариации модуля B ММП на спутниках THB и THC вблизи орбиты Земли (прямые линии соединяют характерные детали для определения запаздывания); z — вариации модуля B ММП, концентрации протонов и электронов по данным THC вблизи орбиты Земли (справа указано расстояние в R_E соответствующего спутника от центра Земли в момент измерений). Данные получены на сайте [<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/eval2.cgi>]. Сохранение микроструктуры m ДС на больших расстояниях от Солнца: д — параметры СВ и ММП на орбите Wind; e — тот же участок СВ на орбите THB вблизи Земли

N (рис. 5, кривые 1, 2). Этот скачок параметров приводит к развитию внезапного начала бури около 01:10 (SSC, вертикальная зеленая линия на рис. 5), хорошо отождествимого по вариациям IL -индекса (рис. 5, кривая 9), а также по магнитограмме и записям риометра обсерватории Абиско (рис. 5, кривые 10, 11). Скачок магнитной активности виден также в вариациях AE - и $SUM-H$ -индексов (рис. 10, а, кривые 8, 9). После внезапного начала произошло возрастание магнитной активности, связанное со сжатием магнитосферы: $SUM-H$ увеличился на 20 нТл,

AE — на 200 нТл. Геомагнитное поле остается на постоянном уровне без заметных вариаций в течение ~ 0.5 ч. Однако на орбите ТНА в магнитосфере заметных изменений концентрации плазмы и энергетических спектров ионов и электронов (рис. 5, кривые 5, 6, 8) после контакта с МУВ не наблюдается.

Перед анализом отклика магнитосферы на приход ДС сравним характерные размеры в радиальном направлении ДС и микроДС m с размером магнитосферы, который составляет $d_{\text{mag}} \approx 50 R_E$ на рис. 1. Из рис. 2, а следует, что размер большой ДС $d_{\text{DS}} \approx 180$ с

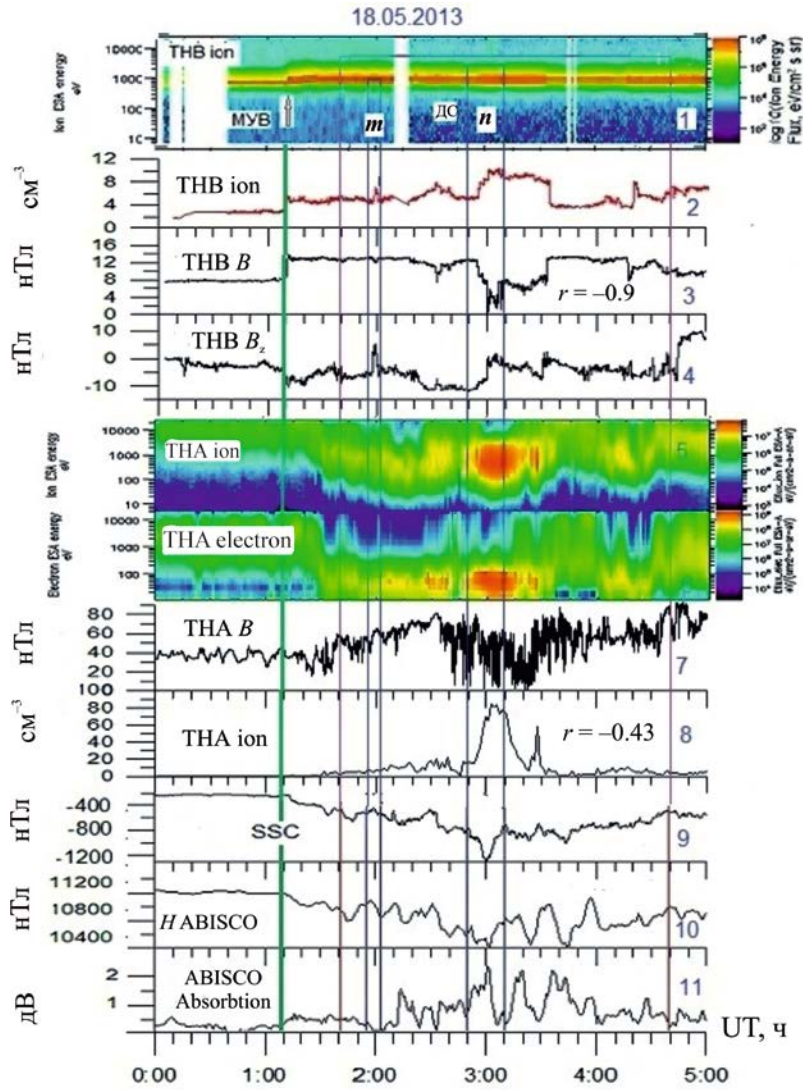


Рис. 5. Энергетический спектр ионов, вариации концентрации ионов N (1, 2), а также вариации B , B_z ММП (3, 4) по данным ТНВ в СВ; энергетические спектры ионов и электронов по данным ТНА/ESA (5, 6) и вариации модуля геомагнитного поля B (7) и концентрации ионов N (8) на спутнике ТНА в магнитослое и магнитосфере; IL — локальный индекс авральной магнитной активности по данным сети магнитных обсерваторий IMAGE; вариации H -составляющей геомагнитного поля (10) и фрагмент записи риометра 30 МГц (11) в обсерватории Абиско. Большим прямоугольником выделена ДС, внутри нее прямоугольниками m и n отмечены микроДС

$\times 450 \text{ км/с} \approx 763 R_E$, что существенно превышает размер магнитосферы d_{mag} . Размер микроДС m на временном профиле (рис. 4, e) показан горизонтальной прямой с надписью d_m и составляет $d_m \approx 180 \text{ с} \times 450 \text{ км/с} \approx 13 R_E$. При этом толщина d_f переднего фронта микроДС m , показанная двумя горизонтальными стрелками на рис. 4, e , составляет (по данным с более высоким временным разрешением): $d_f \approx 7.2 \text{ с} \times 450 \text{ км/с} \approx 0.5 R_E$. Таким образом, размер микроДС существенно меньше размера магнитосферы d_{mag} . Особенно стоит отметить малую толщину переднего фронта d_f , на котором наблюдаются скачкообразное возрастание N и уменьшение B . Сделанные оценки позволяют предположить, что ДС, скорее всего, будет обтекать магнитосферу. А вот ее составляющая микроДС m может проникнуть через границу магнитосферы, триггером чего может быть резкое изменение поля B на узком фронте $d_f \approx 0.5 R_E$. Аналогичная ситуация характерна и для микроДС n .

Учитывая вышеприведенные оценки, рассмотрим отклик магнитосферы на приход микроДС n .

После контакта с магнитосферой в микроДС n в течение часа происходит возрастание концентрации ионов до 90 см^{-3} (рис. 5, кривая 8), в то время как в солнечном ветре максимальная концентрация ионов в микроДС n составляет $\sim 11 \text{ см}^{-3}$ (рис. 5, кривая 2).

Сопоставление данных на рис. 5, показывающих высокую синхронность их изменения, позволяет заключить, что возмущения в магнитосфере непосредственно связаны с воздействием на нее ДС. Некоторые детали этого воздействия представлены на рис. 6 и 7. На рис. 6 видно, что внутри микроДС n , зарегистрированной вблизи магнитопаузы спутником ТНА, наблюдаются импульс электрического поля $E_y \sim 400 \text{ мВ/м}$ (рис. 6, b) и синфазность вариаций электрического поля E_z (рис. 6, a) с периодом $T \sim 200 \text{ с}$ и вариаций модуля геомагнитного поля B (рис. 6, e) и потока протонов с $E_p = 95 \text{ кэВ}$ (рис. 6, a)

на спутнике GOES-15, находившемся на геосинхронной орбите. Синфазность вариаций электрического поля и потоков частиц может свидетельствовать о причинной связи явлений.

Дополнительным подтверждением этому является синхронность скачка компонент электрического поля, а также последующих их колебаний с периодом $T \sim 200$ с на спутнике ТНА, совпадающих с началом прохождения в магнитосферу микроДС, и колебаний модуля геомагнитного поля и энергетической плотности потока протонов радиационного пояса в диапазоне энергий 95–475 кэВ на геосинхронной орбите на GOES-15 (на рис. 6, а $E_p=95$ кэВ показан красной кривой).

Особенности этого эффекта можно видеть на рис. 7. На геосинхронной орбите в послеполуденном секторе (GOES-15) в интервале ДС регистрируются колебания геомагнитного поля (рис. 7, а, кривая 3) и потоков протонов в диапазоне энергий 75–575 кэВ (рис. 7, а, кривая 4). Флуктуации потока электронов в диапазоне энергий 40–475 кэВ незначительны (рис. 7, а, кривая 2). В геомагнитном поле в интервале 02:48–03:10 UT наблюдается цуг колебаний в диапазоне геомагнитных пульсаций Pc5 (рис. 6, 7, а, кривая 3). В этом же временном интервале наблюдаются вариации компонент электрического поля (рис. 6, а, б) примерно с таким же периодом и модуляция потока протонов в энергетическом канале 75 кэВ (рис. 7, а, кривая 4). Наиболее сильная модуляция потока протонов с периодом ~ 60 с наблюдается в каналах 200–310 кэВ (рис. 7, з). В этом энергетическом диапазоне глубина модуляции достигает 90 % (наблюдаются пучки протонов). Однако наибольшая величина потока протонов наблюдается на обоих спутниках в канале 140 кэВ.

