

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ И ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ИЗОЛИРОВАННЫХ МАГНИТОСФЕРНЫХ СУББУРЬ

В.Г. Воробьев¹, О.И. Ягодкина¹, Е.Е. Антонова²

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

²Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, г. Москва

Аннотация. Исследованы параметры ММП и плазмы солнечного ветра в периоды 163 изолированных суббурь. Показано, что скорость (V) и плотность (N) плазмы солнечного ветра остаются примерно постоянными в течение, по крайней мере, трех часов до начала фазы развития изолированной суббури (T_0) и одного часа после T_0 . По всему массиву данных скорость солнечного ветра показывает устойчивую тенденцию к антикорреляции с его плотностью. Однако, если значения V и N рассматривать в зависимости от интенсивности наблюдаемых в этот период суббурь, то с ростом величины AL индекса в максимуме суббури наблюдается увеличение уровней V , N и P , на фоне которых эти суббури появляются. Обнаружено, что рост величины динамического давления (P) приводит к увеличению энергии загрузки, необходимой для генерации суббурь. Такая взаимосвязь между P и значениями функций E_{KL} и $d\Phi/dt$ отсутствует в другие, произвольно выбранные периоды. Сделан вывод, что еще до начала фазы зарождения суббури в результате процессов, сопутствующих увеличивающемуся динамическому давлению солнечного ветра, в магнитосфере формируются условия все более затрудняющие генерацию суббурь. В таком случае, чем больше P , тем больше энергии солнечного ветра должно поступить в магнитосферу Земли в период фазы зарождения для генерации суббури. Впоследствии эта энергия будет выделяться в период фазы развития суббури, создавая все более интенсивные магнитные бухты.

1. Введение

Концепция классической суббури предполагает накопление энергии солнечного ветра в магнитосфере Земли и затем внезапное высвобождение этой энергии в период фазы развития суббури, начало которой в дальнейшем будем обозначать как T_0 . Началу фазы развития изолированных суббурь предшествует фаза зарождения [McPherron, 1970], появление которой обычно связывают с поворотом на юг B_z компоненты межпланетного магнитного поля (ММП). Длительность фазы зарождения суббури различными исследователями оценивается в интервале 0.5-2 ч. Фазу зарождения суббури можно рассматривать как временной интервал, в течение которого магнитосфера Земли «загружается» энергией солнечного ветра. Гипотеза о наличии перед началом суббури «фазы загрузки» подтверждается многими теоретическими и экспериментальными исследованиями

Несмотря на многочисленные исследования, выполненные в последние десятилетия, многие важные проблемы физики магнитосферных суббурь остаются нерешенными. Это связано с тем, что результаты исследований, выполненных различными авторами, не всегда однозначны, а зачастую и противоречат друг другу. Интенсивность суббурь меняется в широких пределах. По величине AL индекса магнитной активности этот интервал может составлять от нескольких сотен до нескольких тысяч нТл. Фундаментальный вопрос о том, какой фактор контролирует интенсивность суббурь, остается до сих пор открытым. Несомненно, что источником энергии магнитосферных суббурь является плазма солнечного ветра и межпланетное магнитное поле. Традиционно, наиболее эффективной для генерации суббурь считается B_z компонента ММП. Скорость (V , км/с) и плотность плазмы (N , см⁻³) солнечного ветра слабо меняются на временных масштабах суббури, поэтому эти параметры обычно не рассматриваются как самостоятельные источники энергии суббуревых возмущений.

В настоящей работе выдвинута гипотеза, что количественные характеристики плазмы солнечного ветра еще до начала фазы зарождения суббури приводят к формированию в магнитосфере Земли такого равновесного состояния, которое в значительной мере будет определять интенсивность генерируемого впоследствии магнитосферного возмущения. В этой связи в работе будет исследовано поведение компонент ММП, скорости (V), плотности (N) и динамического давления (P) плазмы солнечного ветра в периоды регистрации изолированных суббурь разной интенсивности и определена взаимосвязь величин параметров солнечного ветра с уровнем AL индекса в максимуме суббури.

