

УДК 533.951

ИНТЕНСИВНЫЕ СУББУРИ В ГЛАВНУЮ ФАЗУ МАГНИТНОЙ БУРИ 23–24 МАРТА 2023 г.

© 2024 г. Л. И. Громова¹, *, Н. Г. Клейменова², **, С. В. Громов¹, К. Х. Канониди¹,
В. Г. Петров¹, Л. М. Малышева²

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН),
Москва, Троицк, Россия

²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта (ИФЗ РАН), Москва, Россия

*e-mail: gromova@izmiran.ru

**e-mail: ngk1935@yandex.ru

Поступила в редакцию 29.02.2024 г.

После доработки 21.06.2024 г.

Принята к публикации 25.07.2024 г.

Рассмотрены планетарные особенности пространственно-временного распределения ионосферных электроджетов в начале и максимуме активности трех очень интенсивных суббурь (с индексом AL от -1200 до -1700 нТл) в главной фазе сильной магнитной бури 23–24 марта 2023 года. При анализе суббурь использовались карты планетарного распределения высокоширотных ионосферных токов, построенные на основе одновременных магнитных измерений на 66-ти низкоорбитальных спутниках проекта AMPERE, а также наземные магнитограммы скандинавского профиля IMAGE и среднеширотных станций ИЗМИРАН, расположенных в той же долготной области. Установлено, что начало всех исследуемых суббурь на меридиане IMAGE, сопровождалось развитием ночного токового вихря с направлением вращения по часовой стрелке, что является индикатором усиления втекающих продольных токов. Наземные среднеширотные наблюдения на сети станций ИЗМИРАН подтвердили, что в ночном секторе центр токового клина суббурь находился значительно восточнее меридиана IMAGE: Во время максимума интенсивности суббурь подобный, но более обширный токовый вихрь наблюдался в утреннем секторе, что, вероятно, является типичным для интенсивных суббурь.

Ключевые слова: магнитная буря, суббуря, ионосферные и продольные токи.

DOI: 10.31857/S0016794024060041, **EDN:** QOOTXJ

1. ВВЕДЕНИЕ

Главная фаза магнитной бури имеет принципиальное значение в изучении процессов передачи энергии в системе солнечный ветер — магнитосфера — ионосфера. Практически все магнитные бури на своей главной фазе сопровождаются интенсивными суббурями, например [Akasofu and Chapman, 1963], и чем сильнее буря, тем интенсивнее суббури [Feldstein et al., 1997], поскольку оба эти явления имеют общую причину — южную компоненту межпланетного магнитного поля (B_z ММП < 0).

Имеется огромное число отдельных работ и обзоров, посвященных исследованию различных аспектов развития суббурь, наблюдаемых как

во время магнитных бурь, так и в их отсутствии. В ранних работах, например, [Kamide et al., 1982; Hsu and McPherron, 2000] авторы не находили разницы между этими суббурями. В то же время, при сравнении распределения магнитного поля в хвосте магнитосферы во время суббурь, связанных и не связанных с магнитными бурями, в работе [Baumjohann et al., 1996] были найдены значительные различия, позволившие отнести их к разному типу суббурь.

Позднее в работе [Hoffman et al., 2010] было проведено исследование особенностей сопровождающего суббурю видимого аврорального свечения на спутнике “Polar” во время 16 умеренных и сильных магнитных бурь, в сравнении с подобным свечением во время изолированных суббурь,

не связанных с магнитными бурями. Были установлены их существенные различия, проявляющиеся, прежде всего, в том, что суббури во время бурь не сопровождались развитием авроральной выпуклости (*bulge*) и развитием двойного овала, т. е. бифуркацией сияний (по терминологии [Gjerloev et al., 2008]).

Однако другими исследователями этот вывод не подтвердился. Так, например, Корнилова и Корнилов [2009] по данным анализа наземных телевизионных наблюдений полярных сияний в обс. Ловозеро во время главной фазы 10-ти магнитных бурь пришли к выводу, что “буревые” суббури могут сопровождаться развитием авроральной выпуклости как в виде скачкообразного перемещения авроральных дуг в сторону полюса, так и в виде ярких диффузных пятен сияний, быстро распространяющимися в разных направлениях. Характеристики сияний зависели от многих причин: параметров солнечного ветра и ММП, местного магнитного времени (MLT), источника, вызвавшего данную магнитную бурю, и др.

Таким образом, пока нет четкого понимания, существуют ли принципиальные различия суббурь во время бурь и без них, и, если есть, то какие именно. Также явно недостаточно исследованы глобальные особенности пространственно-временной динамики развития суббурь во время различных по типу и интенсивности магнитных бурь, даже на примерах анализа отдельных событий. Цель данной работы — исследование интенсивных магнитосферных суббурь во время магнитной бури 23–24 марта 2023 года, одной из первых сильных бурь в 25-ом цикле солнечной активности.

2. МАГНИТНАЯ БУРЯ 23–24 МАРТА 2023 г.

Магнитная буря 23–24 марта 2023 года стала первой сильной (минимальное значение $SymH \sim -170$ нТл) бурей 25 цикла солнечной активности. Она произошла на четвертом году развития фазы роста солнечного цикла, который является вторым в эпохе пониженной солнечной активности [Ишков, 2023] и была обусловлена приходом к Земле возмущений от взаимодействия корональных выбросов масс, происшедших при возможных вспышечных событиях 20 марта 2023 г. (<https://www.izmiran.ru/services/saf/archive/>). Как показано в работе [Ишков, 2022], наиболее мощные (для данного цикла) вспышечные события внутри эпох обычно происходят на фазе спада цикла и в начальной стадии фазы минимума, более редко на фазе роста и на фазе максимума, поэтому появление такой сильной маг-

нитной бури на пороге максимума солнечного цикла привлекло всеобщее внимание.

Главная фаза магнитной бури началась около 10 UT 23 марта с появлением устойчивого отрицательного градиента $SymH$. Однако ее развитие было довольно медленным из-за неустойчивой и сильно варьирующейся около нуля B_z -компоненты ММП. И только в ~17:30 UT 23 марта с резким поворотом ММП к югу главная фаза начала развиваться активно.

