

УДК 550.384

## ПОЛОЖЕНИЕ ИСТОЧНИКА ДНЕВНЫХ ВЫСОКОШИРОТНЫХ МАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ В МАГНИТОСФЕРЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВ DMSP

© 2025 г. В. В. Сафаргалеев\*

Санкт-Петербургский филиал института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (С-Пб ИЗМИРАН), Санкт-Петербург, Россия

\*e-mail: Vladimir.safargaleev@pgia.ru

Поступила в редакцию 21.03.2024 г.

После доработки 27.06.2024 г.

Принята к публикации 25.07.2024 г.

Дневные высокоширотные геофизические явления несут наземному наблюдателю информацию о процессах на дневной магнитопаузе и/или в примыкающих к ней магнитосферных доменах. Предполагается, что эти явления инициируются изменением параметров межпланетной среды и поэтому могут использоваться как инструмент для исследования способов проникновения энергии солнечного ветра через магнитопаузу. К таким явлениям относятся магнитные импульсы, представляющие собой изолированный пик затухающих колебаний из 2–3 всплесков с периодом следования 8–12 минут. По данным скандинавской сети магнитометров IMAGE исследовано восемь событий магнитных импульсов, для которых спутники DMSP пролетали над областью наблюдений во время, незадолго до и сразу после импульса, пересекая при этом границы нескольких доменов. По наземным данным и данным спутников DMSP показано, что ассоциируемый с импульсами втекающий продольный ток располагается вдали от магнитопаузы. Это означает, что импульс не может рассматриваться как ионосферный след пересоединившейся силовой трубки (*flux transfer event*, FTE) и/или как *travelling convection vortices*, TCV. На большей статистике установлено, что импульсу предшествуют заметные изменения  $B_y$ - и  $B_z$ -компонент ММП, в то время как вклад в генерацию магнитного импульса быстрого изменения давления и скорости солнечного ветра, а также  $B_x$ -компоненты ММП, не очевиден. Обсуждается возможный сценарий инициации магнитного импульса вариациями ММП.

**Ключевые слова:** магнитные импульсы, магнитосферные домены, эквивалентные ионосферные токи

**DOI:** 10.31857/S0016794025010072, **EDN:** ADXGUN

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Ключевым звеном формирования космической погоды является поступление энергии и вещества из солнечного ветра внутрь магнитосферы. Широко распространена точка зрения о том, что проникновение энергии и вещества происходит преимущественно через ту часть дневной магнитопаузы, которая подошвами формирующих ее силовых линий геомагнитного поля “опирается” на высокоширотную ионосферу в окрестности полуденного меридиана. Это делает мониторинг процессов в каспе и в примыкающих к магнитопаузе магнитосферных доменах — низкоширотном плазменном слое (*llbl*), пограничном плазменном слое (*bps*) и централь-

ном плазменном слое (*cps*) важным элементом исследования механизмов реализации солнечно-земных связей. Сопряженность этих областей с высокоширотной ионосферой позволяет исследовать процесс взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой через ряд дневных явлений, наблюдаемых с земной поверхности. Основываясь на данных спутников DMSP [Newell and Meng, 1992], можно утверждать, что в дневные часы и при разных уровнях геомагнитной активности под проекцией всех вышеупомянутых магнитосферных образований “проходят” магнитные станции сети IMAGE, расположенные на арх. Шпицберген, у его южного побережья и на Медвежьем острове.

Начиная с 80-х годов прошлого века, в качестве одного из таких наземных явлений рассматриваются магнитные импульсы (*magnetic impulse events*, MIEs). MIEs представляют собой изолированные затухающие всплескообразные возмущения магнитного поля, регистрируемые наземными магнитометрами на широте каспа (см., например, [Lanzerotti et al., 1986]). На начальном этапе исследований интерес к этому явлению был продиктован тем, что MIEs интерпретировались как наземный признак спорадического пересоединения на дневной магнитопаузе — так называемые события переноса потока, FTE ([Goertz et al., 1985], [Lanzerotti et al., 1986] и ссылки в них). Как альтернативу пересоединению, Sibeck [1992] предложил поверхностные волны на дневной магнитопаузе, генерируемые в результате воздействия на магнитосферу фронта медленной ударной волны, на котором плазменное давление быстро меняется (*sudden impulses*, SI).

В дневные часы в европейской части восточного полушария магнитопауза (граница между замкнутыми и разомкнутыми силовыми линиями) статистически проектируется в северную часть Шпицбергена [Newell and Meng, 1992], где нет густой сети наблюдений. Случаи, когда граница спускается настолько низко, что попадает, например, в поле зрения радара STARE над северным побережьем Норвегии [Goertz et al., 1985], являются экзотическими. Магнитные импульсы являются редкими, но не экзотическим явлением. Поэтому более приближенной к реальности представляется гипотеза Sibeck et al. [2003] о том, что магнитные импульсы отражают в ионосфере развитие неустойчивости Кельвина-Гельмгольца на границе обращения конвекции, которую считают внутренней границе *llbl*. Отметим, что работа Clauer et al. [1997], на которую ссылается Sibeck et al. [2003], была посвящена генерации пульсаций с периодом, близким к периоду следования всплесков в магнитном импульсе. Однако, на примере двух случаев Yahnin et al. [1997] показали, что связанный с MIEs продольный ток находится глубже в магнитосфере, чем внутренняя граница *llbl*, а именно, внутри центрального плазменного слоя, *cps*. Используя иную терминологию для обозначения областей высыпаний, Воробьев [2004] пришел к заключению, что распространяющиеся конвективные вихри (TCV), которые относят к категории “магнитные импульсы”, генерируются в приполюсной части диффузной авроральной зоны, то есть так же глубоко в магнитосфере. Вопрос, в каких магнитосферных доменах расположен источник MIEs, и сегодня остается дискуссионным.

Вероятность обнаружения магнитных импульсов имеет максимум в интервале 08–10 MLT (05–07 UT для высокоширотных станций сети IMAGE), и, как отмечалось в работе [Воробьев и др., 1993], их появление не связано с поворотом *Bz*-компоненты ММП к югу. В большинстве исследованных в этой работе случаев магнитные импульсы наблюдались также в средних и низких широтах, что, по мнению авторов, указывает деформацию дневной магнитосферы как причину генерации MIEs. К такому же заключению пришли в работе [Yahnin et al., 1995] на основе анализа серии из нескольких событий, наблюдавшихся в течение одного трехчасового интервала. Четыре случая, когда инициируемые SI явления TCV можно было связать с неустойчивостью Кельвина-Гельмгольца на внутренней границе *llbl* представлены в работе [Sibeck et al., 2003].

Один случай TCV, причиной которого был внезапный импульс, всесторонне исследован в недавней работе Kim et al. [2017]. Как отмечалось выше, TCV относят к категории магнитных импульсов. TCV и сопутствующие ему явления наблюдались большим количеством инструментов как на земной поверхности (магнитометр, радары, камера и сканирующий интерферометр полного обзора неба SCANDI), так и на спутниках (NOAA и DMSP). Было показано, что импульс сопровождается усилением высыпаний, увеличением температуры плазмы в ионосфере, всплеском магнитной активности в герцовом диапазоне. Авторам удалось также выделить его эффект в термосфере. Отмечается, что центр конвективного вихря располагался вблизи каспа. Однако интерпретация яркого пятна посреди других форм сияний как результат высыпаний из каспа представляется малообоснованным.

Интерпретация магнитных импульсов в рамках SI не согласуется с результатами работы Bering et al. [1990], согласно которым магнитные импульсы связаны с сильными изменениями направления ММП на фоне почти постоянного давления солнечного ветра. Согласно статистическим исследованиям Konik et al. [1994], 50–70% событий магнитных импульсов связано с вариациями *Vy*- и *Bz*-компонент ММП, в то время как лишь 15–30% событий следовали за изменением давления солнечного ветра.

Позже Moretto et al. [2004] отметили, что импульсы чаще появляются при высокоскоростном потоке солнечного ветра, но в целом генерация импульсов определяется широким диапазоном условий в межпланетной среде.

Известно, что в переходной области в результате набегания солнечного ветра на магнитопаузу

зу образуется магнитный барьер, в котором магнитное поле и концентрация (плазменное давление) взаимосвязаны. Вариации ММП порождают вариации плазменного давления, которые, подобно SC или SI, и воздействуют на магнитопаузу. В результате магнитопауза становится источником вторичных волн магнитозвукового типа. Такое качественное рассуждение подтверждается результатами численного моделирования [Lin et al., 1996]. Авторы предлагают рассматривать эти вторичные волны как причину высокоширотных магнитных импульсов. Аналогичное предположение было сделано в работе [Vorobjev et al., 1999].

Пик исследований MIEs приходится на конец 20 – начало 21 столетий. Однако вопрос о природе магнитных импульсов (или TCV как одной из форм магнитного импульса) остается дискуссионным и сегодня. Цель работы – предложить ответы на следующие два принципиально важных для понимания природы MIEs вопроса. Первый вопрос, который возникает при попытке связать события магнитных импульсов с процессами взаимодействия солнечного ветра с магнитопаузой, это в каком магнитосферном домене находится их источник. Ответ на него покажет, насколько далеко от магнитопаузы находится источник магнитного импульса. Второй вопрос – вариации каких параметров межпланетной среды можно связать с запуском магнитного импульса, и каким образом эти вариации приводят к появлению источника магнитных импульсов в отдаленных от магнитопаузы областях магнитосферы.

## 2. АППАРАТУРА И МЕТОДИКА

Поиск магнитных импульсов осуществлялся по данным сети магнитометров IMAGE. Список используемых для этого станций (а также трех низкоширотных станций) с указанием кода, географических и геомагнитных координат приводится в табл. 1. Временной интервал поиска составлял 06:00–12:00 UT, что для указанных в табл. 1 станций IMAGE соответствует интервалу ~08:30–14:30 MLT. Упомянутый выше интервал наиболее вероятного обнаружения MIEs лежит внутри интервала поиска.

