

УДК 533.951

ВЫСОКОШИРОТНЫЕ ГЕОМАГНИТНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ И ПРОДОЛЬНЫЕ ТОКИ В ВОССТАНОВИТЕЛЬНУЮ ФАЗУ БОЛЬШОЙ МАГНИТНОЙ БУРИ 21–26 ИЮНЯ 2015 г.

© 2021 г. Н. Г. Клейменова^{1,2,*}, Л. И. Громова³, С. В. Громов³, Л. М. Мальшева¹¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта (ИФЗ РАН), г. Москва, Россия²Институт космических исследований (ИКИ РАН), г. Москва, Россия³Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия

*e-mail: kleimen@ifz.ru

Поступила в редакцию 21.12.2020 г.

После доработки 14.01.2021 г.

Принята к публикации 28.01.2021 г.

Рассмотрены особенности геомагнитного эффекта подхода к магнитосфере Земли межпланетного магнитного облака в восстановительную фазу сильной магнитной бури (21–26 июня 2015 г.). На земной поверхности наибольшие геомагнитные эффекты были зарегистрированы при подходе к магнитосфере Земли ведущего края магнитного облака, где отмечались большие знакопеременные вариации B_z - и B_y -компонент ММП. В околополуденном секторе приполярных широт, предположительно, в области проекции дневного полярного каспа, наблюдались большие (до 1000 нТл) бухтообразные магнитные возмущения. Показано, что знак высокоширотной магнитной бухты контролировался знаком B_y -компоненты ММП и не зависел от направления B_z -компоненты ММП. На основе одно-временной магнитной регистрации на 66 ионосферных спутниках связи (проект AMPERE) были исследованы планетарная высокоширотная геомагнитная активность и распределение крупномасштабных продольных электрических токов, вычисленных по магнитным наблюдениям. Установлено, что в случае развития отрицательной магнитной бухты (западный электроджет) втекающие продольные электрические токи в околополуденном секторе наблюдались полярнее вытекающих токов, а в случае положительной бухты (восточной электроджет) вытекающие токи располагались полярнее втекающих. Показано, что резкая смена знака B_y -компоненты ММП-привела не только к резкой смене направления ионосферного тока, но и к перемещению его по широте.

DOI: 10.31857/S0016794021040076

1. ВВЕДЕНИЕ

1.1. Магнитная буря 21–26 июня 2015 г.

Термин “магнитная буря” был предложен более 200 лет назад А. Гумбольтом. Несмотря на то, что за прошедшие годы изучению геомагнитных эффектов магнитных бурь посвящено огромное число исследований, многие вопросы физики протекания бурь остаются неизвестными, эта проблема остается актуальной и в настоящее время. Интенсивность магнитной бури определяется величиной Dst -индекса, отражающего интенсивность симметричной части кольцевого тока [Gonzales et al., 1994]. В развитии магнитной бури выделяется три основные фазы: начальная, когда, в основном, отмечается сжатие магнитосферы солнечным ветром и $dDst/dt > 0$; главная, когда происходит инжекция частиц в кольцевой ток ($dDst/dt < 0$), и восстановительная, соответствующая медленному распаду кольцевого тока ($dDst/dt > 0$).

Наиболее значительные геомагнитные возмущения наблюдаются в главную фазу бури при южном направлении межпланетного магнитного поля (B_z ММП < 0). В это время авроральный овал смещается в сторону более низких широт, а полярные сияния могут наблюдаться даже в средних широтах. Большое разнообразие динамики и большие различия в интенсивности и длительности начальной, главной и восстановительной фаз отдельных бурь приводят к тому, что статистический анализ бурь часто не может дать четкого однозначного результата. Поэтому большой интерес представляют исследования особенностей протекания отдельных, особенно очень больших магнитных бурь, к которым по определению [Tsurutani et al., 1992] относятся бури со значением Dst в максимуме бури меньше -200 нТл. Такие бури часто развиваются нестандартно.

Одна из наиболее сильных магнитных бурь 24 цикла солнечной активности наблюдалась в

июне 2015 г. и была вызвана подходом к магнитосфере Земли межпланетного магнитного облака, образованного корональным выбросом массы Солнца (Coronal Mass Ejection – CME). Это подробно рассмотрено в ряде работ, например, [Liu et al., 2015; Громова и др., 2016; Baker et al., 2016; Astafyeva et al., 2016, 2017; Augusto et al., 2018; Piersanti et al., 2017; Gopalswamy et al., 2018; Kashcheyev et al., 2018]. В перечисленных выше работах подробно обсуждены возмущения на Солнце, вызвавшие эту бурю, а также геомагнитные и ионосферные эффекты начальной и главной фазы бури, наблюдаемые 21–23 июня 2015. Максимум магнитной бури отмечался 23 июня около 05:30 UT с $Dst = -207$ нТл. Однако особенности развития восстановительной фазы этой бури до сих пор не исследовались.

Вариации параметров космической погоды в интервале 21–26 июня приведены на рис. 1 по данным 1-мин базы OMNI (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>). На верхней панели рис. 1 показаны временные изменения индекса $SymH$, который является 1-мин аналогом широко известного часового индекса Dst . Далее сверху вниз: вариации межпланетного магнитного поля – ММП (полного магнитного поля (B), его вертикальной (Bz) и азимутальной (By) компоненты), динамического давления (P_{sw}) и скорости (V) солнечного ветра, а также AL -индекса авроральной суббуревой активности, т.е. западного электроджета. Во время этой бури отмечался приход к магнитосфере Земли двух межпланетных магнитных облаков (magnetic cloud – MC), каждому из которых предшествовала область сжатия (SHEATH), что типично для магнитного облака [Burlaga et al., 1981]). Это схематически показано в верхней части рис. 1 согласно каталогу (<ftp://ftp.iki.rssi.ru/omni/>), описание которого приведено в работе [Ермолаев и др., 2009].

Начальная фаза этой бури была необычно длительной, хотя и сопровождалась подходом к магнитосфере Земли трех межпланетных ударных волн. Однако это происходило на фоне северного ММП (положительные значения Bz компоненты ММП), когда отсутствует поступление энергии солнечного ветра в магнитосферу Земли. Главная фаза бури началась только после поворота ММП к югу, т.е. появления отрицательных значений Bz ММП. На границе между областью SHEATH и магнитным облаком наблюдались большие знакопеременные вариации всех компонент ММП на фоне очень большого динамического давления солнечного ветра (до 60 нПа). Это привело к очень большим возмущениям в магнитосфере и ионосфере Земли, что подробно обсуждено в ряде работ, например, [Baker et al., 2016; Reiff et al., 2016; Astafyeva et al., 2016, 2017; Augusto et al., 2018; Kashcheyev et al., 2018 и др.]. Появление больших положительных значений Bz ММП 23 июня вы-

звало начало распада кольцевого тока и восстановительной фазы бури, но ее развитие было осложнено появлением новых потоков в солнечном ветре.

На рисунке 1 видно, что 25 июня в позднюю восстановительную фазу бури к магнитосфере Земли подошло еще одно межпланетное магнитное облако, которому 24 июня предшествовала область сжатия (SHEATH) с межпланетной ударной волной в 13:30 UT. В это время и до 06:20 UT следующего дня (25 июня) направление ММП было северным (Bz ММП > 0), и суббуревой активности на земной поверхности не наблюдалось, что четко видно по отсутствию возмущений в AL -индексе.

