

УДК 523.72:550.385.27

СУПЕРСУББУРИ ВО ВРЕМЯ БУРЬ 7–8 СЕНТЯБРЯ 2017 г.

© 2020 г. И. В. Дэспирак^{1, *}, Н. Г. Клейменова^{2, 3}, Л. И. Громова⁴,
С. В. Громов⁴, Л. М. Малышева²

¹Полярный геофизический институт (ПГИ), г. Апатиты (Мурманская обл.), Россия

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

³Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), г. Москва, Россия

⁴Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия

*e-mail: despirak@gmail.com

Поступила в редакцию 17.12.2019 г.

После доработки 09.01.2020 г.

Принята к публикации 23.01.2020 г.

Выполнен анализ развития двух суперсуббурь, т.е. очень интенсивных суббурь с амплитудой больше 2000 нТл, зарегистрированных в главную фазу двух последовательных сильных магнитных бурь с максимумами в ~01 UT ($Dst \sim -150$ нТл) и ~13 UT ($Dst \sim -115$ нТл) 8 сентября 2017 г. Для этого были использованы данные наблюдений глобальной сети магнитометров SuperMAG и скандинавского профиля станций IMAGE. Анализ мгновенных карт пространственного распределения ионосферных эквивалентных электрических токов на скандинавском меридиане, построенных по модели MIRACLE, и глобальных карт векторов магнитного поля, построенных по наблюдениям SuperMAG, позволил получить картину пространственного распределения возмущений в планетарном масштабе. Показано, что обе суперсуббури характеризовались не только сильными ночными возмущениями в авроральных широтах (~–3600 нТл и ~–2600 нТл), но и одновременным развитием дневных магнитных бухт в полярных широтах с амплитудой ~–1000 нТл и ~–400 нТл, соответственно. Мы предполагаем, что дневные полярные возмущения, наблюдаемые одновременно с суперсуббуриями, могут быть результатом вытягивания ионосферного тока западного направления на дневную сторону. Наши наблюдения свидетельствуют в пользу предположения, что западный электрождет во время суперсуббури развивается в глобальном масштабе, от вечерней до дневной стороны.

DOI: 10.31857/S0016794020030049

1. ВВЕДЕНИЕ

Известно, что магнитосферные суббури различаются по интенсивности, по особенностям формирования и развития западного электроджета и авроральной выпуклости [Tsurutani et al., 2004, 2006; Clausen et al., 2013; Wang et al., 2005; Despirak et al., 2009; Tanskannen et al., 2011]. Суббуревые возмущения часто разделяют на разные категории в зависимости от их широтного развития: “ограниченные” и “протяженные” [Lui et al., 1975, 1976], “локализованные” и “нормальные” [McPherron et al., 1973], “суббури на сжатом овале” и “нормальные” [Kamide et al., 1975, 1977], “полярные” и “обычные” [Kleimenova et al., 2012], “высокоширотные” и “обычные” [Дэспирак и др., 2008], “расширенные” и “полярные” [Дэспирак и др., 2014; Despirak et al., 2018].

Кроме того, недавно был выделен особый тип очень интенсивных суббуревых возмущений во время магнитных бурь. Такие суббури, характеризующиеся очень высокими значениями SML и

AL -индексов геомагнитной активности (≤ 2500 нТл), были названы суперсуббуриями (supersubstorms – SSS) [Tsurutani et al., 2015]. Надо отметить, что исследования таких экстремальных событий имеют большое практическое значение, так как во время подобных интенсивных магнитных возмущений могут развиваться очень сильные ионосферные токи, а изменения в интенсивности токов (dB/dT) ведут к возникновению сильных наведенных токов, так называемых геомагнитных индукционных токов – ГИТ или geomagnetically induced currents – GIC, которые зачастую приводят к сбоям в наземных электрических сетях [например, Карпенман, 2003; Huttunen et al., 2008; Sakharov et al., 2009; Pulkkinen et al., 2017; Воробьев и др., 2018]. Существует мнение, что эффекты ГИТ могут быть связаны не с интенсивными магнитными бурями, как предполагалось ранее, а с развитием суперсуббури (SSS) во время бурь [Tsurutani et al., 2015; Haira et al., 2016].

В настоящее время исследования суперсуббурь только начинаются, имеется всего несколько работ на эту тему [Tsurutani et al., 2015; Haira et al., 2016; Adhikari et al., 2017; Haira and Tsurutani, 2018; Дэспирак и др., 2019]. Результаты исследований [Haira et al., 2016] показали, что суперсуббури наблюдаются, в основном, на фазе спада цикла солнечной активности. При этом суперсуббури развиваются только во время определенных условий в солнечном ветре, а именно, во время межпланетных магнитных облаков (МО) или на фронте сжатой плазмы (SHEATH) перед магнитным облаком [Tsurutani et al., 2015; Дэспирак и др., 2019]. Было показано, что возникновение суперсуббурь связано с межпланетными проявлениями выбросов корональной массы (СМЕ) и, практически, не наблюдалось во время высокоскоростных потоков (СР) из корональных дыр [Дэспирак и др., 2019].

Первые исследования авроральных возмущений во время событий *SSS* показали, что развитие полярных сияний значительно отличается от классической схемы развития суббури, описанной Akasofu [1964]. В работе [Haira and Tsurutani, 2018] показано, что развитие полярных сияний во время суперсуббури происходит нетипичным образом. Так, перед суперсуббурей не наблюдалось стандартного уярчения самой экваториальной дуги в ночном секторе перед брейкапом и последующего скачка сияний к полюсу. Однако при отсутствии сияний в полуночном секторе, интенсивные сияния наблюдались в предполуночном и утреннем секторах MLT. Эти исследования наводят на мысль, что, вероятно, и пространственно-временное развитие западного электроджета для случаев суперсуббурь может иметь некоторые особенности.

В данной работе подробно проанализирована динамика геомагнитных возмущений, связанных с развитием двух суперсуббурь во время событий 7–8 сентября 2017 г., состоящего из двух последовательных магнитных бурь ($Dst \sim -150$ нТл и ~ -115 нТл, соответственно) разные аспекты этого события широко обсуждаются в литературе [например, Клейменова и др., 2018; Chashei et al., 2018; Dimmock et al., 2019; Vlagoveshchensky and Sergeeva, 2019]. Целью нашей работы является анализ долготного пространственного распределения геомагнитных возмущений двух случаев суперсуббурь, наблюдающихся во время этой бури, по данным глобальной сети магнитометров SuperMAG и скандинавского профиля IMAGE.

