

## ГЛОБАЛЬНОЕ РАЗВИТИЕ СУПЕРСУББУРИ 28 МАЯ 2011 ГОДА

© 2022 г. И. В. Дэспирак<sup>1, \*</sup>, Н. Г. Клейменова<sup>2</sup>, А. А. Любчик<sup>1</sup>,  
П. В. Сецко<sup>1</sup>, Л. И. Громова<sup>3</sup>, Р. Вернер<sup>4</sup><sup>1</sup>Полярный геофизический институт, г. Апатиты (Мурманская обл.), Россия<sup>2</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН), г. Москва, Россия<sup>3</sup>Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия<sup>4</sup>Институт космических исследований и технологий Болгарской Академии Наук,  
г. Стара Загора, Болгария

\*e-mail: despirak@gmail.com

Поступила в редакцию 07.12.2021 г.

После доработки 20.01.2022 г.

Принята к публикации 27.01.2022 г.

В работе исследован случай изолированной суперсуббури, наблюдавшейся на главной фазе умеренной магнитной бури 28 мая 2011 г. ( $SYM/H \sim -95$  нТл), вызванной магнитным облаком солнечного ветра. Максимум суперсуббури наблюдался около ~08:50 UT ( $SML = \sim -2600$  нТл). Исследование проводилось по данным планетарных сетей магнитометров SuperMAG и IMAGE, а также по данным спутников проекта AMPERE. Получено, что подобно другим суперсуббурям, ионосферные токи в этом событии развивались в глобальном масштабе: в полуночном, утреннем и дневном секторах наблюдался интенсивный и протяженный западный электроджет (с максимумом около полуночи), а в послеполуденном и вечернем секторах наблюдался интенсивный восточный электроджет. Развитие глобальных токов сопровождалось интенсивными положительными бухтами, что отразилось в больших значениях  $MPV$ -индекса ( $\sim 4000$  нТл<sup>2</sup>). Показано, что во время максимального развития суперсуббури, в вечернем секторе ( $\sim 15-18$  MLT) произошло значительное усиление восточного электроджета, появился дополнительный втекающий продольный электрический ток, и одновременно в этом секторе было зарегистрировано появление дополнительного кольцевого тока. Эти факты свидетельствуют в пользу предположения о развитии дополнительного суббуревоего токового клина, возникшего в вечерней стороне во время суперсуббури и замыкающегося на восточный электроджет.

DOI: 10.31857/S0016794022030063

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Суперсуббури (*supersubstorms* – *SSS*) были названы интенсивные суббури, для которых были зарегистрированы большие отрицательные величины  $SML$ -индекса ( $SML < -2500$  нТл) [Tsurutani et al., 2015]. Отметим, что в отличие от  $AL$ -индекса,  $SML$ -индекс рассчитывается по данным наблюдений на всей сети станций SuperMAG [Gjerloev, 2009, 2012; Newell and Gjerloev, 2011] и, следовательно, включает не только стандартные станции авроральной зоны, как  $AL$ -индекс, но и многие другие станции (от  $40^\circ$  до  $80^\circ$  MLAT), что важно при исследованиях интенсивных суббурь, когда геомагнитная активность может сильно смещаться по широте [Feldstein and Starkov, 1967].

Первые исследования показали, что *SSS* имеют некоторые особенности как в условиях космической погоды во время появления *SSS*, так и в развитии наземных геомагнитных возмущений в

это время. Было показано [Hajra et al., 2016; Дэспирак и др., 2019; Despirak et al., 2020], что появление *SSS* наблюдается только при определенных условиях в солнечном ветре, а именно во время прохождения магнитных облаков (*MC*) или областей сжатой плазмы перед магнитными облаками (*SHEATH*), при скачках давления солнечного ветра и больших отрицательных значениях  $B_z$ -компоненты межпланетного магнитного поля (ММП). В общем, эти условия характерны и для развития больших магнитных бурь. Однако события *SSS* не всегда связаны с интенсивными магнитными бурями, как логично было бы предположить, а могут наблюдаться и во время умеренных магнитных бурь, а иногда во время не буревых условий [Tsurutani et al., 2015; Дэспирак и др. 2019].

До настоящего момента подробные исследования развития *SSS* были проведены только для нескольких событий: 8 сентября 2017 г., 9 марта 2012 г. и

5 апреля 2010 г. [Haira et al., 2018; Дэспирак и др. 2020, 2021; Nishimura et al., 2020; Zong et al., 2021]. Анализ развития *SSS* во время умеренной бури 5 апреля 2010 г. показал, что эта суперсуббура характеризовалась некоторыми особенными признаками: чрезвычайно интенсивным магнитным пересоединением, необычно большой диполизацией и интенсивными быстрыми потоками плазмы, направленными к Земле, которые наблюдались на спутниках THEMIS-A и GOES 11 [Nishimura et al., 2020]. Согласно наблюдениям спутника IMAGE, было показано, что в отличие от классических суббурь [Akasofu, 1964], в этом случае интенсивные сияния наблюдались в предполуночном и утреннем секторах местного магнитного времени (MLT) [Hajra et al., 2018]. Кроме того, было найдено, что эта суперсуббура характеризовалась необычной пространственной картиной развития авроральных электроджетов: оба электроджета – восточный и западный – развились в глобальном масштабе, и, окружая с разных сторон полярную шапку, дотягивались до дневной стороны. В результате, сформировалась сложная слоистая картина продольных токов и соответствующих им наземных магнитных бухт, которая была зарегистрирована на меридиане сети магнитометров IMAGE.

Для всех изученных событий суперсуббурь – как в случае *SSS* 5 апреля 2010 г., так и в событиях 8 сентября 2017 г. и 9 марта 2012 г. – были найдены некоторые особенности в планетарном распределении электроджетов. Главная из них – это формирование сильного западного электроджета в глобальном масштабе – от вечерней стороны на авроральных широтах до дневной в полярной области [Дэспирак и др. 2020, 2021]. Вполне вероятно, что дневные полярные возмущения, которые наблюдались одновременно с ночными суперсуббурами, являются результатом затекания западного электроджета на дневную сторону [Feldstein et al., 2006].

Известно, что западный электроджет является частью суббуревоего токового клина (*substorm current wedge – SCW*). Это трехмерная система токов, возникающая обычно на ночной стороне в результате разрыва тока вблизи геосинхронной орбиты, когда ток поперек плазменного слоя магнитосферы через продольные электрические токи замыкается на ионосферу [Meng and Akasofu, 1969; McPherron et al., 1973]. При этом западный электроджет замыкается парой втекающих и вытекающих продольных токов, которые разделены азимутально, в результате создаются положительные отклонения (положительные бухты) в *H*-компоненте в средних и низких широтах [Rostoker, 1968; Connors et al., 2014; Chu et al., 2014]. Недавно для оценки интенсивности *SWC* был предложен среднеширотный *MPB*-индекс [Chu et al., 2015; McPherron and Chu, 2017]. Этот индекс рассчиты-

вается по данным магнитометров SuperMAG как средняя мощность вариаций *X*- и *Y*-компонент магнитного поля на станциях средних широт, он может служить мерой интенсивности среднеширотных бухт и интенсивности диполяризации во время суббури [Sergeev et al., 2011].

