

## КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ МЕЛКО- И СРЕДНЕМАСШТАБНЫХ СТРУКТУР ПО ОДНОВРЕМЕННЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ И МАГНИТОСЛОЕ

<sup>1,2,3</sup>Л.С. Рахманова, <sup>1,2</sup>М.О. Рязанцева, <sup>1</sup>Г.Н. Застенкер

## CORRELATION ANALYSIS OF SMALL- AND MID-SCALE STRUCTURES FROM SIMULTANEOUS OBSERVATION IN SOLAR WIND AND MAGNETOSHEATH

<sup>1,2,3</sup>L.S. Rakhmanova, <sup>1,2</sup>M.O. Ryazantseva, <sup>1</sup>G.N. Zastenker

На основе корреляционного анализа проведено исследование изучению плазменных структур солнечного ветра малого и среднего масштабов и их изменения при пересечении околоземной ударной волны и движении по магнитослою. Показано, что околоземная ударная волна и магнитослой добавляют к вариациям плотности солнечного ветра в основном только высокочастотные флуктуации с частотами более 0.02 Гц.

Using correlation analysis solar wind structures of small- and middle scales and their change when crossing the near-Earth's shock wave and moving through the magnetosheath were studied. The magnetosheath shock wave and magnetosheath are found to add only high frequency fluctuations (>0.02 Hz) to variations of solar wind density.

### Введение

Параметры плазмы солнечного ветра претерпевают значительные изменения при взаимодействии с околоземной ударной волной и дальнейшем движении через магнитослой (переходную область между околоземной ударной волной и магнитопаузой). Магнитослой – сильно турбулентная область с высоким уровнем вариаций всех параметров плазмы и магнитного поля, в которой присутствует большое число волновых мод, приводящих к перераспределению энергии при движении от околоземной ударной волны к магнитопаузе. В работе [Shevryev, Zastenker, 2005] было показано, что околоземная ударная волна – основной источник флуктуаций магнитослоя в диапазоне частот 0.02–1 Гц. В то же время вариации с частотами  $10^{-3}$ – $10^{-1}$  Гц в магнитослое порождаются локальным источником [Gutynska et al., 2012].

Для понимания картины солнечно-земных взаимодействий важно исследовать, как различные структуры плазмы могут изменяться при прохождении через околоземную ударную волну и движении через магнитослой. В нашей предыдущей работе [Rakhmanova et al., 2012] было показано, что мелко-масштабные плазменные структуры солнечного ветра иногда сохраняют резкие границы при переходе из солнечного ветра в магнитослой, в то время как их амплитуда и длительность увеличиваются. В данной работе на базе корреляционного анализа данных двух близкорасположенных спутников Themis изучается изменение мелко- и среднemasштабных (с длительностями от нескольких секунд до нескольких минут) плазменных структур при пересечении околоземной ударной волны.

### Измерения и пример наблюдений

В работе используются данные двух из пяти спутников проекта Themis с временным разрешением 3 с [http://cdaweb.gsfc.nasa.gov].

Для исследования отбираются интервалы времени, когда один из спутников Themis расположен в солнечном ветре (СВ), а другой – в магнитослое (МС) (расстояние между спутниками при этом не превышает  $20R_E$ ). Пример такого интервала 31 августа 2008 г. приведен на рис. 1. Черной линией показаны измерения плотности со спутника Themis-B, располо-

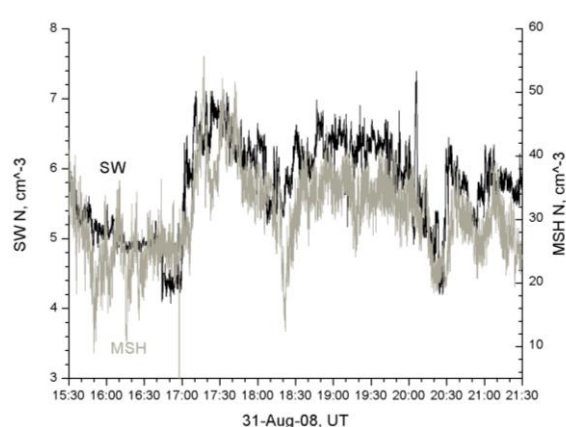


Рис. 1. Пример измерений плотности плазмы со спутников Themis-B (СВ) и Themis-D (МС) 31 августа 2008 г.