Спутники серии DMSP (*Defense Meteorological Satellite Program*) летают на высоте 840 км от поверхности Земли по околополярным орбитам с периодом обращения 101 минута, что дает значение скорости спутника примерно 7.5 км/с. При такой скорости спутники пролетают над Шпицбергом в течение ~2 мин. При длительности импульса от 5 до 25 мин, есть ненулевая вероятность найти события, когда спутник летит над станциями во время импульса, а не только до или

после него. Спутники оснащены, в частности, направленным в зенит детектором частиц (десятиканальный спектрометр SSJ/4), проводящим измерения высыпавшихся частиц в диапазоне энергий от 30 эВ до 30 кэВ с временным разрешением 1 с. Для определения границ авроральных вторжений использовался автоматический алгоритм, предложенный в работе [Newell et al., 1991]. Алгоритм был апробирован в ряде исследований для предполуденных высыпаний (см., например, [de la Beaujardiere et al., 1993]). В частности, отмечается хорошее согласие автоматического и визуального (по спектрограммам) способа определения границы *bps/cps*. Отметим также, что согласно статистическим исследованиям (см. рис. 2 в работе [Newell and Meng, 1992]), в интервале 9–12 MLT границы магнитосферных доменов ориентированы преимущественно вдоль геомагнитной широты. К этому MLT-интервалу относятся анализируемые в работе события магнитных импульсов.

Данные DMSP в виде спектрограмм с указанием границ доменов получены в *on-line* режиме на сайте университета Дж. Хопкинса (адрес в Интернете <http://sd-www.jhuapl.edu/Aurora/spectrogram/index.html>). На спектрограммах приводятся координаты подспутниковой точки (см., например, рис. 2a), по которым при известной высоте спутника рассчитывалась проекция спутника вдоль силовой линии на высоту *E*-слоя ионосферы. Для таких высот при проектировании достаточно пользоваться только IGRF-моделью силовой линии. Далее на всех рисунках приводится проекция траектории спутника на высоту 100 км. В начале исследования спектрограммы были доступны до 2015 года.

Для уточнения положения “подошвы” продольного тока, с появлением которого мы связываем магнитные импульсы (см. далее раздел 3), рассчитывалось 1-D и 2-D распределение интенсивности ионосферного эквивалентного тока над сетью IMAGE. Расчет проводился в *on-line* режиме на сайте сети по программе ECLAT. В качестве базовой линии бралось значение геомагнитного поля в интервале непосредственно перед началом магнитного импульса. При таком подходе распределение эквивалентного тока отражает возмущение тока, магнитный эффект которого и есть магнитный импульс. Для минимизации влияния не связанных с магнитными импульсами возмущений, анализировались преимущественно изолированные события, то есть события с относительно спокойной геомагнитной предисторией. И даже в этих случаях, из-за неотчетливого начала магнитного импульса, погрешность в его опре-



Таблица 1. Координаты магнитных станций

Код	Обсерватория	Географические координаты		Геомагнитная широта, ° N	MLT, ч
		широта, ° N	долгота, ° E		
NAL	Ny Ålesund	78.92	11.95	75.25	UT+2.7
LYR	Longyerbyen	78.20	15.82	75.12	UT+2.8
HOR	Hornsund	77.00	15.60	74.13	UT+2.6
HOP	Hopen Island	76.51	25.01	73.06	UT+2.9
BJN	Bear Island	74.50	19.20	71.83	UT+2.7
SOR	Sørøya	70.54	22.22	67.70	UT+2.7
SOD	Sodankylä	67.37	26.63	63.92	UT+2.3
NUR	Nurmijärvi	60.50	24.65	56.89	UT+1.8
ABG	Alibag	18.64	72.87	10.69	
AAE	Addis Ababa	9.03	38.77	5.4	
HER	Hermanus	-34.42	19.23	34.03	

делении составляла  $\pm 2$  минуты. Как следствие, при дальнейшем сопоставлении импульса с вариациями параметров межпланетной среды у лобовой точки фронта ударной волны мы не смогли получить надежную статистику по такому важному параметру, как время задержки отклика магнитосферы в форме MIEs на изменения ММП.

Для анализа ситуации в межпланетной среде мы использовали данные спутников WIND и ACE, осуществляющих мониторинг солнечного ветра на большом удалении от Земли, а также спутников THEMIS (*Time History of Events and Macroscale Interactions during Substorms*) в интервалы, когда спутники находились за пределами магнитосферы со стороны Солнца. При сопоставлении с магнитными импульсами учитывалось время распространения возмущения от спутника до лобовой точки на фронте ударной волны. Координаты спутников, а также их расстояние до фронта ударной волны, оценивались при помощи сервиса *4D Orbit Viewer* (<https://sscweb.gsfc.nasa.gov/tipsod/>).

В ряде случаев пришлось прибегнуть к помощи сервиса OMNI (<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/index.html/>), осуществляющего пересчет возмущения в солнечном ветре на лобовую точку ударной волны в режиме онлайн. Имея в виду статистические исследования Ridley [2000], показавшие, что неопределенность пересчета сервисом OMNI может составлять 8–25 мин, пред-

почтение отдавалось анализу непосредственных спутниковых измерений.

Магнитные импульсы не являются исключительным явлением. Согласно [Воробьев и др., 1993], в среднем за день обнаруживается 0.5 импульса. Опыт работы над статьей дает меньшую цифру: 2–4 события в месяц. Жесткие критерии отбора (удачные пролеты спутников DMSP и спокойная геомагнитная предистория импульса) привели к тому, что за период 2010–2014 гг. совместно со спутниковыми измерениями анализу были подвергнуты только 8 случаев. В разделе 3 дано подробное описание двух случаев. Для анализа магнитных импульсов в контексте ситуации в межпланетной среде база данных составила 22 случая. Результаты этого анализа приводятся в разделе 4.

### 3. ПОЛОЖЕНИЕ ИСТОЧНИКА МАГНИТНОГО ИМПУЛЬСА ОТНОСИТЕЛЬНО ГРАНИЦ МАГНИТОСФЕРНЫХ ДОМЕНОВ

В этом разделе приводится подробный анализ двух из восьми событий, для которых имеются данные о характере высыпаний над областью наблюдения. Привлечение спутниковых данных позволило приблизительно оценить положение станций IMAGE и предполагаемого источника импульса относительно границ магнитосферных доменов.

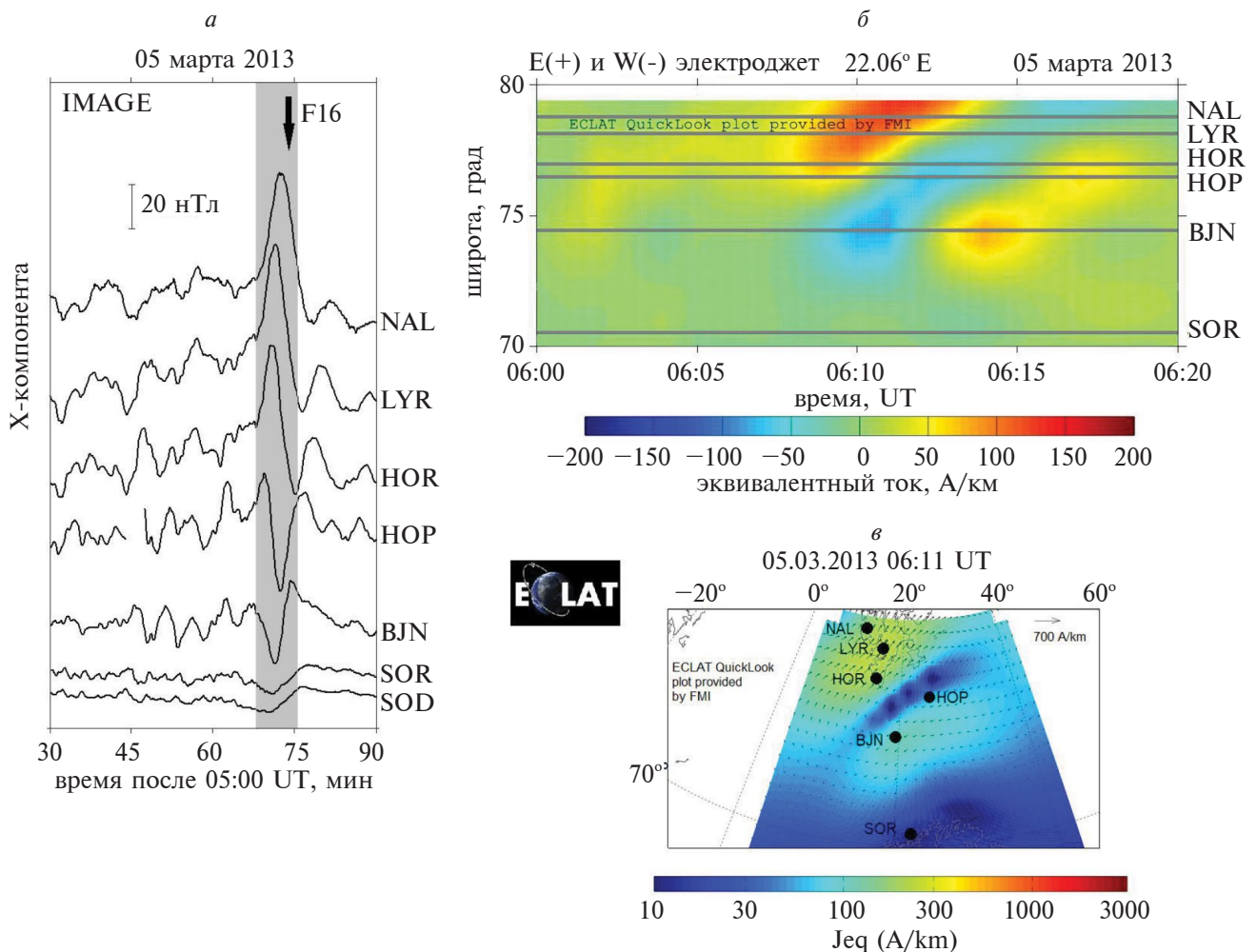
### 3.1. Магнитный импульс 05.03.2013 г.