Мы исследовали интервал активного развития главной фазы бури (с ~17:40 UT 23 марта, когда B_z ММП повернулась к югу, до 03 UT 24 марта), который характеризовался мало меняющейся скоростью (440–490 км/с) и слабым динамиче-

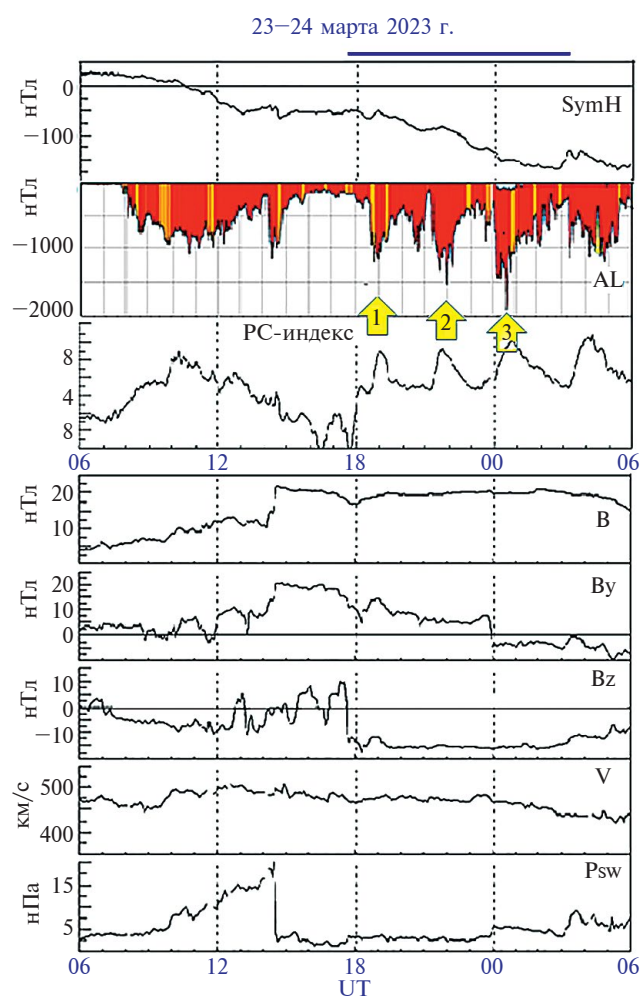


Рис. 1. Вариации индексов геомагнитной активности ($SymH$, AL , PC), компонент ММП (B , B_y , B_z) и параметров солнечного ветра (скорости V и динамического давления P_{sw}). Стрелки — рассматриваемые суббури. Горизонтальная черта — анализируемый интервал.

ским давлением (25 нПа) солнечного ветра; при этом величина B_z -компоненты ММП слабо изменялась в течение 9 ч, оставаясь в диапазоне от ~ -11 нТл до ~ -16 нТл (рис. 1).

Во время этого периода наблюдалось несколько интервалов возрастания суббуревой активности, выразившихся в последовательности интенсивных суббурь с AL -индексом, достигавшим -1200 , -1500 , -1700 нТл, синхронно с которым PC -индекс, как индикатор поступления в магнитосферу энергии солнечного ветра [Troshichev et al., 2014], значительно возрастал. На рис. 1 видно, что возрастание PC -индекса было одинаковым перед анализируемыми суббурями, что является результатом практически неизменной скорости солнечного ветра и величины B_z -компоненты ММП в рассматриваемый временной интервал, и только смена знака B_y -компоненты от положительного к отрицательному и скачок плотности солнечного ветра в 00 UT 24 марта привели к тому, что третья суббуря развивалась в несколько других условиях, чем первая и вторая.

Ниже будут рассмотрены особенности этих трех суббурь более детально.

3. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

В качестве индикатора суббурь мы использовали графическое представление классического AL -индекса (<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/>), а не часто используемый 1-мин SML -индекс, который рассчитывается по методике вычисления AL -индекса, но по всем станциям сети SuperMAG (<https://supermag.jhuapl.edu/indices/>) в полосе магнитных широт от 40 до 80° . Заметим, что данные SML -индекса становятся важными при исследовании больших магнитных бурь, когда экваториальная граница овала и положение западного электроджета смещаются ниже авроральных станций, используемых для вычисления AL -индекса.

К сожалению, к настоящему времени в сети SuperMAG для события 23–24 марта 2023 г. пока нет магнитных данных станций Тикси (ТИК) и Диксон (ДИК), очень важных для оценки геомагнитных возмущений в авроральной зоне в исследуемый интервал времени. Однако эти данные уже имеются в МЦД Киото, и вычисленный с их учетом AL -индекс может рассматриваться как наиболее надежный. Но на сайте МЦД Киото пока недоступны численные значения этого индекса.

Глобальное распределение суббурь анализировалось по картам ионосферных токов, представленных проектом AMPERE (*Active Magnetosphere and Planetary Electrodynamics Response Experiment*) на сайте (<http://ampere.jhuapl.edu/products>). Они

строятся на базе одновременных магнитных измерений 66 низкоорбитальных (780 км) спутников. Карты AMPERE представлены в AAGCM-системе координат (MLAT, MLT) с шагом 1° по широте и осреднением данных по 10-минутному интервалу с 2-минутным сдвигом (<https://ampere.jhuapl.edu/info/>). Мы относим каждую карту к середине интервала осреднения.

Равномерное расположение спутников над поверхностью Земли дает картину планетарного распространения геомагнитной активности, чего мы не можем получить из наземных данных, так как станции расположены неравномерно из-за больших океанских просторов, и/или из-за отсутствия точек наблюдения (например, в Сибири). Равномерность покрытия спутниковыми данными поверхности Земли делает анализ карт AMPERE предпочтительнее, чем анализ карт SuperMAGa.

В исследовании также использовались наземные данные меридионального профиля скандинавской сети магнитометров проекта IMAGE (*International Monitor for Auroral Geomagnetic Effects*) (<https://space.fmi.fi/image/>), расположенных на широтах 57 – 78° MLAT примерно на одной долготе, $MLT = UT + 2.7$, и среднеширотных станций сети ИЗМИРАН (частично они доступны на сайте (<http://serv.izmiran.ru>), размещенных в том же долготном секторе, что и меридиональный профиль станций IMAGE. В настоящее время IMAGE — практически единственная доступная сеть магнитометров, среди которых можно выбрать цепочку станций, густо расположенных по широте вдоль одного меридиана, практически от полярной шапки до — с учетом данных сети ИЗМИРАН — низких широт. Станции, входящие в североамериканскую сеть магнитометров SuperMAG, расположены на разных широтах и долготах, и нет возможности выбрать подобную цепочку магнитометров, образующих достаточно длинный широтный профиль вдоль одного и того же меридиана.

