

## СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАРАМЕТРОВ МЕЖПЛАНЕТНОЙ СРЕДЫ В ПЕРИОДЫ РЕГИСТРАЦИИ МАГНИТОСФЕРНЫХ СУББУРЬ РАЗНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

В.Г. Воробьев, О.И. Ягодкина, В.Л. Зверев (*Полярный геофизический институт, г. Апатиты*)

**Аннотация.** Исследованы параметры межпланетной среды в периоды регистрации 176 изолированных суббурь. Показано, что скорость ( $V$ ) и концентрация плазмы ( $N$ ) солнечного ветра остаются примерно постоянными в течение, по крайней мере, трех часов до и одного часа после начала фазы развития суббури ( $T_0$ ). В среднем по всему массиву данные величины  $V$  и  $N$  показывают устойчивую тенденцию к антикорреляции. Однако если значения  $V$  и  $N$  упорядочить относительно интенсивности наблюдаемых в этот период суббурь, то с ростом AL индекса в максимуме суббури наблюдается увеличение, как скорости, так и концентрации плазмы солнечного ветра, на фоне которых эти суббури появляются. Показано, что наиболее благоприятными условиями для генерации суббурь низкой и средней интенсивности являются отрицательные значения как  $B_z$ , так и  $B_y$  компонент ММП. Для генерации больших суббурь необходимы большие отрицательные значения  $B_z$  компонентой ММП, но знак  $B_y$  компоненты, по всей вероятности, не имеет особого значения. В суточном распределении вероятности появления суббурь обнаружен максимум в интервале 10:00-12:00 UT. Этот максимум наиболее отчетливо выражен для слабых суббурь  $|AL_{max}| < 300$  нТл. Для средних суббурь он расширяется на интервал 08:00-12:00 UT, а для сильных суббурь выглядит наименее отчетливо.

### 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 изолированной суббури предшествует фаза зарождения [McPherron, 1970], появление которой обычно связывают с поворотом на юг  $B_z$  компоненты межпланетного магнитного поля (ММП). В период фазы зарождения суббури увеличивается магнитное давление в долях хвоста магнитосферы, происходит вытягивание силовых линий геомагнитного поля в антисолнечном направлении и уменьшение толщины плазменного слоя (см., например, Shukhtina et al., 2014). Эти изменения, в конечном счете, приводят к развитию в магнитосфере Земли некоторой неустойчивости, которая сопровождается быстрой «разгрузкой» накопленного магнитного потока, т.е. началом суббури.

Традиционно, наиболее эффективной для генерации суббурь считается компонента ММП в плоскости перпендикулярной к линии Солнце-Земля. Скорость ( $V$ , км/с) и концентрация плазмы ( $N$ , см<sup>-3</sup>) солнечного ветра слабо меняются на временных масштабах суббури, поэтому эти параметры обычно не рассматриваются как основные источники энергии суббуревых возмущений. Однако некоторые исследования косвенным образом показывают важность кинетической энергии солнечного ветра в процессах формирования суббурь. Так, например, в работе [Бархатов и др., 2017] изложены результаты экспериментов по восстановлению вариаций AL индекса магнитной активности в периоды изолированных суббурь с помощью искусственных нейронных сетей. Оказалось, что восстановление осуществляется наиболее эффективно, если в качестве входных последовательностей использовать не только компоненты ММП, но и интегральный параметр  $\Sigma[N \cdot V^2]$ , учитывающий предысторию процесса накачки кинетической энергии солнечного ветра в магнитосферу.

Целью настоящей работы является исследование поведения компонент межпланетного магнитного поля (ММП), скорости и плотности плазмы солнечного ветра в периоды регистрации изолированных магнитосферных суббурь разной интенсивности. Определение возможного влияния параметров плазмы солнечного ветра на процессы накопления энергии солнечного ветра в магнитосфере Земли и на интенсивность генерируемых в эти периоды магнитосферных суббурь.

