

ОСОБЕННОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ДИАМАГНИТНОЙ СТРУКТУРЫ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НА МАГНИТОСФЕРУ ЗЕМЛИ

FEATURES OF THE IMPACT OF THE SOLAR WIND DIAMAGNETIC STRUCTURE ON EARTH'S MAGNETOSPHERE

В.А. Пархомов

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

Н.Л. Бородкова

*Институт космических исследований РАН,
Москва, Россия, nlbor@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*

В.Э. Чиликин

*Байкальский государственный университет,
Иркутск, Россия, dfreez@yandex.ru*

V.A. Parkhomov

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

N.L. Borodkova

*Institute of Space Research RAS,
Moscow, Russia, nlbor@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

*Skobel'syn Institute of Nuclear Physics, Moscow State University
Moscow, Russia, dalexav@mail.ru*

V.E. Chilikin

*Baikal State University,
Irkutsk, Russia, dfreez@yandex.ru*

Аннотация. На орбите Земли 28 июня 1999 г. была зарегистрирована диамагнитная структура (ДС), являвшаяся волокном с уникально большой скоростью (около 900 км/с). Показано, что данное волокно являлось частью специфического спорадического потока солнечного ветра (СВ), который можно рассматривать как межпланетный транзиент малых размеров. Представлены результаты исследований взаимодействия данной ДС с магнитосферой Земли. В околополуденные часы на широтах дневного каспа было зарегистрировано мощное свечение в ультрафиолетовом диапазоне (shockaurora), которое быстро распространялось к западу и востоку. Наземные наблюдения вариаций геомагнитного поля, аврального поглощения и полярных сияний на полуденном меридиане показали развитие мощного суббуреподобного возмущения (СПВ) ($AE \sim 1000$ нТл), начало которого связано с воздействием на магнитосферу диамагнитной структуры СВ. На геостационарном спутнике GOES-8, находившемся в полуденном секторе внешней области квазизахвата в течение СПВ, наблюдались вариации B_z - и B_x -компонент геомагнитного поля, соответствующие процессу диполизации.

Ключевые слова: стример, волокно, диамагнитная структура, полярные сияния на дневной стороне, суббуреподобное магнитосферное возмущение.

Abstract. In Earth's orbit on June 28, 1999, there was a diamagnetic structure (DS) representing a filament with a uniquely high speed (about 900 km/s). We show that the filament is a part of the specific sporadic solar wind (SW) stream, which is characterized as a small interplanetary transient. We report the results of studies on the interaction between such a fast filament (DS) and Earth's magnetosphere. Around noon hours at daytime cusp latitudes, we recorded a powerful aurora in the UV band (shockaurora), which rapidly spread to the west and east. Ground-based observations of geomagnetic field variations, auroral absorption, and auroras on the midnight meridian have shown the development of a powerful substorm-like disturbance (SLD) ($AE \sim 1000$ nT), whose origin is associated with the impact of the SW diamagnetic structure on the magnetosphere. The geostationary satellite GOES-8, which was in the midnight sector of the outer quasi-capture region during SLD, recorded variations of the B_z and B_x geomagnetic field components corresponding to the dipolarization process.

Keywords: streamer, filament, diamagnetic structure; dayside auroras, shockaurora, substorm-like magnetospheric disturbance.

ВВЕДЕНИЕ

Диамагнитные структуры (ДС) составляют основу медленного квазистационарного солнечного ветра

(СВ) на орбите Земли, источниками которого на Солнце являются пояс стримеров [Svalgaard et al., 1974], цепочки стримеров [Eselevich et al., 1999; Eselevich et al., 2007] или псевдостримеры [Wang et

al., 2007]. Эти структуры фактически представляют собой магнитные трубки (в общем случае — магнитные жгуты) с плазмой [Еселевич, Еселевич, 2005]. На их поверхности течет диамагнитный ток, уменьшающий магнитное поле внутри и увеличивающий вне трубки. Диамагнитные трубки сохраняют свой угловой размер при движении от Солнца до Земли, т. е. они являются квазистатическими на протяжении всего этого пути [Еселевич, Еселевич, 2005].

Спорадический СВ, источником которого на Солнце являются корональные выбросы массы (coronal mass ejection, CME), на орбите Земли регистрируется в виде последовательности из ударной волны, ударно-нагретой плазмы и магнитного облака, или межпланетного выброса корональной массы (interplanetary coronal mass ejection, ICME). Внутри магнитного облака часто можно наблюдать изгибающийся тонкий магнитный жгут с плазмой повышенной плотности, который является выброшенным с поверхности Солнца волокном (или эруптивным протуберанцем). Он также является ДС с теми же свойствами, что и у магнитной трубки [Еселевич, Еселевич, 2005].

Анализ двух событий [Пархомов и др., 2015] столкновения волокна с магнитосферой Земли показал, что подобное взаимодействие вызывает кратковременную (20–40 мин) активизацию магнитосферных процессов, аналогичных суббуревым. Они начинаются на дневной стороне магнитосферы вспышкой сияний в полуденном секторе (shockaurora) [Zhou, Tsurutani, 1999]. Заметим, что shockaurora возникает не только при взаимодействии с магнитосферой межпланетных ударных волн, но и при резких и больших скачках давления протонов СВ [Бородкова, 2010]. Мы же рассматриваем только случаи взаимодействия с магнитосферой диамагнитных структур СВ, определяемых по отрицательному коэффициенту корреляции между скачками концентрации СВ и модуля межпланетного магнитного поля (ММП) при предшествующей долговременно существующей положительной или слабо отрицательной B_z -компоненте ММП. В таких случаях после вспышки сияний на полуденной стороне передние фронты сияний распространяются в утренний и вечерний секторы авроральной зоны. Через 3–5 мин после вспышки сияний на дневной стороне в хвосте магнитосферы и на Земле наблюдались явления, свойственные суббуре: всплески колебаний $Pi1-2$, усиление потоков электронов и протонов на геостационарной орбите и аврорального электроджета (возрастание AE -индекса до 600 нТл). Продолжительность возмущения определяется временем взаимодействия волокна ДС с магнитосферой. Назовем такие возмущения суббуреподобными (СПВ, substorm-like) аналогично [Huttunen et al., 2002].

Отличия рассматриваемых нами СПВ от классической суббури и псевдобурейкапов различных типов заключаются в точно определенном энергетическом источнике — ДС СВ, продолжительности явления и его начале на дневной стороне. Вводя новое определение, мы учитываем, что суббуреподобные события, которые не перерастают в полномасштабную суббурю [Акасофу, 1971], были названы псев-

добурейкапами. Однако этим понятием определялись в последующих исследованиях многие подобные явления [Zhou, Tsurutani, 2001].

Целью настоящей работы является исследование развития высокоширотных возмущений, отличных от суббури классического типа (т. е. суббуреподобных), при воздействии на магнитосферу диамагнитных структур СВ, на примере уникального события 28 июня 1999 г.

1. АНАЛИЗ НАБЛЮДЕНИЙ НА СОЛНЦЕ И ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НА ОРБИТЕ ЗЕМЛИ 28 ИЮНЯ 1999 г.

Рассмотрим структурные особенности потока СВ, который воздействовал на магнитосферу 28 июня 1999 г. между 03:30 и 05:12 UT. На рис. 1 показаны вариации концентрации, скорости и температуры протонов СВ и модуля ММП по данным со спутника Wind для 25–28 июня 1999 г. Как видно на рис. 1, последовательность из трех межпланетных ударных волн была зарегистрирована в потоке СВ перед рассматриваемым интервалом. Первая ударная волна была зафиксирована 26 июня 1999 г. в ~03:20 UT, вторая — 26 июня 1999 г. в ~20:00 UT и третья — 28 июня 1999 г. в ~02:30 UT. Им соответствовали три внезапных начала бури (storm sudden commencement, SSC): 1) 26 июня 1999 г. в 03:25 UT; 2) 26 июня 1999 г. в 20:08 UT; 3) 26 июня 1999 г. в 02:49 UT. Причинами этих ударных волн были, соответственно, следующие CME типа гало, т. е. распространяющиеся в направлении, близком к линии Солнце—Земля: 1) возник 23 июня 1999 г. в ~07:31 UT (координаты на Солнце N23E42); 2) возник 24 июня 1999 г. в ~13:31 UT (координаты N29W13); 3) возник 26 июня 1999 г. в ~07:31 UT (координаты N25E00).

Специфический спорадический поток СВ, наблюдавшийся между 03:30 UT и 04:48 UT 28 июня 1999 г. (рис. 2), можно охарактеризовать как межпланетный транзиент малых размеров (small interplanetary transient, или SIT). Фактически SIT — это ICME малых размеров (обычно продолжительность ICME существенно больше и составляет 0.5–1.5 сут). Согласно [Rouillard et al., 2011], на орбите Земли SIT имеет следующие особенности:

1) уменьшение или увеличение полярного (широтного) угла θ магнитного поля B в течение ~1–10 ч (рис. 2, δ);

2) быстрое уменьшение параметра $\beta = 8\pi P/B^2$ (β — отношение теплового давления плазмы к магнитному давлению) до значений $\ll 1$ (рис. 2, ϵ), связанное с резким повышением на границе SIT значения B и понижением концентрации протонов N_p (рис. 2, a, b).

SIT обычно распространяется в медленном квазистационарном СВ, скорость которого на орбите Земли $V_{sw} \leq (400-450)$ км/с. При этом задняя часть SIT часто характеризуется пиком N_p , профиль которой антикоррелирует с профилем магнитного поля B .

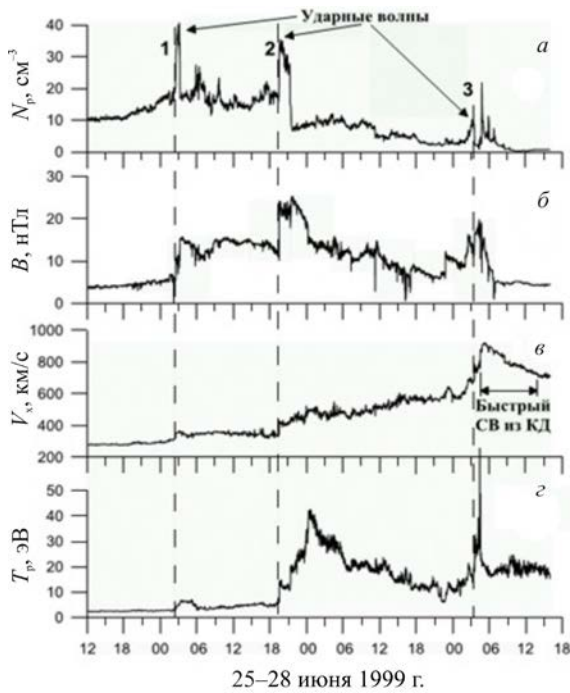


Рис. 1. Вариации параметров СВ и ММП 25–28 июня 1999 г. по данным спутника Wind [http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/eval2.cgi]: а — концентрация протонов; б — модуль ММП; в — скорость вдоль линии Солнце—Земля; г — температура протонов. По оси абсцисс отсчет времени в часах начинается в 12:00 UT 25 июня 1999 г.

Такая структура профилей концентрации плазмы СВ и модуля ММП является диамагнитной. Согласно [Rouillard et al., 2011], СИТ с диамагнитной структурой вблизи Солнца возникает в результате эрупции вершины шлема основания стримера (или вершины арочной структуры стримера). В процессе движения пик N_p в задней части транзиента может увеличиваться за счет сжатия СИТ догоняющим быстрым потоком квазистационарного СВ [Rouillard et al., 2011].