2. ДАННЫЕ

Работа основана на анализе наземных наблюдений на глобальной сети из ~ 320 магнитометров проекта SuperMAG (<http://supermag.jhuapl.edu/>). Подробное описание этого проекта приведено в

работах [Gjerloev, 2009, 2012; Newell and Gjerloev, 2011a, b]. Кроме того, в работе использовались данные наблюдений на плотной меридиональной сети станций скандинавского профиля IMAGE (<http://space.fmi.fi/image/>), состоящей из 40 магнитометров [Viljanen and Häkkinen, 1997].

Интенсивные суббури – суперсуббури (*SSS*) – определялись с помощью геомагнитных индексов *SML* или *AL*, как события с пиковым значением индексов $SML < -2500$ нТл; и $AL < -2500$ нТл [Tsurutani et al., 2015; Haira et al., 2016]. Индекс глобальной магнитной активности *SML* является обобщением известного индекса *AL* [Davis and Sugiura, 1966] и вычисляется по той же методике, но по данным наблюдений не на 12 авроральных станциях северного полушария, как *AL*-индекс, а на глобальной сети станций проекта SuperMag, состоящей из более 300 станций, расположенных как в более низких, так и в более высоких широтах [Newell and Gjerloev, 2011a; Gjerloev, 2012]. Локальная геомагнитная активность на скандинавском меридиане IMAGE определялась по *IL*-индексу, который вычисляется по той же методике, что и *AL*- и *SML*-индексы, но по данным наблюдений на профиле IMAGE.

Для исследования пространственного распределения магнитных возмущений на профиле IMAGE были проанализированы мгновенные карты распределения ионосферных эквивалентных электрических токов (<https://space.fmi.fi/MIRACLE/>), построенные по данным магнитных наблюдений. Глобальное пространственное распределение *SSS* определялось также по картам векторов магнитного поля, полученных по наблюдениям на сети SuperMAG.

Условия в солнечном ветре и межпланетном магнитном поле (ММП) перед началом *SSS* определялись с помощью базы данных CDAWeb OMNI (<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>). Потоки и структуры солнечного ветра были определены согласно каталогу крупномасштабных явлений солнечного ветра (<ftp://ftp.iki.rssi.ru/omni/>) [Ермолаев и др., 2009]. Более подробное описание используемых нами потоков и структур солнечного ветра и их связи с суперсуббуриями приведено в работе [Дэспирак и др., 2019].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1 Межпланетные условия во время магнитных бурь 7–8 сентября 2017

В начале сентября 2017 г. на Солнце произошла серия солнечных вспышек и выбросов корональной массы (coronal mass ejections – СМЕ). Три последовательных солнечных вспышки были зарегистрированы 4–6 сентября 2017 г. Вторая вспышка была самой интенсивной, класса X9.3, спутник STEREO-A зарегистрировал корональ-

ный выброс массы (СМЕ) 06 сентября 2017 года, который наблюдался на юго-западе солнечного диска в 12:24 UT. Средняя скорость этого СМЕ оценивается порядка 1400 км/с [Wu et al., 2019]. Этот корональный выброс массы достиг орбиты Земли 7 сентября в ~22–23 UT и вызвал сильную магнитную бурю с интенсивностью $Dst \sim -150$ нТл. Кроме того, при анализе источников этой бури необходимо учитывать взаимодействие корональных выбросов массы между собой (СМЕ–СМЕ взаимодействие), в результате которого могло произойти усиление геоэффективности отдельного СМЕ. Роль взаимодействия СМЕ–СМЕ для генерации бурь 7–8 сентября 2017 подробно рассмотрена в работе [Scolini et al., 2020]. Мы не будем подробно останавливаться на этом вопросе, так как цель нашей работы – проанализировать пространственную динамику суперсуббури во время этих бурь.

На рисунке 1 показаны данные о параметрах солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП) за период с 12:00 UT 6 сентября по 24:00 UT 8 сентября 2017 г.: магнитуа полного магнитного поля (B) ММП, вертикальная (B_z)-компонента ММП, скорость (V) и динамическое давление (P_{sw}) солнечного ветра, а также геомагнитные индексы суббуревой активности (AL) и интенсивности кольцевого тока (SYM/H).

Границы магнитного облака (MC) и EJECTA и областей сжатой плазмы SHEATH перед ними обозначены вертикальными линиями, а области MC и EJECTA показаны разным затемнением. Видно, что в солнечном ветре наблюдались две последовательные структуры: SHEATH + EJECTA и SHEATH + MC. Первая область SHEATH наблюдалась с ~23 UT 6 сентября до ~20 UT 7 сентября, вторая область SHEATH – с ~22:20 UT 7 сентября до ~11 UT 8 сентября. Хотя первая область SHEATH характеризовалась небольшими значениями южной компоненты B_z ММП, которые наблюдались примерно в 05–06 UT 7 сентября, это не привело к развитию магнитной бури ($SYM/H \sim -15$ нТл). Только с приходом второй области SHEATH с длительным интервалом довольно больших отрицательных значений B_z ММП, началась первая магнитная буря с интенсивностью ~-150 нТл. Главная фаза бури началась в ~23:20 UT, минимум SYM/H индекса был зарегистрирован в 01:10 UT 8 сентября. Как видно из рис. 1, за второй областью SHEATH следует область MC, которая начинается в 11:00 UT 8 сентября. Вторая магнитная буря была вызвана сильной отрицательной B_z -компонентой ММП (-17 нТл), которая наблюдалась в магнитном облаке, минимум SYM/H индекса второй бури был отмечен в ~14 UT 8 сентября ($SYM/H \sim -115$ нТл).

На фоне этих двух бурь наблюдались две суперсуббури: первая суперсуббуря ($SML \sim -3600$ нТл)

наблюдалась во время второго SHEATH, а вторая суперсуббуря ($SML \sim -2640$ нТл) была зарегистрирована во время магнитного облака. Ниже мы рассмотрим пространственное поведение магнитных возмущений во время этих двух суперсуббурь.