Позднее, 25 июня, при относительно большой скорости солнечного ветра (~ 650 км/с), на границе SHEATH с ведущим краем магнитного облака (в интервале ~ 07 – 09 UT) появились большие знакопеременные вариации Bz - и By -компонент ММП с амплитудой до ± 10 нТл. Это привело к развитию суббуревой активности, значение AL -индекса резко увеличилось (рис. 1). Следует заметить, что AL -индекс вычисляется на основе наземных наблюдений на 12 авроральных станциях северного полушария, расположенных на геомагнитных широтах $\sim 60^\circ$ – 70° [Davis and Sugiura, 1966], т.е. этот индекс отражает геомагнитную активность на широтах ниже 70° и “не видит” возмущений в более высоких, приполярных широтах. Однако известно, что в восстановительную фазу магнитных бурь, как правило, дневные геомагнитные возмущения перемещаются в сторону полярных широт к границе магнитосферы, поскольку магнитосфера постепенно возвращается к добуревому спокойному состоянию.

Целью данной работы было проведение исследования геомагнитных возмущений в высоких широтах (больше 70° MLAT) в позднюю восстановительную фазу обсуждаемой бури, вызванных подходом к магнитосфере Земли второго межпланетного магнитного облака (25 июня 2015 г.).

2. ДАННЫЕ

Настоящая работа основана на анализе планетарных геомагнитных наблюдений проекта AMPERE (*Active Magnetosphere and Planetary Electrodynamics Response Experiment*), состоящего из 66 одновременно работающих коммерческих спутников связи на высоте 780 км с круговой полярной орбитой (<http://ampere.jhuapl.edu>). Спутники расположены на 6-ти меридиональных профилях [Anderson et al., 2000, 2014], по 11 спутников на каждом. Спутники оборудованы идентичными магнитометрами, данные которых передаются на Землю для сферического гармонического анализа, по результатам которого вы-

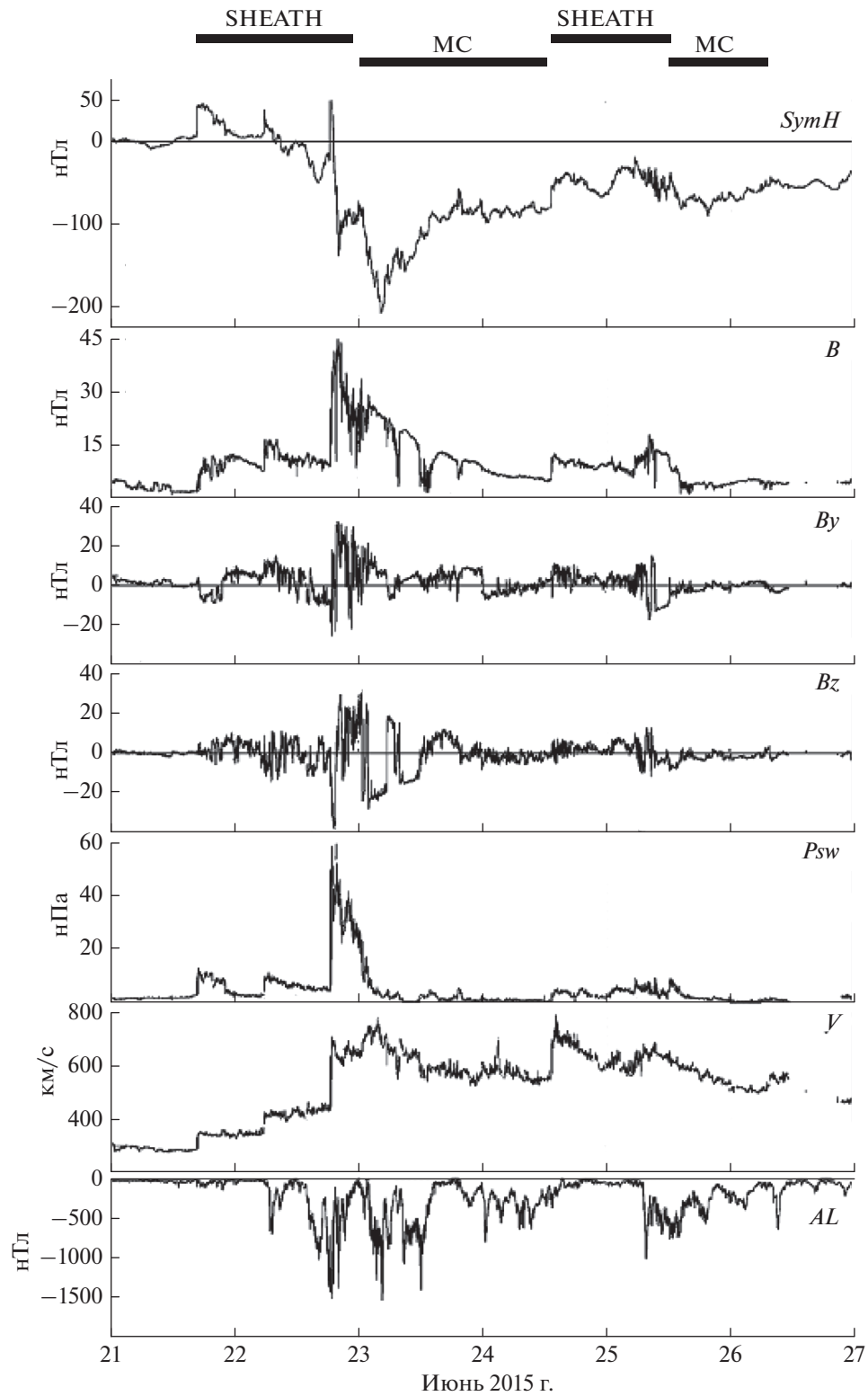


Рис. 1. Условия космической погоды с 21 по 27 июня 2015 г. Сверху вниз: индекс *SymH*, магнитуа магнитного поля *B* и *Bz*- и *By*-компонент ММП, динамическое давление (*Psw*) и скорость (*V*) солнечного ветра, а также геомагнитный индекс *AL*.

числяются продольные электрические токи [Waters et al., 2001]. Результаты наблюдений и расчетов представляются в виде глобальных карт планетарного распределения измеренной магнитной возмущенности и вычисленных по ней продольных электрических токов с 10 мин обобщением и временным сдвигом в 2 мин. Эти данные приводятся в геомагнитных координатах с разрешением по широте в 1° и по долготе в 1 ч MLT.

Использование данных AMPERE позволяет получить планетарную картину геомагнитных возмущений по данным *равномерной* сети. Наземные геомагнитные наблюдения основываются на данных магнитных наблюдений станций и обсерваторий, располагающихся очень *неравномерно* по земному шару. Кроме того, на огромных океанических территориях магнитные наблюдения вообще отсутствуют.

