

УДК 550.384.4

ВОЛНОВАЯ СТРУКТУРА МАГНИТНЫХ СУББУРЬ В ПОЛЯРНЫХ ШИРОТАХ

© 2012 г. Н. Г. Клейменова^{1,3}, Е. Е. Антонова^{2,3}, О. В. Козырева^{1,3}, Л. М. Малышева¹,
Т. А. Корнилова⁴, И. А. Корнилов⁴

¹ ФГБУ науки Институт физики Земли РАН, г. Москва

² Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, МГУ, г. Москва

³ ФГБУ науки Институт космических исследований РАН, г. Москва

⁴ ФГБУ науки Полярный геофизический институт КНЦ РАН, г. Апатиты (Мурманская обл.)

e-mail: kleimen@ifz.ru

Поступила в редакцию 27.03.2012 г.

Выявлен новый тип высокоширотных бухтообразных магнитных возмущений на геомагнитных широтах выше 71° , названный нами “полярными суббурями”. Показано, что полярные суббури отличаются как от классических суббурь, так и от высокоширотных магнитных возмущений типа *Polar Boundary Intensifications (PBIs)*. В отличие от классических суббурь, начинающихся на широтах ниже 67° и затем перемещающихся в сторону полюса, полярные суббури начинаются практически одновременно в вечерней-ночной приполюсной области овала. В отличие от *PBIs* полярные суббури сопровождаются не перемещающимися к югу авроральными стримерами, а авроральными дугами, быстро перемещающимися к северу. Установлено, что полярные суббури наблюдаются в предполуденные часы (20–22 MLT) при слабой геомагнитной активности с $Kp \sim 2$ в позднюю восстановительную фазу магнитной бури. Показано, что характерной особенностью полярных суббурь является одновременное возбуждение в полярных широтах очень интенсивных геомагнитных пульсаций диапазона $Pi2$ и $Pi3$, более чем на порядок превышающих типичную амплитуду этих пульсаций в авроральных широтах. Продолжительность пульсаций определяется длительностью суббури, а их амплитуда резко уменьшается на геомагнитных широтах ниже $\sim 71^\circ$. Высказано предположение, что наблюдаемые пульсации являются отражением флюктуаций ионосферных токов, связанных с полярными суббурями.

1. ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на то, что магнитосферные суббури интенсивно исследуются в течение последних 50 лет, и им посвящена огромная литература, источники и физика развития суббурь во многом остаются не установленными. Термин “полярная суббуря” впервые был введен К. Биркеландом в 1908 г., позднее было установлено, что суббури — явление, типичное для авроральных широт, сопровождаемое определенным комплексом магнитосферных проявлений, и их стали называть магнитосферными суббурями или просто суббурями. При изучении суббурь основное внимание было сосредоточено на природе изолированных суббурь. Согласно классическим представлениям [Akasofu, 1968] изолированная суббуря начинается с внезапного уярчения самой экваториальной спокойной дуги полярного сияния или формирования новой дуги. Затем уярчившаяся дуга быстро, часто скачкообразно распространяется к полюсу (*poleward expansion*), достигая широт полярной шапки (например, [Hones, 1985]).

Изолированные суббури, наблюдаемые в полярных широтах, изучены крайне недостаточно.

Имеются лишь единичные работы, посвященные исследованию высокоширотных суббурь [например, Sergeev и др., 1979; Loomer and Gupta, 1980; Gussenhoven, 1982; Hones, 1985; Mende et al., 1999; Дэспирак и др., 2008]. При этом практически рассматривались результаты полярной экспансии суббури. Волновая структура высокоширотных суббурь не исследовалась.

Изучение суббурь в высоких широтах в настоящее время приобретает принципиальное значение в связи с тем, что до сих пор не решен вопрос о локализации области начала типичной суббури. Заметим, что обсерватории, по которым вычисляются индексы авроральной активности, расположены на более низких широтах. Классическая изолированная суббуря [Lui, 2011 и ссылки в данной работе] начинается на геоцентрическом расстоянии менее $10 R_E$. В то же время диполизация магнитных силовых линий может наблюдаться в хвосте магнитосферы на значительно больших геоцентрических расстояниях [Sergeev et al., 2011 и ссылки в данной работе]. В соответствии с результатами работы [Antonova et al., 2011] в первом случае начало суббури локализовано в области плазменного кольца, окружающего Землю на гео-

центрических расстояниях до $\sim 10R_E$, а во втором — в самом плазменном слое. Характеристики плазмы в этих двух областях существенно различаются, что должно сказываться на характеристиках наблюдаемых суббурь.

Суббури в высоких широтах характерны для двух принципиально различных геомагнитных условий: при северной ориентации межпланетного магнитного поля (ММП), когда авроральный овал уменьшается и сдвигается к полюсу, и при южной ориентации ММП во время магнитных бурь, когда авроральный овал расширен.

Основной целью настоящей работы является анализ волновой активности, т.е. геомагнитных пульсаций в диапазоне $Pi2$ и $Pi3$, сопровождающих появление магнитных бухт в полярных широтах, и их сопоставление с одновременными наблюдениями на разнесенных по долготе станциях.

2. ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ

В данной работе будут рассмотрены вечерние магнитные бухтообразные возмущения длительностью час-полтора, максимальные амплитуды которых наблюдаются на геомагнитных широтах больше 71° . При этом необходимым условием будет отсутствие одновременных или предшествующих на 2–3 часа суббуревых возмущений на более низких широтах. Таким образом, из анализа будут исключены как случаи появления суббурь в полярных широтах за счет полярной экспансии суббурь, развивающихся в авроральных широтах, так и случаи одновременного появления суббурь в огромном диапазоне широт при большом резком возрастании геомагнитной активности.