### 2. Используемые данные

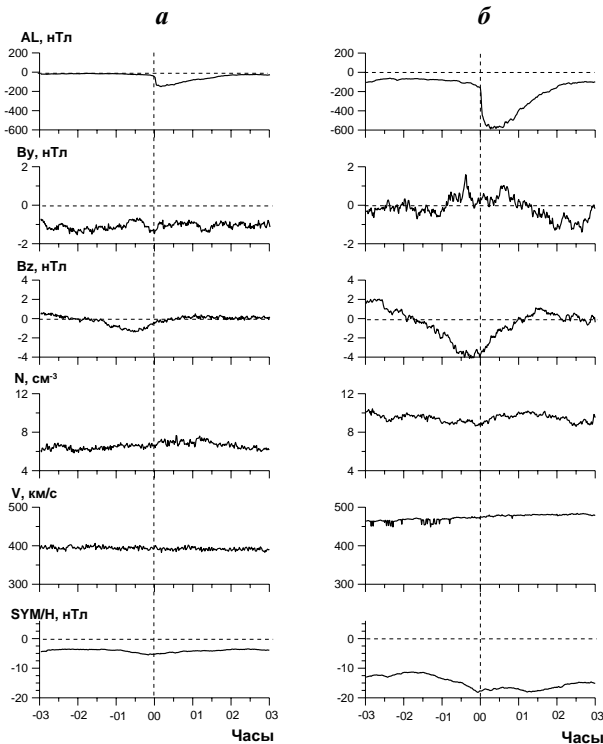
Для проведения исследований был использован список изолированных суббурь, характеристики которых изложены в работе [Воробьев и др., 2016]. Для выделения изолированных суббурь в этой работе были использованы суточные вариации (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>) и 1-мин цифровые значения (<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>) AL индекса магнитной активности за все зимние сезоны 1995-2013 гг. Критерии отбора изолированных суббурь подробно изложены в [Воробьев и др., 2016], здесь мы отметим только, что в этот список были включены суббури с интенсивностью в максимуме  $300 \text{ нТл} < |AL_{max}| < 1500 \text{ нТл}$ . Начало ( $T_0$ ) суббури определялось по времени, когда разность двух последовательных значений AL индекса составляла более 60 нТл, а последующее значение AL отличалось от первого уже на -100 нТл.

Для целей настоящей работы этот список был дополнен слабыми изолированными суббурями с  $|AL_{\max}| < 300$  нТл, которые были зарегистрированы в том же временном интервале. Для определения времени начала таких суббурь использовался более простой критерий:  $|\Delta AL| > 30$  нТл. Данные по ММП и плазме солнечного ветра были взяты из базы OMNIWeb (<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>).

### 3. Сравнительные характеристики суббурь разной интенсивности

Средние характеристики межпланетной среды и вариации магнитной активности в период регистрации суббурь с интенсивностью в максимуме  $|AL_{\max}| < 300$  нТл и  $|AL_{\max}| > 600$  нТл показаны на рисунках 1а и 1б, соответственно. Кривые, представленные на рис. 1, получены методом наложения эпох в интервале  $\pm 3$  ч относительно момента  $T_0$ . Всего рассмотрено 65 и 44 события низкой и большой интенсивности, соответственно.

Обращает на себя внимание тот факт, что значения всех рассмотренных на рис. 1 параметров для суббурь большой интенсивности заметно выше их значений для небольших суббурь. Так, маленькие суббури возникают на уровне  $SYM/H \sim -6$  нТл, а большие – при  $SYM/H \sim -18$  нТл. При маленьких суббурях средняя скорость солнечного ветра не превышает 400 км/с, а для больших – больше 450 км/с. Средняя концентрация плазмы солнечного ветра составляет  $\sim 6$  см<sup>-3</sup> и  $\sim 10$  см<sup>-3</sup> для маленьких и больших суббурь, соответственно. Как и следовало ожидать, значения южной компоненты ММП значительно больше для суббурь большой интенсивности. Что касается азимутальной компоненты ММП, то можно отметить, что суббури низкой интенсивности возникают, главным образом, на фоне отрицательных значений  $B_y$  компоненты ММП, в то время как для генерации больших суббурь знак  $B_y$  компоненты по всей вероятности не имеет особого значения.