Кроме того, в нашей предыдущей работе [Дэспирак и др. 2021] было замечено, что во время *SSS* в послеполуночном и вечернем секторах развивался интенсивный восточный электроджет. Появление сильного восточного электроджета на вечерней стороне, возможно, связано с формированием дополнительного кольцевого тока в вечернем секторе во время *SSS* [Zong et al., 2021]. Возникающий дополнительный кольцевой ток замыкается через продольные токи на восточный электроджет, т.е. предполагается, что во время интенсивных суббурь или суперсуббурь на вечерней стороне возникает дополнительная петля токов – дополнительный суббуревой токовый клин [Fu et al., 2021; Zong et al., 2021].

Целью данной работы является продолжение исследований геомагнитных эффектов и пространственного развития электроджетов во время суперсуббурь, а также проверка предположения о том, что во время *SSS* в предвечернем секторе образуется дополнительный токовый клин обратного направления, приводящий к усилению восточного электроджета. Для анализа было выбрано одно из немногих изолированных событий – суперсуббура, наблюдавшаяся во время умеренной магнитной бури 28 мая 2011 г. Это событие *SSS* является изолированным, так как оно наблюдалась на спокойном фоне, и за 3 ч до его начала не было возмущений в *SML*-индексе с интенсивностью более 500 нТл. Отметим, что ранее рассмотренные случаи *SSS* (8 сентября 2017 г. и 9 марта 2012 г.) не были изолированными, а суперсуббури наблюдались на довольно возмущенном геомагнитном фоне и состояли из серии пиков в *SML*-индексе интенсивностью более ~2000 нТл.

## 2. ДАННЫЕ

Работа основана на анализе наземных наблюдений на глобальной сети магнитометров SuperMAG (<http://supermag.jhuapl.edu/>) [Gjerloev, 2009; Newell and Gjerloev, 2011]. Были использованы также данные наблюдений на скандинавской сети станций IMAGE (<http://space.fmi.fi/image/>) [Viljanen and Häkkinen, 1997].

Начало и развитие суперсуббури определялось с помощью геомагнитного индекса *SML*, взятого с сайта SuperMAG, и по магнитограммам. В системе SuperMAG компоненты магнитного поля определяются следующим образом:  $B = (B_N, B_E, B_Z)$ , где *N* – направление на локальный магнитный

север;  $E$  – направление на локальный магнитный восток;  $Z$  – направление вертикально вниз [Gjerloev, 2009, 2012; Newell and Gjerloev, 2011].

Интенсивность кольцевого тока и его распределение по секторам MLT определялись с помощью индексов  $SMR$  и  $SMR_{LT}$ , взятых также с сайта SuperMAG.  $SMR$ -индекс характеризует интенсивность кольцевого тока и рассчитывается на основе данных вариаций  $N$ -компоненты магнитного поля на  $\sim 100$  магнитометрах, расположенных от  $-50$  до  $+50$  град. геомагнитной широты. В проекте SuperMAG при расчете индексов магнитной активности выделяются четыре сектора местного времени с центрами в 00, 06, 12, 18 MLT, для которых определяется значение  $SMR_{LT}$  ( $SMR-00$ ;  $SMR-06$ ;  $SMR-12$ ;  $SMR-18$ ). Тогда общее значение индекса  $SMR$  определяется согласно формуле  $SMR = (SMR-00 + SMR-06 + SMR-12 + SMR-18)/4$  [Newell and Gjerloev, 2011].

Интенсивность среднеширотных бухт определялась по  $MPB$ -индексу, который был построен на основе дополнительных материалов к электронной версии статьи [McPherron and Chu, 2017].  $MPB$ -индекс рассчитывается по данным магнитометров SuperMAG как средняя мощность вариаций  $X$ - и  $Y$ -компонент магнитного поля, при этом сумма квадратов мощностей  $X$  и  $Y$  определяется на каждой из 35 станций средних широт. Подробное описание методики расчета  $MPB$ -индекса и списки используемых среднеширотных станций представлено в работах [Chu et al., 2015; McPherron and Chu, 2017].

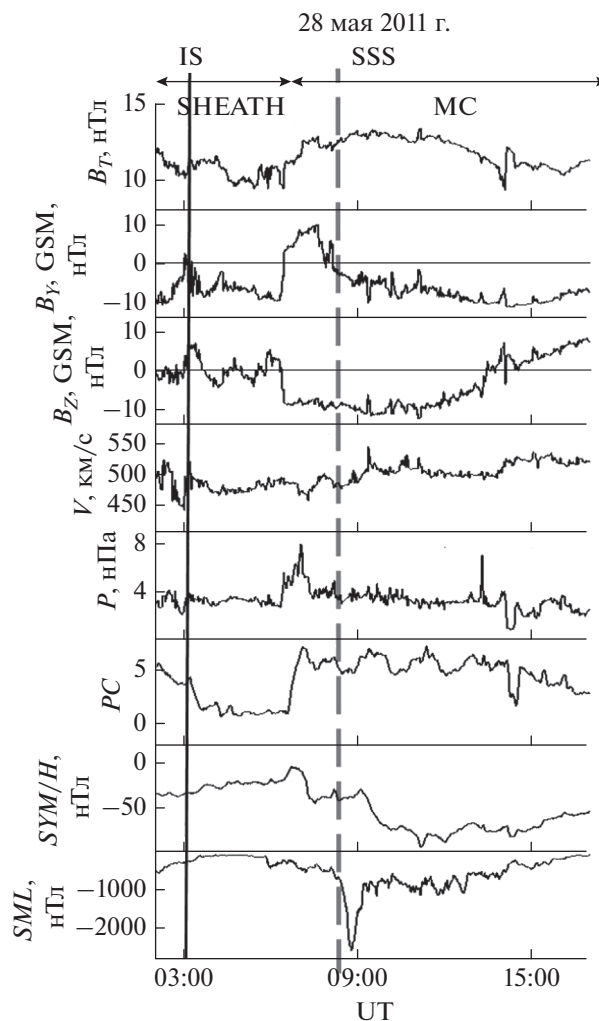
Глобальное пространственное распределение ионосферных токов определялось из карт векторов магнитного поля, полученных на сети магнитометров SuperMAG, а также карт магнитных возмущений, построенных по результатам сферического гармонического анализа магнитных измерений на одновременно работающих 66 низкоорбитальных спутников связи на высоте около 780 км системы AMPERE (*Active Magnetosphere and Planetary Electrodynamics Response Experiment*). Детальное описание методики получения этих данных приведено на сайте (<http://www.amperere.jhuapl.edu>).