женного в СВ, серой – измерения со спутника Themis-D, расположенного в МС. Временной сдвиг между измерениями в СВ и МС, определенный по максимуму коэффициента корреляции, рассчитанного на всем 6-часовом интервале ( $R=0.73$ ), составляет 369 с и соответствует времени распространения плазмы между двумя космическими аппаратами. Координаты спутника в СВ менялись следующим образом:  $x_{GSE}=(21\div 15)R_E$ ,  $y_{GSE}=(-1.5\div 1.5)R_E$ ; в МС:  $x_{GSE}=(11\div 11.5)R_E$ ,  $y_{GSE}=(-1.5\div 2)R_E$ . Координата  $z_{GSE}$  у обоих спутников была близка к нулю. Для каждого интервала рассчитывается коэффициент корреляции временных рядов данных плотности плазмы СВ и МСЛ. Коэффициент корреляции

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - x_{av})(y_i - y_{av})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - x_{av})^2 \sum_{i=1}^N (y_i - y_{av})^2}},$$

где  $x_i$  и  $y_i$  – временные ряды данных плотности плазмы СВ и МС;  $x_{av}$  и  $y_{av}$  – средние значения плотности плазмы в СВ и МС на выбранном временном интервале,  $N$  – число измерений в анализируемом интервале,  $R$  определяется как функция времени и временного сдвига между рядами данных СВ и МС. На рис. 2 представлена зависимость коэффициента корреляции от времени (ось абсцисс) и от временного сдвига между рядами данных СВ и МС (ось орди-

нат) для рассматриваемого периода времени 31 августа 2008 г. Коэффициент корреляции рассчитан на 2-часовых интервалах, сдвинутых относительно друг друга на половину интервала, что позволяет избежать ошибок, связанных с разбиением непрерывного ряда данных на отдельные интервалы. Шкалой яркости обозначено значение коэффициента корреляции. Явно прослеживается его максимум, превышающий 0.7 при временных сдвигах от 300 до 500 с. Таким образом, наблюдается хорошая крупномасштабная корреляция данных СВ и МС на протяжении всего интервала.

На рис. 3 показан пример 30-минутного интервала (часть интервала, описанного выше) измерений плотности плазмы в СВ и в МС. На верхней панели приведены данные без сглаживания, на нижней панели – данные с 50-секундным сглаживанием. Для каждого интервала сглаживания была рассмотрена зависимость коэффициента корреляции от временного сдвига между рядами данных СВ и МС и определен временной сдвиг, соответствующий максимальному коэффициенту корреляции. Значение времени сглаживания изменяется от 10 до 170 с. Зависимость максимального значения коэффициента корреляции от времени сглаживания представлена на рис. 4. Видно, что для исходных данных коэффициент корреляции составляет 0.45, при сглаживании данных наблюдается его постепенный рост и при интервале сглаживания 80 с  $R=0.8$ ; при дальнейшем сглаживании  $R$  увеличивается незначительно. Таким образом, сглаживание, т. е. исключение из данных высокочастотной компоненты флуктуаций приводит

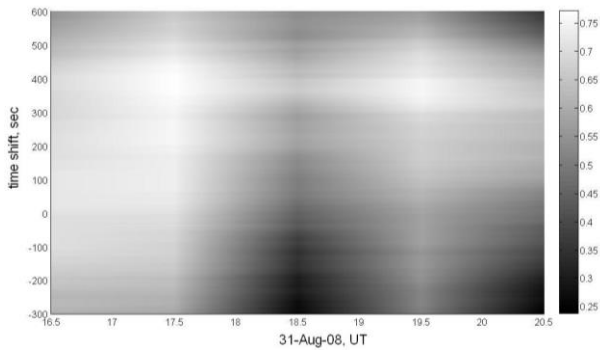


Рис. 2. Коэффициент корреляции временных рядов СВ и МСЛ, рассчитанный на 2-часовых интервалах, в зависимости от времени и сдвига между рядами данных, 31 августа 2008 г.

