

СУПЕРСУББУРИ И УСЛОВИЯ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ

© 2019 г. И. В. Дэспирак¹*, А. А. Любчик¹, Н. Г. Клейменова²¹Полярный геофизический институт, г. Апатиты (Мурманская обл.), Россия²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН), г. Москва, Россия

*e-mail: despirak@gmail.com

Поступила в редакцию 20.09.2018 г.

После доработки 21.09.2018 г.

Принята к публикации 27.09.2018 г.

Исследовано влияние различных крупномасштабных структур и потоков солнечного ветра на появление особого типа суббурь — так называемых суперсуббурь (supersubstorms — SSS), которые представляют собой очень интенсивные суббури, определяемые по индексам $SML < -2500$ нТл и $AL < -2500$ нТл. Для анализа был выбран 131 случай SSS по данным наблюдений на станциях проекта SuperMAG в 1998–2016 г., а также 26 случаев SSS на меридиональной сети станций IMAGE. Результат исследования появления SSS в зависимости от разных типов солнечного ветра и разной геомагнитной возмущенности показал, что SSS, в основном, наблюдаются во время подхода к магнитосфере Земли магнитных облаков солнечного ветра MC (42%), а также областей сжатой плазмы SHEATH (45.2%) перед магнитными облаками или перед EJECTA. Иногда SSS могут появляться и во время EJECTA (8.3%). Таким образом, появление SSS вызывается межпланетными корональными выбросами массы и фактически не связано с высокоскоростными потоками из корональных дыр. Показано, что SSS, в основном, возникают во время магнитных бурь ($Dst < -50$ нТл). В редких случаях (13.4%), когда SSS наблюдались и во время интервалов с $Dst > -50$ нТл, это происходило, в основном, сразу после внезапного начала (SC) бури (11%) и очень редко в позднюю стадию фазы восстановления бури (1.2%). Установлено, что условия космической погоды, во время которых появляются SSS, резко отличаются от условий появления других типов высокоширотных суббурь, таких как “полярные” и “расширенные” суббури.

DOI: 10.1134/S001679401902007X

1. ВВЕДЕНИЕ

Предметом исследования данной работы являются очень интенсивные магнитные суббури, так называемые “суперсуббури” (super-substorms, SSS). Исследования таких экстремальных событий важны для изучения физических процессов взаимодействия в системе солнечный ветер — магнитосфера — ионосфера Земли. Кроме того, во время подобных событий развиваются очень сильные ионосферные токи, что может привести к значительным наводкам и перебоям в наземных электрических сетях [например, Карпенман, 2003; Sakharov et al., 2009].

Термин “суперсуббури” был использован в работе [Tsurutani et al., 2015] для обозначения очень сильных суббурь при анализе наземных наблюдений на сети магнитометров SuperMAG (<http://supermag.jhuapl.edu/>). Суперсуббуриями были названы интенсивные магнитные суббури, наблюдаемые, когда значения SML - или AL -индексов геомагнитной активности достигают очень высоких значений (< -2500 нТл). Индекс SML является обобщением известного индекса AL [Davis and

Sugiura, 1966]. Известно, что индексы суббури AE/AL рассчитываются на основе наблюдений магнитного поля на 12 станциях северного полушария, расположенных на геомагнитных широтах $\sim 60^\circ - 70^\circ$. Однако, данных этих станций бывает недостаточно для того, чтобы отразить планетарную суббуревую активность, часто наблюдающуюся на более высоких или более низких широтах [Rostoker, 1972; Kamide and Akasofu, 1983; Ahn et al., 2000]. В отличие от AL -индекса SML -индекс рассчитывается по всей сети станций SuperMAG и, следовательно, содержит не только стандартные станции авроральной зоны, но также включает в себя много других наземных станций, расположенных как в более низких, так и в более высоких широтах [Newell and Gjerloev, 2011; Gjerloev, 2012].

В настоящее время суперсуббури исследованы явно недостаточно. Насколько нам известно, они обсуждались всего в нескольких работах [Tsurutani et al., 2015; Hajra et al., 2016 и Adhikari et al., 2017], где рассматривались лишь вопросы о возможном появлении таких интенсивных суперсуб-

бурь. В работе [Adhikari et al., 2017] исследовалась связь суперсуббурь с потенциалом полярной шапки и *PC*-индексом. В работе [Najra et al., 2016] было показано, что суперсуббури могут наблюдаться в любой фазе солнечного цикла, но наибольшая частота их появления отмечается на фазе спада солнечного цикла, а наименьшая – во время минимума цикла. Хорошо известно, что именно на фазе спада солнечной активности наблюдалось появление очень интенсивных магнитных бурь, так называемых супербурь (superstorm, $Dst \leq -250$ нТл). Можно было бы предположить, что суперсуббури наблюдаются именно во время супербурь. Однако в работе [Tsurutani et al., 2015] было показано, что суперсуббури не всегда связаны с очень интенсивными бурями и могут наблюдаться во время менее интенсивных ($-100 \text{ нТл} \geq Dst > -250 \text{ нТл}$) и умеренных ($-50 \text{ нТл} \geq Dst > -100 \text{ нТл}$) магнитных бурь, и даже в небуревых условиях ($Dst > -50 \text{ нТл}$).