Начальное сжатие магнитосферы вызвало глобальное SSC (обозначено стрелкой) в 01:10 UT (рис. 7, а) [<http://www.obsebre.es/en/rapid>] и развитие главной фазы магнитной бури, что привело к изменению потоков протонов и электронов радиационного пояса, динамика которых до момента начала проявления ДС соответствует классической картине, наиболее отчетливо отраженной в вариациях потока электронов с $E > 40$ кэВ. На рис. 7, а (кривая 2)

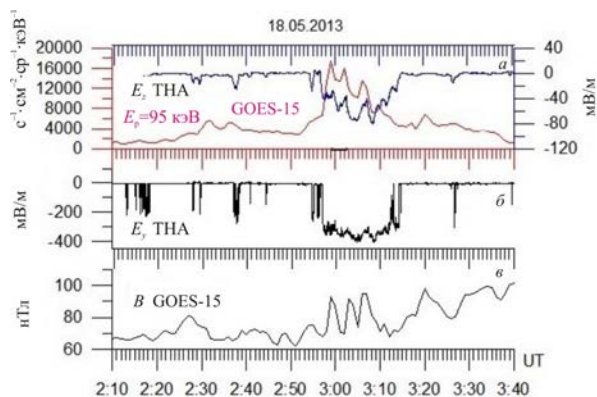


Рис. 6. Синфазность вариаций составляющих электрического поля E_z , E_y (а, б) вблизи магнитопаузы на спутнике ТНА с вариациями модуля геомагнитного поля B (в) и энергетической плотности потока протонов с $E_p=95$ кэВ (а) на геосинхронной орбите

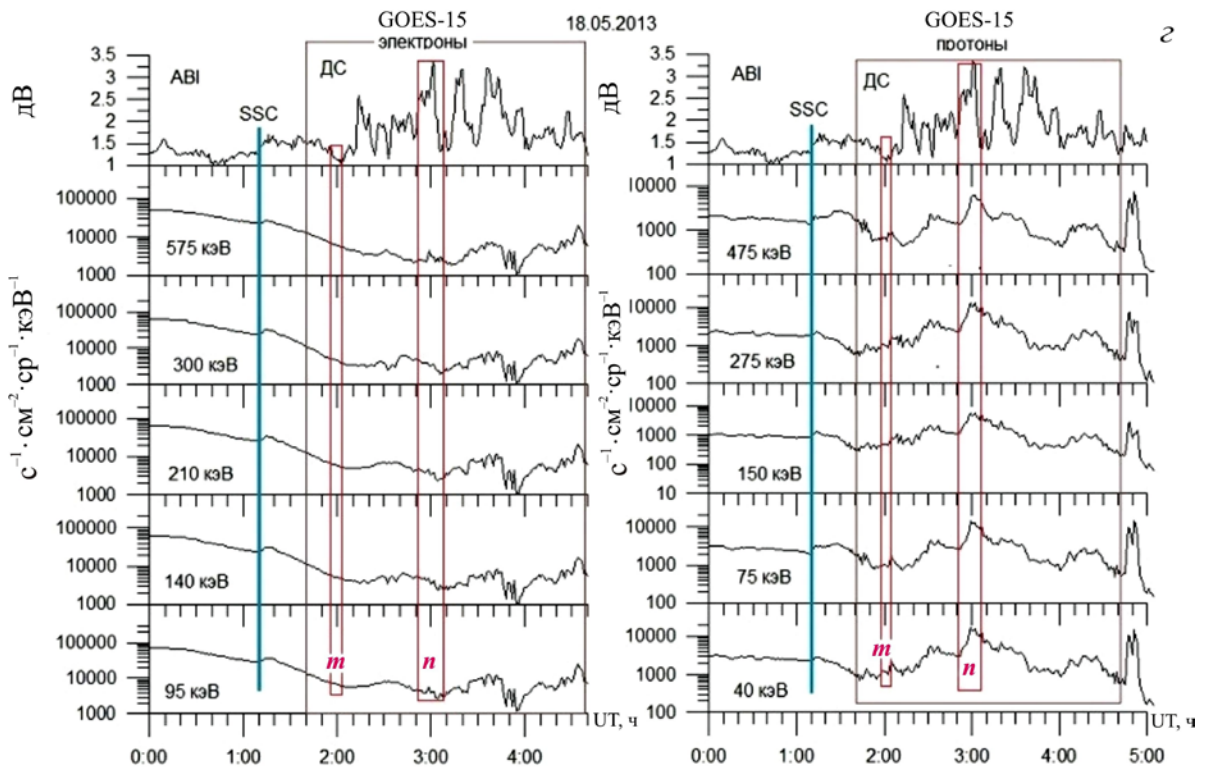
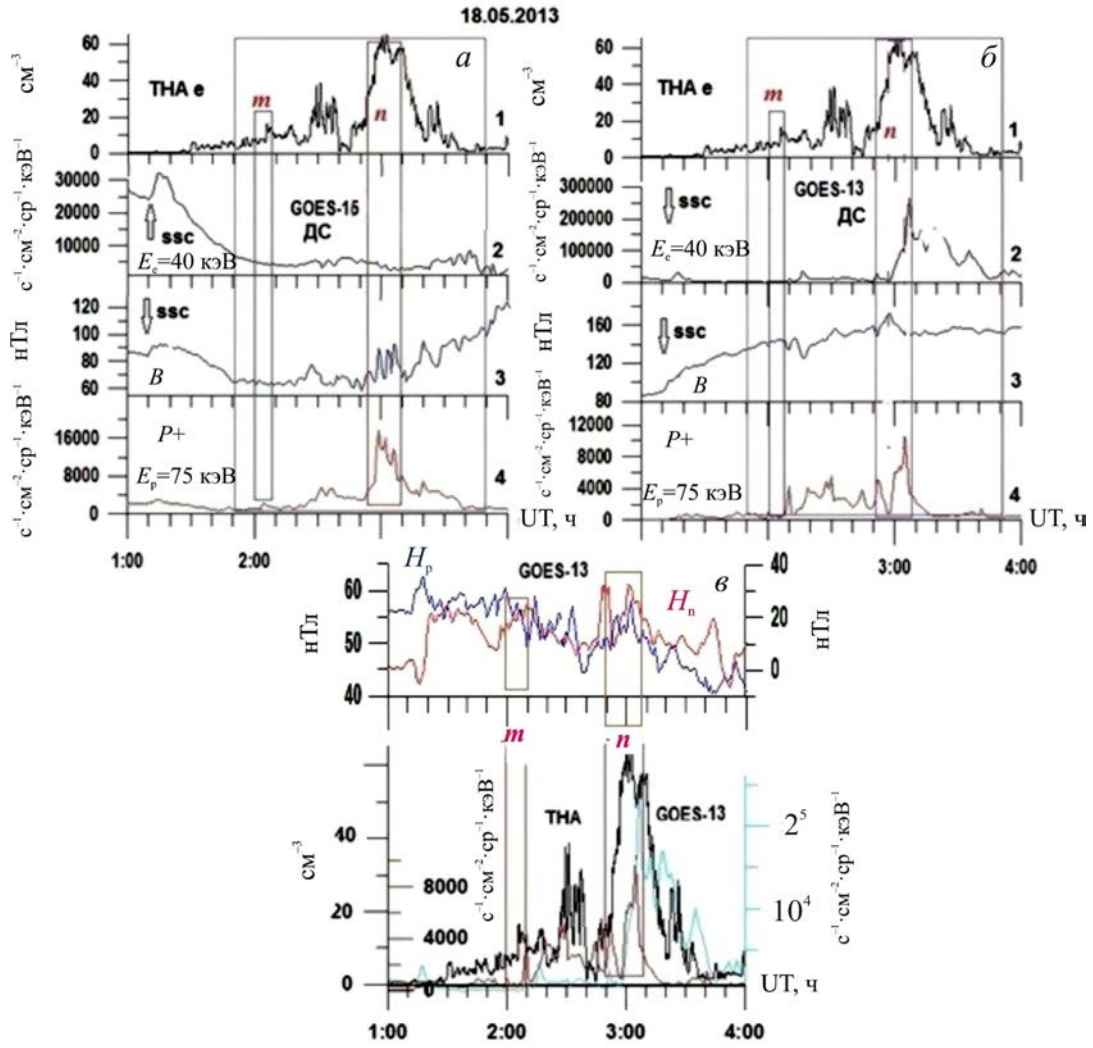
и з видно, что приход волны сжатия от магнитопаузы, сгенерированной в результате контакта с МУВ, вызывает резкое возрастание потоков электронов, которые затем, с развитием главной фазы бури, начинают падать [Хесс, 1972].

В противоположность эффекту распространения в магнитосфере волны сжатия, распространение до геостационарной орбиты ДС, представляющей собой последовательность микроструктур ДС (две из которых обозначены m и n на рис. 7), вызывает колебания геомагнитного поля (рис. 7, б, кривая 3) и возрастание потоков захваченных в радиационном поясе электронов и протонов (рис. 7, б, кривые 2 и 4). При этом длительность этих процессов совпадает со временем наблюдения ДС в солнечном ветре (большой прямоугольник на рис. 7). Важно отметить, что динамика потоков частиц синхронна в солнечном ветре (спутники ТНВ, ТНС), вблизи магнитопаузы (ТНА) и на геосинхронной орбите (GOES-13, -15).

Динамика явлений на геосинхронной орбите в предполуденном секторе магнитосферы отличается от динамики в дневном секторе прежде всего тем, что на ночной стороне наблюдается резкое возрастание потоков и протонов, и электронов (рис. 7, б, кривые 2, 4 и рис. 7, в), а на дневной стороне — только потока протонов (рис. 7, а, кривая 4). Подчеркнем, что интервал наблюдений повышенных потоков частиц на GOES-13 и -15 совпадает по длительности с интервалом наблюдения повышенной концентрации протонов и электронов на спутнике ТНА в магнитослое вблизи магнитопаузы. На GOES-13 наблюдается запаздывание максимумов потоков протонов и электронов относительно максимумов концентрации ионов на ТНА (рис. 7, в нижний) и потока протонов на GOES-15 (рис. 7, з).