В дополнение к данным AMPERE в данной работе использовались наблюдения на высокоширотной части (60° – 76° MLAT) скандинавского профиля IMAGE (<http://space.fmi.fi/image/>), с геомагнитным полднем около 09 UT. Для анализа пространственного распределения высыпавшихся частиц были использованы данные наблюдений на низкоорбитальных спутниках DMSP (*Defense Meteorological Satellites Program*) F16–F18 (<http://sd-www.jhuapl.edu/Aurora/spectrogram>), пересекающих или находящиеся поблизости от скандинавского меридиана IMAGE.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Из рисунка 1 видно, что в позднюю восстановительную фазу этой бури дважды отмечались значительные всплески геомагнитных возмущений – 24 и 25 июня. В первом случае (24 июня) возмущения были вызваны подходом к магнитосфере Земли области резкого градиента плотности солнечного ветра (и соответственно, скачка динамического давления P_{sw}) на передней границе SHEATH около 13:30 UT. Во втором случае (25 июня) геомагнитные возмущения в интервале ~ 07 – 09 UT наблюдались при подходе ведущего края межпланетного магнитного облака.

На рисунке 2 приведены два примера карт AMPERE, на которых показано глобальное распределение геомагнитной возмущенности по результатам спектрального гармонического анализа магнитной регистрации на 66 низко-апогейных спутниках в выбранные временные интервалы обсуждаемых выше событий 24 и 25 июня. Карты построены в геомагнитных координатах в одинаковом масштабе для широт выше 40° MLAT, геомагнитный полдень наверху, полночь – внизу. Видно, что основная геомагнитная активность в обоих случаях наблюдалась в дневном секторе

высоких широт (выше 60° MLAT). При этом геомагнитные возмущения 25 июня наблюдались в значительно большей области пространства (как по широте, так и по долготе), чем 24 июня, когда значительная магнитная активность регистрировалась, в основном, в утреннем секторе.

На картах рис. 2 также показано положение высокоширотных станций скандинавской сети IMAGE, находящейся в анализируемые интервалы времени в дневном секторе: в послеполуденное время 24 июня и дополуночное время 25 июня. Представляло интерес рассмотреть временные геомагнитные вариации, происходящие на разных широтах меридиана IMAGE. Эти данные в интервале 02–20 UT (05–23 MLT) приведены на рис. 3 в виде магнитограмм X -компоненты поля, построенных относительно спокойного добурового уровня. Вертикальный масштаб графиков для обоих дней одинаков. Международные коды высокоширотных ст. IMAGE и их геомагнитные широты указаны на графиках справа. В верхней части рисунков приведены временные вариации динамического давления солнечного ветра (P_{sw}), а также B_z - и B_y -компонент ММП по 1-мин данным OMNI (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>).

На рисунке 3а видно, что 24 июня приход ударной волны был зарегистрирован около 13:30 UT как всплеск динамического давления солнечного ветра (P_{sw}) при небольших знакопеременных значениях B_z ММП. В момент скачка давления в B_y ММП наблюдался относительно короткий (около получаса) отрицательный импульс, сменившийся большими (почти до $+10$ нТл) положительными значениями. На земной поверхности в это время отмечалась генерация отрицательного магнитного импульса на геомагнитных широтах выше 70° с возрастающей к полюсу амплитудой, до ~ 500 нТл в обл. NAL.

Значительно более интенсивные геомагнитные высокоширотные возмущения наблюдались 25 июня в ~ 07 – 10 UT (рис. 3б) при подходе к магнитосфере Земли ведущего края межпланетного магнитного облака. Амплитуда больших знакопеременных колебаний в X -компоненте магнитного поля в высоких широтах в интервале 08–09 UT была больше 1000 нТл. Четко видно, что вариации магнитного поля на земной поверхности повторяли вариации B_y ММП с запаздыванием в несколько минут. Динамическое давление солнечного ветра во время этого события было почти вдвое больше, чем в событии 24 июня, но вариации давления не проявлялись в магнитных колебаниях на земной поверхности.

Рассмотрим две различные ситуации в особенностях дневных высокоширотных геомагнитных возмущений 25 июня (рис. 3б): развитие отрицательной магнитной бухты в ~ 08 – 09 UT и резко сменившей её положительной магнитной бухты в

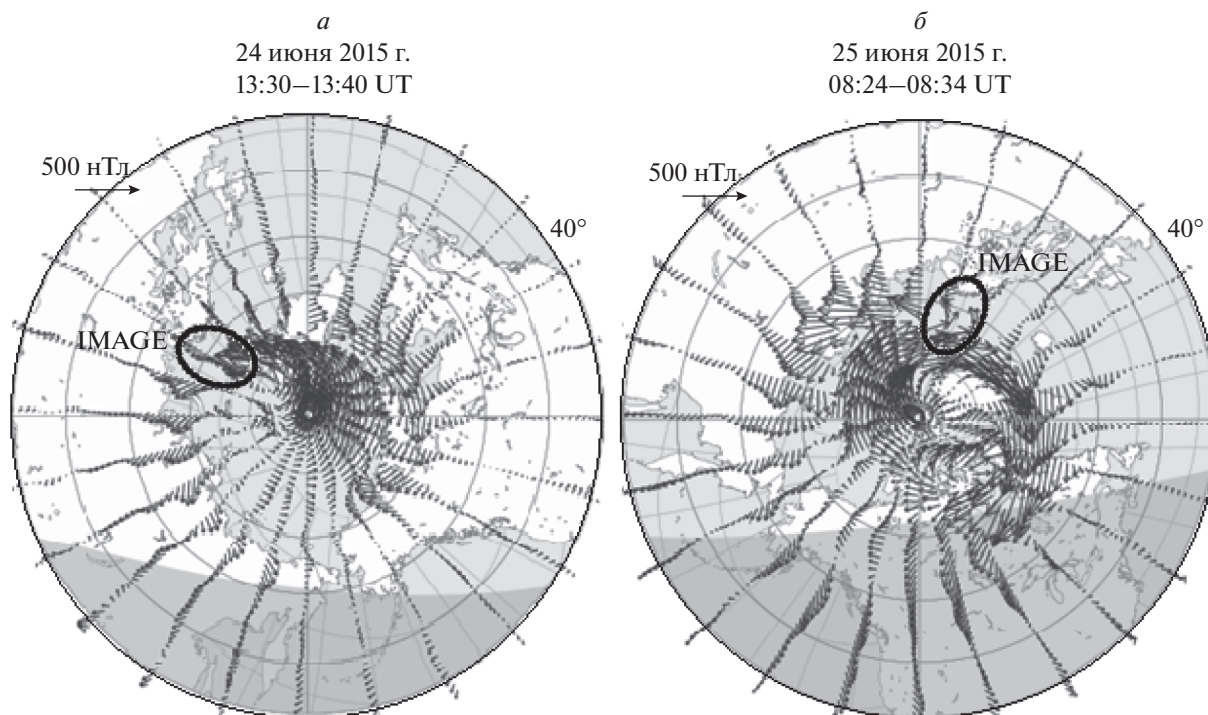


Рис. 2. Планетарные геомагнитные возмущения в Северном полушарии по данным регистрации на 66 спутниках проекта AMPERE (подробности в тексте) во время подхода к магнитосфере Земли переднего края SHEATH 24 июня – (а) и ведущего края межпланетного магнитного облака 25 июня 2015 г. – (б). Овалом показано положение скандинавского профиля IMAGE.