По данным [Tsurutani et al., 2015] суперсуббури (SSS) регистрируются при длительном южном направлении межпланетного магнитного поля, которое обычно связано с магнитными облаками солнечного ветра MC (46%) или областью сжатой плазмы перед магнитным облаком SHEATH (54%). Кроме того, большинство событий SSS (77%) было связано со скачками плотности и импульсами давления в солнечном ветре.

Однако остается не выясненным вопрос, всегда ли SSS появляются во время магнитных облаков или SHEATH областей? Бывали ли случаи появления суперсуббурь во время других типов солнечного ветра? Так, например, известно, что области сжатой плазмы перед магнитным облаком SHEATH и перед высокоскоростным потоком солнечного ветра (CIR) сходны по своим характеристикам [Ермолаев и др., 2009]. Будут ли суперсуббури наблюдаться и во время CIR областей?

Задачей данной работы является исследование связи появления SSS с разными типами потоков солнечного ветра. Известно, что в солнечном ветре можно выделить крупномасштабные потоки и структуры, которые, в целом, можно разделить на три основных типа: (1) потоки, связанные с выбросами корональной массы Солнца (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) [Klein and Burlaga, 1982; Schwenn, 2006; Sheeley and Harvey, 1981; Cane and Richardson, 2003; Liou et al., 2018]. Подробнее описание типов потоков солнечного ветра и их источников на Солнце обсуждалось во многих работах [например, Burlaga et al., 1982;

Gopalswamy, 2006; Иванов, 1996; Ермолаев и др., 2009; Richardson and Cane, 2012; Kilpua et al., 2017].

Кроме того, для получения общей картины связи между появлением суббурь и крупномасштабной структурой солнечного ветра, важно сопоставить условия появления SSS и других типов суббурь, например, суббурь на высоких широтах – “расширенных” и “полярных” [Дэспирак и др., 2014; Despirak et al., 2016, 2018a]. Зависимость появления высокоширотных суббурь от разных типов солнечного ветра рассматривалась недавно в нашей работе [Despirak et al., 2018b]. Нами было исследовано два вида высокоширотных 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). Оказалось, что “расширенные” суббури, в основном, наблюдаются во время высокоскоростных потоков солнечного ветра (FAST) или областей CIR, и лишь иногда – во время межпланетных проявлений корональных выбросов массы EJECTA и области сжатия перед ними SHEATH. В то время как “полярные” суббури в основном связаны с медленными потоками солнечного ветра (SLOW), а также с SHEATH и EJECTA, но только в тех случаях, если они происходили на фоне медленного потока солнечного ветра.

В данной работе мы проанализируем появление SSS в зависимости от крупномасштабных типов солнечного ветра в период с 1998 по 2016 г., т.е. во время 23-го и 24-го циклов солнечной активности. Типы солнечного ветра определялись согласно каталогу [Ермолаев и др., 2009]. В настоящее время этот каталог охватывает довольно большой временной интервал – с 1976 по 2017 г. – и в нем наиболее полно представлены типы солнечного ветра, влияющие на геомагнитную активность. Кроме того, этот же каталог был использован и в нашей предыдущей работе по анализу влияния крупномасштабных структур солнечного ветра на появление суббурь на высоких широтах [Despirak et al., 2018b].

2. ДАННЫЕ

Типы солнечного ветра определялись по 1-минутным данным OMNI (<https://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov/>) и каталогу крупномасштабных явлений солнечного ветра (<ftp://ftp.iki.rssi.ru/omni/>). Для анализа мы использовали 6 разных типов солнечного ветра (согласно каталогу <ftp://ftp.iki.rssi.ru/omni/>; Ермолаев и др., 2009) – 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).

Исследование суперсуббурь проводилось по данным наземных наблюдений на магнитных станциях сети SuperMAG (<http://supermag.jhuapl.edu/>) и скандинавского профиля IMAGE (<http://space.fmi.fi/image/>) [Viljanen and Häkkinen, 1997]. Сеть SuperMAG состоит из более, чем 300 наземных магнитометров, которые принадлежат разным организациям и национальным агентствам. Подробные описания проекта SuperMAG приведены в работах [Gjerloev, 2009, 2012 и Newell and Gjerloev, 2011a, 2011b]. В настоящем исследовании суперсуббури определялись по значениям SML (< -2500 нТл) и AL -индексов геомагнитной активности (< -2500 нТл). За период 1998–2016 г. было найдено 157 случаев суперсуббурь (SSS), из них 131 случай – по сети SuperMAG и 26 случаев – по сети IMAGE. Надо учесть, что сеть SuperMAG охватывает почти все долготы и широты, т.е. фактически весь планетарный масштаб, а профиль IMAGE – только Скандинавию. Суперсуббурия будет зарегистрирована на профиле IMAGE только если попадет в его долготный сектор. Поэтому случаев SSS оказалось больше по сети SuperMAG, чем по сети IMAGE.