Другая важная деталь видна на рис. 7, в при сопоставлении вариаций составляющих B_x и B_z геомагнитного поля с всплеском потока электронов на GOES-13, который пересекал плазменный слой. Компоненты изменяются в фазе, что свидетельствует об отсутствии диполизации геомагнитного поля, которая привела бы к усилению потока частиц из хвоста магнитосферы.

Существует также косвенное указание на прохождение плазмы из магнитослоя в магнитосферу, связанное с генерацией плазменных струй в магнитослое [Dmitriev, Suvorova, 2015]. В этой статье получено эмпирическое пороговое значение скорости плазмы $V=220$ км/с в этих струях. Для рассматриваемого события взаимодействия ДС с магнитосферой вычислены параметры плазмы в магнитослое с 02:00 до 04:00 UT. Результаты расчетов, приведенные на рис. 7, е, показывают, что около 02:25, в 02:47–03:13 и около 03:35 UT на спутнике ТНА наблюдаются резкие возрастания плотности энергии R_{tot} , связанные с плазменными струями, скорости которых выше порогового значения, т. е. необходимое условие для проникновения плазмы магнитослоя в магнитосферу выполняется. Однако у нас отсутствуют данные, которые показывали бы это прямо, поскольку в магнитосфере не было спутника серии THEMIS, который мог бы зарегистрировать проникновение плазмы.



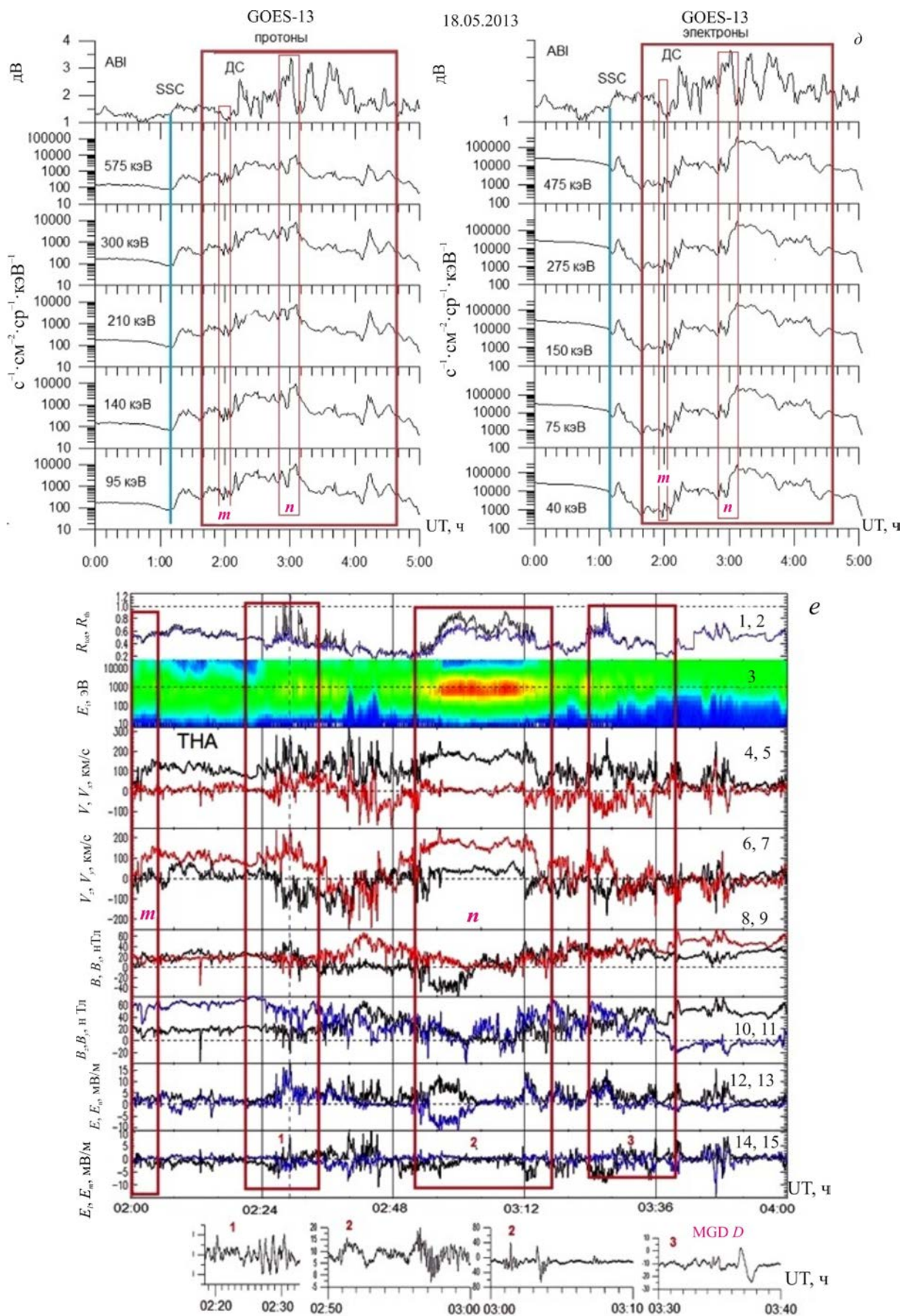


Рис. 7. Вариации параметров геомагнитного поля и энергетической плотности потоков заряженных частиц в магнитосфере, связанные с воздействием на магнитосферу ДС. Большим прямоугольником показан интервал ДС на орбите Земли, соответствующий наблюдению ДС в солнечном ветре. Буквами *m* и *n* обозначены микроДС. Панели *a* и *б*: 1 —

вариации концентрации электронов на спутнике ТНА; 2, 3, 4 — энергетическая плотность потока электронов с $E=40$ кэВ, вариации модуля B и потока протонов с энергией 75 кэВ соответственно на спутниках GOES-15 (а) и GOES-13 (б). Панель $в$ — вариации H_p - и H_n -компонент геомагнитного поля на спутнике GOES-13 в плазменном слое хвоста магнитосферы (верхняя панель) и потоков заряженных частиц (нижняя панель) на спутнике ТНА (черная кривая) и GOES-13 (синяя и красная кривые). Панели $г, д$ — вариации энергетической плотности потока протонов и электронов на геостационарной орбите в послеполуденные (GOES-15) и предполуденные (GOES-13) часы и интенсивности аврорального поглощения в полуденные часы. Панель $е$ — вычисленные параметры плазмы СВ и магнитослоя для ДС: 1, 2 — отношение полной плотности энергии плазмы (черная кривая) и теплового давления (синяя кривая) на ТНА и в СВ на Wind; 3 — энергетический спектр ионов на ТНА; 4, 5 — скорость плазмы на ТНА: черная кривая — полная V , красная — V_{GSM} в геоцентрической солнечно-магнитосферной системе координат (GSM); 6, 7 — скорость плазмы на ТНА: черная кривая — V_z , красная — V_{GSM} ; 8, 9 — компоненты геомагнитного поля на ТНА: черная кривая — полная B , красная кривая — B_{GSM} ; 10, 11 — компоненты геомагнитного поля на ТНА: черная кривая — B_z , синяя кривая — B_{GSM} ; 12, 13 — электрическое поле на ТНА: черная кривая — полное E , синяя кривая — составляющая E_n , ориентированная к Земле; 14, 15 — электрическое поле на ТНА: черная и синяя кривые — поперечные компоненты к магнитопаузе E_1 и E_m соответственно; самая нижняя панель — фрагменты осциллограмм индукционного магнитометра обсерватории MGD вблизи местного полудня

Плазменные струи с высокими скоростями, направленными к Земле, наблюдаются в области границ микроДС n . Длительность пиков составляет порядка минуты, что при скорости ~ 200 км/с дает характерный размер $\sim 2R_E$, что много меньше поперечного размера магнитосферы $\sim 30R_E$. Таким образом, эти мелкомасштабные структуры могут «протыкать» магнитопаузу, обеспечивая проникновение плазмы магнитослоя в дневную магнитосферу. Взаимодействие струй с магнитопаузой является также источником всплесков пульсаций в диапазоне периодов Pc4-5–Pi2, которые в нашем случае наблюдаются на дневной стороне в обсерваториях MND, MGD, PET (рис. 7, $е$, 8, $б$). Таким образом, мы видим, что плазменные струи магнитослоя действительно взаимодействуют с магнитопаузой и это взаимодействие, вероятно, сопровождается проникновением плазмы магнитослоя в дневную внешнюю магнитосферу.

При проникновении ДС в магнитосферу ее скорость падает от $V=450$ км/с в солнечном ветре до $V=175$ км/с на участке орбит ТНА–GOES-15 $R_1=(1\div 0)R_E$ и до $V=72$ км/с на участке орбит GOES-15 – GOES-13 $R_2=(0\div -6.5)R_E$. В то же время диапазон изменения концентрации протонов возрастает. Этот результат совпадает с выводами [Dmitriev, Suvorova, 2015; Рахманова и др., 2015] об увеличении амплитуды фронта плотности в переходном слое в 1.5 раза и падении скорости джета до 270 км/с по сравнению со скоростью в СВ.

Результаты расчетов, приведенные на рис. 7, $е$, показывают, что около 02:25, 02:47–03:13 и 03:35 UT на спутнике ТНА наблюдаются резкие возрастания плотности энергии R_{tot} , связанные с джетами. Эти возрастания определяются параметром $\beta_k > 1$ ($\beta_k = 1/2 \rho u^2 / B^2 / 2\mu_0$, где ρ — плотность плазмоида; B — напряженность окружающего магнитного поля; μ_0 — магнитная постоянная; u — скорость джета [Dmitriev, Suvorova, 2015]). Джеты, которые взаимодействовали с магнитопаузой, являются источником всплесков пульсаций в диапазоне периодов Pc4-5–Pi2, регистрируемых на дневной стороне в обсерваториях MND, MGD, PET. В результате взаимодействия джетов с магнитопаузой плазма магнитослоя могла проникнуть в дневную внешнюю магнитосферу. Фрагменты Pi2-осциллограмм индукционного магнитометра в обсерватории MGD

(MLT=UT+10) вблизи местного полудня показаны внизу рис. 7, $е$.

