

DOI: 10.51981/2588-0039.2022.45.009

ГЕОЭФФЕКТИВНОСТЬ ДИАМАГНИТНЫХ СТРУКТУР ЭРУПТИВНОГО ПРОТУБЕРАНЦА

В.А. Пархомов¹, В.Г. Еселевич², М.В. Еселевич², Б. Цэгмэд³

¹Байкальский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация

²Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук,
г. Иркутск, Российская Федерация

³Институт астрономии и геофизики АН Монголии

Аннотация. Рассмотрена цепочка явлений от Солнца до Земли, позволяющая исследовать механизм геоэффективности эруптивных протуберанцев, которые распространяются от Солнца внутри корональных выбросов массы. Эруптивный протуберанец, выброшенный в солнечный ветер, движется с его скоростью к Земле в виде диамагнитной структуры эруптивного протуберанца (ДСЭП). Главной особенностью ДСЭП является большой резкий скачок концентрации плазмы N внутри него при одновременном резком уменьшении модуля ММП B . Именно, вследствие антикорреляции профилей N и B внутри ДСЭП его контакт с магнитосферой может приводить не только к сжатию магнитосферы, но и к прохождению вещества ДСЭП внутрь магнитосферы. Продолжительность магнитосферного возмущения в виде полярных сияний на дневной стороне, глобального усиления токовых систем, возрастания потоков заряженных частиц в радиационных поясах и генерации нерегулярных пульсаций типа Pi2-3 определяется размером ДСЭП. Приведены статистические исследования ДСЭП, наблюдаемых в разные годы солнечной активности. Построена качественная модель геоэффективности ДСЭП.

Ключевые слова: эруптивный протуберанец, диамагнитная структура эруптивного протуберанца, пилообразная суббуря, двойной овал полярных сияний, геомагнитные пульсации Pi2-3.

Введение

Понятие геоэффективности диамагнитных структур (ДС) медленного солнечного ветра (СВ), определяемых по отрицательному коэффициенту корреляции между большими скачками концентрации СВ и модуля межпланетного магнитного поля (ММП) и переносимых от Солнца до орбиты Земли потоками медленного солнечного ветра (СВ) было обобщено в статье [1]. Наиболее мощные геомагнитные возмущения связаны со спорадическим СВ. На орбите Земли спорадический СВ, источником которого на Солнце являются КВМ, регистрируется в виде последовательности ударной волны (Shock), ударно-нагретой плазмы (Sheath – область сжатия перед КВМ) и межпланетного коронального выброса массы (КВМ). Согласно [2], он может быть либо в виде магнитного облака (МО), либо в виде выброса (ejecta). Именно внутри МО и ejecta регистрируется эруптивный протуберанец (ЭП), который характеризуется резким и большим скачком концентрации плазмы N при одновременном резком уменьшении модуля ММП. По этому параметру он является ярко выраженной ДС спорадического СВ [3]. Далее такую структуру будем называть диамагнитной структурой эруптивного протуберанца (ДСЭП), подчеркивая ее источник. Мы исследовали 15 спорадических потоков СВ, в которых удалось однозначно установить наличие ДСЭП.

Целью данной работы является детальное исследование природы и характера возмущения магнитосферы, которые способны вызывать ДСЭП на примере структуры 02.07.1999 для которой удалось собрать наиболее полный пакет данных.

Данные и методы анализа

Динамика вариаций концентрации плазмы N потока СВ и модуля ММП B внутри ДСЭП исследовалась по измерениям в точках либрации на орбитах космических аппаратов (КА) ACE, WIND и вблизи Земли на спутниках Geotail, IMP-8 и ИНТЕРБОЛ-1, а также на спутниках POLAR,

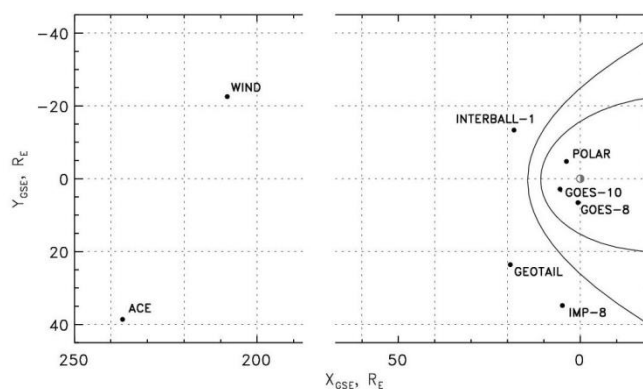


Рисунок 1. Схема расположения спутников внутри и вне магнитосферы 02.07.1999 г.

GOES-8, GOES-10, расположенных внутри магнитосферы. Положение спутников показано на рис. 1.