На рисунке 1 показан пример наблюдения суперсуббурь. На верхней панели показан SML -индекс 8 ноября 2004 г. в период от 00 до 15 UT, на нижней панели AL -индекс, моменты SSS отмечены стрелками. Видно, что в этот день, по SML -индексу наблюдались две суперсуббури в 04:07 и 10:03 UT, а по AL -индексу – три суперсуббури в 01:20, 04:15 и 10:00 UT. Суперсуббурия в 01:20 UT была зарегистрирована также на скандинавском профиле IMAGE, на меридиональной цепочке TAR-NAL. Магнитограммы для этого случая показаны на рис. 2, овалом отмечена область наблюдения суперсуббури в $\sim 01:20$ UT. Видно, что с $\sim 01:00$ наблюдались очень сильные возмущения в X -компоненте магнитного поля, более 2000 нТл, в очень большом интервале геомагнитных широт, от станции Hankasalmi (HAN, 58.7° CGM lat) до станции Ny Alesund (NAL, 75.25° CGM lat). Надо отметить также, что суперсуббури в этот день были зарегистрированы в ночное время двух разных долготных секторов: соответственно, в ~ 01 UT на сети магнитометров IMAGE, а в ~ 04 UT и ~ 10 UT – на сети SuperMag. Это свидетельствует о том, что в магнитосфере больше 10 ч сохранялись условия для генерации суперсуббурь, которые наблюда-

лись одновременно как в утреннем, так и в вечернем секторах.

Заметим, что в этот день (8 ноября 2004) наблюдалась очень сильная магнитная буря, так называемая “супербуря” ($Dst \sim -400$ нТ) (“superstorm”). На рисунке 3 показаны данные о параметрах солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП) за период 00 UT 7 ноября по 09 UT 9 ноября 2004 г. Сверху вниз: магнитуда магнитного поля B_T , Z -компонента межпланетного магнитного поля (ММП), X -компонента скорости солнечного ветра, плотность N , температура T , динамическое давление P солнечного ветра, и геомагнитный индекс SYM/H . Границы магнитного облака (MC) и области сжатой плазмы SHEATH перед магнитным облаком обозначены черными линиями со стрелками. Моменты ударных волн (IS) отмечены вертикальными черными линиями. Подробно солнечные источники и межпланетные драйверы этой бури были рассмотрены в работе Tsurutani et al. [2008].

Отметим, что эта супербурия была вызвана сложным комплексом событий: приходом к Земле магнитного облака, которому предшествовали три ударные волны, последняя из которых наблюдалась на переднем фронте области SHEATH. Однако так как эти ударные волны распространялись при северном направлении B_Z компоненты ММП, то они и не привели к развитию бури. А буря началась при повороте ММП к югу, которое наблюдалось сначала в SHEATH области, а потом – в магнитном облаке. Это вызвало развитие так называемой “двухступенчатой бури” [Kamide et al., 1998], первый минимум Dst -индекса был в ~ 01 UT, второй – в $\sim 04:30$ UT. На фоне развития этой супербури наблюдались три SSS, две из них были на главной фазе бури, одна – во время фазы восстановления. На рис. 3 моменты наблюдения SSS отмечены вертикальными серыми сплошными линиями. Видно, что все SSS наблюдались во время магнитного облака (MC) – при повышенных значениях давления и плотности солнечного ветра, а также магнитуды магнитного поля.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Мы сопоставили появление суперсуббурь (SSS) с одновременными наблюдениями разных типов солнечного ветра. Ниже приводятся результаты по сравнительному анализу появления суперсуббурь в зависимости от разных типов солнечного ветра и разных геомагнитных условий.

На рисунке 4 показаны гистограммы распределения суперсуббурь по разным типам солнечного ветра. Вверху приведено распределение числа событий во время разных типов солнечного ветра в виде одномерной гистограммы, внизу –

