

СОПОСТАВЛЕНИЕ ОДНОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПЛАЗМЫ И МАГНИТНОГО ПОЛЯ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ И МАГНИТОСЛОЕ НА РАЗЛИЧНЫХ РАССТОЯНИЯХ ОТ МАГНИТОПАУЗЫ

Л.С. Рахманова¹, М.О. Рязанцева^{1,2}, Г.Н. Застенкер¹

¹Институт Космических Исследований РАН, Москва, Россия

²Научно-исследовательский Институт Ядерной Физики имени Д.В. Скобельцына Московского Государственного Университета имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Аннотация. Структуры плазмы и магнитного поля солнечного ветра оказывают сильное влияние на магнитосферу Земли, однако необходимо учитывать их изменения (порой существенные) в переходной области – магнитослое. В данной работе на базе корреляционного анализа данных двух близко расположенных спутников оценивается степень изменения этих структур в магнитослое. Анализируются более 300 часов одновременных измерений двух спутников проекта THEMIS, первый из которых находится в солнечном ветре, а второй – в магнитослое. Установлено, что наиболее существенными факторами, влияющими на корреляцию, являются плотность плазмы солнечного ветра и модуль межпланетного магнитного поля, угол между нормалью к околоземной ударной волне и направлением межпланетного магнитного поля - θ_{BN} - и амплитуды структур плазмы и магнитного поля. В данной работе проведен детальный анализ зависимостей коэффициента корреляции от указанных факторов для различных случаев расположения спутника в магнитослое по отношению к магнитопаузе и околоземной ударной волне. При этом получено, что зависимости коэффициента корреляции от плотности плазмы солнечного ветра и модуля межпланетного магнитного поля оказываются сходными на различных расстояниях от магнитопаузы.

Введение

При взаимодействии сверхзвукового потока солнечного ветра (СВ) с магнитосферой Земли образуется околоземная ударная волна (ОЗУВ) и переходная область – магнитослой (МСЛ). Моделирование течения плазмы в МСЛ показало, что плазма нагревается, замедляется, сжимается и меняет направление при переходе через околоземную ударную волну [Spreiter et al., 1966]. Важной отличительной чертой магнитослоя является высокий уровень флуктуаций всех параметров плазмы и магнитного поля в широком диапазоне частот. Зачастую модели взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли и прогнозы «космической погоды» используют данные СВ и не учитывают их изменения в МСЛ. Однако в литературе было показано, что даже знак B_z компоненты магнитного поля, который принято считать одним из наиболее геоэффективных параметров солнечного ветра, может изменяться в МСЛ по сравнению с невозмущенным СВ [Safrankova et al., 2009]. Важно понимать, каким образом параметры солнечного ветра могут изменяться в магнитослое. Модели течения плазмы в магнитослое дают неплохие оценки среднего значения параметров, однако сравнение моделей со спутниковыми наблюдениями показало, что флуктуации параметров МСЛ в моделях не воспроизводятся [см. например Nemecek et al., 2001].

Помимо добавления турбулентных флуктуаций к параметрам СВ, в магнитослое происходит видоизменение плазменных и магнитных структур солнечного ветра. Rakhmanova et al. [2012] показали, что амплитуда и длительность мелкомасштабных (наблюдаемые в течение десятков секунд) структур плазмы и магнитного поля увеличиваются в магнитослое. Safrankova et al. [2007] исследовали взаимодействие околоземной и межпланетной ударных волн и показали, что оно приводит к замедлению последней и к порождению нескольких разрывов нового типа. Таким образом, структуры солнечного ветра претерпевают существенные изменения при пересечении околоземной ударной волны и дальнейшем движении по МСЛ, что необходимо учитывать в реалистичных моделях солнечно-земных связей.

В данной работе проводится статистическое изучение коэффициентов корреляции между параметрами плазмы и магнитного поля (МП), измеренными до и после ОЗУВ. Исследуются данные спутников проекта THEMIS в период с мая по октябрь 2008 года, так как в это время по крайней мере 4 спутника проекта движутся по эллиптическим орбитам с различным апогеем и можно выделить интервалы, когда один из спутников находится в СВ, а другой – в МСЛ при небольшом расстоянии между ними (не более 20 R_E). Всего в работе рассмотрено около 300 часов измерений с временным разрешением 3 секунды.