Вариации параметров ММП и солнечного ветра, а также индекса буревой активности $SymH$ исследовались по 1-мин данным OMNI (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>), PC -индекса — по данным сайта (<https://pcindex.org>).

4. ГЛОБАЛЬНАЯ ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ДИНАМИКА СУББУРЬ ВО ВРЕМЯ ГЛАВНОЙ ФАЗЫ МАГНИТНОЙ БУРИ

Особенности глобального развития суббурь во время главной фазы магнитной бури рассмотрим по AMPERE-картам распределения ионосферных токов в высоких широтах (выше 60° MLAT)

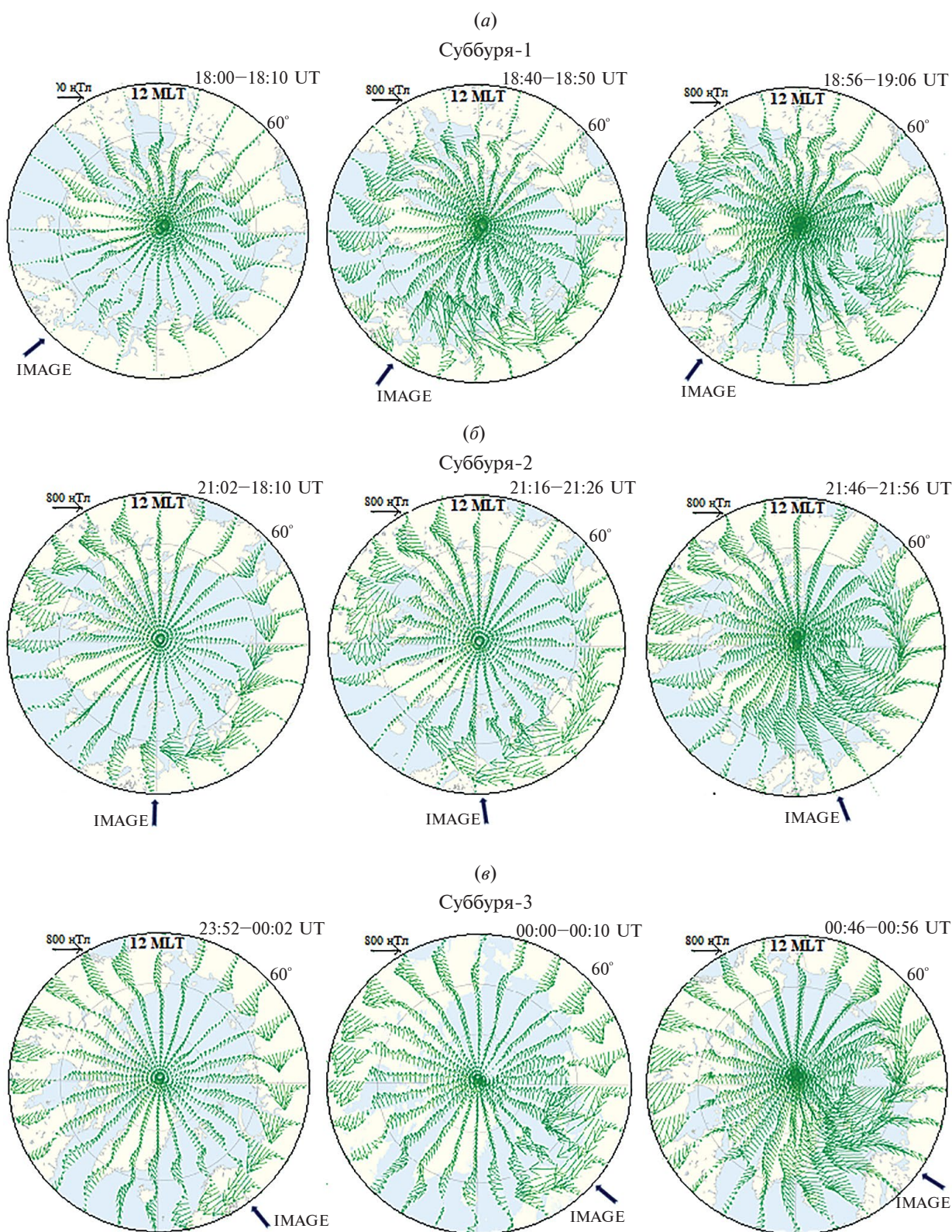


Рис. 2. Карты AMPERE положения электроджетов во время суббурь-1, 2 и 3 (а, б, в соответственно): левые карты – перед началом суббури, центральные – в момент её начала и правые – вблизи максимума активности. Стрелки – положение меридиана IMAGE.

Северного полушария Земли. На рис. 2 для каждой рассматриваемой суббури представлены карты положения ионосферных электроджетов перед началом суббури на момент начала (*onset*) суббури и вблизи ее максимума активности (по *AL*-индексу).

Суббуря-1, начавшейся примерно через час после поворота *B_z* ММП к югу, предшествовал 3-х часовой интервал, в котором наблюдалась слабая геомагнитная активность, следовательно, эта суббуря представляла собой изолированную суббурю. Карта AMPERE 18:00–18:10 UT (рис. 2а, левая карта) показывает развитие спокойных конвективных токов перед началом суббури. В момент начала суббури (центральная карта, 18:40–18:50 UT на рис. 2а) наблюдалось формирование мощного токового вихря в авроральных широтах с вращением по часовой стрелке, усиление западного электроджета около полуночи и резкий сдвиг его к полюсу в вечернем секторе, а также значительное усиление восточного электроджета и его перемещение в более низкие широты. Карта 18:56–19:06 UT (рис. 2а, правая карта), построенная для момента максимума активности суббури, показывает ожидаемое смещение электроджетов к более низким широтам и увеличение их долготных размеров.

Неожиданным явилось формирование значительного токового вихря с вращением по часовой стрелке в утреннем секторе (~05–08 MLT) на широтах выше ~70° MLAT. Центр вихря располагается над Сибирью. В это время в вечернем секторе (~15–18 MLT) на более низких широтах, по сравнению с утренним вихрем, наблюдается менее интенсивный вихрь с противоположным направлением вращения.