3.2. Определение суперсуббури

На рисунке 2 показаны вариации индекса SML с 16 UT 7 сентября до 22 UT 8 сентября 2017 года. Согласно [Tsurutani et al., 2015], суперсуббури определяются как события с пиковой величиной $SML < -2500$ нТл. Как видно из рис. 2, в течение рассматриваемого периода времени наблюдались две суперсуббури. Первая началась в ~22:20 UT 7 сентября, достигла максимума в ~00:25 UT 8 сентября с максимальным значением SML -индекса ~-3600 нТл (на рис. 2 этот момент отмечен стрелкой и обозначен как SSS-1) и закончилась примерно ~02:50 UT. Таким образом, длительность SSS была ~4.5 ч. Эта суперсуббуря наблюдалась на главной фазе первой бури.

Вторая суперсуббуря была зарегистрирована 8 сентября с пиком интенсивности индекса $SML \sim -2600$ нТл в ~13:08 UT, этот момент отмечен на рисунке стрелкой и обозначен как SSS-2. Это событие SSS началось в ~11:34 UT и закончилось в ~15:42 UT, то есть общая длительность SSS-2 составила ~4 ч 8 мин. Эта суперсуббуря также наблюдалась на главной фазе второй магнитной бури с $SYM/H \sim -115$ нТл.

3.3. Первая суперсуббуря

На рисунках 3а и 4а показано пространственное распределение магнитных возмущений во время первой суперсуббури (SSS-1). На рисунке 3а на верхних графиках приведены магнитограммы X -компоненты магнитного поля на некоторых высокоширотных станциях скандинавского профиля IMAGE: Bear Island (BJN, CGLAT = 71.3°; CGLON = 115.1°), Ivalo (IVA, CGLAT = 65.0°; CGLON = 108.6°) и Sodankyla (SOD, CGLAT = 63.8°; CGLON = 107.3°). Эти станции расположены на широтах авроральной зоны, в полуночном секторе MLT, и с ~23 UT на них наблюдались сильные вариации магнитного поля (более ~1000 нТл). Факт, что наиболее сильные геомагнитные возмущения были сосредоточены на геомагнитных широтах авроральной зоны (IVA-SOD), подтверждает и карта распределения ионосферных эквивалентных электрических токов, полученная по расчетам программы MIRACLE, где показано, что развитие западного электроджета наблюдалось от ~60° до ~71°, т.е., на авроральных широтах. Этот рисунок здесь не приводится, так как карта строится только в цветном изображении, где западные и восточные эквивалентные токи

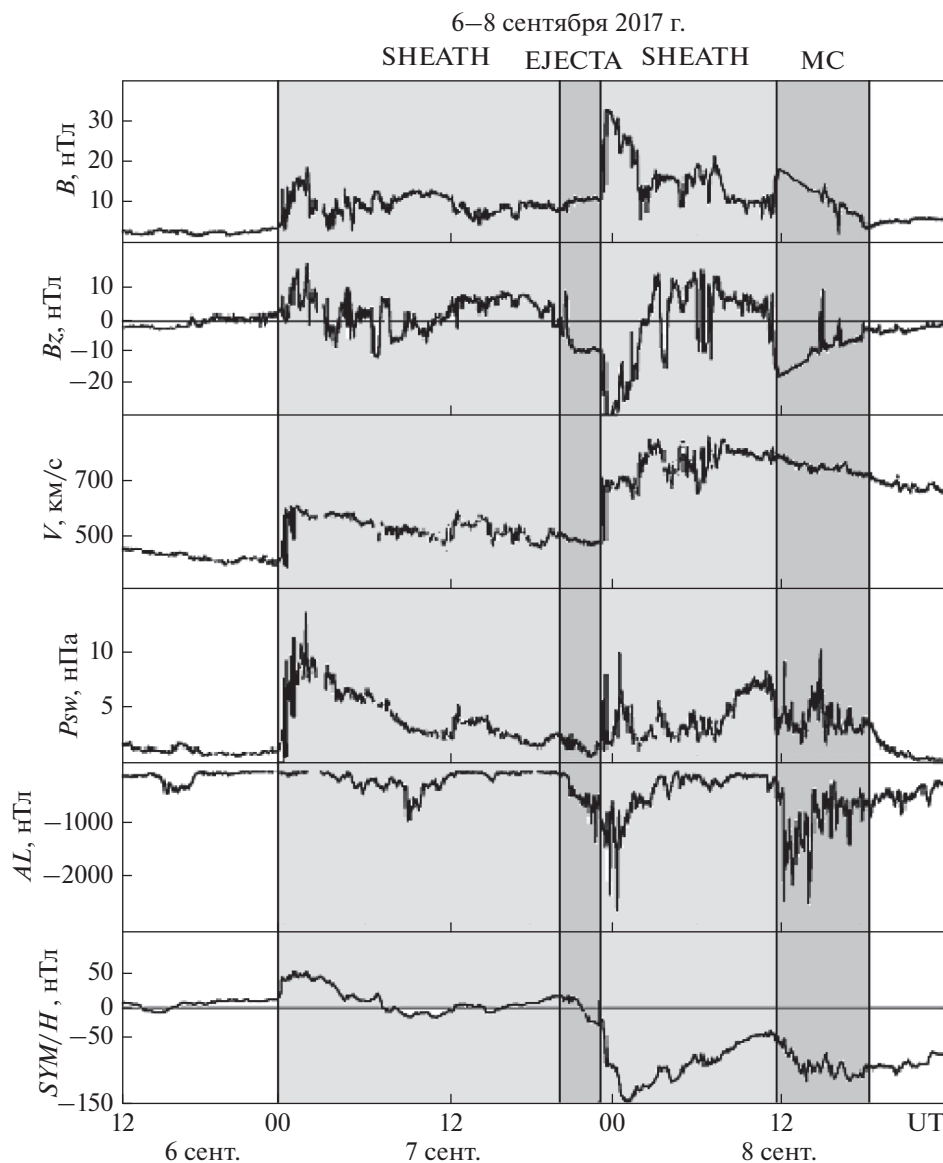


Рис. 1. Параметры солнечного ветра и ММП, а также геомагнитные индексы AL и SYM/H для периода 6–8 сентября 2017 г. Сверху вниз: магнитуда магнитного поля B и B_z -компонента ММП, скорость и динамическое давление солнечного ветра, геомагнитные индексы AL и SYM/H . Границы магнитного облака (MC), области EJECTA и областей сжатой плазмы SHEATH обозначены вертикальными черными линиями.