~09–10 UT. На рисунке 3б видно, что отрицательная магнитная бухта на меридиане IMAGE началась несколько минут спустя смены знака в 08 UT V_y -компоненты ММП с положительного на отрицательный, после чего установилась ситуация с V_y ММП < 0 и V_z ММП > 0 . Однако в интервале ~08:50–09:00 UT знак и величина V_y -компоненты ММП резко изменились – от -12 нТл до $+15$ нТл, а V_z -компонента ММП на короткое время стала отрицательной. В это время на земной поверхности отрицательная приполярная магнитная бухта также резко изменила знак и стала положительной, следовательно, западный электроджет сменился восточным. При этом в начале как отрицательной (в ~08 UT), так и положительной (в ~09 UT) приполярной магнитной бухты, ММП было направлено преимущественно на север (V_z ММП ~ $+12$ нТл). Результаты наблюдений, представленные на рис. 3б, экспериментально подтверждают, что, как это и предполагалось ранее в модели высокоширотных токовых систем [Трошичев и Гизлер, 1980; Troshichev, 1982], знак магнитной бухты, регистрируемой в околополуденном секторе приполярных широт (т.е. направление ионосферного электроджета), определяется знаком V_y -компоненты ММП не зависимо от направления V_z ММП. Анализ данных наблюдений убедительно показывает, что временные вариации

геомагнитных возмущений в дневной приполярной области широт контролируются временными вариациями V_y -компоненты ММП.

Заметим, что около 09:30 UT знак V_y -компоненты ММП опять скачком изменился от $+10$ нТл до -14 нТл, что с задержкой около 10 мин вызвало резкое уменьшение амплитуды положительной высокоширотной магнитной бухты на земной поверхности. До ~12:15 UT значения V_y ММП оставались отрицательными при практически полном отсутствии каких-либо флуктуаций. В это время V_z -компонента ММП была также отрицательной (~ -4 нТл). На рисунке 3б видно, что в этот интервал времени на высоких широтах (НОР – НАЛ) наблюдались очень интенсивные (с амплитудой ~200–400 нТл) квазипериодические длиннопериодные геомагнитные пульсации, которые можно отнести к типу vlp (very long period) пульсаций, рассмотренных, например, в работах [Клейменова и др., 1986; Большакова и др., 1987, 1988]. Известно [Большакова и др., 1987], что типичные vlp пульсации наблюдаются только в летнее время, при условии высокой ионосферной проводимости, как и в обсуждаемом событии. Предполагается, что они возбуждаются выше полярной границы каспа (возможно, в мантии) и являются отражением низкочастотной турбулентности в

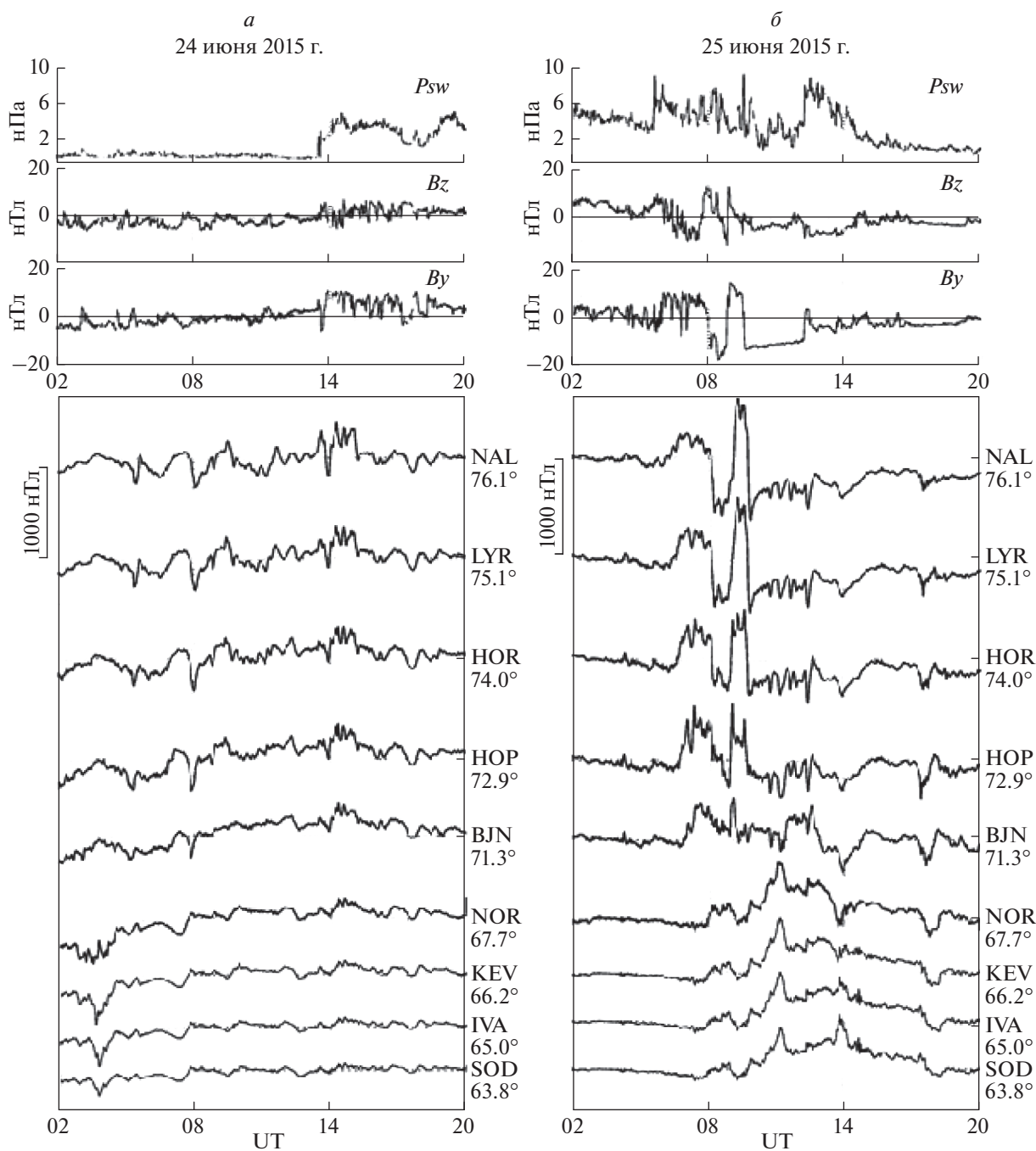


Рис. 3. Магнитограммы высокоширотных станций скандинавского профиля IMAGE, международные коды и геомагнитная широта которых приведена на правой стороне графиков: (а) – 24 июня и (б) – 25 июня 2015 г.

области незамкнутых силовых линий геомагнитного поля. При этом, как правило, νp пульсации регистрируются при положительных значениях B_y МПП. Следовательно, в данном случае, к типичным νp пульсациям можно отнести колебания только в интервале ~ 09 – 10 UT, когда B_y -компонента МПП была положительной. Тогда остается непонятным, почему на земной поверхности генерация этих колебаний, хотя и с меньшей ам-

плитудой, продолжалась и после смены знака B_y МПП, когда в B_y МПП вообще никаких вариаций не отмечалось.

