

РАЗНЫЕ ТИПЫ ПОТОКОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА И СУББУРИ В ВЫСОКИХ ШИРОТАХ

© 2019 г. И. В. Дэспирак¹, *, А. А. Любчик¹, Н. Г. Клейменова²

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

²Институт Физики Земли РАН (ИФЗ РАН), Москва, Россия

*e-mail: despirak@gmail.com

Поступила в редакцию 23.04.2018 г.

После доработки 23.04.2018 г.

Принята к публикации 27.09.2018 г.

Исследовано влияние различных крупномасштабных структур потоков солнечного ветра на появление магнитосферных суббурь в высоких геомагнитных широтах. Рассмотрено два вида высокоскоростных суббуревых возмущений: суббури, наблюдающиеся в спокойных условиях, когда авроральный овал сжат и сдвинут в высокие широты (суббури на сжатом овале или “полярные” суббури); и суббури, наблюдающиеся в возмущенных условиях, когда авроральный овал расширен (суббури на расширенном овале или “расширенные” суббури). Данные наземных магнитных наблюдений на скандинавском профиле станций IMAGE сопоставлены с базой данных OMNI по солнечному ветру и каталогом крупномасштабных явлений солнечного ветра (<ftp://ftp.iki.rssi.ru/omni/>). Исследовались следующие типы потоков солнечного ветра, влияющие на геомагнитную активность: 1) Высокоскоростные потоки из корональных дыр (FAST); 2) Межпланетные проявления корональных выбросов массы: магнитные облака (MC) или EJECTA; 3) Области сжатия плазмы перед этими потоками – CIR и SHEATH. Было исследовано 186 “полярных” и 202 “расширенные” суббури за 1995, 1996, 1999 и 2000 гг. Показано, что ~75% “расширенных” суббурь наблюдаются во время высокоскоростных потоков солнечного ветра (FAST) или области сжатия плазмы перед этими потоками (CIR), и лишь ~18% таких суббурь наблюдаются во время межпланетных проявлений корональных выбросов массы EJECTA и области сжатия перед ними SHEATH. В то время как ~67% “полярных” суббурь наблюдаются во время медленных потоков солнечного ветра (SLOW), и ~19% таких суббурь были зарегистрированы во время SHEATH и EJECTA, но только в том случае, если они происходили на фоне медленного потока солнечного ветра.

DOI: 10.1134/S001679401901005X

1. ВВЕДЕНИЕ

Известно, что в солнечном ветре существуют различные потоки и структуры, которые имеют разные источники на Солнце и переносят плазму и магнитное поле с различными свойствами [Пудовкин, 1996]. При этом внутри определенного типа потока солнечного ветра значения параметров плазмы и поля меняются слабо [например, Yermolaev, 1991]. В настоящее время разработаны классификации разных типов солнечного ветра [например, Иванов, 1996; Ермолаев и др., 2009]. Классификация потоков солнечного ветра важна, с одной стороны, чтобы корректно анализировать и интерпретировать наблюдения солнечного ветра, а с другой стороны, типы солнечного ветра могут рассматриваться как драйверы космической погоды, имеющие различную геоэффективность [например, Crooker et al., 1977; Chen et al., 1997; Gopalswamy et al., 2015; Turner et al., 2009; Guo et al., 2011; Yermolaev et al., 2014; Wing et al.,

2016; Riley et al., 2017]. Так, можно ожидать, что большие значения южной B_z -компоненты межпланетного магнитного поля (ММП) при некоторых проявлениях межпланетных выбросах масс (ICME), в магнитных облаках (MC) или областях сжатой плазмы перед ними (SHEATH) [Klein and Burlaga, 1982], будут создавать большие и интенсивные суббури и бури [Tsurutani et al., 2015; Wu et al., 2006; Zhang et al., 2007; Richardson and Cane, 2011].

Сложные крупномасштабные структуры солнечного ветра можно разделить на три основных типа: 1 – потоки, связанные с выбросами корональной массы Солнца, часто называемые межпланетными выбросами корональной массы (ICME – *interplanetary coronal mass ejection*), 2 – рекуррентные высокоскоростные потоки (HSS – *high speed streams*) из корональных дыр и 3 – медленный солнечный ветер (SSW – *slow solar wind*). Эти крупномасштабные типы солнечного ветра изменяются вместе с их источниками на Солнце и ха-

рактируются различными параметрами плазмы и поля [Klein and Burlaga, 1982; Schwenn, 2006; Sheeley and Harvey, 1981; Cane and Richardson, 2003; Gopalswamy, 2006].