показаны красным и синим цветом, их перевод в черно-белый вариант дает неадекватную картину, так как при трансформации оба цвета становятся одинаково темными.

Однако одновременно на станциях Канады и Гренландии, расположенных в полярных широтах (от $\sim 67.5^\circ$ до $\sim 74.1^\circ$ CGLAT), наблюдались бухтообразные магнитные возмущения. На нижних панелях рис. 3а показаны магнитограммы X -компоненты магнитного поля на станциях Narsarsuaq (NAQ), Baker Lake (BLC) и Barrow (BRW),

которые в это время находились в вечернем (NAQ и BLC) и дневном (BRW) секторах MLT.

Картина распределения векторов магнитного поля в 23:30 UT, получена с помощью сети SuperMag (рис. 4а). Вектора повернуты на 90° по часовой стрелке, чтобы показать направление ионосферных эквивалентных электрических токов. Видно, что во время этой суперсуббури авральный электроджет наблюдался практически в глобальном масштабе с наибольшей интенсивностью в послеполуночном секторе, где располагалась меридиональная цепочка станций IMAGE.

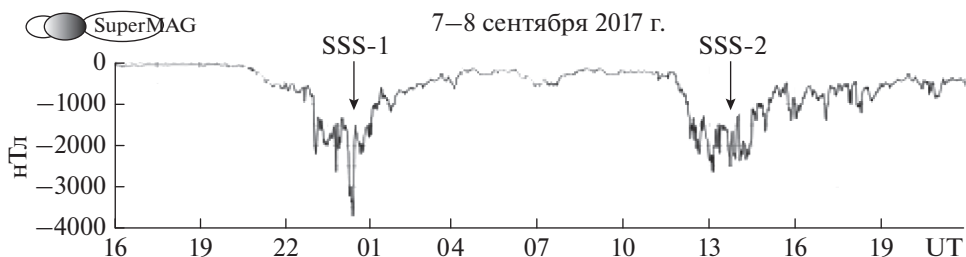


Рис. 2. Вариации *SML*-индекса с 16 UT 7 сентября до 22 UT 8 сентября 2017 г.

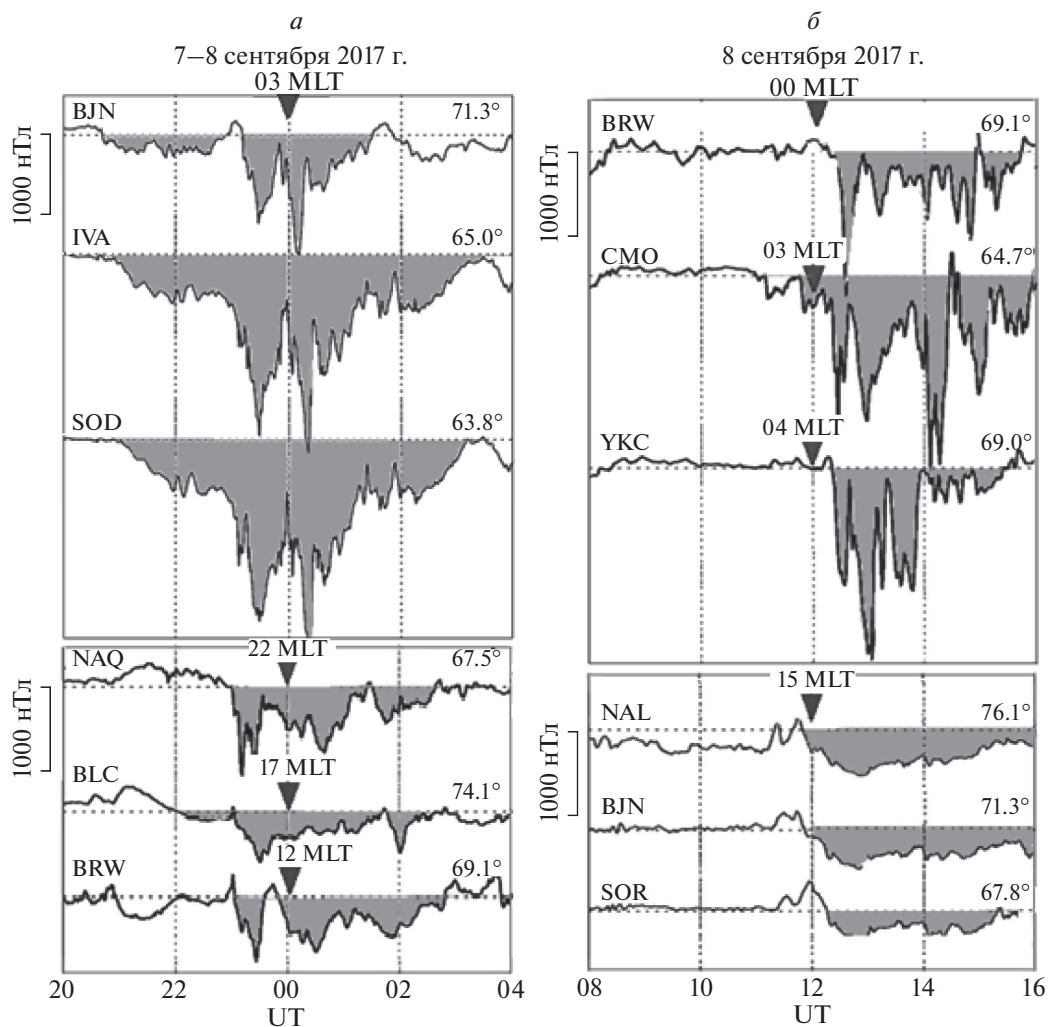


Рис. 3. Магнитограммы отдельных высокоширотных станций: (а) – во время SSS-1, (б) – во время SSS-2.