Работа основана на анализе 10-с данных наблюдений на скандинавском профиле магнитометров IMAGE на геомагнитных широтах ~ 56 – 76° в годы минимума солнечной активности 2006–2007 гг., когда геомагнитные возмущения были незначительными и суббури не накладывались одна на другую. За 2 года наблюдений было выявлено около 60 суббурь в полярных широтах, отвечающих перечисленным выше критериям и названных нами “полярными суббуриями”. Заметим, что общее число вечерних и ночных суббурь, регистрируемых в этот интервал времени на широтах выше 71° , было ~ 300 , т.е. обсуждаемые в данной работе полярные суббури составляли порядка 20% от всех зарегистрированных на этих широтах возмущений.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА НАБЛЮДЕНИЙ

Прежде всего, отметим, что все случаи анализируемых полярных суббурь на профиле IMAGE наблюдались в предполуночное время (20–22 MLT) при слабой геомагнитной активности ($Kp \sim 2$).

Для таких суббурь типичным было появление в позднюю восстановительную фазу магнитных бурь. В отличие от так называемых “суббурь на сжатом овале”, наблюдаемых при B_z ММП >0 , обсуждаемые в данной работе суббури наблюдались при небольших отрицательных значениях B_z ММП. При этом, как правило, значения B_y ММП были также небольшими, но положительными, а скорость солнечного ветра была ~ 350 – 450 км/с. Было установлено, что в случаях, когда имелась возможность регистрации полярных сияний на Шпицбергене, суббури сопровождалась одновременным появлением ярких полярных сияний. Подавляющее большинство полярных суббурь наблюдалось в осенне-зимнее время (октябрь–февраль), как и в работе [Loomer and Gupta, 1980], где исследовались суббури на инвариантных широтах выше 70° .

На рисунке 1 приведено 4 примера бухтообразных магнитных возмущений, обсуждаемых в данной работе. Видно, что все они наблюдались лишь на геомагнитных широтах ~ 71 – 76° . Резкие возмущения магнитного поля начинались с точностью до минут или одновременно на всех высокоширотных станциях или медленно дрейфовали к полюсу. В более низких широтах магнитных возмущений на меридиане IMAGE в это время не было. Судя по вариациям Z -компоненты магнитного поля (здесь не приводится) центр авроральной западной электроструи в подавляющем большинстве случаев находился вблизи обс. NOR ($\Phi \sim 74^\circ$).

Логично было предположить, что магнитные возмущения на высокоширотных станциях могли быть результатом расширения авроральной выпуклости, проявляющегося на ее западном крае в виде распространяющегося к западу изгиба (*WTS* – *westward traveling surge*), поэтому они были сопоставлены с одновременными геомагнитными наблюдениями на станциях, расположенных к востоку от меридиана IMAGE (рис. 2). Для этого использовались данные одновременных 1-мин наблюдений на нескольких арктических обсерваториях. К сожалению, в исследуемый период не все они работали одновременно, в каждом конкретном случае использовался разный набор станций, геомагнитные координаты которых приводятся на каждом графике. Практически во всех анализируемых случаях имелись данные наблюдений в Норильске (НОК, $\Phi = 64.3^\circ$) и Амдерме (АМД, $\Phi = 68.2^\circ$), расположенных на близких геомагнитных долготах ($\sim 160^\circ$), т.е. на ~ 3 часовых пояса к востоку от меридиана IMAGE.

На рисунке 2 видно, что во всех случаях суббурь в полярных широтах на меридиане IMAGE к востоку, т.е. в околополуночном или послеполуночном секторе, на авроральных (НОК) и приполюсных (АМД) широтах регистрировались одновременные бухтообразные возмущения, но их ам-

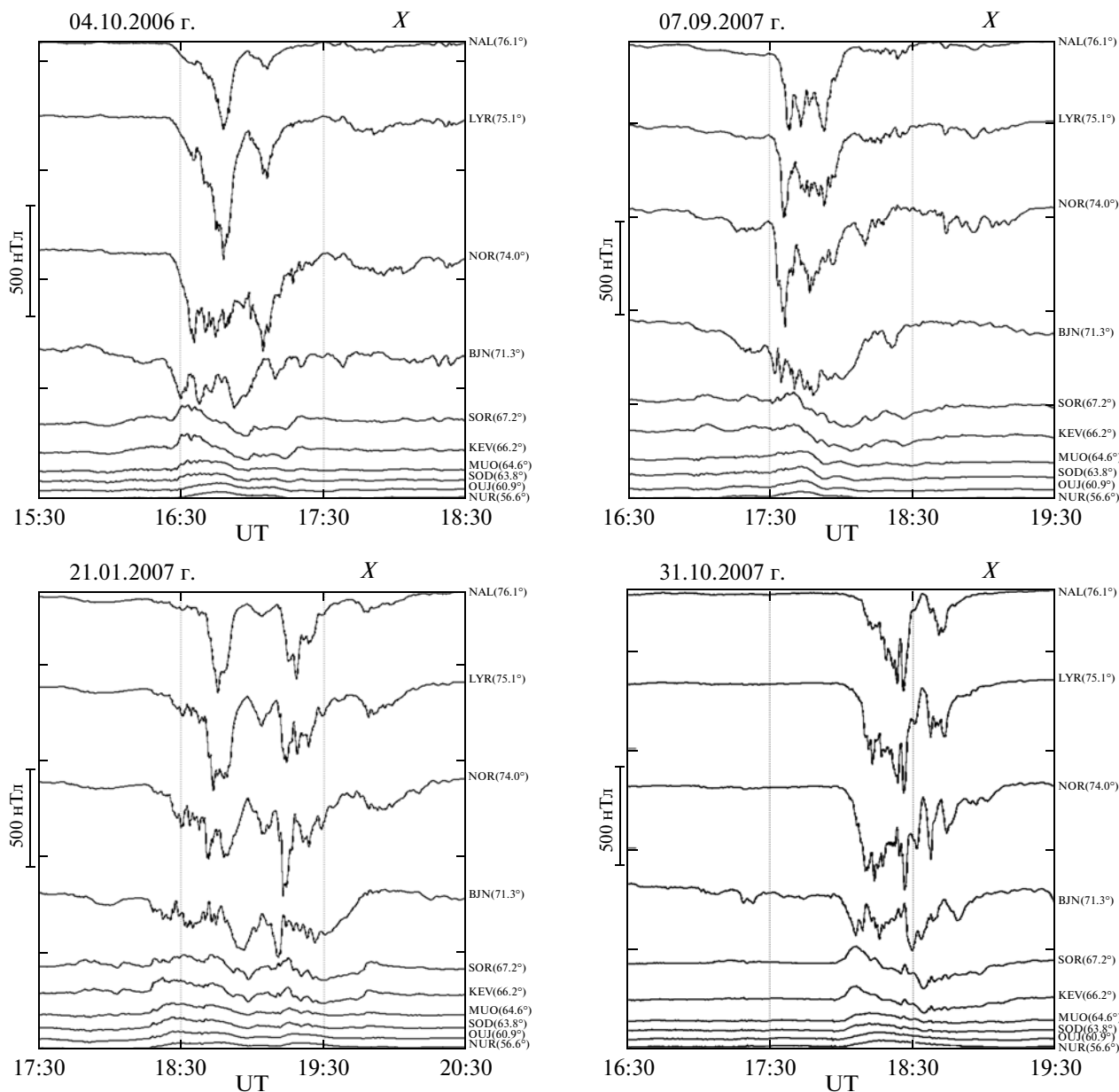


Рис. 1. Примеры магнитограмм некоторых станций профиля IMAGE для 4-х случаев суббурь в полярных широтах; справа – геомагнитные координаты станций.

плитуда была значительно меньше, чем в NOR. При этом в большинстве случаев амплитуда суббури в более высокоширотной obs. AMD была выше, чем в авроральной obs. NOK. Суббури на профиле IMAGE характеризовались резким началом, в то время как на восточных станциях – постепенным, что затрудняло определить точное время начала суббури, а 1-мин данные наблюдений не позволяли увидеть геомагнитные пульсации $Pi2$, являющиеся индикатором начала классической суббури. Анализ магнитных возмущений на станциях к востоку от меридиана IMAGE

показал, что, скорее всего, они являлись следствием развития суббури на меридиане IMAGE.

Известно [например, Пудовкин и др., 1976], что суббури обычно сопровождаются всплесками иррегулярных геомагнитных пульсаций, при этом наибольшие амплитуды отмечаются в диапазоне $Pi3$ в полосе 2–7 мГц [Клейменова и др., 1998; Kleimenova et al., 2002]. Для исследования волновой структуры полярных суббурь данные магнитных наблюдений были отфильтрованы в двух полосах: 2–7 мГц (диапазон $Pi3$) и 8–20 мГц (диапазон $Pi2$). Результаты фильтрации для двух случаев суббури показаны на рис. 3. Видно, что раз-

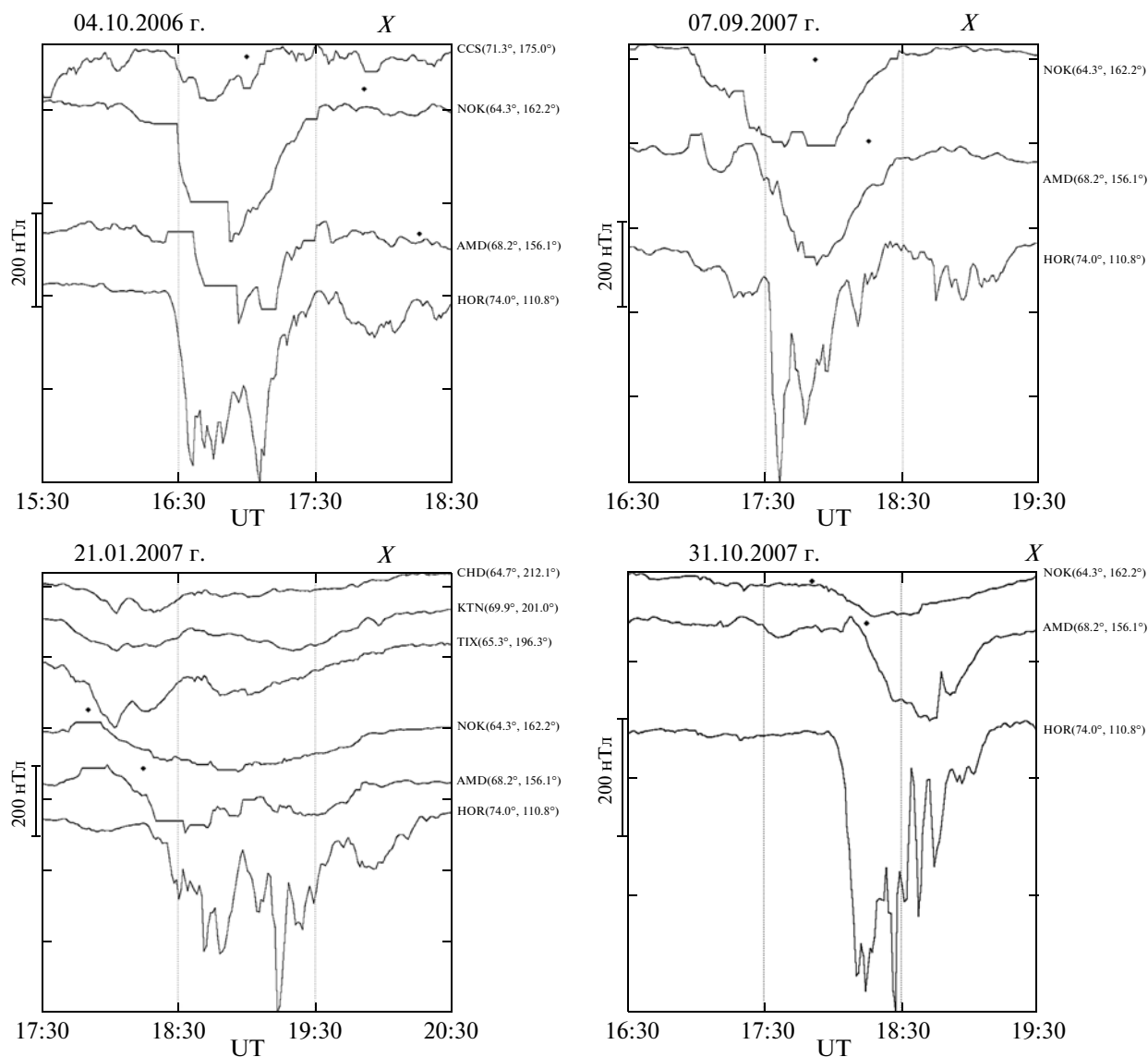


Рис. 2. Сопоставление обсуждаемых суббурь с одновременной геомагнитной регистрацией на околополуденных станциях; справа приведены геомагнитные координаты станций. Темная точка — магнитная полночь.

вите каждой полярной суббури сопровождается генерацией пульсаций обоих типов, и их длительность определяется длительностью суббури. Как правило, волновые пакеты появляются почти одновременно на всех полярных обсерваториях, но вариации в X -компоненте поля и в Y -компоненте (на рисунке не приводится) обычно не совпадают, хотя и имеют амплитуду одного порядка.

Анализ данных наблюдений показал, что оба типа пульсаций являются типичным волновым почерком полярных суббурь. Наибольшие амплитуды пульсаций чаще всего отмечались в obs. HOR, достигая 200 нТл в диапазоне $Pi3$ и 50–70 нТл в диапазоне $Pi2$, что на порядок превышает типичные амплитуды этих пульсаций в аврораль-

ных широтах. Спектральный анализ колебаний показал (графики здесь не приводятся), что спектры волн носят шумовой нерегулярный характер с многочисленными хаотичными максимумами, различными на разных станциях. В то же время на всех станциях в диапазоне $Pi3$ на шумовом фоне часто можно выделить четкий максимум около 3 мГц. В диапазоне $Pi2$ такого четкого максимума не наблюдалось, но почти всегда отмечалось значительное возрастание амплитуды в относительно широкой полосе 8–12 мГц. Важно отметить, что, как видно на рис. 3, геомагнитные пульсации диапазона $Pi3$ в obs. VJN и obs. HOR почти всегда наблюдаются в противофазе. Это позволяет предположить, что источником интенсификации колебаний на частоте около 3 мГц может быть резо-

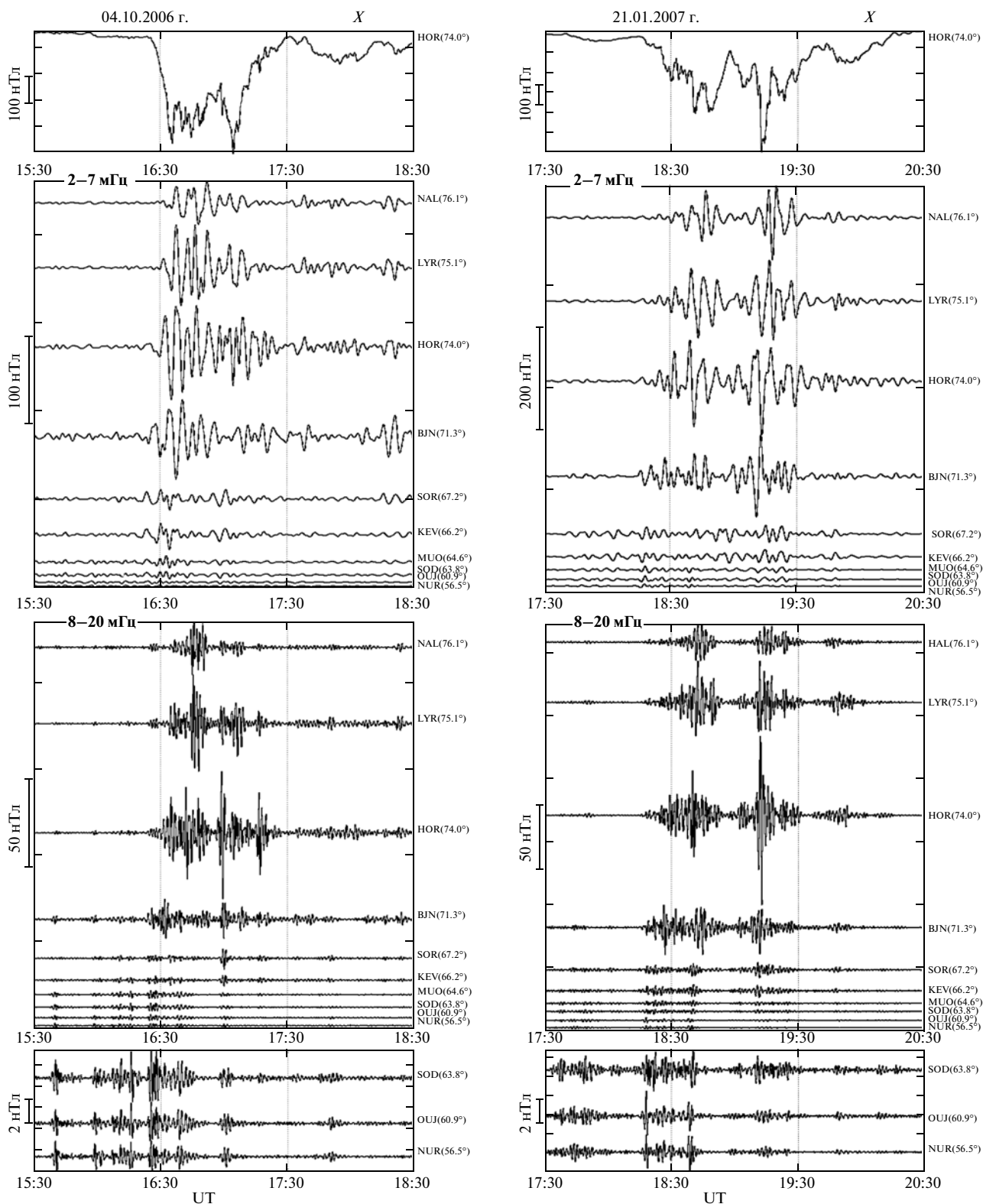


Рис. 3. Отфильтрованные магнитограммы станций профиля IMAGE в полосе геомагнитных пульсаций $Pi3$ (2–7 мГц) и $Pi2$ (8–20 мГц) для двух обсуждаемых случаев. Сверху приведена магнитограмма obs. HOR.