Источник в виде токового слоя  
на границе bps/cps

Импульс зарегистрирован на меридиональной цепочке станций NAL-SOD сети IMAGE около 06:09 UT 5 марта 2013 г. Изменение формы импульса прослеживается на рис. 1а. На трех верхних магнитограммах станций, расположенных на Шпицбергене, а также на станции HOR южнее Шпицбергена, импульс начинается с увеличения  $X$ -компоненты геомагнитного поля. Далее будем называть такие отклонения положительной вариацией имея в виду, что отклонение положительное по отношению к полю перед началом импульса. Положительная вариация вызвана усилением эквивалентного ионосферного тока восточного на-

правления. На магнитограммах станций, расположенных южнее Шпицбергена (BJN, SOR и SOD), импульс начинается как экскурс  $X$ -компоненты в сторону уменьшения (отрицательная вариация), что соответствует усилению западного электроджета. Далее для краткости мы будем опускать характеристику “возмущенный” применительно к магнитному полю, ионосферному и продольному токам, имея в виду, что речь идет не об абсолютных, а возмущенных значениях этих параметров.

Распределение ионосферных эквивалентных токов, соответствующее магнитному импульсу, представлено на рис. 1б и в. (Цветные рисунки доступны в электронной версии статьи.) Напомним, что эквивалентные токи текут только в пло-



**Рис. 1.** (а) – Магнитный импульс на цепочке станций IMAGE (выделен серым). Момент пролета спутника F16 показан стрелкой. (б) – 1D распределение эквивалентного ионосферного тока, показывающее динамику восточного (+) и западного (-) токов магнитного импульса на меридиане 22° E. (в) – Вихревой характер распределения эквивалентного тока. Направление тока показано стрелками.

скости ионосферы (предположительно на высоте 100 км) и создают на земной поверхности то же магнитное поле, что и реальная система ионосферных токов. Система эквивалентных токов не является реальной токовой системой, поскольку не включает в себя продольные токи.

На диаграмме на рис. 1б каждый вертикальный профиль отражает распределение тока вдоль меридиана, усредненное за 10-ти секундный интервал. Положительные значения соответствуют току восточного направления. На цветном рисунке в электронной версии статьи интенсивность восточного электроджета передается цветом в диапазоне от зеленого до коричневого. В момент начала импульса в 06:09 UT область перехода от западного к восточному электроджету располагалась между станциями НОР и ВJN (рис. 1б). На цветном рисунке место, где происходит обращение направления тока с восточного на западное, хорошо видно как переход от красных цветов к синим через зеленый. Серыми горизонтальными линиями показаны широты станций.

На карте 2D-распределения эквивалентного тока программа ECLAT определяет три фокуса вихря, закрученного по часовой стрелке (рис. 1в). Направление и величина токов показано векторами. Из-за слабого пространственного разрешения стрелки на концах некоторых векторов выглядят как утолщения. Результатам расчета 2-D распределения токов в области от материка (станция SOR) к полюсу не следует доверять безоговорочно, так как в этих широтах сеть магнитометров менее плотная, чем на материке. Тем не менее, положение центра вихря согласуется с местом смены полярности магнитного импульса на магнитограммах и диаграмме (рис. 1а, б), а на вихревой характер связанных с магнитными импульсами ионосферных токов обращалось внимание уже на начальной стадии исследования этих явлений (см., например, работу [Friis-Christensen et al., 1988]).

Согласно, например, [Ляцкий и Мальцев, 1983], в области, где ионосферный ток меняет направление с восточного на западное, должна располагаться подошва втекающего в ионосферу продольного тока (*field-aligned current*, FAC). На 2D-картах эквивалентного ионосферного тока, рассчитанных по программе ECLAT, след локализованного втекающего в ионосферу продольного тока часто ассоциируют с центром токового вихря, закрученного по часовой стрелке (например, [Amm et al., 2002] и [Palin et al., 2016]), что имеет место и в рассматриваемом случае. Формально магнитный импульс есть продукт приблизительно одновременной интенсификации восточного и западного джетов. Мы предлагаем в ка-

честве “источника” рассматривать не восточный и западный джеты по-отдельности, а продольный ток, порождающий их в совокупности. Таким образом, определение местоположения источника импульса в магнитосфере сводится к определению областей высыпаний (магнитосферных доменов), внутри или на границе которых находится область обращения токов и/или центр токового вихря.

На рис. 2а приводится спектрограмма электронных и ионных высыпаний, зарегистрированных спутником DMSP F16 во время его пролета над областью наблюдений сразу после того, как амплитуда магнитного импульса достигла максимального значения (стрелка на рис. 1а). Во время пролета спутник дважды пересек границу между высыпаниями из *cps* и *bps*. Отметим, что спутник проводил измерения около 09:00 MLT, так что, согласно работе [de la Beaujardiere et al., 1993], автоматическому алгоритму определения границ можно доверять.

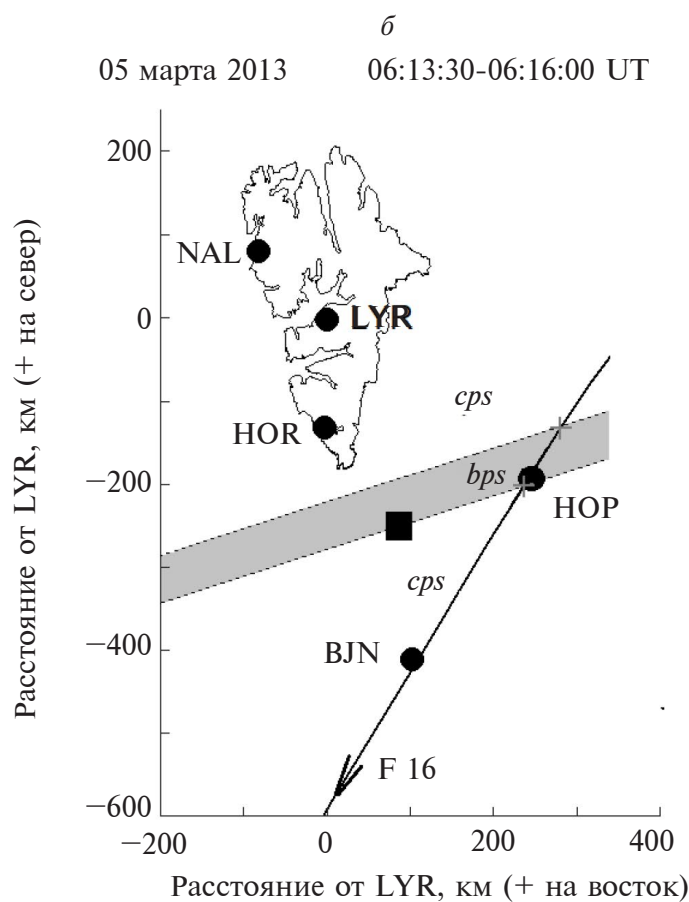
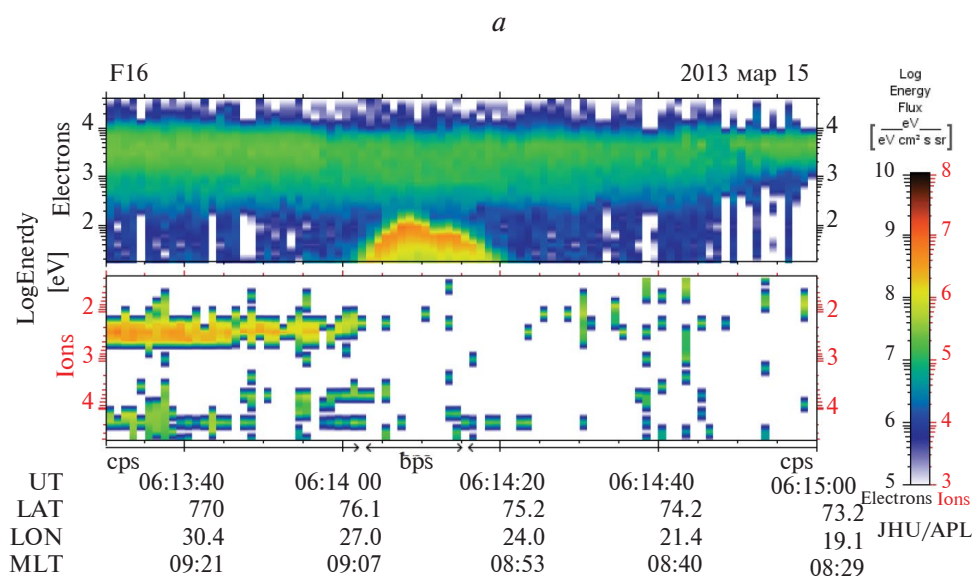
На рис. 2б траектория спутника спроектирована (вдоль силовой линии геомагнитного поля) в ионосферу на высоту 100 км. На этой высоте программа ECLAT рассчитывает эквивалентные токи. Места пересечения *bps* отмечены серыми крестиками. Проходящие через крестики штриховые линии — геомагнитная широта. В разделе 2 отмечалось, что в этом MLT-секторе границы *bps* ориентированы вдоль геомагнитной широты. Таким образом, штриховые линии показывают границы *bps* за пределами траектории спутника.