ОСОБЕННОСТИ ОТКЛИКА В ГЕОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

Особенности геомагнитного отклика на взаимодействие ДС СВ, показанной на рис. 2, с магнитосферой представлены на рис. 8–11. По данным ОМНИ [<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/eval2.cgi>], в предшествующий приходу МУВ четырехчасовой интервал наблюдалась низкая планетарная ($K_p=2$) и умеренная авроральная ($AE_{\text{cp}}=385$ нТл) магнитная активность, соответствующая условиям в медленном солнечном ветре: $V_{\text{cp}}=373$ км/с, $N_{\text{cp}}=4.4$ см $^{-3}$, вертикальная компонента ММП была отрицательной $B_{z\text{GSMcp}}=-2.96$ нТл (рис. 3). Эти условия, согласно общепринятым сегодня моделям [Akasofu, 2017], определяют накачку энергии в хвост магнитосферы вследствие пересоединения межпланетного и геомагнитного полей.

Скачок параметров СВ и ММП в 01:10 UT на фронте межпланетной ударной волны провоцирует внезапное начало умеренной магнитной бури с максимальным значением $Dst=-61$ нТл с очень короткой (~ 10 мин) фазой возмущения корпускулярным потоком (рис. 10, $а$, кривые 6, 7).

На начальной стадии рассматриваемого события наблюдается подобие отклика на контакт магнитосферы с МУВ на геостационарной орбите и на Земле в виде резкого скачка общего магнитного поля на GOES-15 и положительного глобального резкого возрастания горизонтальной составляющей H магнитного поля на поверхности Земли (на рис. 8, $а$ отмечено вертикальной линией).

Отклики на прохождение в магнитосферу замагниченной плазмы ДС различаются в дневном, вечернем и ночном секторах магнитосферы, поэтому рассмотрим их последовательно.

ДНЕВНОЙ СЕКТОР

На дневной стороне магнитосферы (рис. 8, $а$, кривые 5–7) вариации H -компоненты геомагнитного поля в обсерваториях от экватора до авроральной зоны определяются вариацией модуля магнитного поля ДС (рис. 8, $а$, кривая 2). Коэффициенты корреляции между вариациями H -компоненты для пар

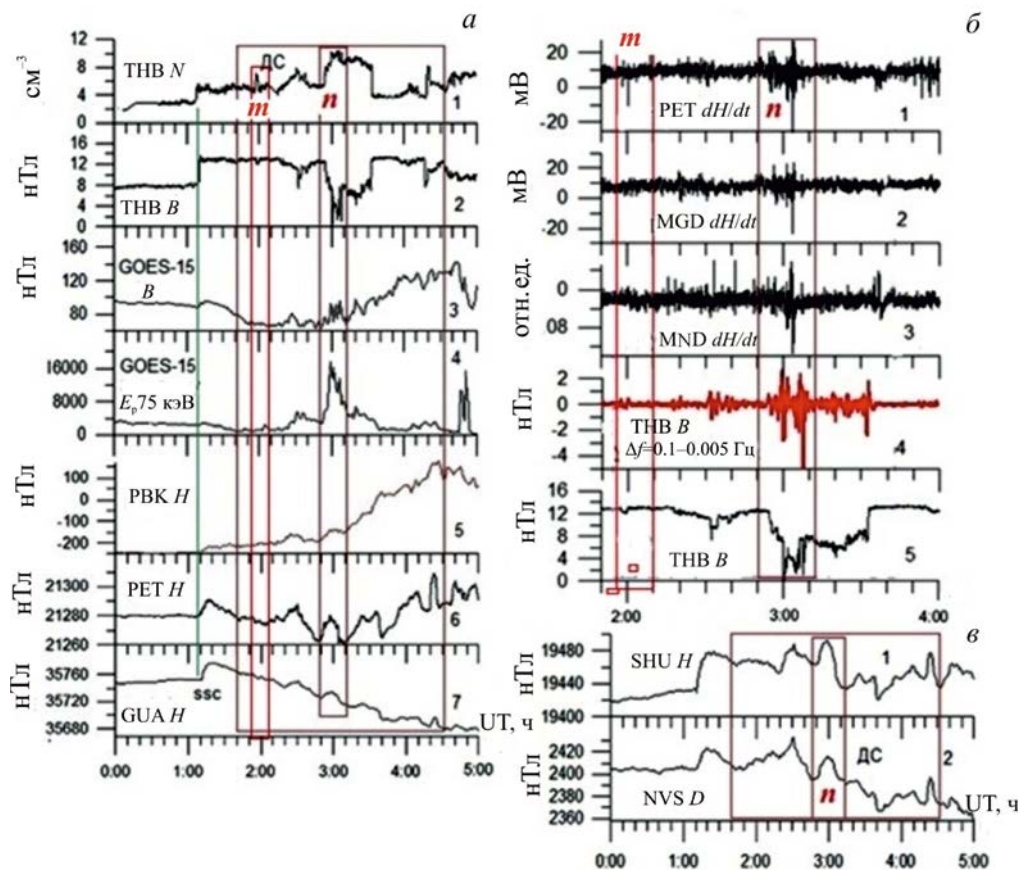


Рис. 8. Панель *а* — вариации концентрации плазмы СВ на спутнике ТНВ (1) и модуля *В* ММП на спутниках ТНВ (2) и GOES-15 (3), а также потока протонов на GOES-15 (4); фрагменты магнитограмм *H*-компоненты авроральной (5, PBK), среднеширотной (6, PET) и низкоширотной (7, GUA) обсерваторий в околополуденные часы местного времени. Зеленая вертикальная линия показывает момент SSC, а большой красный прямоугольник соответствует интервалу наблюдения ДС в солнечном ветре. Панель *б* — фрагменты осциллограмм индукционных магнитометров (01:50–04:00 UT) среднеширотных обсерваторий PET, MGD, MND, разнесенных по долготе на 54° (1–3), и вариации модуля *В* ММП на спутнике ТНВ (4, 5). Панель *в* — фрагменты магнитограмм наземных обсерваторий SHU (*H*-компонента) и NVS (*D*-компонента), находящихся на широтах 54° и 55° и разнесенных по долготе на 150°

обсерваторий GUA–PET и PET–PBK $r=0.62$ и $r=0.91$ соответственно. Вариации *H*-компоненты по наземным измерениям неплохо соответствуют вариациям модуля магнитного поля *B* на геостационарной орбите и в солнечном ветре. Во всех магнитных обсерваториях регистрируется отклик на взаимодействие магнитосферы с КВМ, который включает МУВ, sheath и диамагнитную структуру, состоящую из пяти последовательных микроструктур. Магнитная буря началась (SSC) с резкого увеличения *H*-компоненты (GUA — на 30 нТл, PET — на 13 нТл, PBK — на 34 нТл), вызванного взаимодействием магнитосферы с МУВ. Следующее возрастание *H*-компоненты в наземных обсерваториях (GUA — на 9 нТл, PET — на 16 нТл, PBK — на 24 нТл), сравнимое по величине с ее скачком во время SSC (рис. 8, *а*, кривые 5–7), и последующие вариации геомагнитного поля связаны с его взаимодействием с микроДС *m* в 01:58 UT и *n* в 02:50 UT.

Особенно отчетливо эффект прохождения в магнитосферу микроДС виден в интервале, выделенном прямоугольником с буквой *n* на рис. 8, *а*. Начало прохождения микроДС *n* в 02:55 UT, определяемое

по противофазному изменению модуля *B* и концентрации *N* СВ на спутнике ТНВ (кривые 1, 2 на рис. 8), отражается в возбуждении колебаний типа Pc5 модуля геомагнитного поля на геостационарной орбите на GOES-15 (кривая 3), резкого флуктуирующего возрастания потока протонов в диапазоне энергий 75–475 кэВ (кривая 4) и резкого синхронного возрастания компонент геомагнитного поля с наложением всплесков геомагнитных пульсаций типа Pc4–5–Pi2 в обсерваториях освещенной полусферы от экватора до авроральных широт (GUA–PBK, кривые 5–7) в долготном диапазоне 07–19 MLT (83°–199°, NVS–SHU, рис. 8, *в*).

Взаимодействие ДС с магнитосферой проявилось не только в усилении ионосферных токов, вызвавших подобные вариации геомагнитного поля от экватора до авроральной зоны, но и в прохождении МГД-волн из СВ, наблюдаемых без запаздывания в далеко отстоящих среднеширотных обсерваториях ($\Delta\lambda=54^\circ$) в виде геомагнитных пульсаций в частотном диапазоне Pc4–5–Pi2 (100–200 с) (рис. 8, *б*, кривые 1–4). Одновременность возбуждения геомагнитных пульсаций, а также синхронность вариаций ионосферных токов, индуцирующих вариации геомагнитного поля,

в большом широтно-долготном диапазоне, свидетельствует об удаленности источника.

Аргументами в пользу предположения о прохождении волн в магнитосферу из СВ до Земли могут быть и подобие динамических спектров всплесков пульсаций, и одинаковая частота (~0.0055 Гц) максимумов (обозначены стрелками) спектральной плотности колебаний магнитного поля в наземных обсерваториях и на спутниках ТНВ и ТНС в СВ (рис. 9).