Суббури-2 и **-3**, следовавшие за **суббурей-1**, наблюдались вблизи к максимуму активности главной фазы магнитной бури и характеризовались возрастающей интенсивностью.

Суббуря-2 начала развиваться сразу после резкого окончания небольшого магнитного возмущения, разделяющего **суббури-1** и **-2**, на фоне несколько увеличившейся во время главной фазы бури геомагнитной активности. Перед началом суббури (левая карта 21:02–21:12 UT на рис. 2б) ионосферные электроджеты были более интенсивны, чем перед **суббурей-1**, и сдвинуты к более низким широтам. Начало **суббури-2** (центральная карта 21:16–21:26 UT на рис. 2б) сопровождалось развитием токового вихря в раннем утреннем секторе, а не в околополуночном секторе, где в это время наблюдалась сложная суперпозиция двух вихрей с противоположным направлением вращения, но на более низких широтах, чем в случае

суббури-1. К моменту максимума активности суббури (правая карта 21:46–21:56 UT на рис. 2б) электроджеты еще более усилились, западный сдвинулся к полюсу, а восточный – к более низким широтам. Как и в **суббуре-1**, в утреннем секторе (05–08 MLT) наблюдалось формирование интенсивного токового вихря с направлением вращения по часовой стрелке, а в вечернем секторе – значительно более слабого вихря противоположного направления вращения, центр которого располагался на более низких широтах, чем в первой суббуре.

Развитие **суббури-3** началось на еще более возмущенном фоне, чем **суббури-2**, при значении индекса *AL* ~-500 нТл. Ионосферные электроджеты перед началом **суббури-3** были более интенсивными, чем перед **суббурей-2**, и сдвинуты к более низким широтам (левая карта 23:52–00:02 UT на рис. 2в). Начало этой суббури, как и в предшествующих случаях, было связано с появлением в ночном секторе токового вихря с направлением вращения по часовой стрелке, но на более высоких приполюсных широтах (центральная карта 00:00–00:10 UT на рис. 2в). Заметим, что развитие этого вихря произошло после резкой смены знака *B_y* ММП с положительного на отрицательный и скачка динамического давления солнечного ветра. Известно, например, [Boudourides et al., 2003], что скачки давления солнечного ветра могут сдвигать полярный край аврорального овала в сторону полюса.

5. РАЗВИТИЕ СУББУРЬ НА МЕРИДИАНЕ IMAGE

В предыдущем разделе пространственно-временная динамика суббурь рассматривалась в глобальном масштабе на основе карт, которые представляют мгновенное распределение ионосферных токов на широтах выше 60° MLAT северного полушария Земли. Временную динамику развития суббурь в узком долготном секторе можно проанализировать по магнитограммам скандинавской цепочки IMAGE.

На рис. 3 представлены магнитограммы *X*- и *Y*-компонент геомагнитного поля станций меридионального профиля IMAGE в анализируемый интервал главной фазы магнитной бури.

Суббуря-1 (*AL* до -1200 нТл) на профиле IMAGE, который находился в это время в вечернем секторе, начиналась на субавроральных широтах (~61° MLAT, OJ) и быстро распространилась до полярных широт, достигнув максимума активности в 19 UT на широтах 71–74° MLAT. По резкому всплеску в *Y*-компоненте магнитного поля **суббурю-1** можно отнести к суббурям WTS-ти-

23–24 марта 2023 г.

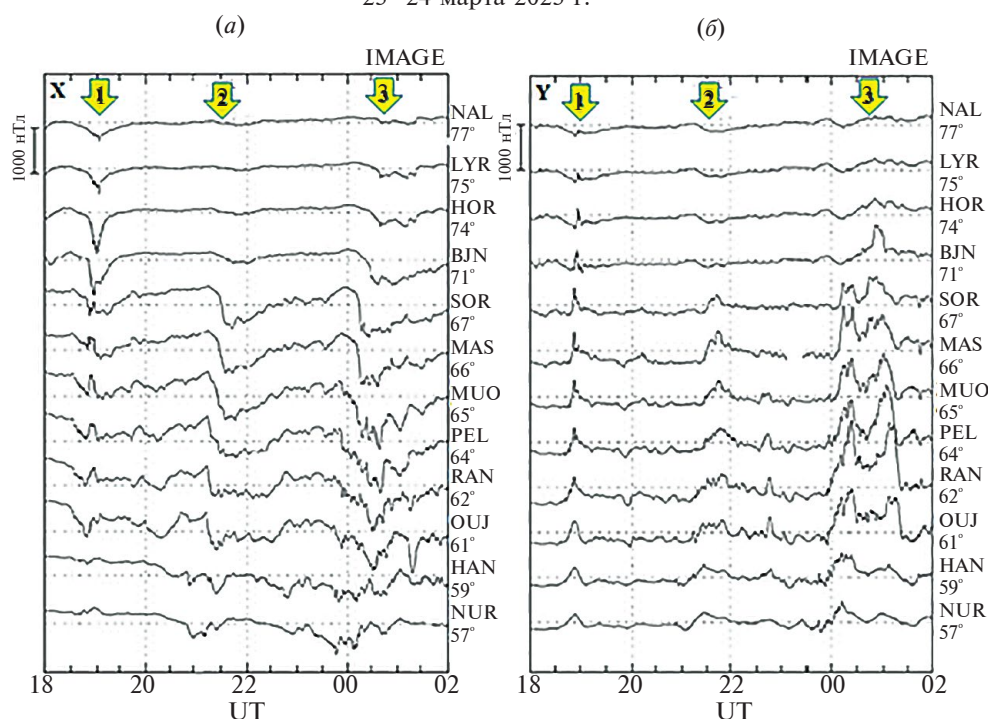


Рис. 3. Магнитограммы: (а) X- и (б) Y-компоненты поля некоторых станций цепочки IMAGE. Толстые стрелки схематически показывают максимумы активности рассматриваемых суббурь.

па (*Westward Traveling Surge*), которая характеризуется тем, что в области возрастания электронных высыпаний, где такой всплеск наблюдается, генерируется ионосферный ток, направленный по меридиану север-юг [Ebihara and Tanaka, 2015; Kisabeth and Rostoker, 1973; Tighe and Rostoker, 1981; Lazutin et al., 2001]. Его усиление и привело к тому, что *суббуря-1* распространилась до широт 77–78° MLAT в вечернем секторе, а в ранне-вечернем она наблюдалась даже вблизи геомагнитного полюса на 85° MLAT, в обсерватории THL (магнитограмма здесь не приводится), куда распространяется полярная часть вихря, направленного по часовой стрелке, что видно на правой AMPERE-карте 18:56–19:06 UT на рис. 2а.