**Рисунок 1.** Средние характеристики межпланетной среды и магнитной активности для суббурь с  $|AL_{\max}| < 300$  нТл (а) и  $|AL_{\max}| > 600$  нТл (б). Кривые получены методом наложения эпох в интервале  $\pm 3$  ч относительно момента  $T_0$ . Сверху вниз на рисунке показаны: вариации AL индекса,  $B_y$  и  $B_z$  компоненты ММП, концентрация плазмы ( $N$ ) и скорость ( $V$ ) солнечного ветра, значения индекса SYM/H.

предшествующий ей период спокойного геомагнитного поля. Поэтому значения южной компоненты ММП на кривых 1, 2 и 3 последовательно уменьшаются. Естественным выглядит и рост уровня отрицательной  $B_z$  для суббурь большей интенсивности.

Поведение  $B_y$  компоненты ММП, показанное в нижней части рис. 2в, подтверждает выводы, сделанные ранее из анализа рис. 1. Суббурям низкой и средней интенсивности предшествуют, как правило, отрицательные значения  $B_y$  компоненты ММП, в то время как для больших суббурь средние значения  $B_y$

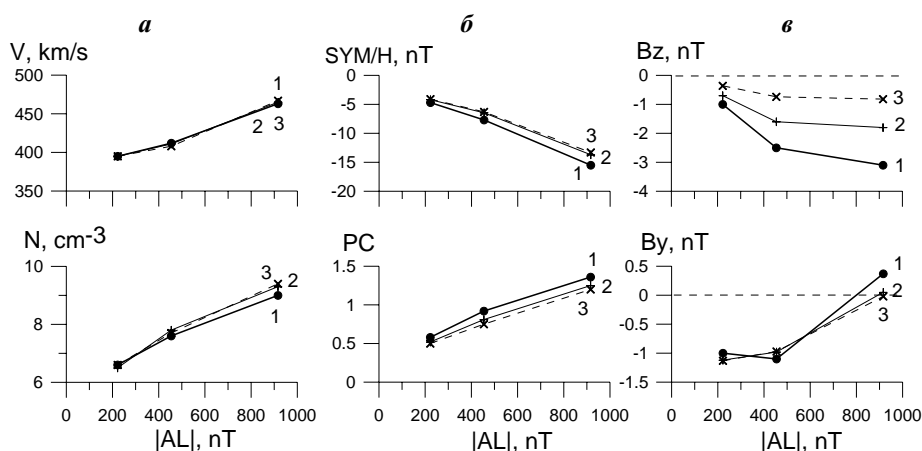
Данные, рассмотренные на рис. 1, в графическом виде представлены на рис. 2. К двум группам рассмотренных выше суббурь низкой и большой интенсивности добавлена третья группа суббурь с интенсивностью в максимуме  $300 \text{ нТл} < |AL_{\max}| < 600 \text{ нТл}$ . На рис. 2 показаны данные, усредненные за 1 час (кривая 1), 2 часа (кривая 2) и 3 часа (кривая 3) до начала фазы развития суббури  $T_0$ . По горизонтальной оси график представлен всего тремя точками, соответствующими средним значениям суббурь слабой, средней и большой интенсивности.

В левой колонке (рис. 2а) показаны значения скорости ( $V$ ) и концентрации плазмы ( $N$ ) солнечного ветра. Кривые 1, 2, и 3 на этих рисунках фактически совпадают, что свидетельствует о том, что  $V$  и  $N$  очень незначительно изменяются, по крайней мере, в 3-х часовом интервале до начала суббури. Следует обратить особое внимание на то, что суббури большей интенсивности возникают на уровне все увеличивающихся значений как  $V$ , так и  $N$ .