Чтобы показать эти пульсации более подробно, на рис. 4 показаны результаты фильтрации (в полосе частот 0.5 – 10 мГц) исходных высокоширотных магнитограмм, а также B_z - и B_y -компонент МПП и динамического давления солнеч-

ного ветра (P_{sw}). Видно, что геомагнитные пульсации на земной поверхности отличаются от пульсации в ММП и P_{sw} , поэтому трудно предположить, что, наземные пульсации могут быть результатом просачивания волн из межпланетного пространства. Однако следует учесть, что обсуждаемая буря произошла вблизи летнего солнцестояния, т.е. в условиях повышенной ионосферной проводимости северной полярной шапки, когда горловина северного каспа открыта для прямого проникновения потока солнечной плазмы, поэтому нельзя исключать возможный вклад флуктуаций B_z и B_y ММП в спектр геомагнитных ν/p пульсации, наблюдаемых на земной поверхности. Однако наибольшие амплитуды ν/p пульсаций отмечались в интервале $\sim 08:30-09:00$ UT, т.е. вблизи и после местного магнитного полдня, типичного для положения задней стенки дневного полярного каспа, где силовые линии воронки уходят в сторону мантии.

Рисунок 4 показывает, что на длиннопериодные геомагнитные пульсации ν/p отмечались только на широтах выше $\sim 70^\circ$ MLAT (BJN). На более низких широтах в это время регистрировались шумовые np колебания с более короткими периодами и значительно меньшей амплитудой. Такая пространственная структура пульсаций типична для широт дневного каспа [Клейменова и др., 1985], когда полярнее каспа наблюдаются ν/p пульсации, а экваториальнее — np пульсации. Можно предположить, что в обсуждаемом событии в 08–10 UT дневной касп находился на геомагнитных широтах $\sim 70^\circ$, а высокоширотные станции скандинавского профиля IMAGE (HOR-NAL) регистрировали геомагнитные ν/p пульсации, отражающие турбулентные процессы в мантии. Источник более низкоширотных np пульсаций находился в замкнутой магнитосфере и, скорее всего, был связан с турбулентным пограничным слоем в окрестностях каспа [Савин и др., 2001].

Рассмотрим планетарное пространственное распределение высокоширотных геомагнитных возмущений и продольных электрических токов 25 июня в интервале 08–10 UT по данным AMPERE. На рисунке 5 слева приведены карты AMPERE магнитных возмущений (результат сферического гармонического анализа), а справа вычисленные по этим измерениям продольные электрические токи на геомагнитных широтах выше 60° . На сайте AMPERE карты продольных токов приведены в цветном изображении, где втекающие в ионосферу продольные токи показаны синим цветом, а вытекающие токи — красным. К сожалению, при трансформации цветного изображения в черно/белое, оба цвета становятся одинаково темными, и карта теряет наглядность. Чтобы различить эти цвета, на черно-белых вариантах карт AMPERE, область втекающих токов показана нами крести-

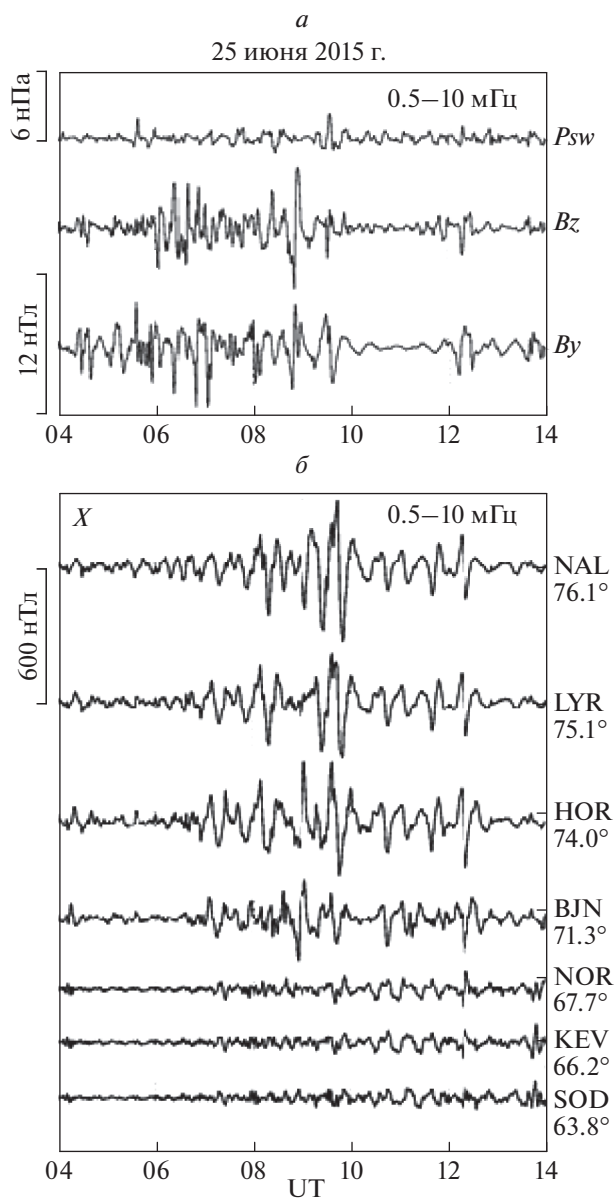


Рис. 4. Отфильтрованные в полосе 0.5–10 мГц вариации и B_z - и B_y -компонент ММП и динамического давления солнечного ветра (P_{sw}) — (а), а также отфильтрованные в той же полосе магнитограммы высокоширотных станций скандинавского профиля IMAGE — (б).

ками, а вытекающих — кружочками. Известно, что источником вытекающих токов являются высыпавшиеся в ионосферу электроны различных энергий, а втекающие в ионосферу токи обусловлены направленными вверх тепловыми электронами ионосферного происхождения [например, McDiarmid et al., 1979; Maier et al., 1980]. Заметим, что в ионосфере горизонтальный холловский ток (электроджет), регистрируемый на земной поверхности как бухтообразные возмущения в маг-