3.4. Вторая суперсуббура

На рисунке 3б представлены магнитограммы высокоширотных станций во время второй суперсуббуры (SSS-2), максимум интенсивности которой был в ~13:08 UT 8 сентября 2017 г. На верхних панелях рис. 3б показаны вариации *X*-компоненты магнитного поля для стан-

ций американского сектора, расположенных в авроральной зоне: Barrow (BRW, CGLON = 69.1°), College (CMO, CGLON = 64.7°) и Yellowknife (YKC, CGLON = 69.0°), которые находились в это время в послеполуночном секторе (01–05 MLT) и зарегистрировали сильные вариации магнитного поля (более ~1000 нТл). При этом, одновременно

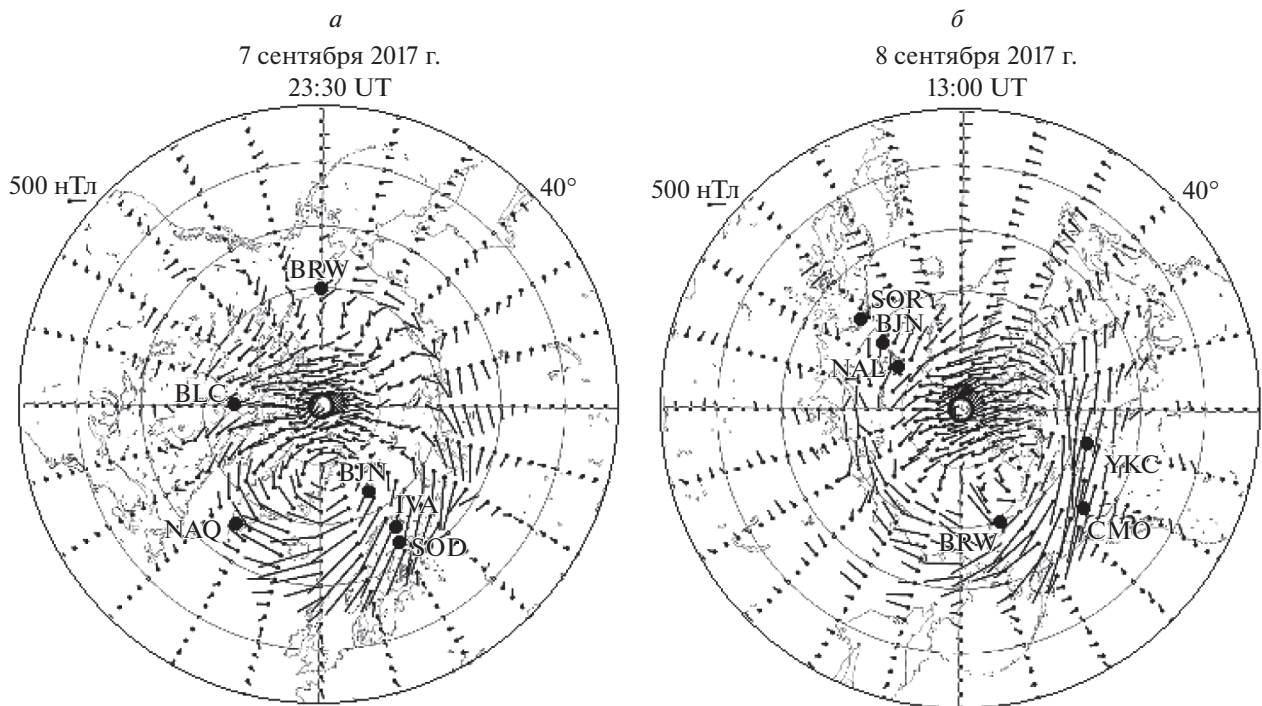


Рис. 4. Карты пространственного распределения векторов магнитного поля, повернутые на 90° , чтобы показать направление ионосферных эквивалентных электрических токов. Карты построены по данным наблюдений на сети SuperMAG: (а) – во время SSS-1, (б) – во время SSS-2.

на высокоширотных станциях скандинавского профиля IMAGE (NAL, BJN и SOR), магнитограммы которых показаны на нижних графиках рис. 3б, наблюдались бухтообразные магнитные возмущения. В это время эти станции находились в послеполуденном секторе (15–17 MLT). Согласно картине пространственного распределения, ионосферных эквивалентных электрических токов, полученных по данным MIRACLE (рисунок здесь не приводится), западный электроджет был сфокусирован в полярных широтах (от $\sim 68^\circ$ до $\sim 76^\circ$ CGLAT).

Карта SuperMAG глобального пространственного распределения векторов магнитного поля, повернутых на 90° (рис. 4б), показывает, что во время SSS-2, как и во время SSS-1, авроральный электроджет наблюдался практически в глобальном масштабе с наибольшей интенсивностью в послеполуденном секторе, где располагались высокоширотные станции американского сектора (YKC, CMO, BRW).

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Во время магнитных бурь 7–8 сентября 2017 г. наблюдались две очень интенсивные суббури, так называемые суперсуббури (supersubstorms – SSS). Как было показано ранее, суперсуббури появляются только во время определенных крупномас-

штабных типов солнечного ветра, а именно, во время межпланетных магнитных облаков (MC) или на фронте сжатой плазмы (SHEATH) перед магнитным облаком или EJECTA. [Tsurutani et al., 2015; Дэспирак и др., 2019]. Известно, что межпланетные выбросы корональной массы (ICME), наблюдаемые около Земли как EJECTA или MC, представляют собой крупномасштабные гелиосферные транзиенты, которые содержат магнитное поле в виде жгута, где магнитное давление намного выше, чем тепловое давление ($\beta \ll 1$) [например, Kilrua et al., 2016], но при этом магнитные облака (MC) отличаются еще и более высоким и регулярным магнитным полем. Турбулентная область сжатой плазмы, расположенная перед телом выброса – SHEATH – характеризуется повышенными значениями плотности, температуры, величины магнитного поля и $\beta > 1$. Однако, не все корональные выбросы массы приводят к появлению суперсуббурь. В большинстве случаев, перед появлением SSS наблюдался дополнительно локальный скачок давления и плотности в солнечном ветре [Tsurutani et al., 2015; Haira et al., 2016; Дэспирак и др., 2019]. Как показано в нашей работе, все эти межпланетные условия были выполнены перед появлением двух суперсуббурь 7–8 сентября 2017 г. Первая суперсуббуря (SSS-1) наблюдалась во время области сжатой плазмы SHEATH, а вторая суперсуббуря (SSS-2) – во вре-