Суббуря-2, более интенсивная, чем *суббуря-1* (AL до -1500 нТл), с максимумом активности в $\sim 21:30$ UT наблюдалась на профиле IMAGE в околополночном секторе в субавроральных и авроральных широтах до $\sim 71^\circ$ MLT без резких всплесков в Y-компоненте магнитного поля. В силу своего расположения IMAGE “видит” только один вихрь, расположенный на широтах 61–67° MLAT от OUI до SOR. Второй же вихрь, центр которого расположен выше 70° MLAT в послеполночном секторе, остается значительно восточнее.

Суббуря-3, самая интенсивная из рассматриваемых (AL менее -1700 нТл) с максимумом активности в $\sim 00:50$ UT наблюдалась на профиле IMAGE в послеполночном – раннеутреннем секторе, так как, согласно картам на рис. 2в, в это время станции меридиана IMAGE были расположены около центра вихря. Как и *суббуря-1*, она начиналась на авроральных широтах (на $\sim 57^\circ$ MLAT, вблизи NUR) и быстро достигла полярных широт. Ее интенсивность в максимуме суббури на станциях (PEL–SOR) была заметно выше, чем во время *суббури-1*.

Известно [например, McPherron et al., 1973, 2016; Керко et al., 2015], что характерной особенностью магнитосферной суббури является формирование токового клина суббури SCW (*Substorm Current Wedge*), который проявляется как развитие положительных магнитных бухт в средних и низких широтах. Токовый клин (SCW), представляется в виде 3х-мерной магнитосферно-ионосферной токовой системы с токами, втекающими в ионосферу утром и вытекающими из нее вечером вдоль силовых линий магнитного поля и замыкающимися в ионосфере западным и восточным электроджетами (подробно описание приводится, например, в работах [Керко et al., 2015; McPherron et al., 2016]. Внутри области SCW ком-

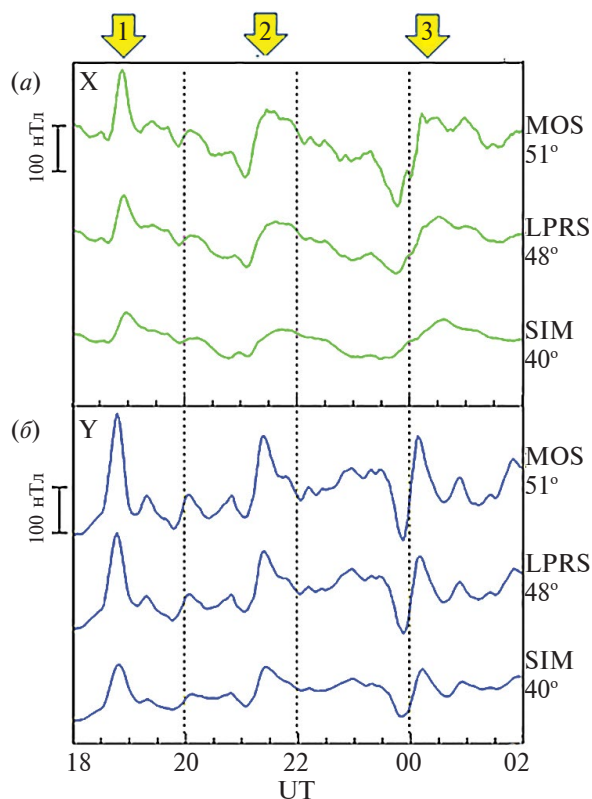


Рис. 4. Магнитограммы: (а) X - и (б) Y -компонент среднеширотных станций ИЗМИРАН.

понента магнитного поля X положительна и симметрична относительно центрального меридиана токового клина. В свою очередь, компонента Y асимметрична, положительна к западу от центрального меридиана и отрицательна к востоку от него.

При исследовании среднеширотных магнитных наблюдений во время обсуждаемых суббурь были использованы данные среднеширотных станций ИЗМИРАН, расположенных в том же долготном секторе, что и меридиональный профиль станций IMAGE. К настоящему времени сеть ИЗМИРАН, оснащенная однотипными магнитометрами, состоит из 7 станций на широтах от 34 до 60° MLAT. Для анализа выбранных суббурь использовались данные магнитометров 3-х станций: MOS (Москва, 51° MLAT, 111° MLONG), LPRS (Воронеж, 48° MLAT, 112° MLONG), SIM (Симеиз, Крым, 40° MLAT, 115° MLONG), магнитограммы которых показаны на рис. 4. Из рис. 4а видно, что каждая рассмотренная суббуря сопровождалась положительными отклонениями в X -компоненте магнитного поля в средних широтах, наиболее ярко выраженными во время суббурь-1, что свидетельствует о формировании токового клина суббури.

Положительные вариации Y -компоненты магнитного поля во время этих бурь позволяют сделать вывод, что центр токового клина находился восточнее меридиана IMAGE. Однако сложные изменения в развитии геомагнитной обстановки во время суббурь-3 отразились в резких скачках в Y -компоненте на среднеширотных станциях, по которым можно сделать вывод о быстром перемещении центра суббурь-3 вдоль широты, так как рассматриваемый меридиан находился вблизи центра мощного вихря.

6. ОБСУЖДЕНИЕ

Выше рассмотрены три интенсивные суббури в главную фазу сильной магнитной бури. Первая суббуря развивалась при $SymH$ около -50 нТл, вторая около -80 нТл и третья около -130 нТл, т. е. с увеличением интенсивности магнитной бури амплитуда суббурь возрастала, как это видно на рис. 1. Первую из рассмотренных суббурь можно отнести к “изолированным” суббурям, поскольку перед ней, по меньшей мере, в течение 3-х ч, не было существенных геомагнитных возмущений. Последующие суббури начинались на восстановительной фазе предыдущих, и в предшествующее им время (левые карты AMPERE на рис. 2) западный и восточный электроджет регистрировались на значительно более низких широтах, чем перед первой суббурей.