2. Используемые данные

В работе проведен анализ изолированных суббурь, список которых опубликован по адресу <http://pgia.ru/lang/en/data>. Для выделения изолированных суббурь были использованы суточные вариации

(<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>) и 1-мин цифровые значения (<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>) AL индекса магнитной активности за все зимние сезоны 1995-2013 гг. Алгоритм, по которому проводился отбор суббурь, детально изложен в работе [Воробьев и др., 2018]. Здесь мы отметим, что к изолированным относились только те суббури, которые были отделены от других возмущений интервалом не менее 3-х часов.

Параметры ММП и плазмы солнечного ветра были взяты из базы OMNIWeb (<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>). В список изолированных суббурь вносились только те события, для которых в данных OMNI отсутствовали разрывы, превышающие 10 мин. Таким образом, в общий список вошли 163 суббури разной интенсивности.

3. Условия генерации суббурь разной интенсивности

По величине AL индекса в максимуме возмущения все суббури были разделены на три группы: слабые суббури с интенсивностью в максимуме $|AL_{max}| < 300$ нТл, суббури средней интенсивности $300 \text{ нТл} < |AL_{max}| < 600$ нТл и сильные суббури $|AL_{max}| > 600$ нТл. На рис. 1 показаны среднечасовые значения параметров солнечного ветра и индексов магнитной активности за 1 час (кривая 1), за 2 часа (кривая 2) и за 3 часа (кривая 3) до начала фазы развития суббури T_0 . По горизонтальной оси график представлен тремя точками, соответствующими средним значениям суббурь слабой, средней и большой интенсивности.

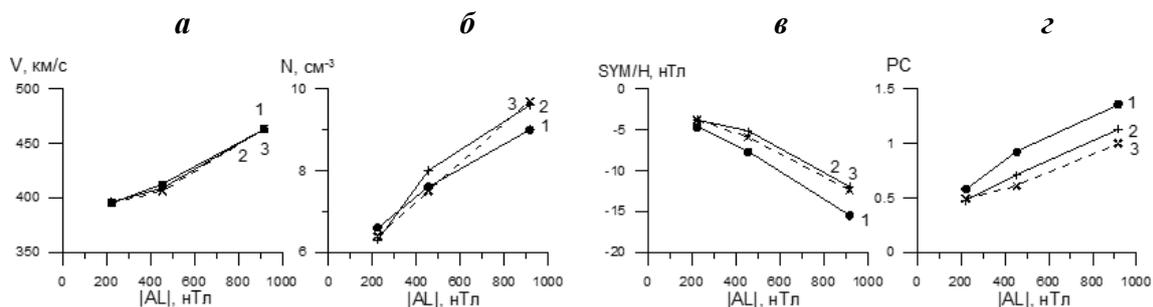


Рисунок 1. Среднечасовые значения скорости (V) и плотности (N) солнечного ветра, а так же SYM/H и PC индексов магнитной активности за час (кривая 1), за 2 часа (кривая 2) и за 3 часа (кривая 3) до начала фазы развития (T_0) слабых, средних и сильных суббурь.

Кривые 1, 2, и 3 на рис. 1а и 1б фактически совпадают, что свидетельствует о том, что V и N очень незначительно изменяются в 3-х часовом интервале до начала суббури. На рис. 1в и 1г показаны средние значения SYM/H и PC индексов. Важно отметить, что более высокие уровни, показанных на рис. 1 параметров, соответствуют более сильным изолированным суббурям. Такая тенденция сохраняется во все временные интервалы и даже за 3 часа до T_0 . Для слабых суббурь скорость солнечного ветра не превышает 400 км/с, в то время для сильных суббурь $V > 450$ км/с. Средняя плотность солнечного ветра составляет $\sim 6 \text{ см}^{-3}$ и $\sim 9 \text{ см}^{-3}$ для слабых и сильных суббурь, соответственно. Слабые суббури появляются при $SYM/H \sim -4$ нТл, $PC \sim 0.5$, в то время как сильным суббурям соответствуют значения $SYM/H \sim -16$ нТл, $PC \sim 1.0$ и более.

Важно отметить, что, представленные на рис. 1а и 1б данные свидетельствуют о том, что суббури большей интенсивности регистрируются на фоне все возрастающих значений как скорости, так и плотности, а, следовательно, и динамического давления плазмы солнечного ветра. Хорошо известно, что величина скорости солнечного ветра имеет тенденцию уменьшаться с ростом плотности плазмы. Так высокоскоростные потоки солнечного ветра от корональных дыр имеют низкую плотность, в то же время плотные потоки солнечного ветра в области гелиосферного токового слоя имеют относительно низкие скорости. В наших событиях эту тенденцию иллюстрируют рис. 2а и 2б. На рисунках использованы средние значения V и N , наблюдаемые за 1ч до момента T_0 (рис. 2а) и 1ч после T_0 (рис. 2б). Сплошные линии соответствуют уравнениям линейной регрессии. Довольно четко прослеживается тенденция к уменьшению плотности плазмы по мере увеличения скорости солнечного ветра.