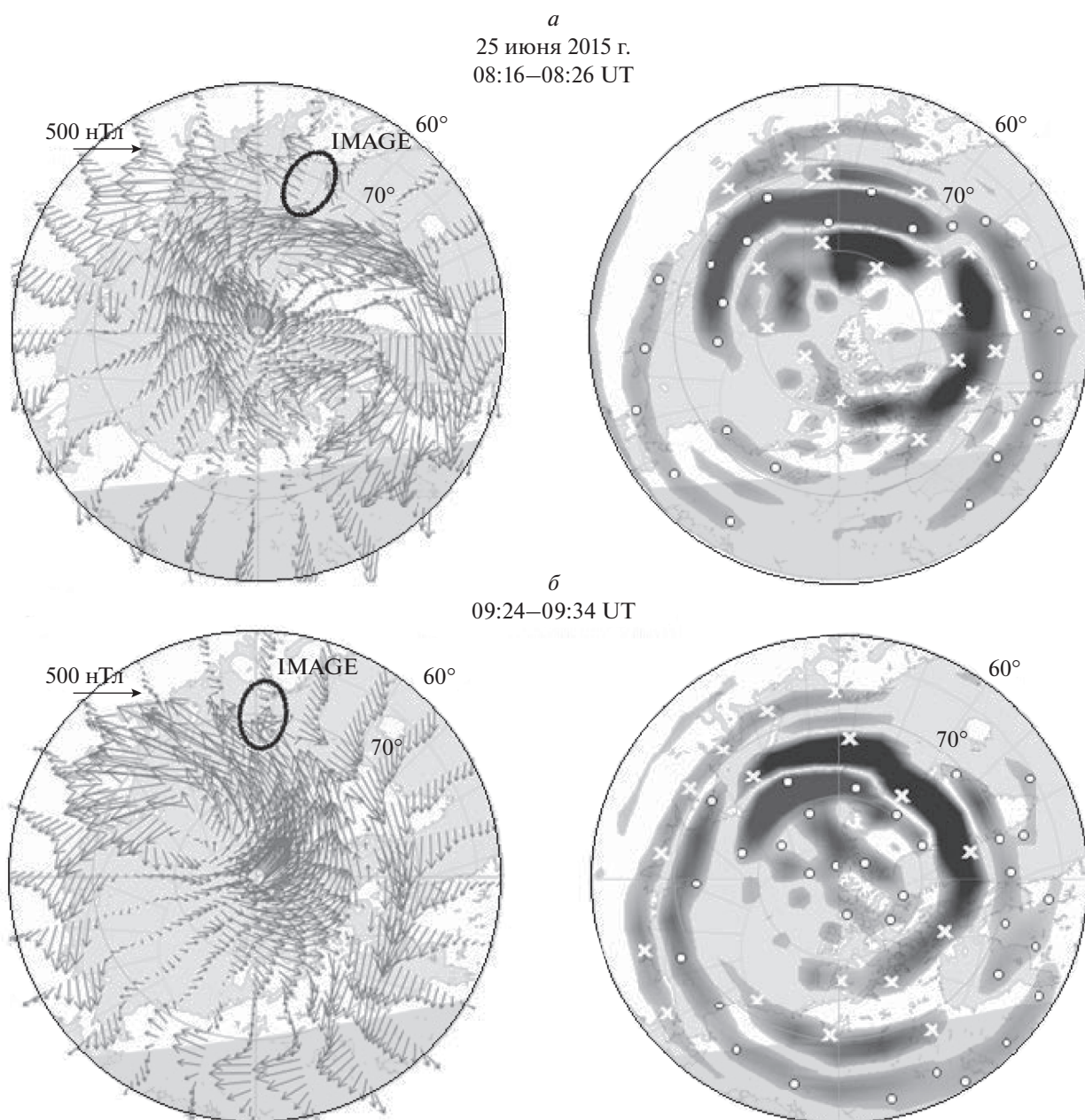


Рис. 5. Планетарное распределение геомагнитных возмущений и продольных токов в высокоширотной области Северного полушария по данным проекта AMPERE во время отрицательной – (*a*) и положительной – (*b*) магнитной бухты 25 июня. Овалом показано положение скандинавского профиля IMAGE. Токи, втекающие в ионосферу, обозначены крестиками, а вытекающие – кружками.

нитном поле, течет по азимуту в области широт между положением крупномасштабных структур втекающих и вытекающих токов.

На рисунке 5*a* показано распределение магнитных возмущений и продольных токов в середине отрицательной магнитной бухты, а на рис. 5*b* в середине положительной бухты. Видно, что во время этих событий крупномасштабные магнитные вихри в околополярных широтах были на-

правлены в противоположные стороны. Различным было и пространственное распределение продольных токов в околополуденном секторе приполярных широт. Так, в первом случае (рис. 5*a*) вытекающие из ионосферы продольные токи (на рисунке они показаны белыми кружочками) находились экваториальнее втекающих токов, показанных белыми крестиками. Во втором случае (рис. 5*b*) направление ионосферного электродже-

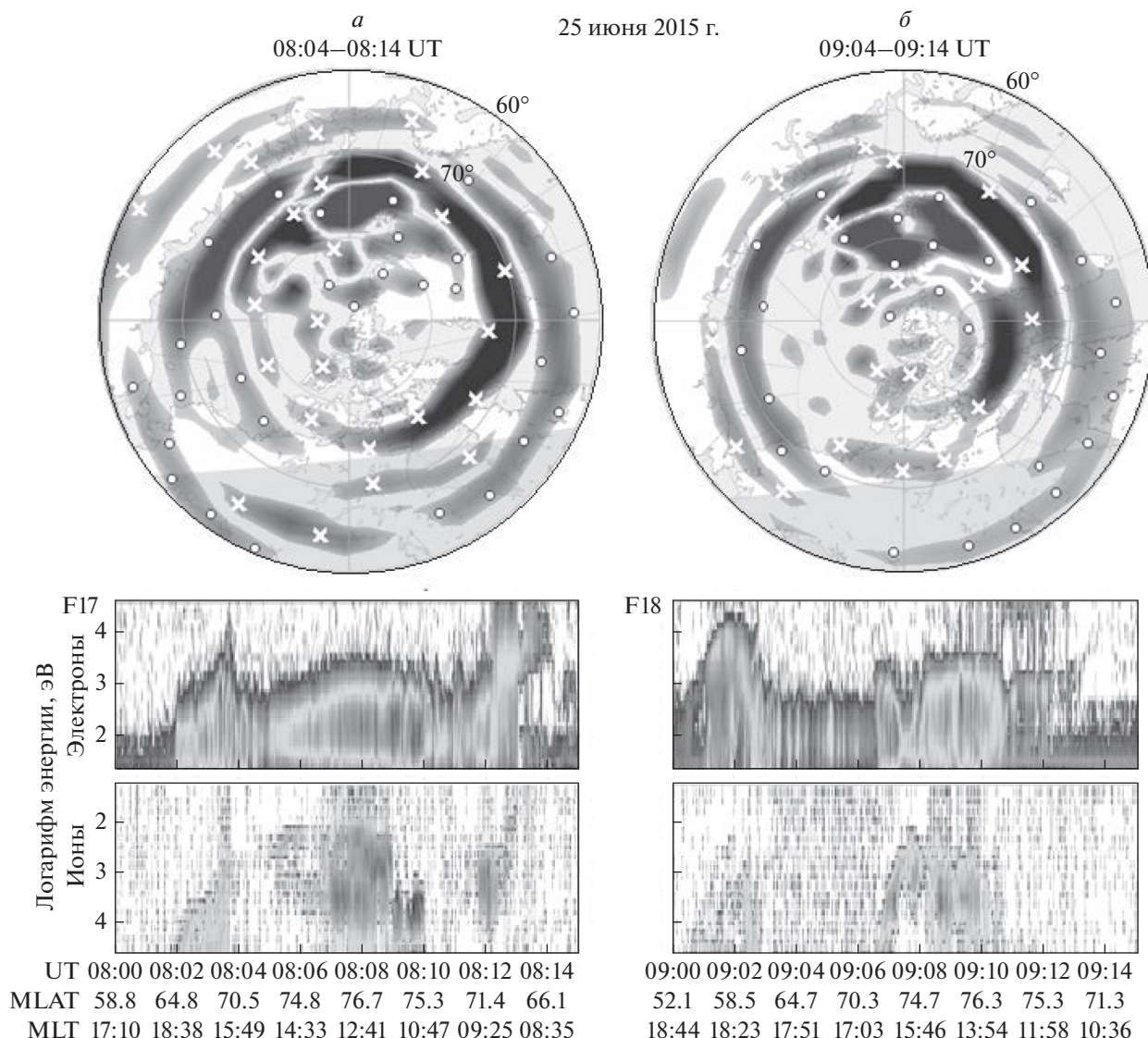


Рис. 6. Распределение продольных токов по данным AMPERE в геомагнитной системе координат и регистрация высыпающихся частиц по данным спутников DMSP F17 – (а) и F18 – (б). Токи, втекающие в ионосферу, обозначены крестиками, а вытекающие – кружками.