Методика и пример анализа

На рис. 1 приведен пример измерений плотности плазмы (а) и модуля магнитного поля (в) солнечного ветра (черная линия, THEMIS-B) и магнитослоя (серая линия, THEMIS-C). Данные МСЛ сдвинуты на время распространения плазмы между двумя космическими аппаратами. Штриховыми линиями показаны примеры среднемасштабных плазменных (магнитных) структур – увеличений/уменьшений плотности (модуля магнитного поля) в течение нескольких минут. Для изучения структур таких масштабов мы считаем коэффициент корреляции между данными СВ и МСЛ на 30-минутных интервалах с 15 минутным перекрытием, делая поправку на время распространения плазмы. На панелях б и г черной линией показан коэффициент корреляции плотности и модуля МП, соответственно. Когда структура СВ проходит через ОЗУВ невозмущенной и наблюдается спутником в МСЛ, коэффициент корреляции высокий >0.7 (например, в случаях, отмеченных штриховыми линиями). Когда структура СВ не наблюдается в МСЛ, или сильно видоизменена, или в МСЛ наблюдается структура, которой не было в СВ, корреляция параметров отсутствует - <0.5 (например, в 20:15-20:30). В предыдущих работах (например *Рахманова и др.*, 2015) нами было показано, что если сглаживать данные (считать бегущее среднее), тем самым убирая из них высокочастотную компоненту, коэффициент корреляции увеличивается вплоть до интервалов сглаживания $\sim 50-100$ с, а дальнейшее сглаживание изменяет корреляцию незначительно. Таким образом, чтобы рассматривать только структуры, а не турбулентные флуктуации параметров, в дальнейшем мы работаем со сглаженными по 100 с данными. Влияние сглаживания на коэффициент корреляции можно видеть из панелей б и г рис. 1, где серыми линиями показан коэффициент корреляции, рассчитанный на сглаженных по 100 с данных.

Всего в работе было рассмотрено более 300 часов данных, из которых было выделено 1330 30-минутных интервалов. На рис. 2 представлена зависимость коэффициента корреляции МП от коэффициента корреляции плотности плазмы для всех рассмотренных интервалов, рассчитанные по сглаженным данным. Из рисунка видно, что в половине случаев коэффициент корреляции обоих параметров не превышает 0.7 несмотря на сглаживание. Высокий (>0.7) коэффициент корреляции обоих параметров наблюдается в 18% рассмотренных случаев. На рис. 2 отдельно выделены (закрашенными кружками) интервалы, в течение которых наблюдались структуры с амплитудами более 20% (методика выделения таких интервалов будет описана в следующем разделе). Для таких интервалов коэффициенты корреляции параметров также не зависят друг от друга.

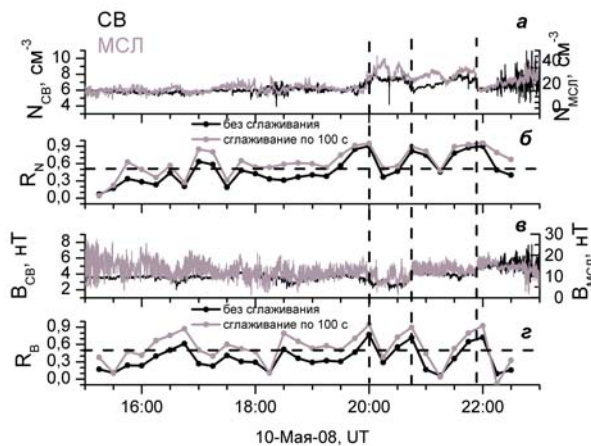


Рисунок 1. Пример измерений плотности плазмы (а) и модуля МП (в) в СВ (черная линия) и в МСЛ (серая линия); коэффициент корреляции между параметрами СВ и МСЛ - плотностью (б) и модулем МП (г) для данных с разрешением 3 сек (черная линия) и сглаженных по 100 сек (красная линия).

