

УДК 533.951

РАЗВИТИЕ ВЫСОКОШИРОТНЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В МАГНИТНУЮ БУРЮ 22 ИЮЛЯ 2009 г.

© 2020 г. Л. И. Громова^{1, *}, Н. Г. Клейменова^{2, 3}, С. В. Громов¹, Л. М. Мальшева²¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта (ИФЗ РАН), г. Москва, Россия³Институт космических исследований (ИКИ РАН), г. Москва, Россия

*e-mail: gromova@izmiran.ru

Поступила в редакцию 23.03.2020 г.

После доработки 06.04.2020 г.

Принята к публикации 21.05.2020 г.

Рассмотрены особенности геомагнитных возмущений во время умеренной *CIR*-бури, наиболее интенсивной магнитной бури 2009 г., в минимуме солнечной активности. Установлено, что в главную фазу бури суббуревая активность наблюдалась не в ночном, а в утреннем секторе (07–09 MLT) авроральных геомагнитных широт (65°–67°) и сопровождалась чрезвычайно большими (до 1000 нТл) геомагнитными пульсациями диапазона *Pc5*, явно нерезонансной природы, амплитуда *Y*-компоненты волн была значительно больше, чем *X*-компоненты. В восстановительную фазу магнитной бури тангенциальный разрыв в ММП вызвал суббурю, наблюдаемую вблизи приполюсной границы аврорального овала в глобальном масштабе по долготе: от вечернего до околополуденного сектора. В дневном секторе магнитная бухта наблюдалась на несколько минут позже, чем в полуночном секторе и быстро перемещалась к полюсу, что можно интерпретировать как перемещение к полюсу границы между замкнутыми и открытыми силовыми линиями геомагнитного поля и сжатие аврорального овала.

DOI: 10.31857/S0016794020050089

1. ВВЕДЕНИЕ

Магнитные бури являются важным элементом околоземной космической погоды, особенно в годы максимума, спада и подъема солнечной активности (СА). Подавляющее число имеющихся публикаций посвящено анализу магнитных бурь именно в эти фазы СА. Магнитные бури и их геомагнитные эффекты в годы минимума солнечной активности изучены значительно хуже, поэтому их исследование является актуальной задачей. На рисунке 1а (<https://www.spaceweatherlive.com/en/solar-activity/solar-cycle>) видно, что глубокий минимум солнечной активности между 23-м и 24-м циклами СА наблюдался в 2009 г. Этот год был самым магнито-спокойным за весь период проведения качественных обсерваторских измерений [Леви-тин и др., 2014]. В течение 2009 г. было зарегистрировано несколько слабых магнитных бурь с индексом *SymH* до –40 нТл и всего одна умеренная буря (22 июля 2009), когда в главной фазе бури значение *SymH* достигло ~–90 нТл [Perez et al., 2012].

Исследованию геомагнитных эффектов больших магнитных бурь посвящено много работ, на-

пример, [Gonzales et al., 1994 и ряд других], выявлены как их общие закономерности, так и особенности развития отдельных бурь в зависимости от условий в солнечном ветре и межпланетном магнитном поле (ММП). Большие магнитные бури чаще всего связаны с подходом к магнитосфере Земли межпланетных магнитных облаков, вызванных корональными выбросами массы Солнца – *CME* (Coronal Mass Ejection) [например, Guo et al., 2010].

Другой тип магнитных бурь, обычно менее интенсивных и характеризующихся постепенным началом, связан с высокоскоростными потоками солнечного ветра из больших корональных дыр, например, [Kriger et al., 1973]. В области, где быстрые потоки солнечного ветра догоняют предшествующие им более медленные потоки, формируется область сжатия (Corotating Interaction Region – *CIR*), приводящая к развитию магнитных бурь в магнитосфере Земли, называемых *CIR*-бурями [Richardson et al., 2006; Tsurutani et al., 2006; Zhang et al., 2008]. Такие бури наиболее типичны для спада и минимума СА [Richardson et al., 2001; Tsurutani et al., 2006]. Несмотря на то, что *CIR*-бури обычно бывают более слабыми, чем *CME*-бури,

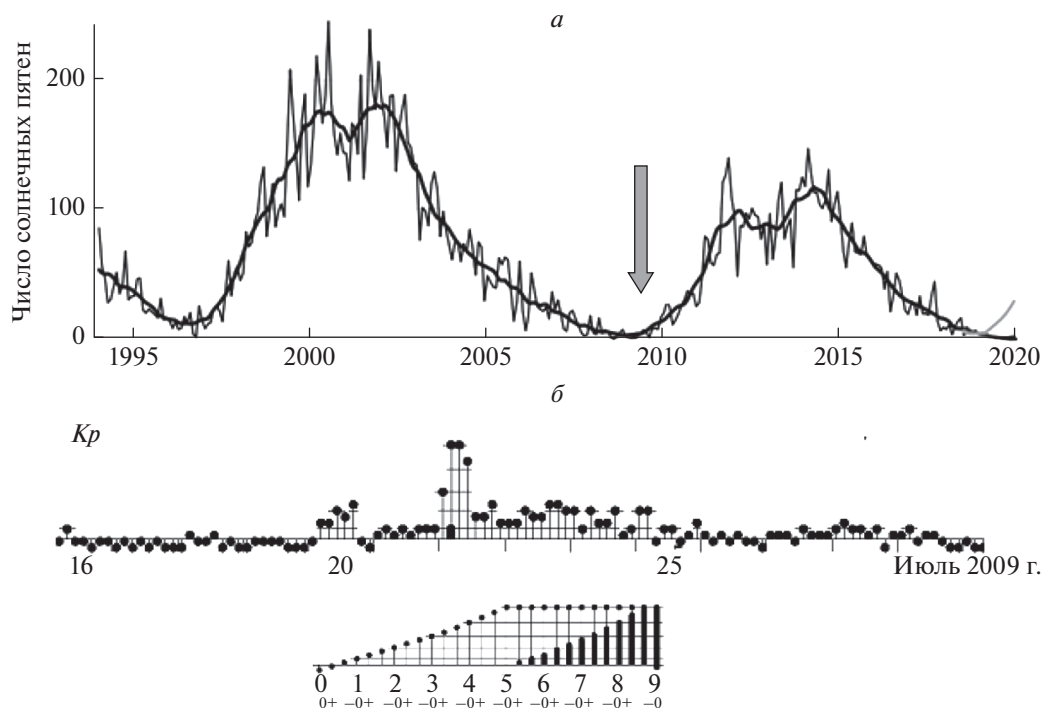


Рис. 1. Вариации солнечной активности (*а*) — во время 23 и 24-го цикла СА, (*б*) — вариации планетарной геомагнитной активности по *Kp*-индексу перед и во время магнитной бури 22 июля 2009 г.

они могут оказывать даже большее влияние на электроны радиационных поясов и кольцевой ток, чем *CME*-бури [Miyoshi and Kataoka, 2005]. В то же время наземные геомагнитные эффекты *CIR*-бурь значительно меньше исследованы, чем эффекты *CME*-бурь.

Наиболее интенсивной магнитной бурей в 2009 г., т.е. в глубоком минимуме солнечной активности, была короткая (около 10 ч) *CIR*-буря 22 июля. Целью данной работы является рассмотрение нетипичных пространственно-временных особенностей высокоширотных геомагнитных возмущений во время этой магнитной бури.

2. УСЛОВИЯ В МЕЖПЛАНЕТНОЙ СРЕДЕ И РАЗВИТИЕ МАГНИТНОЙ БУРИ

На рисунке 1б (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/kp/>) видно, что магнитная буря 22 июля наблюдалась после нескольких дней относительно магнитоспокойного периода с $Kp \sim 0$, за исключением небольшого возмущенного интервала 20 июля с $Kp \sim 2$. На рисунке 2 показаны условия в межпланетной среде (вариации параметров ММП и солнечного ветра) во время этой бури по базе данных OMNI с 1-мин разрешением (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>). Магнитная буря началась около 02 UT с появлением отрицательных значений *SymH* на фоне южного направления ММП (B_z ММП порядка -5 нТл). С 02 UT начали воз-

растать скорость и плотность солнечного ветра, а также значения B ММП. Поскольку скорость солнечного ветра в главную фазу бури оставалась небольшой и составляла всего 300–350 км/с, то, несмотря на резкое, почти пятикратное возрастание плотности солнечного ветра (до ~ 50 см $^{-3}$), его динамическое давление в максимуме бури было всего 12 нПа. За область сжатия в межпланетной среде следовала область возрастания скорости солнечного ветра (до ~ 400 км/с), но с более низкой его плотностью (порядка 10–15 см $^{-3}$). Такая динамика параметров солнечного ветра типична для *CIR*-бурь [Tsurutani et al., 2006] и существенно отличается от их поведения во время *CME*-бурь [Borovsky and Denton, 2006].