Как видно на рис. 2, событие 28 июня 1999 г. между 03:30 и 04:48 UT (отмеченное вертикальными штриховыми линиями) удовлетворяет перечисленным выше требованиям. Но у него есть очень важная особенность: этот СИТ распространялся в квазистационарном быстром СВ, скорость которого была $V_{sw} \approx 600$ км/с. Источником быстрого СВ являлась корональная дыра (КД), центр которой проходил 25 июня 1999 г. центральный меридиан. Этот вывод следует из расчета Г.В. Руденко [http://bdm.iszf.irk.ru] магнитного поля в короне по измеренному фотосферному магнитному полю (рис. 3). Рассчитанные положения основания открытой магнитной трубки этой КД на рис. 3 показаны стрелками. Из рис. 3, б следует, что центр тяжести рассчитанного основания магнитной трубки этой КД проходил центральный меридиан 25 июня 1999 г. между 0–14 UT на широте $\theta_0 \approx 25^\circ$. Оценка площади основания трубки по рис. 3, б дает значение $S \approx 5.5 \cdot 10^{10}$ км². Это позволяет оценить максимальную скорость V_M быстрого потока СВ от этой КД на расстоянии 1 а.е. по формуле [Eselevich et al., 2009]

$$V_M(S, \theta_0) = \{(2.25 \cdot 10^{-9} S + 500) - 4(|\theta_0 - B_0|)\}, \quad (1)$$

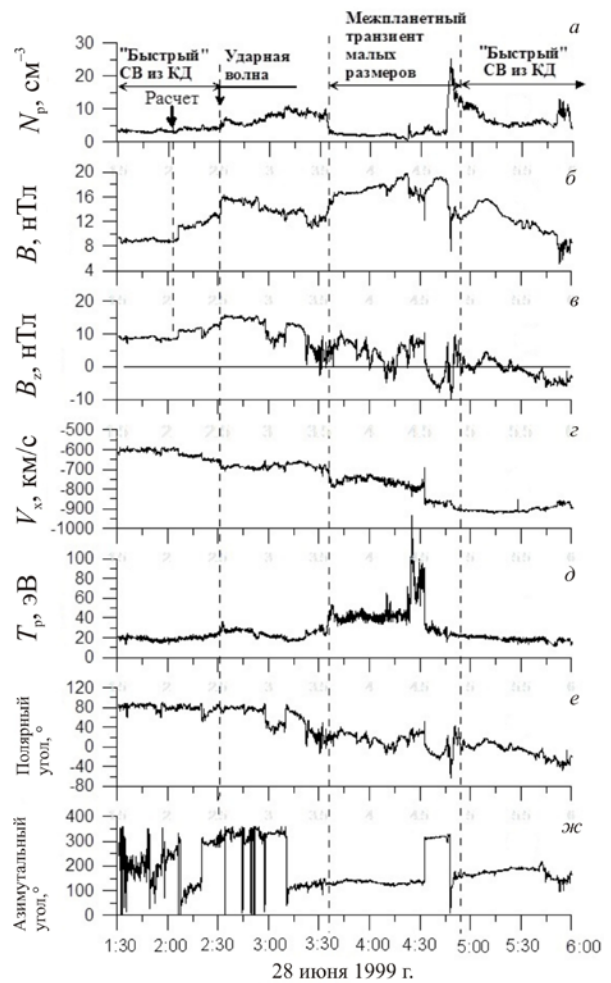


Рис. 2. Вариации параметров СВ и ММП 28 июня 1999 г. по данным спутника Wind: а — концентрация протонов; б — модуль ММП; в — скорость вдоль линии Солнце—Земля; г — температура протонов; д — полярный угол ММП (в гелиоцентричной системе координат отсчитывается от солнечного экватора, положительное направление на север вдоль оси Z); е — азимутальный угол ММП (отсчитывается от оси X, направленной по линии Земля—Солнце, вдоль оси Y, которая направлена против вращения Солнца); ж — плазменный параметр β . По оси абсцисс отсчет времени в часах начинается в 01:30 UT 28 июня 1999 г.

где B_0 — гелиоширота Земли, S — площадь основания магнитной трубки КД (в км²), а затем из соотношения

$$t_M(V_M) = t_0 + 236.5 R_0 / V_M, \quad (2)$$

где R_0 — радиус Солнца, найти момент времени t_M прихода потока СВ от этой КД [Eselevich et al., 2009].

Оценка дает $V_M \approx 590$ км/с, $t_M \approx 07–21$ UT 28 июня 1999 г. Величина скорости V_M согласуется с наблюдаемым значением скорости быстрого СВ из этой КД в первые часы 28 июня 1999 г., а рассчитанная величина t_M соответствует наблюдению с точностью ± 12 ч [Eselevich et al., 2009].

В то же время, как видно на рис. 1 и 2, после ~ 5 UT 28 июня 1999 г. непосредственно за СИТ наблюдается увеличение скорости быстрого СВ из рассматриваемой КД. О том, что это квазистационарный СВ из КД, свидетельствуют относительно малое значение $N_p < 10$ см⁻³ и характерная величина

магнитного поля $B \approx 4-5$ нТл (в интервале как минимум 06:30–18:00 UT 28 июня 1999 г. на рис. 1) при максимальной скорости $V_M \approx 900$ км/с. Единственное различие — это длительность потока (показана стрелками на рис. 1, в), которая составляет около $\Delta t \approx 12$ UT, в то время как типичное значение Δt для быстрых потоков с $V_M \approx 600-900$ км/с составляет от 3 до 5 сут.

Такое возрастание V_M можно объяснить, если допустить, что 25 июня 1999 г. площадь S основания магнитной трубки КД после прохождения центрального меридиана возросла в течение нескольких часов примерно в 3 раза. При этом, согласно формуле (1), скорость быстрого СВ из этой дыры должна увеличиться до ~ 850 км/с. Такое возрастание S вполне возможно, поскольку 24–25 июня 1999 г. площадь этой КД уже менялась (возрастала более чем в 2 раза, см. рис. 3, а, б).

Итак, уникальность рассматриваемого случая состоит в том, что гало-СМЕ, который возник 26 июня 1999 г. в $\sim 07:31$ UT (координаты N25E00) и сопровождался эрупцией протуберанца, попал под воздействие быстрого СВ, скорость которого достигала экстремально большой величины — почти 900 км/с. Процесс выглядит следующим образом. Согласно [http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list], на $R \approx 20R_0$ гало-

СМЕ имел скорость в плоскости неба $V_{\perp} = 400$ км/с и при этом испытывал торможение с ускорением $a = -9.8$ м/с². Это означает, что его скорость в радиальном направлении составляла, согласно [Schwenn et al., 2005], не более $V_r \approx 1.8V_{\perp} \approx 720$ км/с и к тому же непрерывно уменьшалась из-за торможения СМЕ при движении к Земле.

Однако если 25 июня 1999 г. в течение нескольких часов площадь основания магнитной трубки КД после прохождения центрального меридиана возросла примерно в 3 раза, то скорость быстрого СВ из этой КД могла увеличиться до ~ 900 км/с. В результате СМЕ вместе с ДС (волоконном), который тормозился и имел сравнительно небольшую скорость, был достигнут и увлечен быстрым СВ, а затем зарегистрирован на орбите Земли в виде межпланетного транзиента малых размеров, движущегося со скоростью $V \approx 900$ км/с.

2. МАГНИТОСФЕРНЫЙ ОТКЛИК НА ДС 28 ИЮНЯ 1999 г.

2.1. Анализ наблюдений в СВ перед магнитопаузой и на геостационарной орбите

Фронт ДС на орбите Земли был зарегистрирован на трех спутниках (рис. 4, а, табл. 1). Запаздывание между приходом фронта ДС на спутники Geotail и Interball-1 составляет 7 мин, что связано с наклоном фронта к линии Земля—Солнце с нормалью $n = (-0.55, -0.54, 0.64)$ в солнечно-эклиптической системе координат. Нормаль к фронту ДС определялась из следующих соображений. Зная координаты положения спутников в моменты прохождения фронта возмущения и времена регистрации фронта возмущения приборами этих спутников и предполагая, что фронт возмущения является плоским и распространяется со скоростью СВ, можно определить направление движения фронта возмущения. Для применения этого метода необходимо, чтобы как минимум три спутника находились в СВ. Точность этого метода невелика и составляет 20–30%. С учетом направления нормали, первый контакт с магнитосферой происходил на вечерне-полуденной стороне, и, вероятно, поэтому на геостационарной орбите отклик регистрировался раньше, чем на спутниках Interball-1 и IMP-8. С учетом шага дискретизации данных спутниковых магнитометров, равного 1 мин, опережение составляло 2 мин на GOES-8 и 3 мин на GOES-10 (с точностью ± 0.5 мин) по отношению к началу регистрации скачка потока протонов СВ на спутнике Interball-1, который находился перед фронтом околоземной ударной волны (рис. 4, а).

Отметим важные для интерпретации типа возмущения особенности вариаций геомагнитного поля на геостационарном спутнике GOES-8, который находился во внешней зоне квазизахвата на полуденном меридиане (рис. 4, б).

Магнитометром спутника зарегистрированы характерные вариации B_z - и B_x -компонент геомагнитного поля (рис. 4, в). Моменты начала интервалов противофазного хода B_z - и B_x -компонент обозначены на рис. 4, в прямоугольниками П (05:25–05:27),

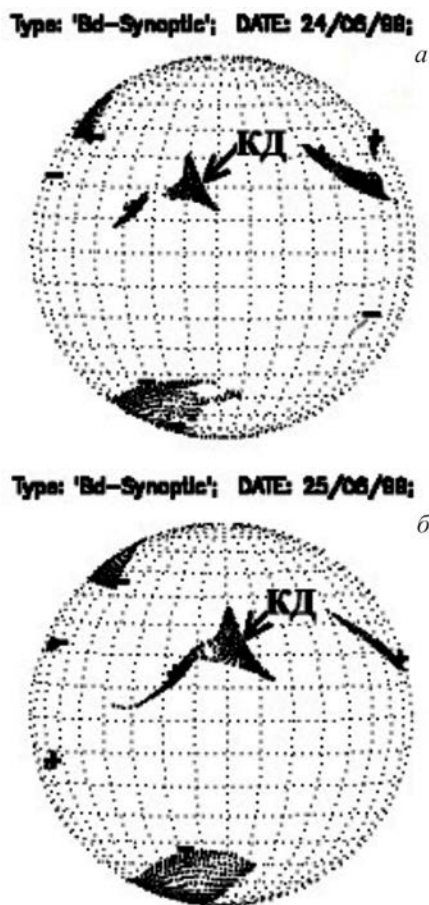


Рис. 3. Положения оснований открытых магнитных трубок, соответствующих корональным дырам, рассчитанные в потенциальном приближении [<http://bdm.iszf.irk.ru>]: а — для 14:28 UT 24.06.1999, б — 14:28 UT 25.06.1999. Плюс — направление магнитного поля от Солнца, минус — к Солнцу

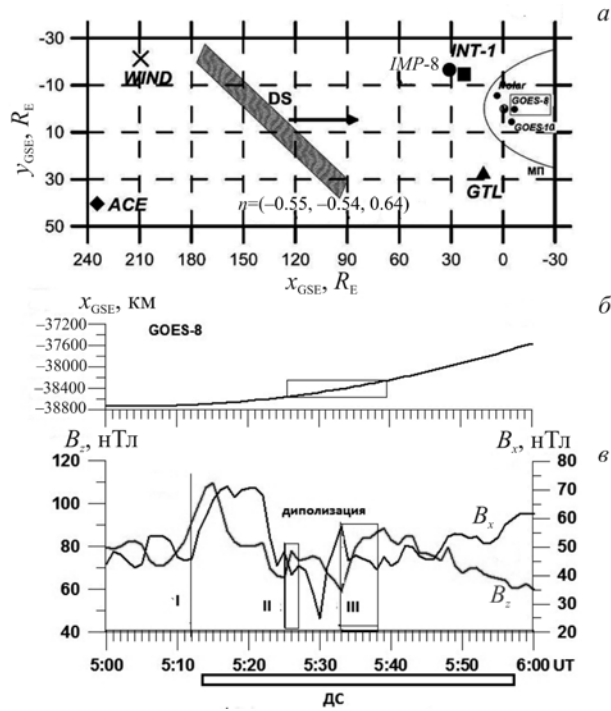


Рис. 4. Передний фронт ДС, положение спутников в СВ и внутри магнитосферы (а); траектория движения спутника GOES-8 во внешней области квазизахвата на полуденном меридиане (б), прямоугольником обозначен интервал диполизации. Вариации B_z - и B_x -компонент геомагнитного поля по данным GOES-8 (в): I — начало усиления свечения на полуденном меридиане; II, III — моменты начала противофазного хода компонент B_z , B_x геомагнитного поля на геостационарной орбите (интервалы диполизации)

Таблица 1

Таблица координат GSE-спутников 28.06.1999 в 05:12 UT

| Спутник | x_{GSE} , км | y_{GSE} , км | z_{GSE} , км |
|-------------|----------------------|----------------------|----------------|
| ACE | $1.49560 \cdot 10^6$ | 250542 | -29671.6 |
| Wind | $1.3351 \cdot 10^6$ | $-1.4355 \cdot 10^5$ | -16365 |
| Geotail | 72253 | $1.7019 \cdot 10^5$ | 3003 |
| IMP-8 | 197838 | -111795 | -116679 |
| Interball-1 | 143194 | -99865 | -41207 |
| GOES-8 | -38699 | -2568 | 16567 |
| GOES-10 | -20629 | 35179 | 10716 |
| Polar | 15576 | -43143 | 16316 |

III (05:33–05:38). Эти данные можно интерпретировать как проявление эффекта диполизации геомагнитного поля, что является неперенным атрибутом суббури [Lui, 2001]. Особенностью рассматриваемого события можно считать то, что диполизация наблюдалась не в начале, а на активной фазе суббуреподобного возмущения.