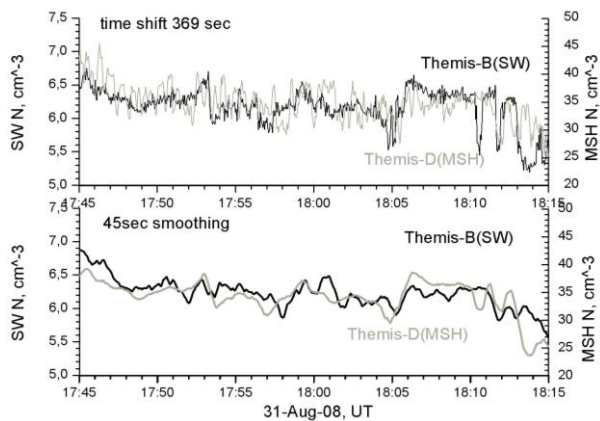


Рис. 3. Пример измерений плотности плазмы в СВ (черная линия) и МСЛ (серая линия) без сглаживания (верхняя панель) и с 50-секундным сглаживанием для интервала 17:45–18:15 31 августа 2008 г.

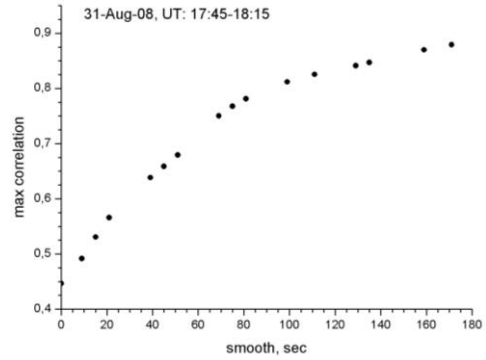


Рис. 4. Зависимость коэффициента корреляции от времени сглаживания для интервала 17:45–18:15 31 августа 2008 г.

к значительному увеличению корреляции в большинстве случаев.

### Статистический анализ

В данной работе было проанализировано 64 измерения плотности плазмы. На рис. 5 показано распределение значений коэффициента корреляции на 30-минутных интервалах для данных без сглаживания (серый цвет) и для данных с 50-секундным сглаживанием (черный цвет). Для данных без сглаживания коэффициент корреляции изменяется от  $-0.5$  до  $1.0$ , распределение имеет максимум на  $0.45$  и ширина на половине высоты составляет  $0.6$ . Для сглаженных данных распределение смещается в область более высоких корреляций: для 50-секундного сглаживания максимум распределения находится на  $0.75$ , пик распределения становится более выраженным.

Более чем для 40 % 30-минутных интервалов сглаживание по 50 с увеличивает коэффициент корреляции на  $0.1$ – $0.2$ . Для 30 % интервалов при сглаживании более чем по 50 с коэффициент корреляции увеличивается более чем на  $0.2$ . Таким образом, сглаживание данных по 50 с и более позволяет получить значимые коэффициенты корреляции временных рядов СВ и МС.

Анализ был проведен для всех 30-минутных интервалов. Однако в 45 % интервалов наблюдалась близкая нулю и даже отрицательная корреляция. Далее мы рассмотрим лишь интервалы с изначально положительной значимой корреляцией  $R(0) > 0.4$ ,

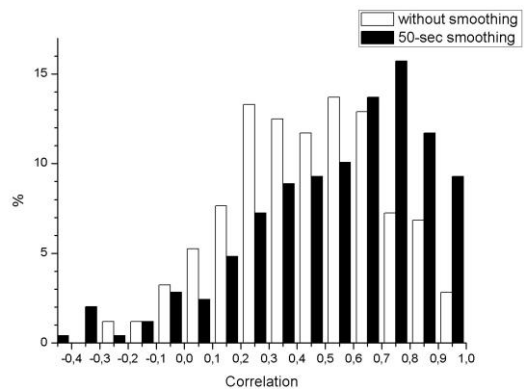


Рис. 5. Распределение значений коэффициента корреляции данных на 30-минутных интервалах без сглаживания (белый цвет) и данных с 50-секундным сглаживанием (черные цвет).