та было противоположным, и вытекающие продольные токи наблюдались полярнее втекающих токов, занимая почти всю полярную шапку. В обоих случаях направление ММП было преимущественно северным.

Такое же распределение втекающих и вытекающих токов в околополуденном секторе полярных широт наблюдалось и при южном направлении ММП (B_z ММП < 0), например, в 08:40–08:50 UT при B_z ММП < 0 и в 09:36–09:46 UT при B_z ММП > 0 (эти графики в данной работе не приводятся). Таким образом, в случае дневной отрицательной магнитной бухты (западный электроджет) более полярными были втекающие про-

дольные токи, а в случае положительной магнитной бухты полярнее находились вытекающие токи.

Бликие результаты были получены ранее в работе [Burch and Reiff, 1985] при исследовании пространственного положения околополуденных втекающих и вытекающих продольных токов, наблюдаемых при различных знаках B_z ММП. Вопрос о возможном источнике околополуденных продольных токов достаточно сложный, вполне возможно, что одновременно может присутствовать несколько различных источников, расположенных на замкнутых и открытых силовых линиях, как, например, это обсуждалось в работе [Wing et al., 2010].

Для исследования пространственного распределения высыпающихся частиц в дневном секторе высоких широт были использованы данные наблюдений на низкоапогейных (~830 км) спутниках DMSP F17 и F18 [Redmon et al., 2017]. Во время развития геомагнитных возмущений (25 июня в 08–10 UT), спутники DMSP дважды пересекали дневную высокоширотную область Северного полушария: спутник DMSP F17 в интервале 08:00–08:15 UT и спутник DMSP F18 в интервале 09:00–09:15 UT. Спектрограммы высыпающихся частиц, измеренных на этих спутниках, приведены на рис. 6, где в верхней части рисунка показаны карты положения продольных токов по усредненным за 10 мин данным AMPERE. Естественно, что не совсем корректно сравнивать результаты мгновенной регистрации на быстро перемещающихся в пространстве спутников DMSP с результатами 10-мин усреднения многоточечных данных AMPERE, поэтому из сопоставления этих графиков можно сделать только довольно грубо обобщенные выводы.

Спутник DMSP F17 (рис. 6а) находился в дневном секторе полярных широт в интервале ~08:04–08:14 UT и регистрировал усиленные потоки высыпающихся частиц в 08:03–08:04 UT на широтах ~68°–71° MLAT в предвечернем секторе ~16–18 MLT и в 08:12–08:13 UT на тех же широтах в утреннем секторе ~08–09 MLT. На карте AMPERE видно, в этих пространственно-временных областях утреннего и послеполуденного времени отмечались вытекающие продольные токи. Небольшой подъем на спектре DMSP в 08:08–08:09 UT в околополуденное время на широтах ~75°–76° MLAT соответствует пересечению спутником области вытекающих токов вблизи полдня в области полярных геомагнитных широт.

Спутник DMSP F18 (рис. 6б) находился в полярных широтах послеполуденного сектора в интервале ~09:08–09:12 UT и регистрировал повышенные потоки высыпающихся частиц на широтах ~75°–76° MLAT. На карте продольных токов AMPERE видно, что в это время спутник пересекал область вытекающих токов. Следовательно, как и ожидалось, данные наблюдений подтвердили, что области вытекающих из ионосферы продольных токов соответствуют областям с усиленными потоками высыпающихся частиц.

4. ВЫВОДЫ

Рассмотрены особенности геомагнитного эффекта подхода к магнитосфере Земли межпланетного магнитного облака с предшествующей областью сжатия (SHEATH) в позднюю восстановительную фазу сильной магнитной бури 21–26 июня 2015 г. Найдено, что наибольшие геомагнитные эффекты наблюдались при подходе к магнитосфере Земли ведущего края магнитного облака.

Установлено, что наиболее интенсивные геомагнитные возмущения в это время наблюдались в дневном секторе приполярных широт. Знак геомагнитного возмущения, контролировался знаком V_y -компоненты ММП и не зависел от направления V_z -компоненты ММП. Резкая смена знака V_y ММП привела к быстрой смене направления электроджета за счет быстрой перестройки структуры продольных токов.

Показано, что в околополуденном секторе в случае развития отрицательного магнитного возмущения (западный электроджет) втекающие крупномасштабные продольные токи наблюдались полярнее вытекающих токов, а в случае положительной бухты (восточной электроджет) вытекающие токи располагались полярнее втекающих. В области вытекающих продольных токов, наблюдались высыпания частиц по данным спутников DMSP F17 и F18, пересекающих эту область пространства.

Было найдено, что полярные геомагнитные возмущения сопровождалась генерацией иррегулярных длиннопериодных ($T \sim 20$ – 30 мин) пульсаций типа v_{lp} , наблюдаемых на широтах выше ~70° MLAT (предполагаемого положения каспа), т.е. в области проекции мантии. Одновременно на широтах ниже ~70° MLAT, т.е. в области проекции а замкнутых силовых линий, регистрировались более короткопериодные пульсации ($T \sim 5$ – 15 мин).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания института физики Земли им. О.Ю. Шмидта и института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Большаякова О.В., Клайн Б.И., Клейменова Н.Г., Куражковская Н.А. Особенности широтного распределения очень длиннопериодных геомагнитных пульсаций (v_{lp}) // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 27. № 1. С. 109–114. 1987.
- Большаякова О.В., Клайн Б.И., Клейменова Н.Г., Куражковская Н.А. Поляризационные характеристики высокоширотных очень длиннопериодных геомагнитных пульсаций (v_{lp}) // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 28. № 5. С. 836–838. 1988.
- Громова Л.И., Клейменова Н.Г., Левитин А.Е., Громов С.В., Дремухина Л.А., Зелинский Н.Р. Дневные геомагнитные возмущения в высоких широтах во время сильной магнитной бури 21–23 июня 2015: Начальная фаза бури // Геомагнетизм и аэрономия № 3 С. 302–313. 2016.
<https://doi.org/10.7868/S0016794016030056>
- Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю. Каталог крупномасштабных явлений сол-