2.2. Особенности глобального магнитосферного отклика

Поток СВ, структура которого описана во введении, вызвал магнитосферный отклик, имеющий несколько особенностей, отличающих его от обычно наблюдаемых магнитосферных возмущений, вызываемых спорадическими структурами СВ. Особенности глобального магнитосферного отклика иллюстрирует рис. 5.

Прежде всего, в рассматриваемый период 25–28 июня 1999 г. наблюдались три слабые магнитные

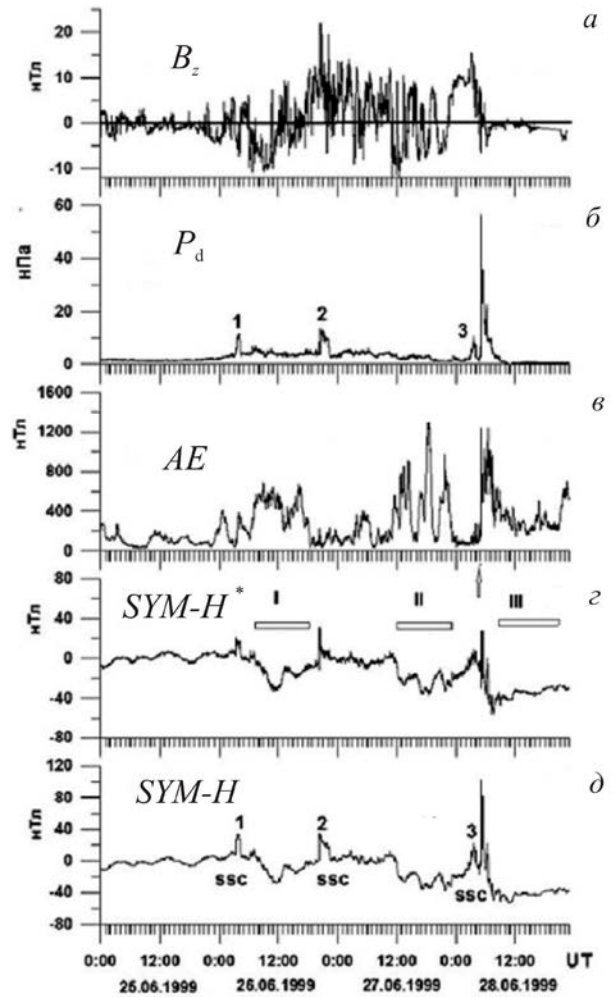


Рис. 5. Вариации B_z -компоненты ММП (а), давления СВ (б), геомагнитных индексов AE (в), $SYM-H^*$ (г) и $SYM-H$ (д). Стрелкой обозначен момент начала СПВ и последующей бури, вызванной ДС. Прямоугольниками I, II, III обозначены интервалы слабых магнитных бурь.

бури (обозначены прямоугольниками I, II, III) с внезапными началами (1, 2, 3 на рис. 5) [http://www.obsebre.es/en/rapid]. Бури классифицированы как слабые по величине суммарного за 26–28 июня K_p -индекса магнитной активности ($\Sigma K_p=26-$ и $26+$ соответственно). SSC первой бури зарегистрировано 26 июня 1999 г. в 03:25 UT с максимальным индексом $Dst=-15$ нТл в ~12 UT 26 июня 1999 г. SSC второй бури наблюдалось в ~20:15 UT 26 июня 1999 г. с максимальным $Dst=-22$ нТл в ~23 UT 27 июня 1999 г. Эту бурю составили три мощные суббури с $AE_{max}=1350$ нТл в 18:28 UT.

Геомагнитное поле возвращается к невозмущенному уровню в первые часы 28 июня 1999 г. ($K_{p0-3}=2$). Третье SSC не отмечено в каталоге [http://www.obsebre.es/en/rapid]. Однако просмотр магнитограмм обсерваторий, по которым определяются SSC в каталоге, показал, что в 02:49 UT наблюдался скачок H -компоненты геомагнитного поля длительностью ~3 мин с максимальным значением ~21 нТл на обсерваториях дневного сектора (Alibag, Kakioka, Honolulu). После внезапного начала произошло усиление поверхностных токов и индекс $SYM-H$ достиг значения 25 нТл, а в 04:00 UT произошло резкое падение $SYM-H$ -индекса, отражаю-

щее усиление кольцевого тока, подобное усилению в главные фазы бури (до -18 нТл).

В следующем трехчасовом интервале магнитная возмущенность резко возросла ($K_{p3-6}=6+$). Возрастание геомагнитной активности в этом временном интервале связано с воздействием на магнитопаузу диамагнитной структуры СВ, в отличие от трех предыдущих возрастаний, вызванных межпланетными ударными волнами. Мировой службой Intermagnet в 05:09 UT зарегистрировано глобальное резкое возрастание H -компоненты. На обсерваториях дневного сектора, данные которых используются для определения $SYM-H$ - и Dst -индексов, регистрировались положительные резкие возрастания H -компоненты до 110 нТл в течение одной минуты. Но это возмущение в каталоге не отнесено к типу SSC. В целом по совокупности морфологических признаков возмущение III можно классифицировать как слабую магнитную бурю с SSC в 02:49 UT. В начале главной фазы бури произошло резкое возрастание активности, обусловленное взаимодействием магнитосферы с ДС. Для этой бури в ~ 11 UT 28 июня 1999 г. наблюдался максимальный из трех бурь $Dst=-41$ нТл. Учитывая большую величину скачка давления в 05:12 UT и следуя результатам [O'Brien, McPherron, 2002], из вариации $SYM-H$ -индекса мы исключили вклад поверхностных токов, усиливающих на магнитопаузе при сжатии магнитосферы:

$$SIM-H^* = SIM-H - 10 \left(\sqrt{P_d} - 1.5 \right). \quad (3)$$

Сравнение вариаций индекса $SYM-H$ с исправленной вариацией (рис. 5, ε , δ) показывает, что скачок давления в ДС наблюдается в начале главной фазы третьей магнитной бури.

Скачок концентрации протонов СВ в 05:09 UT вызвал мощное магнитосферное возмущение — полярные сияния на дневной и ночной сторонах, глобальное усиление ионосферных токов и магнитной активности с максимальными значениями AE -индекса 1262 нТл в 05:13 UT и 1033 нТл в 05:37 UT. Весьма важно, что вариация концентрации протонов СВ в интервале 05:09–05:55 UT антикоррелирована с модулем напряженности ММП:

$$R(B, N_p) = -0.8 \pm 0.1.$$

Такая структура СВ является диамагнитной [Пархомов и др., 2015].

Магнитосферное возмущение в интервале 05:12–06:00 UT близко по своим проявлениям к суббуре [Акасофу, 1971]. Однако оно началось на дневной стороне, без предварительной фазы накопления энергии в хвосте магнитосферы (вертикальная компонента ММП ориентирована к северу в течение 5 ч до прихода ДС), а продолжительность возмущения определяется размером ДС на орбите Земли. Как уже говорилось во введении, подобный комплекс явлений, вызванных взаимодействием с магнитосферой диамагнитной структуры СВ, мы называем суббуреподобным возмущением.

Важно отметить то, что в рассматриваемом временном интервале 25–28 июня 1999 г. бури (и суббури

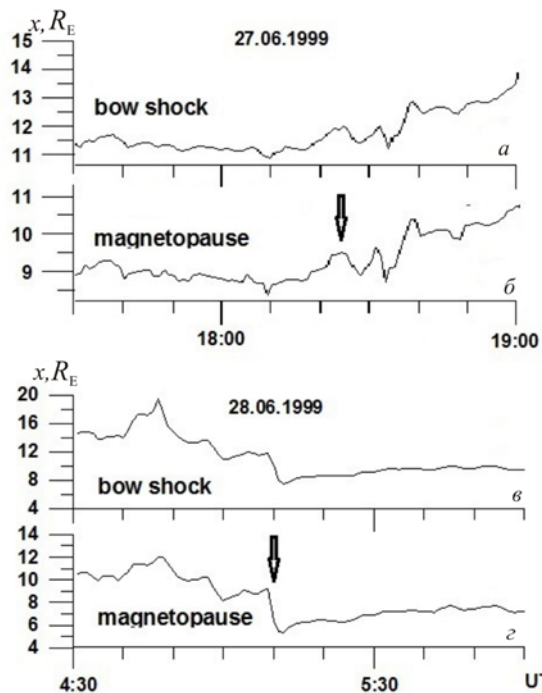


Рис. 6. Вариации положения границы головной ударной волны и магнитопаузы (x -координата): а — головной ударной волны (по данным [http://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp_public]), б — магнитопаузы, рассчитанной по модели [Lin et al., 2010] для 27 июня 1999 г.; в, г — то же для 28 июня 1999 г. Стрелками обозначены начала суббури и СПВ

как их составляющие) наблюдались при разных предшествующих ориентациях вертикальной компоненты ММП: первая и вторая бури при преимущественно южной ориентации B_z . В течение взаимодействия ДС с магнитосферой B_z была положительной. Особо подчеркнем, что до начала возмущения вертикальная компонента ММП в течение ~ 5 ч перед контактом с ДС была направлена к северу (средняя величина $B_{z,av}=5.29 \pm 4.21$ нТл). Южная B_z -компонента кратковременно регистрировалась в интервалах 04:59–05:10 UT ($B_{z,av}=-4.54 \pm 1.67$ нТл) и 05:10–05:12 UT ($B_{z,av}=-3.8 \pm 3.4$ нТл), а затем вертикальная компонента снова была устойчиво направлена к северу, изменяясь в пределах 0–8 нТл. Мы полагаем, что за 10 мин существования южной B_z -компоненты ММП в хвосте магнитосферы не может накопиться того количества энергии, которое высвободилось в рассматриваемом СПВ.

Примечательны вариации положения фронта ударной волны и магнитопаузы (рис. 6), которые синхронны с вариациями концентрации протонов и динамического давления СВ. Положение магнитопаузы вычислено по модели [Lin et al., 2010], а положение головной ударной волны взято на сайте [http://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp_public].

В интервале II (рис. 5) в ходе мощных суббурь граница магнитосферы удаляется от Земли при падении концентрации протонов СВ, а максимум интенсивности суббури регистрируется на фоне расширяющейся магнитосферы (рис. 6, а, б). Напротив, СПВ в интервале III (рис. 5) начинается после скачка

концентрации протонов и, соответственно, после сжатия магнитосферы (рис. 6, в, з).

Приведенные факты позволяют сделать предварительное заключение о разных энергетических источниках двух магнитосферных возмущений, сравнимых по величине AE -индекса. Поскольку перед суббурей в интервале II, которая началась 27 июня 1999 г. в 17:20 UT (рис. 5), B_z -компонента ММП в течение ~4 ч была преимущественно южного направления, то можно предполагать, что источником энергии этой суббури ($AE_{\max}=1350$ нТл) была энергия, накопленная в хвосте магнитосферы в результате пересоединения силовых линий ММП и магнитосферы [Lui, 2001].

Поскольку в интервале III (рис. 5) перед началом СПВ B_z -компонента ММП в течение ~5 ч была ориентирована к северу, то накопления энергии в хвосте в результате пересоединения не происходило. Перед скачком давления СВ регистрировались скачки всех компонент ММП, поэтому можно предполагать, что источником СПВ является сильное сжатие магнитосферы диамагнитной структурой СВ и поступление в магнитосферу энергии ДС.

2.3. Анализ отклика в авроральной зоне на ДС по спутниковым снимкам сияний и наземным геомагнитным наблюдениям

Выполним сравнительный анализ наблюдений полярных сияний, аврорального поглощения, вариаций геомагнитного поля и геомагнитных пульсаций для поиска различий между классической суббурей и СПВ.

Суббуря 27 июня 1999 г.

Вертикальная компонента ММП в интервале 11:30–24:00 UT имела преимущественно южное направление с тремя 20-минутными возвращениями к северному, и, как следствие, в этом интервале произошло три суббури. Рассмотрим детально суббурю 17:20–19:10 UT (рис. 7, а–в). Прежде всего, развитие суббури происходит по хорошо известному сценарию, а отличия от СПВ проявляются в развитии начальной стадии суббури и особенно в динамике полярных сияний в UVI-диапазоне (использованы наблюдения со спутника Polar). Снимки сияний на спутнике получены с использованием фильтров LBHL и LBHS [Torr et al., 1995]. На рис. 7, а–в приведены: вариации B_z -компоненты ММП (а), фрагмент магнитограммы (H -компонента) обсерватории Barrow (BRW, географ. коорд. 71.32° N, 203.38° E) ночного сектора и моменты наблюдений Pi2 на средних широтах (указаны стрелками) (б), а также спутниковые снимки сияний с фильтром LBHS (в).

В рассматриваемом интервале наблюдается классическая суббуря в полярных сияниях, которая начинается с усиления яркости спокойной дуги вблизи полуночного меридиана (кадр 17:24:17 UT на рис. 7, в) [Акасофу, 1971]. После брейккапа дуга сияний движется к западу, а на восстановительной фазе происходит движение сияний к востоку. Здесь видно, что сияния по долготе охватывают область от 23 до 06 MLT в широтном интервале 58°–72° N.

Наряду с суббурей в полярных сияниях, наблюдается суббуря в авроральном поглощении

[<http://aurora.phys.ucalgary.ca/cgi-bin/rio>]. Поглощение началось в 17:30 UT и достигло максимальной величины 1.5 дБ в 18:30 UT в обсерватории Fort Churchill (иллюстрация не приводится).

В магнитной обсерватории Barrow, находящейся в утреннем секторе (05 MLT), регистрируется отрицательное бухтообразное возмущение H -компоненты с максимальной амплитудой 860 нТл (рис. 7, б). На среднеширотной станции Монды в полуночном секторе регистрируются всплески Pi2-колебаний. Таким образом, все данные, приведенные на рис. 7, а–в, указывают на то, что магнитосферное возмущение 27.06.1999 является авроральной суббурей. Важно, что суббуря развивается на фоне удаления магнитопаузы и головной ударной волны от Земли (рис. 6, а, б).

Суббуреподобное возмущение 28 июня 1999 г.

В отличие от рассмотренной суббури, источником СПВ является сильное сжатие магнитосферы структурой СВ, отождествленной нами как ДС. Основным признаком такой структуры [Пархомов и др., 2015] является высокий отрицательный коэффициент корреляции между B и N_p . В анализируемом событии $R(B, N_p) = -0.8 \pm 0.1$. Еще раз заметим, что до начала возмущения, перед взаимодействием ДС с магнитосферой, компонента B_z в течение ~5 ч была направлена к северу. Повороты B_z -компоненты к югу на спутниках вблизи магнитопаузы (рис. 4, а) (IMP-8, Geotail, Interball-1) регистрируются в интервале 04:59–05:10 UT, а затем вертикальная компонента вновь устойчиво направлена к северу.

Динамика полярных сияний

Главными особенностями отклика магнитосферы авроральной зоны на ДС являются появление интенсивного свечения в UVI-диапазоне на полуденной стороне на широтах полярного каспа и быстрое распространение свечения на ночную сторону (рис. 8, б, фильтр LBHL). На снимках с фильтром LBHS (рис. 8, в) хорошо видна динамика сияний.

Полярные сияния, возникающие в дневной области полярного каспа после взаимодействия с магнитосферой межпланетных ударных волн и областей СВ с повышенным давлением, получили название shockaurora и были рассмотрены во многих статьях [Zhou, Tsurutani, 1999, 2001; Zhou et al., 2009]. Мы рассматриваем случай взаимодействия не с ударной волной, а с ДС.

Особенность рассматриваемого события и его отличие от shockaurora заключается в том, что слабое усиление свечения на широтах ~73–78° в околополуденном секторе 11–13 MLT начинается в 05:00:07 UT — в момент перехода B_z ММП от северного к южному направлению. Но резкое усиление свечения происходит в 05:11:46 UT — в момент скачка концентрации протонов СВ и поворота B_z к северу. Поэтому в рассматриваемом случае нельзя отрицать и роль пересоединения в передаче энергии из СВ в магнитосферу. Но еще раз подчеркнем, что длительность существования южной B_z -компоненты ММП составила ~10 мин, в то время как в классических работах по суббурям указывается, что началу суббури предшествует существование южной B_z -компоненты ММП в течение 1 ч, что и определяет подготовительную фазу суббури.

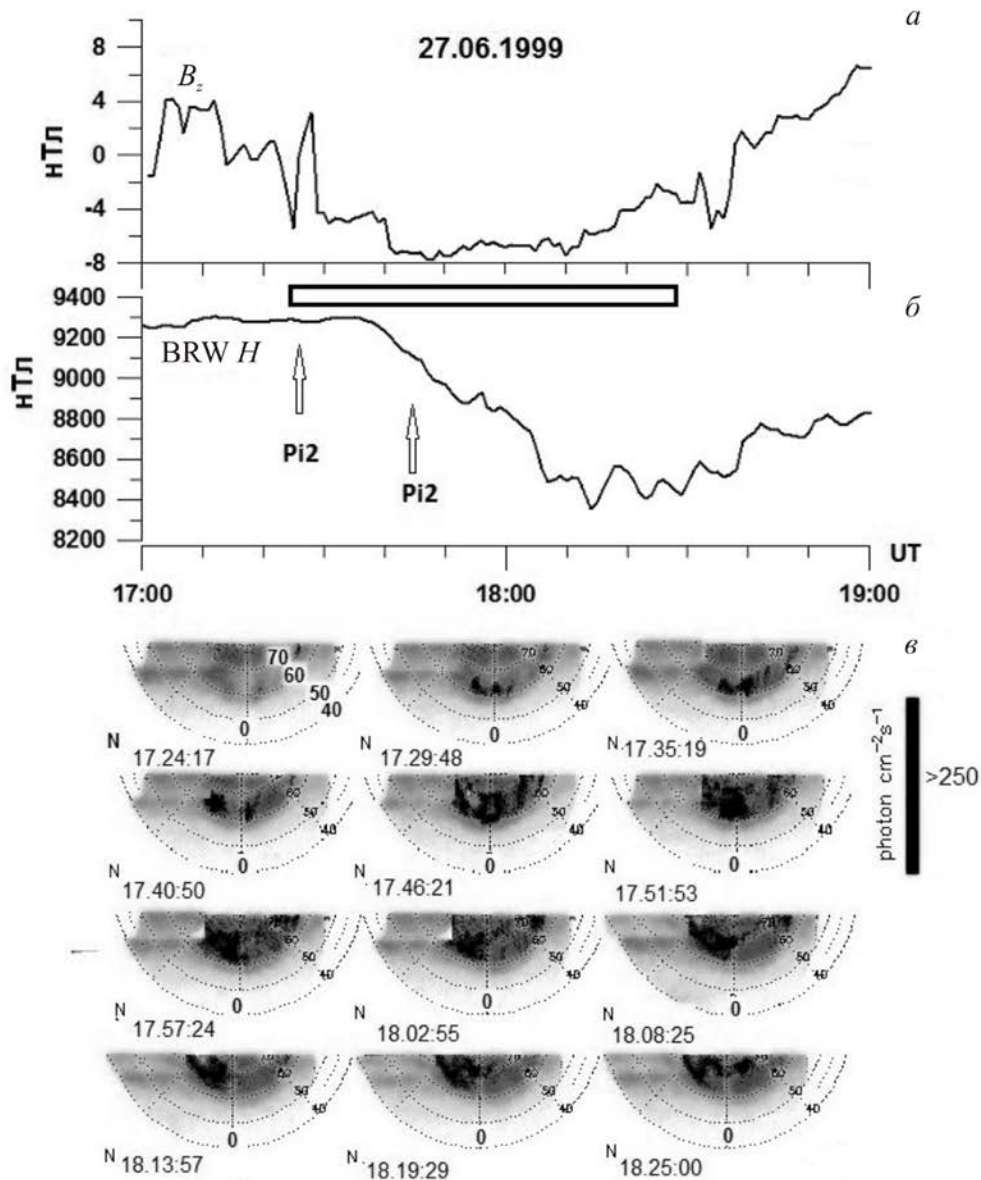


Рис. 7. Последовательность развития классической авроральной суббури: а — вариации B_z -компоненты ММП; б — вариации H -компоненты магнитного поля на obs. Вагтов. Прямоугольником обозначено время наблюдения сияний на спутнике Polar. Стрелками обозначены моменты регистрации колебаний Pi2 на среднеширотной станции Монды. Панель в — снимки сияний со спутника Polar (фильтр LBHS)

Можно предположить, что в рассматриваемом случае подготовительная фаза СПВ началась с момента обращения знака вертикальной компоненты ММП и длилась 10 мин.

На рис. 8, а приведены вариации AE -индекса авроральной геомагнитной активности и B_z -компоненты ММП. Прямоугольником обозначено время наблюдения ДС. Видно, что перед контактом магнитосферы с ДС в течение 10 мин вертикальная компонента ММП имела южное направление. Однако столь короткое время существования отрицательной B_z -компоненты не могло обеспечить поступление в магнитосферу такого количества энергии, которое выделилось в последующем СПВ.

Рассмотрим динамику полярных сияний. На последовательных кадрах (рис. 8, б, в) видно, что по-

сле начального уярчения в 05:00:07 UT на широтах дневного полярного каспа ($\sim 72^\circ$ – 76°) в 05:11:46 UT происходит сильное возрастание яркости вблизи полуденного меридиана и начинается движение фронтов свечения на утреннюю и вечернюю стороны. Смещение восточного края свечения особенно отчетливо видно на рис. 8, б (кадр 05:16:04 UT), на котором фронт свечения достиг предполуночного сектора ($\sim 02^h$). На рис. 8, в видно смыкание границ свечения на полуночном меридиане (кадр 05:18:12 UT), а также что свечение охватывает весь овал полярных сияний (кадр 05:23:43 UT).