На основании подобия осциллограмм колебаний и динамических спектров всплесков пульсаций в СВ и в наземных обсерваториях на дневной стороне магнитосферы в долготном интервале 104°–199° можно заключить, что наблюдаются колебания и вариации геомагнитного поля, генерируемые одним удаленным источником. Этим источником являются флуктуации модуля магнитного поля и концентрации плазмы в ДС (фрактальные составляющие ДС), которые генерируются КВМ вблизи Солнца и переносятся СВ до орбиты Земли, сохраняя свою структуру. ДС пересекла головную ударную волну и магнитопаузу, и ее тонкая структура наблюдалась на дневной стороне от утренних до вечерних часов в виде геомагнитных пульсаций диапазона Pc4-5–P12.

О прохождении волн этого частотного диапазона из СВ в магнитосферу ранее сообщалось в работах [Мишин, 1996; Kessel et al., 2004; Potapov, Polyushkina, 2010; Klibanova et al., 2016].

На дневной стороне магнитосферы микроструктура ДС также отражается в виде флуктуаций потока протонов в диапазоне энергий 95–475 кэВ в радиационном поясе, которые синхронны с колебаниями магнитного поля на GOES-15 (рис. 8, а, кривая 4) и противофазны колебаниям модуля магнитного поля в ДС в солнечном ветре (рис. 8, а, кривые 1, 3). Заметных вариаций потока электронов в диапазоне 40–575 кэВ не отмечается (рис. 7, а, кривые 2, 3, 4).

ВЕЧЕРНЕ-ПОЛУНОЧНЫЙ СЕКТОР

На ночной стороне магнитосферы контакт с ДС вызвал усиление ионосферных токов (токовой системы DP2). В вечерне-полуночном секторе резко усиливаются и западная, и восточная электроструи (эллипс и стрелки над обсерваториями PINA, FCHU на рис. 10, а) [Gjerloev, 2012].

Особенности магнитосферного возмущения в вечерне-полуночном секторе (19–23 MLT) представлены на рис. 11. Видно, что в обсерватории PINA, находящейся под наземной проекцией восточного тока, при взаимодействии с ДС (микроДС m на рис. 5) генерируются колебания с нестационарным спектром (колебания с убывающим периодом, КУП) (рис. 11, з). Механизмом возбуждения таких колебаний является циклотронная неустойчивость протонов, связанная с инжекцией протонов с $E \sim 30\text{--}50$ кэВ на замкнутые магнитные оболочки [Гульельми, 1979]. В цитируемой работе предполагается, что протоны инжектируются из плазменного слоя хвоста магнитосферы в начале (breakup) взрывной фазы суббури. Однако в рассматриваемом случае на магнитограммах обсерваторий FCHU и PINA (рис. 11, д) не наблюдается резкого отрицательного изменения H -компоненты, которое является признаком начала взрывной фазы.

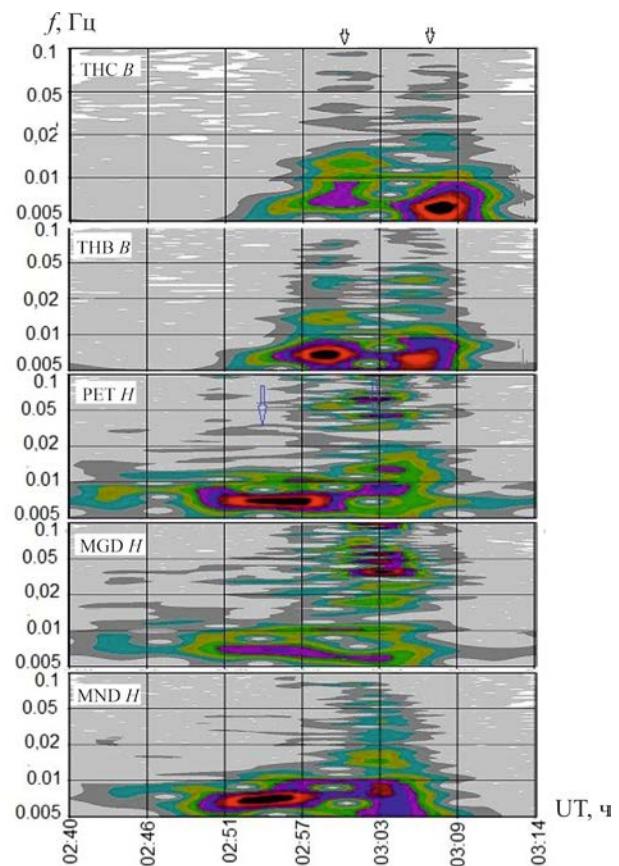


Рис. 9. Динамические спектры колебаний модуля B ММП на спутниках ТНС, ТНВ и горизонтальной компоненты H геомагнитного поля в среднеширотных обсерваториях PET, MGD, MND, расположенных в околополуночном секторе (10–02 MLT), осциллограммы которых представлены на рис. 8, б. Начало геомагнитных пульсаций на Земле опережает начало пульсаций на спутниках ТНВ и ТНС

Более того, начало генерации КУП совпадает с началом повышения потока протонов в диапазоне энергий $E=75\text{--}475$ кэВ на геостационарной орбите (см. рис. 7, а, з), которое, в свою очередь, связано с регистрацией повышенного фона протонов и электронов на спутнике ТНА. В то же время в обсерватории FCHU, находящейся на одном меридиане с PINA, но на 8.5° севернее, под западным джетом, одновременно с началом КУП регистрируются мощные всплески пульсаций P1–2, являющиеся общепризнанным индикатором начала суббури. Генерация таких всплесков пульсаций связана с выпадениями электронов с энергией >10 кэВ [Mishin et al., 2020]. Обратим внимание на важный момент. Начало описанных явлений совпадает с прохождением в магнитосферу микроструктуры m ДС. Момент ее контакта с магнитосферой обозначен прямоугольником m на рис. 5 и стрелкой на рис. 11, б, з. Примечательно, что, как видно на рис. 4, д и 5, микроструктура m ДС сопровождается резкой кратковременной (в течение четырех минут) сменой направления B_z -компоненты ММП с южного на северное (от -6 до $+4$ нТл). В работах [Kokubun et al., 1977; Hsu, McPherron, 2002] установлена значимая связь между поворотом B_z к северу и началом взрывной фазы суббури. Этот поворот к северу верти-

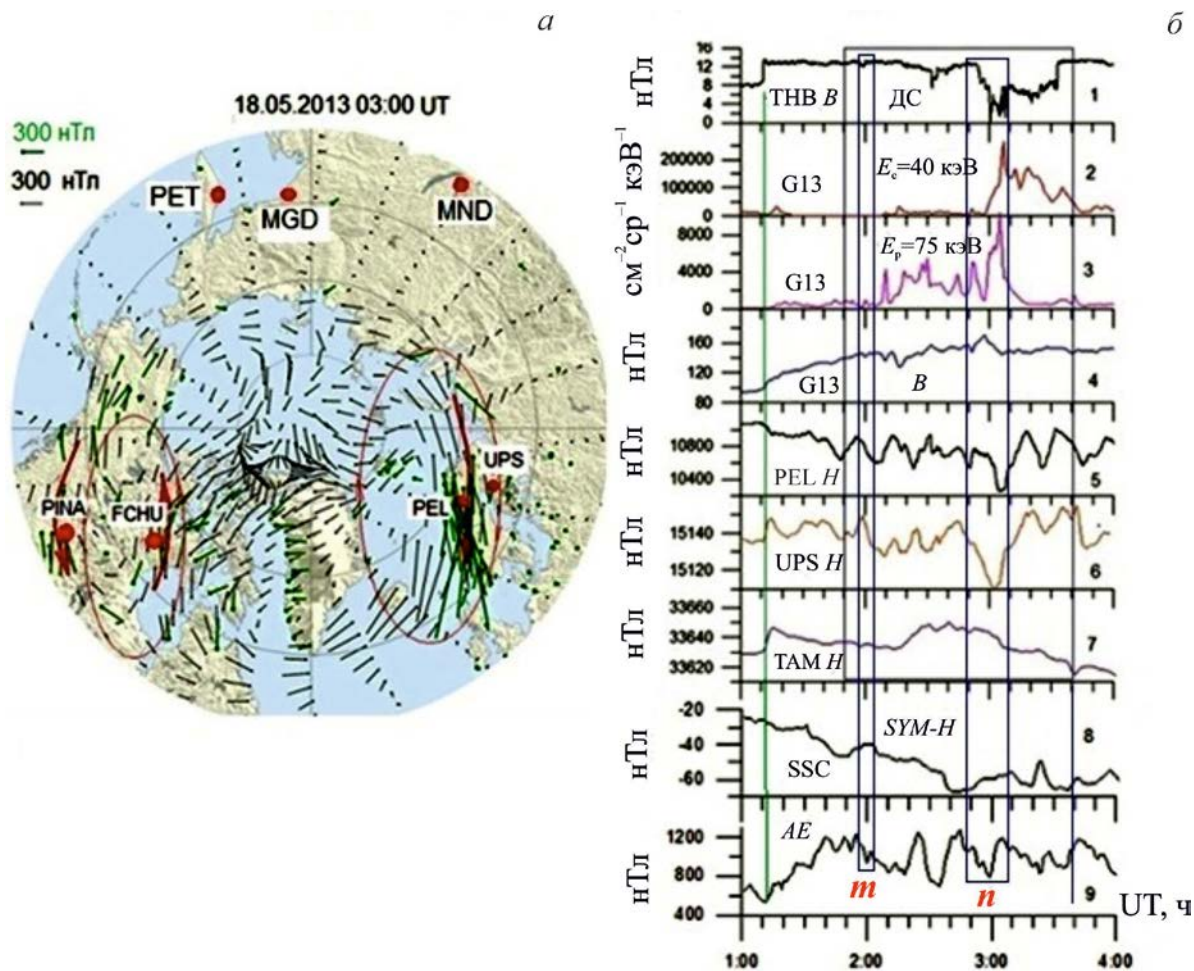


Рис. 10. Панель *a* — векторная диаграмма эквивалентных ионосферных токов по данным [http://supermag.jhuapl.edu/mag]. Положение станций обозначено кружками. Панель *б* — вариации модуля B магнитного поля в солнечном ветре (THB, кривая 1) и на геостационарной орбите (GOES-13, кривая 4), энергетической плотности потока электронов и протонов на геостационарной орбите (GOES-13, кривые 2, 3) и индексов SYM-H (8) и AE (9), а также фрагменты магнитограмм H -компоненты авроральной (PEL, 5), среднеширотной (UPS, 6) и низкоширотной (TAM, 7) обсерваторий в послеполуночном секторе 04–06 MLT. Вертикальная линия показывает момент SSC; большой прямоугольник соответствует ДС в СВ, прямоугольники с буквами *m* и *n* — микроДС

кальной компоненты можно было бы считать началом суббури, если бы присутствовали все ее составляющие. Однако отсутствует один из главных элементов суббури — усиление токовой системы DP-2. Более того, индекс AE, являющийся главным индикатором интенсивности токовой системы суббури, уменьшился с 646 нТл в 02:00 UT до 527 нТл в 02:10 UT (рис. 10, *б*, кривая 9).

Данные, представленные на рис. 5 и 11, *a–д*, можно интерпретировать следующим образом. МикроДС *m*, которая обуславливает поворот B_z -компоненты к северу, становится триггером суббуреподобных явлений — всплесков геомагнитных Pi1–2-пульсаций и КУП. Источником этих пульсаций могут быть электроны и протоны, инжектированные из плазменного слоя хвоста магнитосферы, что подтверждается усилением потоков частиц в плазменном слое хвоста (рис. 1, 7, *в*), наблюдавшимся в этот момент на GOES-13. Кроме того, в этом временном интервале на кеограмме обсерватории CHBG видна авроральная активизация на северном горизонте, или

активизация в сжатом овале (рис. 12). В целом наблюдаемую активизацию авроральных процессов, вызванных контактом с магнитосферой микроДС *m*, можно назвать pseudo-breakup [Koskinen et al., 1993, Yahnin et al., 2001].

ПОСЛЕПОЛУНОЧНО-УТРЕННИЙ СЕКТОР

Как видно на векторной диаграмме ионосферных токов (рис. 10 *a*), в послеполуночно-утреннем секторе (01–08 MLT) резко усиливается западный ток, который индуцирует магнитную бухту с максимумом 500 нТл в 03:10 UT (рис. 10, *б*). В это же время регистрируется максимальное авроральное поглощение в обсерватории АВИ (рис. 5 кривая 11). Наблюдается также модуляция токов и аврорального поглощения с близкими периодами с коэффициентом корреляции между ними $r(A, H) = -0.68$, что может служить основанием для вывода о модуляции ионосферного тока магнитосферной суббури выс-

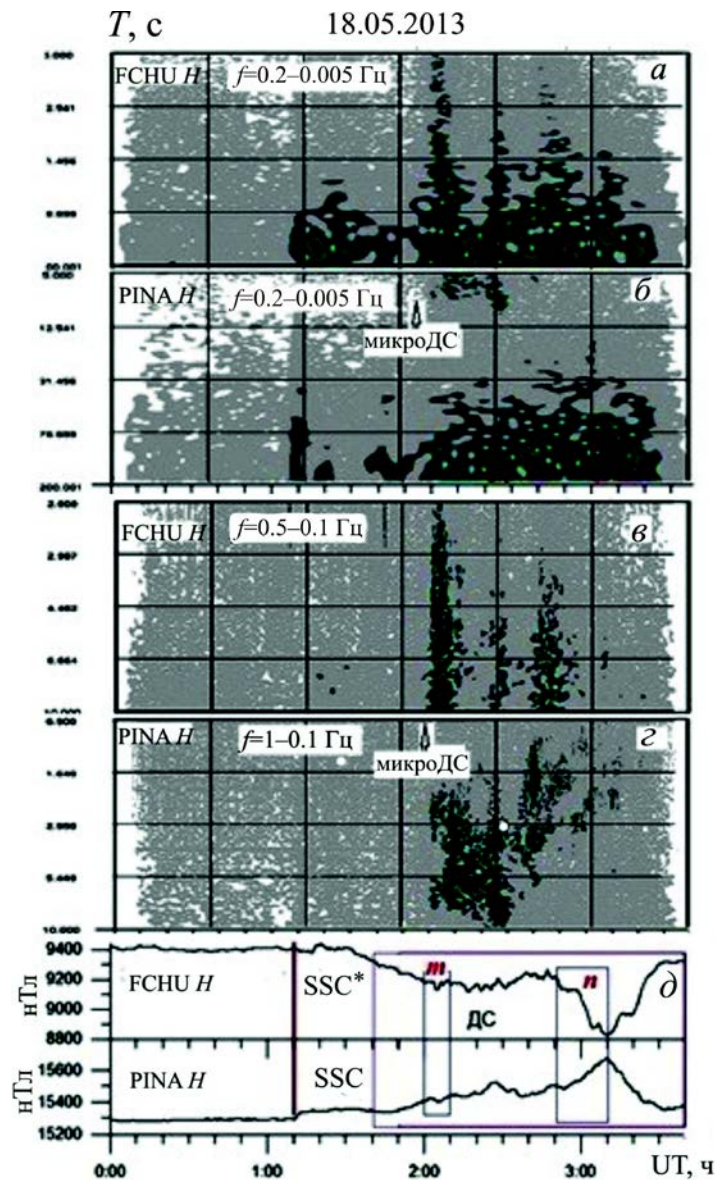


Рис. 11. Спектрограммы геомагнитных пульсаций в двух частотных диапазонах в обсерватории FCHU, расположенной под западным током (а, в), отрицательная геомагнитная бухта ~400 нТл начиная с ~02:50 UT, и в обсерватории PINA, расположенной под восточным током (б, г), положительная геомагнитная бухта ~300 нТл, и фрагменты записи *H*-компоненты в этих обсерваториях (д). Буквами *m* и *n* обозначены микроДС

пающимися электронами [Belakhovsky et al., 2019]. Действительно, на GOES-13 регистрировались модулированные всплески потоков электронов в диапазоне энергий 40–475 кэВ (рис. 7, б, в, д). Эти наблюдения позволяют отнести суббурию к классу sawtooth [Troshichev et al., 2011].

Временной ход вариаций геомагнитного поля и аврорального поглощения находится в противофазе, а максимальное значение вариации и, соответственно, *AE*-индекса совпадает с наименьшим значением модуля *B* на спутнике ТНВ (рис. 5, кривые 5, 10, 11; рис. 10, б, кривые 1, 5, 6, 9).

Отличие рассматриваемого геомагнитного возмущения от классической суббурии подтверждается анализом наблюдений полярных сияний вблизи местной полуночи (MLT=UT–5), представленных на кеограмме обсерватории СНВГ (рис. 12). Несмотря на то что камера полного обзора неба была включена после начала контакта микроДС *m* с маг-

нитосферой, в 02:05–02:25 UT видна авроральная активизация в сжатом овале. Активизация свечения совпадает по времени с всплесками геомагнитных пульсаций и кратковременным (~3 мин) усилением ионосферного тока (на ~60 нТл) в обсерваториях PINA и FCHU (рис. 10, а), расположенных западнее СНВГ на 20°. В картине полярных сияний имеются признаки двойного овала. Интервал 02:50–03:10 UT можно интерпретировать как начало суббурии, если предположить, что ее авроральный брейккап был восточнее СНВГ. Однако в магнитных обсерваториях, расположенных восточнее пункта наблюдения сияний, нам не удалось обнаружить всплесков геомагнитных пульсаций Pi2, которые являются общепризнанным индикатором брейккапа и начала суббурии. На кеограмме двойной овал с 03:00 до 03:30 UT смещается к низким широтам, как в ходе развития суббурии. В процессе смещения двойной овал исчезает, т. е. полярные сияния на экваториальной и полярной

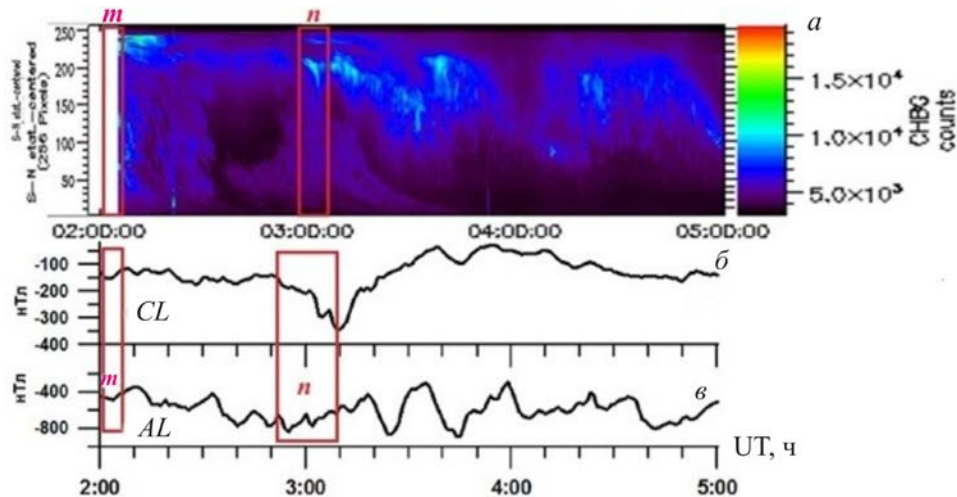


Рис. 12. Кеограмма полярных сияний обсерватории СНВГ (а), а также вариации индексов CL (б) и AL (е). Буквами m и n обозначены микроДС

границах сливаются друг с другом. Эти данные позволяют утверждать, что в 02:50 UT началась суббуревая активность. Продолжительность суббуреподобных явлений совпадает с длительностью ДС в солнечном ветре и магнитослое/магнитосфере (~170 мин), а максимальная интенсивность всех составляющих регистрируется в интервале 02:50–03:10 UT (обозначен n). Однако она вызвана не явлениями в хвосте магнитосферы, а определяется процессом взаимодействия ДС с магнитосферой. Динамика полярных сияний подтверждает правильность классификации суббурового возмущения как sawtooth-суббури, поскольку магнитные sawtooth-возмущения начинаются на фоне высокой авроральной активности и для них типична структура двойного аврорального овала [Troshichev et al., 2011].

В низкоширотной обсерватории ТАМ, так же как и на дневной стороне, наблюдается резкое возрастание H -компоненты на 14 нТл, сравнимое по величине со скачком H -компоненты на 16 нТл, вызванным взаимодействием с МУВ (рис.10, б, кривая 7). Поскольку скачок H -компоненты во время SSC является результатом контакта МУВ с магнитосферой и вызван сжатием магнитосферы и усилением токов на магнитопаузе, можно считать, что резкое возрастание H -компоненты геомагнитного поля, вызванное взаимодействием с ДС, также обусловлено усилением токов на магнитопаузе за счет роста концентрации плазмы в ДС. Это обстоятельство было подчеркнуто в нашей статье [Parkhomov et al., 2018].

Согласно [Shadrina, Starodubtsev, 2016], прохождение межпланетной ударной волны почти всегда вызывает суббуревые возмущения. Однако в работе [Liou et al., 2003] на большой статистике показано, что МУВ в 52 % случаев вызывают отрицательные магнитные бухты (получившие название «бухты сжатия»), но не авроральные брейкапы. В рассматриваемом событии не наблюдается выраженной отрицательной магнитной бухты на магнитограммах вечерних и ночных обсерваторий сети INTERMAGNET.

В вариациях AL -индекса не наблюдается падения, а AE скачком возрастает от 400 до 860 нТл и остается на среднем уровне 660 нТл до начала контакта ДС с магнитосферой в 01:40 UT. [<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/eval2.cgi>].

По данным [<http://carisma.ca/carisma-data/fgm-pi2-dbase>], в обсерватории PINA (MLT=UT–6.35) пульсации Pi2, являющиеся индикатором начала брейкапа и суббури, зарегистрированы в 02:21:44 и 02:50:32 UT. Первый момент соответствует началу контакта ДС с магнитосферой, а второй — началу взаимодействия с магнитосферой микроДС n , а также началам отрицательной бухты, зарегистрированной в обсерватории FCHU (рис. 11, д), и суббури в сияниях (рис. 12). Заметим, что пульсации Pi2, хорошо отождествимые по данным обсерватории FCHU, не регистрируются в обсерватории PINA, что является еще одним подтверждением необычности описываемой суббуровой активизации. Таким образом, глобальная динамика взаимодействия ДС с магнитосферой в рассматриваемом событии показывает одновременное развитие компрессионного псевдобрейкапа на вечерней стороне (18–23 MLT) и sawtooth-суббури без признаков начала взрывной фазы (брейкап) на ночной стороне магнитосферы с максимумом интенсивности в секторе 01–05 MLT (рис. 11, 12). Начало псевдобрейкапа в ~02 UT вызвано взаимодействием с магнитосферой микроДС m , сопровождавшимся кратковременным поворотом к северу B_z -компоненты ММП, который и является триггером кратковременного потока плазмы из хвоста магнитосферы. Начало sawtooth-суббури в ~02:58 UT, ее развитие и длительность определяются поступлением энергии ДС с дневной стороны магнитосферы.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ И ДИСКУССИЯ

Исследования движения диамагнитной структуры СВ, являющейся частью КВМ, выявили особенности

распространения ДС в солнечном ветре и эффекты ее взаимодействия с магнитосферой, наблюдаемые в околоземном пространстве и на поверхности Земли.

1. Диамагнитная структура, определяемая по высокому отрицательному коэффициенту корреляции между модулем ММП и концентрацией частиц СВ, зародившись на Солнце во время солнечной вспышки, переносится СВ до орбиты Земли с сохранением своей тонкой структуры. Она представляет собой последовательность микроДС меньших размеров, которые являются частью частью КВМ 18.05.2013.

2. МикроДС могут проходить через околоземную головную ударную волну и магнитопаузу в виде замагниченного плазмоида. При этом скорость плазмоида падает, а концентрация ионов в нем возрастает от 10 см^{-3} до 90 см^{-3} . Коэффициент корреляции между концентрацией частиц СВ и модулем геомагнитного поля в прошедшем через магнитопаузу в магнитосферу замагниченном плазмоиде отрицателен, так же как и в микроДС в СВ. Он движется в хвост магнитосферы с уменьшающейся скоростью.

3. При переходе микроДС через магнитопаузу генерируется импульсное электрическое поле величиной $\sim 400 \text{ мВ/м}$ с последующими колебаниями с $T \sim 200 \text{ с}$ и амплитудой $\sim 50 \text{ мВ/м}$. Электрическое поле ускоряет заряженные частицы радиационного пояса и вызывает модулированные потоки протонов в диапазоне энергий $95\text{--}575 \text{ кэВ}$ на дневной стороне магнитосферы и электронов $40\text{--}475 \text{ кэВ}$ и протонов $95\text{--}575 \text{ кэВ}$ на ночной стороне.

4. Поступление энергии микроДС СВ с дневной стороны вызывает магнитосферное возмущение с максимальной интенсивностью $SUM-H \sim 65 \text{ нТл}$ и $AE \sim 1220 \text{ нТл}$ на начальной фазе умеренной магнитной бури ($Dst = -61 \text{ нТл}$). Возрастание авроральной магнитной активности в 02:55 UT можно отнести к классу sawtooth-суббури без выраженных предварительной и взрывной фаз (брейкап). Полярные сияния, модуляция потоков частиц радиационного пояса и резкое возрастание тока западного электроджета в виде локального токового вихря, подобного обнаруженному в [Belakhovsky et al., 2019], вызваны поступлением в ночную ионосферу энергии, приносимой микроДС, и движением микроДС с дневной стороны в хвост магнитосферы.

5. Изложенные результаты согласуются с концепцией импульсного проникновения элементов плазмы СВ в магнитосферу, предложенной в 1976 г. [Lemaire, 1977, 1985] и анализируемой в [Heikkilä, 2003].

Возможность проникновения сгустка замагниченной плазмы в магнитосферу предсказывалась теоретически и может быть обусловлена различными механизмами. Согласно [Lemaire, 1977; Echim, Lemaire, 2000; Voitu, Echim, 2016], при столкновении с головной ударной волной в ДС возможно импульсное возникновение дрейфового электрического поля E (это означает, что E перпендикулярно магнитному полю B и скорости V), которое обеспечивает дальнейшее движение ДС в магнитослое и проникновение ее через магнитопаузу.

Тот факт, что в магнитосфере наблюдаемая скорость микроДС падает и существенно меньше скоро-

сти магнитозвуковых волн, свидетельствует в пользу проникновения в магнитосферу и движения в ней микроДС, а не МГД-волны какого-либо типа. Механизм импульсного проникновения плазменных джетов из магнитослоя в магнитосферу подтверждается спутниковыми наблюдениями. Например, в работах [Gunell et al., 2012; Dmitriev, Suvorova, 2015] показано, что подавляющее большинство проникающих в магнитосферу плазменных струй характеризуется высокими скоростями $V > 220 \text{ км/с}$ и кинетическим давлением $\beta_k > 1$, что соответствует сочетанию эффекта конечного ларморовского радиуса с механизмом импульсного проникновения.

Примерами прохождения ДС из солнечного ветра в магнитослою являются также события, приведенные на рис. 1 в статье [Meurant et al., 2005] и на рис. 2 в статье [Keika et al., 2009]. Показанные на этих рисунках структуры в СВ и магнитослое легко отождествляются с ДС по антикорреляции их профилей магнитного поля B и концентрации плазмы N . Однако авторы называют их скачками динамического давления P_d . Они предполагают, что в результате взаимодействия скачка динамического давления P_d с головной околоземной ударной волной в магнитослое распространяется быстрая ударная волна. Подобный случай взаимодействия описан в [Maunard et al., 2008]. Наглядный пример прохождения диамагнитной структуры СВ в магнитослою приводится в статье [Рахманова и др., 2015]. Большая статистика прохождения джетов из магнитослоя в магнитосферу приведена также в работе [Dmitriev, Suvorova, 2015].

Следует отметить, что вывод о прохождении диамагнитной структуры как составной части солнечного ветра (неоднородного участка замагниченной плазмы) внутрь магнитосферы и о движении ее поперек силовых линий геомагнитного поля в хвост магнитосферы отличается от общепринятой точки зрения на взаимодействие СВ с магнитосферой Земли, согласно которой доминирующим является механизм пересоединения силовых линий межпланетного и геомагнитного полей [Akasofu, 2017].