которую можно заметно улучшить посредством сглаживания данных  $R(170) > 0.8$  ( $R(0)$  и  $R(170)$  – коэффициент корреляции данных без сглаживания и с максимальным сглаживанием). Из всех 248 интервалов такому критерию удовлетворяют 97. На рис. 6 приведена зависимость коэффициента корреляции на этих 97 интервалах от времени сглаживания: толстой линией показано среднее значение коэффициента корреляции, вертикальными линиями показано стандартное отклонение для каждого интервала сглаживания. При увеличении интервал сглаживания от 10 до 50 с коэффициент корреляции быстро растет от 0.68 до 0.82, для интервала сглаживания более 50 с  $R$  изменяется значительно медленнее. Из этого можно сделать вывод, что околоземная ударная волна и магнитослой добавляют к вариациям плотности плазмы солнечного ветра в основном только высокочастотные флуктуации с частотами более 0.02 Гц.

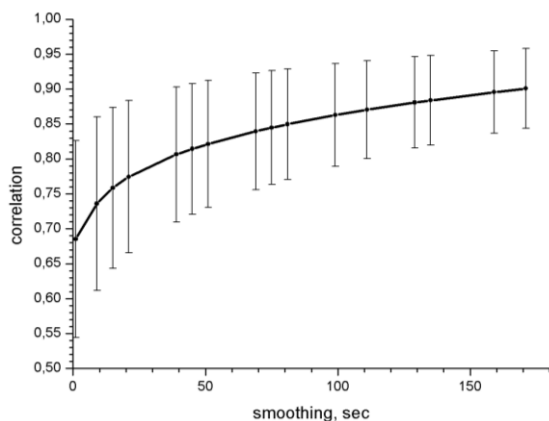


Рис. 6. Зависимость среднего значения коэффициента корреляции (жирная линия) от времени сглаживания для интервалов со значительным уровнем корреляции (вертикальными линиями показано стандартное отклонение).

### Заключение

С помощью корреляционного анализа мы рассмотрели 64 часа почти одновременных измерений плотности плазмы в солнечном ветре и магнитослой на аппаратах Themis, расположенных. Обнаружено, что сглаживание данных плотности плазмы в некоторых случаях позволяет значительно улучшить корреляцию временных рядов СВ и МС на 30-минутных интервалах. Корреляция существенно увеличивается при сглаживании по 10–50 с, дальнейшее сглаживание изменяет корреляцию несущественно. Из такой зависимости коэффициента корреляции от интервала сглаживания данных можно сделать вывод, что околоземная ударная волна и магнитослой добавляют к вариациям плотности плазмы солнечного ветра в основном только высокочастотные флуктуации с частотами более ~0.02 Гц.

Работа выполнена при содействии грантов РФФИ 12-05-00984-а, 12-02-00217-а, 12-02-31224-а, 13-02-00819-а и программы Р-22 Российской академии наук.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Gutynska O., Šimunek J., Šafránková J., et. al. Multipoint study of magnetosheath magnetic field fluctuations and their relation to the foreshock // J. Geophys. Res. 2012. V. 117, iss. A4. P. A04214.

Rakhmanova L.S. et. al. in WDS'12 Proc of Contributed Papers: Part II – Physics of Plasmas and Ionized Media / Eds. J. Safrankova, J. Pavlu. Prague: Matfyzpress, 2012. P. 176–181.

Shevyrev N.N., Zastenker G.N. Some features of the plasma flow in the magnetosheath behind quasi-parallel and quasi-perpendicular bow shock // Planet. Space Sci. 2005. V. 53, iss. 1–3. P. 95–102.

<sup>1</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Скобелевца МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>3</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия