

УДК 533.951

“ПОЛЯРНЫЕ” СУББУРИ И РАЗРЫВ ХАРАНГА

© 2024 г. Н. Г. Клейменова^{1, *}, Л. И. Громова², С. В. Громов², Л. М. Малышева¹,
И. В. Дэспирак³

¹Институт физики Земли РАН (ИФЗ РАН), Москва, Россия

²Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН(ИЗМИРАН),
Москва, Троицк, Россия

³Полярный геофизический институт (ПГИ), Апатиты (Мурманская обл.), Россия

*e-mail: ngk1935@yandex.ru

Поступила в редакцию 13.12.2023 г.

После доработки 25.01.2024 г.

Принята к публикации 04.04.2024 г.

Выполнен анализ 214 случаев “полярных” суббурь на скандинавском меридиане IMAGE, т.е. суббурь, на геомагнитных широтах выше $\sim 70^\circ$ MLAT в 19–02 MLT в магнито-спокойное время при отсутствии отрицательных магнитных бухт на более низких широтах. Разрыв Харанга, разделяющий по широте западный и восточный электроджеты, является типичной структурой для указанного MLT-сектора высокоширотной ионосферы. Исследовано глобальное распределение ионосферных электроджетов и положение разрыва Харанга во время развития “полярных” суббурь на основе карт, построенных по результатам сферического гармонического анализа магнитных измерений на 66 одновременно работающих ионосферных спутниках связи проекта AMPERE. На основе анализа карт показано, что мгновенное положение экваториальной границы ионосферного тока “полярной” суббури определяет мгновенное положение полярной границы разрыва Харанга, а полярная граница восточного электроджета определяет его экваториальную границу. Установлено, что 90% “полярных” суббурь наблюдается одновременно с возрастанием планетарной суббуревой активности по AL -индексу и развитием магнитосферной суббури в послеполуночном секторе. При этом развитие вечерних “полярных” суббурь связано с формированием околполуночных магнитных вихрей на геомагнитных широтах $\sim 70^\circ$ MLAT вблизи “носа” разрыва Харанга указывающих на резкое локальное усиление продольных токов. Это приводит к формированию в вечернем секторе приполярных широт новой суббури, названной “полярной” суббурей с типичными характерными признаками начала суббури (всплесками геомагнитных пульсаций $Pi2$, резким началом суббури вблизи экваториальной границы сжатого в это время овала, развитием “токового клина суббури” и т.д.

Ключевые слова: магнитосфера, магнитная буря, суббури, ионосферные токи.

DOI: 10.31857/S0016794024050035, **EDN:** QRHFTR

1. ВВЕДЕНИЕ

Под термином “суббури”, введенным С.-И. Акасофу [Akasofu, 1964], понимается комплекс глобальных взаимосвязанных явлений, наблюдаемых в магнитосфере, ионосфере и на земной поверхности, возникающих при взрывообразном высвобождении энергии, накопленной в хвосте магнитосферы за счет её обтекания возмущенным солнечным ветром. Одним из основных проявлений магнитосферной суббури являются отрицательные магнитные бухты в авроральных и приполярных широтах длительностью 1–3 ч, напри-

мер, [Rostoker et al., 1980]. Развитие суббури вызывается интенсификацией крупномасштабной конвекции, продольных токов и высыпаний авроральных частиц, например, [Baker et al., 1996].

Несмотря на то, что суббури достаточно интенсивно исследуются как экспериментально, так и теоретически, до сих пор нет понимания, где и как возникают и начинаются суббури и каков механизм их возбуждения. Нет даже четкой общепринятой формулировки морфологических характеристик суббури, нередко возникают дискуссии, какую отрицательную магнитную бухту

можно называть суббурей, а какую нет. В литературе имеется несколько противоречивых моделей генерации суббури, причем каждая предложенная модель подтверждается соответствующими наблюдательными фактами. Это свидетельствует как о сложности этого явления, так и о том, что в различных геофизических условиях имеют место разные виды магнитосферных суббурь с различной пространственно-временной динамикой.

За счет взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли в авроральной и высокоширотной ионосфере постоянно наблюдается конвекция плазмы, например, [Nishida, 1968; Нерпег, 1977]. Отдельные её интенсификации были названы “конвективной бухтой” [Pytte et al., 1978], представляющей собой развитие двух-вихревой токовой системы *DP2* с центрами вихрей в утреннем (западный электроджет) и вечернем (восточный электроджет) секторах, как показано на схеме на рис. 1а, взятой из работы [Baumjohann, 1983]. Имеются существенные различия между классической магнитосферной суббурей и конвективной бухтой [Pytte et al., 1978а; Baumjohann, 1983; Sergeev et al., 2001]. В отличие от конвективной бухты с пологим началом, “классическая” суббуря характеризуется резким началом (substorm onset) с брейкпапом полярных сияний, сопровождающимся формированием особой 3-х мерной системой продольных токов, образующей так называемый “токовый клин суббури” (*Substorm Current Wedge - SCW*), например, [McPherron et al., 1973; Кепко et al., 2015], на западном краю которого отмечаются вытекающие продольные токи, а на восточном — втекающие. Токовый клин суббури — это одно-вихревая токовая система *DPI* (рис. 1а). На земной поверхности развитие токового клина суббури сопровождается появле-

нием среднеширотной положительной магнитной бухты в *X*-компоненте поля.

Магнитосферная суббуря — типичное ночное возмущение в области аврорального овала, который сдвигается к полюсу с уменьшением геомагнитной активности [Feldstein and Starkov, 1967]. Как правило, суббуря начинается с внезапного уярчения (брейкапа) спокойной дуги полярного сияния вблизи экваториальной границы аврорального овала. В зависимости от положения этой границы авроральный овал считается “нормальным” при её расположении на 65–66° MLAT, “расширенным” (*expanded*), если она находится ниже 65° MLAT, и “сжатым” (*contracted*), если экваториальная граница овала выше 66–67° MLAT [Lui et al., 1973]. В соответствии с этим, суббури в зависимости от геомагнитной широты расположения их начала (*onset*) классифицируются как “нормальные” или “классические”, “расширенные” и суббури “на сжатом овале”, которые исследованы менее всего и явно недостаточно.