Использованы данные наземных геомагнитных наблюдений на мировой сети станций INTERMAGNET, меридиональной цепочке магнитометров CPMN (210 меридиан) [4], сети CARISMA, а также данные наблюдений индукционных магнитометров обсерваторий Борок (BOR) и Монды (MND).

Определение и анализ ДСЭП 02.07.1999 г. на орбите Земли

Прежде чем определять источник ЭП на Солнце и анализировать результаты регистрации ДСЭП различными КА, напомним характерные свойства ЭП внутри КВМ в короне Солнца в плоскости эклиптики, перечисленные в [5, 6, 7].

1. Эруптивный протуберанец представляет собой петлю с неоднородными границами и располагается внутри магнитной полости КВМ, которой соответствует МО на 1 а. е.

2. Толщина петли волокна ΔL_p вдоль радиуса R (в направлении оси X движения КВМ) много меньше аналогичного размера $\Delta L_{КВМ}$ для КВМ.

3. Толщина петли волокна в направлении Z , перпендикулярном плоскости эклиптики, сравнима с ΔL_p .

4. При движении до орбиты Земли угловые размеры КВМ и эруптивного волокна примерно сохраняются.

Результаты сравнения наблюдений эруптивного волокна при его движении от орбиты либрации до расстояния $\sim 4R_E$ показаны на рис. 2.

Вертикальными штриховыми линиями на рис. 2 отмечены моменты времени пересечения передней и задней границ волокна, Δt – интервал времени прохождения волокна через спутник. Видно, что обе границы по времени регистрации существенно меньше длительности Δt прохождения волокна через спутник. При этом наблюдается антикорреляция вариаций N и B на всех спутниках в СВ и на спутнике Polar внутри магнитосферы на дневной стороне на расстоянии $\sim 4R_E$. Именно этот факт позволяет нам впервые интерпретировать ЭП (волокно) в солнечном ветре как ДСЭП и показать прохождение этой структуры внутрь магнитосферы.

В статье [8] было показано, что источником рассматриваемого спорадического СВ является КВМ типа гало, который сопровождался вспышкой с координатами N18E07 и рентгеновским баллом M3.3. Время начала вспышки 29.06.1999, $t_0 \approx 07:31$ UT.

Отклик в магнитосферных токовых системах

Особенности отклика рассмотрим в двух частотных диапазонах – низкочастотном в токовых системах, определяемых вариациями кольцевого тока (индексами геомагнитной активности SYMH), вариациями авроральных токовых струй (индексы SML, SMU), и высокочастотном, определяемом динамикой нерегулярных геомагнитных пульсаций типа Pi 2-3 ($T = 180 \div 320$ с).

На рис. 3а показаны параметры N , B , B_y , B_z ДСЭП по данным OMNI, магнитосферный отклик в вариациях геомагнитного поля на низкоширотных магнитных обсерваториях, в индексах геомагнитной активности SML, SMU, SYM-H. Магнитосферный отклик можно разделить на четыре стадии. Стадия 1-2 – соответствует началу взаимодействия, связанного с небольшим возрастанием концентрации плазмы; 2-3 – фаза DCF, резкое возрастание токов на магнитопаузе, вызванное сжатием магнитосферы скачком концентрации СВ от 2.8 до 10 см^{-3} .

Компоненты ММП B_x и B_y в плоскости эклиптики скачком меняют направление на противоположное в момент начала DCF фазы, а B_z компонента плавно меняет направление с южного на северное. Вероятно, в рассматриваемом событии геоэффективными оказались компоненты ММП в горизонтальной плоскости.

На рис. 3б добавлены: SYM-H на утренней обсерватории MBO и данные спутников Polar (модуль B), GOES-10, GOES-8 (H_p -компоненты) в зависимости от их расположения по местному времени. Все спутники, данные

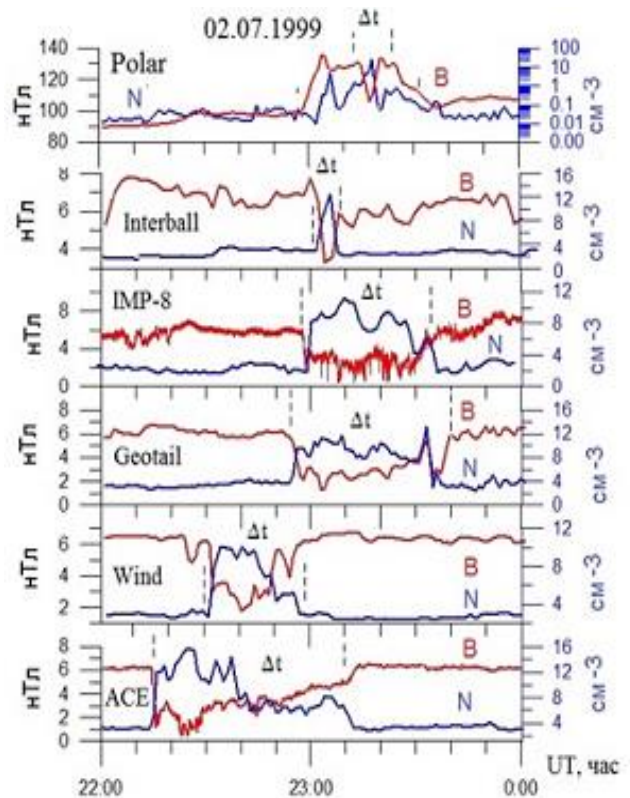


Рисунок 2. Вариации концентрации плазмы N (синие кривые) и модуля ММП B (красные кривые), в области ДСЭП 02.07.1999, зарегистрированные на различных КА. Снизу вверх: ACE, WIND, GEOTAIL, IMP-8, INTERBALL-1, POLAR; Δt – интервал времени прохождения волокна через спутник, две временные границы которого показаны вертикальными штриховыми линиями.

которых показаны на рис. 3б, находятся на дневной стороне: Polar – ~9 h, GOES-10 – ~13 h, GOES-8 – ~17 h MLT. На GOES-10 регистрируется резкий скачок H_p -компоненты геомагнитного поля на ~50 нТл; на GOES-8 на вечерней стороне – 40 нТл. Модуль геомагнитного поля на спутнике Polar в предполуденном секторе возрос скачком на ~60 нТл. Индекс восточной авроральной электроструи SMU скачком возрастает от ~250 до 400 нТл. Возрастания геомагнитного поля по длительности примерно равны времени прохождения переднего фронта ДСЭП через спутники.

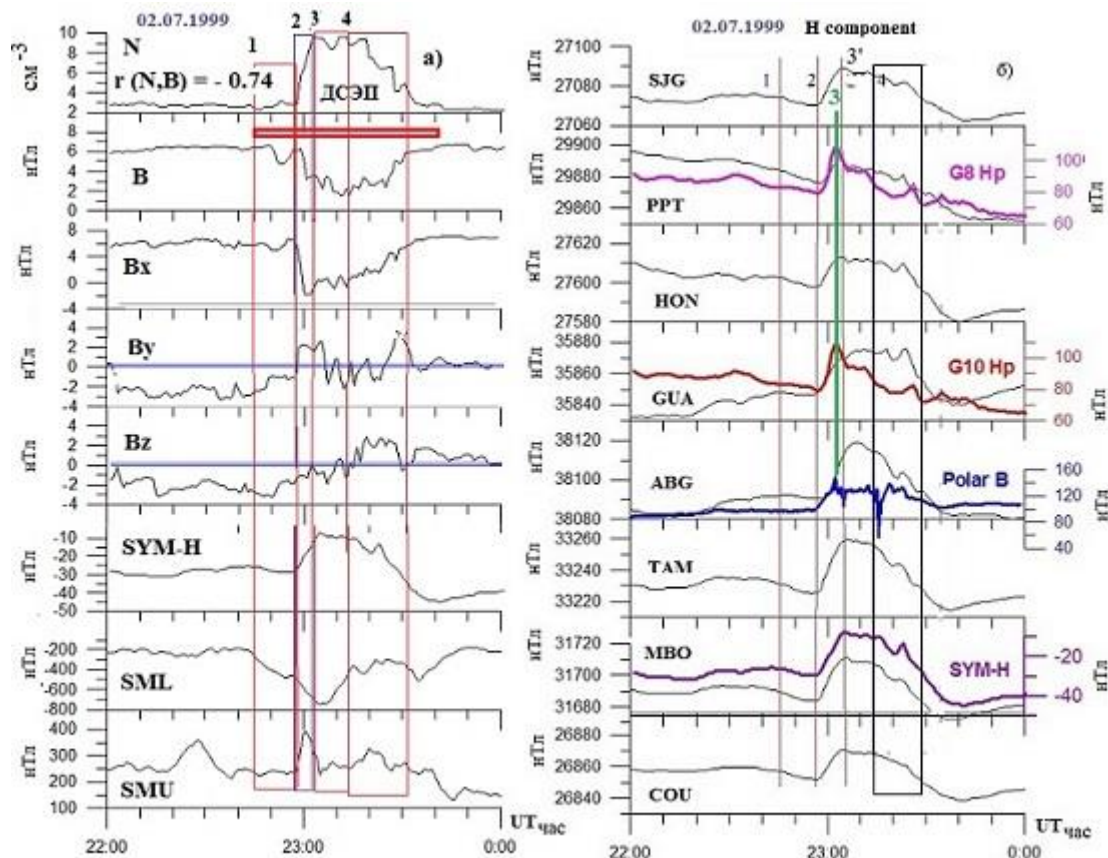


Рисунок 3. Глобальный магнитосферный отклик на приход к Земле ДСЭП 02.07.1999:

а – (сверху вниз) концентрация СВ N и модуль ММП B по наблюдениям с разрешением 3 с на спутнике Wind, индекс кольцевого тока $SYM-H$, индекс западной авроральной электроструи SML , индекс восточного тока SMU . 1 – начало контакта с ДСЭП, 2 – начало взаимодействия ДСЭП с магнитопаузой (начало DCF фазы), 3 – окончание DCF фазы на низкоширотных обсерваториях и стабилизация величины DR (кольцевого тока), 4 – генерация Pi2-3 колебаний.

б – копии фрагментов магнитограмм низкоширотных обсерваторий в зависимости от местного времени. 1 – начало контакта с ДСЭП, 2 – начало взаимодействия ДСЭП с магнитопаузой (начало DCF фазы), 3 – окончание DCF фазы на спутниках, 3' – окончание DCF фазы на низкоширотных обсерваториях и стабилизация величины DR (кольцевого тока), 4 – генерация Pi2-3 колебаний.

На Земле в ~22:47 UT резко усиливается планетарная магнитная активность. Контакт ДСЭП с магнитосферой вызывает резкое возрастание глобальной магнитной активности, которое определяется синхронным возрастанием индексов авроральной магнитной активности SML на ~600 нТл и SMU на 250 нТл и усиление кольцевого тока (индекс $SYM-H$ возрос на ~20 нТл). Эти эффекты воздействия ДСЭП на магнитосферу можно понять, используя механизм, рассмотренный в [9]. Суть механизма заключается в том, что развитие геомагнитной бури контролируется, как межпланетным магнитным полем, так и кинетическим давлением солнечного ветра, которые создают условия для поступления плазмы во внутреннюю магнитосферу. В нашем случае усиление кольцевого тока происходит на фазе восстановления бури, а не в целом для развития бури, как в цитируемой статье.

Информацию о поступлении энергии внутрь магнитосферы можно также получить из анализа вариаций потоков заряженных частиц (электронов) и модуля магнитного поля на спутнике Polar, показанное на рис. 4а. В указанный краткий интервал, N_e и B изменяются в противофазе. Для доказательства антикорреляции и

учитывая большую разницу в частоте дискретизации измеряемых параметров, на рисунке приведены фрагменты файлов регистрации этих параметров. Экстремальные значения Ne и B регистрируются примерно в одно время 23.16:29 UT и 23.16:20 UT соответственно. Факт совершенной антикорреляции между концентрацией заряженных частиц и резкого уменьшения модуля геомагнитного поля, который достигает величины ~ 57 нТл, что существенно ниже значения дипольного геомагнитного поля на оболочке $L \sim 4$. Одновременно со скачками Ne, B происходит резкое усиление спектральной мощности потока высыпающихся ионов в диапазоне энергий 0.275 эВ – 320 кэВ (рис. 4б). Это позволяет сделать заключение о том, что на спутнике Polar регистрируется диамагнитная структура, проникшая глубоко в магнитосферу (до 4 Re), т.е. часть энергии ДСЭП проходит не только в магнитослой, но и внутрь магнитосферы, что видно на рис. 4а,б (обозначено прямоугольником 1), что соответствует максимуму стадии 4 на рис. 3а,б.

Приведённый результат совпадает с полученными ранее нами [3] и другими авторами [10] данными об импульсном прохождении энергии СВ внутрь магнитосферы, а также теоретическими и модельными расчётами [11,12].