- нечного ветра для периода 1976–2000 гг. // Космич. исслед. Т. 47. № 2. С. 99–113. 2009.
- Клейменова Н.Г., Большакова О.В., Троицкая В.А., Фриис-Кристенсен Е. Два вида длиннопериодных геомагнитных пульсаций вблизи экваториальной границы дневного полярного каспа // Геомагнетизм и аэрoномия. Т. 25. № 1. С. 163–164. 1985.
- Клейменова Н.Г., Большакова О.В., Куражковская Н.А., Фриис-Кристенсен Е. Очень длиннопериодные пульсации геомагнитного поля в полярных шапках и их связь с ионосферным ДРУ–током // Геомагнетизм и аэрoномия. Т. 26. № 6. С. 985–989. 1986.
- Савин С.П., Зеленый М., Романов С.А. и др. Турбулентный погранслои на границе геомагнитной ловушки // Письма в ЖЭТФ. Т. 74. С. 620–624. 2001.
- Троицков О.А., Гизлер В.А. Модель продольных токов в области дневного каспа, учитывающая влияние межпланетного магнитного поля // Геомагнитные исслед. № 27. С. 108–111. 1980.
- Anderson B.J., Takahashi K., Toth B.A. Sensing global Birkeland currents with Iridium® engineering magnetometer data // Geophys. Res. Lett. V.27. P. 4045–4048. 2000. <https://doi.org/10.1029/2000GL000094>
- Anderson B.J., Korth H., Waters C.L., Green D.L., Merkin V.G., Barnes R.J., Dyru L.P. Development of large-scale Birkeland currents determined from the Active Magnetosphere and Planetary Electrodynamics Response Experiment // Geophys. Res. Lett. V. 41(9). P. 3017–3025. 2014. <https://doi.org/10.1002/2014GL059941>
- Astafyeva E., Zakharenkova I., Alken P. Prompt penetration electric fields and the extreme topside ionospheric response to the June 22–23, 2015 geomagnetic storm as seen by the Swarm constellation // Earth, Planets and Space. V. 68(1). P. 152. 2016. <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0526-x>
- Astafyeva E., Zakharenkova I., Huba J.D., Doornbos E., Van den IJssel J. Global Ionospheric and thermospheric effects of the June 2015 geomagnetic disturbances: Multi-instrumental observations and modeling // J. Geophys. Res. Space Physics. V. 122. P. 11.716–11.742. 2017. <https://doi.org/10.1002/2017JA024174>
- Augusto C.R.A., Navia C.E., de Oliveira M.N. et al. The 2015 Summer Solstice Storm: One of the Major Geomagnetic Storms of Solar Cycle 24 Observed at Ground Level // Solar Phys. V. 293. P. 84. 2018. <https://doi.org/10.1007/s11207-018-1303-8>
- Baker D.N., Jaynes A.N., Turner D.L. et al. A telescopic and microscopic examination of acceleration in the June 2015 geomagnetic storm: Magnetospheric Multiscale and Van Allen Probes study of substorm particle injection // Geophys. Res. Lett. V. 43. P. 6051–6059. 2016. <https://doi.org/10.1002/2016GL069643>
- Burlaga L.F., Sittler E., Mariani F., Schwenn R. Magnetic loop behind an interplanetary shock: Voyager, Helios, and IMP 8 observations // J. Geophys. Res. V. 86. P. 6673–6684. 1981. <https://doi.org/10.1029/JA086iA08p06673>
- Davis T.N., Sugiura M. Auroral electrojet activity index AE and its universal time variations // J. Geophys. Res. V. 71. P. 785–801. 1966. <https://doi.org/10.1029/JZ071i003p00785>
- Gonzalez W.D., Joselyn J.A., Kamide Y., Kroehl H.W., Rostoker G., Tsurutani B.T., Vasyliunas V.M. What is a geomagnetic storm? // J. Geophys. Res. V. 99(A4). P. 5771–5792. 1994. <https://doi.org/10.1029/93JA02867>
- Gopalswamy N., Mäkelä P., Akiyama S., Yashiroa S., Xiea H., Thakur N. Sun-to-Earth propagation of the 2015 June 21 coronal mass ejection revealed by optical, EUV, and radio observations // J. Atmos. Sol-Terr. Phys. V. 179. P. 225–238. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.07.013>
- Kashcheyev A., Migoya-Orué Y., AmoryMazaudier C., Fleury R., Nava B., AlazoCuartas K., Radicella S.M. Multi-variable comprehensive analysis of two great geomagnetic storms of 2015 // J. Geophys. Res. Space Physics. V. 123. P. 5000–5018. 2018. <https://doi.org/10.1029/2017JA024900>
- Liu Y.D., Hu H., Wang R., Zhongwei Y., Bei Z., Yi A.L., Luhmann J.G., Richardson J.D. Plasma and magnetic field characteristics of solar coronal mass ejections in relation to geomagnetic storm intensity and variability // The Astrophys. J. Lett. V. 809(2), L34. 2015. <https://doi.org/10.1088/2041-8205/809/2/L34>
- Maier E.J., Kayser S.E., Burrows J.R., Klumpar D.M. The suprathermal electron contributions to high-latitude Birkeland currents // J. Geophys. Res. V. 85 (A5). P. 2003–2010. 1980. <https://doi.org/10.1029/JA085iA05p02003>
- McDiarmid I.B., Burrows J.R., Wilson M.D. Large-scale magnetic field perturbations and particle measurements at 1400 km on the dayside // J. Geophys. Res. V. 84. № A4. P. 1431–1441. 1979. <https://doi.org/10.1029/JA084iA04p01431>
- Piersanti M., Alberti T., Bemporad A. et al. Comprehensive analysis of the geoeffective solar event of 21 June 2015: Effects on the magnetosphere, plasmasphere, and ionosphere systems // Solar. Phys. V. 292. P. 169. 2017. <https://doi.org/10.1007/s11207-017-1186-0>
- Reiff P.H., Daou A.G., Sazykin. S.Y. et al. Multispacecraft observations and modeling of the 22/23 June 2015 geomagnetic storm // Geophys. Res. Lett. V. 43. P. 7311–7318. 2016. <https://doi.org/10.1002/2016GL069154.1>
- Redmon R.J., Denig W.F., Kilcommons L.M., Knipp D.J. New DMSP database of precipitating auroral electrons and ions // J. Geophys. Res. Space Physics. V. 122. P. 9056–9067. 2017. <https://doi.org/10.1002/2016JA023339>
- Troshichev O.A. Polar magnetic disturbances and field-aligned currents // Space Sci. Rev. V. 32. P. 275–360. 1982. <https://doi.org/10.1007/BF00167945>
- Tsurutani B.T., Lee Y.T., Gonzalez W.D., Tang F. Great magnetic storms // Geophys. Res. Lett. V. 19(1). P. 73–76. 1992. <https://doi.org/10.1029/91GL02783>
- Waters C.L., Anderson B.J., Liou K. Estimation of global field aligned currents using the Iridium® system magnetometer data // Geophys. Res. Lett. V. 28. P. 2165–2168. 2001. <https://doi.org/10.1029/2000GL012725>
- Wing S., Ohtani S., Newell P.T., Higuchi T., Ueno G., Weygand J.M. Dayside field-aligned current source regions // J. Geophys. Res. V. 115. P. A12215. 2010. <https://doi.org/10.1029/2010JA015837>