В последние годы суббури на сжатом овале наиболее детально исследовались в работах [Клейменова и др., 2012, 2023; Дэспирак и др., 2014, 2022; Сафаргалеев и др., 2018; Safargaleev et al., 2020; Kleimenova et al., 2023], где для краткости такие суббури были названы “полярными” суббурями, поскольку наблюдаются вблизи полярного края аврорального овала. Было установлено [Клейменова и др., 2012, 2023; Kleimenova et al., 2023], что “полярные” суббури обычно регистрируются на геомагнитных широтах выше ~68–70° MLAT в предполуночные часы (20–22 MLT) при слабой геомагнитной активности (*Kp* ~1–2), и сопровождаются интенсивными геомагнитными пульсациями диапазона *Pi2* и *Pi3*. Заметим, что согласно

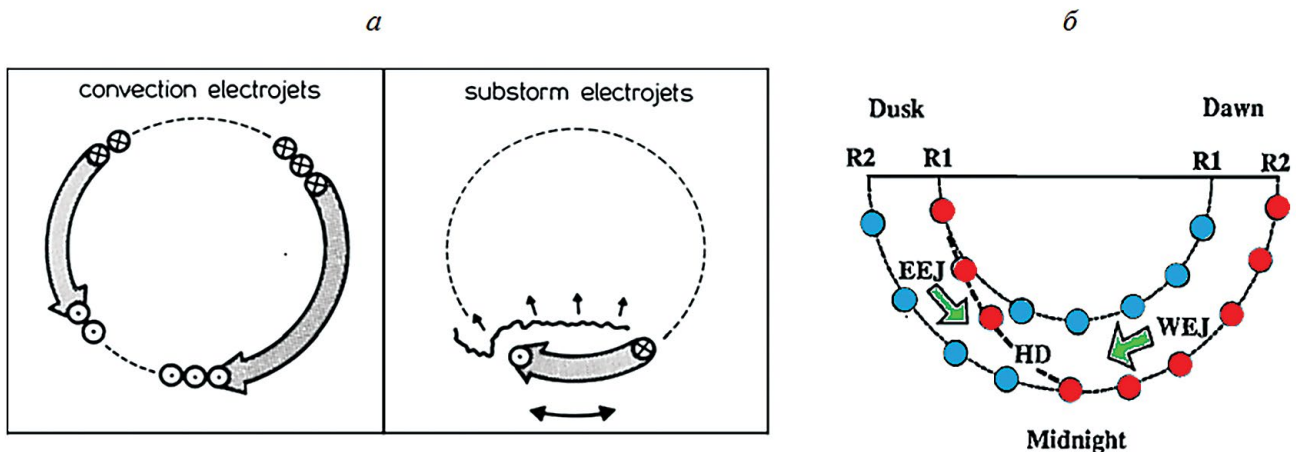


Рис. 1. (а) — Схема конвективной бухты и магнитосферной суббури из работы [Baumjohann, 1983]; (б) — схема токов в разрыве Харанга из работы [Koskinen and Pulkkinen, 1995]

[Feldstein and Starkov, 1967], геомагнитная широта $\sim 68\text{--}70^\circ$ MLAT соответствует экваториальной границе вечернего сектора аврорального овала в магнито-спокойных условиях.

При благоприятных метеоусловиях во время “полярных” суббурь регистрируются высокоширотные полярные сияния в виде вытянутых вдоль овала дуг, иногда с необычными спиральными структурами [Safargaleev et al., 2020; Дэспирак и др., 2022]. Было найдено [Дэспирак и др., 2014, 2019; Despirak et al., 2018], что “полярные” суббури обычно наблюдаются во время медленного потока солнечного ветра, часто после прохождения высокоскоростного рекуррентного потока. Общие закономерности развития “полярных” суббурь соответствуют типичным характеристикам “классических” суббурь, а именно, формирование токового клина суббури (положительные магнитные бухты в более низких широтах), скачкообразное перемещение электроджета к полюсу после начала суббури, генерация геомагнитных пульсаций $Pi2$. Таким образом, “полярные” суббури можно рассматривать как особый тип суббурь, наблюдаемых в *слабо возмущенных условиях* в вечернем секторе сжатого аврорального овала, т.е. на геомагнитных широтах выше $\sim 68\text{--}70^\circ$ MLAT.

В области пространства, типичной для развития “полярных” суббурь, находится так называемый разрыв Харанга (*Harang discontinuity* – HD) [Harang, 1946; Нерпнер, 1972; Kamide and Vickrey, 1983], представляющий собой узкую широтную полосу, вытянутую по долготе в интервале $\sim 21\text{--}24$ MLT, разделяющую одновременно существующие на разных широтах западный и восточный электроджеты, т.е. отрицательные (более полярные) и положительные (более экваториальные) магнитные бухты [Kissinger et al., 2013 и ссылки в этой работе]. Теоретическое объяснение формирования разрыва Харанга приведено, например, в работе [Erickson et al., 1991]. Положение разрыва Харанга и его широтный размер меняются в пространстве и во времени в зависимости от геомагнитных условий, как это показано, например, в работе [Kunkel et al., 1986].

Схема разрыва Харанга из работы [Koskinen and Pulkkinen, 1995] приведена на рис. 1б для Северного полушария. В послеполуночном секторе, т.е. к востоку от разрыва Харанга, втекающие продольные токи находятся на более высокоширотной (приполярной) зоне R1, а вытекающие — на более экваториальной — R2, что соответствует формированию западного электроджета полярнее вытекающих токов. В дополуночном, вечернем секторе, т.е. к западу от разрыва Харанга, ситуация меняется на противоположную: в высо-

коширотной зоне R1 наблюдаются вытекающие токи, а в более низкоширотной зоне R2 — втекающие, и формируется восточный электроджет. Это значит, что разрыв Харанга характеризует резкое перемещение вытекающих продольных токов (и соответствующее высыпание мягких электронов) в сторону полярной границы аврорального овала. При этом западный электроджет резко сдвигается к северо-западу.

В ряде работ, например, [Nielsen and Greenwald, 1979; Baumjohann et al., 1981; Koskinen and Pulkkinen, 1995; Weygand et al., 2008; Zou et al., 2009] обсуждалась возможная связь области начала (*onset*) типичной, т.е. “классической”, суббури с положением разрыва Харанга. Так, в работе [Nielsen and Greenwald, 1979] было установлено, что область источника начала суббури, как правило, располагается несколько полярнее разрыва Харанга, определенного по наземным магнитным наблюдениям, или совпадает с ним. Однако другие авторы [Baumjohann et al., 1981; Koskinen and Pulkkinen, 1995; Bristow et al., 2003; Zou et al., 2009], использовавшие наблюдения на радарх, пришли к выводу, что область источника начала (*onset*) суббури находится экваториальнее разрыва Харанга на $1\text{--}2^\circ$ или совпадает с ним. Это несоответствие результатов свидетельствует о том, что проблема связи окончательно не решена, эта связь может быть разной для различных типов магнитных суббурь.

Целью данной работы является исследование связи “полярных” суббурь (т.е. суббурь на сжатом овале) с положением разрыва Харанга.

2. ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ

Работа основана на анализе наземных наблюдений на скандинавской сети магнитометров IMAGE с дискретизацией 10 с (<http://space.fmi.fi/image/>) [Tanskanen, 2009]. В работе использовались станции профиля PPN (Polesie) – NAL (Ny Alesund). Это единственная в мире плотная сеть станций, расположенных почти вдоль выбранного геомагнитного меридиана ($\sim 100\text{--}110^\circ$ MLON, с MLT = UT+2.5 ч) от полярных широт архипелага Шпицберген (NAL $\sim 76^\circ$ MLAT) до среднеширотных станций Германии (PPN $\sim 47^\circ$ MLAT), географические и геомагнитные координаты всех станций приведены на сайте IMAGE. На используемом профиле станций имеется лишь одна “дырка” (пропуск наблюдений) — между Шпицбергом и континентом. Промежуточной станцией между архипелагом Шпицберген и материком является ст. Bear Island (BJN, 71.4° MLAT) на острове Медвежий, ближайшей к континенту станцией, является Soroa (SOR, 67.8° MLAT).

Если магнитные бухты наблюдались в BJN, но отсутствовали в SOR, то условной низкоширотной границей появления магнитных бухт можно считать середину расстояния между пунктами BJN и NOR, т.е. порядка 70° MLAT, поэтому эта широта и использовалась как граничная в развитии “полярных” суббурь. Это соответствует условиям сжатого овала [Lui et al., 1973]. Как правило, начало (onset) почти всех исследуемых “полярных” суббурь на скандинавском меридиональном профиле IMAGE наблюдалось в obs. BJN или между BJN и SOR. В работе также используются данные некоторых среднеширотных станций, взятые с сайта планетарной сети магнитометров INTERMAGNET (<https://imag-data.bgs.ac.uk>).

Глобальное пространственное распределение ионосферных токов во время исследуемых “полярных” суббурь исследовалось по общедоступным данным проекта AMPERE, представленным на сайте <http://ampere.jhuapl.edu/products> в виде обобщенных за 10 мин карт распределения ионосферных токов, построенных по результатам сферического гармонического анализа магнитных измерений на 66 одновременно работающих ионосферных спутниках на высоте ~ 780 км. По этим измерениям также вычисляются карты распределения втекающих и вытекающих в ионосферу продольных токов. К сожалению, эти карты представляются в красно-синем изображении, что делает невозможным их представление в черно-белом варианте журнала, поэтому в данной работе они не используются. (Заметим, что рисунки в цвете доступны в электронной версии статьи).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Для исследования возможной связи “полярных” суббурь с планетарной суббуревой активностью появление “полярных” суббурь на меридиане IMAGE было сопоставлено с вариациями AL -индекса. Мы использовали те же случаи “полярных” суббурь в зимние сезоны 2010–2020 гг., которые исследовались в работе [Клейменова и др., 2023], за исключением событий, во время которых не было данных регистрации на ионосферных спутниках AMPERE. Таким образом, было выбрано 214 случаев “полярных” суббурь. Результат исследований показал, что в 90% случаев развитие “полярных” суббурь на профиле IMAGE сопровождалось одновременным возрастанием суббуревой активности по AL -индексу. Анализ 21 случая “полярных” суббурь, не сопровождаемых всплеском AL -индекса, показал, что в 15 событиях западный электроджет в послеполюночном секторе наблюдался на очень высоких

широтах, далеко от береговых станций Диксон и Тикси, по данным которых вычисляется AL -индекс. В 6 событиях усиление продольного тока наблюдалось в очень узкой по долготе и широте области. Похожее событие обсуждалось и в работе [Дэспирак и др., 2022].

Кроме того, был выполнен анализ пространственного распределения ионосферных токов по данным спутниковых наблюдений AMPERE во время появления “полярных” суббурь на профиле IMAGE. Исследования показали, что перед началом (или одновременно с ним) подавляющего большинства вечерних дополуночных “полярных” суббурь наблюдается интенсивный магнитный вихрь в околополуночном секторе, свидетельствующий о резком локальном усилении продольных токов. Вихрь, вращающийся по часовой стрелке, является индикатором интенсификации втекающих продольных токов, а вихрь, вращающийся против часовой стрелки, — вытекающих продольных токов.

На рис. 2 приведены четыре примера карт ионосферных токов AMPERE во время начала типичных случаев “полярных” суббурь, зарегистрированных на профиле IMAGE, положение которого показано стрелкой в нижнем левом углу карт. Под каждой картой также показаны графики AL -индекса в рассматриваемое на карте время. На всех картах видно, что к востоку от меридиана IMAGE в раннем утреннем секторе Земли наблюдается развитие западного электроджета на геомагнитных широтах порядка 70° MLAT, т.е. выше типичных широт “классических” суббурь.

Наиболее четко начало “полярной” суббури на меридиане IMAGE можно определить по наблюдениям в BJN. Для случаев, рассмотренных на рис. 2, мы сравнили данные в BJN с наблюдениями на ст. Диксон (DIK, геомагнитные координаты 157° MLON и 69.3° MLAT, магнитограммы в работе не приводятся), расположенной к востоку от Скандинавии. Заметим, что в другой сибирской ст. Тикси (197° MLON, 66.7° MLAT, магнитограммы не приводятся), находящейся на более низких геомагнитных широтах, амплитуда отклонений во время рассмотренных суббурь была значительно меньше и резкого начала суббури не отмечалось. В табл. 1 приведено время начала “полярной” суббури (UT) в BJN и начало суббури в Диксон для 4-х событий на рис. 2.

Видно, что с точностью в несколько минут начало “полярной” суббури на меридиане IMAGE совпадает с началом суббури в Диксоне или немного отстает. К западу от магнитного вихря электроджет сдвинулся к западу, в сторону поляр-

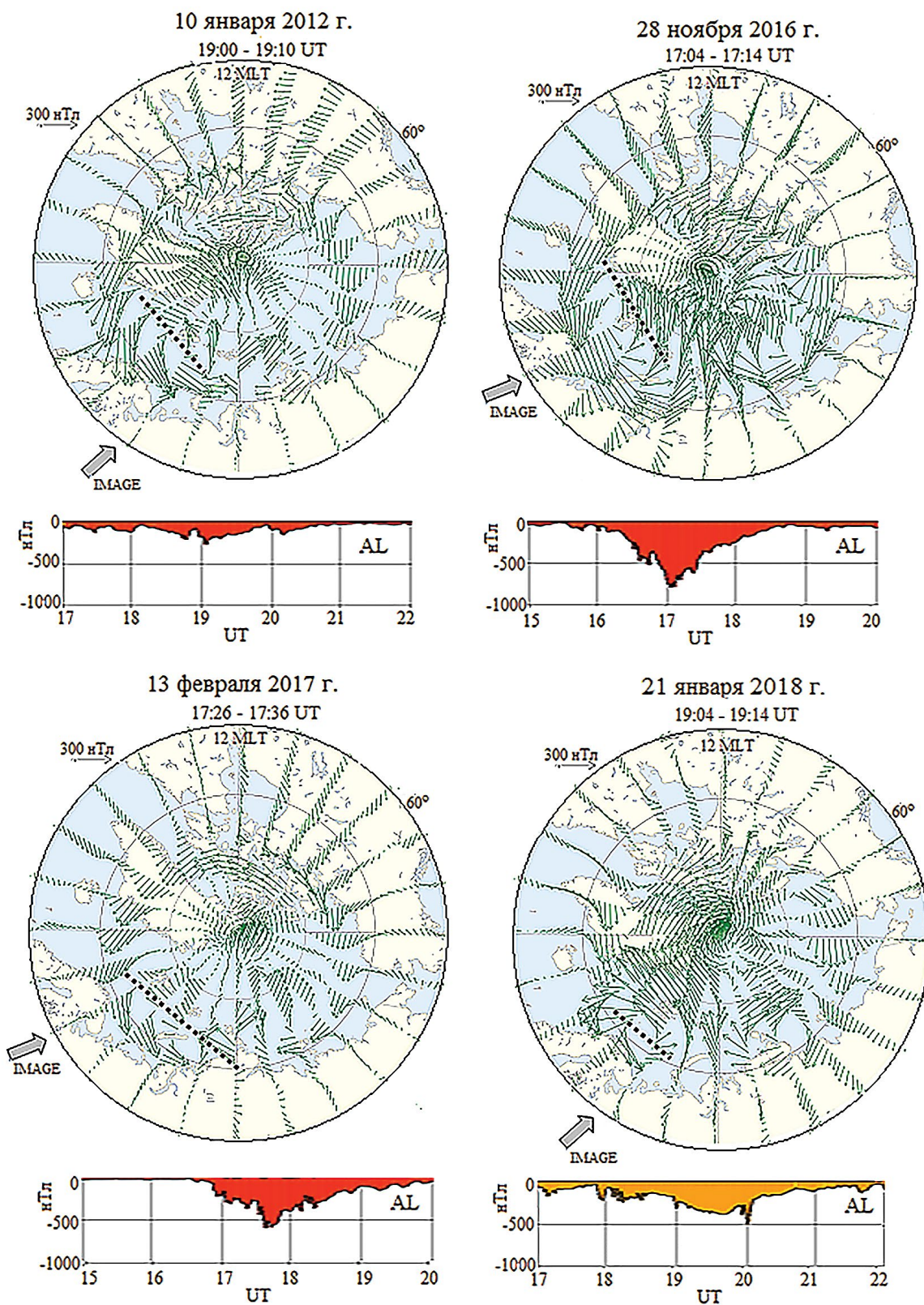


Рис. 2. Типичные примеры распределения глобальных ионосферных токов по данным измерений на спутниках системы AMPERE и вариации планетарного суббурового AL-индекса во время 4-х “полярных” суббурь. Подробности в тексте.

Таблица 1. Время начала “полярной” суббури в BJN и начало суббури в Диксон для 4-х событий на рис. 2

Дата	Начало суббури в BJN	Начало суббури в DIK
10. 01.2012	19:00 UT	18:55 UT
28.11.2016	17:05 UT	17:03 UT
13.02.2017	17.30 UT	17.28 UT
21.01.2018	19.00 UT	18.56 UT

ной границы вечернего аврорального овала на геомагнитные широты до порядка $76\text{--}78^\circ$ MLAT.

На всех примерах четко виден околополуночный магнитный вихрь, причем наиболее часто имеет место формирование двух, а иногда и больше одновременных вихрей: ближе к утреннему краю наблюдается вихрь, вращающийся по часовой стрелке, а ближе к вечернему краю — вихрь, вращающийся против часовой стрелки. Первый свидетельствует об интенсификации втекающих продольных токов, а второй — об усилении вытекающих токов, сопровождающимся усилением высыпания мягких электронов, вызывающих полярные сияния. Развитие магнитного вихря резко “поворачивает” западный электроджет в дополуночном секторе в сторону полярной границы аврорального овала, где формируется ионосферный электроджет с низкоширотной границей порядка $\sim 70^\circ$ MLAT. На более низких широтах усиливается восточный электроджет. Узкая, вытянутая по долготе широтная граница между западным и восточным электроджетами представляет собой разрыв Харанга, “нос” который начинается от магнитного вихря и вытягивается к западу

Положение разрыва Харанга четко прослеживается на всех четырех картах AMPERE представленных на рис. 2. На картах видно, что экваториальная граница “полярных” суббурь представляют собой полярную границу сформировавшегося разрыва Харанга, а полярная граница восточного электроджета, расположенного на более низких широтах (в субваторальных, а иногда даже и в авроральных широтах), являются экваториальной границей разрыва Харанга.

На рис. 3 подробно рассмотрено одно из типичных событий “полярных” суббурь 5 декабря 2020 г. Слева показаны магнитограммы IMAGE, на которых видно резкое начало “полярной” суббури около 20.10 UT на ст. BJN (71.4° MLAT), а ниже на ст. SOR (67.3° MLAT), регистрируется уже положительная магнитная бухта, их разделяет море и разрыв Харанга, расстояние между станциями около 400 км. На среднеширотной

обс. Борок (BOX, 114° MLON, 54.4° MLAT) видна четкая положительная магнитная бухта в X-компоненте поля и четкая положительная бухта в Y-компоненте поля, указывающая на то, что источник этой суббури находится к востоку от данного меридиана. На рис. 3 также показана магнитограмма среднеширотной обс. Иркутск (IRT, 179° MLON, 47.8° MLAT), находящейся 65° восточнее Борка. Видно, что в Иркутске регистрируется отрицательная бухта в Y-компоненте поля, что означает, что источник суббури находится к западу от Иркутска, следовательно, между Борком и Иркутском.

Это подтверждается приведенной в правом верхнем углу картой AMPERE распределения ионосферных токов, положение Борка и Иркутска на которой показано стрелками внизу карты. Три интенсивных магнитных вихря видны в околополуночном секторе. К востоку от вихрей виден западный электроджет на широте около 70° MLAT, а к западу от вихрей западный электроджет резко переместился в сторону полюса, на более низких широтах усилился восточный электроджет. Пунктирной линией на карте показан разрыв Харанга. В правом нижнем углу рисунка показан график AL-индекса. Видно, что “полярная” суббуря на меридиане IMAGE и суббулевая активность в ночном секторе начинаются почти одновременно (с точностью до нескольких минут).

Источником “полярных” суббурь, наблюдаемых на сети IMAGE в приполярной области вечернего сектора, по-видимому, может быть локальное усиление продольных токов, индикатором которого является развитие магнитного вихря в околополуночном секторе. Эти магнитные вихри, по-видимому, также вызывают развитие магнитной суббури к востоку от вихря, т.е. в утреннем секторе. Действительно, в ряде работ, например, [Opgehoorth et al., 1980; Untiedt and Baumjohann, 1993; Lyatsky et al., 2001] была установлена связь развития “классической” суббури с появлением вихря в эквивалентных ионосферных токах.

5 декабря 2020 г.

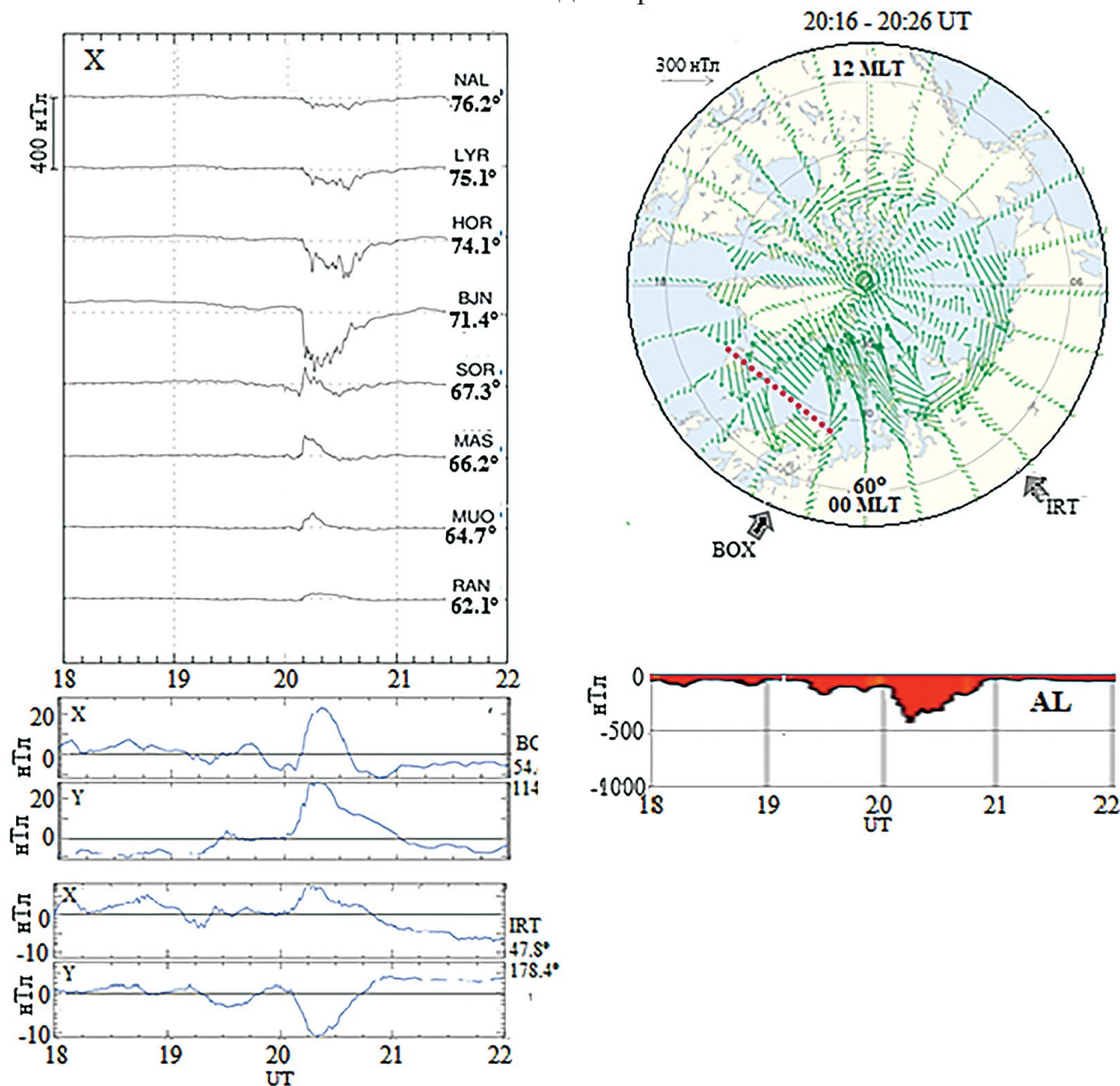


Рис. 3. Пример одной из типичных “полярных” суббурь 5 декабря 2020 г.: магнитограммы некоторых станций IMAGE и среднеширотных obs. Борок (BOX) и Иркутск (IRT), а также карта распределения ионосферных токов по данным AMPERE и вариации AL-индекса.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

“Полярные” суббури являются типичным явлением в вечернем секторе сжатого овала. Понятие “сжатый” овал означает, что в обсуждаемое время полярные сияния наблюдаются в высоких широтах в узкой области вблизи полярного края аврорального овала, т.е. там же, где мы отмечаем появление “полярных” суббурь. Ранее было показано, например, [Клейменова и др., 2012;

Despirak et al., 2022], что в метео благоприятных условиях “полярные” суббури, как правило, сопровождаются дугами высокоширотных полярных сияний, вызываемых локальным усилением продольных токов (поэтому вначале исследовались “полярные” суббури только в зимние периоды, когда при благоприятных метеоусловиях возможны наблюдения полярных сияний). Это может быть подтверждением того, что генерация

“полярных” суббурь тоже связана с усилением вытекающих продольных токов (*upward FACs*) зоны R1, вызывающих сияния. Ряд авторов считает, что источник этих продольных токов находится на фланге магнитосферы [Ebihara and Tanaka, 2022] и, наиболее вероятно, связан с низкоширотным входным слоем (*LLBL*) [Bythrow et al., 1981; Siscoe et al., 1991; Troshichev, 2003], где быстрый поток магнитошиша может взаимодействовать с медленными магнитосферными потоками.