Главная фаза магнитной бури с максимальным значением $Kp = 6$ продолжалась до ~ 06 UT, когда индекс *SymH* достиг ~ -90 нТл. Около 05:50 UT знак B_z -компоненты ММП сменился на положительный (рис. 2), т.е. прекратилось поступление энергии в магнитосферу из солнечного ветра. После этого градиент *SymH* стал положительным, и интенсивность кольцевого тока начала уменьшаться [Perez et al., 2012]. Плотность солнечного ветра и его динамическое давление также стали быстро падать, следовательно, началась восстановительная фаза магнитной бури.

Однако около 07:20 UT B_z -компонента ММП вновь стала отрицательной, что с небольшой задержкой вызвало рост суббуревой активности

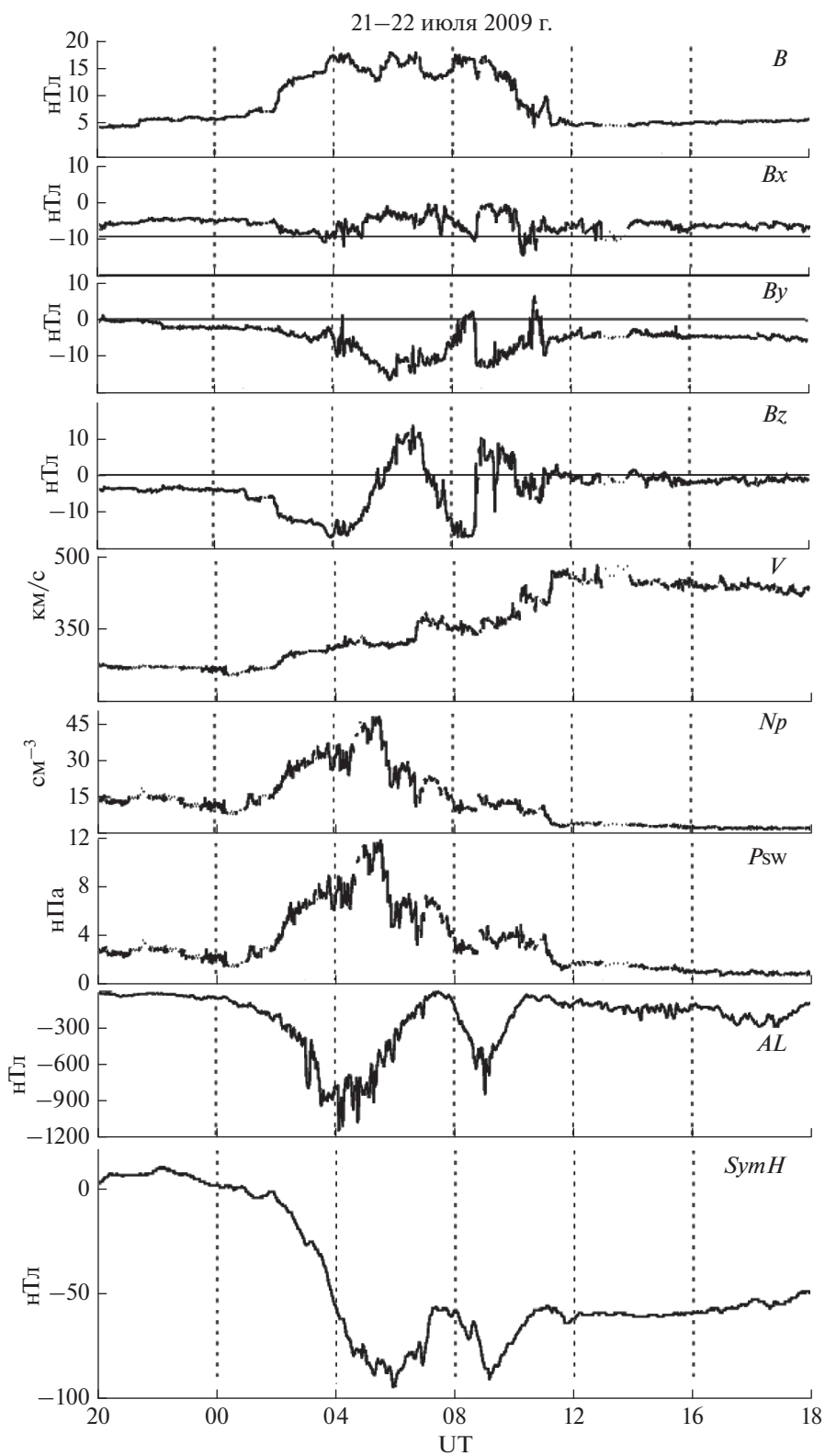


Рис. 2. Вариации параметров солнечного ветра и ММП перед и во время бури 22 июля 2009 г.

(см. вариации AL -индекса на рис. 2). Такая ситуация в межпланетной среде иногда рассматривается в литературе как вторая ступень магнитной бури [Kamida et al., 1998], поскольку значения $SymH$ -индекса вновь начинают уменьшаться. На рисунке 2 видно, что после 08 UT значения $SymH$ -индекса уменьшились от ~ -50 нТл до ~ -80 нТл. Динамическое давление солнечного ветра к этому времени уменьшилось почти втрое, хотя скорость солнечного ветра несколько возросла. Но в 08:50 UT внезапно скачком изменились величина и знак всех компонент ММП при почти постоянной скорости и плотности солнечного ветра, что согласно [Нишида, 1978] можно интерпретировать как тангенциальный разрыв. B_z -компонента ММП вновь стала положительной, значения B ММП начали быстро уменьшаться, т.е. вновь началась фаза восстановления бури. Так как скорость солнечного ветра оставалась относительно высокой (около 450 км/с), и значения B_z ММП были слабо отрицательными, то интенсивность кольцевого тока оставалась значительной, и $SymH$ -индекс с 11 до 17 UT оставался на довольно высоком уровне (-50 нТл).

Сложная картина космической погоды во время этой бури разными авторами интерпретировалась по-разному. Так, в работе [Perez et al., 2012]: где исследовалась динамика спектральных особенностей ионов кольцевого тока во время этой магнитной бури (по спутниковым наблюдениям), был сделан вывод, что главная фаза бури окончилась в 06 UT. После 06 UT началась восстановительная фаза бури, во время которой наблюдалось кратковременное изменение знака B_z ММП с положительного на отрицательный с соответствующими последствиями. Однако в работе [Steeja et al., 2011], где рассматривались вариации электрического поля в дневной ионосфере на экваториальных широтах Индии во время этой магнитной бури, весь временной интервал от 01 до 10 UT авторами был отнесен к особенностям главной фазы бури.

По нашему мнению, следуя работе [Perez et al., 2012], главной фазой бури следует считать временной интервал до 06 UT, когда наблюдались отрицательные значения B_z -компоненты ММП и характерная для CIR-бурь область сжатия (плотный транзиент) в солнечном ветре. Анализируя данные наблюдений на геостационарных спутниках GOES 11 и 12, находившихся в ночном секторе магнитосферы, авторы работы [Perez et al. 2012] показали, что до 06 UT наблюдалось вытягивание магнитного поля в хвост магнитосферы (уменьшение значений B_z компоненты локального магнитного поля), а после 06 UT значения B_z начали увеличиваться, что свидетельствует о постепенном возвращении топологии магнитного поля к прежнему состоянию. Таким образом, геомагнитные вариации, наблюдаемые после 06 UT, мо-

гут быть отнесены к особенностям развития восстановительной фазы этой бури, в позднюю стадию которой наблюдалось 2-х часовое появление больших отрицательных значений B_z -компоненты ММП (рис. 2).

3. ВЫСОКОШИРОТНЫЕ ГЕОМАГНИТНЫЕ ЭФФЕКТЫ БУРИ

Рассмотрим особенности развития геомагнитных возмущений, наблюдаемых на земной поверхности в высоких широтах во время обсуждаемой магнитной бури 22 июля 2009, продолжавшейся всего 10 ч (02–12 UT). Динамика общей наземной магнитной активности может быть оценена по вариациям глобального 1-мин SML -индекса [Newell and Gjerloev, 2011; Gjerloev, 2012]. Этот индекс является обобщением широко используемого индекса суббуревой активности AL [Davis and Sugiura, 1966]. Он вычисляется по той же методике, что и AL -индекс, но по данным наблюдений не на 12 авроральных станциях северного полушария, как AL -индекс, а по данным сети станций SuperMAG (<http://supermag.jhuapl.edu/>), расположенных в большом диапазоне геомагнитных широт от 40° до 80° . Поэтому вариации SML -индекса можно рассматривать как временные вариации глобальной магнитной возмущенности на земной поверхности.

Вариации SML -индекса в интервале 00–15 UT показаны на рис 3б. В общих чертах они повторяют вариации AL -индекса (рис. 2), подтверждая, что основная геомагнитная активность во время бури наблюдалась в авроральных широтах. На верхнем графике рис. 3а приведены вариации B_z -компоненты ММП, сопоставление которых с вариациями SML -индекса показывает, что наземная геомагнитная активность обусловлена появлением отрицательных значений B_z -компоненты ММП. При этом наибольшая геомагнитная возмущенность в течение бури типично наблюдалась в главную фазу бури в ~ 03 – 05 UT, в это время B_z ММП составляла ~ -16 нТл.

Вариации планетарного SML -индекса являются результатом сложения ночной и дневной магнитной активности в большом интервале широт. Во время обсуждаемой, относительно короткой магнитной бури к дневным наблюдениям можно отнести данные европейских обсерваторий, включая высокоширотные станции Скандинавии, а к ночным условиям – данные станций на американском континенте, а также высокоширотных станций Гренландии.

3.1. Дневные высокоширотные возмущения

Для анализа дневных высокоширотных геомагнитных возмущений воспользуемся данными наблюдений плотной сети магнитометров Скандинавии.

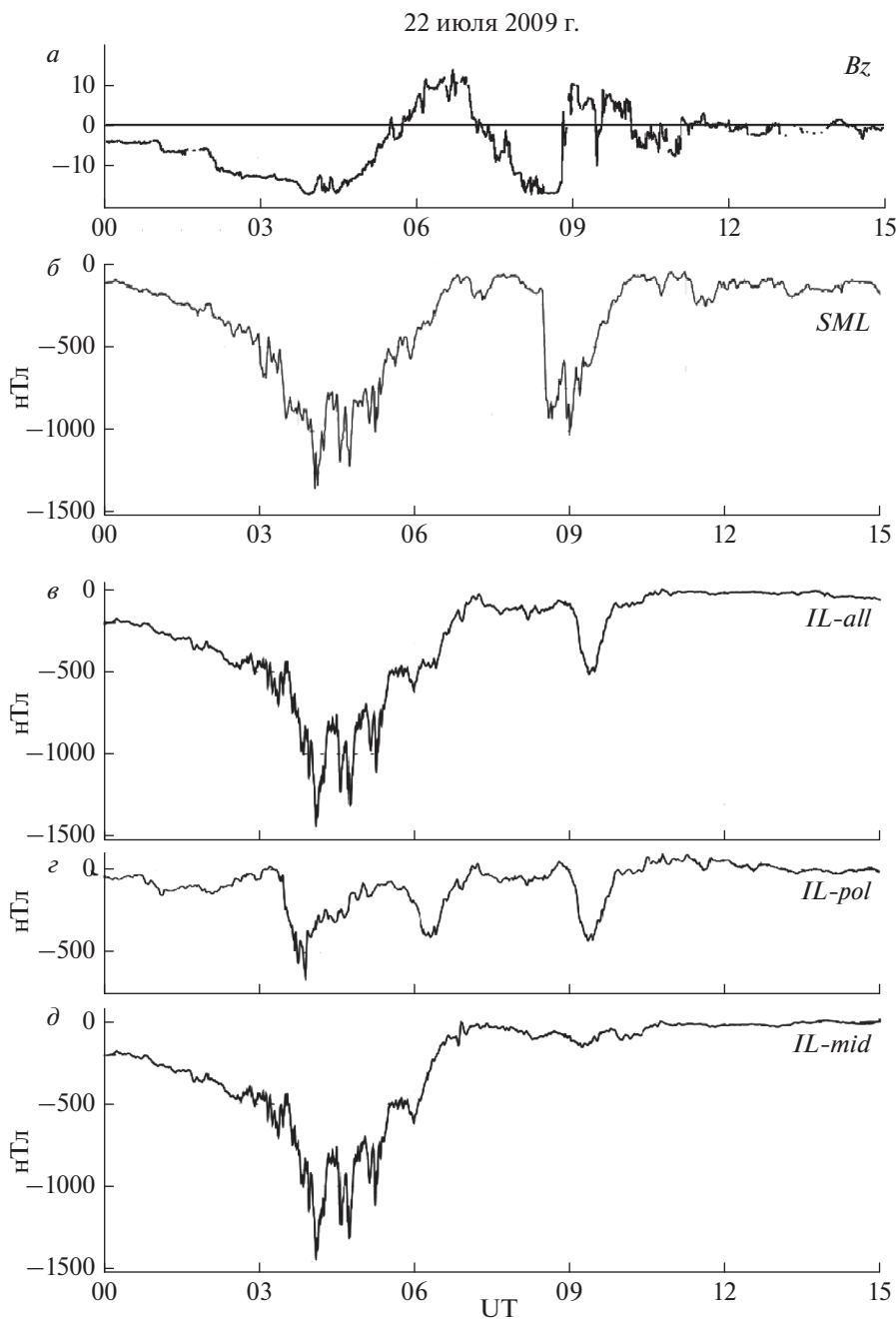


Рис. 3. Геомагнитные возмущения во время магнитной бури 22 июля 2009 г. Сверху вниз: (а) B_z -компонента ММП; (б) вариации SML -индекса глобальной геомагнитной активности; (е) вариации IL -индекса дневной высокоширотной активности, вычисленного по данным всех (IL -all) станций профиля IMAGE; (з) то же самое только для полярных (IL -pol) и (д) только для более низкоширотных (IL -mid) станций.

динавии (IMAGE), включающей 41 наземную станцию в диапазоне геомагнитных широт 47° – 75° (<http://space.fmi.fi/image/>) и долгот 87° – 115° с геомагнитным полднем около 09 UT. Во время обсуждаемой бури скандинавская сеть магнитометров располагалась последовательно в утреннем и дневном секторах. Общая геомагнитная активность на профиле IMAGE может быть оценена с

помощью специального локального IL -индекса активности IMAGE (*Electrojet indicator IL*) [Tanskanen, 2009], представленного на рис. 3в, вычисляемого по той же методике, что и SML -индекс глобальной сети SuperMAG, но по данным наблюдений на станциях профиля IMAGE. Заметим, что данные IMAGE включены в вычисления SML -индекса (рис. 3б). Сопоставляя временные

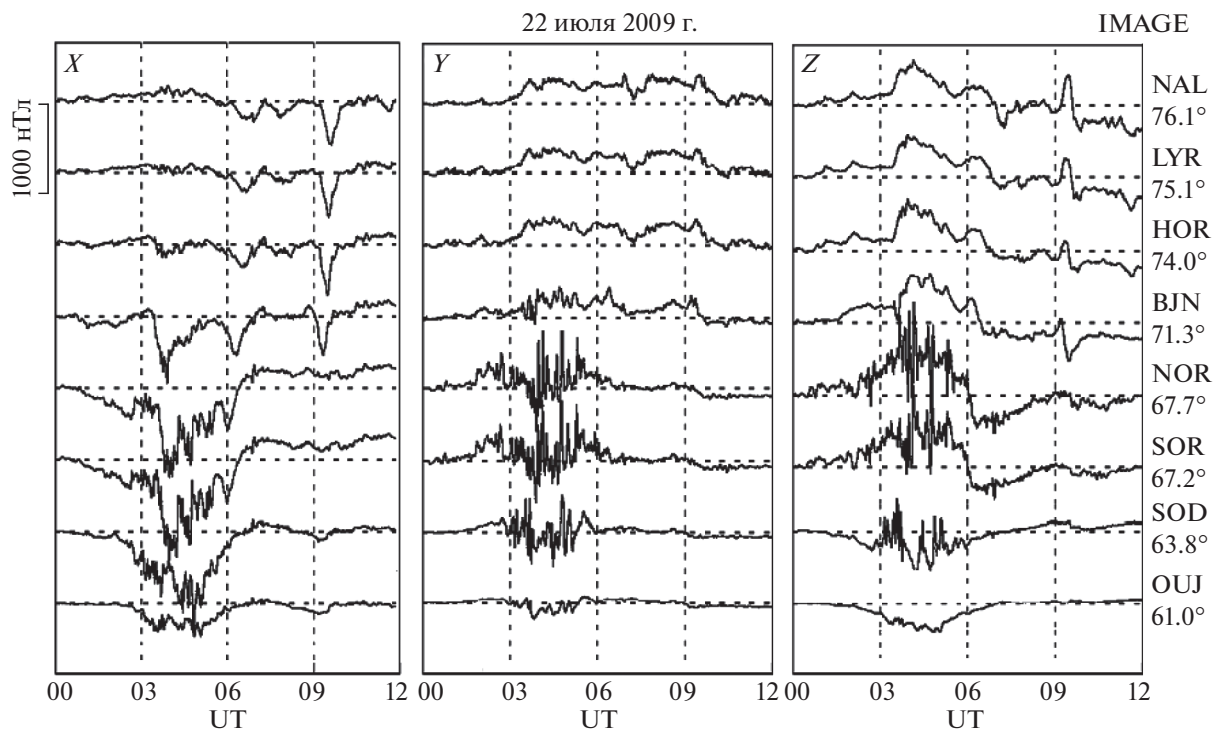


Рис. 4. Магнитограммы 3-х компонент (X , Y , Z) геомагнитного поля некоторых станций скандинавского профиля IMAGE.

вариации и значения амплитуд индексов SML и IL , можно сделать вывод, что во время главной фазы бури (02–06 UT) магнитные возмущения на Земле наблюдались, главным образом на профиле IMAGE, т.е. в утреннем секторе магнитосферы (05–09 MLT).

Однако в восстановительную фазу бури (06–10 UT) временной ход и значения индексов SML и IL были существенно различными. Максимальное значение SML -индекса наблюдалось в 08:30–09:15 UT и было порядка 1000 нТл, а наибольшие значения IL -индекса были всего около 500 нТл и наблюдались немного позднее, в ~09:15–09:40 UT (около местного магнитного полдня). Таким образом, в восстановительную фазу бури наиболее интенсивные геомагнитные возмущения наблюдались не на утренне-дневной стороне, как это типично для восстановительной фазы бури, а в ночном секторе Земли.

Поскольку геомагнитные возмущения на различных геомагнитных широтах часто бывают различными, были вычислены значения IL -индекса раздельно для станций, лежащих на широтах выше и ниже 70° (наиболее вероятное положение полярной границы аврорального овала в утреннем секторе). Полученные результаты показаны на рис. 3г для полярных станций и на рис. 3д для более низкоширотных станций. Видно, что временной ход кривых различен. В высоких широтах

выделяются три относительно короткие суббури с амплитудой около 500 нТл, а в более низких широтах – почти 3-х часовое (03–06 UT) возмущение со сложной временной структурой и с амплитудой ~1300 нТл, т.е. почти такой же, как и у SML -индекса на рис. 3б.

Рассмотрим дневные геомагнитные возмущения более подробно по отдельным выбранным магнитограммам профиля IMAGE на различных широтах. На рисунке 4 приведены вариации 3-х компонент магнитного поля на 8 станциях IMAGE, международные коды и геомагнитные широты показаны на графиках справа.

Видно, что в главную фазу бури (02–06 UT) основные возмущения наблюдались в авроральных широтах. Судя по вариациям Z -компоненты магнитного поля, центр электроструи в это время находился на широтах между SOR и SOD. При этом в X -компоненте поля четко видно (особенно в BJN), что главная фаза магнитной бури началась с суббури с максимумом около 04 UT между BJN и SOR и окончилась также суббурей, с уменьшающейся с широтой амплитудой и быстро перемещающейся от SOR к NAL.

Но основной особенностью главной фазы суббури являлось возбуждение в авроральных широтах (SOD–NOR) экстремально интенсивных (порядка 500–700 нТл) геомагнитных пульсаций диапазона $Pc5$, амплитуда которых резко умень-

шалась как к более низким широтам (OUJ), так и к более высоким (BJN). В отличие от резонансных колебаний, которые обычно регистрируются в X -и Z -компонентах магнитного поля и отсутствуют в Y -компоненте [Poulter et al., 1982; Samson et al., 1992; Clauer et al., 1997], в обсуждаемом событии $Pc5$ пульсации наблюдались во всех 3-х компонентах поля с наибольшей амплитудой в Y -компоненте (почти до 1000 нТл!). Как правило, резонансные пульсации $Pc5$ на земной поверхности наблюдаются в восстановительную фазу предшествующей им суббури [например, Baker et al., 2003], однако, в данном событии $Pc5$ пульсации были зарегистрированы в течение всего утреннего возмущения и прекратилась с их окончанием.

В восстановительную фазу бури, в 09–10 UT дневные геомагнитные возмущения регистрировались только в высоких, приполярных широтах (BJN-NAL) и представляли собой короткую (менее часа) суббурю, быстро перемещающуюся по широте. В более низких широтах в это время никаких возмущений не отмечалось.

3.2. Ночные высокоширотные возмущения

Во время обсуждаемой магнитной бури американский сегмент станций находился в ночном секторе (с вечерних часов MLT до ранних утренних). На рисунке 5 показаны магнитограммы (X -компонента поля) нескольких высокоширотных станций (<https://www.intermagnet.org>), расположенных на разных долготах, но на близких геомагнитных широтах (порядка 70°). Международные коды станций и их геомагнитная широта показаны на графиках справа, местное магнитное время (MLT) для каждой станции приведено для 09 UT.

Видно, что в главную фазу бури (02–06 UT) одновременно с большим (более 1000 нТл) утренним суббуревым возмущением, наблюдаемым в авроральных широтах на профиле IMAGE (рис. 4), на авроральных широтах вечернего сектора (16–19 MLT), на станции СМО (64°), регистрировался типичный для такой ситуации восточный электроджет (положительная магнитная бухта с амплитудой порядка 300–400 нТл). В предполуночном секторе в FCC и IQA, как и в утреннем секторе на профиле IMAGE, наблюдались две короткие суббури около 04 и 06 UT. Таким образом, в главную фазу обсуждаемой магнитной бури сложилась нетипичная ситуация, когда основная геомагнитная активность наблюдалась не в ночном секторе, а в утреннем.

Восстановительная фаза бури характеризовалась развитием интенсивной (до ~ 800 нТл) суббури с резким началом в 09 UT в околополуночном секторе (YKC). Суббуря наблюдалась одновре-

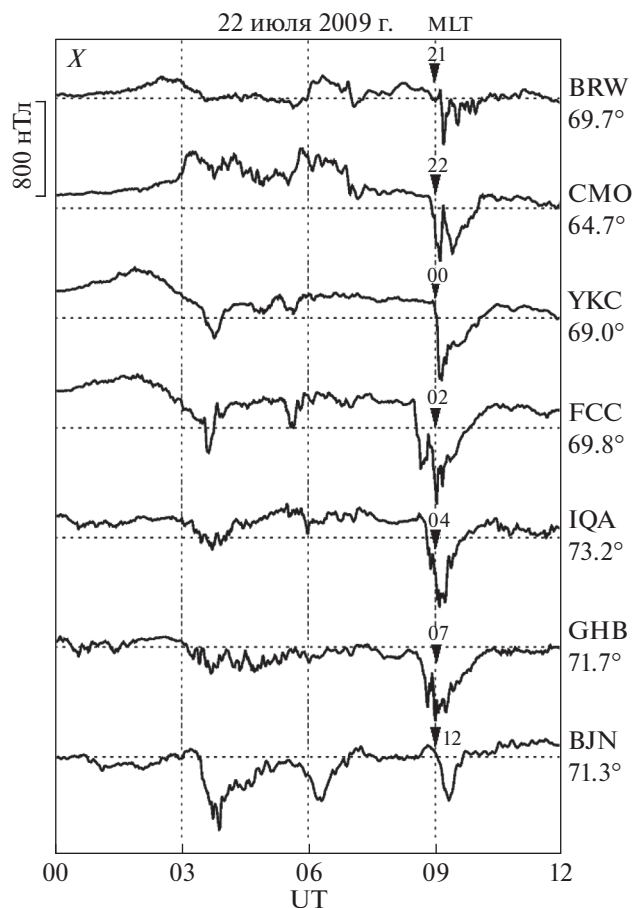


Рис. 5. Ночные геомагнитные возмущения во время магнитной бури 22 июля 2009 г. по данным магнитограмм некоторых приполярных станций сети INTERMAGNET. Стрелкой показано местное геомагнитное время, соответствующее 09 UT.

менно в очень большом долготном интервале (рис. 5): от вечерних (21 MLT, BRW) до утренних и даже околополуденных часов местного магнитного времени (в 07 MLT, GHB и в 12 MLT на 71° – 76° , BJN-NAL). При этом со временем магнитная бухта быстро перемещалась на более высокие широты, амплитуда бухты в ночном секторе была почти вдвое больше, чем в дневном. Наиболее вероятным триггером этой суббури мог быть тангенциальный разрыв в ММП (рис. 2) на фоне южного ММП, когда около 09 UT скачком изменился знак всех компонент ММП. Этот скачок был зарегистрирован и в околополуночном секторе на геостационарном спутнике GOES-11 [Perez et al., 2012, рис. 3] в вариациях B_z -компоненты локального магнитного поля.

Следует отметить, что в 08–09 UT при большом южном ММП (B_z ММП ~ -14 нТл) в послеполуночном и утреннем секторах MLT (FCC и GHB, соответственно), на геомагнитных широтах около 70° , за 25–30 мин до начала обсуждаемой

выше суббури было зарегистрировано резкое начало более ранней бухты, что четко видно и в вариациях SML -индекса планетарной геомагнитной активности (рис. 3б). В вечернем секторе (СМО, BRW) этого возмущения не наблюдалось. На приведенных в работе [Perez et al., 2012] рис. 3 и 4 показана асимметрия магнитных возмущений в вечернем (дополуночном) и раннем утреннем (послеполуночном) секторах на геостационарной орбите. Так, на спутнике GOES-12, находившемся в это время в послеполуночном секторе магнитосферы (в районе долготной проекции FCC), в B_z -и B_y -компонентах локального магнитного поля в ~08:20 UT был зарегистрирован резкий импульс, который не наблюдался на геостационарном спутнике GOES-11, находящемся в предполуночном секторе магнитосферы (в районе долготной проекции BRW). Таким образом, можно предположить, что долготная асимметрия, наблюдаемая в развитии этого возмущения на земной поверхности, является результатом азимутальной асимметрии магнитных возмущений в ночной магнитосфере.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Магнитная CIR-буря 22 июля 2009 г. оказалась уникальной, не только потому, что была наиболее сильной бурей в глубоком минимуме солнечной активности, но и потому, что наземные геомагнитные возмущения во время ее главной и восстановительной фазы были нетипичными.

Главная фаза магнитной бури началась с переходом к магнитосфере Земли плотного (N_p до $\sim 50 \text{ см}^{-3}$) образования в межпланетном пространстве, в области, где более быстрый поток солнечного ветра догнал более медленный поток. Это произошло на фоне значительных отрицательных величин B_z -компоненты ММП (до ~ -16 нТл). Заметим, что небольшие (до ~ -4 нТл) отрицательные значения B_z -компоненты ММП наблюдались и перед бурей в течение нескольких дней.

Усиленное динамическое давление солнечного ветра вызвало сжатие дневной магнитосферы и вытягивание ее в хвост на ночной стороне, что и наблюдалось [Perez et al., 2012, рис. 3] на геостационарном спутнике GOES-12. Зарегистрированная на этом спутнике диполяризация (около 03 UT) привела к возрастанию суббуревых возмущений, которые оказались наиболее интенсивными в утреннем секторе Земли (рис. 3). Это было неожиданно, поскольку, как правило, суббуревая активность во время главной фазы магнитной бури отмечается в предполуночном или в ночном секторе, а не в утреннем.

Анализ данных показал, что в главную фазу бури наибольшая суббуревая активность наблюдалась в 04–05 UT (рис. 3) в утреннем секторе (07–

08 MLT) на геомагнитных широтах 64° – 67° (SOD-SOR). На рисунке 6 приведено вычисленное положение зон высыпания заряженных частиц различной энергии в координатах исправленной геомагнитной широта – местное геомагнитное время, построенное по разработанной в ПГИ модели (<http://webapps.pgia.ru/apm-test/>), основанной на статистическом исследовании данных наблюдений на спутниках DMSP F6 и F7 в 1986 г, т.е. в минимуме солнечной активности. Более светлая зона (1) это область дискретных высыпаний аврорального овала (AOP – auroral oval precipitation), к экватору от него располагается зона (2) диффузного, т.е. более жесткого высыпания (DAZ – diffuse auroral zone), на полярной границе овала находится область (3) мягких диффузных высыпаний (SDP – soft diffuse precipitation). Положение этих зон зависит от величины AL и Dst индексов в исследуемый интервал времени. На рисунке 6а распределение зон высыпаний построено для главной фазы магнитной бури в 05 UT. Как и следовало ожидать, область наиболее интенсивной утренней суббуревой активности (HOR-SOD) проецировалась в зону 1, т.е. в зону дискретных высыпаний аврорального овала. В то же время остается неясным вопрос, почему суббури в утреннем секторе оказались более интенсивной, чем в ночном.

Другой особенностью главной фазы бури 22 июля 2009 г. было возбуждение необычно интенсивных геомагнитных пульсаций диапазона $Pc5$ как тонкой волновой структуры утренней суббури. С окончанием суббури закончились и пульсации. При этом амплитуда $Pc5$ пульсаций в Y -компоненте поля была почти вдвое выше, чем в X -компоненте, что не позволяет отнести их к резонансным колебаниям. В отличие от резонансных пульсаций $Pc5$, имеющих, как правило, монокromaticкий характер, обсуждаемые пульсации характеризовались хаотическим появлением волн разных частот. Такие широкополосные колебания больше напоминают геомагнитные пульсации, наблюдаемые вблизи проекции дневного полярного каспа, т.е. так называемые пульсации типа $ipcl$ (irregular pulsations at the cusp latitudes), впервые обнаруженные в работах [Troitskaya and Bolshakova, 1977; Большакова и Троицкая, 1977]. Но геомагнитные широты, на которых наблюдались обсуждаемые $Pc5$ пульсации, были слишком низкими для возможного положения дневного каспа.