Параметры солнечного ветра и ММП взяты из базы данных CDAWeb и каталога крупномасштабных типов солнечного ветра (<ftp://ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/catalog>).

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

#### 3.1. Условия в солнечном ветре и межпланетном магнитном поле

На рисунке 1 показаны параметры солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП), которые наблюдались 28 мая 2011 г. в 02–17 UT: магнитуа ( $B_T$ ) межпланетного магнитного поля



**Рис. 1.** Параметры солнечного ветра и ММП, а также геомагнитные индексы для периода 02–17 UT 28 мая 2011. Сверху вниз: магнитуа межпланетного магнитного поля ( $B_T$ ),  $B_Y$ - и  $B_Z$ -компоненты ММП (в системе GSM), скорость и динамическое давление солнечного ветра, геомагнитные индексы  $PC$ ,  $SYM/H$  и  $SML$ . Границы магнитного облака ( $MC$ ), и области  $SHEATH$  обозначены горизонтальными стрелками, моменты прихода ударной волны ( $IS$ ) и начала  $SSS$  отмечены вертикальными линиями (сплошной и штриховой).

(ММП),  $Y$ - и  $Z$ -компоненты ММП ( $B_Y$ ,  $B_Z$ ), скорость потока ( $V$ ), динамическое давление ( $P$ ) солнечного ветра и геомагнитные индексы  $PC$ ,  $SYM/H$  и  $SML$ .

Видно, что в этот период времени около Земли (на рис. 1 представлены данные на расстоянии 1 а.е.) наблюдался корональный выброс массы (*coronal mass ejection* –  $CME$ ), состоящий из двух последовательных структур –  $SHEATH$  и магнитного облака (*magnetic cloud* –  $MC$ ). Турбулентная область сжатой плазмы  $SHEATH$  с повышенными значениями плотности, температуры, величины

магнитного поля наблюдалась с  $\sim 04$  UT 27 мая до  $\sim 06:20$  UT 28 мая, а  $MC$  — с  $\sim 06:20$  до  $21:00$  UT 28 мая. На рисунке области *SHEATH* и  $MC$  отмечены горизонтальными стрелками. В конце области *SHEATH*, около  $03:00$  UT наблюдался скачок параметров солнечного ветра, соответствующий приходу ударной волны ( $IS$ ), этот момент времени показан на рис. 1 вертикальной сплошной линией. Как следует из рис. 1,  $MC$  содержит большой интервал отрицательных значений  $B_z$ -компоненты ММП. Примерно в  $\sim 06:20$  UT началось резкое изменение  $B_z$ -компоненты ММП от  $+4$  нТл до  $-10$  нТл, и она оставалась отрицательной до  $\sim 14$  UT, минимальное значение было  $-13$  нТл. Вероятно, что длительный период отрицательных значений  $B_z$  ММП и привел к развитию умеренной геомагнитной бури с  $Dst = -95$  нТл.

На фоне этой магнитной бури начала развиваться суперсуббури ( $SSS$ ), с минимальным значением  $SML$ -индекса  $\sim -2500$  нТл. Суперсуббури началась в  $\sim 08:05$  UT (на рис. 1 этот момент отмечен вертикальной штриховой линией), достигла максимума в  $\sim 08:50$  UT и закончилась примерно в  $09:10$  UT 28 мая 2011. Таким образом, длительность  $SSS$  была  $\sim 1$  ч. Видно, что  $SSS$  началась на главной фазе бури ( $SYM/H \sim -50$  нТл), в начале магнитного облака ( $MC$ ). Перед  $SSS$  наблюдался скачок давления солнечного ветра,  $B_z$ -компонента ММП была отрицательной, в то время как  $B_y$ -компонента — положительной.

Из рисунка 1 видно, что примерно за полтора часа до начала суперсуббури  $B_z$ -компонента ММП стала отрицательной, что способствовало поступлению энергии солнечного ветра в магнитосферу Земли. Известно, что индикатором этого процесса является полярный  $PC$ -индекс [Troshichev et al., 2014]. На рисунке 1 видно, что перед началом суперсуббури значения  $PC$ -индекса быстро возросли от 1 до 7, что указывает на очень большое поступление энергии от солнечного ветра в магнитосферу Земли.

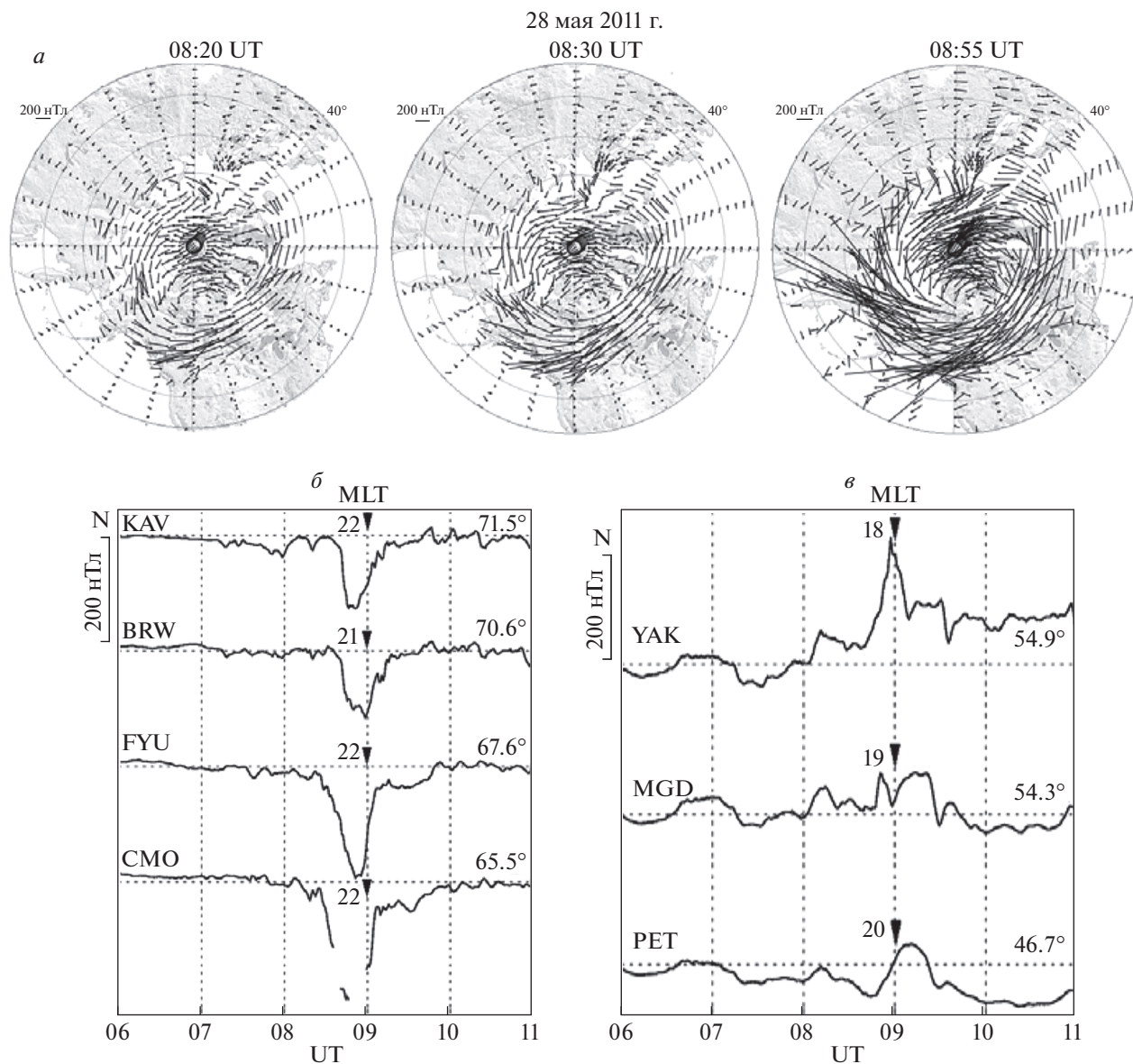
### 3.2. Развитие суперсуббури по геомагнитным наземным и спутниковым возмущениям