Согласно работе [Hoffman et al., 2010] основное отличие “буревых” суббурь от “изолированных” состоит в том, что “буревые” суббури не сопровождаются развитием WTS. Типичным индикатором WTS является появление положительных всплесков в Y -компоненте геомагнитного поля на ведущем крае выпуклости [Kisabeth and Rostoker, 1973; Tighe and Rostoker, 1981]. На рис. 3, где приведены магнитограммы некоторых станций профиля IMAGE, видно, что положительные всплески в Y -компоненте магнитного поля в высоких широтах наблюдались только во время *onset* первой суббурь, следовательно, она в отличие от остальных суббурь развивалась как “изолированная” суббуря.

Анализируя карты AMPERE мы установили, что начало (*onset*) всех трех суббурь (средние графики на рис. 2) было связано с появлением вихря ионосферных токов, направленного по часовой стрелке, что является индикатором локального усиления втекающих продольных токов, это подтверждают и цветные карты распределения продольных токов на сайте AMPERE (в данной работе не приводятся). Во время первой и второй суббурь такие вихри во время начала суббурь на

меридиане IMAGE (левые карты на рис. 2) были зарегистрированы в околополуночном секторе.

Утренние вихри, наблюдаемые в максимумах активности (по AL -индексу) всех трех рассмотренных суббурь (правые карты AMPERE на рис. 2), сопровождались значительно более слабыми вихрями с противоположным направлением вращения векторов, наблюдаемыми в позднем послеполуденном секторе (примерно в 15–18 MLT). Похожая утренняя интенсификация крупномасштабных ионосферных токов вблизи максимумов активности очень интенсивных суббурь была обнаружена и авторами работы [Ohtani et al., 2018] во время четырех сильных магнитных бурь (22 октября 2001, 20 ноября 2003, 14–15 декабря 2006 и 17–18 марта 2015. Во время последнего события уже имелись данные регистрации проекта AMPERE.

Сравним полученные нами результаты с глобальным распределением ионосферных токов по картам AMPERE (рис. 5) во время суперсуббури (AL -индекс около -2500 нТл), наблюдаемой вблизи максимума активности главной фазы сильной магнитной бури 17 марта 2015, обсуждаемой в приведенной выше работе [Ohtani et al., 2018]. Термин “суперсуббура” (SSS) был предло-

жен в работе [Tsurutani et al., 2015] для суббурь с интенсивностью 2500 нТл и более. На рис. 5 показано полученное по картам AMPERE распределение эквивалентных ионосферных токов в максимуме активности суббури, зарегистрированной в бурю 17 марта 2015. Видно, что карты AMPERE на рис. 5 очень похожи на карты распределения ионосферных токов во время исследуемых нами суббурь в магнитную бурю 23 марта 2023 г. (правые карты на рис. 2).

Утреннее усиление западного электроджета и появление вихря с направлением вращения по часовой стрелке, т. е. интенсификацию втекающего продольного тока, можно увидеть также и в максимуме активности суперсуббурь в другие сильные бури, ранее обсуждаемые в литературе, например, 7 сентября 2017 г. на рис. 5 в статье [Дэспирак и др., 2020]; 20 декабря 2015 г. на рис. 5в в статье [Despirak et al., 2022]; 28 мая 2011 г. на рис. 3 в статье [Дэспирак и др., 2022a]; 5 апреля 2010 г. на рис. 4 в статье [Дэспирак и др., 2022б] и на рис. 2б в статье [Gromova et al., 2022].

Таким образом, выявленные нами утренние пространственные особенности интенсивных суббурь во время сильных магнитных бурь, наблюдаемые как появление токовых вихрей и усиление западного электроджета в утреннем секторе, можно считать типичными для сильных магнитных бурь.

Согласно работе [Gjerloev and Hoffman, 2014] формирование и развитие крупномасштабной токовой системы в утреннем секторе во время максимума активности интенсивной суббури можно схематически представить как результат развития в магнитосфере так называемого двой-

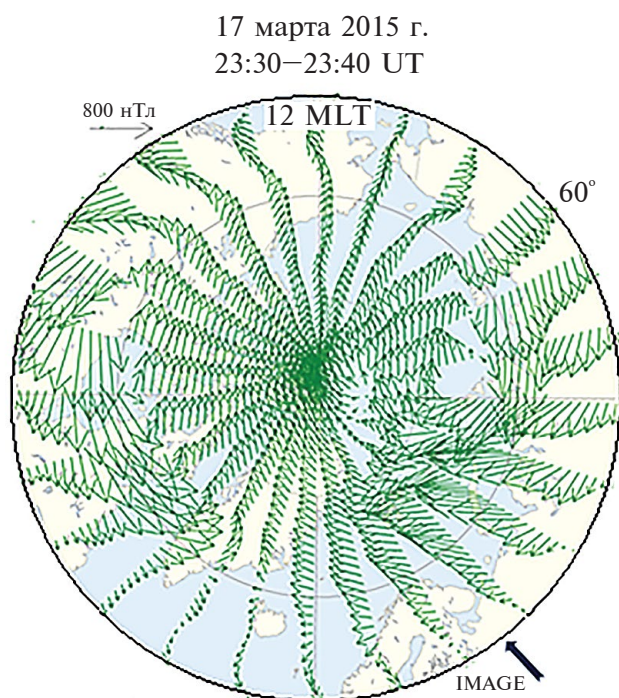


Рис. 5. Событие 17 марта 2015 г.: карта AMPERE положения электроджетов вблизи максимума активности суббури. Стрелки — положение меридиана IMAGE.

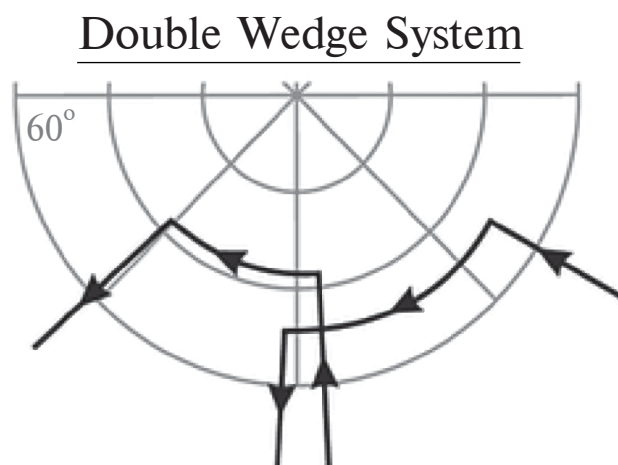


Рис. 6. Схема крупномасштабной суббуревой токовой системы: утренний двойной токовый клин суббури, из работы [Gjerloev and Hoffman, 2014].