Однако ситуация иная, если значения V и N рассматривать в зависимости от интенсивности наблюдаемых в этот период суббурь (рис. 2в,г). С ростом величины AL в максимуме суббури наблюдается увеличение уровней, как скорости, так и плотности солнечного ветра, на фоне которых эти суббури появляются. Сплошные линии на рисунках соответствуют данным по V и N , усредненным за 1ч до момента T_0 , а штриховые - за 1ч после T_0 . Сплошные и штриховые линии на рис. 2б и 2в очень близки друг к другу. Это свидетельствует о том, что величины скорости и плотности солнечного ветра незначительно изменяются в период фазы развития суббури по сравнению с их уровнем в период фазы зарождения.

4. Как плазма солнечного ветра контролирует интенсивность суббурь

Основные результаты предыдущего раздела, на которые хотелось бы обратить особое внимание, следующие. Скорость (V) и плотность плазмы (N) солнечного ветра остаются примерно постоянными в течение длительного интервала времени, по крайней мере, в течение трех часов до начала фазы развития суббури (T_0) и одного часа после T_0 . С увеличением уровня V и N наблюдается рост интенсивности генерируемых в эти

периоды магнитосферных суббурь. Полученные результаты позволяют сделать предположение, что количественные характеристики плазмы солнечного ветра еще до начала фазы зарождения суббури создают в магнитосфере Земли такое равновесное состояние, которое в значительной мере определяет интенсивность генерируемого впоследствии магнитосферного возмущения. Более того, мы предполагаем, что увеличивающиеся значения V и N приводят в магнитосфере Земли к формированию условий все более затрудняющих генерацию суббурь. Вследствие этого, чем больше скорость и/или плотность плазмы солнечного ветра, тем больше его энергии должно быть «загружено» в магнитосферу Земли в период фазы зарождения для генерации суббури. Впоследствии эта энергия будет выделяться в период фазы развития суббури, создавая все более интенсивные магнитные бухты.

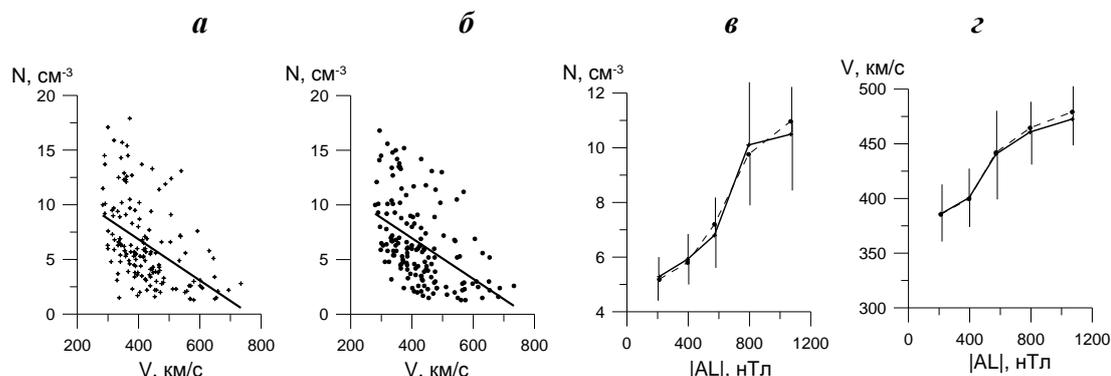


Рисунок 2. Взаимосвязь между плотностью и скоростью солнечного ветра за 1 ч до T_0 (а) и 1 ч после T_0 (б). Средние значения плотности (в) и скорости (г) солнечного ветра для суббурь разной интенсивности. Сплошные линии – за час до T_0 , штриховые линии – за час после T_0 . Данные усреднены в интервалах AL по 200 нТл, начиная от 100 нТл.