Рассмотрим пространственное распределение магнитных возмущений во время суперсуббури 28 мая 2011 г. Карты распределения векторов магнитного поля, полученные по данным сети SuperMAG, представлены на рис. 2. На верхней панели рисунка приведены карты для трех моментов времени —  $08:20$ ,  $08:30$  и  $08:55$  UT, по которым можно проследить динамику развития суперсуббури. На рисунке 2а магнитные вектора повернуты на  $90^\circ$  по часовой стрелке, чтобы показать направление ионосферных эквивалентных электрических токов. По очертаниям материков видно, что в предполуденном и ночном секторах находились

станции Аляски и Канады, над Гренландией было утро, Сибирь и Дальний Восток располагались в вечернем секторе ( $MLT \sim 16-19$  ч), а Скандинавия, где расположены станции меридионального профиля IMAGE, находилась в дневном секторе. Отметим, что расположение магнитных станций примерно такое же, как и для случая суперсуббури 5 апреля 2010 г. Видно, что возмущения начались в ночном секторе, на севере Канады, далее они усиливались, и область их наблюдения расширялась, захватывая станции севера США и, распространяясь как на запад, по направлению к Аляске и Дальнему Востоку, так и на восток, по направлению к Гренландии и Скандинавии. В максимуме развития  $SSS$  наиболее сильные возмущения ( $\sim 2000$  нТл) наблюдались на Аляске, в предполуденном секторе, и на юге Канады, в ночном секторе ( $\sim 1700$  нТл). По картам магнитных векторов видно, что западный электроджет развивался в глобальном масштабе, от вечернего (Аляска) через ночной (Канада) и утренний (Гренландия) сектора до дневного сектора (Скандинавия).

На рисунке 2б представлены магнитограммы некоторых станций Аляски по данным глобальной сети SuperMAG (<http://supermag.jhuapl.edu/>). Показаны вариации  $N$ -компоненты магнитного поля на четырех станциях Аляски: Kaktovik (KAV), Barrow (BRW), Fort Yukon (FYU) и College (CMO) с  $06$  до  $11$  UT 28 мая 2011 г. Геомагнитные координаты всех используемых станций приведены в табл. 1. Эти станции располагались в околополуденном секторе, и с  $\sim 08:25$  UT здесь наблюдались сильные отрицательные бухты (более  $\sim 1000$  нТл). При этом, наиболее сильные возмущения были зафиксированы на широтах авроральной зоны, на станциях CMO и FYU ( $\sim -2200$  нТл).

Магнитные возмущения в вечернем секторе оценить довольно трудно из-за редкой сети магнитных станций на большой территории Сибири. Магнитограммы некоторых станций Сибири и Дальнего Востока по данным сети SuperMAG представлены на рис. 2в. Показаны вариации  $N$ -компоненты магнитного поля на трех станциях Восточной Сибири и Дальнего Востока: Якутск (YAK), Магадан (MGD) и Паратунка (PET). Геомагнитные координаты этих станций приведены в табл. 1. Видно, что на этих станциях наблюдались довольно интенсивные положительные бухты, наибольшие возмущения ( $\sim 220$  нТл) были зарегистрированы в вечернем секторе ( $\sim 18$  MLT) на ст. Якутск, амплитуда бухт уменьшается от Якутска (YAK) к Камчатке (PET). Заметим, что для обычных суббурь амплитуды положительных бухт обычно много меньше ( $\sim 20-30$  нТл) [например, Guineva et al., 2021]. Положительные бухты указывают на наличие интенсивного восточного электроджета. Однако, чтобы сделать более достоверные выводы о магнитных возмущениях и



**Рис. 2.** Наблюдения на сети SuperMAG во время SSS: карты пространственного распределения векторов магнитного поля, повернутые на 90°, чтобы показать направление ионосферных эквивалентных электрических токов (а) и вариации *N*-компоненты магнитного поля на отдельных станциях на Аляске (б) и в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке (в).

положениях электроджетов, необходимо использовать данные спутниковой регистрации проекта AMPERE.

На рисунке 3 приведены результаты анализа магнитных возмущений по данным измерений на 66-ти спутниках AMPERE на высоте 780 км 28 мая 2011 г. Показаны карты сферического гармонического анализа магнитных возмущений (слева) и карты распределения продольных токов (справа), вытекающий ток отмечен кружками, втекающий – крестиками. Карты построены в геомагнитных координатах для северного полушария, полдень находится сверху карты, полночь –

внизу. Надо отметить, что на сайте AMPERE (<http://www.ampere.jhuapl.edu>) карты распределения продольных токов приведены в цвете, красным цветом показаны вытекающие токи, а синим – втекающие. При трансформации цветных рисунков в черно-белые эти цвета становятся неразличимыми, поэтому мы использовали специальные значки (крестики и нулики). Однако при этом полностью теряется информация об интенсивности токов, можно оценить только их положение и пространственное развитие.

На рисунке 3 показаны карты для двух моментов времени, близких к 08:30 и 09:00 UT, то есть в

**Таблица 1.** Геомагнитные координаты используемых станций сети SuperMAG

Станция	MLAT	MLON	MLT (в 09 UT)
Kaktovik (KAV)	71.5°	-94.7°	22
Barrow (BRW)	70.6°	-106.5°	21
Fort Yukon (FYU)	67.6°	-92.7°	22
College (CMO)	65.4°	-93.8°	22
Якутск (YAK)	54.9°	-157.4°	18
Магадан (MGD)	54.3°	-139.3°	19
Паратунка (PET)	46.7°	-132.1°	20

начале и в максимуме развития *SSS* (рис. 3а и 3б). Видно, что около 08:30 UT были зарегистрированы два протяженных электроджета — западный, который наблюдался от предполуночных до поздних утренних часов местного времени, и восточный — от полуденных до поздних вечерних часов. Западный электроджет располагается между втекающим и вытекающим токами, а восточный — между вытекающим и втекающим токами. При этом видно, что в ночном секторе геомагнитные возмущения развиваются в авроральных широтах, а в утреннем и дневном секторах — в полярных.

В максимуме развития *SSS* около 09:00 UT токи усилились, расширяясь по широте, особенно это проявилось в ночном секторе, около полуночи, втекающий и вытекающий токи расширились почти в 2 раза. А в вечернем секторе появился дополнительный втекающий ток в ~15–18 MLT (рис. 3б) и огромный вихрь возмущений над Восточной Сибирью (~16–19 MLT), что указывает на усиление восточного электроджета в этой области, возможно, из-за появления дополнительного частичного кольцевого тока, который появляется в этом секторе MLT (как будет показано ниже).

### 3.3. Развитие кольцевого тока во время суперсуббури

Развитие кольцевого тока во время *SSS* можно оценить с помощью индексов *SMR* и *SMR\_LT*, которые характеризуют интенсивность кольцевого тока и его распределение по секторам MLT. На рисунке 4 представлены вариации *SMR*- и *SMR\_LT*-индексов для 28 мая 2011 г. с 06 до 13 UT. Для сравнения динамики кольцевого тока и суперсуббури на рисунок добавлен также *SML*-индекс, а для оценки интенсивности среднеширотных положительных бухт — индекс *MPB*. На верхней панели хорошо видно начало и развитие суперсуббури. *SSS* началась в ~08:05 UT и достигла максимума в ~08:50 UT. Ниже представлены вариации индекса кольцевого тока *SMR\_LT* для четырех различных секторов MLT (ночного, утреннего, полуденного и вечернего). Разные сектора

MLT показаны разными символами на графиках *SMR\_LT*: крест — *SMR\_00*; ромб — *SMR\_06*; треугольник — *SMR\_12*; звездочка — *SMR\_18*.

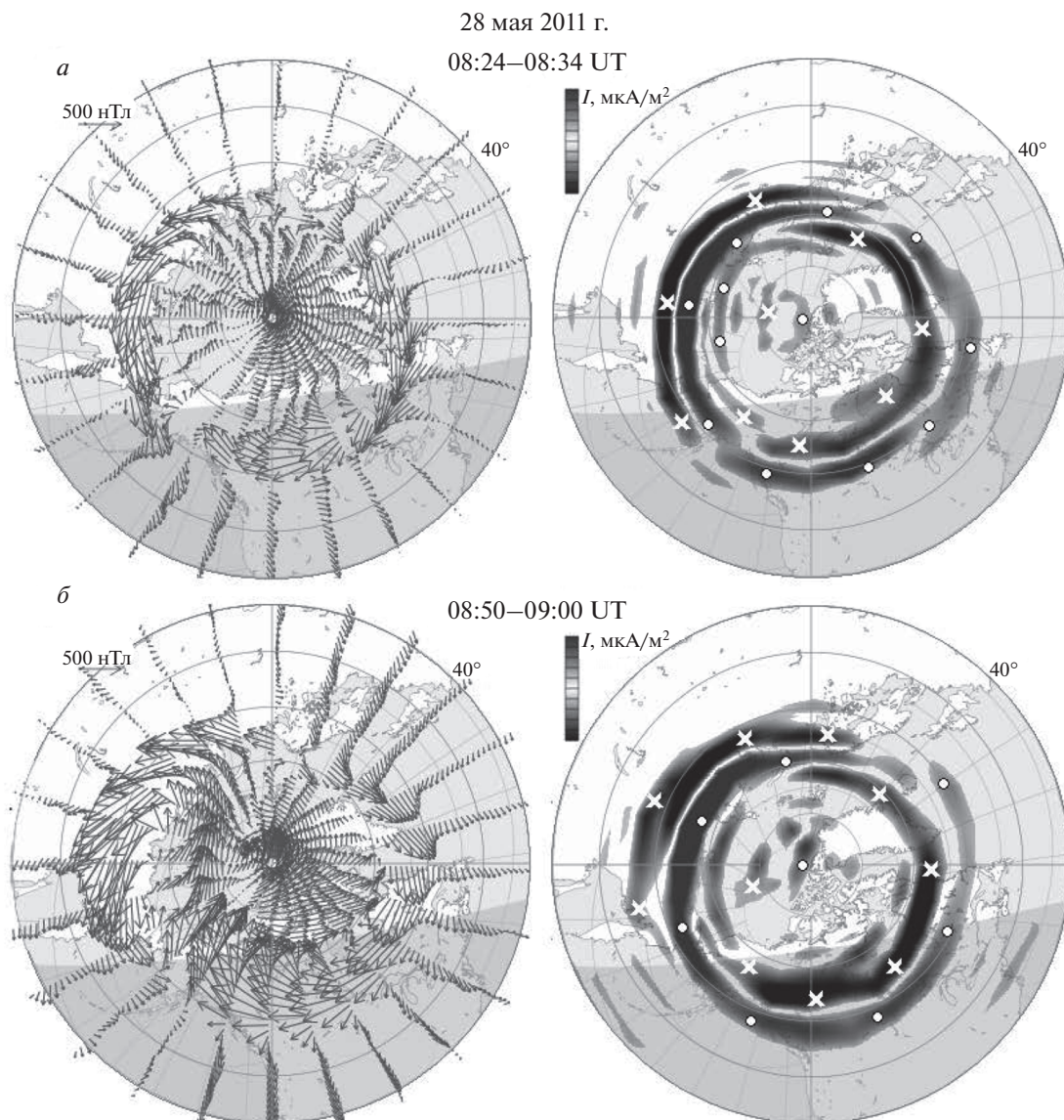
Видно, что интенсивность кольцевого тока неуклонно возрастает, индекс *SMR* достигает минимальных значений ~-150 нТл около ~11–12 UT, при чем это происходит в ночном, вечернем и дневном секторе (*SMR\_00*, *SMR\_18* и *SMR\_12*). Заметим, что время ~11–12 UT соответствует максимуму развития магнитной бури 28 мая 2011 г. (рис. 1). Однако, на графиках *SMR\_12* и *SMR\_18* виден еще второй дополнительный минимум около ~08:50 UT, который совпадает с минимумом в *SML*-индексе, т.е. соответствует максимальной фазе развития суперсуббури. Это доказывает то, что кольцевой ток увеличился в послеполуденной и вечерней области магнитосферы во время развития суперсуббури.