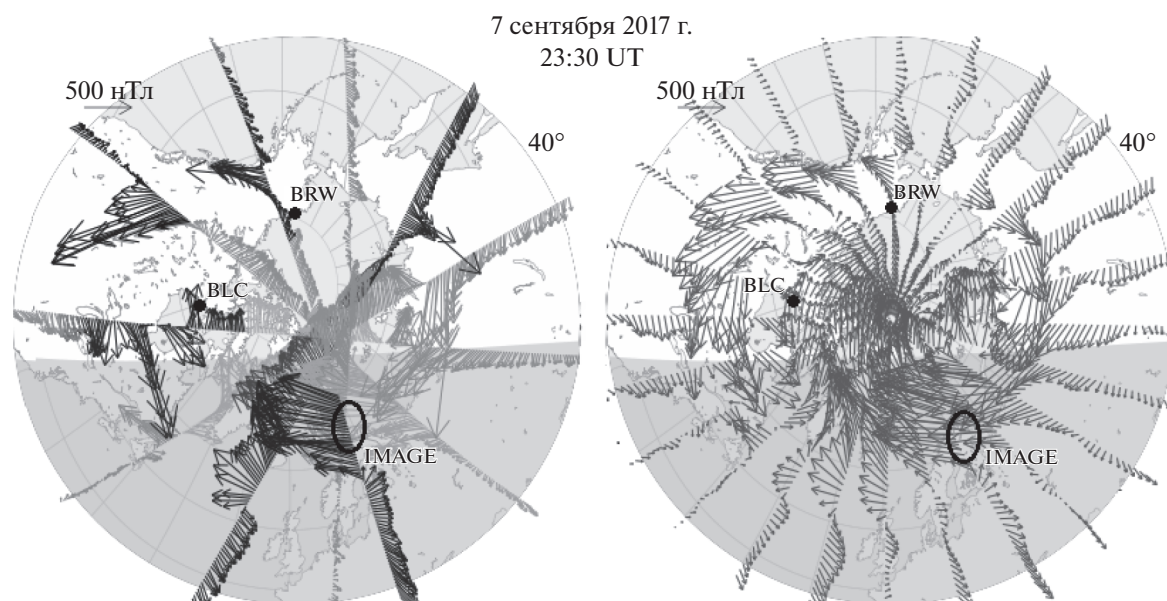


Рис. 5. Карта распределения векторов магнитных возмущений и результат их сферического гармонического анализа для первого возмущения SSS-1 в 23:30 UT 7 сентября 2017 г. по данным системы AMPERE.

мя межпланетного магнитного облака (MC). И перед каждой суперсуббури были локальные скачки давления, причем несколько больший скачок давления наблюдался перед первой суперсуббури, и это, возможно, привело к более высокой интенсивности SSS-1 (~3600 нТл), чем SSS-2 (~2600 нТл). Кроме того, надо учитывать, что в первом событии наблюдались более высокие значения отрицательной компоненты B_z ММП (около -30 нТл), чем во втором (~ -20 нТл).

Развитие магнитных возмущений во время этих суперсуббурь имело особенный характер: наибольшая величина западного электроджета обеих SSS наблюдалась на авроральных широтах после полуночи. В дневном секторе в это время также регистрировались отрицательные бухтообразные возмущения, но в более высоких, полярных геомагнитных широтах, как правило, выше 70° , и их интенсивность была значительно ниже, чем ночных суббурь.

Мы предполагаем, что дневные полярные возмущения, которые наблюдались одновременно с ночными суперсуббуриями, являются результатом затекания западного электроджета на дневную сторону во время сильных геомагнитных возмущений, как это было предложено в работе [Feldstein et al., 2006].

Полученный вывод о глобальном долготном развитии электроджета во время суперсуббурь полезно было бы проверить по данным пространственного распределения высокоширотных магнитных возмущений на ионосферных высотах по данным AMPERE (Active Magnetosphere and Plan-

etary Electrodynamics Response Experiment [Anderson et al., 2014]), (<http://www.ampere/jhapl.edu>). Проект AMPERE был основан на одновременной регистрации магнитного поля на высотах 780 км с помощью 66 коммерческих спутников связи с круговой орбитой. К сожалению, работа этого сайта закрыта с 8 сентября 2017 г. Однако имеются данные AMPERE за 7 сентября во время начала развития первой суперсуббури SSS-1, когда на скандинавском меридиане IMAGE была зарегистрирована магнитная бухта с амплитудой порядка 2000 нТл (рис. 3a).

Карты AMPERE пространственного распределения векторов магнитного поля и результата сферического гармонического анализа приведены на рис. 5, где четко видно, что западный электроджет регистрировался в глобальном масштабе по долготе, с наибольшей интенсивностью в послеполуденном секторе и с наименьшей вблизи полдня. Кроме того, в послеполуденном секторе на более низких широтах наблюдался интенсивный восточный электроджет, вечерняя его граница (разрыв Харанга) четко прослеживалась немного западнее Гренландии.

Таким образом, карты векторов электрического поля SuperMAG, построенные для двух суперсуббурь, и карты магнитных наблюдений на ионосферных высотах спутниковой системой AMPERE показывают, что ионосферные токи SSS были зарегистрированы в глобальном по долготе масштабе вокруг Земли. Насколько нам известно, такие глобальные суббуревые электроджеты ранее в литературе не обсуждались. Однако

в работе [Клейменова и др., 2019] при анализе геомагнитных пульсаций во время бури 25–26 августа 2018 г. было найдено, что одна из особенностей этой бури состояла в том, что суббури наблюдались в глобальном масштабе: отрицательные магнитные бухты были зарегистрированы синхронно в ночных авроральных широтах и в дневных полярных широтах. Надо отметить, что 26 августа 2018 года *SML*-индекс достигал значения ~ -2165 нТл, т.е. был близок к его значениям во время суперсуббурь. Вполне вероятно, что в главную фазу сильных магнитных бурь, создается настолько мощный электроджет, что он может затекать на дневную сторону.

Следует отметить, что остается много нерешенных вопросов о том, от чего зависит появление такой мощной электроструи, как связано ее формирование с условиями в солнечном ветре. При всех ли суперсуббурах формируется такая глобальная электроструя? Все эти вопросы требуют дальнейших детальных исследований.

5. ВЫВОДЫ

1) Исследованы пространственные особенности двух суперсуббурь с максимальной интенсивностью около 3600 и 2600 нТл, наблюдаемых во время двух сильных магнитных бурь 7–8 сентября 2017 г.