В работе [Воробьев и др., 2016] было показано, что интенсивность изолированных суббурь сильно коррелирует с электрическим полем Кана-Ли [Kan, Lee, 1979] $E_{KL} = V \cdot B_T \cdot \sin^2(\Theta/2)$ и с параметром Ньюелла [Newell et al., 2007] $d\Phi/dt = V^{4/3} \cdot B_T^{2/3} \cdot \sin^{8/3}(\Theta/2)$, где $B_T = (B_y^2 + B_z^2)^{1/2}$ и $\Theta = \arctg(B_y/B_z)$. Для целей настоящего исследования важно определить наличие корреляционных связей между этими функциями и параметрами солнечного ветра. В первую очередь в анализ мы включили величину и знак B_z компоненты ММП, которые рассматриваются многими авторами как наиболее значимые для генерации суббурь.

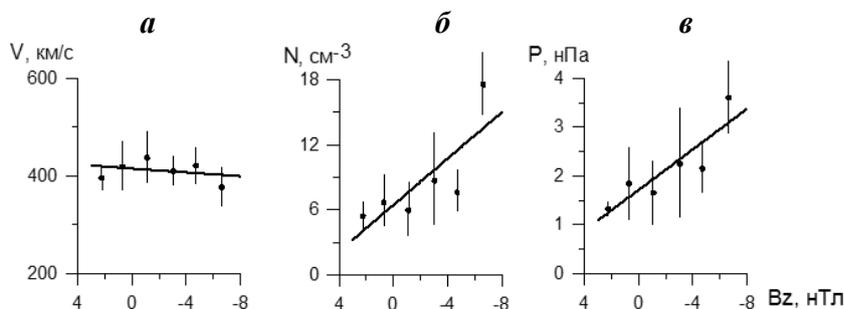


Рисунок 3. Скорость (а), плотность (б) и динамическое давление (в) солнечного ветра в зависимости от B_z компоненты ММП. Использованы среднечасовые значения параметров солнечного ветра за 1 ч до начала каждой изолированной суббури. Данные усреднялись в интервалах B_z по 2 нТл.

На рис. 3 показана скорость (а), плотность (б) и динамическое давление (в) солнечного ветра относительно величины и знака B_z компоненты ММП. Использовались среднечасовые значения параметров солнечного ветра, усредненные за 1 ч до начала каждой изолированной суббури. Из рисунка видно, что скорость солнечного ветра остается примерно на своем среднем уровне независимо от знака B_z . А вот с увеличением плотности (N) и динамического давления (P) солнечного ветра

увеличиваются значения южной компоненты ММП, регистрируемые перед началом фазы развития суббури. Важность величины скорости солнечного ветра, по-видимому, заключается в ее энергетическом вкладе в период фазы зарождения, как одной из составляющих электрического поля солнечного ветра.

Взаимосвязь между величиной загрузки магнитосферы энергией солнечного ветра перед началом фазы развития суббури и динамическим давлением солнечного ветра демонстрирует рис. 4. На этом рисунке, как и на рис. 3, использованы данные, усредненные за 1ч до начала каждой суббури. По горизонтальной оси отложено динамическое давление солнечного ветра (P). Точки на графиках показывают средние значениям E_{KL} (рис. 4а) и $d\Phi/dt$ (рис. 4б) в каждом интервале P по 0.5 нПа. Сплошные линии соответствуют уравнениям линейной регрессии. Отрезки вертикальных линий показывают величину среднеквадратичного отклонения.

Рис. 4 демонстрирует довольно тесную связь динамического давления с величиной загрузки магнитосферы энергией солнечного ветра. Рост величины динамического давления солнечного ветра приводит к увеличению энергии загрузки, необходимой для генерации суббурь. Коэффициенты корреляции по усредненным данным составляют $r=0.91$ и $r=0.85$ для функций E_{KL} и $d\Phi/dt$, соответственно.

Нет оснований предполагать, что такая тесная связь между динамическим давлением солнечного ветра и значениями функций E_{KL} и $d\Phi/dt$ может существовать и в другие произвольно выбранные периоды. Для сопоставления были взяты два интервала: 10-19 декабря 2000 г. и 10-19 декабря 2007 г. Месяц декабрь соответствует середине зимнего периода, а годы 2000 г. и 2007 г. соответствуют годам минимума и максимума солнечной активности. Для этих массивов данных были получены следующие коэффициенты корреляции: в 2000 г. $r=0.23$ и $r=0.21$, а в 2007 г. $r=0.49$ и $r=0.36$ для функций E_{KL} и $d\Phi/dt$, соответственно. Низкий уровень коэффициентов корреляции свидетельствует об отсутствии связи между P и функциями E_{KL} и $d\Phi/dt$. Только в периоды, предшествующие моменту T_0 , динамическое давление солнечного ветра будет в значительной степени определять энергию загрузки, необходимую для генерации суббурь.