На рис. 2б показаны средние значения SYM/H и PC индексов для суббурь разной интенсивности. Кроме того, что значения этих индексов, усредненные за 1, 2, и 3 часа до  $T_0$  примерно совпадают, отметим последовательный рост абсолютной величины индексов по мере увеличения интенсивности последующей суббуревой активности.

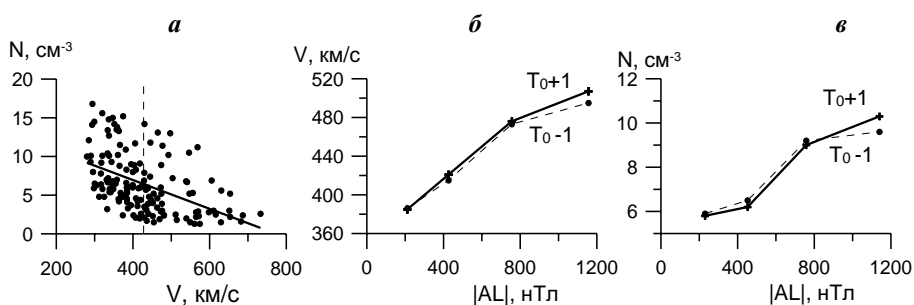
На рис. 2в представлены средние значения  $B_z$  и  $B_y$  компонент ММП. Наибольшее влияние на интенсивность суббурь, очевидно, оказывает уровень  $B_z$  компоненты ММП, усредненный за 1 час до начала суббури (кривая 1). Интервалы усреднения за 2 и 3 часа до суббури (кривые 2 и 3) включают в себя как фазу зарождения, так и

нулевые или слабо положительные. Эти данные свидетельствуют о том, что наиболее благоприятными условиями для генерации суббурь низкой и средней интенсивности являются отрицательные значения как  $B_z$ , так и  $B_y$  компонент ММП. Для генерации больших суббурь необходимы большие отрицательные значения  $B_z$  компонентой ММП, но знак  $B_y$  компоненты по всей вероятности не имеет особого значения.



**Рисунок 2.** Средние значения параметров межпланетной среды и индексов магнитной активности для суббури низкой  $|AL_{max}| < 300$  нТл, средней  $300 \text{ нТл} < |AL_{max}| < 600$  нТл и большой  $|AL_{max}| > 600$  нТл интенсивности. Данные усреднялись за 1 ч (кривая 1), 2 ч (кривая 2) и 3 ч (кривая 3) до момента  $T_0$ .

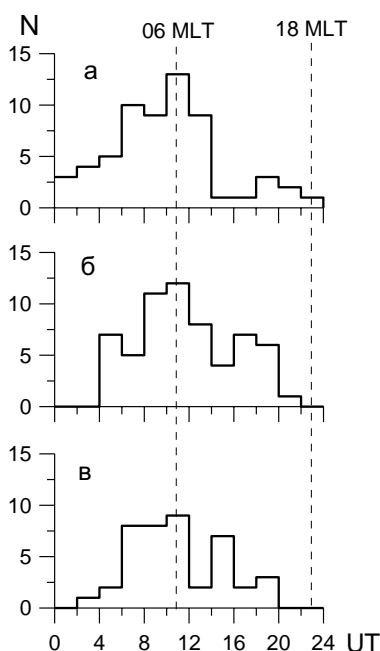
Наибольший интерес, с нашей точки зрения, представляют данные, показанные на рис. 2а. Полученные результаты свидетельствуют о том, что суббури большей интенсивности регистрируются на фоне все возрастающих значений как скорости, так и концентрации плазмы солнечного ветра. Хорошо известно, что величина скорости солнечного ветра имеет тенденцию антикоррелировать с уровнем концентрации солнечной плазмы. Так высокоскоростные потоки солнечного ветра от корональных дыр имеют низкую концентрацию, в то же время плотные потоки солнечного ветра в области гелиосферного токового слоя имеют относительно низкие скорости. В наших событиях эту тенденцию иллюстрирует рис. 3а. Рисунок показывает соотношение между концентрацией плазмы и скоростью солнечного ветра для всех событий, исследуемых в настоящей работе. На рис. 3а использованы средние значения  $V$  и  $N$ , наблюдаемые за 1ч до момента  $T_0$ . Вертикальная штриховая линия показывает среднее значение скорости солнечного ветра по всему массиву данных, которая составляет  $\sim 420$  км/с. Сплошная линия соответствует линейному уравнению регрессии. Довольно четко прослеживается тенденция к уменьшению концентрации плазмы по мере увеличения скорости солнечного ветра.