Видно, что во время минимумов в *SML* и *SMR\_LT* индексах наблюдался сильный всплеск в *MPB*-индексе. Так, в ~08:50 UT в *MPB*-индексе появился большой пик с максимумом ~4000 нТл<sup>2</sup>, который связан с наличием сильных возмущений на средних широтах (положительных бухт). В нашем событии довольно интенсивные положительные бухты (~100–200 нТл) были зарегистрированы на станциях Восточной Сибири, Дальнего Востока, Японии и Северной Америки, некоторые из них были представлены выше (рис. 2в). Отметим, что это очень большие величины как для *MPB*-индекса, так и для амплитуд положительных бухт, при обычных суббури их значения меньше в несколько раз [Guineva et al., 2021].

## 4. ОБСУЖДЕНИЕ

Суперсуббури, наблюдавшаяся на фоне магнитной бури 28 мая 2011 г., возникла при очень благоприятных условиях в солнечном ветре и ММП: мимо Земли проходило магнитное облако, наблюдался длительный период отрицательных значений  $B_z$ -компоненты ММП, а также локальный скачок давления. Кроме того, как следует из рис. 1, в конце области *SHEATH*, около 03 UT бы-



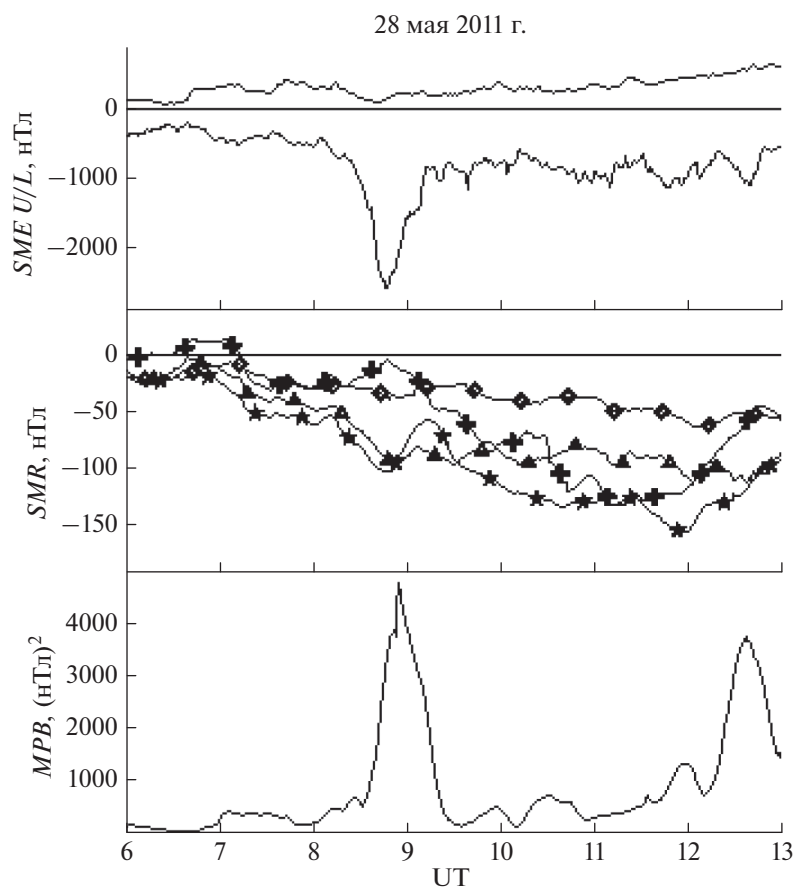


**Рис. 3.** Карты сферического гармонического анализа магнитных возмущений 28 мая 2011 г. (слева) и карты распределения продольных токов (справа), по данным проекта AMPERE. Вытекающий ток отмечен кружками, втекающий – крестиками. Карты построены в геомагнитных координатах для северного полушария для двух моментов времени: 08:20 UT (*a*) и 08:55 UT (*б*). Полдень вверх, полночь – внизу, 06 MLT – справа и 18 MLT – слева.

ла зарегистрирована ударная волна (*IS*). Поэтому несмотря на то, что появление *SSS* связано с магнитным облаком солнечного ветра, а не его фронтом (*SHEATH*), эту суперсуббурю можно отнести к событиям *SSS*, связанным с развитием ударных волн. Одним из таких событий является суперсуббуря, наблюдавшаяся в начале бури 5 апреля 2010 г., которая была рассмотрена в нескольких работах [Nishimura et al., 2020; Haira et al., 2018; Zong et al., 2021]. Обе суперсуббури были изолированными, но *SSS* 5 апреля 2010 года состояла из нескольких интенсификаций, а событие 28 мая 2011 было более простым. Отметим, что располо-

жение магнитных станций во время развития обеих *SSS* было подобным: в ночном секторе находились станции Аляски и Канады, в утреннем секторе – станции Гренландии, в дневном секторе – станции сети IMAGE, а в вечернем секторе – станции Сибири (рис. 2).

Анализ геомагнитных возмущений показал, что ионосферные токи во время этой суперсуббури 28 мая 2011 г., развивались в глобальном масштабе – от послеполуночного до вечернего секторов, окружая Землю. Во время развития *SSS* наблюдался очень интенсивный западный электроджет с максимумом в ночном секторе (~00 MLT), ко-



**Рис. 4.** Вариации  $SML$ ,  $SMR_{LT}$  и  $MPB$  индексов с 06 до 13 UT 28 мая 2011. Небольшими символами на графиках для  $SMR$ -индекса обозначены разные сектора MLT: крест —  $SMR-00$ ; ромб —  $SMR-06$ ; треугольник —  $SMR-12$ ; звездочка —  $SMR-18$ .

торый протягивался до полуденного сектора (рис. 2 и 3). Надо отметить, что подобное глобальное развитие западного электроджета характерно для всех рассмотренных ранее суперсуббурь [Дэспирак и др., 2020, 2021].

Кроме того, как видно из рис. 3б, развитие протяженного западного электроджета сопровождалось появлением большой положительной вариации  $N$ -компоненты магнитного поля ( $\sim 200$  нТл) на геомагнитных широтах от  $\sim 45^\circ$  до  $\sim 55^\circ$ , что могло привести к наблюдаемому импульсу  $MPB$ -индекса  $\sim 4000$  нТл<sup>2</sup>. Отметим, что  $SSS$  5 апреля 2010 г. также сопровождалась интенсивными положительными бухтами, и наблюдался большой всплеск в  $MPB$ -индексе ( $\sim 6000$  нТл<sup>2</sup>).