Квадратиком на рис. 2б отмечено положение центра вихря, расположенного на меридиане 22°E, вдоль которого строилась диаграмма на рис. 1б. Этот и другие центры располагаются вдоль экваториальной границы *bps/cps*. Можно предположить, что в рассматриваемом случае продольный ток имел форму полосы и протекал на границе *bps/cps* или рядом с ней. Таким образом, источник магнитного импульса располагался внутри магнитосферы, на удалении от магнитопаузы и *llbl*, что не позволяет связать магнитный импульс с событиями пересоединения на магнитопаузе или с неустойчивостью Кельвина-Гельмгольца в области обращения конвекции [Clauer et al., 1997].

### 3.2. Магнитный импульс 21.04.2010 г.

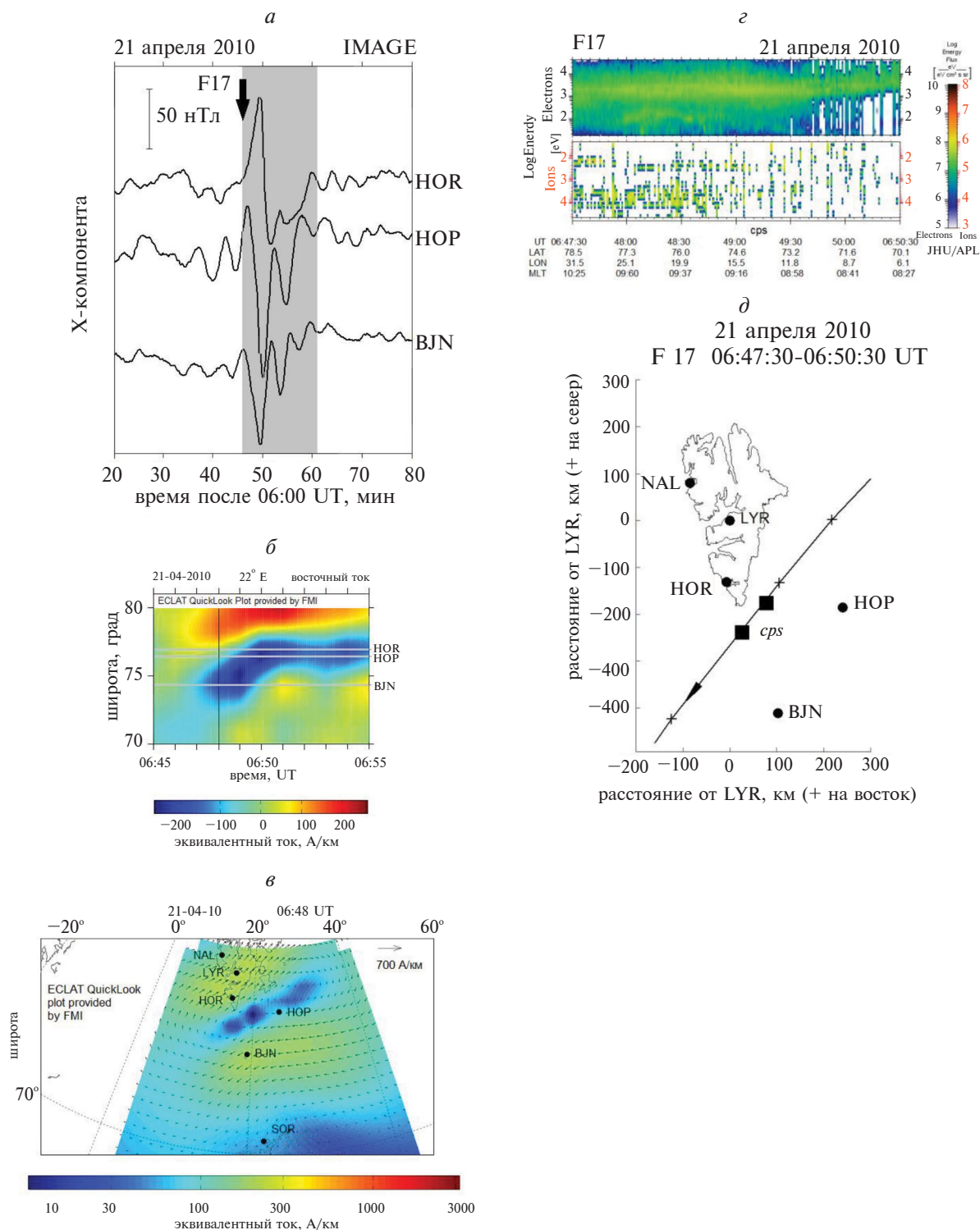
#### Пролет спутника вдоль токового слоя

Магнитный импульс был зарегистрирован в 06:45 UT (рис. 3а). Анализ проводился по той же схеме, что и в предыдущем случае. Мы приводим это событие в статье по следующей причине.



**Рис. 2.** (*a*) – Характер высыпаний вдоль траектории спутника с указанием магнитосферных доменов спустя три минуты после начала импульса. (*б*) – Фрагмент траектории F16. Положение границ *cps*/*bps* показано крестиками. Область высыпаний из *bps* закрашена серым. Штриховая линия – геомагнитная широта (границы доменов вне траектории). Квадратик – центр вихря на меридиане 22°E, вдоль которого рассчитывалось 1D распределение эквивалентного тока на рис. 1б.





**Рис. 3.** (а) — Противофазный характер изменения магнитного поля. Стрелкой показан момент пролета спутника F17 над сетью IMAGE. (б) — Динамика восточного (+) и западного (-) токов магнитного импульса на меридиане 22° E. Тонкая вертикальная линия — момент времени, для которого рассчитывалась карта эквивалентного тока. (в) — Вихреобразная структура с несколькими центрами на карте эквивалентного тока магнитного импульса. Направление тока показано стрелками. (г) — Характер высыпаний над областью наблюдений по данным DMSP F17. (д) — Фрагмент траектории F17. Крестики — реперные точки для построения траектории. Квадратики — положение центра вихря.



На карте 2D-распределения токов (рис. 3в) программа ECLAT показывает наличие у вихря тонкой структуры в виде нескольких фокусов. Самый западный фокус располагается примерно там же, где на диаграмме (рис. 3б) имеет место обращение направления тока. Тонкую структуру имел центр вихря и в предыдущем случае (рис. 1в). Однако тогда траектория спутника проходила в стороне от центра. В рассматриваемом же случае спутник пролетал прямо над серией фокусов (квадратики на рис. 3д), находясь при этом в области высыпаний из *cps* (рис. 3г).

Нижняя панель спектрограммы на рис. 3г показывает, что ионные высыпания над центрами вихрей имели спорадический характер. Как и в предыдущем случае, вихрь был закручен по часовой стрелке, что указывает на наличие в его центре втекающего (ионы движутся в ионосферу) продольного тока. В свете этого, мы трактуем спорадичность ионных высыпаний как признак нескольких волокон у продольного тока, порождающих тонкую структуру в центре вихря.

По такой схеме нами было проанализировано 8 событий. В четырех случаях источник (точнее, центр вихря эквивалентных ионосферных токов) находился внутри центрального плазменного слоя (*cps*), в одном случае — внутри пограничного плазменного слоя (*bps*) и в трех случаях — вблизи границы между *bps* и *cps*. Анализ указывает на то, что MIEs не являются ни событием переноса потока на магнитопаузу вследствие пересоединения (события *FTE*), ни развивающейся на внутренней границе *llbl* неустойчивости Кельвина-Гельмгольца, порождающей в ионосфере распространяющиеся вихри конвекции (события *TCV*). В следующем разделе появление магнитных импульсов рассматривается в контексте изменений в межпланетной среде. В разделе Дискуссия, опираясь на результаты разделов 3 и 4, будет предложен возможный механизм генерации магнитного импульса.

#### 4. МАГНИТНЫЕ ИМПУЛЬСЫ В КОНТЕКСТЕ РАЗВИТИЯ СИТУАЦИИ В МЕЖПЛАНЕТНОЙ СРЕДЕ

Статистика по этому вопросу является более обширной, так как для отбора событий не нужно было ограничиваться удачными пролетами низкоорбитальных спутников DMSP.

Результаты анализа приведены в табл. 2. В первых трех столбцах указаны номер, дата и время магнитного импульса. В четвертом столбце приводится амплитуда вариации давления солнечного ветра. В столбце 5 — амплитуда вариации X-компоненты геомагнитного поля на низкоши-

ротных обсерваториях. Вариация в виде ступени на экваториальных станциях традиционно считается признаком сжатия дневной магнитосферы во время SI. В столбце 6 — относительные изменения X-компоненты скорости солнечного ветра. Знак + означает, что скорость увеличилась. Изменения классифицируются нами как нулевые, если скорость менялась менее чем на 5 км/с. В столбцах 7–9 приведены значения компонент ММП. Символ 0.5/3.3 означает, что данная компонента увеличилась с +0.5 до +3.3 нТл. Символ X использован в тех случаях, когда компонента не менялась или менялась на уровне флуктуаций (менее чем на 0.5 нТл).

Для восьми событий удачного пролета спутников DMSP, в столбце 10 указывается название магнитосферного домена, где, по нашему мнению, располагался источник магнитного импульса. Например, символ *bps/cps* означает, что источник располагается вблизи границы между этими доменами. Эти события помещены в начале табл. 2.

Во Введении было отмечено, что генерация магнитных импульсов определяется не единственным фактором, а широким спектром условий в межпланетной среде [Moretto et al., 2004]. К такому же выводу мы пришли по результатам наших исследований. Сказанное демонстрирует рис. 4. Здесь магнитный импульс рассматривается в контексте измерений на спутнике THV. Спутник находился на линии Солнце-Земля на относительно небольшом (по сравнению со спутниками ACE и WIND) расстоянии от фронта ударной волны (~642000 км, как дает сервис *4D Orbit Viewer*). При скорости солнечного ветра 340 км/с, время распространения неоднородности солнечного ветра от спутника до ударной волны составляет 31 мин. Это время принималось во внимание при сравнении спутниковых и наземных данных.

На рис. 4 вариации ММП, скорости и давления солнечного ветра на спутниках THV и WIND приведены в перерасчете на фронт ударной волны. Серым выделен интервал, когда на сети IMAGE наблюдался магнитный импульс (см. рис. 3а для этого события). Примерно за 4–5 мин до начала импульса, *B<sub>x</sub>*- и *B<sub>z</sub>*-компоненты ММП быстро меняются в сторону отрицательных значений. Также быстро в ту же сторону, но на меньшую величину, меняется *B<sub>y</sub>*-компонента. Изменения ММП сопровождаются быстрым увеличением скорости солнечного ветра на  $\Delta V_x \sim 20$  км/с (6%).

В отличие от магнитного поля и скорости, давление солнечного ветра не демонстрирует ступенчатого изменения на спутниках ни вблизи фронта ударной волны, ни на значительном от

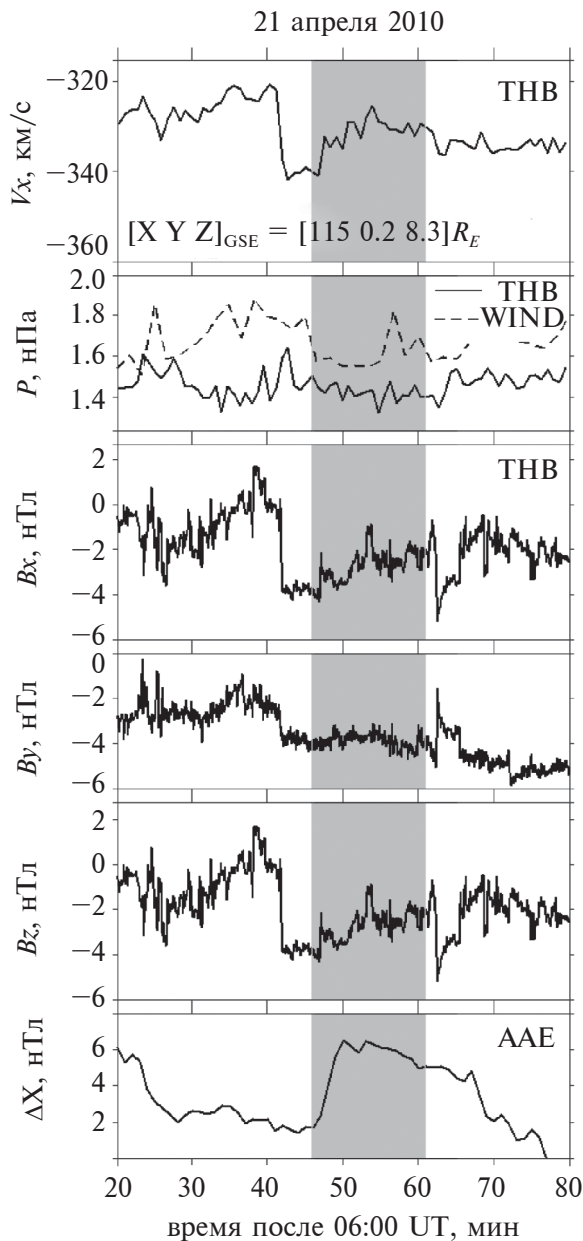
Таблица 2. Магнитные импульсы и параметры межпланетной среды

№	дд/мм/гггг	UT	$\Delta P$ , нПа	$\Delta X$ , нТл	$\Delta V_X$ , %	ММП			домен
						$B_x$	$B_y$	$B_z$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	21/04/2010	06:46	~0	4	+8*	5/2	-2.6/-4	0/-4	<i>cps</i>
2	24/04/2010	08:45	~0	1.5	+8	-4/1	0.5/4.5	-1/1	<i>cps</i>
3	10/01/2011	08:16	~0	~1	-3	-2/2	0/-2	-3/3	<i>cps</i>
4	20/01/2011	08:42	0.35	3.5	+4*	-3/1*	2/0	-1/1.7	<i>bps/cps</i>
5	15/02/2011	06:54	~0	~7	+9	-5/1	3/1	2/6	<i>bps/cps</i>
6	04/06/2011	07:51	0.4	~5	~0	2/3	0.5/-2.5	-3/1	<i>cps</i>
7	05/03/2013	06:09	~0	2	+3	3/-1*	-0.5/-2	1/-1	<i>bps/cps</i>
8	18/10/2014	07:37	—	~2	-2*	0/-2.5*	4/1	2/0	<i>bps</i>
9	06/01/2010	06:07	0.25	13**	-5	0/2.5	X	4/-2	
10	29/01/2010	05:05	1.1	13	~0	-1/2.5	2.2/4	3/0	
11	17/01/2011	08:38	0.5	~2	+6*	-4.5/-3	0/2.5	-1/0	
12	26/08/2011	06:31	~0	~1	-7	0/4	-4/0	-1/1	
13	07/11/2011	06:07	0.8	0	~0	0/1	0/-3	1/3	
14	08/02/2012	06:05	~0	~1	-3	-3/1	0/-3	1.5/4	
15	29/02/2012	07:22	1.5	~8	+3	-5/1	2/4	2/-4	
16	16/02/2013	07:42	0.2	0	~0	-2.5/-2	X	0/-2	
17	03/03/2013	08:37	~0	10	+9*	4.5/2.5	0/-4	-2/1	
18	16/10/2013	08:45	0.4	3	+3	-3/-1.5	-1.2	-1.5/1	
19	18/10/2013	06:05	~0	~0	+4	-3.5/-2	-1/3	1/0	
20	28/10/2013	09:11	0.4	10	~0	0.5/1.2	-0/-4.7	4.5/0	
21	20/04/2014	07:28	0.5	~0	-2	-5/-2	1/0	1/4	
22	06/10/2014	06:33	—	2	+2.5	3/4	-3/0	0.5/2.5	

Примечание. Символ \* относится к параметру, начало вариации которого не согласуется с началом магнитного импульса. Символом \*\* обозначено изменение давления в эВ/см<sup>3</sup>.

него удалении (сплошная и штриховая линии на рис. 4, соответственно), характерного для явления, известного в литературе как внезапный импульс (SI). Тем не менее, вариация X-компоненты на экваториальной станции ААЕ,  $\Delta X$ , по форме (но не по величине) напоминает отклик магнитосферы на SI (рис. 4, нижняя панель). Согласно, например, [Safargaleev et al., 2002], типичная величина геомагнитного отклика на SI на экваториаль-

ных станциях составляет  $\Delta X \sim 40$  нТл, то есть в 10 раз больше. При временном разрешении данных ААЕ 1 минута, момент начала возмущения на ААЕ с точностью до 1–2 мин совпадает с началом магнитного импульса на высокоширотных станциях. Если предположить, что  $\Delta X$  каким-либо образом обусловлено изменениями ММП, получим оценку времени распространения вариации в соответствующей компоненте ММП в переходном



**Рис. 4.** Вариации параметров межпланетной среды у лобовой точки ударной волны за промежуток времени, включающий интервал наблюдения магнитного импульса (выделен серым цветом, см. также рис. 3а). Сверху вниз: скорость и давление солнечного ветра, три компоненты ММП. Нижняя панель — ступенеобразное увеличение X-компоненты геомагнитного поля на экваториальной станции ААЕ.

слое ~4–5 мин, что согласуется с результатами численного моделирования Samsonov et al. [2006].

Из рис. 4 следует, что вариация любого из представленных параметров (за исключением давления солнечного ветра) может рассматри-

ваться как потенциальный кандидат на триггер магнитного импульса.