**Рисунок 3.** Соотношение между концентрацией плазмы и скоростью солнечного ветра (а). Средние значения скорости (б) и концентрации плазмы (в) солнечного ветра для суббурь различной интенсивности. Все суббури разделены на четыре группы:  $|AL_{max}| < 300$  нТл,  $300 \text{ нТл} < |AL_{max}| < 600$  нТл,  $600 \text{ нТл} < |AL_{max}| < 900$  нТл и  $|AL_{max}| > 900$  нТл. Штриховые линии -  $V$  и  $N$  усреднены за 1ч до начала суббури ( $T_0-1$ ); сплошные линии -  $V$  и  $N$  усреднены за 1ч после начала суббури ( $T_0+1$ ).

Однако, те же данные, но упорядоченные относительно интенсивности суббурь, показывают последовательный рост как  $V$ , так и  $N$  по мере увеличения интенсивности суббурь. Этот результат, уже представленный ранее на рис. 2а, дополнительно иллюстрируют рис. 3б и 3в. По интенсивности суббури на рис. 3б и 3в объединены в группы по 300 нТл. Штриховые линии на рисунках соответствуют данным по  $V$  и  $N$ , усредненным за 1ч до момента  $T_0$ , а сплошные линии соответствуют данным, усредненным за 1ч после  $T_0$ . Сплошные и штриховые линии на рис. 3б и 3в очень близки друг к другу. Это свидетельствует о том, что величины скорости и концентрации плазмы солнечного ветра незначительно

изменяются в период фазы развития суббури по сравнению с их уровнем в период фазы зарождения. Кривые на рис. 3б и 3в показывают устойчивый рост  $V$  и  $N$  по мере увеличения интенсивности наблюдаемых в этот период суббурь. Так суббури интенсивностью  $|AL_{\max}| < 300$  нТл наблюдались при  $V \sim 380$  км/с и  $N \sim 5.8$  см<sup>-3</sup>, а суббури с  $|AL_{\max}| > 900$  нТл наблюдались при  $V \sim 500$  км/с и  $N \sim 10.0$  см<sup>-3</sup>.



**Рисунок 4.** Суточное распределение вероятности появления суббурь низкой (а), средней (б) и большой (в) интенсивности. Вертикальными штриховыми линиями указаны моменты UT, когда ось геомагнитного диполя наклонена в утреннюю и вечернюю сторону.

На рис. 4 показаны гистограммы суточного распределения времени начала суббурь разной интенсивности. Вертикальная ось показывает количество суббурь, начавшихся в соответствующем 2-х часовом интервале UT. По интенсивности, как и на рис. 2, суббури разделены на слабые (а), средние (б) и сильные (в). Рисунок указывает на то, что в распределении вероятности появления суббурь наблюдается максимум в интервале 10:00-12:00 UT. Этот максимум наиболее отчетливо выражен для слабых суббурь (рис. 4а). Для средних суббурь он расширяется на интервал 08:00-12:00 UT (рис. 4б), а для сильных суббурь выглядит наименее отчетливо и уже в интервале 06:00-12:00 UT.