В данной работе будет рассмотрено влияние этих трех типов солнечного ветра на геомагнитную активность, а именно, на появление и интенсивность высокоширотных суббурь. Мы будем использовать классификацию типов солнечного ветра согласно работе Ермолаев и др. [2009], которая основана на часовых данных базы OMNI и представлена в каталоге крупномасштабных типов солнечного ветра (<ftp://ftp.iki.rssi.ru/omni/>). Существуют и другие каталоги типов солнечного ветра, например, ICME каталог [Richardson and Cane, 2010], каталог магнитных облаков (https://wind.nasa.gov/mfi/mag_cloud_pub1.html), ISTEP каталог (http://www-spof.gsfc.nasa.gov/scripts/swcat/Catalog_events.html). Однако, на наш взгляд, типы солнечного ветра, влияющие на геомагнитную активность, наиболее полно представлены в каталоге [Ермолаев и др., 2009], который охватывает довольно большой временной интервал – с 2000 по 2016 г.

Целью данной работы является исследование влияния крупномасштабной структуры солнечного ветра на появление суббурь, в частности, на появление суббурь в высоких геомагнитных широтах. Существует большое число работ, посвященных исследованиям суббурь в различных межпланетных условиях – на фоне разных потоков солнечного ветра, во время бурь, вызванных разными типами солнечного ветра, и в спокойных условиях например, [Tsurutani et al., 2004, 2006; Clausen et al., 2013; Wang et al., 2005; Despirak et al., 2009, 2011; Дэспирак и др., 2014а; Guineva et al., 2018; Tanskannen et al., 2011]. Однако они не дают полной картины, так как часто проводится анализ лишь отдельных межпланетных явлений, которые или являются следствием некоторых событий на Солнце, или являются причинами некоторых возмущений в магнитосфере. Также часто отсутствует сравнение геоэффективности различных типов солнечного ветра.

В нашей работе анализируется влияние всех основных типов солнечного ветра на появление высокоширотных суббурь. Согласно динамике аврорального овала [Feldstein and Starkov, 1967], суббуревые возмущения в высоких широтах ($>70^\circ$ CGLAT) можно разделить на два типа: 1) суббури, наблюдающиеся во время спокойных условий, когда авроральный овал сжат и сдвинут в высокие широты (суббури на сжатом овале или “полярные” суббури); 2) суббури, которые наблюдаются в возмущенные периоды, когда авроральный овал расширен, и возмущения наблюдаются от низких до высоких широт (суббури на расширенном овале или “расширенные” суббури). В предыдущих на-

ших работах [Дэспирак и др., 2014б; Despirak et al., 2016, 2018] исследовались особенности параметров солнечного ветра (скорости, межпланетного магнитного поля, электрического поля, давления, температуры и т.д.), геомагнитной ситуации и солнечной активности во время появления высокоширотных суббурь. В частности, было показано, что условия появления “полярных” суббурь часто противоположны условиям появления “расширенных” суббурь (величина предшествующего PC-индекса, сезон года и т.д.).

Задача данной работы – систематизировать полученные ранее результаты, и показать, как суббури на высоких широтах связаны с крупномасштабной структурой солнечного ветра. Для этого данные наземных наблюдений на магнитных станциях скандинавского профиля IMAGE были сопоставлены с базой данных OMNI по солнечному ветру и каталогом крупномасштабных явлений солнечного ветра (<ftp://ftp.iki.rssi.ru/omni/>)

2. ДАННЫЕ

Для определения типа солнечного ветра мы использовали каталог крупномасштабных явлений (<ftp://ftp.iki.rssi.ru/omni/>) и базу данных OMNI. В каталоге выделяются 3 квазистационарных типа солнечного ветра, 6 возмущенных типов, а также прямые и обратные ударные волны. В данной работе мы использовали всего 6 разных типов солнечного ветра – быстрые (FAST) и медленные (SLOW) потоки из корональных дыр и пояса стримеров, магнитные облака (MC) и EJECTA, связанные с проявлениями корональных выбросов массы, а также области сжатия плазмы на фронтах быстрых потоков – CIR (перед потоком FAST) и SHEATH (перед магнитным облаком и EJECTA). Ниже представлены основные характеристики каждого типа.

Медленный поток SLOW (над поясом стримеров на экваторе Солнца) представляет собой плотную и холодную плазму, распространяющуюся с довольно низкой скоростью ($V < 450$ км/с).

Быстрый поток FAST, наблюдаемый над полярными корональными дырами, – это горячий и разреженный поток плазмы,двигающийся с высокой скоростью ($V > 450$ км/с). Надо отметить, что четкой границы между медленным и быстрым потоком не существует, и граница проведена условно. Так, в каталоге плазменные потоки со скоростью $V < 450$ км/с рассматриваются как медленные потоки, а плазма с $V > 450$ км/с как быстрый поток. Следует отметить также, что высокоскоростные потоки обычно обозначаются как HSS, но здесь мы использовали терминологию типов солнечного ветра в соответствии с этим каталогом.

Межпланетные выбросы корональной массы ЕЈЕСТА представляют собой крупномасштабные гелиосферные транзиенты (Kilrua et al., 2016), которые содержат магнитное поле в виде жгута, где магнитное давление выше, чем тепловое давление ($\beta \ll 1$). Магнитные облака МС являются подклассом ЕЈЕСТА и отличаются более высоким и регулярным магнитным полем.

Когда выброс корональной массы движется быстрее, чем предыдущий солнечный ветер, перед ним образуется область сжатой плазмы. Турбулентная область сжатой плазмы, расположенная перед телом выброса (МС/ЕЈЕСТА), называется SHEATH. Плазма здесь характеризуется повышенными значениями плотности, температуры, величины магнитного поля и $\beta > 1$.

Область взаимодействия (CIR), когда быстрый поток из корональной дыры (FAST) обгоняет предыдущий медленный поток, представляет собой также область сжатой плазмы с теми же характеристиками, как и у области SHEATH. Небольшое отличие состоит в том, что у CIR граница раздела между быстрым и медленным потоками наклонена под небольшим углом к радиальному направлению, и на орбите Земли наблюдается определенная внутренняя структура [Ермолаев и др., 2009].

Для выявления магнитных суббурь использовались 10-ти секундные данные сети магнитных станций IMAGE для периодов 1995, 1996, 1999 и 2000 гг. Высокоширотные “полярные” и “расширенные” суббури идентифицировались с помощью меридиональной цепочки TAR – NAL (*Tartu – TAR, CGC lat. = 54.47° – Ny Ålesund – NAL, CGC lat. = 75.25°*). За 4 года было выбрано и проанализировано 388 случаев наблюдения суббурь на высоких геомагнитных широтах, из них 186 случаев “полярных” суббурь и 202 случая “расширенных” суббурь. Примеры наблюдения “полярных” и “расширенных” суббурь по данным станций IMAGE представлены в наших предыдущих работах [Дэспирак и др., 2014б; Despirak et al., 2016, 2018]. В данной работе мы будем рассматривать соотношение между разными типами солнечного ветра и появлением “полярных” и “расширенных” суббурь.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Мы сравнили появление двух типов высокоширотных суббурь с одновременными наблюдениями разных типов солнечного ветра. Результаты представлены на рисунках 1–3. На рисунке 1 показаны гистограммы распределения “расширенных” суббурь, по разным типам солнечного ветра. Вверху приведено распределение числа событий во время разных типов солнечного ветра в виде одномерной гистограммы, внизу – в виде двумерной.

Видно, что “расширенные” суббури наблюдались, главным образом, во время высокоскорост-

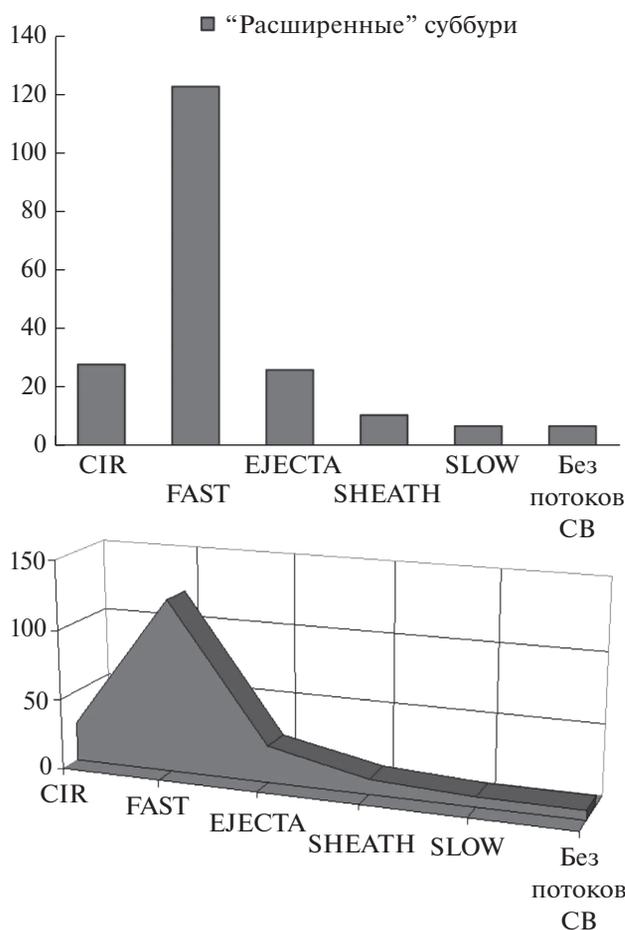


Рис. 1. Гистограммы распределения “расширенных” суббурь по разным типам солнечного ветра. По вертикальной оси – число событий. На верхней панели показана одномерная гистограмма распределения “расширенных” суббурь по типам солнечного ветра; на нижней панели – рисунок для двумерной гистограммы.

ных потоков FAST (~61%). Кроме того, такие суббури появлялись и во время проявлений межпланетных выбросов массы ЕЈЕСТА (~13%). Однако, надо отметить, что это относится, в основном, к событиям ЕЈЕСТА с высокой скоростью солнечного ветра ЕЈЕСТА, FAST. То есть, если учитывать скорость потока, на фоне которого происходило событие, то “расширенные” суббури наблюдались, как правило, во время ЕЈЕСТА, происходящих на фоне высокоскоростного потока ЕЈЕСТА, FAST. Таких было 25 событий и только одна “расширенная” суббуря была зарегистрирована во время ЕЈЕСТА, на фоне медленного потока ЕЈЕСТА, SLOW. На рисунке 1 видно также, что “расширенные” суббури наблюдались и во время областей сжатия перед потоками, CIR и SHEATH (~19%). Надо отметить, что для областей CIR и SHEATH суббури могли наблюдаться как на фоне быстрого (CIR, FAST; SHEATH, FAST), так и на фоне медленного солнечного ветра (CIR, SLOW; SHEATH,

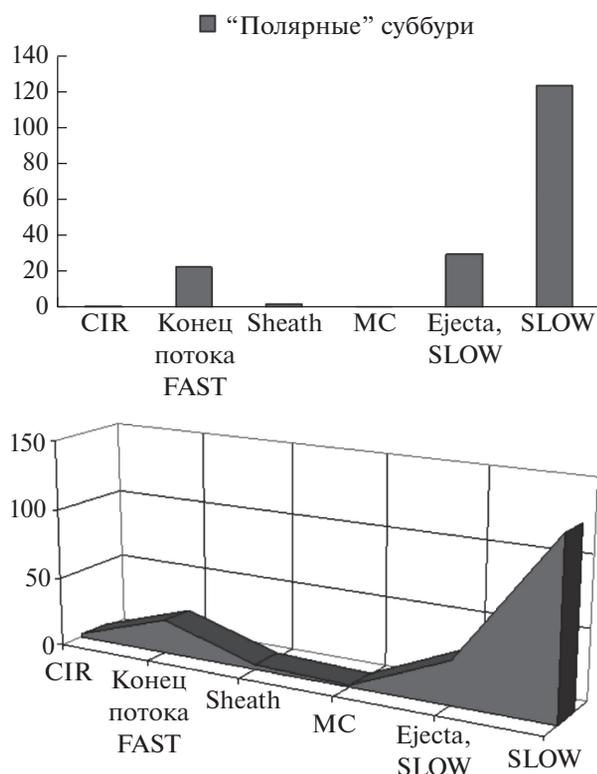


Рис. 2. Гистограммы распределения «полярных» суббурь по разным типам солнечного ветра. Формат рис. 2 подобен формату рис. 1.

SLOW). Этот факт свидетельствует в пользу того, что наряду с высокой скоростью, другие параметры такие, как высокие значения плотности, давления и температуры солнечного ветра, характеризующие области CIR и SHEATH, также являются благоприятными параметрами для появления «расширенных» суббурь. Значительно меньше событий (~3.5%) было зарегистрировано во время медленных потоков SLOW, и также некоторая часть событий (~3.5%) наблюдались без определенных потоков солнечного ветра.

Распределение «полярных» суббурь, наблюдаемых при разных типах солнечного ветра, приведено на рис. 2. Формат рис. 2 такой же, как рис. 1. Видно, что «полярные» суббури происходят, главным образом, во время медленных потоков солнечного ветра SLOW (67.2% событий). Примерно одна четверть из этих событий – это суббури, наблюдавшиеся на фоне медленных потоков SLOW и одновременно гелиосферного токового слоя HCS (HCS не представлен на рис. 2). Главной особенностью этих двух типов солнечного ветра являются низкие значения скорости солнечного ветра и, кроме того, одновременные изменения знаков B_x и B_y IMF, а также высокая плотность солнечного ветра. Из рисунка 2 следует также, что «полярные» суббури могут наблюдаться

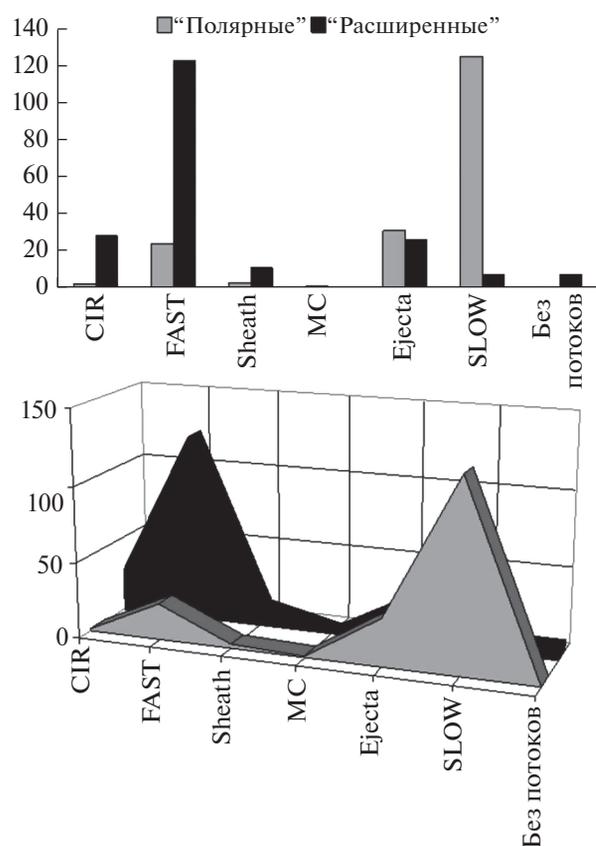


Рис. 3. Сравнительные гистограммы распределения двух видов высокоширотных суббурь по разным типам солнечного ветра. Черным цветом показаны «расширенные» суббури, серым цветом – «полярные» суббури. Формат рис. 3 подобен формату рис. 1.

во время высокоскоростных потоков (~12.9% случаев). Однако, надо отметить, что все эти события были зарегистрированы в конце высокоскоростного потока, когда скорость быстро уменьшается (от высоких до низких значений). Следует отметить также, что в начале высокоскоростных потоков (когда скорость еще не достигла высоких значений) «полярные» суббури регистрировались реже, чем в конце потоков. За анализируемый интервал мы обнаружили только одно событие, которое произошло в начале высокоскоростного потока, остальные 23 события были в конце потока FAST.

Интересно также отметить, что «полярные» суббури наблюдались и во время межпланетных проявлений выброса корональной массы – ЕЈЕСТА (16.7% событий). Однако, «полярные» суббури происходили тогда, когда отмечались ЕЈЕСТА с низкой скоростью (ЕЈЕСТА, SLOW), в отличие от «расширенных» суббурь, которые наблюдались во время ЕЈЕСТА с высокой скоростью солнечного ветра (ЕЈЕСТА, FAST). Кроме того, «полярные» суббури почти не наблюдались во

время магнитных облаков МС, мы нашли только одну “полярную” суббурю, которая была зарегистрирована во время МС. И это было во время магнитного облака с низкой скоростью солнечного ветра, при этом “полярная” суббуря была зарегистрирована при положительных значениях B_z ММП.

Для наглядности, на рис. 3 сопоставлены распределения “полярных” и “расширенных” суббурь во время различных типов солнечного ветра. На верхней панели рисунка представлена одномерная гистограмма распределения, на нижней панели – двумерная гистограмма. Видно, что распределения этих суббурь резко различаются, условия наблюдения “полярных” и “расширенных” суббурь практически противоположны. Отметим, что один и тот же тип солнечного ветра, указанный на рис. 3, может наблюдаться на фоне разных потоков (SLOW и FAST).

4. ОБСУЖДЕНИЕ

В работе получено, что появление суббурь в высоких широтах связано с определенными типами солнечного ветра. Следует отметить, что, рассматривая влияние разных типов солнечного ветра на суббуревые возмущения, мы фактически рассматриваем влияние различных комбинаций геоэффективных параметров, так как каждый тип солнечного ветра характеризуется определенной комбинацией параметров [например, Burlaga et al., 1982; Krieger et al., 1973; Klein and Burlaga, 1982; Tsurutani et al., 2006; Mitsakou and Moussas, 2014]. Так, для высокоскоростных потоков из корональных дыр (FAST) характерны высокие значения скорости солнечного ветра ($V > 450$ км/с) и температуры, но низкие значения плотности плазмы. Медленные потоки (SLOW) означают низкие значения скорости солнечного ветра ($V < 450$ км/с) и одновременно повышенные значения плотности и низкую температуру плазмы [Ермолаев и др., 2009].

Имеется большое число работ, в которых исследовалось развитие электроджетов и полярных сияний на высоких геомагнитных широтах [Loomer and Gupta, 1980; Gussenhoven, 1982; Nielsen et al., 1988; Mende et al., 1999; Weatherwax et al., 1997; Kuznetsov et al., 2001; Yahnin et al., 2004; Клейменова и др., 2012; Дэспирак и др., 2008; Despirak et al., 2018]. Кроме того, рассматривались также и влияния отдельных потоков и структур солнечного ветра на суббуревые возмущения, и, в частности, на высокоширотные суббури [Сергеев и др., 1979; Дмитриева и Сергеев, 1984; Despirak et al., 2009; Дэспирак и др., 2014а, 2014б; Despirak et al., 2018; Liou et al., 2018]. Однако, в отличие от предыдущих работ, в наших исследованиях предпринята попытка систематизации наших знаний: рассматривается влияние, в целом, крупномасштабной

структуры солнечного ветра на появление определенного типа суббурь, и при этом сравниваются между собой роли разных типов солнечного ветра.

Мы показали, что “полярные” и “расширенные” суббури развиваются при очень разных типах солнечного ветра (рис. 3). “Расширенные” суббури наблюдаются во время высокоскоростных потоков из корональных магнитных дыр (FAST); областей сжатой плазмы (CIR, SHEATH), а также во время межпланетных проявлений выбросов корональной массы (EJECTA), которые регистрируются на фоне быстрого потока.

Таким образом, подтвердился полученный нами ранее вывод о том, что “расширенные” суббури наблюдаются, в основном, при высокой скорости солнечного ветра [Despirak et al., 2016, 2018], но необходимо учитывать, что эта высокая скорость относится к определенному типу солнечного ветра – высокоскоростным потокам из корональных дыр (FAST). Хотя иногда “расширенные” суббури могут наблюдаться и во время других потоков с высокой скоростью – EJECTA, но это бывает достаточно редко (~13% случаев). Кроме того, как мы показали, “расширенные” суббури могут наблюдаться и при относительно низких значениях скорости солнечного ветра, например, во время областей SHEATH и CIR с высокой плотностью солнечного ветра, давлением и величиной магнитного поля, и большой изменчивостью магнитного поля. Таким образом, мы установили существование некоторых дополнительных геоэффективных факторов, таких как, плотность и давление солнечного ветра, величина и регулярность магнитного поля, которые могут приводить к появлению “расширенных” суббурь.

Мы подтвердили также полученный нами ранее вывод о том, что “полярные” суббури происходят при низких значениях скорости солнечного ветра [Дэспирак и др., 2014б; Despirak et al., 2016, 2018]. Новые результаты показали, что “полярные” суббури наблюдаются не только во время медленных потоков (SLOW), но и во время EJECTA/МС, а также и в конце или в начале потоков FAST. Однако надо помнить, что события EJECTA/МС, во время которых наблюдались “полярные” суббури, как правило, происходили на фоне низкоскоростных потоков солнечного ветра (SLOW).

5. ВЫВОДЫ

Проведено сравнение появления магнитных суббурь в высоких широтах с крупномасштабной структурой потоков солнечного ветра. Показано, что условия наблюдений “полярных” и “расширенных” суббурь фактически противоположны.

“Расширенные” суббури наблюдаются во время высокоскоростных потоков из корональных магнитных дыр (FAST); областей сжатой плазмы

(CIR, SHEATH) перед высокоскоростным потоком (FAST) и перед ЕЈЕСТА/МС, а также во время межпланетных проявлений выбросов корональной массы (ЕЈЕСТА), которые наблюдаются на фоне быстрого потока (ЕЈЕСТА, FAST).

“Полярные” суббури наблюдаются в течение медленных потоков (SLOW) и выбросов межпланетной корональной массы (ЕЈЕСТА), которые происходят на фоне медленного потока солнечного ветра (ЕЈЕСТА, SLOW), а также в конце или в начале высокоскоростного потока (FAST), когда скорость солнечного ветра уже уменьшилась или еще не достигла высоких значений.