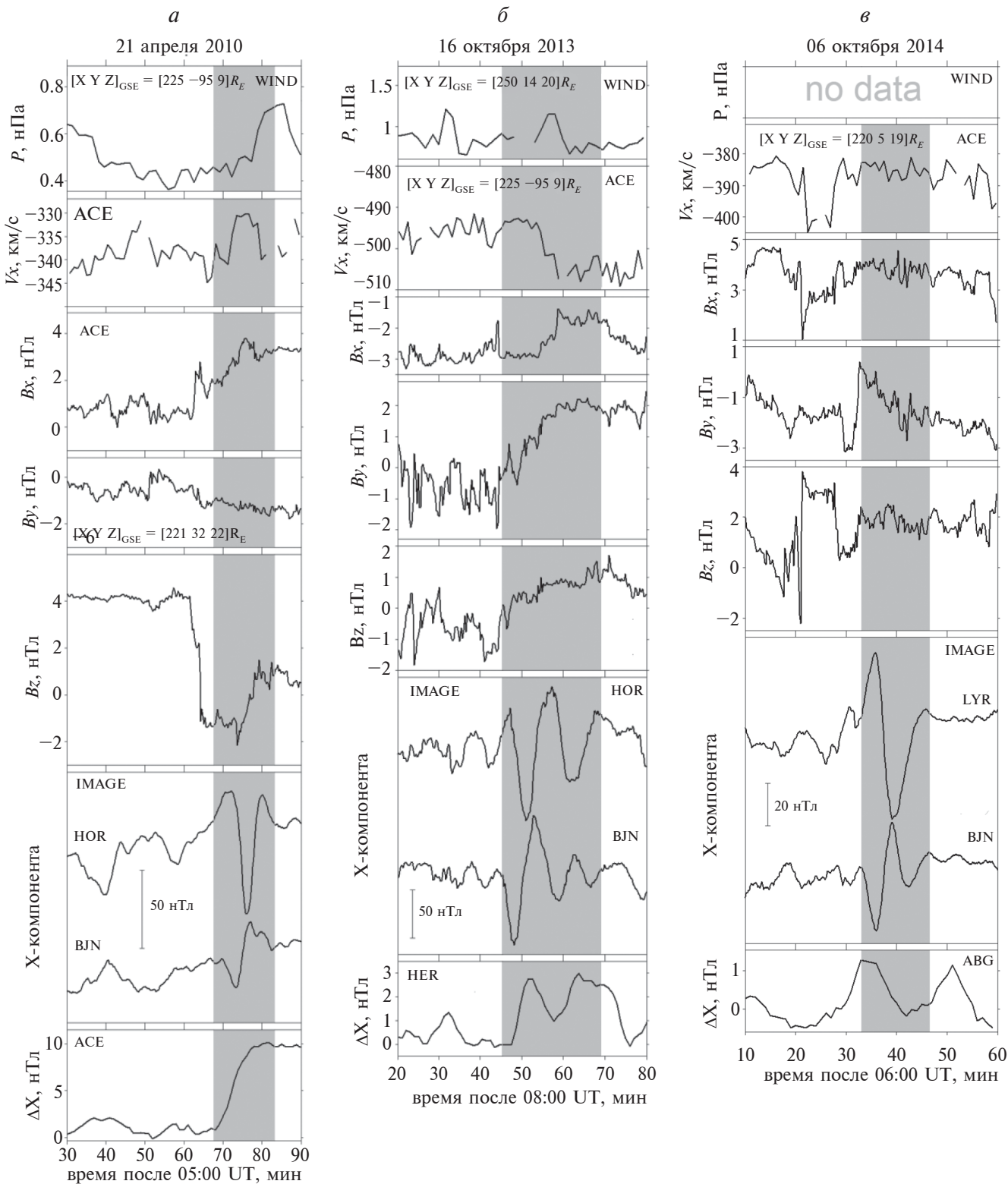
Дальнейшие исследования показали, что быть причиной магнитного импульса могут не все параметры межпланетной среды.

#### 4.1. Роль параметров межпланетной среды в запуске магнитных импульсов

**Импульс давления солнечного ветра.** Остановимся на этом параметре подробнее, так как ряд авторов считает, что к генерации импульсов приводит внезапное сжатие дневной магнитосферы ([Friis-Christensen et al., 1988]; [Sibeck, 1990]; [Боробьев и др., 1993]; [Yahnin et al., 1995]; [Kim et al., 2017]). В работе [Yahnin et al., 1995] отмечается, в частности, что иногда магнитные импульсы наблюдаются и без глобальных признаков SI. К этим признакам авторы относят усиление высыпаний, изменения ионосферной проводимости, всплески геомагнитной активности в КНЧ- и УНЧ-диапазонах. В процитированной работе наличие/отсутствие признаков глобальности не исследовалось. Признаки глобальности имеют случай, детально описанный в работе [Kim et al., 2017]. Реакция магнитосфер на SI была многосторонней и проявилась в высыпаниях и волновой активности в герцовом диапазоне. Авторы также обнаружили отклик на SI на высоте термосферы.

Для каждого события нами были проанализированы магнитограммы низкоширотных станций Addis Ababa (AAE), Alibag (ABG) и Hermanus (HER). На этих широтах импульс давления солнечного ветра проявляется как ступенеобразное увеличение геомагнитной X-компоненты с типичной величиной ~40 нТл (см., например, [Safargaleev et al., 2002]). Этот показатель мы рассматриваем как необходимый признак глобальности SI. Появление признаков, перечисленных в работе [Yahnin et al., 1995], в значительной степени определяется состоянием внутренней магнитосферы (в литературе — “подготовленностью” магнитосферы).

В авроральной зоне отклик X-компоненты на SI также имеет форму ступеньки, отражая сжатие магнитного поля, но на ступеньку дополнительно накладываются пульсации диапазона Pc5 (в литературе —  $P_{s,5}$ ). Несмотря на то, что периодичность в близком диапазоне обнаруживается и в магнитном импульсе, сколь либо значительных признаков SI или SC на экваториальных станциях выявить не удалось. Если в ситуациях, когда увеличение X-компоненты было различимо на фоне флуктуаций, то это увеличение составляло не более 15 нТл (см. пример на рис. 5а).



**Рис. 5.** Три примера магнитных импульсов (интервалы выделены серым цветом) в контексте изменения параметров межпланетной среды на лобовой точке фронта ударной волны. Сверху вниз: вариации давления и скорости солнечного ветра, вариации ММП, магнитограммы станций сети IMAGE, демонстрирующие противофазный характер магнитного импульса, вариации геомагнитного поля на экваториальных станциях.



Как следует из табл. 2 (столбец 4), незначительные, но обнаруживаемые невооруженным глазом ступенеобразные изменения давления иногда имели место на спутнике WIND. Однако часть из них, будучи, пересчитанными на фронт ударной волны, не предшествовали импульсу, а наблюдались после его начала. Примеры таких событий приведены на верхних панелях рис. 5а, б.

Результат не согласуется с результатами большого количества ранних работ (см., например, [Yahnin et al., 1995] и ссылки в ней), где было показано, что SI являются наиболее вероятными триггерами MIEs. В связи с этим упомянем работу Konik et al. [1994], где было показано, что подавляющее большинство магнитных импульсов происходит на фоне быстрых изменений компонент ММП. Результат не исключает безоговорочно SI как триггер импульсов, поскольку в работе [Moretto et al., 1997] было указано на существование по крайней мере двух разных классов TCV, различающихся механизмами генерации.

Изменение  $V_x$ -компоненты скорости солнечного ветра и  $V_x$ -компоненты ММП. Информация о характере изменения этих параметров приведена в табл. 2 (столбцы 6 и 7). Видно, что в ~23% случаев  $V_x$  практически не меняется (точнее, меняется на уровне флуктуаций), в ~47% случаев  $V_x$  увеличивается, а в ~30% случаев уменьшается. Аргументом для исключения этого параметра из списка возможных кандидатов на запуск магнитного импульса является не разноплановый характер вариации (усиление или уменьшение скорости), а запаздывание относительно начала импульса. В столбце 6 такие события отмечены символом \* и составляют ~23% от всех событий. Сказанное демонстрируется также примером на рис. 5а, б (вторая панель сверху).

$V_x$ -компонента ММП меняется более систематически — в 19 случаях из 22  $V_x$  растет в область положительных значений. При этом в 11 случаях (50%)  $V_x$  проходит через нулевые значения. В остальных случаях  $V_x$  при изменении остается в зоне либо отрицательных, либо положительных значений. Как и для  $V_x$ , аргументом подвергнуть сомнению роль  $V_x$  в запуске магнитного импульса является несоответствие времени начала импульса с моментом начала вариации  $V_x$  в лобовой точке фронта ударной волны (события №№4, 7 и 8 в табл. 2, рис. 5а, б).

Объяснить запаздывания  $V_x$  и  $V_x$  неточностью расчета времени распространения от спутника до фронта ударной волны мы не можем, так как две другие компоненты ММП, вариации которых начинаются до магнитного импульса, измерялись на том же спутнике.

Вариации  $V_y$ - и  $V_z$ -компонент ММП, как наиболее вероятный триггер магнитных импульсов. Выше из списка кандидатов на запуск магнитного импульса были исключены давление и скорость солнечного ветра, а также  $V_x$ -компонента ММП. Причина — вариация этих параметров, с которой можно было бы связать магнитный импульс, начиналась после того, как импульс уже начался. Информация о характере изменения оставшихся двух параметров приведена в табл. 2 (столбцы 8 и 9).

Во всех рассмотренных случаях  $V_z$ -компонента менялась. Вариации имели разную амплитуду и разный знак, но, в отличие от  $V_x$  и  $V_x$ , вариации в  $V_z$ -компоненте начинались за несколько минут до начала магнитного импульса (см. примеры на рис. 5, третья панель снизу). Примерно таким же образом вел себя  $V_y$ -компонента. Исключение представляют два случая (№№ 9 и 16 в табл. 2), когда магнитный импульс начинался на фоне плавно убывающей  $V_y$ . Поскольку при этом перед импульсом имели место отчетливые вариации  $V_z$ -компоненты, обе эти компоненты остаются в списке кандидатов на триггер. Сказанное иллюстрируется примером на рис. 5а (четвертая панель сверху).

Результат согласуется с результатами статистического исследования Konik et al. [1994], показавшими, что 50–70% событий магнитных импульсов связано с вариациями  $V_y$ - и  $V_z$ -компонент ММП. Ранее Friis-Christensen et al. [1988] также связывали генерацию магнитных импульсов (в виде TCV) с изменением этих двух компонент.

## 5. ДИСКУССИЯ

### 5.1. Ионосферные и продольные токи магнитного импульса. Обобщение

Во всех исследуемых ситуациях магнитный импульс в высоких широтах начинался как положительное отклонение, в то время как на более низких широтах начальное отклонение было отрицательным. То есть, в высоких широтах импульс вызывался усилением тока восточного направления, а ниже — западного. В области, где эквивалентный ионосферный ток меняет направление с восточного на западное, должна располагаться подошва втекающего в ионосферу продольного тока. На 2D-картах эквивалентного ионосферного тока, рассчитанных по программе ECLAT, след локализованного втекающего в ионосферу продольного тока ассоциируют с центром токового вихря, закрученного по часовой стрелке.

Мы предполагаем, что магнитный импульс есть продукт приблизительно одновременной интенсификации восточного и западного джетов, вызванной усилением или появлением локализованного втекающего продольного тока. Во всех представленных в работе событиях возмущение продольного тока происходило в глубине магнитосферы. Результат может означать, что магнитный импульс не есть следствие прямого взаимодействия неоднородности солнечного ветра с магнитопаузой типа пересоединения или развинутой неустойчивости Кельвина-Гельмгольца на внутренней границе *lbl*.

### 5.2. Сценарий генерации магнитного импульса

Основываясь на общепринятой точке зрения, что альвеновская волна есть волна продольного тока (см., например, [Ляцкий и Мальцев, 1983]), мы полагаем, что появление продольного тока, являющегося опосредованным источником магнитного импульса, связано с генерацией альвеновской волны. Ниже представлен возможный поэтапный сценарий, по которому внутри магнитосферы в локальной области генерируется альвеновская волна в отклик на изменения ММП. Основой сценария являются три теоретических результата, полученные ранее другими авторами.

На первом этапе, попадая в переходную область между ударной волной и магнитопаузой, вариации ММП трансформируются в вариации плазменного давления. Это может происходить в области магнитного барьера, где вариации магнитного поля и концентрации плазмы (плазменного давления) взаимосвязаны. Такое качественное рассуждение подтверждается результатами численного моделирования [Lin et al., 1996]. Отметим также работу Eastwood et al. [2008], где возможной причиной появления вариаций давления в переходной области при отсутствии таковых в солнечном ветре рассматривается явление, известное в литературе как аномальные горячие потоки (*hot flow anomalies*, HFA). С этими вариациями авторы предлагают связать кратковременную отрицательную вариацию магнитного поля на наземной сети обсерваторий проекта THEMIS (рис. 5 в цитируемой работе), называя ее магнитным импульсом. Рассматриваемые в нашем исследовании магнитные импульсы имеют иную форму, и, в отличие от работы Eastwood et al. [2008], исследование не носит характер case study.

На втором этапе вариации давления, подобно SI, воздействуют на магнитопаузу, в результате чего магнитопауза становится источником вторичных волн магнитозвукового типа сложной структуры, но малой амплитуды.

На третьем этапе в процесс “включается” форма магнитопаузы. Согласно Leonovich and Kozlov [2020], магнитопауза, благодаря своей форме, может действовать как собирающая линза, усиливая вторичные волны или их эффект в “фокусе”, находящемся внутри дневной магнитосферы. Под воздействием внешней среды форма магнитопаузы меняется, меняются положение и размеры фокуса.

На четвертом этапе сложная волна (сцепка магнитозвуковой и альвеновской мод) распространяется внутри магнитосферы. Согласно представлениям теории магнитосферного альвеновского резонатора, МГД-возмущения из внешних областей в процессе распространения в глубь магнитосферы трансформируются в альвеновские колебания. Наиболее эффективен процесс трансформации колебаний на геомагнитной широте, где частота внешнего источника совпадает с локальной частотой собственных колебаний геомагнитной силовой линии (см., например, [Пилипенко, 2006] и ссылки в ней). В работе Leonovich and Mazur [1989] трансформация магнитозвуковой волны в альвеновскую исследована применительно к событиям SI. Трансформация происходит как при монохроматической, так и широкополосной форме внешнего возбудителя.

Этот теоретический результат о трансформации магнитозвуковой волны в альвеновскую привлекался авторами для объяснения пульсаций  $P_{sr}5$ , являющимися откликом магнитосферы на SI. Если область трансформации находится в “фокусе” магнитопаузы, эффект перекачки будет заметен.

В модели Lühr et al. (1996) трансформация моды быстрой волны сжатия в альвеновскую волну происходит на градиенте плотности, который, как предполагается, существует в *lbl*. Согласно проведенному нами исследованию, источник MIEs находится глубже в магнитосфере, чем *lbl*.

С предложенным нами сценарием хорошо согласуются результаты работы [Pilipenko et al., 2021]. Наблюдения в сопряженных точках показали, что TCV возбуждается магнитосферным генератором тока. Режим генератора тока соответствует резонансным колебаниям в магнитосферном альвеновском резонаторе. Такой резонансный отклик на магнитозвуковой импульс действительно может возникать в глубине магнитосферы и наблюдается как MIEs/TCV.

Отметим, что исследованные в работе явления не являются импульсами в традиционном понимании этого слова, а представляют цуг затухающих колебаний. На биполярный характер магнитных импульсов обращалось внимание, в част-

ности, в работе Воробьев и др. [1997]. Авторы объяснили эту особенность движением токовых вихрей. Несмотря на то, что для данного исследования отбирались изолированные события, они не характеризовались отчетливым началом, что в совокупности с относительно небольшим временным разрешением магнитных данных и отсутствием достаточного количества станций на широте, где располагался центр вихря, затруднило исследование вопроса о его движении. Мы полагаем, что пульсационная форма импульса могла быть обусловлена баунсировкой альвеновской волны между сопряженными ионосферами.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Магнитные импульсы (МИ или *magnetic impulse events*, MIEs) — дневное высокоширотное явление в виде изолированного цуга затухающих пульсаций в X-компоненте геомагнитного поля, состоящего из 1–3 всплесков с периодом следования 8–12 мин. Нами рассмотрено 22 случая магнитных импульсов, токовая система которых состояла из разнонаправленных ионосферных токов — восточного направления в высокоширотной части скандинавской сети магнитометров IMAGE и западного направления на станциях, расположенных южнее. На двумерных картах распределения эквивалентных ионосферных токов, токовая система имела форму закрученного по часовой стрелке вихря, в полюсной части которого ионосферные токи текли преимущественно на восток, а в южной — на запад.

Для 8 случаев имелись данные по высыпавшимся частицам спутников DMSP, пролетающих над высокоширотной частью сети IMAGE во время, непосредственно перед или сразу после магнитного импульса. По этим данным было определено приблизительное положение центра вихря относительно границ магнитосферных доменов. Считая втекающий в центр вихря продольный ток опосредованным источником магнитного импульса, показано, что источник магнитного импульса находится либо в центральном плазменном слое, *cps*, либо в пограничном плазменном слое, *bps*. Это означает, что предложенные ранее объяснения магнитных импульсов спорадическим пересоединением, поверхностными волнами на магнитопаузе или неустойчивостью Кельвина-Гельмгольца на внутренней границе низкоширотного пограничного слоя, *llbl*, не согласуются с наблюдениями. Полученный результат согласуется с результатами некоторых исследований формата *case study* (см., например, [Yahnin et al., 1997]), тем самым расширяя статистику по данному вопросу.

Все 22 случая MIEs были проанализированы в контексте ситуации в межпланетной среде. По результатам анализа из списка возможных кандидатов на запуск MIEs были исключены внезапные импульсы (SI), вариации скорости солнечного ветра и *B<sub>x</sub>*-компоненты ММП. Полученный результат, исключающий SI и указывающий на вариации *B<sub>y</sub>*- и *B<sub>z</sub>*-компонент как наиболее вероятный триггер MIEs, согласуется с результатами других исследований (см., например, Konik et al. [1994]), также расширяя тем самым статистику по данному вопросу.

Предложен поэтапный сценарий генерации магнитного импульса продольным током альвеновской волны. Согласно сценарию, вариации ММП, проходя через область между ударной волной и магнитопаузой, порождают вариации плазменного давления. Вариации давления воздействуют на магнитопаузу подобно явлениям SI, в результате чего магнитопауза становится источником слабых вторичных волн смешанного типа. Форма магнитопаузы напоминает собирающую линзу, в фокусе которой вторичные волны усиливаются. Если в фокусе оказывается участок магнитосферы, где энергия смешанной волны “перекачивается” в альвеновскую моду (ранее возможность трансформации магнитозвуковой волны в альвеновскую обсуждалась применительно к генерации пульсаций  $P_{sr5}$ ), трансформация приведет к появлению продольного тока. Обусловленный появлением продольного тока вихрь ионосферного эквивалентного тока создаст на земной поверхности цуг затухающих пульсаций — магнитный импульс.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит Ньюела П.Т. (Newell P.T., Johns Hopkins University, APL, Laurel, Maryland, US) за подготовку и размещение на страницах Интернет информации о положении границ авроральных высыпаний по наблюдениям спутников серии DMSP. Данные сети IMAGE доступны на сайте (<https://space.fmi.fi/MIRACLE>). Данные низкоширотных станций AAE, ABG и HER, взяты из мировой базы данных INTERMAGNET ([https://imag-data.bgs.ac.uk/GIN\\_V1](https://imag-data.bgs.ac.uk/GIN_V1)). Положение спутников определялось при помощи он-лайн процедуры *SSC 4D Orbit Viewer* (<https://sscweb.gsfc.nasa.gov>). Геомагнитная широта и местное время рассчитывались он-лайн программой *VITMO Model* (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/cgm.html>).

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания (номер госрегистрации 1021100714196-5).