По наземным наблюдениям сияний зенитными фотометрами на полуночном меридиане (ст. Gillam, GILL) резкое увеличение интенсивности свечения в линии 486 нм (в 10 раз) начинается на широте 67°

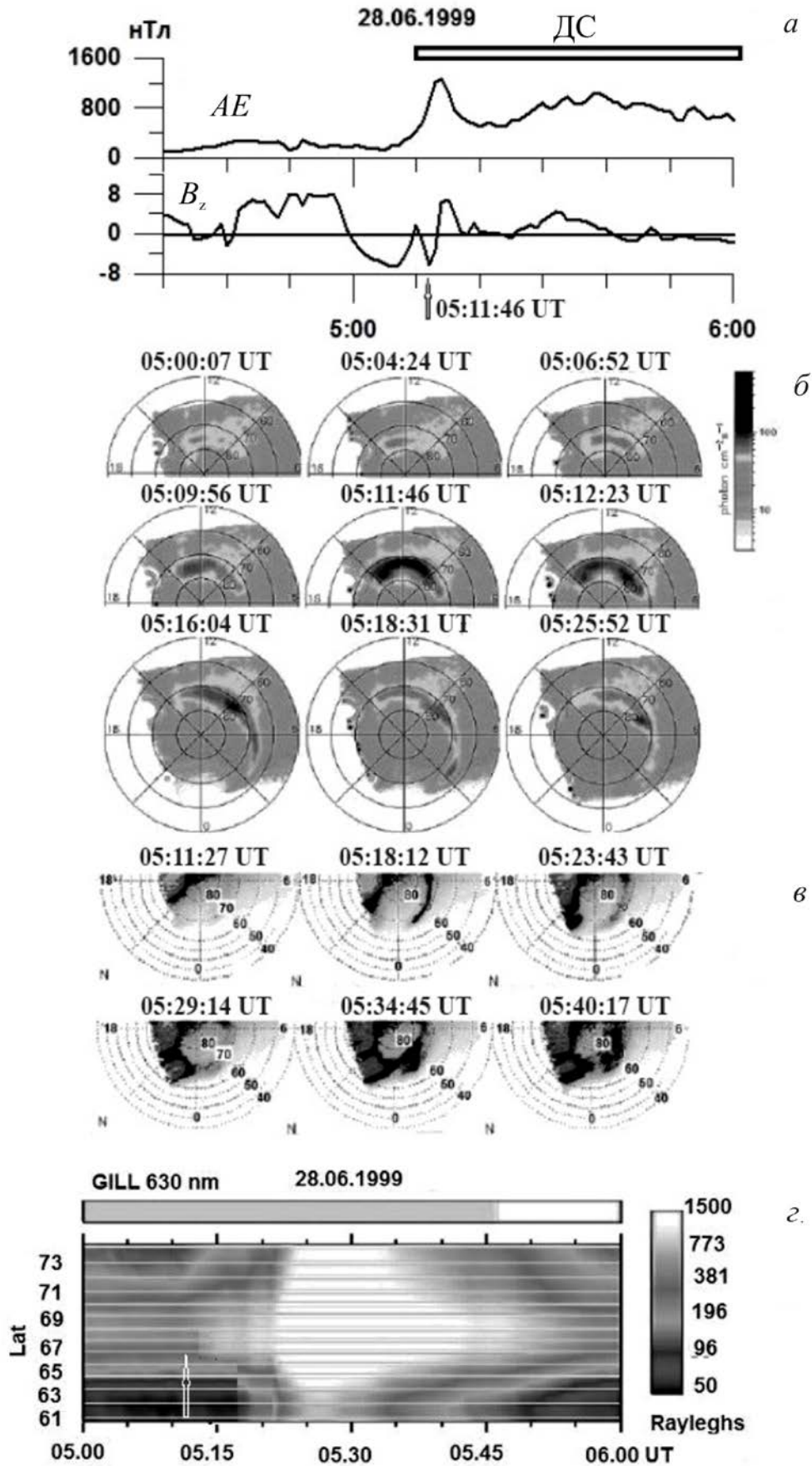


Рис. 8. Последовательность развития СПВ после взаимодействия ДС с магнитосферой: вариации AE -индекса и B_z -компоненты ММП, прямоугольником обозначено время наблюдения ДС (а); последовательность снимков сияний со спутника Polar с фильтрами LBHL (б) и LBHS (в); данные наземного зенитного фотометра вблизи полуночного меридиана, MLT $\sim 23^{\text{h}}$ (ст. Gillam) (г), стрелкой обозначен момент начала усиления яркости сияний на полуденном меридиане

Таблица 2

| № | Название станции | Сокращение | Географическая широта | Географическая долгота |
|---|------------------|------------|-----------------------|------------------------|
| 1 | Pinava | PINA | 50.20° | 263.96° |
| 2 | Island Lake | ISLL | 53.86° | 265.34° |
| 3 | Gillam | GILL | 56.38° | 265.36° |
| 4 | Fort Churchill | FCHU | 58.76° | 265.92° |
| 5 | Eskimo Point | ESKI | 61.11° | 265.95° |
| 6 | Rankin Inlet | RANK | 62.82° | 267.80° |
| 7 | Taloyk | TALO | 69.54° | 266.45° |

в ~05:14:30 UT, т. е. через ~3 мин после резкого усиления сияний на дневной стороне (рис. 8, з). Как показали [Zhou, Tsurutani, 1999], скорость распространения переднего фронта shockауга к восходу и закату определяется скоростью движения ударной волны вдоль магнитопаузы и составляет 6–11 км/с. В рассматриваемом случае начало свечения на ночной стороне наблюдается через ~3 мин после усиления свечения на дневной стороне. Вероятно, столь малое запаздывание можно связать с высокой скоростью распространения ДС в СВ — ~900 км/с.

Динамика аврорального поглощения, электроджета и геомагнитных пульсаций

Особенности развития возмущения на ночной стороне Земли видны на рис. 9.

Здесь представлены данные меридиональной сети CANOPUS (MLT ~23–01 ч) с высоким временным разрешением (частота опроса 5 с) в диапазоне геомагнитных широт 61.15–79.65° (географические координаты станций приведены в табл. 2) с 04:40 до 06:00 UT: фрагменты записей риометров (а) и магнитограмм *H*-компоненты геомагнитного поля (б), а также фрагменты магнитограмм, отфильтрованных в частотном диапазоне геомагнитных пульсаций Pi1 (10–45 с) (в). Вертикальной линией 1 на рис. 9, а–в обозначено время резкого усиления свечения в UVI-диапазоне (кадр 05:11:49 на рис. 8, б) на полуденном меридиане. Прямоугольником обозначено время регистрации ДС. Стрелками указаны: начало отрицательной бухты в *H*-компоненте, начало регистрации максимума геомагнитных пульсаций Pi1 и начало бухты в авроральном поглощении на каждой станции. Все перечисленные явления составляют комплекс суббури [Акасофу, 1971].

Последовательность явлений следующая. Через 11 мин после резкого возрастания *H*-компоненты, вызванного усилением токов Чепмена—Ферраро на магнитопаузе и сжатием магнитосферы, на GOES-8, который находился во внешней зоне квазизахвата на полуночном меридиане, регистрируются вариации B_z - и B_x -компонент геомагнитного поля (рис. 9, а–в — прямоугольники 2, 3), характерные для диполизации геомагнитного поля — одного из главных признаков суббури [Sergeev et al., 2012; Lui, 2001].

В 05:13 UT на ст. ISSL ($\varphi=53.86^\circ$) регистрируется начало отрицательной бухты в авроральном поглощении. Поглощение такого типа вызвано высыпанием энергичных электронов с энергиями $E=10\text{--}40$ кэВ из плазменного слоя хвоста магнитосферы. Начало бухты в поглощении запаздывает на северных станциях по отношению к более южным, и

данная закономерность является одним из типичных признаков суббури [Акасофу, 1971]. На самой южной станции меридиональной сети PINA ($\varphi=50.20^\circ$) высыпаний не регистрируется (рис. 9, а).

Рассмотрим динамику аврорального электроджета по вариациям *H*-компоненты. Как видно на рис. 9, б, на самой южной меридиональной станции PINA вблизи местной полуночи (MLT=0:35) в отмеченное вертикальной линией время наблюдается резкое возрастание *H*-компоненты, которое совпадает с аналогичным возрастанием на низкоширотных станциях дневной полусферы. Это возрастание связано со сжатием магнитосферы, резким смещением магнитопаузы и усилением на ней поверхностных токов Чепмена—Ферраро. После прохождения переднего фронта ДС геомагнитное поле постепенно возвращается к невозмущенному уровню, как и на остальных среднеширотных станциях. Однако на ст. ISLL, расположенной севернее ($\varphi\approx 54^\circ$), в 05:15 UT наблюдается спад *H*-компоненты (обозначено стрелкой). Начало отрицательной бухты в *H*-компоненте так же, как и начало бухты в поглощении, смещается к северным станциям. Глубина бухты возрастает по мере смещения к северу с максимумом ~450 нТл на ст. FCHU. Смещение к северу наблюдается и для максимума амплитуды нерегулярных пульсаций (рис. 9, в). Такая же закономерность дрейфа максимума амплитуды иррегулярных геомагнитных пульсаций Pi1, характерная для активной фазы суббури, была обнаружена по наблюдениям на Норильской меридиональной сети станций [Пархомов, Рахматулин, 1975].

Смена направления эквивалентного ионосферного тока над станциями меридиональной сети по мере развития СПВ и смещения электроджета к северу отчетливо прослеживается на рис. 10, а. Здесь представлены фрагменты карт векторов эквивалентных ионосферных токов, вычисленных по методике [Parkhomov et al., 2011], над станциями, магнитограммы которых даны на рис. 9 в моменты, соответствующие вертикальным линиям на рис. 10, б. На этом рисунке приведены также вариации концентрации протонов СВ и модуля *B* ММП (ДС обозначена прямоугольником). Видно, что перед началом возмущения в 05:07:00 UT токи над всеми станциями меридиана направлены на восток, а максимальный ток течет над самой северной станцией TALO. В момент, соответствующий максимуму динамического давления в СВ (05:12 UT) и максимуму токов Чепмена—Ферраро на дневной магнитопаузе, синхронно усиливаются токи восточного направления над станциями меридиана с максимальным значением над ст. RANK. Ток над ст. PINA сохраняет

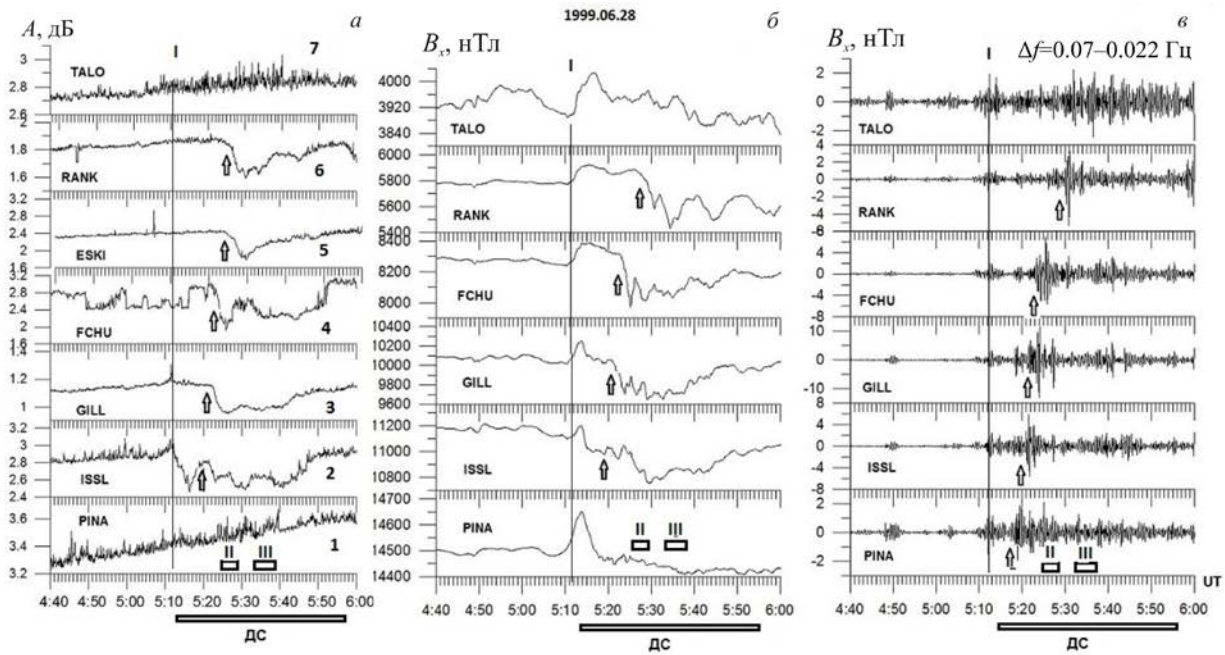


Рис. 9. Геомагнитный отклик на полуденном меридиане сети станций CANOPUS (MLT ~23–0^h): *a* — вариации интенсивности аврорального поглощения в диапазоне географических широт 50.20°–69.54° (геомагнитные широты 61.15°–79.65°) вдоль меридиана в ~23 MLT; *б* — вариации *H*-компоненты; *в* — вариации интенсивности геомагнитных пульсаций в частотном диапазоне Pi1 (15–45 с). Сплошной тонкой линией I обозначено резкое усиление свечения на полуденном меридиане. Стрелки показывают моменты начала явления на каждой станции. Прямоугольником ДС обозначено время наблюдения диамагнитной структуры. Прямоугольники II, III соответствуют интервалам диполизации на рис. 4, *в*. Номера станций соответствуют табл. 2

восточное направление в течение всего возмущения, вызванного ДС.