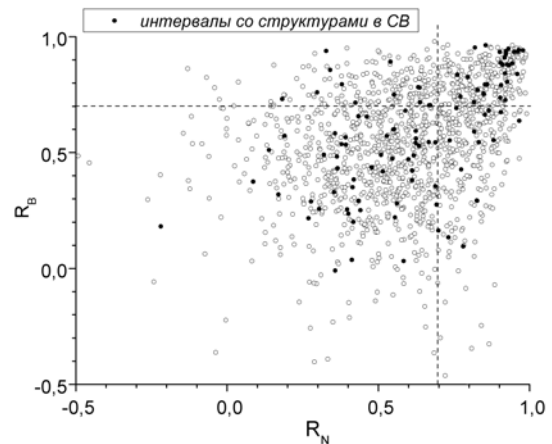


Рисунок 2. Зависимость коэффициента корреляции модуля МП от коэффициента корреляции плотности плазмы. Закрашенными кружками обозначены интервалы, на которых наблюдаются структуры с большими ($>20\%$) амплитудами.

Параметры, влияющие на коэффициент корреляции

Для того, чтобы оценить, какие факторы влияют на наличие или отсутствие корреляции между параметрами СВ и МСЛ, мы рассмотрели отношение числа интервалов с высокой корреляцией – N_g – к полному числу интервалов – N – в каждом диапазоне значений выбранного фактора. Коэффициент корреляции считался на сглаженных данных. Отношение N_g/N соответствует вероятности наблюдения высокой корреляции между параметрами СВ и МСЛ.

Первый фактор, который был рассмотрен – амплитуда структур СВ на интервале. Для оценки амплитуды структур было использовано относительное стандартное отклонение – RSD – рассчитанное на тех же

интервалах, что и коэффициент корреляции, по сглаженным по 100 с данным плотности и модуля МП. Зависимость N_g/N от RSD показана на рис. 3. Здесь и далее черными колонками показана зависимость для корреляции плотности, серыми – для модуля МП, а вертикальными отрезками показана оценка ошибок, связанных с различным числом интервалов N в каждой области выбранного параметра. Видно, что при увеличении амплитуды наблюдаемой в СВ плазменной или магнитной структуры вероятность наблюдения высокой корреляции между параметрами СВ и МСЛ возрастает.

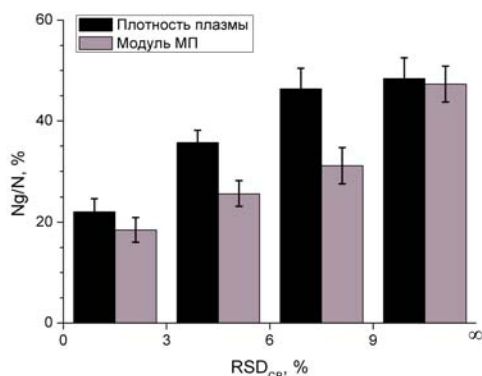


Рисунок 3. Зависимость вероятности наблюдения высокой корреляции от амплитуды структур СВ на интервале.

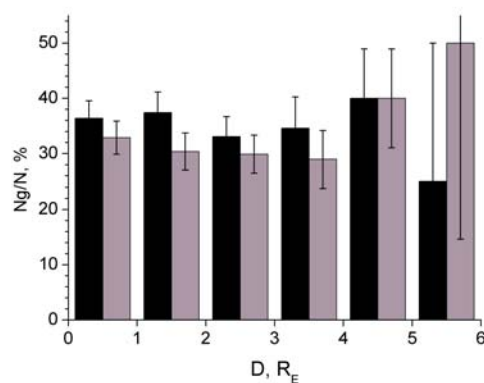


Рисунок 4. Зависимость вероятности наблюдения высокой корреляции от расстояния между точкой наблюдения в МСЛ и магнитопаузой.

В ряде работ [например, *Gutynska et al.*, 2012] показано увеличение амплитуды флуктуаций параметров магнитного поля в МСЛ при приближении спутника к магнитопаузе. Таким образом, при увеличении уровня флуктуаций корреляция параметров МСЛ с параметрами СВ должна уменьшаться. Мы рассмотрели зависимость N_g/N от расстояния между спутником в МСЛ и магнитопаузой - D . Положение магнитопаузы было рассчитано с использованием модели (*Shue et al.*, 1997). Указанная зависимость приведена на рис. 4. Большие ошибки на расстояниях $D > 4 R_E$ связаны с устройством орбиты спутников THEMIS: большую часть рассматриваемого периода они находятся в подсолнечной области, а не на фланге магнитослоя. Никакой зависимости от расстояния между точкой измерения в МСЛ и магнитопаузой не наблюдается. Возможно, это связано с тем, что мы используем сглаженные данные, подавляя тем самым высокочастотную компоненту флуктуаций параметров МСЛ.

Поскольку уровень корреляции сильно зависит от параметра RSD, для дальнейшего изучения мы выбрали только интервалы с $RSD > 10\%$, то есть интервалы, на которых в СВ наблюдаются структуры с большими амплитудами. Значение $RSD = 10\%$ соответствует амплитуде структур $\sim 20\%$ при нормальных условиях в СВ. На рис. 5 представлена зависимость N_g/N от: а) угла θ_{BN} , б) плотности плазмы СВ, в) модуля межпланетного магнитного поля, и г) от скорости плазмы солнечного ветра. θ_{BN} – угол между направлением нормали к ОЗУВ и межпланетным магнитным полем. Данный угол, как было показано в литературе [см. например, *Shevryev and Zastenker*, 2005] является ключевым фактором, определяющим уровень флуктуации параметров плазмы и магнитного поля в МСЛ за ОЗУВ. Как видно из рис. 5, взаимное направление межпланетного магнитного поля и нормали к ОЗУВ существенно влияет на уровень корреляции между параметрами СВ и МСЛ. Однако даже при $\theta_{BN} \sim 90^\circ$ высокая корреляция наблюдается менее чем в 60% случаев. Из рис. 5 также следует, что корреляция между параметрами СВ и МСЛ увеличивается при увеличении плотности плазмы СВ и модуля межпланетного магнитного поля и не зависит от скорости плазмы в СВ.

Заключение и выводы

Структуры плазмы и магнитного поля солнечного ветра подвергаются существенным изменениям в магнитослое. Проанализировав коэффициенты корреляции между параметрами плазмы и магнитного поля в СВ и МСЛ на большой статистике, мы выяснили, что:

- Для данных, сглаженных по 100 с коэффициент корреляции и плотности, и модуля магнитного поля превышает 0.7 в 18% рассмотренных случаев; в 51% случаев корреляция обоих параметров не превышает 0.7. В 31% случаев коэффициент корреляции одного параметра превышает 0.7, а другого – нет.
- Чем больше амплитуда структуры, пришедшей из солнечного ветра, тем меньше она подвержена видоизменению в магнитослое. Кроме того, вероятность наблюдения высокой корреляции увеличивается при увеличении плотности плазмы солнечного ветра, модуля ММП, угла θ_{BN} и не зависит от скорости плазмы солнечного ветра.

– Не наблюдается зависимости коэффициента корреляции между плотностью, а также модулем магнитного поля, солнечного ветра и магнитослоя от расстояния между точкой измерения в магнитослое и магнитопаузой.

Таким образом, было показано, что амплитуда структур и взаимное направление межпланетного магнитного поля и нормали к ОЗУВ, а также плотность плазмы и модуль межпланетного магнитного поля являются основными факторами, влияющими на модификацию структур СВ при пересечении ОЗУВ и движении по МСЛ. Результаты являются статистически обоснованным и могут быть использованы для разработки моделей солнечно-земных связей.

Данная работа была поддержана грантом РФФИ 13-02-00819.