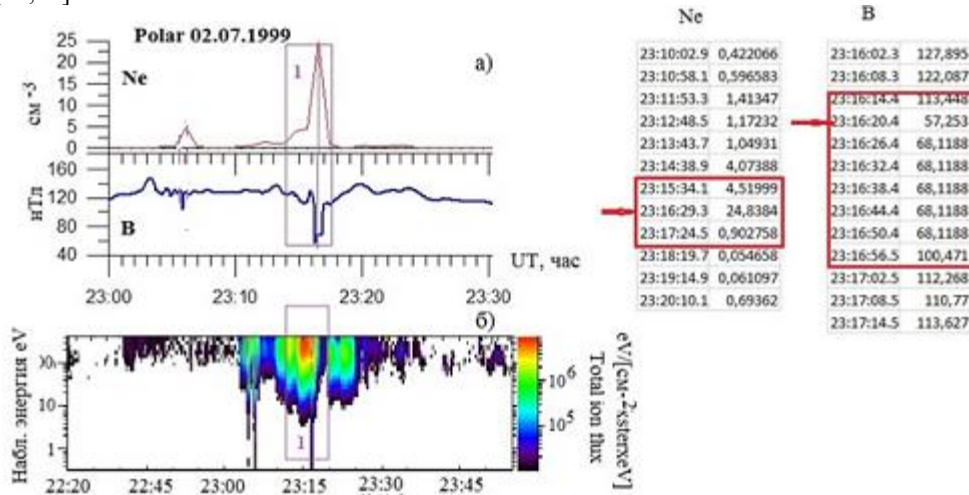


Рисунок 4. а – поток электронов Ne и модуль геомагнитного поля B на спутнике Polar в утреннем секторе магнитосферы; б – спектрограмма потока ионов на спутнике Polar. Прямоугольником 1 обозначен интервал, соответствующий прохождению части ДСЭП в магнитосферу. Ne, B – фрагмент файлов спутниковых измерений величин.

Отклик в динамике нерегулярных геомагнитных пульсаций типа Pi 2-3 ($T = 180 \div 320$ с)

В статьях [3, 10] обнаружено возбуждение иррегулярных геомагнитных пульсаций типа Pi2-3 при импульсном прохождении энергии диамагнитной структуры СВ внутрь магнитосферы. Прежде всего отметим, что воздействие на магнитосферу резких неоднородностей (межпланетных ударных волн, скачков давления и разрывов) приводит к возбуждению всплесков широкополосных УНЧ излучений типа Psc 1-6 в диапазоне периодов $1 \div 600$ с [13]. Глобальность магнитосферного отклика на контакт с ДСЭП и возбуждения цуга геомагнитных пульсаций хорошо видна на магнитограммах обсерваторий меридиональной цепочки от авроральной зоны до экватора (меридиан 210°), в том числе и для сопряженной обсерватории южного полушария Mascuaie Island (MCQ) [4] (рис. 5). Местное время станций меридиана 09–10 MLT. Для сравнения приведены данные и полуденной обсерватории Waigow. Для всех обсерваторий, особенно среднеширотных, видно одновременное бухтообразное возмущение с наложением цуга геомагнитных пульсаций Pi2-Pi3. Поэтому учитывая ширину полосы периодов, далее будем называть такой цуг Pi2-3 колебаниями. Для рассматриваемого события период колебаний не зависит от долготы пункта наблюдения, что указывает на общность источника колебаний. Таким источником могут быть МГД волны, которые генерируются при резких изменениях магнитного поля вследствие прохождения сгустков плазмы (джетов) через плазму магнитослоя. Такие волны с задержкой в 140 секунд наблюдались внутри магнитосферы [10].

Отклик в полярных сияниях на контакт с ДСЭП

Последовательность развития полярных сияний, отражающих взаимодействие ДСЭП с магнитосферой и регистрируемых инструментом UVI на спутнике Polar [14], показана на рис. 6а. На первом кадре в 22:19:49 UT активность в сияниях не определяется. На следующем кадре в 22:29:21 в утреннем секторе 08–05 LT на широте $\sim 63^\circ$ N появляется спокойная дуга, вытянутая вдоль параллели. В 22:38:23 UT возникает трансполярная полоса сияний (сердц поперек полярной шапки), которая существует до 22:52:47 UT. В 22:58:28 видно усиление активности с вечерней стороны. На кадре в 22:38:23 свечение усиливается в вечерне-полуночном секторе. В 23:03:39 свечение охватывает весь овал полярных сияний в диапазоне широт $\sim 62^\circ$ –

74°, на широте ~70° появляется второй овал сияний. Такая форма сияний свойственна для sawtooth-суббурь. Максимальная интенсивность сияний наблюдается с 23:09:30 до 23:20:33. На кадре в 23:20:33 видно смещение области свечения к северу. Затем активность сияний затухает и сияния прекращаются после ~ 23:50, когда N СВ и B в ДСЭП возвращаются к невозмущенному уровню.

Анализ наблюдений полярных сияний, возникающих после контакта ДСЭП с магнитосферой, показывает кардинальное отличие развития авроральных форм от динамики сияний, сопровождающих на полярной стороне магнитосферы суббурю, причиной которой являются процессы в хвосте магнитосферы. В классической суббуре наблюдается регулярно наблюдаемая последовательность явлений. На начальном этапе в разрыве Харанга в околополуночные часы зарождается начальное уярчение, интенсивность которого резко возрастает в фазу взрыва и изгиб в полярных сияниях движется к западу [15]. В исследуемом событии свечение атмосферы начинается на дневной стороне, перемещаясь к западу и востоку от полудня. Аналогичная динамика полярных сияний была рассмотрена нами ранее для события 28.06.1999 [16]. Динамика сияний отличается также и от сияний типа “shock aurora” [17], которые начинаются на дневной стороне после контакта магнитосферы с межпланетными ударными волнами и свечение распространяется к востоку со скоростью ~6–11 км/с.