Поскольку эти пульсации были зарегистрированы не после суббури, что типично для резонансных $Pc5$, а во время суббури, мы предполагаем, что они представляют волновые вариации в ионосферной токовой системе, связанной с суббурей, как это было предложено в работе [Motoba et al., 2002]. В пользу такого предположения может быть преобладание Y -компоненты пульсаций над

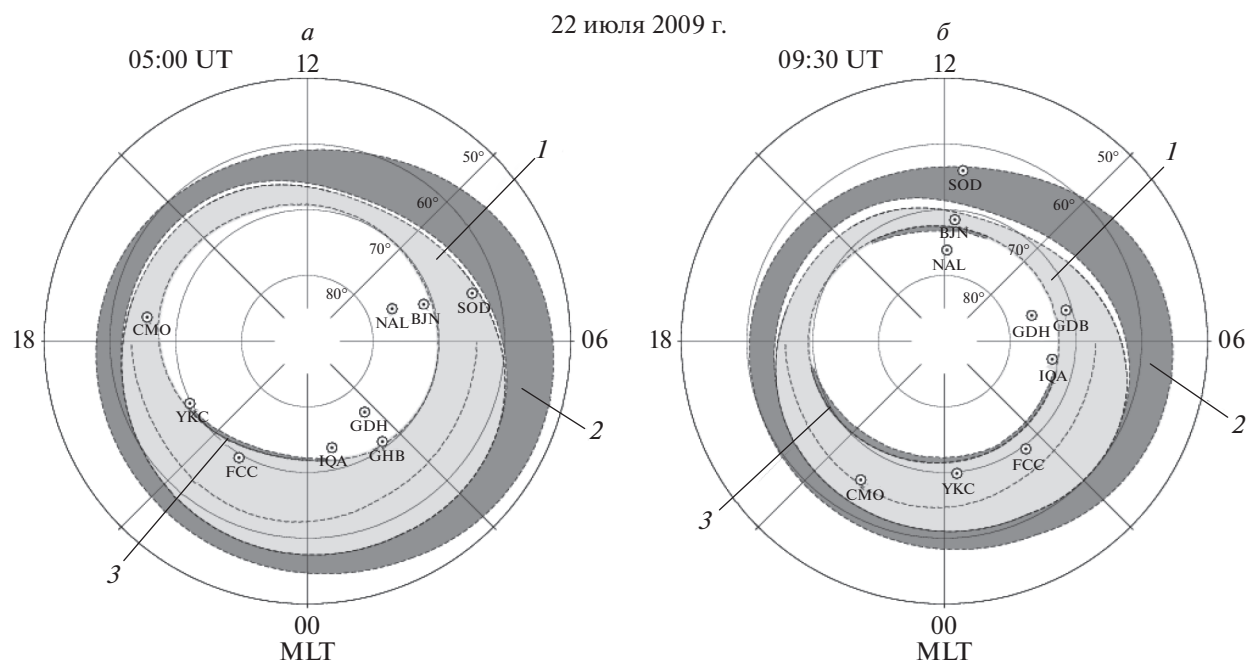


Рис. 6. Распределение зон высыпания высокоширотных электронов различной энергии, вычисленное по модели ПГИ в главную (а) и восстановительную (б) фазу магнитной бури. Подробности в тексте.

X -компонентой, независимость периода колебаний от широты точки наблюдения, регистрация $Pc5$ волн на станциях, расположенных на широтах мягких авроральных высыпаний (рис. 6а) и в той же области пространства, что и магнитная бухта. При этом, волны на частотах, совпадающих с резонансной частотой данной L -оболочки, будут усиливаться, создавая сложную спектральную структуру колебаний. Заметим, что резонансные $Pc5$ обычно регистрируются в области более энергичных высыпаний (DAZ), поскольку, по мнению ряда исследователей, именно $Pc5$ приводят к ускорению и высыпанию частиц радиационного пояса. Источником наблюдаемых флуктуаций ионосферного электрического тока в диапазоне $Pc5$ могут быть слабые флуктуации магнитного поля в хвосте магнитосферы, которые в это время регистрировались в Bz -компоненте локального магнитного поля на геостационарном спутнике GOES-12 в ночном секторе [Perez et al., 2012].

Восстановительная фаза бури 22 июля 2009 г. также была нетипичной за счет сложной ситуацией в межпланетной среде. Так, типичное для восстановительной фазы бури северное направление ММП около 07 UT изменилось на южное (рис. 2), т.е. Bz компонента ММП стала отрицательной. Затем, около 09 UT в ММП был зарегистрирован тангенциальный разрыв, и Bz компонента ММП вновь стала положительной, а Bu компонента отрицательной. Эта резкая неоднородность в ММП проявилась как скачок Bz -компоненты локально-

го магнитного поля в околополуденном секторе на геостационарном спутнике GOES-11 [Perez et al., 2012, рис. 3] и вызвала развитие суббури в магнитосфере Земли. Суббуря наблюдалась одновременно в большом интервале долгот: от вечерних до околополуденных часов (рис. 5), демонстрируя глобальный характер азимутального растекания западной ионосферной электроструи. При этом амплитуда магнитной бухты в ночном секторе была почти вдвое больше, чем в дневном, и началась она в ночном секторе на несколько минут раньше, чем в дневном.

Дневные магнитные бухты в полярных широтах неоднократно наблюдались и ранее при положительных Bz ММП [Левитин и др., 2015; Клейменова и др., 2015; Громова и др., 2016; Gromova et al., 2017]. Генерация таких возмущений связывалась с усилением приполярных продольных электрических токов системы NBZ [например, Iijima et al., 1998; Antonova and Ovchinnikov, 1999, 2001; Stauning, 2002]. Но в отличие от этих исследований, дневная полярная бухта 22 июля 2009 г. наблюдалась не только в дневном, но и в ночном секторе. Наибольшая амплитуда суббури была зарегистрирована вблизи местной геомагнитной полночи (YKC). В околополуденном секторе на близкой геомагнитной широте (BJN) суббуря была значительно слабее и началась на несколько минут позже, чем в полуночном секторе, что позволяет предположить, что ее источник находился в ночной магнитосфере.

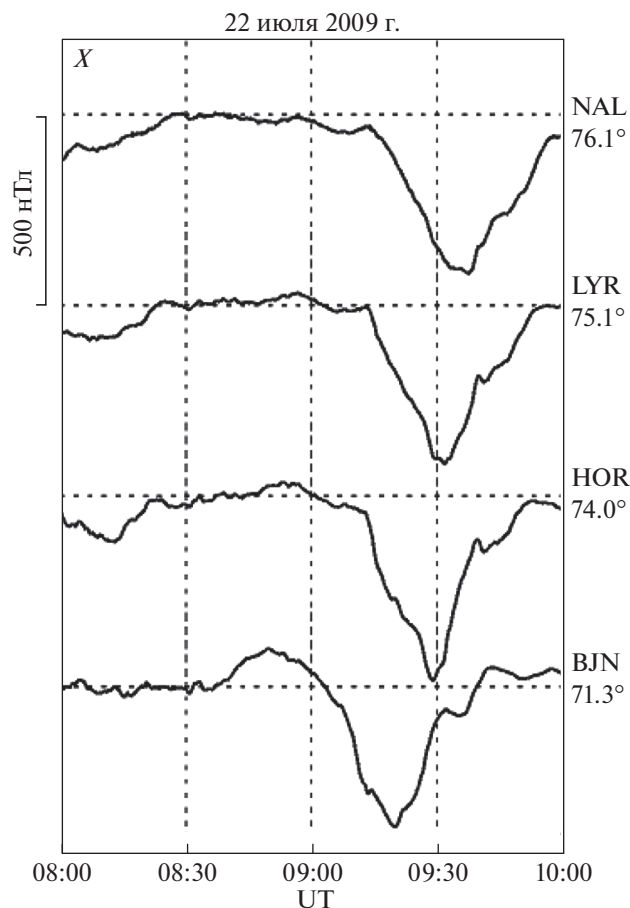


Рис. 7. Дневная полярная магнитная бухта, зарегистрированная на станциях профиля IMAGE в восстановительную фазу магнитной бури.