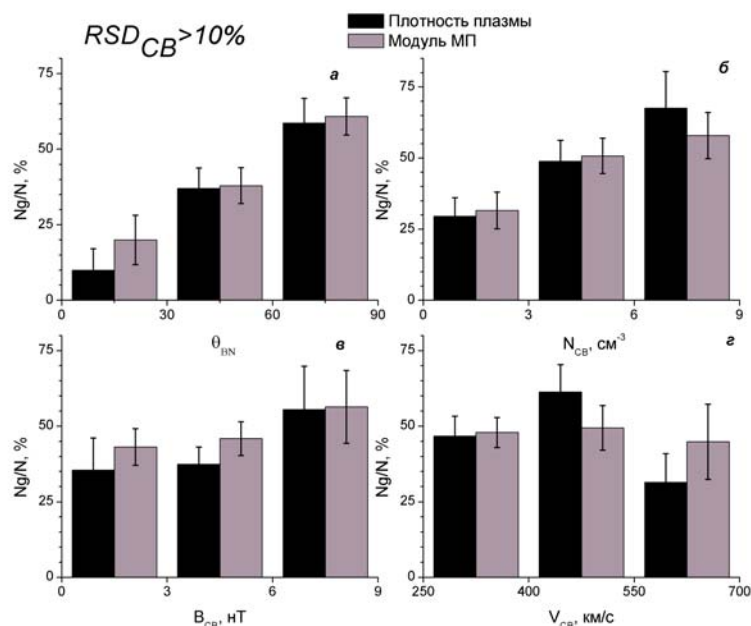


Рисунок 5. Зависимость вероятности наблюдения высокой корреляции от: **а)** угла θ_{BN} , **б)** плотности плазмы СВ, **в)** модуля межпланетного магнитного поля, **г)** скорости плазмы СВ.

Список литературы

- Gutynska O., J. Simunek, J. Safrankova, Z. Nemecek, L. Prech, Multipoint study of magnetosheath magnetic field fluctuations and their relation to the foreshock, *J. Geophys. Res.*, 117, A04214, doi: 10.1029/2011JA017240, 2012.
- Nemecek Z., J. Safrankova, P. Pisoft, G. N. Zastenker, Statistical Study of ion flux fluctuations in the Magnetosheath. *Czech. J. of Phys.*, 51, 853-862, 2001.
- Rakhmanova L. S., M. O. Riazantseva, G. N. Zastenker, Dynamics of the small-scale solar wind structures with sharp boundaries under transfer from the solar wind to magnetosheath, in *WDS'12 Proceedings of Contributed Papers: Part II – Physics of Plasmas and Ionized Media* (eds. J. Safrankova and J. Pavlu), Prague, Matfyzpress, 176–181, 2012.
- Rakhmanova L., M. Riazantseva, G. Zastenker, J. Safrankova, Modification of small- and middle-scale solar wind structures by the bow shock and magnetosheath: correlation analysis, *Planet. Space Sci.*, 115, 12-18, doi: 10.1016/j.pss.2015.03.003, 2015.
- Safrankova J., Z. Nemecek, L. Prech, A. A. Samsonov, A. Koval, K. Andreeva, Modification of interplanetary shock near the bow shock and through the magnetosheath, *J. Geophys. Res.*, 112, A08212, doi: 10.1029/2007JA012503, 2007.
- Safrankova J., M. Hayosh, O. Gutinska, Z. Nemecek, L. Prech, Reliability of prediction of the magnetosheath Bz component from the interplanetary magnetic field observations, *J. Geophys. Res.* 114 A12213. doi: 10.1029/2009A014552, 2009.
- Shevyrev N., G. Zastenker, Some features of plasma flow in the magnetosheath behind the quasi-parallel and quasi-perpendicular bow shock, *Planet. Space Sci.*, 53, 95-102, 2005.
- Shue J.-H., J. K. Chao, H. C. Fu, K. K. Khurana, C. T. Russel, H. J. Singer, P. Song, A new functional form to study solar wind control of the magnetopause size and shape, *J. Geophys. Res.*, 102, 9497-9511, doi: 10.1029/97JA00196, 1997.
- Spreiter J.R., A. L. Summers, A. Y. Alksne, Hydromagnetic flow around the magnetosphere, *Planet. Space Sci.*, 14, 223, 1966.