ного токового клина суббури (*double wedge system*), схема которого приведена на рис. 6. В результате суперпозиции продольных токов на восточном конце токового клина (т. е., утром) будут преобладать втекающие продольные токи, а на западном — вытекающие. В околополуночном секторе будет наблюдаться смешанная слоистая структура продольных токов. Подобная ситуация наблюдалась в начале суббури-2 (рис. 2б, центральная карта).

Возможные причины утреннего усиления западного электроджета и втекающего продольного тока в максимуме активности суббурь, зарегистрированных в главную фазу очень больших магнитных бурь, детально обсуждались в работах [Ohtani et al., 2018; Ohtani and Motoba, 2023]. Авторы рассматривали различные причины, такие, как усиление конвекции за счет внешних источников, вторжение энергичных электронов за счет возрастания давления солнечного ветра, дрейф инжектированных в ночном секторе электронов на утреннюю сторону, но пока не смогли выделить наиболее вероятную.

7. ВЫВОДЫ

Рассмотрены планетарные особенности пространственно-временного распределения ионосферных электроджетов в начале (*onset*) и максимуме активности трех очень интенсивных суббурь (с AL от -1200 нТл до -1700 нТл) в главной фазе сильной магнитной бури 23–24 марта 2023 года, выявленные на основе анализа планетарных магнитных измерений с помощью 66 одновременных низкоорбитальных (780 км) спутников проекта AMPERE.

Установлено, что начало (*onset*) всех суббурь на меридиане IMAGE было связано с формированием токового вихря в авроральных широтах с направлением вращения по часовой стрелке, что является индикатором локальной интенсификации втекающих продольных токов. Анализ среднеширотных наблюдений на станциях сети ИЗМИРАН показал, что центр токового клина суббури в это время находился значительно восточнее меридиана IMAGE.

В первой, по существу, изолированной, суббуре к западу от вихря, т. е. в вечернем секторе отмечалась быстрая экспансия западного электроджета к полюсу и развитие на его западном крае WTS, проявляющегося в наземных геомагнитных наблюдениях на высокоширотных станциях профиля IMAGE как короткий положительный всплеск в Y -компоненте поля.

Во время максимума активности анализируемых суббурь было обнаружено развитие в утреннем секторе (05–08 MLT) крупномасштабного интенсивного токового вихря с направлением вращения по часовой стрелке, свидетельствующего об интенсификации втекающих продольных токов. Выявленный эффект подтвердился анализом пространственных особенностей ионосферного тока в максимуме активности нескольких обсуждаемых в литературе суперсуббурь, наблюдаемых в главную фазу сильных магнитных бурь. О подобном утреннем усилении втекающих продольных токов во время суббурь в главную фазу четырех сильных магнитных бурь сообщалось также в работе [Ohtani et al., 2018]. Таким образом, выявленные нами утренние пространственные особенности очень интенсивных суббурь во время сильных магнитных бурь, такие, как формирование токовых вихрей с направлением вращения по часовой стрелке (интенсификация втекающих продольных токов) и усиление западного электроджета в утреннем секторе и восточного в вечернем, можно считать типичными для очень интенсивных суббурь.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят создателей баз данных меридиональной сети IMAGE (<https://space.fmi.fi/image/>) и сети магнетометров ИЗМИРАН (<http://serv.izmiran.ru>), а также проекта AMPERE (<http://ampere.jhuapl.edu/products>) за возможность использования данных в проводимых исследованиях.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследования выполнены в рамках Государственных заданий институтов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дэспирак И.В., Клейменова Н.Г., Громова Л.И., Громов С.В., Малышева Л.М. Суперсуббури во время бурь 7–8 сентября 2017 г. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 60. № 3. С. 308–317. 2020. <https://doi.org/10.31857/S0016794020030049>
- Дэспирак И.В., Клейменова Н.Г., Любич А.А., Сецко П.В., Громова Л.И., Вернер Р. Глобальное развитие суперсуббури 28 мая 2011 года. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 62. № 3. С. 325–335. 2022a. <https://doi.org/10.1134/S0016793222030069>
- Дэспирак И.В., Клейменова Н.Г., Громова Л.И., Любич А.А., Гинева В., Сецко П.В. Пространственные особенности суперсуббури на главной фазе бури 5 апреля 2010 // Изв. РАН. Сер. физ. Т. 86. № 3. С. 249–255. 2022b. <https://doi.org/10.3103/S106287382203008X>
- Ишков В.Н. Итоги и уроки 24 цикла — первого цикла второй эпохи пониженной солнечной активности //