Рассмотрим, в какой области высокоширотных высыпаний по модели ПГИ наблюдалась обсуждаемая суббуря. На рисунке 6б это распределение показано для 09:30 UT 22 июля 2009 г. (время наибольшей интенсивности дневной полярной суббури). Видно, что станции, магнитogramмы которых приведены на рис. 5, располагались вблизи полярной границы аврорального овала, т.е., обсуждаемая суббуря развивалась в замкнутой магнитосфере, вблизи ее полярной границы. Такое предположение было подтверждено наблюдением высыпаний заряженных частиц на низкоорбитальном спутнике DMSP F16 (<http://sd-www.jhuapl.edu/Aurora/spectrogram>) 22 июля 2009 г., пересекающем геомагнитные широты 72° – 76° вблизи скандинавского меридиана IMAGE в 09:46–09:48 UT, т.е. во время магнитной бухты, наблюдаемой в NAL (рис. 7). На спутнике в это время регистрировались интенсивные потоки высыпавшихся ионов с энергией ~ 2 – 3 кэВ и электронов с энергией ~ 3 кэВ (соответствующая спектрограмма-здесь не приводится), интерпре-

тируемые как пересечение спутником области низкоширотного погранслоя магнитосферы (LLBL).

Интересной особенностью обсуждаемой магнитной бухты в 09–10 UT было не только ее глобальное азимутальное распределение, но и быстрое широтное перемещение в сторону полюса. Наблюдения показали, что в утреннем (07 MLT, Гренландия,) и околополуденном (12 MLT, Скандинавия) секторах магнитная бухта со временем перемещалась к полюсу. Так, максимум бухты на геомагнитной широте $\sim 70^{\circ}$ в GHB и BJN наблюдался в 09:15–09:20 UT соответственно, а на широте $\sim 76^{\circ}$ в GDH и NAL в 09:25–09:35 UT соответственно, т.е. примерно на 15 мин позже. Это четко видно на рис. 7, где приведены магнитogramмы станций скандинавского профиля. Скорость перемещения магнитной бухты к полюсу составляла около 0.5 км/с.

Подобные перемещающиеся к полюсу возмущения (транзиенты) наблюдались при положительной B_z компоненте ММП в высокоширотных дневных полярных сияниях как в Северном полушарии [например, Vorobjev et al., 1975; Sandholt et al., 1986; Fasel, 1995; Øieroset et al., 1997; Sandholt et al., 1998 и др.], так и в Южном полушарии [Sato et al., 1999]. Такие сияния получили специальные термин – “движущиеся к полюсу авроральные формы” (“poleward moving auroral forms” – PMAFs [Sandholt et al., 1986; Fasel, 1995]).

Так, в Антарктиде всплески дневных сияний (auroral transients), движущихся к полюсу со скоростью ~ 0.5 км/с, наблюдались на 4-х автоматических станциях камер всего неба (all-sky cameras), расположенных на геомагнитных широтах 70° – 80° , они четко коррелировали с появлением положительных значений B_z ММП [Sato et al., 1999]. Более подробно морфология дневных движущихся к полюсу сияний и их связь с вариациями и направлением ММП исследовалась в Арктике на ст. NAL на Шпицбергене с помощью меридионального сканирующего фотометра [например, Sandholt et al., 1986; Sandholt, 1991; Øieroset et al., 1997; Sandholt et al., 1998].

Была установлена тесная связь таких сияний с пересоединением межпланетного и земного магнитного поля и усилением вытекающих продольных электрических токов [например, Sandholt, 1991]. Можно предположить, что исследуемая дневная полярная бухта в 09–10 UT имеет тот же источник, что и PMAFs, поэтому широтное перемещение бухты обусловлено перемещением к полюсу области пересоединения и связанных с ним усилением вытекающих продольных токов. К сожалению, буря 22 июля 2009 г. произошла летом, когда наблюдения полярных сияний невозможны.

Известно [Øieroset et al., 1997; Watanabe et al., 2005], что при положительной B_z компоненте ММП область пересоединения межпланетного

магнитного поля с околосолнечным магнитным полем находится полярнее каспа. Граница между открытыми и замкнутыми геомагнитными силовыми линиями (open-closed boundary) также будет находиться полярнее каспа. При этом вытекающие продольные электрические токи, усиливающиеся в процессе пересоединения, будут располагаться полярнее этой границы, а втекающие продольные токи — экваториальнее. Горизонтальная ионосферная токовая струя будет находиться между ними.

При изменении знака B_z ММП с отрицательного на положительный, ионосферная проекция области пересоединения, как и граница между замкнутыми и открытыми силовыми линиями геомагнитного поля, переместится к полярной границе каспа. Можно предположить, что этот процесс и отражался на земной поверхности как перемещение со временем магнитной бухты в сторону полюса.

5. ВЫВОДЫ

Рассмотрены особенности нетипичных геомагнитных эффектов умеренной CIR -бури (с минимальным значением $S_{\text{min}}H$ индекса ~ -90 нТл) с постепенным началом, которая произошла в минимуме солнечной активности и была наиболее интенсивной магнитной бурей в самый магнитоспокойный (2009) год последнего пятидесятилетия.

1. Анализ сопоставления данных глобальных наземных наблюдений в дневном и ночном секторе показал, что в главную фазу бури суббуревая активность наблюдалась не в ночном, а в утреннем (07–09 MLT) секторе и сопровождалась необычно большими (до 1000 нТл) геомагнитными пульсациями диапазона $Pc5$.

2. Амплитуда $Pc5$ колебаний в азимутальной компоненте магнитного поля была много больше, чем в X -компоненте, что противоречит резонансной природе волн. Наиболее вероятно предположить, что данные $Pc5$ пульсации отражают флюктуации ионосферной электроструи, обусловленные нестационарной структурой продольных электрических токов, связанных с суббури.

3. Восстановительная фаза суббури была нетипичной ввиду сложной ситуации в межпланетной среде, появлением южной компоненты ММП и тангенциального разрыва в ММП, сменившего знак всех его компонент. Это привело к развитию магнитной суббури, наблюдаемой вблизи приполюсной границы аврального овала в глобальном масштабе, от вечернего до полуденного сектора. В дневном секторе магнитная бухта наблюдалась на несколько минут позже, чем в полуночном, что свидетельствует о том, что ее ис-

точник был связан с вторжением заряженных частиц из хвоста магнитосферы.

4. Дневная высокоширотная бухта быстро перемещалась к полюсу, подобно хорошо известным перемещающимся к полюсу дневным полярным сияниям (PMAFs), наблюдаемым при северном направлении ММП и связанным с перемещением области пересоединения к приполюсной границе дневного каспа. Следовательно, перемещение дневной магнитной бухты к полюсу свидетельствует о сжатии овала и перемещении к полюсу границы между замкнутыми и открытыми силовыми линиями геомагнитного поля.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Большакова О.В., Троицкая В.А.* Динамика дневного каспа по наблюдениям длиннопериодных геомагнитных пульсаций // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 17. № 6. С. 1076–1082. 1977.
- *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 аэрномия. Т. 56. № 3. С. 302–313. 2016.
- *Клейменова Н.Г., Громова Л.И., Дремухина Л.А., Левитин А.Е., Зелинский Н.Р., Громов С.В.* Высокоширотные геомагнитные эффекты главной фазы магнитной бури 24 ноября 2001 при северном направлении ММП // Геомагнетизм и Аэрномия. Т. 55. № 2. С. 185–195. 2015.
- *Левитин А.Е., Громова Л.И., Громов С.В., Дремухина Л.А.* Количественная оценка локальной геомагнитной активности по данным обсерваторий отсчитанная от уровня поля геомагнитно спокойных дней 2009 г. // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 54. № 3. С. 315–323. 2014.
- *Левитин А.Е., Клейменова Н.Г., Громова Л.И., Антонова Е.Е., Дремухина Л.А., Зелинский Н.Р., Громов С.В., Малышева Л.М.* Геомагнитные возмущения и пульсации как высокоширотный отклик на большие знакопеременные вариации ММП в восстановительную фазу магнитной бури (событие 30 мая 2003 г.) // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 55. № 6. С. 755–768. 2015.
- *Нишида А.* Геомагнитный диагноз магнитосферы. М.: Мир. 299 с. 1978.
- *Antonova E.E., Ovchinnikov I.L.* Magnetostatically equilibrated plasma sheet with developed medium scale turbulence: Structure and implications for substorm dynamics // J. Geophys. Res. V. 104. № A8. P. 17289–17298. 1999.
- *Antonova E.E., Ovchinnikov I.L.* The model of turbulent plasma sheet during IMF $B_z > 0$ // Adv. Space Res. V. 28. № 12. P. 1747–1752. 2001.
- *Baker G.E., Donovan E.F., Jacke B.J.* A comprehensive survey of auroral latitude $Pc5$ pulsation characteristics // J. Geophys. Res. V. 108(A10). 2003. <https://doi.org/10.1029/2002JA009801>

- Borovsky J.E., Denton M.H. Differences between CME-driven storms and CIR-driven storms. *J. Geophys. Res.* 111. A06. 2006.
<https://doi.org/10.1029/2005JA011447>
- Clauer C.R., Ridley A.J., Sitar R.J., Singer H.J., Rodger A.S., Friis-Cristensen E., Papitashvili V.A. Field line resonant pulsations associated with a strong dayside ionospheric shear convection flow reversal // *J. Geophys. Res.* V. 102. № A3. P. 4585–4596. 1997.
- 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>
- Fasel G. Dayside poleward moving auroral forms: A statistical study // *J. Geophys. Res.* V. 100. P. 11891–11905. 1995.
- Gjerloev J.W. The SuperMAG data processing technique // *J. Geophys. Res.* V. 117. A09213. 2012.
<https://doi.org/10.1029/2012JA017683>
- Gonzalez W.D., Joselyn J., Kamide Y., Kroehl H., Rostoker G., Tsurutani B., Vasyliunas V. What is a magnetic storm // *J. Geophys. Res.* V. 99. P. 5771–5792. 1994.
<https://doi.org/10.1029/93JA02867>
- Gromova L.I., Kleimenova N.G., Levitin A.E., Dremukhina L.A., Antonova E.E., Gromov S.V. High-latitude daytime magnetic bays as effects of strong positive IMF Bz: case study // *Sun and Geosphere.* V. 12. № 2. P. 125–131. 2017.
- Guo J., Feng X., Zhang J., Zuo P., Xiang C. Statistical properties and geoefficiency of interplanetary coronal mass ejections and their heaths during intense geomagnetic storms. *J. Geophys. Res.* 115. A09107. 2010.
<https://doi.org/10.1029/2009JA015140>
- Iijima T., Potemra T.A., Zanetti L.J., Bythrow P.F. Large-scale Birkeland currents in the dayside polar region during strongly northward IMF: A new Birkeland current system // *J. Geophys. Res.* V. 103. P. 26271–26283. 1998.
- Kamide Y., Yokoyama N., Gonzalez W.D., Tsurutani B.T., Daglis I.A., Brekke A., Masuda S. Two-step development of geomagnetic storms // *J. Geophys. Res.* V. 103. P. 6917–6921. 1998.
- Krieger A.S., Timothy A.F., Roelof E.C. A coronal hole and its identification as the source of a high velocity solar wind stream // *Sol. Phys.* V. 29. P. 505–525. 1973.
<https://doi.org/10.1007/BF00150828>
- Miyoshi Y., Kataoka R. Ring current ions and radiation belt electrons during geomagnetic storms driven by coronal mass ejections and corotating interaction regions // *Geophys. Res. Lett.* V. 32. L21105. 2005.
<https://doi.org/10.1029/2005GL024590>
- Motoba T., Kikuchi T., Lühr H., Tachihara H., Kitamura T.-I., Hayashi K., Okuzawa T. Global Pc5 caused by a DP2-type ionospheric current system // *J. Geophys. Res.* V. 107(A2). 1032. 2002.
<https://doi.org/10.1029/2001JA900156>
- Newell P.T., Gjerloev J.W. Evaluation of SuperMAG auroral electrojet indices as indicators of substorms and auroral power // *J. Geophys. Res.* V. 116. A12211. 2011.
<https://doi.org/10.1029/2011JA016779>
- Øieroset M., Sandholt P.E., Denig W.F., Cowley S.W.H. Northward interplanetary magnetic field cusp aurora and high-latitude magnetopause reconnection // *J. Geophys. Res.* V. 102. P. 11349–11362. 1997.
- Perez J.D., Grimes E.F., Goldstein J., McComas D.J., Valek P., Billor N. Evolution of SIR storm on 22 July 2009 // *J. Geophys. Res.* V. 117. A09221. 2012.
<https://doi.org/10.1029/2012JA017572>
- Poulter E.M. Pc5 micropulsation resonance regions observed with the STARE radar // *J. Geophys. Res.* V. 87. № A10. P. 8167–8173. 1982.
- Richardson I.G., Cliver E.W., Cane H.V. Sources of geomagnetic storms for solar minimum and maximum conditions during 1972–2000 // *Geophys. Res. Lett.* V. 28. P. 2567–2572. 2001.
- Richardson I.G., Webb D.F., Zhang J. et al. Major geomagnetic storms ($Dst \leq -100$ nT) generated by corotating interaction regions. *J. Geophys. Res.* V. 111. A07S09. 2006.
<https://doi.org/10.1029/2005JA011476>
- Sato M., Fukunishi H., Kataoka R., Shono A., Lanzerotti L., Doolittle J., Mende S., Pinnock M. Dayside auroral dynamics observed by the AGO network in Antarctica // *Adv. Polar Upper Atmosp. Res.* № 13. P. 67–78. 1999.
- Samson J.C., Harrold B.G., Ruohoniemi J.M., Greenwald R.A., Walker A.D.M. Field line resonances associated with MGD waveguides in the magnetosphere // *Geophys. Res. Lett.* V. 19. P. 19441–19444. 1992.
- Sandholt P.E., Deehr C.S., Egelan A., Lybekk B., Vierec R., Romick G. Signatures in the dayside aurora of plasma transfer from the magnetosheath // *J. Geophys. Res.* V. 91. P. 10063–10079. 1986.
- Sandholt P.E. Auroral electrodynamic structure at the cusp/cleft poleward boundary during northward interplanetary magnetic field // *Geophys. Res. Lett.* V. 18. P. 805–809. 1991.
- Sandholt P.E., Farrugia C.J., Moen J., Noraberg Ø., Lybekk B., Sten T., Hansen T. A classification of dayside auroral forms and activities as a function of interplanetary magnetic field orientation // *J. Geophys. Res.* V. 103(A10). P. 23325–23345. 1998.
- Sreeja V., Pant T.K., Jose L., Ravindran S. Westward electric field penetration to the dayside equatorial ionosphere during the main phase of the geomagnetic storm on 22 July 2009 // *J. Geophys. Res.* V. 116. A03303. 2011.
<https://doi.org/10.1029/2010JA016013>
- Stauning P. Field-aligned ionospheric current systems observed from Magsat and Oersted satellites during northward IMF // *Geophys. Res. Lett.* V. 15. P. 8005–8008. 2002.
<https://doi.org/10.1029/2001GL013961>
- Tanskanen E.I. A comprehensive high-throughput analysis of substorms observed by IMAGE magnetometer network: Years 1993–2003 examined. *J. Geophys. Res.* 114. A05204. 2009.
<https://doi.org/10.1029/2008JA013682>
- Troitskaya V.A., Bolshakova O.V. Diurnal latitude variation of the location of the dayside cusp // *Planet. Space Sci.* V. 25. P. 1167–1169. 1977.
- Tsurutani B.T., Gonzalez W.D., Gonzalez A.L.C. et al. Corotating solar wind streams and recurrent geomagnetic activity: A review // *J. Geophys. Res.* V. 111. A07S01. 2006.
<https://doi.org/10.1029/2005JA011273>
- Vorobjev V.G., Gustafsson G., Starkov G.V., Feldstein Y.I., Shevnina N.F. Dynamics of day and night aurora during substorms // *Planet. Space Sci.* V. 23. P. 269–278. 1975.
- Watanabe M., Kabin K., Sofko G.J., Rankin R., Gombosi T.I., Ridley A.J., Clauer C.R. The internal reconnection for northward interplanetary magnetic field // *J. Geophys. Res.* V. 110. A06210. 2005.
<https://doi.org/10.1029/2004JA010832>
- Zhang Y., Sun W., Feng X.S., Deehr C.S., Fry C.D., Dryer M. Statistical analysis of corotating interaction regions and their geoeffectiveness during solar cycle 23 // *J. Geophys. Res.* V. 113. A08106. 2008.
<https://doi.org/10.1029/2008JA013095>