2) Показано, что западный электроджет во время этих суперсуббурь развивался в глобальном по долготе масштабе, от послеполуденного до предполуденного сектора, окружая Землю. Наибольшая интенсивность электроджета наблюдалась в авроральных широтах в послеполуночное время.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность создателям баз данных OMNI (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>), SuperMAG (<http://supermag.jhuapl.edu/>), IMAGE (<http://space.fmi.fi/image/>), MIRACLE (<https://space.fmi.fi/miracle/>) и AMPERE (<http://www.ampere/jhapl.edu>) за возможность их использования в работе.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Проекта Минобрнауки КП19-270 “Вопросы происхождения и эволюции Вселенной с применением методов наземных наблюдений и космических исследований” (Проект 28 П) в рамках государственных заданий Полярного геофизического института, Института физики Земли, и Института Земного магнетизма и распространения радиоволн.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Воробьев В.Г., Сахаров Я.А., Ягодкина О.И., Петрукович А.А., Селиванов В.Н. Геоиндуцированные токи и их связь с положением западной электроструи и границами авроральных высыпаний // Тр. Кольского научного центра РАН. Т. 4. С. 16–28. 2018.
<https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.5.16-28>
- Дэспирак И.В., Любич А.А., Бирнат Х.К., Яхнин А.Г. Полярная экспансия суббурь западного электроджета в зависимости от параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 48. № 3. С. 297–305. 2008.
- 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/10.7868/S0016794014050046>
- Дэспирак И.В., Любич А.А., Клейменова Н.Г. Суперсуббури и условия в солнечном ветре // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 59. № 2. С. 183–190. 2019.
<https://doi.org/10.1134/S001679401902007X>
- Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю. Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2000 гг. // Космич. исслед. // Т. 47. № 2. С. 99–113. 2009.
- 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.
- Клейменова Н.Г., Громова Л.И., Громов С.В., Малышева Л.М. Большая магнитная буря 7–8 сентября 2017: высокоширотные геомагнитные вариации и геомагнитные пульсации Pc5 // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 58. № 5. С. 619–629. 2018.
<https://doi.org/10.1134/S0016794018050085>
- Клейменова Н.Г., Громова Л.И., Громов С.В., Малышева Л.М. Магнитная буря 25–26 августа 2018: дневные высокоширотные геомагнитные вариации и пульсации // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 59. № 6. С. 706–713. 2019.
<https://doi.org/10.1134/S0016794019060075>
- Adhikari B., Baruwal P., Chapagain N.P. Analysis of superstorm events with reference to polar cap potential and polar cap index // Earth and Space Science. V. 4. P. 2–15. 2017.
<https://doi.org/10.1002/2016EA000217>
- 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)
- Anderson B.J., Korth H., Waters C.L., Green D.L., Merkin V.G., Barnes R.J., Dryud L.P. Development of large-scale Birkeland currents determined from the Active Magnetosphere and Planetary Electrodynamics Response Experiment // Geophys. Res. Lett. V. 41. P. 3017–3025. 2014.
<https://doi.org/10.1002/2014GL059941>
- Blagoveshchensky D.V., Sergeeva M.A. Impact of geomagnetic storm of September 7–8, 2017 on ionosphere and HF propagation: A multi-instrument study // Adv. Space Res. V. 63. P. 239–256. 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.07.016>