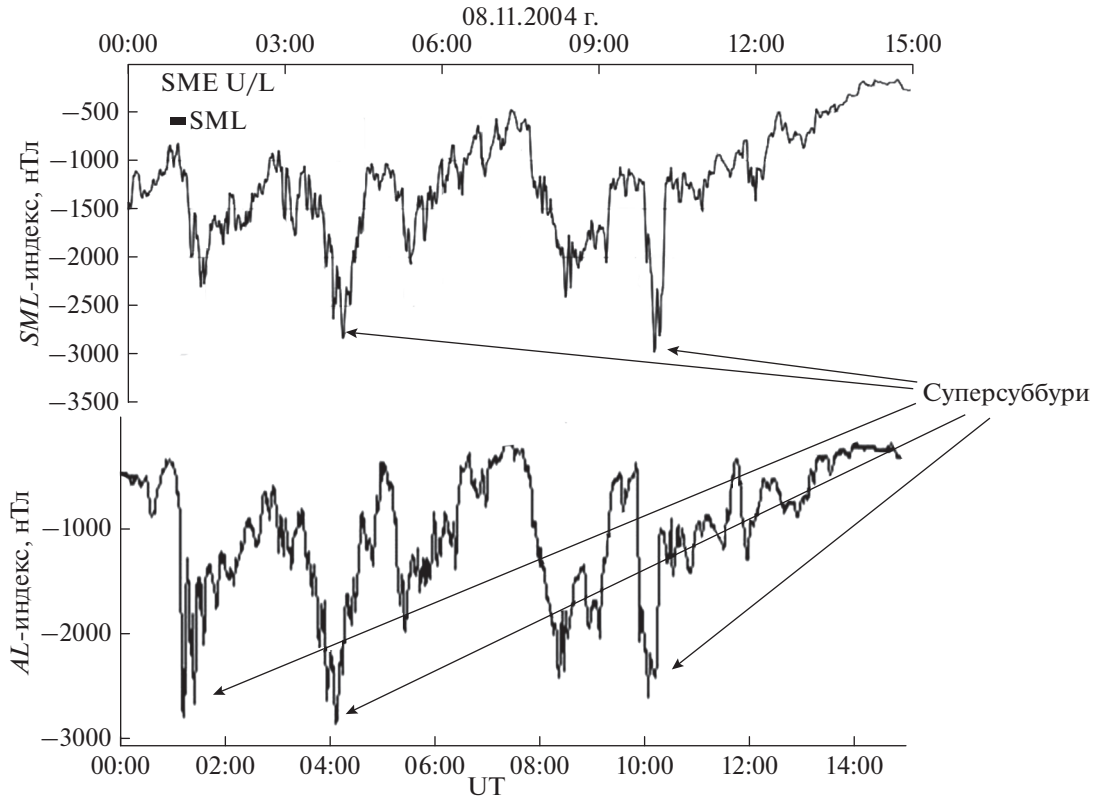


Рис. 1. Примеры наблюдения суперсуббури 8 ноября 2004 г. На верхней панели представлен *SML*-индекс, на нижней панели *AL*-индекс в интервале от 00 до 15 UT. Стрелками отмечены моменты появления суперсуббури.

в виде двумерной. Видно, что суперсуббури, в основном, наблюдаются во время магнитных облаков солнечного ветра (MC, 42%), а также во время областей сжатой плазмы SHEATH перед магнитными облаками или EJECTA (SHEATH, 45.2%). Кроме того, иногда суперсуббури появлялись во время проявлений межпланетных выбросов массы (EJECTA) (~13%). И очень редко SSS могут появляться во время областей сжатой плазмы перед высокоскоростным потоком (CIR, 2.5%) или во время высокоскоростного потока (FAST, 1.7%). Таким образом, мы видим, что появление SSS связано с межпланетными проявлениями корональных выбросов массы и фактически не связано с высокоскоростными потоками из корональных дыр.

Сравним условия появления суперсуббури и двух типов высокоширотных суббури — “расширенных” и “полярных”, которые мы рассматривали ранее, в работе [Despirak et al., 2018b]. На рисунке 5 показаны гистограммы распределения “полярных” и “расширенных” суббури и суперсуббури по различным типам солнечного ветра. Черным цветом показаны “расширенные” суббури, темно-серым цветом — суперсуббури и светло-серым цветом — “полярные” суббури. Формат

рис. 5 подобен рис. 4. Видно, что распределения трех типов суббури сильно различаются, условия наблюдения “полярных”, “расширенных” и суперсуббури практически противоположны. Так, “полярные” суббури регистрировались, главным образом, во время медленных потоков солнечного ветра (SLOW). Иногда во время выбросов межпланетной корональной массы (EJECTA), которые происходят на фоне медленного потока солнечного ветра (EJECTA, SLOW), а также в конце или в начале высокоскоростного потока (FAST), когда скорость солнечного ветра уже или еще не достигает высоких значений. А “расширенные” суббури наблюдаются во время высокоскоростных потоков из корональных магнитных дыр (FAST), а также во время областей сжатой плазмы перед этими потоками (CIR) и перед магнитными облаками или EJECTA (SHEATH). Иногда они появляются и во время EJECTA, которые наблюдаются на фоне быстрого потока (EJECTA, FAST). Противоположно этому, суперсуббури (SSS) появляются, в основном, во время магнитных облаков MC и областей сжатой плазмы SHEATH. И иногда они появлялись во время межпланетных проявлений корональных выбросов массы (EJECTA).