Работа выполнена при частичной поддержке программы Президиума РАН № 28 “Фундаментальные проблемы исследований и освоения Солнечной системы”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дмитриева Н.П., Сергеев В.А. Появление авроральной электроструи на широтах полярной шапки: характеристики явления и возможность его использования для диагностики крупномасштабных высокоскоростных потоков солнечного ветра // Магнитосферные исследования. № 3. С. 58–66. 1984.
- Дэспирак И.В., Любич А.А., Бирнат Х.К., Яхнин А.Г. Полярная экспансия суббурового 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., Колева Р.Т. Магнитосферные признаки авроральных возмущений во время прохождения CIR и Sheath областей солнечного ветра // Космич. Исслед. Т. 52. № 1. С. 39–47. 2014а.
- 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. 2014б.
- 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.
- Иванов К.Г. Солнечные источники потоков межпланетной плазмы на орбите Земли // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 36. № 2. С. 19–24. 1996.
- 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.
- Пудовкин М.И. Солнечный ветер // Соровский образовательный журнал. Т. 12. С. 87–94. 1996.
- Сергеев В.А., Яхнин А.Г., Дмитриева Н.П. Суббури в полярной шапке – эффект высокоскоростных потоков солнечного ветра // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 19. № 6. С. 1121–1122. 1979.
- Burlaga L.F., Klein L., Sheeley N.R., Jr., Michels D.J., Howard R.A., Koomen M.J., Schwenn R., Rosenbauer H. A magnetic cloud and a coronal mass ejection // Geophys. Res. Lett. V. 9. P. 1317–1320. 1982.
- Cane H.V., Richardson I.G. Interplanetary coronal mass ejections in the near–Earth solar wind during 1996–2002 // J. Geophys. Res. V. 108. № A4. 2003. doi 10.1029/2002JA009817
- Chen J., Cargill P.J., Palmadesso P.J. Predicting solar wind structures and their geoeffectiveness // J. Geophys. Res., V. 102. № A7. P. 14.701–14.720. 1997.
- 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. doi 10.1002/jgra.50308
- Crooker N., Feynman J., Gosling J. On the high correlation between long-term averages of solar wind speed and geomagnetic activity // J. Geophys. Res. V. 82. № 13. P. 1933–1937. 1977.
- 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.
- Despirak I.V., Lubchich A.A., Guineva V. Development of substorm bulges during storms of different interplanetary origins // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. V. 73. № 11–12. P. 1460–1464. 2011.
- Despirak I., Lubchich A., Kleimenova N. Comparison of substorms near two solar cycle maxima: (1999–2000 and 2012–2013) // Sun and Geosphere. V. 11. № 2. P. 105–110. 2016.
- Despirak I.V., Lubchich A.A., Kleimenova N.G. High-latitude substorm dependence on space weather conditions in solar cycle 23 and 24 (SC23 and SC24) // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2018. V. 177. P. 54–62. doi 10.1016/j.jastp.2017.09.011
- Feldstein Y.L., Starkov G.V. Dynamics of auroral belt and geomagnetic disturbances // Planet. Space Sci. V. 15. № 2. P. 209–229. 1967.
- Gopalswamy N. Properties of interplanetary coronal mass ejections // Space Sci. Rev. V. 124. № 1–4. P. 145–168. 2006. doi 10.1007/s11214-006-9102-1
- Gopalswamy N., Yashiro S., Xie H., Akiyama S., Mäkelä P. Properties and geoeffectiveness of magnetic clouds during solar cycles 23 and 24. // J. Geophys. Res.-Space. V. 120. № 11. P. 9221–9245. 2015.
- Guineva V., Despirak I.V., Werner R. Observations of substorm auroras by MAIN cameras system in Apatity during two winter seasons: 2014/2015 and 2015/2016 // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2018. V. 177. P. 63–72. doi 10.1016/j.jastp.2017.09.014
- Guo J., Feng X., Emery B.A., Zhang J., Xiang C., Shen F., Song W. Energy transfer during intense geomagnetic storms driven by interplanetary coronal mass ejections and their sheath regions // J. Geophys. Res. V. 116. № A5. P. A05106. 2011. doi 10.1029/2011JA016490
- Gussenhoven M.S. Extremely high latitude auroras // J. Geophys. Res. V. 87. № A4. P. 2401–2412. 1982.
- Kilpua E., Madjarska M., Karna N., Wiegelmann T., Farugia C., Yu W., K. Andreeva K. Sources of the slow solar wind during the solar cycle 23/24 minimum // Solar Phys. V. 291. № 8. P. 2441–2456. 2016.
- Klein L.W., Burlaga L.F. Interplanetary magnetic clouds at 1 AU // J. Geophys. Res. V. 87. № A2. P. 613–624. 1982.

- Krieger A.S., Timothy A.F., Roelof E.C. A coronal hole and its identification as the source of a high velocity solar wind stream // *Solar Phys.* V. 29. № 2. P. 505–525. 1973.
- Kuznetsov S., Lazutin L.L., Rosenberg T., Borovkov L., Gotselyuk Yu., Weatherwax A., Reeves G. Energetic electron and ion dynamics and polar aurora during magnetospheric substorm of March 10, 1994 // *Proc. 5th Intern. Conf. on Substorms.* May 16–20, 2000. St.Petersburg. Russia. P. 511–514. 2001.
- Loomer E.I., Gupta J.C. Some characteristics of high latitude substorms // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 42. P. 645–652. 1980.
- Liou K., Sotirelis T., Richardson I. Substorm occurrence and intensity associated with three types of solar wind structure // *J. Geophys. Res.* V. 123. № 1. P. 485–496. 2018. doi 10.1002/2017JA02445
- Mende S.B., Frey H.U., Geller S.P., Doolittle J.H. Multi-station observations of auroras: Polar cap substorms // *J. Geophys. Res.* V. 104. № A2. P. 2333–2342. 1999.
- Mitsakou E., Moussas X. Statistical study of ICMEs and their sheaths during solar cycle 23 (1996–2008) // *Solar Phys.* V. 289. № 8. P. 3137–3157. 2014. doi 10.1007/s11207-014-0505-y
- Nielsen E., Bamber J., Chen Z.-S., Brekke A., Egeland A., Murphree J.S., Venkatesan D., Axford W.I. Substorm expansion into the polar cap // *Ann. Geophys.* V. 6. № 5. P. 559–572. 1988.
- Richardson I.G., Cane H.V. Near-Earth interplanetary Coronal Mass Ejections during solar cycle 23 (1996–2009): catalog and summary of properties // *Sol. Phys.* V. 264. № 1. P. 189–237. 2010. doi 10.1007/s11207-010-9568-6
- Richardson I.G., Cane H.V. Geoeffectiveness (Dst and Kp) of interplanetary coronal mass ejections during 1995–2009 and implications for storm forecasting // *Space Weather.* V. 9. № 7. S07005. 2011. doi 10.1029/2011SW000670
- Riley P., Ben-Nun M., Linker J.A., Owens M., Horbury T. Forecasting the properties of the solar wind using simple pattern recognition // *Space Weather.* V. 15. № 3. P. 526–540. 2017.
- Sheeley N.R. Jr., Harvey J.W. Coronal holes, solar wind streams and recurrent geomagnetic disturbances during 1978 and 1979 // *Solar Phys.* V. 70. № 2. P. 237–249. 1981.
- Schwenn R. Solar wind sources and their variations over the solar cycle // *Space Sci. Rev.* V. 124. № 1–4. P. 51–76. 2006. doi 10.1007/s11241-006-9099-5
- 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. A00134. 2011. doi 10.1029/2010JA015788
- 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.
- 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. doi 10.1029/2005JA011273
- 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.
- Turner N.E., Cramer W.D., Earles S.K., Emery B.A. Geoefficiency and energy partitioning in CIR-driven and CME-driven storms // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* V. 71. № 10–11. P. 1023–1031. 2009.
- Wang H., Lühr S., Ma 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. doi 10.5194/angeo-23-2069-2005
- Weatherwax A.T., Rosenberg T.J., MacLennan C.G., Doolittle J.H. Substorm precipitation in the polar cap and associated Pc5 modulation // *Geophys. Res. Lett.* V. 24. № 5. P. 579–582. 1997.
- Wing S., Johnson J.R., Camporeale E., Reeves G.D. Information theoretical approach to discovering solar wind drivers of the outer radiation belt // *J. Geophys. Res.-Space.* V. 121. № 10. P. 9378–9399. 2016.
- Wu C.C., Lepping R.P., Gopalswamy N. Relationships among magnetic clouds, CMEs, and geomagnetic storms // *Sol. Phys.* V. 239. № 1–2. P. 449–460. 2006. doi 10.1007/s11207-006-0037-1
- Zhang J., Richardson I.G., Webb D.F. et al. Solar and interplanetary sources of major geomagnetic storms ($Dst \leq -100$ nT) during 1996–2005 // *J. Geophys. Res.-Space.* V. 112. № A10. A10102. 2007. doi 10.1029/2007JA012321
- Yahnin A.G., Despirak I.V., Lubchich A.A., Kozelov B.V. Solar wind control of the auroral bulge expansion // *Proc. 7th Intern. Conf. on Substorms.* 21–27 March, 2004. Levi. Finland. P. 31–34. 2004.
- 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.
- Yermolaev Y.I., Lodkina I.G., Nikolaeva N.S., Yermolaev M.Y. Influence of the interplanetary driver type on the durations of the main and recovery phases of magnetic storms // *J. Geophys. Res.-Space.* V. 119. № 10. P. 8126–8136. 2014. doi 10.1002/2014JA019826