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Воробьев В.Г., Зверев В.Л., Старков Г.В. Геомагнитные импульсы в дневной высокоширотной области: основные морфологические характеристики и связь с динамикой дневных сияний // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 33. 69–79. 1993.
- Воробьев В.Г., Зверев В.Л. Морфологические особенности перемещающихся токовых вихрей. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 35. № 5. С. 35–43. 1997
- Ляцкий В.Б., Мальцев Ю.П. Магнитосферно-ионосферное взаимодействие. М.: Наука, 192 с. 1983.
- Пилипенко В.А. Резонансные эффекты ультра-низкочастотных волновых полей в околоземном пространстве // Автореф. дис. док. физ.-мат. наук. М.: изд-во ИФЗ РАН, 33 с. 2006.
- Amm O., Engebretson M.J., Hughes T., Newitt L., Viljanen A., Watermann J. A traveling convection vortex event study: Instantaneous ionospheric equivalent currents, estimation of fieldaligned currents, and the role of induced currents // J. Geophys. Res. V. 107. 1334. 2002. <https://doi.org/10.1029/2002JA009472>.
- Beaujardiere O. de la, Watermann J., Newell P., Rich F. Relationship between Birkeland current regions, particle precipitation, and electric field // J. Geophys. Res. V. 98. P. 711–7720. 1993. <https://doi.org/10.1029/92JA02005>.
- Bering III E.A., Lanzerotti L.J., Benbrook J.R., Lin Z.-M. Solar wind properties observed during high-latitude impulsive perturbation events // Geophys. Res. Lett. V. 17. P. 579–582. 1990. <https://doi.org/10.1029/GL017i005p00579>.
- Clauer C.R., Ridley A.J., Sitar R.J., Singer H.J., Rodger A.S., Friis-Christensen E., Papitashvili V.O. Field line resonant pulsations associated with a strong dayside ionospheric shear convection flow reversal // J. Geophys. Res. V. 102. P. 4585 – 4596. 1997. <https://doi.org/10.1029/96JA02929>.
- Eastwood J.P., Sibeck D.G., Angelopoulos V., Phan T.D., Bale S.D., McFadden J.P., et al. THEMIS observations of a hot flow anomaly: Solar wind, magnetosheath, and ground-based measurements // Geophys. Res. Lett. V. 35. № 17. 2008. <https://doi.org/10.1029/2008GL033475>.
- Friis-Christensen E., McHenry M.A., Clauer C.R., Vennerstrøm S. Ionospheric traveling convection vortices observed near the polar cleft: A triggered response to sudden changes in the solar wind // Geophys. Res. Lett. V. 15. P. 253–256. 1998. <https://doi.org/10.1029/GL015i003p00253>.
- Goertz C.K., Nielsen E., Korth A., Glassmeier K.H., Haldoupis C., Hoeg P., Hayward D. Observations of a possible ground signature of flux transfer events // J. Geophys. Res. V. 90. P. 4069–4078. 1985. <https://doi.org/10.1029/JA090iA05p04069>.
- Kim H., Lessard M.R., Jones S.L., et al. Simultaneous observations of traveling convection vortices: Ionosphere-thermosphere coupling // J. Geophys. Res. V. 122. P. 4943–4959. 2017. <https://doi.org/10.1002/2017JA023904>.
- Konik R.M., Lanzerotti L.J., Wolfe A., Maclellan C.G., Venkatesan D. Cusp latitude magnetic impulse events, 2, Interplanetary magnetic field and solar wind conditions // J. Geophys. Res. V. 99. P. 14831–14853. 1994. <https://doi.org/10.1029/93JA03241>.
- Lanzerotti L.J., Lee L.C., Maclellan C.G., Wolfe A., and Medford L.V. Possible evidence of flux transfer events in the polar ionosphere // Geophys. Res. Lett. 13. P. 1089–1092. 1986. <https://doi.org/10.1029/GL013i011p01089>.
- Leonovich A.S., Mazur V.A. Resonance excitation of standing Alfvén waves in an axisymmetric magnetosphere (nonstationary oscillations) // Planet. Space Sci. V. 37. P. 1109–1116. 1989. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(89\)90082-2](https://doi.org/10.1016/0032-0633(89)90082-2).
- Leonovich A.S., Kozlov D.A. Focusing of fast magnetosonic waves in the dayside magnetosphere // J. Geophys. Res. V. 125. e2020JA027925. 2020. <https://doi.org/10.1029/2020JA027925>.
- Lin Y., Swift D.W., Lee L.C. Simulation of pressure pulses in the bow shock and magnetosheath driven by variations in interplanetary magnetic field direction // J. Geophys. Res. V. 101. P. 2725–27269. 1996. <https://doi.org/10.1029/96JA02733>.
- Lühr H., Lockwood M., Sandholt P.E., Hansen T.L., Moretto T. Multi-instrument ground-based observations of a travelling convection vortices event // Ann. Geophys. V. 1. P. 162–181. 1996. <https://doi.org/10.1007/s00585-996-0162-z>.
- Moretto T., Friis-Christensen E., Lühr H., Zesta E. Global perspective of ionospheric traveling convection vortices: Case studies of two Geospace Environmental Modeling events // J. Geophys. Res. V. 102. P. 11597–11610. 1997. <https://doi.org/10.1029/97JA00324>.
- Moretto T., Sibeck D., Watermann J. Occurrence statistics of magnetic impulsive events // Annales Geophysicae. V. 22. P. 585–602. 2004. <https://doi.org/10.5194/angeo-22-585-2004>.
- Newell P.T., Wing S., Meng C.-I., Sigilitto V. The auroral oval position, structure and intensity of precipitation from 1984 onward: an automated on-line base // J. Geophys. Res. V. 96. P. 5877–5882. 1991. <https://doi.org/10.1029/90JA02450>.
- Newell P.T., Meng C.-I. Mapping the dayside ionosphere to the magnetosphere according to particle precipitation characteristics // Geophys. Res. Lett. V. 19. P. 609–612. 1992. <https://doi.org/10.1029/92GL00404>.
- Palin L., Opgenoorth H.J., Årgen J., et al. Modulation of the substorm current wedge by bursty bulk flows: 8 September 2002 – Revisited // J. Geophys. Res. V. 121. P. 4466–4482. 2016. <https://doi.org/10.1002/2015JA022262>.
- Piliipenko V.A., Engebretson M.J., Hartinger M.D., Fedorov E.N., Coyle S. Electromagnetic fields of magnetospheric disturbances in the conjugate ionospheres: Current/voltage dichotomy / Cross-Scale Coupling and Energy Transfer in the Magnetosphere-Ionosphere-Thermosphere System, ed. by T. Nishimura, O. Verkhoglyadova, and Y. Deng,



- Elsevier B.V. Amsterdam. 357-440. 2021. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821366-7.00005-6>.
- *Ridley A.J.* Estimations of the uncertainty in timing the relationship between magnetospheric and solar wind processes // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 62. P. 757–771. 2000. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(00\)00057-2](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(00)00057-2).
- *Safargaleev V., Kangas J., Kozlovsky A., Vasilyev A.* Burst of ULF noise excited by sudden changes of solar wind dynamic pressure // *Ann. Geophys.* V. 20. P. 1751–1761. 2002. <https://doi.org/10.5194/angeo-20-1751-2002>.
- *Samsonov A.A., Nemeček Z., Šafránková J.* Numerical MHD modeling of propagation of interplanetary shock through the magnetosheath // *J. Geophys. Res.* V. 111. A08210. 2006. <https://doi.org/10.1029/2005JA011537>.
- *Sibeck D.G.* A model for the transient magnetospheric response to sudden solar wind dynamic pressure variations // *J. Geophys. Res.* V. 95. P. 3755–3771. 1990. <https://doi.org/10.1029/JA095iA04p03755>.
- *Sibeck D.G.* Transient events in the outer magnetosphere: Boundary waves or flux transfer events? // *J. Geophys. Res.* V. 97. 4009–4026. 1992. <https://doi.org/10.1029/91JA03017>
- *Sibeck D.G., Trivedi N.B., Zesta E., Decker R.B., Singer H.J., Szabo A., Tachihara H., Watermann J.* Pressure pulse interaction with the magnetosphere and ionosphere // *J. Geophys. Res.* V. 108. 1095. 2003. <https://doi.org/10.1029/2002JA009675>.
- *Vorobjev V.G., Yagodkina O.I., and Zverev V.L.* Morphological features of bipolar magnetic impulsive events and associated interplanetary medium signatures. // *J. Geophys. Res.* V. 104. P. 4595–4608. 1999. <https://doi.org/10.1029/1998JA900042>.
- *Yahnin A., Titova E., Lubchich A., Böisinger T., Manninen J., Turunen T., Hansen T., Troshichev O., Kotikov A.* Dayside high latitude magnetic impulsive events: their characteristics and relationship to sudden impulses // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 57. P. 1569–1582. 1995. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(95\)00090-O](https://doi.org/10.1016/0021-9169(95)00090-O).
- *Yahnin A.G., Vorobjev V.G., Böisinger T., Rasinkangas R., Sibeck D.G., Newell P.T.* On the source region of traveling convection vortices // *Geophys. Res. Lett.* V. 24. P. 237–240. 1997. <https://doi.org/10.1029/96GL03969>.

## Position of the Source of Daylight High-Latitude Magnetic Pulses in the Magnetosphere According to DMSP Satellite Data

V. V. Safargaleev\*

*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, St. Petersburg Department, St. Petersburg, Russia*

*\*e-mail: Vladimir.safargaleev@pgia.ru*

Daytime high-latitude geophysical phenomena provide a ground-based observer with information about processes at the daytime magnetopause and/or in adjacent magnetospheric domains. It is assumed that these phenomena are initiated by changes in the parameters of the interplanetary medium and therefore can be used as a tool for studying the ways in which solar wind energy penetrates through the magnetopause. Such phenomena include magnetic impulses, which are an isolated train of damped oscillations of 2–3 bursts with a repetition period of 8–12 minutes. Using data from the Scandinavian network of magnetometers IMAGE, eight magnetic impulse events were studied for which DMSP satellites flew over the observation area during, shortly before and immediately after the pulse, crossing the boundaries of several domains. Based on ground-based and satellite data, it has been shown that the downward field-aligned current associated with the impulses is located away from the magnetopause. This means that the impulse cannot be considered as an ionospheric trace of a reconnected magnetic flux tube (flux transfer event, FTE) and/or as a traveling convection vortex (TCV). Using more statistics, it has been established that the pulse is preceded by noticeable changes in the  $B_y$  and  $B_z$  components of the IMF, while the contribution to the generation of the impulse from the pressure jump and solar wind speed, as well as the  $B_x$  component of the IMF, is not obvious. A possible scenario for the initiation of a magnetic pulse by IMF variations is discussed.

**Keywords:** magnetic impulses, magnetospheric domains, equivalent ionospheric currents