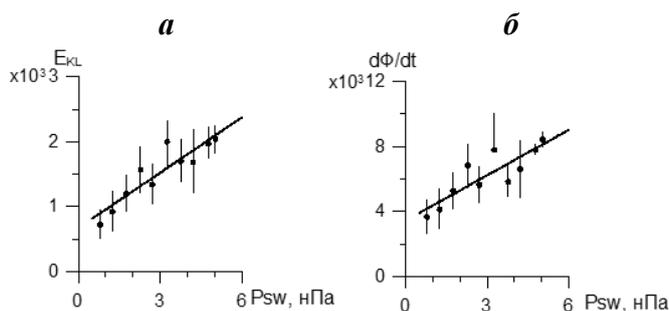


Рисунок 4. Величина функций E_{KL} и $d\Phi/dt$ в зависимости от динамического давления солнечного ветра. Точки на графиках - средние значения E_{KL} и $d\Phi/dt$ в каждом интервале P по 0.5 нПа.

индекса в максимуме суббури наблюдается увеличение уровней, как скорости, так и плотности плазмы солнечного ветра, на фоне которых эти суббури появляются.

Обнаружено, что величина динамического давления солнечного ветра (P) оказывает существенное влияние на энергетическую загрузку магнитосферы, определяемую как средние значения функций E_{KL} и $d\Phi/dt$ за 1 ч до начала фазы развития каждой суббури. Рост величины динамического давления сопровождается увеличением энергии загрузки, необходимой для генерации суббурь. Такая взаимосвязь между P и значениями E_{KL} и $d\Phi/dt$ отсутствует в другие произвольно выбранные периоды.

Полученные результаты дают основание полагать, что количественные характеристики плазмы солнечного ветра до начала фазы зарождения суббури создают в магнитосфере Земли такое равновесное состояние, которое в значительной мере определяет интенсивность генерируемого впоследствии магнитосферного возмущения. Более того, в результате процессов, сопутствующих увеличивающемуся динамическому давлению солнечного ветра, в магнитосфере Земли будут формироваться условия все более затрудняющие генерацию суббурь. Таким образом, чем больше динамическое давление солнечного ветра, тем больше его энергии должно быть перекачено в магнитосферу Земли в период фазы зарождения для генерации суббури. Впоследствии эта энергия будет выделяться в период фазы развития суббури, создавая все более интенсивные магнитные бухты.

Благодарности. Работа частично поддержана программой Президиума РАН «Арктика – научные основы новых технологий освоения, сохранения и развития» (проект «Разработка моделей мониторинга авроральной зоны и воздействия гелиофизических факторов на технические системы»).

Литература

1. Воробьев В.Г., Ягодкина О.И., Зверев В.Л. Исследование изолированных суббурь: условия генерации и характеристики различных фаз // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 56. № 6. С. 721–732. DOI:10.7868/S0016794001606016X. 2016.
2. Воробьев В.Г., Ягодкина О.И., Антонова Е.Е., Зверев В.Л. Влияние скорости и плотности солнечного ветра на интенсивность изолированных магнитосферных суббурь // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 58. № 3. С. 311–323. DOI:10.7868/S001679401803001X. 2018.
3. Kan, J.R., Lee L.C. Energy coupling and the solar wind dynamo // Geophys. Res. Lett. V. 6. No. 7. P. 577–580. DOI:10.1029/GL006i007p00577. 1979.
4. McPherron R.L. Growth phase of magnetospheric substorms // J. Geophys. Res. V. 75. No. 28. P. 5592–5599. 1970.
5. Newell P.T., Sotirelis T., Liou K., Meng C.-I., Rich F.J. A nearly universal solar wind-magnetosphere coupling function inferred from 10 magnetospheric state variables // J. Geophys. Res. V.112. A01206. DOI:10.1029/2006JA012015. 2007.