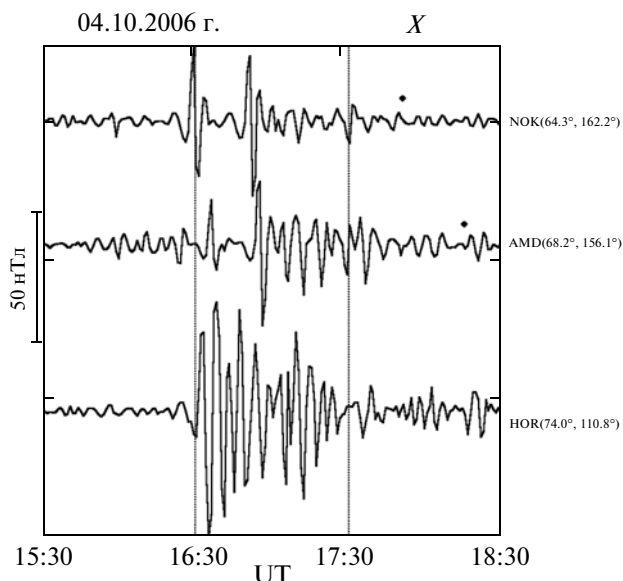


Рис. 4. Пример одновременной регистрации геомагнитных пульсаций диапазона $Pi3$ на разнесенных по долготе станциях.

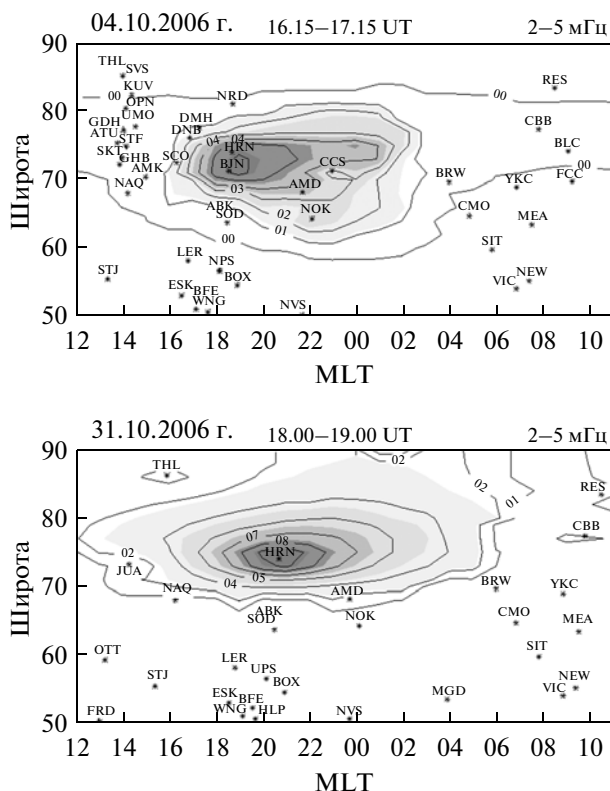


Рис. 5. Карты глобального пространственного распределения интенсивности геомагнитных пульсаций диапазона $Pi3$ для двух случаев обсуждаемых суббурь в координатах: геомагнитная широта — местное магнитное время.

нанное усиление волн на широтах $\sim 73\text{--}74^\circ$ (между BJN и HOR , но ближе к HOR , поскольку там амплитуды больше).

На широтах ниже 70° амплитуда резко, скачком уменьшалась почти на порядок, а затем очень постепенно убывала с уменьшением широты. К сожалению, в Скандинавии между обс. BJN (остров Медвежий) и побережьем (обс. SOR) нет наблюдений, поэтому нельзя точно указать геомагнитную широту, где происходит резкое уменьшение пульсаций.

В нижней части рис. 3 отдельно показаны записи геомагнитных пульсаций $Pi2$ в полосе $8\text{--}20$ мГц на авроральных и субавроральных широтах. Если в полярных широтах масштаб записи был 50 нТл на деление, то на более низких широтах — всего 2 нТл. Четко видно, что пульсации на высоких и низких широтах резко отличаются не только по амплитудам, но и по временной динамике, что позволяет предположить их различную природу.

На восточных станциях (AMD , NOK), расположенных вблизи магнитной полноты, интенсивных пульсаций $Pi3$ в это время не наблюдалось, что четко видно на рис. 4, где показаны данные наблюдений на этих станциях, отфильтрованные в полосе $Pi3$.

По результатам анализа 1-мин данных магнитных наблюдений на мировых сетях были построены карты глобального пространственного распределения интенсивности геомагнитных пульсаций диапазона $Pi3$ во время обсуждаемых суббурь в координатах: геомагнитная широта — местное магнитное время. Две таких карты показаны на рис. 5. Четко видно, что интенсивные $Pi3$ пульсации отмечаются только в предполночном секторе полярных широт.