Недавние исследования суперсуббурь [Zong et al., 2021], связанных с ударной волной в солнечном ветре, в том числе и события 5 апреля 2010 г., показали, что во время таких событий на вечерней стороне ( $\sim 18$  MLT) происходит формирование интенсивного восточного электроджета. Предполагалось, что это может быть связано с усилением частичного кольцевого тока в этом секторе MLT.

Подобное усиление кольцевого тока видно и в случае суперсуббури 28 мая 2011 г. (рис. 4). Видно, что графики  $SMR_{12}$  и  $SMR_{18}$  (индексы частичного кольцевого тока в дневном и вечернем секторах) содержат дополнительный минимум около  $\sim 08:50$  UT, который совпадает с минимумом в  $SML$ -индексе. Это указывает на тот факт, что кольцевой ток увеличился в послеполуденной и вечерней области магнитосферы во время развития суперсуббури. Этот возникающий дополнительный кольцевой ток замыкается через продольные токи на восточный электроджет, т.е. предполагается, что во время интенсивных суббурь или суперсуббурь на вечерней стороне возникает дополнительная петля токов — дополнительный суббуревой токовый клин [Fu et al., 2021; Zong et al., 2021]. Это показано на рис. 5, взятом из статьи Zong et al. (2021), где показана модель токового клина суббури (*substorm current wedge*), которая наблюдается во время обычных суббурь (слева), и модель развития суперсуббури (справа), которая состоит из двух токовых клиньев — обычного, который связан с западным



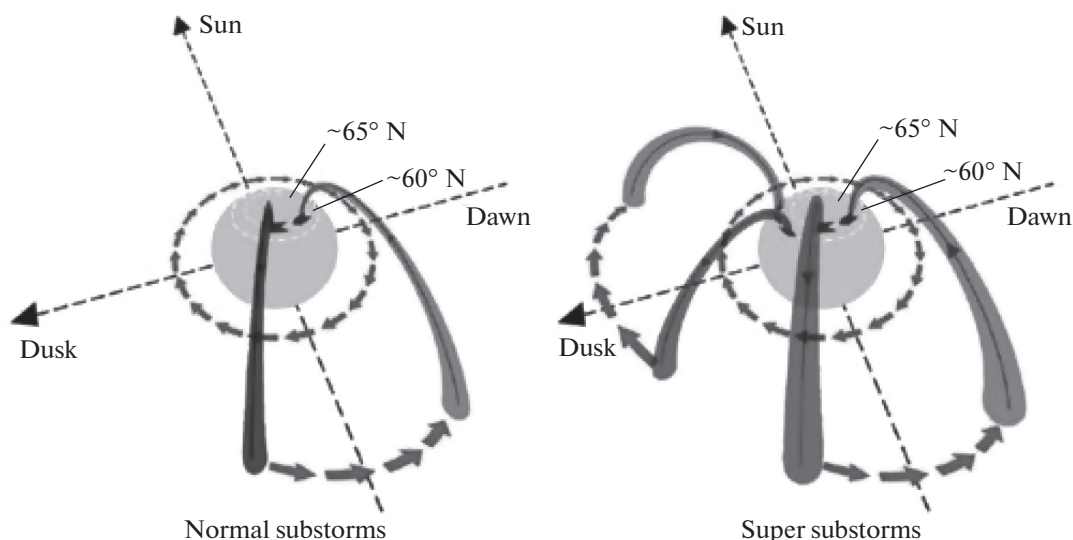


Рис. 5. Модель токового клина суббури (*substorm current wedge* – SCW) для обычных суббурь (слева) и для суперсуббурь (справа). Рисунок взят из статьи Zong et al., 2021.

электроджетом на ночной стороне, и дополнительного токового клина, который связан с усилением восточного электроджета и формированием дополнительного частичного кольцевого тока на вечерней стороне. Как следует из рис. 2 и 3, в нашем случае также было зарегистрировано усиление восточного электроджета в секторе 15–18 MLT. Во время взрывной фазы *SSS* в этом секторе MLT появился дополнительный втекающий ток, который, возможно, связан с появлением частичного кольцевого тока (рис. 4).

Вопросы о механизме формирования дополнительного кольцевого тока и ускорения заряженных частиц кольцевого тока во время суперсуббури пока недостаточно исследованы. Интуитивно понятно, что во время суперсуббури, вызванной ударной волной, возможно поступление огромного числа частиц во внутреннюю магнитосферу, что может внести значительный вклад в кольцевой ток. Однако, каков физический механизм этого процесса пока неясно. В литературе обсуждается несколько возможностей, например, накопленная в долях хвоста магнитосферы энергия может высвобождаться во время импульсов динамического давления, а также внезапное глобальное магнитосферное сжатие может вызывать продольные токи, вызывающие ионосферный джоулев нагрев [Tsurutani et al., 2016]. Еще одним источником могут быть плазменные волны, генерируемые в результате столкновений с ударной волной, которые вызывают ускорение и высыпание частиц в магнитосферу [например, Zong et al., 2012]. Недавно было показано также, что в возникающих во время *SSS* быстрых потоках плазмы и плазмоидах содержится большое количество ионов кислорода, т.е. при расчетах необходимо

учитывать и вклад тяжелых ионов кислорода [Zong et al., 2021]. Для достоверных выводов необходимы дальнейшие исследования.

## 5. ВЫВОДЫ

Исследованы планетарные геомагнитные возмущения во время изолированной суперсуббури (*SSS*), наблюдавшейся 28 мая 2011 г. на главной фазе умеренной магнитной бури, вызванной подходом к магнитосфере Земли межпланетного магнитного облака.

Показано, что, подобно рассмотренным ранее случаям *SSS*, ионосферные токи во время этой суперсуббури развивались в глобальном масштабе: в полуночном, утреннем и дневном секторах наблюдался интенсивный и протяженный западный электроджет (с максимумом около полуночи), а в послеполуденном и вечернем секторах наблюдался интенсивный восточный электроджет. Развитие этих глобальных токов сопровождалось интенсивными положительными бухтами, что отразилось в значительном всплеске *MPV*-индекса ( $\sim 4000$  нТл<sup>2</sup>).

Установлено, что развитие суперсуббури сопровождалось значительным усилением восточного электроджета в послеполуденном – вечернем секторе ( $\sim 15$ –18 MLT), где появился дополнительный втекающий продольный ток. Одновременно в этом секторе также наблюдалось появление дополнительного кольцевого тока. Эти факты свидетельствуют в пользу предположения о дополнительном суббуревом токовом клине, возникающим на вечерней стороне во время супер-

суббури, и замыкающемся на восточный электроджет.