В 05:15 UT направление тока над ст. ISSL меняется на западное, а в 05:22 UT усиливается ток западного направления над ст. GILL (этот момент совпадает с началом отрицательной бухты в *H*-компоненте — стрелка на рис. 9, *б*).

В 05:24 UT максимум западного тока перемещается на широту ст. FCHU, а в 05:30 UT достигает ст. RANK. Над ст. PINA и TALO сохраняется ток восточного направления. Таким образом, карты эквивалентных ионосферных токов также показывают динамику токов, свойственную суббуре.

Заметим, что начало диполизации геомагнитного поля на геостационарной орбите на GOES-8 можно определить в 05:25 UT (прямоугольник II на рис. 9), а второй интервал диполизации зарегистрирован в максимуме активной фазы СПВ, т. е. диполизация во внешней зоне квазизахвата происходит в ходе СПВ, вызванного взаимодействием с магнитосферой ДС.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В работе [Zhou, Tsurutani, 2001, Zhou et al., 2009] на основе многолетних исследований отклика магнитосферы на скачки параметров СВ и ММП выявлены различные виды откликов, которые включают суббури, псевдобрейкапы, интенсификации полярной границы сияний, устойчивую магнитосферную конвекцию, интервалы длительной высокоинтенсивной *AE*-активности, магнитные бури и буревые активизации. Каждый вид отклика определяется

определенным сочетанием параметров внешнего воздействия и внутреннего состояния магнитосферы.

В статье [Zhou et al., 2003] анализируются несколько случаев наблюдений shockaurora при воздействии на магнитосферу межпланетных ударных волн и импульсов давления по наблюдениям полярных сияний в UVI-диапазоне на спутнике Polar и потоков электронов и протонов на спутниках FAST и DMSP. Особенно примечателен случай воздействия на магнитосферу скачка давления СВ на 4 нПа при положительной ориентации вертикальной компоненты ММП 04.08.1997. Как видно на рис. 4 из статьи [Zhou et al., 2009] и следует из его описания авторами, сияния начались на полуденном меридиане и распространились на ночную сторону.

Если рассмотреть вариации концентрации протонов СВ и модуля *B* ММП в интервале 02:30–03:05 UT 04.08.1997, их можно интерпретировать как признаки ДС, составляющей часть СМЕ. В этом интервале концентрация протонов СВ и модуль ММП изменяются в противофазе: коэффициент корреляции $R(B, N_p) \approx -0.3$.

Дополнительным аргументом в пользу нашего вывода может служить аналогия токовых систем 28.06.1999 (рис. 11) и 04.08.1997 (рис. 12), возникающих в результате развития СПВ. Как видно на картах векторов эквивалентных ионосферных токов, в обоих случаях на ночной стороне возникает токовая система DP-2 с мощным западным током (для обоих случаев карты построены для момента спустя 17 мин после контакта ДС с магнитопаузой).

Другое подтверждение высказанных предположений можно найти в работе [Tagirov et al., 1998],

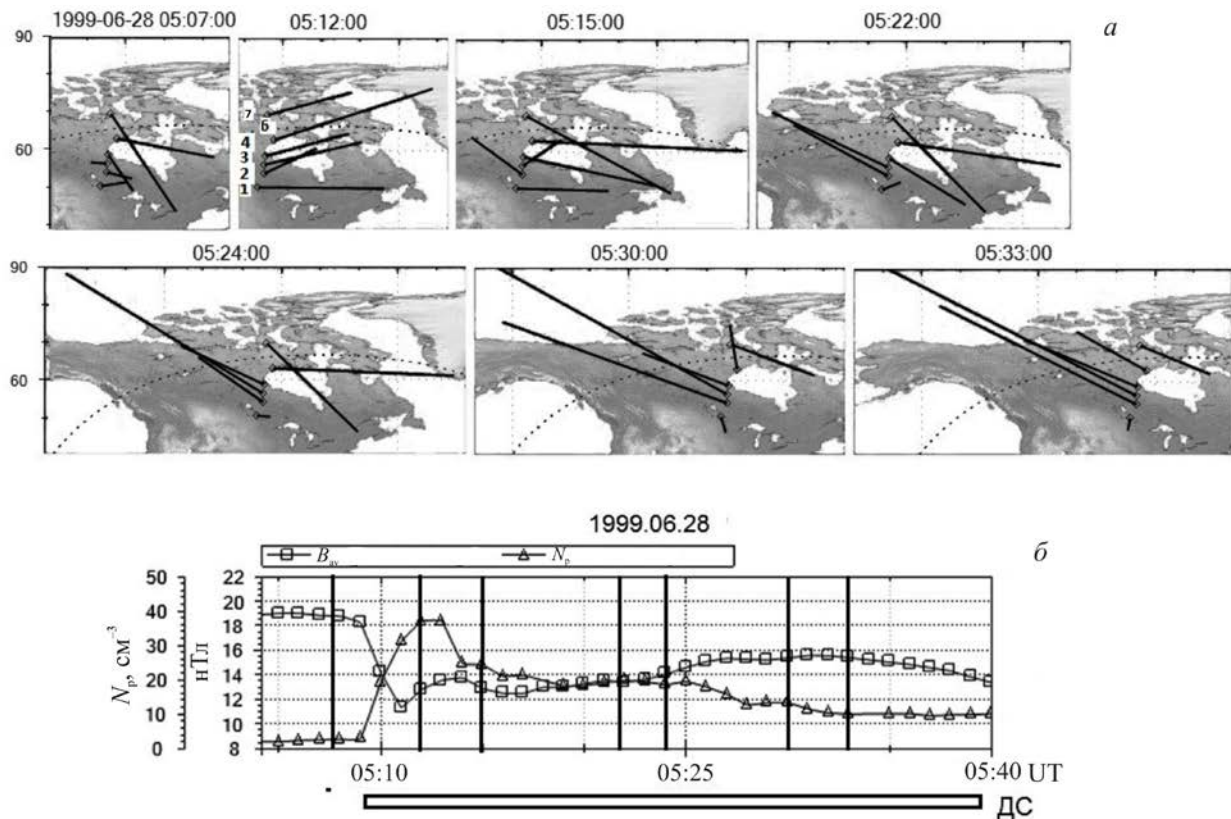


Рис. 10. Фрагменты карт векторов эквивалентных токов на меридиональной сети CANOPUS (MLT ~23–0^h), демонстрирующие моменты смены направления эквивалентного ионосферного тока при перемещении границы электроджета к северу в ходе суббури (а); вариации параметров ММП (B_{av}) и СВ (N_p) в рассматриваемый интервал (б). Вертикальные линии показывают время, для которого построены карты векторов. Номера станций указаны в соответствии с табл. 2

где исследованы две суббури 09.12.1996, следовавшие одна за другой с интервалом в один час и существенно различавшиеся по источникам. Начало первой из них отчетливо связано с взаимодействием ДС с магнитосферой при северной ориентации вертикальной компоненты ММП. Для этой структуры, по нашим расчетам, $R(B, N_p) = -0.91 \pm 0.02$. Суббури классифицирована авторами [Tagirov et al., 1998] как псевдобурейка. Для нашего исследования важно то, что данное магнитосферное возмущение вызвано ДС. Вторая — классическая — суббури не имела явно выраженных внешних запускающих механизмов, но началась после длительного существования (~1 ч) ММП южной ориентации перед подходом к магнитосфере СВ с областью повышенного давления.

В работе [Huttunen et al., 2002] рассмотрены суббуреподобные события в течение сильной магнитной бури и сделано заключение, что при рассмотренных условиях в СВ усиления аврорального электроджета как часть суббуревой активизации напрямую контролируются параметрами ММП и СВ, а не динамическими процессами в хвосте магнитосферы.

Мы проверили на диамагнитность структуру солнечного ветра в интервалах, для которых в [Huttunen et al., 2002] предполагается прямой контроль магнитосферной возмущенности параметрами СВ и ММП. Главный признак ДС для интервала с 22:00 UT 06.04.2000 до 02:00 UT 07.04.2000 — коэффициент корреляции $R(B, N_p) = -0.84$. Это поз-

воляет нам считать, что и в случаях, приведенных в [Huttunen et al., 2002], источником энергии процесса в магнитосфере является ДС в быстром потоке СВ.

Подобный вывод сделан и по поводу суббурь 01.08.1998 в работе [Parkhomov et al., 2011]. Было установлено, что интервалы в СВ, в которых вариации концентрации СВ в противофазе с вариациями модуля напряженности ММП, вызывают синхронный отклик в геофизических явлениях, наблюдаемых на Земле, на орбите Polar, геосинхронной орбите и в плазменном слое хвоста магнитосферы. Скачок давления СВ при слабо отрицательной B_z -компоненте ММП, амплитуда которой возрастает в момент скачка, может служить не только триггером суббури, но и определять в дальнейшем процесс высвобождения поступающей из СВ энергии.

Аналогичная модель воздействия скачка давления СВ рассмотрена в [Zhou et al., 2013]. Согласно модели, ДС, распространяющаяся с большой скоростью в СВ вдоль хвоста магнитосферы, сжимает хвост. Это приводит к передаче энергии в плазменный слой и развитию процессов, аналогичных процессам, происходящим во время классической суббури. После утоньшения хвоста до 80 % [Zhou et al., 2013] появляются направленные к Земле потоки плазмы и фронты диполизации, подобные приведенным на рис. 4, в. Эти явления приводят в авроральной зоне к процессам, сходным с авроральной суббурей.