Анализ кеограмм полярных сияний на Шпицбергене показал, что появление суббурь в полярных широтах всегда сопровождается интенсивными всплесками полярных сияний. Пример развития сияний в обс. Баренцбург (BAB , $\Phi \sim 75^\circ$) во время суббури 21 января 2007 г показан на рис. 6. На кеограмме (рис. 6б) видны три отдельных всплеска сияний, хорошо коррелирующих с интенсификациями магнитных вариаций на близко расположенной от Баренцбурга обс. LYR (рис. 6а), сопровождаемых тремя всплесками $Pi2$ и $Pi3$ пульсаций (рис. 3б). Наиболее интенсивный всплеск сияний наблюдался в $18.25\text{--}18.50$ UT. До ~ 18.40 UT сияния отмечались южнее обс. BAB , а около 18.40 UT яркий всплеск сияний сместился к зениту, и на кадрах камеры полного неба в 18.42 UT видна яркая дуга в зените. Амплитуда $Pi2$ до ~ 18.40 UT в обс. HOR была больше, чем в обс. LYR (рис. 3б), перемещение дуги к зениту и ее уярчение сопровождалось резким всплеском амплитуды $Pi2$. Следующее резкое уярчение сияний наблюдалось в 19.11 UT к югу от зенита обс. BAB и так же сопровождалось резким всплеском амплитуды $Pi2$ в обс. HOR (рис. 3б). Таким образом, интенсификация полярных сияний и $Pi2$

пульсаций совпадает во времени и в пространстве. Подобный вывод был получен в работе [Murphy et al., 2009] по данным магнитных и оптических наблюдений в Канаде.

На рисунке 6*в* для каждого всплеска активности показаны телевизионные кадры, демонстрирующие динамику форм сияний. Экспансия сияний к полюсу во всех трех всплесках выражалась в основном скачкообразным появлением дуг к северу. Однако особенностью в развитии сияний во время первого всплеска были вращающиеся против часовой стрелки (если смотреть против направления магнитного поля) спирали, как видно на кадрах 18:41:58–18:48:58. Согласно модели [Hallinan, 1976] образование спиралей связано с развитием неустойчивости в слое продольных токов. На кеограмме видно, что сияния наблюдались до полярного горизонта обс. ВАВ, а возможно, и дальше, т.е. до $\Phi \sim 79\text{--}80^\circ$. Следовательно, в это время полярная граница аврорального овала находилась на очень высоких широтах, существенно уменьшая размер полярной шапки, в то время как по данным станций авроральной зоны KIL ($\Phi \sim 66^\circ$), MUO ($\Phi \sim 65^\circ$), SOD ($\Phi \sim 64^\circ$), LOZ ($\Phi \sim 64^\circ$) сияния наблюдались только далеко на северном горизонте, на широтах выше 71° .

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Итак, анализ данных наблюдений показал, что в позднюю восстановительную фазу магнитной бури на геомагнитных широтах выше 71° в вечернем секторе могут наблюдаться бухтообразные магнитные возмущения, названные нами “полярными суббуриями” по аналогии с классическими суббуриями. В отличие от классических суббурь, начинающихся на широтах ниже 67° и затем перемещающихся в сторону полюса, полярные суббури наблюдаются только в приполюсной области овала. Полярные суббури отличаются и от другого типа высокоширотных магнитных возмущений, наблюдаемых в ночном секторе вблизи границы замкнутых и открытых силовых линий, так называемых *PBIs* (*polar boundary intensifications*). Характерной особенностью *PBIs* [например, Lyons et al., 1999; Nakamura et al., 2001; Zesta et al., 2002] является перемещение магнитных возмущений к югу и развитие вытянутых с севера на юг стримеров полярных сияний, генерация которых обычно связывается с быстрыми потоками ионов в хвосте магнитосферы. Анализ данных показал, что во время полярных суббурь не наблюдается ни стримеров, ни перемещения магнитных возмущений к югу. Таким образом, полярные суббури представляют собой особый тип высокоширотных бухтообразных возмущений.

Полярные суббури отличаются от классических огромными амплитудами сопровождающих их иррегулярных геомагнитных пульсаций *Pi2–Pi3*,

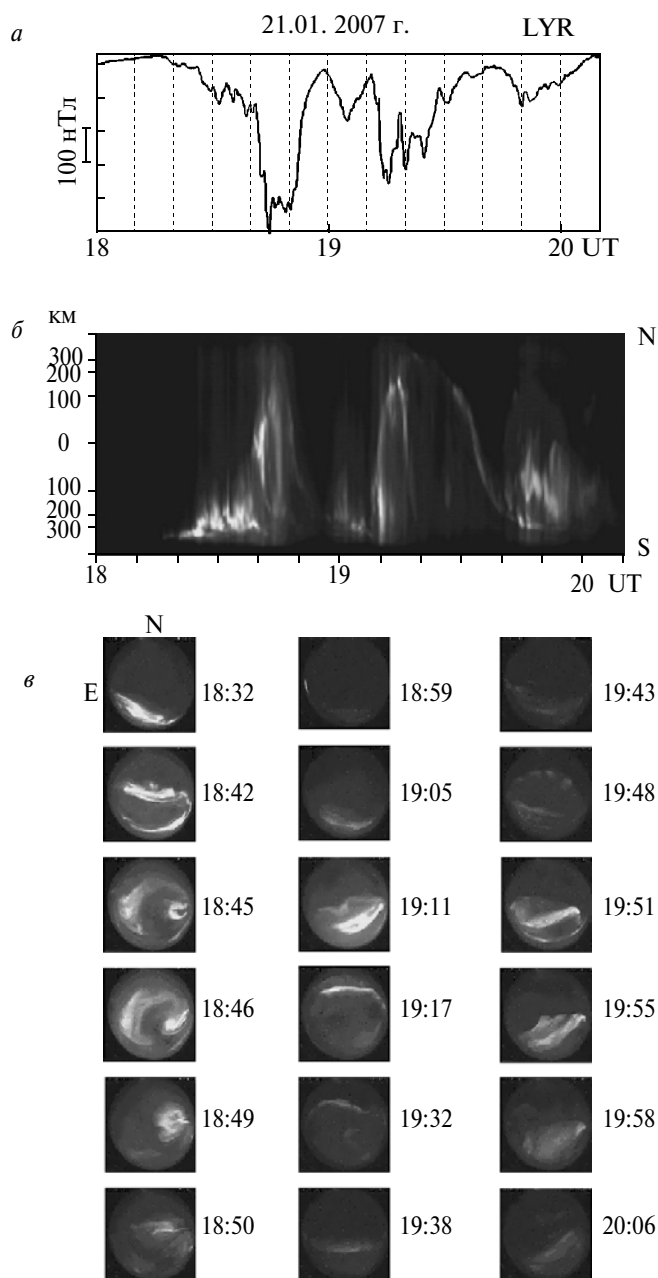


Рис. 6. Развитие суббури 21 января 2007 г. (а) – X-компонента магнитного поля, (б) – кеограмма полярных сияний в обс. ВАВ, (в) – телевизионные кадры для трех всплесков сияний.

превышающими более чем на порядок амплитуды таких пульсаций в авроральных широтах. Кроме того, характеристики сопровождающих полярные суббури пульсаций *Pi2* и *Pi3* отличаются от наблюдаемых пульсаций во время классических суббурь. Колебания наблюдаются в течение всей полярной суббури, а не только во время ее начала (*onset*), и резко возрастают в фазе развития. Большие амплитуды пульсаций могут свиде-

тельствовать о высоком уровне флуктуаций в хвосте магнитосферы в области источника полярных суббурь. В работах [Stepanova et al., 2009, 2011] показано, что уровень постоянно наблюдаемых флуктуаций в экваториальной плоскости сильно зависит от геоцентрического расстояния и фазы суббури. Этот уровень резко возрастает на геоцентрических расстояниях больше $\sim 10 R_E$.

Было установлено, что ионосферная проекция положения полярных суббурь и сопровождающих их пульсаций и полярных сияний совпадает. Построенные по данным мировой сети станций карты распределения пульсаций (рис. 5) свидетельствуют о том, что пульсации возбуждаются в очень локализованной области в предполуденном секторе (20–22 MLT) полярных широт. Проецирование этой области в экваториальную плоскость ночной магнитосферы показывает, что источник полярных суббурь должен находиться на больших геоцентрических расстояниях по сравнению с классическими суббуриями.

В соответствии с результатами [Iijima and Potemra, 1976] и большого числа более поздних работ, в вечерней области аврорального овала на высоких широтах локализованы вытекающие продольные токи зоны 1. В работе [Shiokawa et al., 2005] продемонстрирована возможность возникновения суббуревых взрывов в области вытекающего тока зоны 1. Таким образом, несмотря на отсутствие одновременных данных о конфигурации продольных токов, можно предположить, что, скорее всего, анализируемые суббури развивались в области продольных токов зоны 1. Локализация источника предполуденной части токов зоны 1 окончательно не установлена. Согласно результатам работ [Antonova et al., 2006, Xing et al., 2009] источник этих токов локализован на геоцентрических расстояниях $\sim 11\text{--}13 R_E$, что указывает на возможность проецирования области начала исследуемых высокоширотных суббурь на геоцентрические расстояния, превышающие $10 R_E$. Следует отметить, однако, что проецирование с использованием моделей Цыганенко-1996 и -2001 (см. [Antonova et al., 2006]) приводит к значительному большему геоцентрическим расстояниям.

Две наиболее популярные модели возникновения суббуревых взрывов (пересоединения и разрыва тока хвоста) не связывают локализацию начала суббури с динамикой продольных токов. В работах [Antonova, 2002; Stepanova et al., 2002] развита теория, связывающая уярчение дуги в момент начала взрывной фазы суббури с существованием в области взрыва вытекающего продольного тока и структур типа перевернутого V с последующей генерацией высокого уровня иррегулярных флуктуаций продольных и поперечных токов. Данный сценарий хорошо описывает и характеристики анализируемых полярных суббурь.

Однако не во всех случаях удастся предложить объяснение наблюдаемым явлениям. Так, например, пока остается не ясным, почему геомагнитные пульсации практически не наблюдаются в околополуденном секторе.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных исследований обнаружен новый тип высокоширотных бухтообразных магнитных возмущений на геомагнитных широтах выше 71° , названный нами “полярными суббуриями”.

В отличие от классических суббурь, начинающихся на широтах ниже 67° и затем перемещающихся в сторону полюса, полярные суббури наблюдаются только в приполюсной области овала. Полярные суббури отличаются и от другого типа высокоширотных магнитных возмущений, наблюдаемых в ночном секторе вблизи границы замкнутых и открытых силовых линий, так называемых “*polar boundary intensifications (PBIs)*”, характерной особенностью которых является перемещение магнитных возмущений к югу и развитие вытянутых с севера на юг стримеров полярных сияний. Во время обсуждаемых в данной работе полярных суббурь сияния обычно наблюдаются в виде авроральных дуг, деформирующихся и быстро перемещающихся к северу. Локализация обсуждаемых суббуревых возмущений в полярных широтах предполагает их проецирование в экваториальную плоскость на сравнительно большие геоцентрические расстояния, скорее всего в область локализации источника вытекающих продольных токов зоны 1 Ииджимы и Потемры.

Полярные суббури всегда сопровождаются иррегулярными геомагнитными пульсациями диапазона $Pi2\text{--}Pi3$, превышающими более чем на порядок амплитуды таких пульсаций в авроральных широтах. Длительность пульсаций определяется длительностью суббурь, их амплитуда резко уменьшается на геомагнитных широтах ниже $\sim 71^\circ$. Высказано предположение, что наблюдаемые пульсации являются отражением флуктуаций ионосферных токов, связанных с полярными суббуриями.