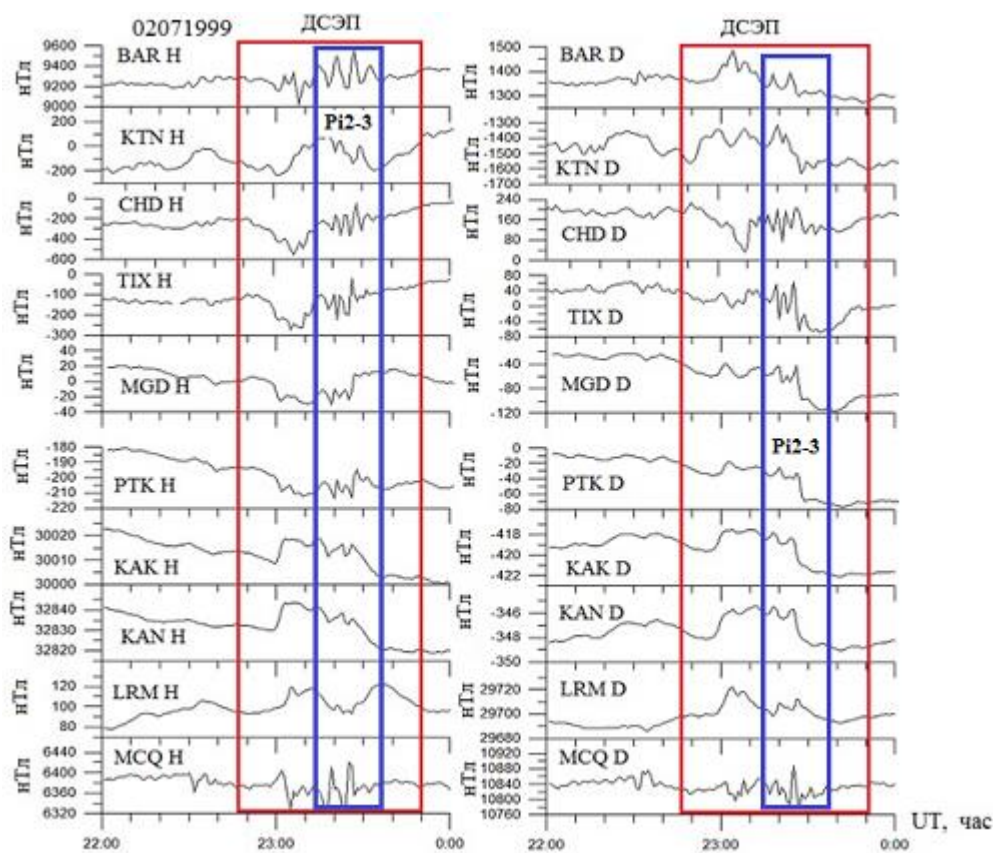


Рисунок 5. Фрагменты магнитограмм H - и D -компонент по данным обсерваторий меридиональной цепочки CPMN (меридиан 210°) [4]. Время наблюдения ДСЭП показано красным прямоугольником. Синий прямоугольник – интервал регистрации цуга Pi 2-3.

Обратим внимание на особенности свечения атмосферы на кадрах с 22:41:54 до 23:31:35 UT (рис. 6а), на которых видно появление второй полосы свечения к северу от основной полосы овала полярных сияний. Для ясности на панели б показан увеличенный кадр с деталями свечения атмосферы в UVI-диапазоне сияний в 23:18:38 UT. Стрелками 1 и 2 обозначены первая и вторая полосы. Подчеркнем, что такая форма сияний наблюдается во время saw-tooth суббурь [18]. Другая особенность, свойственная saw-tooth суббурям, – инжекция высокоэнергичных частиц на геостационарной орбите.

Согласно описанию динамики развития saw-tooth суббурь [19], наблюдается строгое соответствие между вариациями магнитной активности в полярной шапке и развитием магнитных возмущений в авроральной зоне. В случае взаимодействия ДСЭП с магнитосферой также видно такое взаимодействие, которое проявляется синхронностью вариаций индекса AE , определяющего силу ионосферного тока в авроральной зоне и индекса PCN , определяющего силу ионосферных токов в полярной шапке. Коэффициенты корреляции между PCN и AE , AL соответственно равны 0.78 и -0.65.

Таким образом, в результате взаимодействия ДСЭП с магнитосферой наблюдаются следующие явления.