- *Chashei I.V., Tyul'bashev S.A., Shishov V.I., Subaev I.A.* Coronal Mass Ejections in September 2017 from Monitoring of Interplanetary Scintillations with the Large Phased Array of the Lebedev Institute of Physics // *Astronomy Rep.* V. 62. № 5. P. 346–351. 2018.
https://doi.org/10.1134/S1063772918050025
- *Clausen L.B.N., Milan S.E., Baker J.B.H., Ruohoniemi J.M., Glassmeier K.-H., Coxon J.C., Anderson B.J.* On the influence of open magnetic flux on substorm intensity: Ground- and space-based observations // *J. Geophys. Res.-Space.* V. 118. № 6. P. 2958–2969. 2013.
https://doi.org/10.1002/jgra.50308
- *Davis T.N., Sugiura M.* Auroral electrojet activity index AE and its universal time variations // *J. Geophys. Res.* V. 71. № 3. P. 785–801. 1966.
https://doi.org/10.1029/JZ071i003p00785
- *Despirak I.V., Lubchich A.A., Yahnin A.G., Kozelov B.V., Biernat H.K.* Development of substorm bulges during different solar wind structures // *Ann. Geophys.* V. 27(5). P. 1951–1960. 2009.
https://doi.org/10.5194/angeo-27-1951-2009
- *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.* V. 177. P. 54–62. 2018.
https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.09.011
- *Dimmock A.P., Rosenqvist L., Hall J.-O., Viljanen A., Jordanova E., Honkonen I., André M., Sjöberg E.C.* The GIC and geomagnetic response over Fennoscandia to the 7–8 September 2017 geomagnetic storm // *Space Weather.* V. 17. № 7. P. 989–1010. 2019.
https://doi.org/10.1029/2018SW002132
- *Feldstein Y.I., Popov V.A., Cumnock J.A., Prigancova A., Blomberg L.G., Kozyra J.U., Tsurutani B.T., Gromova L.I., Levitin A.E.* Auroral electrojets and boundaries of plasma domains in the magnetosphere during magnetically disturbed intervals // *Ann. Geophys.* V. 24. P. 2243–2276. 2006.
https://doi.org/10.5194/angeo-24-2243-2006
- *Gjerloev J.W.* A global ground-based magnetometer initiative // *EOS Trans. AGU.* V. 90. No. 27. P. 230–231. 2009.
https://doi.org/10.1029/2009EO270002
- *Gjerloev J.W.* The SuperMAG data processing technique // *J. Geophys. Res.* V. 117. № A9. A09213. 2012.
https://doi.org/10.1029/2012JA017683
- *Hajra R., Tsurutani B.T., Echer E., Gonzalez. W.D., Gjerloev J.W.* Supersubstorms (SML < –2500 nT): Magnetic storm and solar cycle dependences // *J. Geophys. Res.* V. 121. № 8. P. 7805–7816. 2016.
https://doi.org/10.1002/2015JA021835
- *Hajra R., Tsurutani B.T.* Interplanetary Shocks Inducing Magnetospheric Supersubstorms (SML < –2500 nT): Unusual Auroral Morphologies and Energy Flow // *Astrophys. J.* V. 858 : 123(6pp). 2018.
https://doi.org/10.3847/1538-4357/aabaed
- *Huttunen K.E.J., Kilpua S.P., Pulkkinen A., Viljanen A., Tanskanen E.* Solar wind drivers of large geomagnetically induced currents during the solar cycle 23 // *Space Weather.* V. 6. № 10. S10002. 2008.
https://doi.org/10.1029/2007SW000374
- *Kamide Y., Akasofu S.-I., Deforest S.E., Kisabeth J.L.* Weak and intense substorms // *Planet. Space Sci.* V. 23. № 4. P. 579–584. 1975.
https://doi.org/10.1016/0032-0633(75)90098-7
- *Kamide Y., Perreault P.D., Akasofu S.-I., Winningham J.D.* Dependence of substorm occurrence probability, on the interplanetary magnetic field and on the size of the auroral oval // *J. Geophys. Res.* V. 82. № 35. P. 5521–5528. 1977.
https://doi.org/10.1029/JA082i035p05521
- *Kappenman J.G.* Storm sudden commencement events and the associated geomagnetically induced current risks to ground-based systems at low-latitude and midlatitude locations // *Space Weather.* V. 1. № 3. P. 1016. 2003.
https://doi.org/10.1029/2003SW000009
- *Kilpua E.K.J., Madjarska M.S., Karna N., Wiegmann T., Farrugia C., Yu W., Andreeva K.* Sources of the slow solar wind during the solar cycle 23/24 minimum // *Solar Phys.* V. 291. P. 2441–2456. 2016.
https://doi.org/10.1007/s11207-016-0979-x
- *Lui A.T.Y., Anger C.D., Akasofu S.-I.* The equatorward boundary of the diffuse aurora and auroral substorms as seen by the Isis 2 auroral scanning photometer // *J. Geophys. Res.* V. 80. № 25. P. 3603–3614. 1975.
https://doi.org/10.1029/JA080i025p03603
- *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 a prolonged quiet period // *J. Geophys. Res.*, V. 81. № 7. P. 1415–1419. 1976.
https://doi.org/10.1029/JA081i007p01415
- *McPherron R.L., Russell C.T., Kivelson M.G., Coleman P.J., Jr.* Substorms in space: The correlation between ground and satellite observations of the magnetic field // *Radio Sci.* V. 8. № 11. P. 1059–1076. 1973.
https://doi.org/10.1029/RS008i011p01059
- *Newell P.T., Gjerloev J.W.* Evaluation of SuperMAG auroral electrojet indices as indicators of substorms and auroral power // *J. Geophys. Res.* V. 116. № A12. A12211. 2011a.
https://doi.org/10.1029/2011JA016779
- *Newell P.T., Gjerloev J.W.* Substorm and magnetosphere characteristic scales inferred from the SuperMAG auroral electrojet indices // *J. Geophys. Res.* V. 116. № A12. A12232. 2011b.
https://doi.org/10.1029/2011JA016936
- *Pulkkinen A., Bernabeu E., Thomson A. et al.* Geomagnetically induced currents: Science, engineering, and applications readiness // *Space Weather.* V. 15. № 7. P. 828–856. 2017.
https://doi.org/10.1002/2016SW001501
- *Sakharov Ya.A., Danilin A.N., Ostafiychuk R.M., Katkalo Yu.V., Kudryashova N.V.* Geomagnetically induced currents in the power systems of the Kola peninsula at solar minimum // *Proc. 8th Intern. Symp. on Electromag. Compatibility and Electromagnetic Ecology.* St-Ptb. 16–19 June 2009. P. 237–238. 2009.
- *Scolini C., Chané E., Temmer M. et al.* CME–CME Interactions as Sources of CME Geoeffectiveness: The Formation of the Complex Ejecta and Intense Geomagnetic Storm in 2017 Early September // *Astrophys. J.* V. 247. № 1. 2020.
https://doi.org/10.3847/1538-4365/ab6216
- *Tanskanen E.I., Pulkkinen T.I., Viljanen A., Mursula K., Partamies N., Slavin J.A.* From space weather toward space

- climate time scales: Substorm analysis from 1993 to 2008 // *J. Geophys. Res.* V. 116. № A5. A00I34. 2011.
<https://doi.org/10.1029/2010JA015788>
- *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. № 5. P. 519–524. 2015.
<https://doi.org/10.5194/angeocom-33-519-2015>
- *Tsurutani B.T., Gonzales W.D., Guarnieri F., Kamide Y., Zhou X., Arballo J.K.* Are high-intensity long-duration continuous AE activity (HILDCAA) events substorm expansion events? // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* V. 66. № 2. P. 167–176. 2004.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2003.08.015>
- *Tsurutani B.T., Gonzalez W.D., Gonzalez A.L.C. et al.* Corotating solar wind streams and recurrent geomagnetic activity: A review // *J. Geophys. Res.* V. 111. № A7. A07S01. 2006.
<https://doi.org/10.1029/2005JA011273>
- *Viljanen A., Häkkinen L.* IMAGE magnetometer network, Satellite-ground based coordination sourcebook // ed. Lockwood M., Wild M.N., Opgenoorth H.J. ESA publications SP-1198. P. 111–117. 1997.
- *Yermolaev Yu.I.* Large-scale structure of solar wind and its relationship with solar corona: Prognoz 7 observations // *Planet. Space Sci.* V. 39. № 10. P. 1351–1361. 1991.
[https://doi.org/10.1016/0032-0633\(91\)90016-4](https://doi.org/10.1016/0032-0633(91)90016-4)
- *Wang H., Lühr H., Ma S.Y., Ritter P.* Statistical study of the substorm onset: its dependence on solar wind parameters and solar illumination // *Ann. Geophys.* V. 23. № 6. P. 2069–2079. 2005.
<https://doi.org/10.5194/angeo-23-2069-2005>
- *Wu C.-C., Liou K., Lepping R.P., Huttuning L.* The 04–10 September 2017 Sun–Earth connection events: solar flares, coronal mass ejections/magnetic clouds, and geomagnetic storms // *Solar Phys.* V. 294. № 9(110). 2019.
<https://doi.org/10.1007/s11207-019-1446-2>