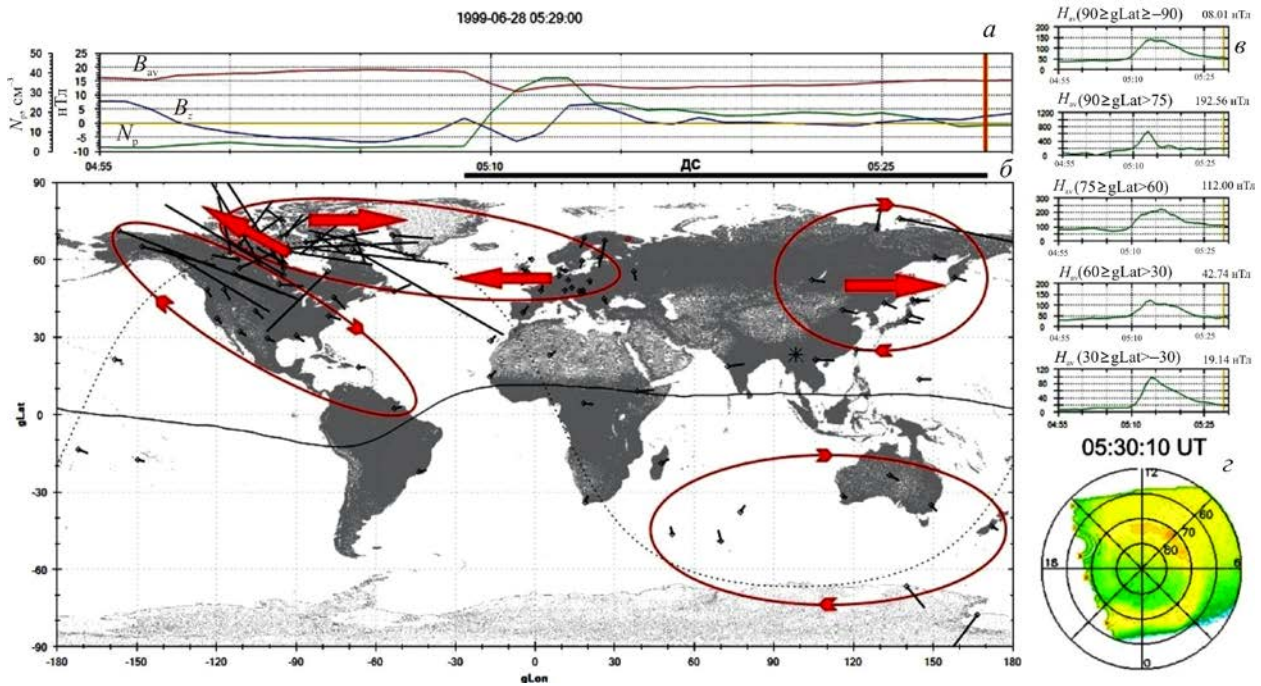


Рис. 11. СПВ 28.06.1999: *a* — вариации концентрации протонов СВ, модуля и вертикальной компоненты ММП; *б* — карта векторов эквивалентных ионосферных токов 18:30 UT; *в* — вариации средней напряженности геомагнитного поля, индуцируемые эквивалентным ионосферным током в указанных широтных интервалах; *г* — снимок сияний со спутника Polar. Пунктиром обозначена линия терминатора, сплошной линией — магнитный экватор, звездочкой — положение подсолнечной точки, стрелками — преимущественное направление ионосферных токов. Горизонтальная линия ДС — время наблюдения диамагнитной структуры, вертикальная линия — момент вычисления параметров. H_{av} — среднее значение напряженности геомагнитного поля, создаваемой эквивалентным ионосферным током в указанном широтном диапазоне (*в*). В правом верхнем углу (*г*) приведена средняя по обсерваториям в данном широтном диапазоне напряженность геомагнитного поля в момент времени, обозначенный вертикальной линией

Время активизации СПВ определяется пространственными размерами волокна (ДС). В событии 28.06.1999 от момента взаимодействия (05:11:40 UT) диамагнитной структуры СВ с магнитосферой, определяемого по наибольшей яркости сияний в UVI-диапазоне на полуденном меридиане (рис. 9, *б*), до усиления высыпаний и аврорального электрождета СПВ на полуночном меридиане прошло ~5 мин (05:19 UT, стрелки на рис. 9, *а-в*). Такое же время запаздывания усиления светимости сияний на ночной стороне определяется и для события 04.08.1997 в работе [Zhou et al., 2003]. На рис. 10 вектор эквивалентного тока над ст. ISLL меняет направление в 05:15 UT, поэтому как среднее время начала СПВ на полуночном меридиане можно взять 05:17 UT.

В рассмотренном нами событии источником энергии мощного СПВ с $AE_{max}=1280$ нТл была ДС в потоке СВ после продолжительного периода существования B_z ММП северного направления. Энергия этой структуры диссипировала в составляющих СПВ процессах без предварительного накопления в хвосте.

В заключение заметим, что, несмотря на обилие публикаций по рассматриваемой проблеме, она далека от однозначного понимания в силу многообразия неоднородностей в СВ и множества степеней свободы состояния магнитосферы. Поэтому однозначно идентифицировать отклик магнитосферы на поворот ММП или скачок давления очень сложно. Часто они работают вместе и генерируют СПВ, как в рассмотренном случае.

4. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ данных выявляет не только качественное сходство, но и некоторые различия в зарождении, развитии и затухании рассмотренных магнитосферных возмущений, вызванных разными энергетическими источниками — пересоединением силовых линий ММП и магнитосферы в первой суббуре и взаимодействием магнитосферы с диамагнитной структурой в СПВ. Главные различия в динамике двух рассмотренных геомагнитных возмущений заключаются в следующем.

1. Классическая суббура (рис. 5, интервал II) произошла после длительного существования южной ориентации B_z ММП, началась спонтанно, без видимых резких изменений в СВ и ММП. Максимальная интенсивность суббуры составила $AE=1350$ нТл. Картина развития полярных сияний, по наблюдениям со спутника Polar, и аврорального поглощения, по данным меридиональной сети риометров, соответствует динамике развития авроральной суббуры [Акасофу, 1971]. Суббура от фазы зарождения до восстановления продолжалась ~2 ч.

2. В интервале III (рис. 5) наблюдалось магнитосферное возмущение, источником которого была ДС СВ и которое произошло после длительного существования (~5 ч) ММП с северной вертикальной компонентой. Максимальная интенсивность возмущения $AE=1262$ нТл сравнима с величиной AE -индекса классической суббуры. По характеру вариаций геомагнитного поля во внешней зоне квазизахвата (дипо-

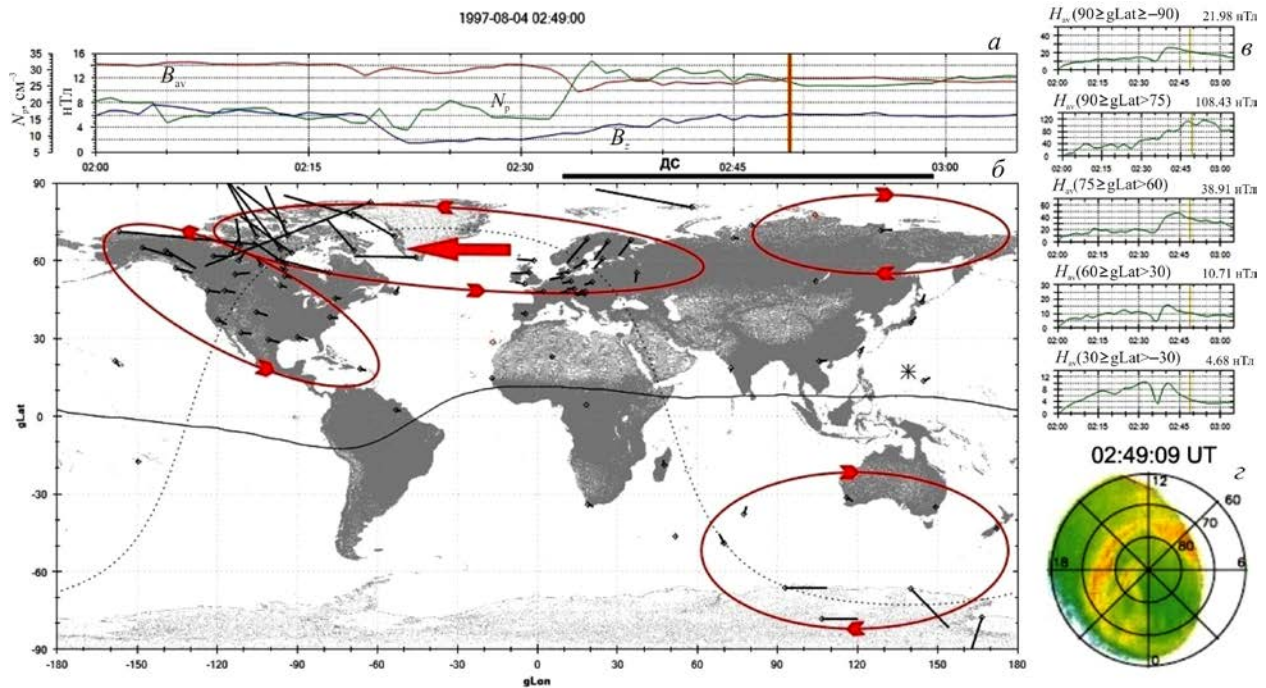


Рис. 12. То же, что и на рис. 11, для СПВ 04.08.1997. Карта векторов эквивалентных ионосферных токов приведена для 18:20 UT (б)

лизация), динамике аврорального поглощения, ионосферных токовых систем и дрейфу источника иррегулярных геомагнитных пульсаций на полуденном меридиане можно отнести наблюдаемое возмущение к типу суббури. Предположение о том, что возмущение содержит элементы, присущие суббурям, подтверждается данными, приведенными на рис. 8, б–в, 9, а, б, 10, которые показывают начало развития СПВ после взаимодействия ДС с магнитосферой (рис. 10) и появления на полуденной стороне однородной дуги свечения в UVI-диапазоне на широтах дневного каспа с последующим ее резким уярчением и движением фронтов свечения к западу и востоку от полуденного меридиана (рис. 8, б, в). Все возмущение длилось ~50 мин.

3. Исходя из динамики и времени развития СПВ можно выделить четыре фазы возмущения, подобные фазам классической суббури: подготовительную, взрывную, активную и восстановительную. Подготовительная фаза — время от начала взаимодействия ДС с магнитосферой до начала движения западного и восточного фронтов свечения (05:00–05:11 UT), брейкап (05:12–05:18 UT), активная фаза (05:18–05:32 UT), восстановительная (05:32–06:12 UT).

Авторы признательны Г.В. Руденко за расчет положений оснований открытых магнитных трубок корональной дыры и нейтральной линии глобального магнитного поля Солнца, Д.Г. Баишеву за консультации и полезные обсуждения.

Авторы выражают искреннюю благодарность NASA CDAWEB за предоставление данных спутников ACE, IMP-8, Wind, Geotail, Polar, GOES-8, GOES-10. Авторы благодарны Канадскому portalу данных космических исследований, J. Mann, D.K. Milling и членам команды CARISMA. Авторы благодарят

Kyoto World Data Center for Geomagnetism и сеть Intermagnet за возможность использования геомагнитных данных.

Работа была частично поддержана грантом РФФИ 16-02-00669 и грантом NSC103-2923-M-006-002-MY3/14-05-92002ННС Taiwan–RFBR.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акасофу С. Полярные и магнитосферные суббури. М.: Мир, 1971. 320 с.
- Бородкова Н.Л. Воздействие больших и резких изменений динамического давления солнечного ветра на магнитосферу Земли: анализ нескольких событий // Космические исследования. 2010. Т. 48, № 1. С. 43–57.
- Еселевич М.В., Еселевич В.Г. Фрактальная структура гелиосферного плазменного слоя на орбите Земли // Геомагнетизм и аэрномия. 2005. Т. 45, № 3. С. 347.
- Пархомов В.А., Рахматулин Р.А. Локализация и широтный дрейф источника P1B // Исслед. по геомагнетизму, аэрномии и физике Солнца. М.: Наука, 1975. Вып. 6. С. 132.
- 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. 449–453. DOI: [10.7868/S002342061505009X](https://doi.org/10.7868/S002342061505009X).
- 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. V. 188, N 2. P. 277.
- Eselevich M.V., Eselevich V.G., Fujiki K. Streamer belt and chains as the main sources of quasi-stationary slow solar wind // Solar Phys. 2007. V. 240. P. 135.
- Eselevich V.G., Fainshtein V.G., Rudenko G.V., et al. Forecasting the velocity of quasi-stationary solar wind and the intensity of geomagnetic disturbances produced by it // Cosmic Res. 2009. V. 47, N 2. P. 95.
- Huttunen K. E. J., Koskinen H.E.J., Pulkkinen T.I., et al. April 2000 magnetic storm: solar wind driver and magnetospheric response // J. Geophys. Res. 2002. V. 107, N A12. P. 1440. DOI: [10.1029/2001JA009154](https://doi.org/10.1029/2001JA009154).