1. Глобальный отклик в ионосферных токах полярной шапки, авроральной зоны и кольцевого тока.
2. Усиление полярных сияний, которое начинается на полуденной стороне, а свечение распространяется на вечернюю и утреннюю стороны. В максимуме активности возникают структуры в виде двойного аврорального овала.
3. На орбите спутника Polar внутри магнитосферы резко возрастают потоки электронов и ионов в противофазе с изменениями модуля геомагнитного поля подобно противофазности вариаций концентрации протонов и модуля ММП в ДСЭП в солнечном ветре.
4. Вариации ионосферных токов в полярной шапке синхронны с вариациями ионосферных токов в авроральной зоне ($r_{AE, PCN} = 0.78$).
5. Генерируется глобальный цуг колебаний P12-P13.

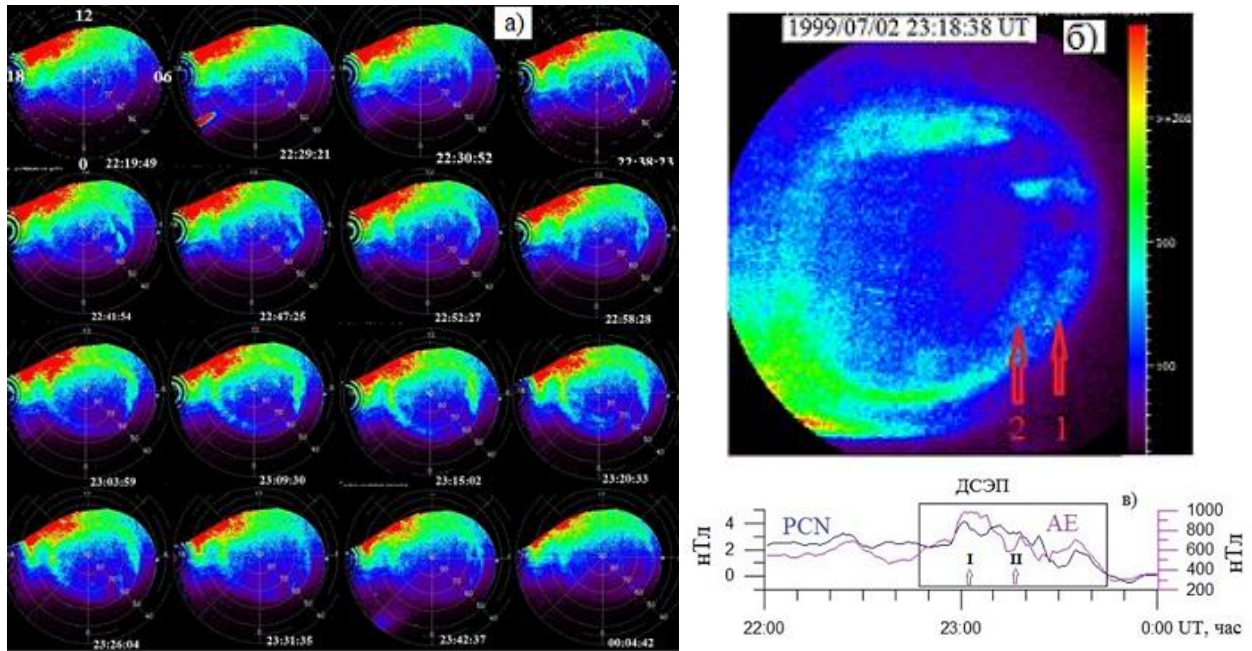


Рисунок 6. *a* – последовательность снимков сияний (спутник Polar, инструмент UVI), отражающих взаимодействие ДСЭП с магнитосферой и развитие сияний с дневной стороны; появление второго овала видно на кадрах с 23:09:30 до 23:31:35 UT; *б* – увеличенный кадр, стрелки 1, 2 отмечают овалы сияний; *в* – вариации индексов PCN и AE, стрелка I указывает начало появления второй полосы сияний, стрелка II – время снимка сияний.

Заключение

В заключение представим общую качественную модель распространения ДСЭП (Рис. 7). Структура зарождается как результат эрупции протуберанца (или волокна) при возникновении КВМ вблизи поверхности Солнца и затем распространяется в составе КВМ до орбиты Земли и далее. Воздействие волокна (ДСЭП) на магнитосферу приводит к сжатию последней и одновременно к прохождению части энергии ДСЭП внутрь магнитосферы. Энергия ДСЭП расходуется на ускорение частиц в радиационных поясах, высыпание электронов в атмосферу и генерацию полярных сияний, а также на повышение ионизации ионосферы, усиление кольцевого тока, аврорального электроджета и генерацию УНЧ-излучений в виде геомагнитных пульсаций P12-P13 с амплитудой сравнимой с амплитудой бухтообразного возмущения.