- Астрон. журн.* Т. 99. № 1. С. 55–69. 2022. <https://doi.org/10.31857/S0004629922020050>
- Ишков В.Н. Текущий 25 цикл солнечной активности в преддверии фазы максимума // Труды XXVII Всероссийская ежегодная конференция по физике солнца “Солнечная и солнечно-земная физика – 2023”. Санкт-Петербург. С. 139–144. 2023. <https://doi.org/10.31725/0552-5829-2023-139-144>
- Корнилова Т.А., Корнилов И.А. Пространственно-временная динамика сияний во время главной фазы магнитной бури // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 49. № 6. С. 757–767. 2009.
- Akasofu S.-I., Chapman S. The development of the main phase of magnetic storms // *J. Geophys. Res.* V. 68. P. 125–129. 1963. <https://doi.org/10.1029/jz068i001p00125>
- Boudouridis A., Zesta E., Lyons L.R., Anderson P.C., Lummerzheim D. Effect of solar wind pressure pulses on the size and strength of the auroral oval // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. № A4. P. 8012 – 8027. <https://doi.org/10.1029/2002JA009373>
- Baumjohann W., Kamide Y., Nakamura R. Substorms, storms and the near-Earth tail // *J. Geomagn. Geoelectr.* V. 48. I. 2. P. 177–185. 1996. <https://doi.org/10.5636/jgg.48.177>
- Despirak I.V., Lubchich A.A., Kleimenova N.G., Setsko P.V., Werner R. Supersubstorm on 20 December 2015: Spatial Geomagnetic Effects // *Proceedings of the Fourteenth Workshop “Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere”*. P. 10–15. 2022. <https://doi.org/DOI:10.31401/WS.2022.proc>
- Ebihara Y., Tanaka T. Substorm simulation: Formation of westward traveling surge // *J. Geophys. Res. Space Physics.* V. 120. P.10466–10484. 2015. <https://doi.org/10.1002/2015JA021697>
- Feldstein Y.I., Grafe A., Gromova I.I., Popov V.A. Auroral electrojets during geomagnetic storms // *J. Geophys. Res.* V. 102. P. 14223–14235. 1997. <https://doi.org/10.1029/97JA00577>
- Gjerloev J.W., Hoffman R.A., Sigwarth J.B., Frank L.A., Baker J.B. Typical auroral substorm: A bifurcated oval. // *J. Geophys. Res.* V. 113. A03211. 2008. <https://doi.org/10.1029/2007JA012431>
- Gjerloev J.W., Hoffman R.A. The large-scale current system during auroral substorms. // *J. Geophys. Res.: Space Physics.* V. 119. P. 4591–4606. 2014. <https://doi.org/10.1002/2013JA019176>
- Gromova L.I., Kleimenova N.G., Despirak I.V., Gromov S.V., Lubchich A.A., Malysheva L.M. Magnetic storm 20 April 2020: substorms in the main phase // ‘Physics of auroral phenomena’, *Proceedings of the 45th Annual Seminar*. P. 16–19. 2022. <https://doi.org/10.51981/2588-0039.2022.45>
- Hoffman R.A., Gjerloev J.W., Frank L.A., Sigwarth, J.W. Are there optical differences between storm-time substorms and isolated substorms? // *Ann. Geophys.* V. 28. P. 1183–1198. 2010. <https://doi.org/10.5194/angeo-28-1183-2010>
- Hsu T.-S., McPherron R.L. The Characteristics of Storm-Time Substorms and Non-Storm Substorms // *Fifth International Conference on Substorms*. Edited by A. Wilson. ESA SP-443. P. 439–442. 2000.
- Kamide Y., Ahn B.-H., Akasofu S.-I., et al. Global distribution of ionospheric and field-aligned currents during substorms as determined from six IMS meridian chains of magnetometers: initial results // *J. Geophys. Res.* V. 87. P. 8228–8240. 1982. <https://doi.org/10.1029/JA087iA10p08228>
- Kepko L., McPherron R.L., Amm O., Apatenkov S., Baumjohann W., Birn J., Lester M., Nakamura R., Pulkkinen T.I., Sergeev V. Substorm current wedge revisited. // *Space Sci. Rev.* V. 190(1-4). P. 1–46. 2015. <https://doi.org/10.1007/s11214-014-0124-9>
- Kisabeth J., Rostoker G. Current flow in auroral loops and surges inferred from ground-based magnetic observations. // *J. Geophys. Res.* V. 78. P. 5573–5584. 1973. <https://doi.org/10.1029/JA078i025p05573>
- Lazutin L., Starkov G., Meng C.-I., Sibeck D. G., Stadsnes J., Bjordal J., Kan Liou, Kornilova T., Reeves G. Westward traveling surge dynamics and the local structure of an isolated substorm. // *Adv. Space Res.* V. 28. P. 1623–1629. 2001. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(01\)00489-6](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(01)00489-6)
- 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>
- McPherron R.L., Chu X. Relation of the auroral substorm to the substorm current wedge. // *Geosci. Lett.* V. 3. P. 12. 2016. <https://doi.org/10.1186/s40562-016-0044-5>
- Ohtani S., Motoba T., Gkioulidou M., Takahashi K., Singer H.J. Spatial development of the dipolarization region in the inner magnetosphere. // *J. Geophys. Res.: Space Physics.* V. 123. P. 5452–5463. 2018. <https://doi.org/10.1029/2018JA025443>
- Ohtani S., Motoba T. Formation of beading auroral arcs at substorm onset: implications of its variability into the generation process. // *J. Geophys. Res.: Space Physics.* V. 128. e2022JA030796. 2023. <https://doi.org/10.1029/2022JA030796>
- Tighe W.G. and Rostoker G. Characteristics of westward travelling surges during magnetospheric substorms. // *Journal of Geophysics - Zeitschrift fuer Geophysik.* V. 50. № 1. P. 51–67. 1981.
- Troshichev O.A., Podorozhkina N.A., Sormakov D.A., Janzhura A.S. PC index as a proxy of the solar wind energy that entered into the magnetosphere: Development of magnetic substorms // *J. Geophys. Res.:Space Physics.* V. 119. P. 6521–6540. 2014. <https://doi.org/10.1002/2014JA019940>
- Tsurutani B.T., Hajra R., Echer E., Gjerloev J.W. Extremely intense (SML \leq -2500 nT) substorms: isolated events that are externally triggered? // *Ann. Geophys.* V. 33. P. 519–524. 2015 <https://doi.org/10.5194/angeocom-33-519-2015>

Intensive Substorms During the Main Phase of the Magnetic Storm on March 23-24, 2023

L. I. Gromova^{1,*}, N. G. Kleimenova^{2,**}, S. V. Gromov¹, K. K. Kanonidi¹, V. G. Petrov¹,
L. M. Malysheva²

¹*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, Moscow, Troitsk, Russia*

²*Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow, Russia*

*e-mail: gromova@izmiran.ru

**e-mail: ngk1935@yandex.ru

Here we studied the planetary features of the spatiotemporal distribution of ionospheric electrojets recorded in the substorm onset and in the time on the activity maximum of three very intense substorms (with the *AL*-index from -1200 nT to -1700 nT) observed during the main phase of the strong magnetic storm on 23–24 March 2023. We analyze the substorms by applying the global maps of the planetary distribution of the high-latitude ionospheric currents, constructed on the basis of the simultaneous magnetic measurements on 66 low-orbit satellites of the AMPERE project, as well as the ground-based magnetograms from the Scandinavian IMAGE profile and mid-latitude IZMIRAN stations located in the same longitudinal region. It was established that the onset of all the studied substorms at the IMAGE meridian was accompanied by the development of a night-time current vortex with a clockwise rotation direction that is an indicator of the downward field-aligned currents increasing. The ground-based mid-latitude observations at the IZMIRAN station network confirmed that the center of the substorm current wedge was located in the night-time sector significantly east of the IMAGE meridian. In the time of the substorm intensity maximum, a similar but more extensive current vortex was observed in the morning sector, that fact is, probably, typical for intense substorms.

Keywords: magnetic storm, substorm, ionospheric and field-aligned currents.