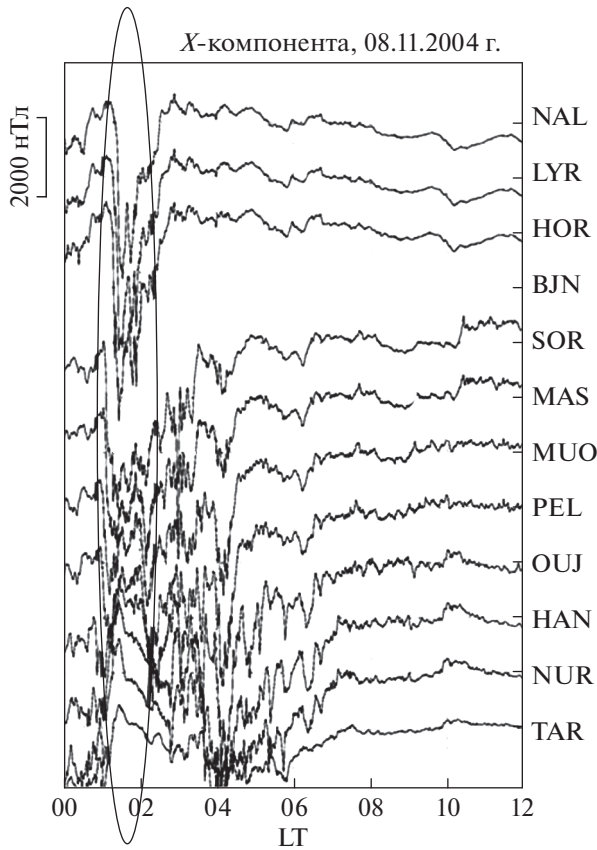


Рис. 2. Пример возмущений в X-компоненте магнитного поля 8 ноября 2004 г. для меридиональной цепочки станций TAR-NAL по сети IMAGE, овалом отмечена область наблюдения суперсуббури в ~01:20 UT.

Далее рассмотрим геомагнитные условия, при которых наблюдались суперсуббури. Все 157 случаев SSS были разделены на две большие группы – случаи, наблюдавшиеся во время бурь ($Dst < -50$ нТл), и случаи, которые наблюдались в небуревых условиях ($Dst > -50$ нТл). При этом, небуревые ($Dst > -50$ нТл) условия можно условно разделить на 3 группы: 1) во время внезапного начала бури (SC), 2) поздней стадии восстановительной фазы бури, 3) при отсутствии бури. Гистограмма распределения случаев SSS в зависимости от буревых и небуревых условий представлена на рис. 6. Видно, что, в основном, суперсуббури наблюдались во время бурь. Это всего 136 случаев, что составляет 86.6% от их общего числа. Отметим, что здесь мы не разделяли бури по интенсивности. 21 случай SSS был зарегистрирован в небуревых условиях, это составляет 13.4%. Однако, как видно из рисунка, небуревые условия – это, чаще всего, внезапное начало магнитной бури (SC), когда наблюдалось 17 случаев из 21 небуревых SSS события, что составляет примерно ~11% от общего числа событий SSS,

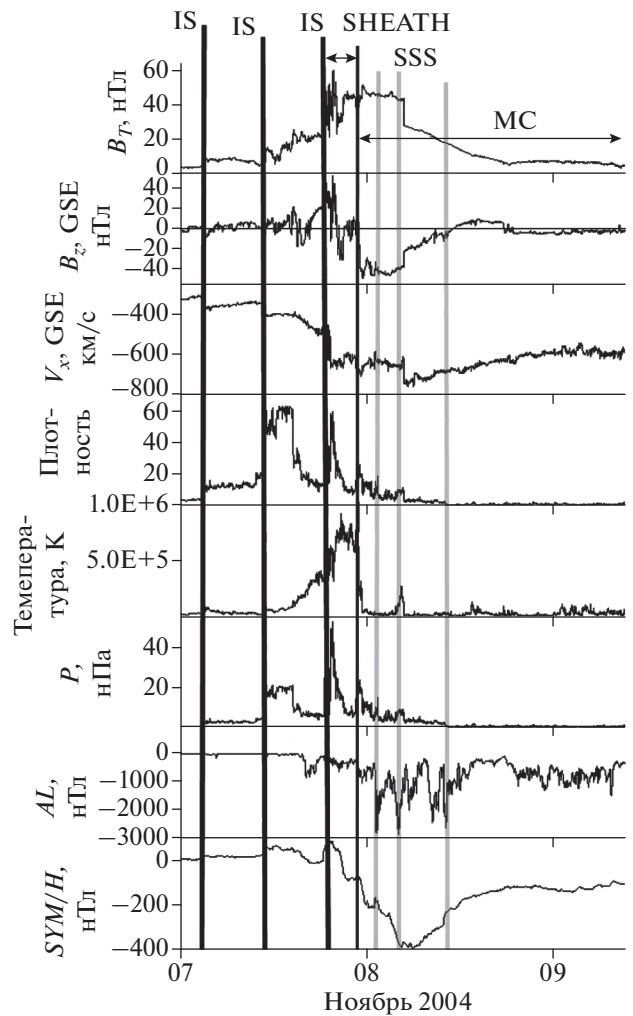


Рис. 3. Параметры солнечного ветра и ММП (B_T , B_z , V_x , N , T , P) и индексы AL и SYM/H для супербури 7–9 ноября 2004 г. Сверху вниз: магнитуда магнитного поля B_T , Z-компонента магнитного поля, X-компонента скорости солнечного ветра, плотность N , температура T , динамическое давление P солнечного ветра, и геомагнитные индексы AL и SYM/H . Границы магнитного облака (MC) и области сжатой плазмы SHEATH перед магнитным облаком обозначены черными линиями со стрелками. Моменты ударных волн (IS) и моменты “суперсуббури” (SSS) отмечены вертикальными черными и серыми линиями, соответственно.