## 6. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность создателям базы данных OMNI (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>), каталога крупномасштабных типов солнечного ветра <ftp://ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/catalog>, баз данных SuperMAG (<http://supermag.jhuapl.edu/>), IMAGE (<http://space.fmi.fi/image/>), AMPERE (<http://www.ampere.jhuapl.edu>) за возможность их использования в работе.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа Дэспирак И.В., Клейменовой Н.Г., Любича А.А., Седко П.В. поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований № 20-55-18003Болг а; работа Вернера Р. выполнена при поддержке проекта Национального научного фонда Болгарии (проект № КП-06-Русия/15); работа Громова Л.И. выполнена в рамках госзадания ИЗМИРАН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дэспирак И.В., Любич А.А., Клейменова Н.Г. Суперсуббури и условия в солнечном ветре // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 59. № 2. С. 183–190. 2019. <https://doi.org/10.1134/S001679401902007X>
- Дэспирак И.В., Клейменова Н.Г., Громова Л.И., Громов С.В., Мальшева Л.М. Суперсуббури во время бурь 7–8 сентября 2017 г. // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 60. № 3. С. 308–317. 2020. <https://doi.org/10.31857/S0016794020030049>
- Дэспирак И.В., Любич А.А., Клейменова Н.Г., Громова Л.И., Громов С.В., Мальшева Л.М. Долготные геомагнитные эффекты суперсуббурь во время геомагнитной бури 9 марта 2012 г. // Изв. РАН. Сер. физ. Т. 85. № 3. С. 346–352. 2021. <https://doi.org/10.31857/S0367676521030108>
- 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)
- Chu X., Hsu T.-S., McPherron R.L., Angelopoulos V., Pu Z., Weygang J.J., Kihara K., Connors M., Kissinger J., Zhang H., Aam O. Development and validation of inversion technique for substorm current wedge using ground magnetic field data // J. Geophys. Res.: Space Phys. V. 119. P. 1909–1924. 2014. <https://doi.org/10.1002/2013ja019185>
- Chu X., McPherron R.L., Hsu T.-S., Angelopoulos V. Solar cycle dependence of substorm occurrence and duration: Implications for onset // J. Geophys. Res.: V. 120. P. 2808–2818. 2015. <https://doi.org/10.1002/2015JA021104>
- Connors M., McPherron R.L., Anderson B.J., Korth H., Russell C.T., Chu X. Electric currents of a substorm current wedge on 24 February 2010 // Geophys. Res. Lett. V. 41. P. 4449–4455. 2014. <https://doi.org/10.1002/2014gl060604>
- Despirak I.V., Lubchich A.A., Kleimenova N.G. Several special conditions in the solar wind for a supersubstorm appearance // “Physics of Auroral Phenomena”, Proc. XLIII Annual Seminar, Apatity. P. 7–10. 2020. <https://doi.org/10.37614/2588-0039.2020.43.001>
- Feldstein Y.I., Starkov G.V. Dynamics of auroral belt and geomagnetic disturbances // Planet. Space Sci. V. 15. P. 209–229. 1967.
- 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>
- Fu H., Yue C., Zong Q.-G., Zhou X.-Z., Fu S., Statistical characteristics of substorms with different intensity // J. Geophys. Res. Space Physics. V. 126. e2021JA029318. 2021. <https://doi.org/10.1029/2021JA029318>
- Gjerloev J.W. A global ground-based magnetometer initiative // EOS Trans. AGU. V. 90. № 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>
- Guineva V., Werner R., Despirak I., Bojilova R., Raykova L. Mid-latitude positive bays during substorms by quiet and disturbed conditions // Comptes rendus de l’Acad’emie bulgare des Sciences, Space physics. V. 74. P. 1185–1193. 2021. <https://doi.org/10.7546/CRABS.2021.08.10>
- 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>
- 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. 2011. <https://doi.org/10.1029/2011JA016936>
- Nishimura Y., Lyons L.R., Gabrielse C., Sivasdas N., Donovan E.F., Varney R.H., Angelopoulos V., Weygang J.M., Conde M.G., Zhang S.R. // J. Geophys. Res.: Space Physics. V. 125. № 4. e2019JA027654. 2020. <https://doi.org/10.1029/2019JA027654>
- 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. The midlatitude positive bay index and the statistics of substorm occurrence // J. Geophys. Res. V. 123. P. 2831–2850. 2017. <https://doi.org/10.1002/2017JA024766>

- *Meng C.-I., Akasofu S.-I.* A study of polar magnetic substorms: 2. Three-dimensional current system. // *J. Geophys. Res.* V. 74(16). P. 4035–4053. 1969.  
<https://doi.org/10.1029/ja074i016p04035>
- *Rostoker G.* Macrostructure of geomagnetic bays // *J. Geophys. Res.* V. 73(13). P. 4217–4229. 1968.  
<https://doi.org/10.1029/ja073i013p04217>
- *Sergeev V.A., Tsyganenko N.A., Smirnov M.V., Nikolaev A.V., Singer H.J., Baumjohann W.* Magnetic effects of the substorm current wedge in a “spread-out wire” model and their comparison with ground, geosynchronous, and tail lobe data // *J. Geophys. Res.* V. 116. A07218. 2011.  
<https://doi.org/10.1029/2011JA016471>
- *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. 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. № 5. P. 519–524. 2015.  
<https://doi.org/10.5194/angeocom-33-519-2015>
- *Tsurutani B.T., Hara R., Tanimori T., Takada A., Remya B., Mannucci A.J., Lakhina G.S., Kozyra J.U., Shiokawa K., Lee L.C., Echer E., Reddy R.V., Gonzales W.D.* Heliospheric plasma sheet (HPS) impingement onto the magnetosphere as a cause of relativistic electron dropouts (REDs) via coherent EMIC wave scattering with possible consequences for climate change mechanisms // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* V. 121(10). P. 10 130–10 156. 2016.  
<https://doi.org/10.1002/2016JA022499>
- *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.
- *Zong Q.G., Wang Y.F., Zhang H., Fu S.Y., Zhang H., Wang C.R., Yuan J., Vogiatzis I.* Fast acceleration of inner magnetospheric hydrogen and oxygen ions by shock induced ULF waves // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* V. 117. № A11. 2012.  
<https://doi.org/10.1029/2012JA018024>
- *Zong Q.-G., Yue C., Fu S.-Y.* Shock induced strong substorms and super substorms: Preconditions and associated oxygen ion dynamics // *Space Sci. Rev.* V. 217(33). 2021.  
<https://doi.org/10.1007/s11214-021-00806-x>