Важным является также вопрос, сопровождается ли начало (*onset*) “полярных” суббурь брейкапом полярных сияний и где находится область источника *onset*. К сожалению, в окрестностях BJN, где обычно на профиле IMAGE наблюдается начало “полярной” суббури, нет наблюдений полярных сияний. Однако в работе [Milan et al., 2010] представлены результаты статистического анализа пространственно-временного распределения более 2000 авроральных брейкапов (ярких всплесков сияний) как индикатора начала суббури, зарегистрированных на спутнике IMAGE. В этой работе было получено, что на геомагнитных широтах выше 67–68° MLAT авроральные брейкапы наблюдаются в предполуночное время. Это соответствует результатам исследования “полярных” суббурь [Клейменова и др., 2023]. Можно сделать вывод, что начало “полярных” суббурь, как и “классических” суббурь, по-видимому, сопровождается появлением аврорального брейкапа, который, к сожалению, из-за отсутствия наземных оптических наблюдений в “нужном” месте пока не регистрировался.

Известно, что через 10–15 мин после начала “классической” суббури, на фазе ее развития, за счет азимутального давления плазмы, полярные сияния и ионосферные токи начинают быстро перемещаться на вечернюю сторону к полюсу (полярная экспансия суббури), формируя “движущийся к западу изгиб сияний” (*Westward Travelling Surge* – WTS), например, [Tighe and Rostoker, 1981; Baumjohann, 1983]. Можно предположить, что подобный процесс, по-видимому, имеет место и в слабо-возмущенных геомагнитных условиях, т.е. при сжатом авроральном овале, когда экваториальная граница овала расположена на достаточно высоких геомагнитных широтах (~68–70° MLAT), и проявляется как развитие в вечернем секторе особого типа суббурь, названных “полярными” суббурями, которые, в свою очередь, формируют полярную границу разрыва Харанга.

Заметим, что в ряде ранних работ, например, [Pytte et al., 1978b; Hones et al., 1985] появление

отрицательных магнитных бухт в высоких широтах интерпретировалось как развитие “*poleward leap*” суббури в позднюю восстановительную фазу суббури за счет вытягивания силовых линий источника далеко в хвост магнитосферы. Таким же процессом вытягивания силовых линий в хвост магнитосферы объяснялось и развитие “движущегося к западу изгиба полярных сияний” (WTS). Однако в настоящее время многие из исследователей “хвостовую” идею генерации суббурь не поддерживает и склоняется к мысли, что источник суббури находится в замкнутой магнитосфере. Это было даже опубликовано в одной из последних работ “отца” суббури – Акасофу [Akasofu, 2017].

При этом морфологические характеристики “*poleward leap*” принципиально отличаются от высокоширотной экспансии магнитосферных суббурь [Pytte et al., 1978], прежде всего, отсутствием геомагнитных пульсаций *Pi2*, а также отсутствием формирования токового клина (SCW), т.е. отсутствием положительных магнитных бухт в средних широтах. Таким образом, “полярные” суббури можно рассматривать как особый тип высокоширотных суббурь, наблюдаемых в приполярных широтах вечернего сектора сжатого аврорального овала. “Полярные” суббури формируют полярную границу разрыва Харанга, а наблюдаемые на более низких широтах положительные магнитные бухты – его экваториальную границу.

5. ВЫВОДЫ

Исследовано глобальное распределение положения ионосферных электроджетов и разрыва Харанга по данным спутниковых измерений проекта AMPERE во время 214 “полярных” суббурь, зарегистрированных на скандинавском меридиональном профиле IMAGE в зимние сезоны 2010–2020 гг. Показано, что мгновенное положение экваториальной границы ионосферного тока “полярной” суббури определяет мгновенное положение полярной границы разрыва Харанга, а полярная граница восточного электроджета определяет его экваториальную границу.

Установлено, что 90% “полярных” суббурь наблюдается одновременно с возрастанием планетарной суббуревой активности по *AL*-индексу и развитием магнитосферной суббури в послеполуночном секторе. В подавляющем большинстве несовпадающих событий развитие западного электроджета отмечалось на очень высоких широтах, значительно выше широт станций, по данным которых вычисляется *AL*-индекс суббуревой планетарной активности.

Показано, что появление “полярных” суббурь связано с развитием околополуденных магнитных вихрей в западном ионосферном токе, вызывающих на резкую локальную интенсификацию продольных электрических токов. При этом к востоку от вихря усиливается ионосферный электроджет утренней авроральной суббури, а к западу наблюдается резкое смещение западного ионосферного тока к полярным широтам вечернего сектора, подобное так называемому “движущемуся к западу изгибу полярных сияний” (*westward travelling surge* – WTS), наблюдаемому после начала (*onset*) “классической” суббури. Это приводит к формированию в вечернем секторе приполярных широт новой суббури, названной “полярной” суббурей с типичными характерными признаками суббури (всплесками геомагнитных пульсаций $Pi2$, началом (*onset*) суббури вблизи экваториальной границы сжатого в это время овала, развитием “токового клина суббури” (*substorm current wedge*-SCW) и т.д.).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят создателей баз данных сетей IMAGE (<https://space.fmi.fi/image/>), INTERMAGNET (https://imag-data.bgs.ac.uk/GIN_V1/GINForms2/), SuperMAG (<https://supermag.jhuapl.edu/>) и проекта AMPERE (<http://ampere.jhuapl.edu/products>) за возможность их использования в данном исследовании.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследования выполнены в рамках госзаданий институтов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дэспирак И.В., Любич А.А., Клейменова Н.Г. “Полярные” и “высокоширотные” суббури и условия в солнечном ветре // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 54. № 5. С. 619–626. 2014. <https://doi.org/10.1134/S0016793214050041>
- Дэспирак И.В., Клейменова Н.Г., Любич А.А., Малышева Л.М., Громова Л.И., Ролдугин А.В., Козелов Б.В. Полярные магнитные суббури и сияния на Шпицбергене: событие 17 декабря 2012 // Изв. РАН. Сер. Физ. Т. 86. № 3. С. 340–348. 2022. <https://doi.org/10.31857/S0367676522030097>
- Клейменова Н.Г., Антонова Е.Е., Козырева О.В., Малышева Л.М., Корнилова Т.А., Корнилов И.А. Волновая структура магнитных суббурь в полярных широтах // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 52. № 6. С. 785–793. 2012 <https://doi.org/10.1134/S0016793212060059>
- Клейменова Н.Г., Громова Л.И., Дэспирак И.В., Малышева Л.М., Громов С.В., Любич А.А. Особенности полярных суббурь: анализ отдельных событий // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 63. № 3. С. 327–339. 2023 <https://doi.org/10.31857/S0016794023600023>.
- Сафаргалеев В.В., Митрофанов В.М., Козловский А.Е. Комплексный анализ полярных суббурь на основе магнитных, оптических и радарных наблюдений на Шпицбергене // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 58. № 4. С. 793–808. 2018. <https://doi.org/10.1134/S0016793218040151>
- Akasofu S.-I. The development of the auroral substorm // Planet. Space Sci. V. 12(4). P. 273–282. 1964. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(64\)90151-5](https://doi.org/10.1016/0032-0633(64)90151-5)
- Akasofu S.-I. Where is the magnetic energy for the expansion phase of auroral substorms accumulated? 2. The main body, not the magnetotail // J. Geophys. Res.: Space Physics. V. 122. P. 8479–8487. 2017. <https://doi.org/10.1002/2016JA023074>
- Baker D.N., Pulkkinen T.I., Angelopoulos V., Baumjohann W., McPherron R.L. Neutral line model of substorms: Past results and present view // J. Geophys. Res. V. 101. P. 12975–13010. 1996. <https://doi.org/10.1029/95ja03753>
- Baumjohann W., Pellinen R.J., Opgenoorth H.J., Nielsen E. Joint two-dimensional observations of ground magnetic field and ionospheric electric fields associated with auroral zone currents: current systems associated with local auroral break-ups // Planet. Space Sci. V. 29. P. 431 – 447. 1981. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(81\)90087-8](https://doi.org/10.1016/0032-0633(81)90087-8)
- Baumjohann W. Ionospheric and field-aligned current systems in the auroral zone: A concise review // Adv. Space Res. V. 2(10). P. 55–62. 1983.
- Bristow W.A., Sofko G., Stenbaek-Nielsen H.C., Wei S., Lummerzheim D., Otto A. Detailed analysis of substorm observations using SuperDARN, UVI, ground-based magnetometers, and all-sky imagers // J. Geophys. Res. V. 108 (A3). P. 1124. 2003. <https://doi.org/10.1029/2002JA009242>
- Bythrow P.F., Heelis R.A., Hanson W.B., Power R.A., Hoffman R. A. Observational evidence for a boundary layer source of dayside region 1 field-aligned currents // J. Geophys. Res. V. 86 (A7). P. 5577. 1981. <https://doi.org/10.1029/JA086iA07p05577>
- Despirak I.V., Lubchich A.A., Kleimenova N.G. High-latitude substorm dependence on space weather conditions in solar cycle 23 and 24 (SC23 and SC24) // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2018. V. 177. P. 54–62. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.09.011>
- Ebihara Y., Tanaka T. Where is Region 1 field-aligned current generated? // J. Geophys. Res.: Space Physics. P. 127. 2022. <https://doi.org/10.1029/2021JA029991>
- Erickson G.M., Spiro R.W., Wolf R.A. The physics of the Harang discontinuity // J. Geophys. Res. V. 96. P. 1633–1645. 1991. <https://doi.org/10.1029/90JA02344>
- Feldstein Y.L., Starkov G.V. Dynamics of auroral belt and geomagnetic disturbances // Planet. Space Sci. V. 15. № 2. P. 209–229. 1967. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(67\)90190-0](https://doi.org/10.1016/0032-0633(67)90190-0)
- Harang L. The mean field of disturbance of polar geomagnetic storms // Terr. Magn. Atmos. Electr. V. 51. P. 353 – 380. 1946. <https://doi.org/10.1029/TE051i003p00353>.

- *Heppner J.P.* The Harang discontinuity in auroral belt ionospheric current // *Geophys. Norv.* V. 29. P. 105 – 120. 1972.
- *Heppner J.P.* Empirical models of high-latitude electric fields // *J. Geophys. Res.* V. 82. P. 1115– 1125. 1977. <https://doi.org/10.1029/JA082i007p01115>.
- *Hones E.W.* The poleward leap of the auroral electrojet as seen in auroral images // *J. Geophys. Res.* V. 90. P. 5333– 5337. 1985. <https://doi.org/10.1029/JA090iA06p05333>
- *Kamide Y., Vickrey J.F.* Variability of the Harang discontinuity as observed by the Chatanika radar and the IMS Alaska magnetometer chain // *Geophys. Res. Lett.* V. 10. № 2. P. 159–162. 1983. <https://doi.org/10.1029/GL010i002p00159>
- *Kepko L., McPherron R.L., Amm O. et al.* Substorm Current Wedge revisited // *Space Sci. Rev.* V. 190. P. 1–46. 2015. <https://doi.org/10.1007/s11214-014-0124-9>
- *Kissinger J., Wilder F.D., McPherron R.L., Hsu T.-S., Baker J.B.H., Kepko L.* Statistical occurrence and dynamics of the Harang discontinuity during steady magnetospheric convection // *J. Geophys. Res.: Space Physics* V. 118. P. 5127–5135. 2013. <https://doi.org/10.1002/jgra.50503>
- *Kleimenova N.G., Despirak I.V., Malysheva L.M., Gromova, L.I., Lubchich A.A., Roldugin A.V., Gromov S.V.* Substorms on a contracted auroral oval // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 245. P. 106049–106062. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2023.106049>
- *Koskinen H.E.J., Pulkkinen T.I.* Midnight velocity shear zone and the concept of Harang discontinuity // *J. Geophys. Res.* V. 100. P. 9539 – 9547. 1995. <https://doi.org/10.1029/95JA00228>.
- *Kunkel T., Baumjohann W., Untied J., Greenwald R.* Electric fields and currents at the Harang discontinuity: A case study // *J. Geophys. V.* 59. P. 73–86. 1986.
- *Lui A.T.Y., Perreault P.D., Akasofu S.-I., Anger C.D.* The diffuse aurora // *Planet. Space Sci.* V. 21(5). P. 857–861. 1973. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(73\)90102-5](https://doi.org/10.1016/0032-0633(73)90102-5)
- *Lui A.T.Y., Akasofu S.-I., Hones E.W. Jr., Bame S.J., McIlwain C.E.* Observation of the plasma sheet during a contracted oval substorm in the prolonged quiet period // *J. Geophys. Res.* V. 81 (7). P. 1415–1419. 1976. <https://doi.org/10.1029/JA081i007p01415>
- *Lyatsky, W., Cogger L.L., Jackel B., Hamza A.M., Hughes W.J., Mur D., Rasmussen O.* Substorm development as observed by Interball UV imager and 2-D magnetic array // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* V. 63. P. 1609 – 1621. 2001. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(01\)00045-1](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(01)00045-1).
- *McPherron R.L., Russell C.T., Aubry M.P.* Satellite studies of magnetospheric substorms on August 15, 1968: 9. Phenomenological model for substorms // *J. Geophys. Res.* V. 78 (16). P. 3131–3149. 1973. <https://doi.org/10.1029/JA078i016p03131>
- *Milan S.E., Boakes P.D., Hubert B.* Response of the expanding/contracting polar cap to weak and strong solar wind driving: Implications for substorm onset // *J. Geophys. Res.*, V. 113, A09215, 2008. <https://doi.org/10.1029/2008JA013340>
- *Nielsen N.E., Greenwald A.* Electron flow and visual aurora at the Harang discontinuity // *J. Geophys. Res.* V. 84. P. 4189–4200. 1979. <https://doi.org/10.1029/JA084iA08p04189>.
- *Nishida A.* Geomagnetic DP2 fluctuations and associated magnetospheric phenomena // *J. Geophys. Res.* V. 73 (5). P. 1795–1803. 1968. <https://doi.org/10.1029/JA073i005p0179>
- *Oppenoorth H.J., Pellinen R.J., Maurer H., Küppers F., Heikkilä W.J., Tanskanen P.* Ground-based observations of an onset of localized field-aligned currents during auroral breakup around magnetic midnight // *J. Geophys. V.* 4. P. 101–115. 1980.
- *Pytte T., McPherron R.L., Jr., Hones E.W., Wes H.I.* Multiple-satellite studies of magnetospheric substorms, III. Distinction between polar substorms and convection-driven negative ba // *J. Geophys. Res.* V. 83 (A2). P. 663–679. 1978a.
- *Pytte T., McPherron R.L., Kivelson M.G., Wes H.I. Jr., Hones E.W.* Multiple-satellite studies of magnetospheric substorms: Plasma sheet recovery and the poleward leap of auroral zone activity // *J. Geophys. Res.* V. 83. P. 5256–5268. 1978b. <https://doi.org/10.1029/JA083iA11p05256>
- *Rostoker G., Akasofu S.-I., Foster J., Greenwald R.A., Kamide Y., Kawasaki K., Lui A.T.Y., McPherron R.L., Russell C.T.* Magnetospheric substorms definitions and signatures // *J. Geophys. Res.* V. 85 (A4). P. 1663–1668. 1980.
- *Safargaleev V.V., Kozlovsky A.E., Mitrofanov V.M.* Polar substorm on 7 December 2015: preonset phenomena and features of auroral breakup // *Ann. Geophys.* V. 38 (4). P. 901–918. 2020. <https://doi.org/10.5194/angeo-38-901-2020>
- *Sergeev V.A., Kubyshkina M.V., Liou K., Newell P.T., Park G., Nakamura R., Mukai T.* Substorm and convection bay compared: Auroral and magnetotail dynamics during convection bay // *J. Geophys. Res.* V. 106. P. 18,843–18,855. 2001
- *Siscoe G.L., Lotko W., Sonnerup B.U.O.* A high-latitude, low-latitude boundary layer model of the convection current system // *J. Geophys. Res.* V. 96 (A3). P. 3487. 1991. <https://doi.org/10.1029/90ja02362>
- *Tanskanen E.F.* A comprehensive high-throughput analysis of substorms observed by IMAGE magnetometer network: Years 1993–2003 examined // *J. Geophys. Res.* V. 114. P. A05204. 2009. <https://doi.org/10.1029/2008JA013682>
- *Tighe W., Rostoker G.* Characteristics of westward travelling surges during magnetospheric substorms // *J. Geophys. V.* 50 (1). P. 51–67. 1981. Retrieved from <https://journal.geophysicsjournal.com/JofG/article/view/12>
- *Troshichev O.A.* Low-latitude boundary layer and generation of field-aligned currents // *Earth’s low-latitude boundary layer.* P. T. Newell, and T. Onsager (Eds.). P. 329–334. AGU. 2003. <https://doi.org/10.1029/133GM33>
- *Untiedt J., Baumjohann W.* Studies of polar current systems using the IMS Scandinavian magnetometer array //

Space Sci. Rev. V. 63. P. 245–390. 1993. <https://doi.org/10.1007/BF00750770>.

— Weygand J.M., McPherron R.L., Frey H., Amm O., Kauristie K., Viljanen A.T., Koistinen A. Relation of substorm onset to Harang discontinuity // J. Geophys. Res. V. 113. P. A04213. 2008. <https://doi.org/10.1029/2007JA012537>

— Zou S., Lyons L.R., Wang C.-P., Boudouridis A., Ruohoniemi J.M., Anderson P.C., P.L. Dyson P.C., Devlin J.C. On the coupling between the Harang reversal evolution and substorm dynamics: A synthesis of SuperDARN, DMSP, and IMAGE observations // J. Geophys. Res. V. 114. P. A01205. 2009. <https://doi.org/10.1029/2008JA013449>.

“Polar” Substorms and the Harang Discontinuity

N. G. Kleimenova^{1,*}, L. I. Gromova², S. V. Gromov², L. M. Malysheva¹, I. V. Despirak³

¹*Schmidt Institute Physics of the Earth RAS, Moscow, Russia*

²*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Moscow, Troitsk, Russia*

³*Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia*

*e-mail: ngk1935@yandex.ru

We analyzed 214 cases of “polar” substorms on the Scandinavian meridian IMAGE, i.e. substorms recorded by magnetometers located at geomagnetic latitudes above $\sim 70^\circ$ MLAT at 19–02 MLT under magnetically quiet time in the absence of negative magnetic bays at lower latitudes. The Harang Discontinuity, which separates the westward and eastward electrojets by latitude, is a typical structure for the indicated MLT sector of the high-latitude ionosphere. The global distribution of ionospheric electrojets and the location of the Harang discontinuity during the development of “polar” substorms were studied by the maps constructed from the results of spherical harmonic analysis of the magnetic measurements on 66 simultaneous ionospheric communications satellites of the AMPERE project. Based on these maps analysis, it is shown that the instantaneous location of the equatorial boundary of the ionospheric current of a “polar” substorm determines the instantaneous location of the polar boundary of the Harang Discontinuity, and the polar boundary of the eastward electrojet determines its equatorial boundary. It has been established that the appearance of 90% of the “polar” substorms is observed simultaneously with increasing of the planetary substorm activity according to the *AL*-index and the development of a magnetospheric substorm in the post-midnight sector. At the same time, the development of the evening “polar” substorms is associated with the formation of near-midnight magnetic vortices at geomagnetic latitudes of $\sim 70^\circ$ MLAT (near the “nose” of the Harang discontinuity), indicating a sharp local enhancement of the field-aligned currents. This leads to the formation of a new substorm in the evening sector of near-polar latitudes, called a “polar” substorm with typical features of the onset of a substorm (*Pi2* geomagnetic pulsation bursts, an abrupt onset of the substorm close to the equatorial boundary of the constructed oval (the development of a “substorm current wedge” — etc.)

Keywords: magnetosphere, magnetic storm, substorm, ionospheric currents.