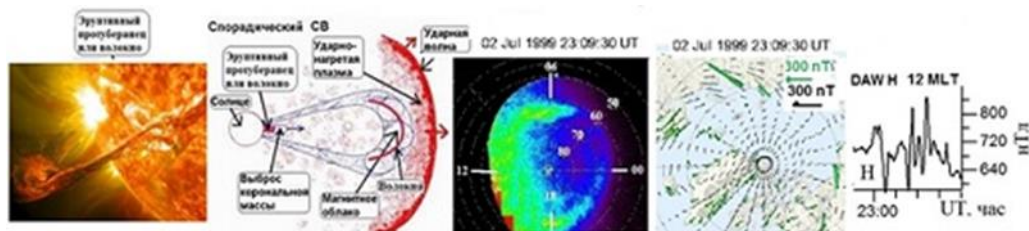


Рисунок 7. Качественная модель генерации и распространения ДСЭП

Список литературы

1. Пархомов В.А., Еселевич В.Г., Еселевич М.В., Дмитриев А.В., Ведерникова Т.И. Диамагнитные плазмиды, как составная часть диамагнитных структур “медленного” солнечного ветра, и их воздействие на магнитосферу Земли. *Солнечно-земная физика*. 2019. Т. 5. № 4. С. 42–54. DOI: 10.12737/szf-54201905
2. 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.
3. Пархомов В.А., Еселевич В.Г., Еселевич М.В., Дмитриев А.В., Суворова А.В., Хомутов С.Ю., Цэгмэд Б., Торо Райта. 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
4. Yumoto K. and the MAGDAS Group. MAGDAS project and its application for space weather ILWS WORKSHOP – 2006. GOA, February 19–24, 2006. P. 1–7.
5. Burlaga L. Microscale structure in the interplanetary medium. *Solar Phys.* 1968. No. 4. P. 67.
6. Burlaga L., Sitteler E., Mariani F., Schwenn R. Magnetic loop behind an interplanetary shock: Voyager, Helios and IMP-8 observations. *J. Geophys. Res.* 1981. V. 86, No. 8. P. 6673.
7. Пархомов В.А., Бородкова Н.Л., Еселевич В.Г., Еселевич М.В., Застенкер Г.Н. Резкие изменения концентрации в спорадическом солнечном ветре и их воздействие на магнитосферу Земли. *Космические исследования*. 2015. Т. 53. № 5. С. 1–12. DOI: 10.7868/S002342061505009X
8. Пархомов В.А., Еселевич В.Г., Еселевич М.В., Цэгмэд Б. Геоэффективность эруптивного протуберанца. *System Analysis & Mathematical Modeling*. 2022. №4 (в печати).
9. Калегаев В.В., Власова Н.А., Пенг Ж. Динамика магнитосферы во время геомагнитных бурь. *Космические исследования*. 2015. Т. 53. № 2. С. 105–117.
10. Katsavriasi C., Rapits S., Daglis L.A., Karlsson T., Georgiou N., Balasis G. On the generation of Pi2 pulsations due to plasma flow patterns around magnetosheath jets. *Geophys. Res. Lett.* 2021. V. 48. e2021GL093611. DOI: 10.1029/2021GL093611
11. Lemaire J. Plasmoid motion across a tangential discontinuity (with application to the magnetopause). *J. Plasma Phys.* 1985. Vol. 33. No. 3. P. 425–436.
12. Echim M.M., Lemaire J.F. Laboratory and numerical simulations of the impulsive penetration mechanism. *Space Sci. Rev.* 2000. Vol. 92. P. 56–61.
13. Нишида А. Геомагнитный диагноз магнитосферы. М.: Мир, 1980. 300 с.
14. Torr M.R., Torr D.G., Zukic M., Johnson R.B., Ajello J., Banks P., et al. A far ultraviolet imager for the international solar-terrestrial physics mission. *Space Sci. Rev.* 1995. V. 71. P. 329–383.
15. Kepko L., McPherron R.L., Amm O., Apatenkov S., Baumjohann W., Birn J., Lester M., Nakamura R., Pulkkinen T.I., Sergeev V. Substorm current wedge revisited. *Space Sci. Rev.* 2015. V. 190. P. 1–46. DOI: 10.1007/s11214-014-0124-9
16. 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-3420170544
17. Zhou X.-Y., Tsurutani B.T. Rapid intensification and propagation of the dayside aurora: Large-scale interplanetary pressure pulses (fast shocks). *Geophys. Res. Lett.* 1999. V. 26. Iss. 8. P. 1097–1100. DOI: 10.1029/1999GL900173
18. Troshichev O., Stauning P., Liou K., Reeves G. Saw-tooth substorms: inconsistency of repetitive bay-like magnetic disturbances with behavior of aurora. *Adv. Space Res.* 2011. V. 47. P. 702–709. DOI: 10.1016/j.asr.2010.09.026
19. Troshichev O.A., Janzhura A. *Space Weather Monitoring by Ground-Based Means: PC Index*. Springer-Verlag, 2012, 287 p. DOI: 10.1007/978-3-642-16803-1