Работа была выполнена при поддержке грантов РФФИ 10-05-00247, 12-05-01030 и 12-02-00217 и Программ № 7 и 4 Президиума РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дэспирак И.В., Любчик А.А., Бирнат Х.К., Яхнин А.Г. Полярная экспансия суббуревых западного электроджета в зависимости от параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля // Геомагнетизм и аэрономия Т. 48. № 3. С. 297–305. 2008.
- Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Биттерли Ж., Биттерли М. Длиннопериодные ($T = 8\text{--}10$ мин) гео-

- магнитные пульсации в высоких широтах // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 38. № 4. С. 38–48. 1998.
- Пудовкин М.И., Распопов О.М., Клейменова Н.Г. Возмущения электромагнитного поля Земли. Ч. 2. Короткопериодные колебания геомагнитного поля. Л.: ЛГУ, 1976. 271 с.
- Сергеев В.А., Яхнин А.Г., Дмитриева Н.П. Суббури в полярной шапке – эффект высокоскоростных потоков солнечного ветра // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 19. № 6. С. 1121–1122. 1979.
- Akasofu S.-I. Polar and magnetospheric substorms: Reidel Publishing Company, Dordrecht-Holland. 316 p. 1968.
- Antonova E.E. The results of INTERBALL/Tail observations, the inner magnetosphere substorm onset and particle acceleration // Adv. Space Res. V. 30. № 7. P. 1671–1676. 2002.
- Antonova E.E., Kirpichev I.P., Stepanova M.V. Field-aligned current mapping and the problem of the generation of magnetospheric convection // Adv. Space Res. V. 38. P. 1637–1641. 2006.
- Antonova E.E., Kirpichev I.P., Ovchinnikov I.L., Pulnits M.S., Znatkova S.S., Orlova K.G., Stepanova M.V. Topology of High-Latitude Magnetospheric Currents // IAGA Special Sopron Book Series, V. 3. The Dynamic Magnetosphere, Ed. W. Liu and M. Fujimoto, Springer. P. 2001–2010. 2011.
- Hallinan T.J. Auroral spirals. 2. Theory. // J. Geophys. Res. V. 81. № 22. P. 3959–3965. 1976.
- Hones E.W. The poleward leap of the auroral electrojet as seen in auroral images // J. Geophys. Res. V. 90. P. 5333–5337. 1985.
- Gussenhoven M.S. Extremely high latitude auroras // J. Geophys. Res. V. 87. P. 2401–2412. 1982.
- Iijima T., Potemra T.A. The amplitude distribution of field-aligned currents at northern high latitudes observed by Triad // J. Geophys. Res. V. 81. № 13. P. 2165–2174. 1976.
- Kleimenova N.G., Kozyreva O.V., Kauriste K., Manninen J., Ranta A. Case studies on the dynamic of Pi3 geomagnetic and riometer pulsations during auroral activations // Ann. Geophys. V. 20. P. 151–159. 2002.
- Loomer E.I., Gupta J.C. Some characteristics of high-latitude substorms // J. Atmos. Terr. Phys. V. 42. P. 645–652. 1980.
- Lui A.T.Y. Reduction of the cross-tail current during near-Earth dipolarization with multisatellite observations // J. Geophys. Res. V. 116. A12239. doi:10.1029/2011JA017107. 2011.
- Lyons L.R., Nagai T., Blanchard G.T., Samson J.C., Yamamoto T., Mukai T., Nishida A., Kokubun S. Association between Geotail plasma flows and auroral poleward boundary intensifications observed by CANOPUS photometers // J. Geophys. Res. V. 104 (A3). P. 4485–4500. 1999.
- Mende S.B., Frey H.U., Geller S.P., Doolittle J.H. Multi-station observations of auroras: Polar cap substorms // J. Geophys. Res. V.104. No. A2. P. 2333–2342. 1999.
- Murphy K.R., Rae I.J., Mann I.R., Milling D.K., Watt C.E.J., Ozeke L., Frey H.U., Angelopoulos V., Russell C.T. Wavelet-based ULF wave diagnosis of substorm expansion phase onset // J. Geophys. Res. V. 114. A00C16. doi:10.1029/2008JA013548. 2009.
- Nakamura R., Baumjohann W., Schodel R., Brittnacher M., Sergeev V.A., Kubyschkina M., Mukai T., Liou K. Earthward flow bursts, auroral streamers, and small expansions // J. Geophys. Res. V. 106. P. 10,791–10,802, doi:10.1029/2000JA000306. 2001.
- Sergeev V., Angelopoulos V., Kubyschkina M., Donovan E., Zhou X.-Z., Runov A., Singer H., McFadden J., Nakamura R. Substorm growth and expansion onset as observed with ideal ground-spacecraft THEMIS coverage // J. Geophys. Res. V. 116. A00I26, doi:10.1029/2010JA015689. 2011.
- Shiokawa, K., Yago K., Yumoto K., Baishev D.G., Soloviyev S.I., Rich F.J., Mende S.B. Ground and satellite observations of substorm onset arcs // J. Geophys. Res. V. 110. A12225, doi:10.1029/2005JA011281. 2005.
- Stepanova M.V., Antonova E.E., Bosqued J.M., Kovrazhkin R.A., Aubel K.R. Asymmetry of auroral electron precipitations and its relationship to the substorm expansion phase onset // J. Geophys. Res. V. 107(A7). 1134, doi:10.1029/2001JA003503. 2002.
- Stepanova M.V., Antonova E.E., Paredes-Davis D.I., Ovchinnikov I.L., Yermolaev Y.I. Spatial variation of eddy-diffusion coefficients in the turbulent plasma sheet during substorms // Ann. Geophys. V. 27. P. 1407–1411. 2009.
- Stepanova M., Pinto V., Valdivia J.A., Antonova E.E. Spatial distribution of the eddy diffusion coefficients in the plasma sheet during quiet time and substorms from THEMIS satellite data // J. Geophys. Res. V. 116. A00I24, doi:10.1029/2010JA015887. 2011.
- Xing X., Lyons L.R., Angelopoulos V., Larson D., McFadden J., Carlson C., Runov A., Auster U. Azimuthal plasma pressure gradient in quiet time plasma sheet // Geophys. Res. Lett. V. 36. L14105, doi:10.1029/2009GL038881. 2009.
- Zesta E., Donovan E., Lyons L., Enno G., Murphree J.S., Cogger L. The two dimensional structure of auroral Poleward Boundary Intensification (PBIs) // J. Geophys. Res. V. 107(A11). 1350. doi:10.1029/2001JA000260. 2002.