Наличие такого максимума можно было бы отнести к недостаткам традиционного  $AL$  индекса, определенного по небольшому числу (10-12) наземных магнитных станций. Однако наличие предполуденного по UT максимума в суточном распределении вероятности появления суббурь в зимний период можно обнаружить и в исследованиях [Newell et al., 2013, Fig. 7]. Авторы этой работы для определения  $T_0$  использовали  $SML$  (SuperMAG Low) индекс, который подобен индексу  $AL$ , но определен по данным 130 станций. Вертикальными штриховыми линиями на рис. 4 показаны моменты UT, когда ось геомагнитного диполя в GSM системе координат наклонена вдоль оси  $Y$  в сторону 06:00 MLT и 18:00 MLT. Как видно из рисунка, максимум вероятности появления суббурь низкой и средней интенсивности наблюдается в периоды, когда ось геомагнитного диполя наклонена в утреннюю сторону. Такой наклон оси диполя в сочетании с отрицательными значениями  $B_y$  компоненты ММП, как это иллюстрируют рис. 1а и рис. 2в, даёт «эффективную» отрицательную компоненту  $B_z$  [Russell and McPherron, 1973]. Величина этой компоненты, зависящая как от  $B_y$  компоненты ММП, так и от UT, будет вносить определенный вклад в степень геоэффективности солнечного ветра перед началом суббури.

#### 4. Заключение

Проведено статистическое исследование параметров межпланетной среды в периоды регистрации изолированных суббурь разной интенсивности. Показано, что скорость ( $V$ ) и концентрация плазмы ( $N$ ) солнечного ветра остаются примерно постоянными в течение длительного интервала времени, по крайней мере, в течение трех часов до и одного часа после начала фазы развития суббури ( $T_0$ ). В среднем по всему массиву данных величины  $V$  и  $N$  показывают устойчивую тенденцию к антикорреляции. Однако если значения  $V$  и  $N$  упорядочить относительно интенсивности наблюдаемых в этот период суббурь, то с ростом величины  $AL$  индекса в максимуме суббури наблюдается увеличение, как скорости, так и концентрации плазмы солнечного ветра, на фоне которых эти суббури появляются. Показано, что в распределении вероятности появления суббурь наблюдается максимум в интервале 10:00-12:00 UT. Этот максимум наиболее отчетливо выражен для слабых суббурь  $|AL_{\max}| < 300$  нТл. Для средних суббурь он расширяется на интервал 08:00-12:00 UT (рис. 4б), а для сильных суббурь выглядит наименее отчетливо и уже в интервале 06:00-12:00 UT.

#### Литература

- Бархатов Н.А., Воробьев В.Г., Ревунов С.Е., Ягодкина О.И. Отражение динамики параметров солнечного ветра в процессе формирования суббуревой активности // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 57. № 3. С. 273-279. doi 10.1134/S0016793217030021. 2017.
- Воробьев В.Г., Ягодкина О.И., Зверев В.Л. Исследование изолированных суббурь: условия генерации и характеристики различных фаз // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 56. № 6. С. 721-732. doi 10.7868/S0016794001606016X. 2016.
- McPherron R.L. Growth phase of magnetospheric substorms // J. Geophys. Res. V. 75. No. 28. P. 5592-5599. 1970.
- Russell C.T., McPherron R.L. Semiannual variation of geomagnetic activity // J. Geophys. Res. V. 78. No. 1. P. 92-108. doi 10.1029/JA78i001p00092. 1973.
- Shukhtina M. A., Dmitrieva N. P., Sergeev V. A. On the conditions preceding sudden magnetotail magnetic flux unloading // Geophys. Res. Lett. V. 41. No. 4. P. 1093-1099. doi 10.1002/2014GL059290. 2014.3