или поздняя стадия восстановительной фазы бури, когда наблюдалось 2 события SSS (~1.27%). И только 2 суперсуббури были зарегистрированы при отсутствии бури вообще, что составляет 1.27% от всего числа случаев.

Не исключено, что источником некоторых суперсуббурь, наблюдаемых во время внезапного начала бури, может быть сброс энергичных электронов из области квазизахвата, как это рассмотрено в работе [Лазутин и Кузнецов, 2008].

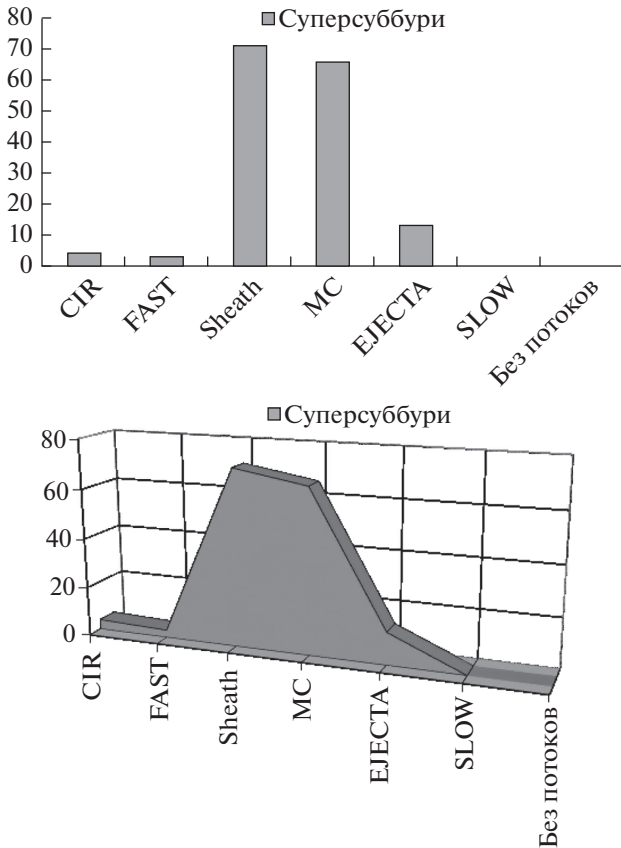


Рис. 4. Гистограммы распределения суперсуббурь по разным типам солнечного ветра. По вертикальной оси – число событий. На верхней панели показана одномерная гистограмма распределения суперсуббурь по типам солнечного ветра; на нижней панели – рисунок для двумерной гистограммы.

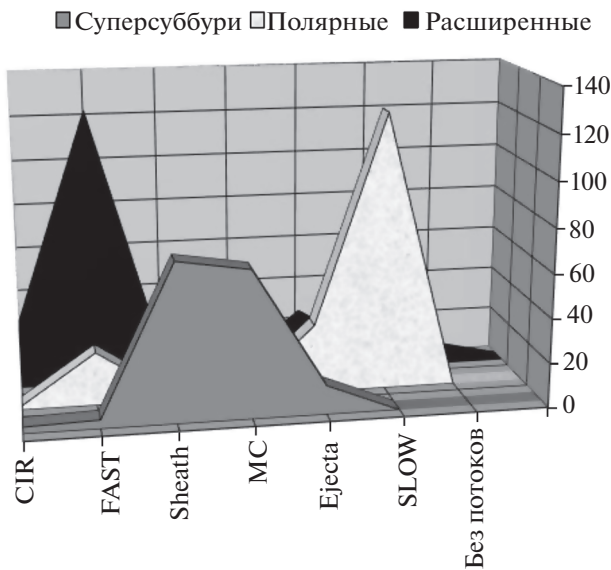


Рис. 5. Сравнительные гистограммы распределения суперсуббурь, “расширенных” и “полярных” суббурь по разным типам солнечного ветра. Серым цветом показаны суперсуббури, черным цветом – “расширенные” суббури, светло-серым цветом – “полярные” суббури. Формат рис. 5 подобен формату рис. 4.

Отметим, что оба события SSS, которые были зарегистрированы во время поздней стадии восстановительной фазы бури, появились во время скачка скорости солнечного ветра, который наблюдался на фоне довольно высоких значений скорости (от ~600 км/с до ~700 км/с и от ~750 км/с до ~1000 км/с), и одновременного скачка температуры, при повышенных значениях южной компоненты ММП, и плавном повышении давления солнечного ветра. В первом случае SSS была во время высокоскоростного потока FAST. Во втором случае – на фоне восстановительной фазы предшествующей интенсивной бури ($Dst \sim -250$ нТл), когда пришел новый высокоскоростной поток со скоростью ~1000 км/с, во время области взаимодействия этого потока с более медленным предыдущим потоком, т.е. во время CIR области.

Как видно из рисунков 4 и 5, появление суперсуббурь, связано с определенными типами солнечного ветра, а именно, – SHEATH, MC и EJECTA, которые являются межпланетными проявлениями корональных выбросов массы Солнца, и фактически не связано с потоками плазмы из корональных дыр (CIR, FAST). Возможно, это происходит из-за того, что SSS наблюдаются, в основном, во время геомагнитных бурь, а именно во время супербурь ($Dst < -250$ нТл) или интенсивных бурь (-100 нТл $> Dst > -250$ нТл) [Tsutani et al., 2015]. А, как известно, источником интенсивных геомагнитных бурь обычно является направленное к югу межпланетное магнитное поле в магнитных облаках (MC) солнечного ветра или в областях сжатой плазмы перед магнитными облаками (SHEATH) [например, Yermolaev et al., 2012].

Отметим, что суперсуббури по природе своей не отличаются от классических суббурь, они лишь сильнее по интенсивности, по амплитуде. Возможно, к аномальному возрастанию интенсивности суббури приводит определенная комбинация параметров СВ и ММП. Так, магнитные облака характеризуются высоким и регулярным магнитным полем ($B_T > 10$ нТл), в них магнитное давление преобладает над тепловым давлением ($\beta < 0.5$), динамическое давление выше, чем в высокоскоростных потоках ($P > 5$ нПа), и продолжительное время могут сохраняться высокие значения южной компоненты B_Z ММП. Области SHEATH характеризуются повышенной плотностью ($N > 3 \text{ #/см}^3$), динамическим давлением ($P > 5$ нПа), а также повышенной температурой и высоким магнитным полем ($B > 5$ нТл). Кроме того, перед появлением SSS, в большинстве случаев, обычно отмечались сильные скачки динамического давления и плотности солнечного ветра, которые наблюдались на фоне его высокой ско-

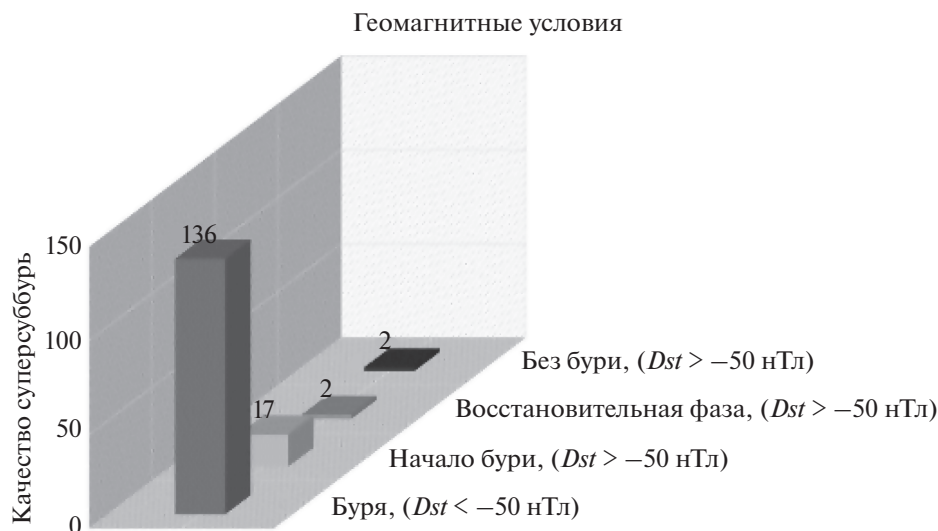


Рис. 6. Гистограмма геомагнитных условий появления суперсуббурь.

рости. Таким образом, мы полагаем, что наиболее вероятным источником появления суперсуббурь может быть повышение скорости солнечного ветра, магнитуды магнитного поля, плотности и динамического давления солнечного ветра при южном направлении межпланетного магнитного поля.

5. ВЫВОДЫ

1) наиболее сильные по интенсивности суббури – “суперсуббури” (SSS) наблюдаются во время межпланетных проявлений корональных выбросов массы, а именно в периоды SHEATH (45.2%), MC (42%) и EJECTA (8.3%) и фактически не наблюдаются во время высокоскоростных потоков солнечного ветра из корональных дыр (CIR, FAST).

2) в основном, SSS связаны с интенсивными геомагнитными бурями (86.6%), но в некоторых случаях SSS могут наблюдаться и в небуревых условиях (13.4%). Это чаще всего бывает во время внезапного начала бури (11%) и очень редко – во время поздней стадии фазы восстановления (1.2%), или без бури (1.2%)

3) в разных условиях космической погоды на земной поверхности наблюдаются разные типы суббурь: SSS появляются, в основном, при межпланетных проявлениях корональных выбросов массы (SHEATH, MC, EJECTA); “расширенные” суббури – при высокоскоростных потоках из корональных дыр (FAST, CIR) и областей сжатой плазмы SHEATH перед EJECTA/MC; “полярные” суббури – при медленных потоках солнечного ветра (SLOW) и EJECTA, которые связаны с медленным потоком солнечного ветра, а также в конце или в начале высокоскоростного потока

(FAST), когда скорость солнечного ветра уже или еще не достигает высоких значений.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дэспирак И.В., Любич А.А., Клейменова Н.Г. “Полярные” и “высокоширотные” суббури и условия в солнечном ветре // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 54. № 5. С. 619–626. 2014.
- 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 аэрномия. Т. 36. № 2. С. 19–24. 1996.
- Лазутин Л.Л., Кузнецов С.Н. Природа внезапных авроральных активаций в начале магнитных бурь // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 48. № 2. С. 173–182. 2008.
- 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. № 1. P. 2–15. 2017. doi 10.1002/2016EA000217
- Ahn B.H., Kroehl H.W., Kamide Y., Kihn E.A. Universal time variations of the auroral electrojet indices // J. Geophys. Res. V. 105. № A1. P. 267–275. 2000. doi 10.1029/1999JA900364
- 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 0.1029/2002JA009817
- *Davis T.N., Sugiura M.* Auroral electrojet activity index AE and its universal time variations // J. Geophys. Res. V. 71. № 3. P. 785–801. № 3. 1966. doi 10.1029/JZ071i003p00785
- *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. V. 177. P. 54–62. 2018a. doi 10.1016/j.jastp.2017.09.011
- *Despirak I., Lubchich A., Kleimenova N.* High-latitudes magnetic substorms under different types of the solar wind large-scale structure // Sun and Geosphere. V. 13. № 1. P. 57–61. 2018b.
- *Gjerloev J.W.* A global ground-based magnetometer initiative // Eos Trans. AGU. V. 90. № 27. P. 230–231. 2009. doi 10.1029/2009EO270002
- *Gjerloev J.W.* The SuperMAG data processing technique // J. Geophys. Res. V. 117. № A9. A09213. 2012. doi 10.1029/2012JA017683
- *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
- *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. Space Physics. V. 121. № 8. P. 7805–7816. 2016. doi 10.1002/2015JA021835
- *Kamide Y., Akasofu S.-I.* Notes on the auroral electrojet indices // Rev. Geophys. V. 21. № 7. P. 1647–1656. 1983. doi 10.1029/RG21i007p01647
- *Kamide Y., Yokoyama N., Gonzalez W., Tsurutani B.T., Daglis I.A., Brekke A., Masuda S.* Two-step development of geomagnetic storms // J. Geophys. Res. V. 103. № A4. P. 6917–6921. 1998.
- *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. CiteID 1016. 2003. doi 10.1029/2003SW000009
- *Kilpua E.K.J., Madjarska M.S., Karna N., Wiegeltmann T., Farrugia C., Yu W., Andreeva K.* Sources of the slow solar wind during the solar cycle 23/24 minimum // Solar Physics. 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.
- *Liou K., Sotirelis T., Richardson I.* Substorm occurrence and intensity associated with three types of solar wind structure // J. Geophys. Res.-Space. V. 123. № 1. P. 485–496. 2018. doi 10.1002/2017JA024451
- *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. doi 10.1029/2011JA016779
- *Newell P.T., Gjerloev J.W.* Substorm and magnetosphere characteristic scales inferred from SuperMAG auroral electrojet indices // J. Geophys. Res. V. 116. № A12. A12232. 2011b. doi 10.1029/2011JA016936
- *Richardson I.G., Cane H.V.* Near-Earth solar wind flows and related geomagnetic activity during more than four solar cycles (1963–2011) // J. Space Weather and Space Climate. V. 2. A02. 2012. doi 10.1051/swsc/2012003
- *Rostoker G.* Geomagnetic indices // Rev. Geophys. V. 10. № 4. P. 935–950. 1972. doi 10.1029/RG010i004p00935
- *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. of 8th Intern. Symp. on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology. St-Ptb. P. 237–238. 2009.
- *Sheeley N.R. Jr., Harvey J.W.* Coronal holes, solar wind streams and 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
- *Tsurutani B.T., Echer E., Guarnieri F.L., Kozyra J.U.* CAWSES November 7–8, 2004, superstorm: Complex solar and interplanetary features in the post-solar maximum phase // Geophys. Res. Lett. V. 35. № 6. L06S05. 2008. doi 10.1029/2007GL031473
- *Tsurutani B.T., Hajra R., Echer E., Gjerloev J.W.* Extremely intense (SML ≤ –2500 nT) substorms: isolated events that are externally triggered? // Ann. Geophys. V. 33. № 5. P. 519–524. 2015.
- *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 Y.I., Nikolaeva N.S., Lodkina I.G., Yermolaev M.Y.* Geoeffectiveness and efficiency of CIR, sheath, and ICME in generation of magnetic storms // J. Geophys. Res. V. 117. № A9. A00L07. 2012. doi 10.1029/2011JA017139