Авторы выражают искреннюю благодарность NASA CDAWEB за предоставление данных спутников ACE, Wind, GOES-13, GOES-15, THEMIS. Авторы благодарят разработчиков приборов, установленных на спутниках, и руководителей экспериментов, проводимых на этих спутниках, за возможность использования данных. Результаты, представленные в этой статье, основаны на данных, полученных в магнитных обсерваториях сети INTERMAGNET. Мы благодарим национальные институты, которые их поддерживают [www.intermagnet.org]. Работа Пархомова В.А. выполнена при поддержке проекта Минобрнауки РФ «Разработка математической модели взаимодействия диамагнитных структур солнечного ветра с магнитосферой Земли» и гранта РФФИ в рамках научного проекта № 18-55-52006 МНТА. Работа Еселевича В.Г. и Еселевича М.Г. выполнена в рамках базового финансирования программы ФНИ П.16. Работа Б. Цэгмэда 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 геосфере при солнечных и литосферных воздействиях», № АААА-А21-121011290003-0. Измерения с помощью индукционных магнитометров обсерваторий «Паратунка» и «Магадан» выполняются в рамках «Соглашения по академическому обмену между ИКИР ДВО РАН и Исследовательским институтом Нагойи (Япония)» при поддержке проекта PWING (JSPS KAKENHI 16H06286).

Выражаем глубокую признательность ведущему н.с. ИКФИА ЯФ СО РАН Баишеву Д.Г. за помощь в интерпретации кеограммы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гульельми А.В. МГД-волны в околоземной плазме. М.: Наука, 1979. С. 70.

Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю. Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2000 гг. *Космические исследования*. 2009. Т. 47, № 2. С. 99–113.

Еселевич М.В., Еселевич В.Г. Спорадические потоки плазмы и их источники в период чрезвычайной активности Солнца с 26 октября по 6 ноября 2003 г. *Космические исследования*. 2004. Т. 42, № 6. С. 595–607.

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

Мишин В.В. О потоке волновой энергии в магнитосфере под действием пульсаций давления солнечного ветра. *Исслед. по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца*. Новосибирск: Наука, 1996. Вып. 104. С. 182–185.

Пархомов В.А., Бородкова Н.Л., Еселевич В.Г. и др. Особенности воздействия диамагнитной структуры солнечного ветра на магнитосферу Земли. *Солнечно-земная физика*. 2017. Т. 3, № 4. С. 47–62. DOI: [10.12737/szf-3420170544](https://doi.org/10.12737/szf-3420170544).

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).

Рахманова Л.С., Рязанцева М.О., Застенкер Г.Н. Прохождение структур солнечного ветра через магнитослой по данным двух аппаратов THEMIS. *Космические исследования*. 2015. Т. 53, № 5. С. 363–373. DOI: [10.7868/S0023420615040081](https://doi.org/10.7868/S0023420615040081).

Хесс В.Н. Радиационный пояс и магнитосфера. М.: Атомиздат, 1972. 352 с.

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).

Belakhovsky V., Pilipenko V., Engebretson M., et al. Impulsive disturbances of the geomagnetic field as a cause of induced currents of electric power lines. *Journal of Space Weather and Space Climate*. 2019. Vol. 9, no. A18. P. 2–19. DOI: [10.1051/swsc/2019015](https://doi.org/10.1051/swsc/2019015).

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.

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

Gunell H., Nilsson H., Stenberg G., et al. Plasma penetration of the dayside magnetopause. *Phys. Plasmas*. 2012. Vol. 19, no. 7, 072906. DOI: [10.1063/1.4739446](https://doi.org/10.1063/1.4739446).

Heikkila W.J. Initial condition for plasma transfer events. *Earth's Low-Latitude Boundary Layer*. Ed. by P.T. Newell, T. Onsager. Washington: AGU, 2003. P. 157–168. (Geophysical Monograph Ser. Vol. 113). DOI: [10.1029/133gm16](https://doi.org/10.1029/133gm16).

Hsu T.-S., McPherron R.L. An evaluation of the statistical signatures of the association between northward turnings of the interplanetary magnetic field and substorm expansion onset. *J. Geophys. Res.* 2002. Vol. 107, no. A11, 1389. DOI: [10.1029/2000JA000125](https://doi.org/10.1029/2000JA000125).

Keika K., Nakamura R., Baumjohann W., et al. Substorm expansion triggered by a sudden impulse front propagating from the dayside Magnetopause. *J. Geophys. Res.: Space Phys*. 2009. Vol. 114, iss. A1. DOI: [10.1029/2008JA013445](https://doi.org/10.1029/2008JA013445).

Kessel R.L., Mann I.R., Fung S.F., et al. Correlation of Pc5 wave power inside the magnetosphere during high speed streams. *Ann. Geophys.* 2004. Vol. 22, iss. 2. P. 629–641. DOI: [10.5194/angeo-22-629-2004](https://doi.org/10.5194/angeo-22-629-2004).

Klibanova Yu.Yu., Mishin V.V., Tsegmed B., Moiseev A.V. Properties of daytime long-period pulsations during magnetospheric storm commencement. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2016. Vol. 56, no. 4. P. 426–440. DOI: [10.1134/S0016793216040071](https://doi.org/10.1134/S0016793216040071).

Kokubun S., McPherron R., Russell C. Triggering of substorms by solar wind discontinuities. *J. Geophys. Res.* 1977. Vol. 82, no. 1. P. 74–86. DOI: [10.1029/JA082i001p00074](https://doi.org/10.1029/JA082i001p00074).

Koskinen H.E.J., Lopez R.E., Pulkkinen R.I., et al. Pseudobreakup and substorm growth phase in the ionosphere and magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 1993. Vol. 98. P. 5801–5814. DOI: [10.1029/92JA02482](https://doi.org/10.1029/92JA02482).

Lemaire J. Impulsive penetration of filamentary plasma elements into the magnetospheres of the Earth and Jupiter. *Planet. Space Sci.* 1977. Vol. 25. P. 887–890. DOI: [10.1016/0032-0633\(77\)90042-3](https://doi.org/10.1016/0032-0633(77)90042-3).

Lemaire J. Plasmoid motion across a tangential discontinuity (with application to the magnetopause). *J. Plasma Phys.* 1985. Vol. 33, no. 3. P. 425–436.

Liou K., Newell P.T., Meng C.-I., et al. Investigation of external triggering of substorms with Polar ultraviolet imager observations. *J. Geophys. Res.* 2003. Vol. 108, no. A10, 1364. DOI: [10.1029/2003JA009984](https://doi.org/10.1029/2003JA009984).

Maynard N.C., Farrugia C.J., Ober D.M., et al. Cluster observations of fast shocks in the magnetosheath launched as a tangential discontinuity with a pressure increase crossed the bow shock. *J. Geophys. Res.* 2008. vol. 113, A10212. DOI: [10.1029/2008JA013121](https://doi.org/10.1029/2008JA013121).

Meurant M., Gerard J.C., Blockx C., et al. Comparison of intense nightside shock-induced precipitation and substorm activity. *J. Geophys. Res.* 2005. Vol. 110, iss. A7, A07228. DOI: [10.1029/2004JA010916](https://doi.org/10.1029/2004JA010916).

Mishin V.V., Tsegmed B., Klibanova Y.Y., Kurikalova M.A. Burst geomagnetic pulsations as indicators of substorm expansion onsets during storms. *J. Geophys. Res.: Space Phys*. 2020. Vol. 125, iss. 10, e2020JA028521. DOI: [10.1029/2020JA028521](https://doi.org/10.1029/2020JA028521).

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).

Potapov A.S., Polyushkina T.N. Experimental evidence for direct penetration of ULF waves from the solar wind and their possible effect on acceleration of radiation belt electrons. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2010. Vol. 50, no. 8. P. 950–957. DOI: [10.1134/S0016793210080049](https://doi.org/10.1134/S0016793210080049).

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).

Shadrina L.P., Starodubtsev S.A. Manifestation of interplanetary shock in geomagnetic storms and substorms. *Physics of Auroral Phenomena, Proc. XXXIX Annual Seminar*. Apertity, 2016. P. 23–26. DOI: [10.22323/1.236.0111](https://doi.org/10.22323/1.236.0111).

Troshichev O.A., Stauning P., Liou K., et al. Saw-tooth substorms: Inconsistency of repetitive bay-like magnetic disturbances with behavior of aurora. *Adv. Space Res.* 2011. Vol. 47. P. 702–709. DOI: [10.1016/j.asr.2010.09.026](https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.09.026).

Voitcu G., Echim M. Transport and entry of plasma clouds/jets across transverse magnetic discontinuities: three-dimensional electromagnetic particle-in-cell simulations. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2016. Vol. 121. P. 4343–4361. DOI: [10.1002/2015JA021973](https://doi.org/10.1002/2015JA021973).

Yahnin A.G., Sergeev V.A., Böisinger T., et al. Correlated Interball/ground-based observations of isolated substorm. *Ann. Geophys.* 2001. Vol. 19. P. 687–698. DOI: [10.5194/angeo-19-687-2001](https://doi.org/10.5194/angeo-19-687-2001).

URL: https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/catalog_description.htm (дата обращения 20 ноября 2020 г.).

URL: https://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/new_avg (дата обращения 20 ноября 2020 г.).

URL: <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/eval2.cgi> (дата обращения 20 ноября 2020 г.).

URL: <http://www.obsebre.es/en/rapid> (дата обращения 20 ноября 2020 г.).

URL: <http://supermag.jhuapl.edu/mag> (дата обращения 20 ноября 2020 г.).

URL: <http://carisma.ca/carisma-data/fgm-pi2-dbase> (дата обращения 20 ноября 2020 г.).

URL: www.intermagnet.org (дата обращения 20 ноября 2020 г.).

URL: https://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp_public (дата обращения 20 ноября 2020 г.).

URL: <https://www.sgo.fi/Data/Riometer/rioData.php> (дата обращения 20 ноября 2020 г.).

Как цитировать эту статью:

Пархомов В.А., Еселевич В.Г., Еселевич М.В., Дмитриев А.В., Суворова А.В., Хомутов С.Ю., Цэгмэд Б., Райта Т. 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).