Lin R.L., Zhang X.X., Liu S.Q., et al. A three-dimensional asymmetric magnetopause model // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. A04207. DOI: [10.1029/2009JA014235](https://doi.org/10.1029/2009JA014235).

Lui A.T.Y. Current controversies in magnetospheric physics // *Rev. Geophys.* 2001. V. 39. P. 535–564.

O'Brien T.P., McPherron R.L. Seasonal and diurnal variation of *Dst* dynamics // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107, N A11. DOI: [10.1029/2002JA009435](https://doi.org/10.1029/2002JA009435).

Parkhomov V.A., Borodkova N.L., Dmitriev A.V., et al. The role of solar wind pressure jumps in the initiation and control processes of magnetospheric substorms // *Geomagnetism and Aeronomy.* 2011. V. 51, N 7. P. 979–993. DOI: [10.1134/S0016793211070176](https://doi.org/10.1134/S0016793211070176).

Rouillard A.P., Sheeley N.R. Jr., Cooper T.J., et al. The solar origin of small interplanetary transients // *Astrophys. J.* 2011. V. 734, 10 p. DOI: [10.1088/0004-637X/734/1/7](https://doi.org/10.1088/0004-637X/734/1/7).

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. V. 23. P. 1033–1059.

Sergeev V., Nishimura Y., Kubyskhina M., et al. Magnetospheric location of the equatorward prebreakup arc // *J. Geophys. Res.* 2012. 117. A01212. DOI: [10.1029/2011JA017154](https://doi.org/10.1029/2011JA017154).

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

Tagirov V.R., Arinin V.A., Meng C.I., et al. Comparison of two substorm onsets on the basis of coordinated ground-satellite observations // *Fourth International Conference on Substorms (ICS-4)*. 1998. P. 339–342.

Torr M.R., Torr D.G., Zukic M., et al. A far ultraviolet imager for the International Solar-Terrestrial Physics Mission // *Space Sci. Rev.* 1995. V. 71, iss. 1–4. P. 329–383.

Wang Y.M., Sheeley N.R., Rich N.B. Coronal pseudo-streamers // *Astrophys. J.* 2007. V. 685. P. 1340.

Zhou X., Tsurutani B.T. Rapid intensification and propagation of the dayside aurora: large scale interplanetary pressure pulses (fast shocks) // *Geophys. Res. Lett.* 1999. V. 26, N 8. P. 1097–1100. DOI: [10.1029/1999GL900173](https://doi.org/10.1029/1999GL900173).

Zhou X., Tsurutani B.T. Interplanetary shock triggering of nightside geomagnetic activity: substorms, pseudobreakups and quiescent events // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106, N A9. P. 18,957–18,967. DOI: [10.1029/2000JA003028](https://doi.org/10.1029/2000JA003028).

Zhou X.-Y., Strangeway R.J., Anderson P.C., et al. Shock aurora: FAST and DMSP observations // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108, N A4. 8019. DOI: [10.1029/2002JA009701](https://doi.org/10.1029/2002JA009701).

Zhou X.-Y., Fukui K., Carlson H. C., et al. Shock aurora: ground-based imager observations // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. A12216. DOI: [10.1029/2009JA014186](https://doi.org/10.1029/2009JA014186).

Zhou X.-Y., Zhou X.-Z., Angelopoulos V., et al. Interplanetary shock-induced current sheet disturbances leading to auroral activations: THEMIS observations // *J. Geophys. Res.* 2013. V. 118. P. 3173–3187. DOI: [10.1002/jgra.50175](https://doi.org/10.1002/jgra.50175).

URL: <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/eval2.cgi> (дата обращения 26 апреля 2017 г.).

URL: <http://bdm.iszf.irk.ru> (дата обращения 26 апреля 2017 г.).

URL: http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list (дата обращения 26 апреля 2017 г.).

URL: <http://www.obsebre.es/en/rapid> (дата обращения 26 апреля 2017 г.).

URL: http://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp_public (дата обращения 26 апреля 2017 г.).

URL: <http://aurora.phys.ucalgary.ca/cgi-bin/rio> (дата обращения 26 апреля 2017 г.).

REFERENCES

Akasofu S.I. Polar and Magnetospheric Substorms. Moscow, Mir, 1971, 320 p. (In Russian). English edition: Akasofu S.I. Polar and Magnetospheric Substorms. New York, Springer-Verlag, 1968, 280 p.

Borodkova N.L. Effect of large and sharp changes of solar wind dynamic pressure on the Earth's magnetosphere: analysis of several events. *Cosmic Research.* 2010, vol. 48, no. 1, pp. 41–55. DOI: [10.1134/S001095251001003X](https://doi.org/10.1134/S001095251001003X).

Eselevich V.G., Eselevich M.V. Fractal structure of the heliospheric plasma layer on the Earth's orbit. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2005, vol. 45, no. 3, p. 347. (In Russian).

Eselevich M.V., Eselevich V.G., Fujiki K. Streamer belt and chains as the main sources of quasi-stationary slow solar wind. *Solar Phys.* 2007, vol. 240, p. 135.

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, no. 2, p. 277.

Eselevich V.G., Fainshtein V.G., Rudenko G.V., Eselevich M.V., Kashapova L.K. Forecasting the velocity of quasi-stationary solar wind and the intensity of geomagnetic disturbances produced by it. *Cosmic Res.* 2009, vol. 47, no. 2, pp. 95–113.

Huttunen K.E.J., Koskinen H.E.J., Pulkkinen T.I., Pulkkinen A., Palmroth M., Reeves E.G.D., Singer H.J. April 2000 magnetic storm: Solar wind driver and magnetospheric response. *J. Geophys. Res.* 2002, vol. 107, no. A12, 1440. DOI: [10.1029/2001JA009154](https://doi.org/10.1029/2001JA009154).

Lin R.L., Zhang X.X., Liu S.Q., Wang Y.L., Gong J.C. A three-dimensional asymmetric magnetopause model. *J. Geophys. Res.* 2010, vol. 115, A04207. DOI: [10.1029/2009JA014235](https://doi.org/10.1029/2009JA014235).

Lui A.T.Y. Current controversies in magnetospheric physics. *Rev. Geophys.* 2001, vol. 39, pp. 535–564.

O'Brien T.P., McPherron R.L. Seasonal and diurnal variation of *Dst* dynamics. *J. Geophys. Res.* 2002, vol. 107, no. A11. DOI: [10.1029/2002JA009435](https://doi.org/10.1029/2002JA009435).

Parkhomov V.A., Rakhmatulin R.A. Localization and latitudinal drift of the source P11B. *Issledovaniya po geomagnetizmu, aeronomii i fizike Solntsa* [Research on Geomagnetism, Aeronomy, and Solar Physics]. Moscow, Nauka Publ., 1975, iss. 6, p. 132. (In Russian).

Parkhomov V.A., Borodkova N.L., Dmitriev A.V., Klimov P.M., Rakhmatulin R.A. The role of solar wind pressure jumps in the initiation and control processes of magnetospheric substorms. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2011, vol. 51, no. 7, pp. 979–993. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0016793211070176>.

Parkhomov V.A., Borodkova N.L., Eselevich V.G., Eselevich M.V. Abrupt changes of density in sporadic solar wind and their effect on Earth magnetosphere. *Cosmic Research.* 2015, vol. 53, no. 6, pp. 411–422. DOI: [10.1134/S0010952515050093](https://doi.org/10.1134/S0010952515050093).

Rouillard A.P., Sheeley N.R. Jr., Cooper T.J., Davies J.A., Lavraud B., Kilpua E.K.J., Skoug R.M., Steinberg J.T., Szabo A., Opitz A., Sauvaud J.-A. The solar origin of small interplanetary transients. *Astrophys. J.* 2011, vol. 734, 10 p. DOI: [10.1088/0004-637X/734/1/7](https://doi.org/10.1088/0004-637X/734/1/7).

Schwenn R., Dal Lago A., Huttunen E., Gonzalez W.D. The association of coronal mass ejections with their effects near the Earth. *Annales Geophysicae.* 2005, vol. 23, pp. 1033–1059.

Sergeev V., Nishimura Y., Kubyskhina M., Angelopoulos V., Nakamura R., Singer H. Magnetospheric location of the equatorward prebreakup arc. *J. Geophys. Res.* 2012, vol. 117, A01212. DOI: [10.1029/2011JA017154](https://doi.org/10.1029/2011JA017154).

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

Tagirov V.R., Arinin V.A., Meng C.I., Sibeck D.G., Lui A.T.Y., Liou K., Ivanov A.G., Frank L.A., Morgan D., Parks G. Comparison of two substorm onsets on the basis of coordinated ground-satellite observations. *Fourth International Conference on Substorms (ICS-4)*. 1998, pp. 339–342.

Torr M.R., Torr D.G., Zukic M., Johnson R.B., Ajello J., Banks P., Clark K., Cole K., Keffer C., Parks G., Tsurutani B., Spann J. A far ultraviolet imager for the International Solar-Terrestrial Physics Mission. *Space Sci. Rev.* 1995, vol. 71, iss. 1–4, pp. 329–383.

В.А. Пархомов, Н.Л. Бородкова, В.Г. Еселевич, М.В. Еселевич,
А.В. Дмитриев, В.Э. Чиликин

Wang Y.M., Sheeley N.R., Rich N.B. Coronal pseudo-streamers. *Astrophys. J.* 2007, vol. 685, p. 1340.

Zhou X., Tsurutani B.T. Rapid intensification and propagation of the dayside aurora: large scale interplanetary pressure pulses (fast shocks). *Geophys. Res. Lett.* 1999, vol. 26, no. 8, pp. 1097–1100. DOI: 10.1029/1999GL900173.

Zhou X., Tsurutani B.T. Interplanetary shock triggering of nightside geomagnetic activity: substorms, pseudobreakups and quiescent events. *J. Geophys. Res.* 2001, vol. 106, no. A9, pp. 18,957–18,967. DOI: 10.1029/2000JA003028.

Zhou X.-Y., Strangeway R.J., Anderson P.C., Sibeck D.G., Tsurutani B.T., Haerendel G., Frey H.U., Arballo J.K. Shock aurora: FAST and DMSP observations. *J. Geophys. Res.* 2003, vol. 108, no. A4, p. 8019. DOI: 10.1029/2002JA009701.

Zhou X.-Y., Fukui K., Carlson H.C., Moen J.I., Strangeway R.J. Shock aurora: ground-based imager observations. *J. Geophys. Res.* 2009, vol. 114, A12216. DOI: 10.1029/2009JA014186.

Zhou X.-Y., Zhou X.-Z., Angelopoulos V., Shi Q., Wang C.-P., Frey H. Interplanetary shock-induced current sheet disturbances leading to auroral activations: THEMIS observations. *J. Geophys. Res.* 2013, vol. 118, p. 3173. DOI: 10.1002/jgra.50175.

V.A. Parkhomov, N.L. Borodkova, V.G. Eselevich, M.V. Eselevich,
A.V. Dmitriev, V.E. Chilikin

URL: <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/eval2.cgi> (accessed April 26, 2017).

URL: <http://bdm.iszf.irk.ru> (accessed April 26, 2017).

URL: http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list (accessed April 26, 2017).

URL: <http://www.obsebre.es/en/rapid> (accessed April 26, 2017).

URL: http://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp_public (accessed April 26, 2017).

URL: <http://aurora.phys.ucalgary.ca/cgi-bin/rio> (accessed April 26, 2017).

Как цитировать эту статью

Пархомов В.А., Бородкова Н.Л., Еселевич В.Г., Еселевич М.В., Дмитриев А.В., Чиликин В.Э. Особенности воздействия диамагнитной структуры солнечного ветра на магнитосферу Земли. *Солнечно-земная физика*. 2017. Т. 3, № 4. С. 47–62. DOI: 10.12737/szf-34201705.