

DOI: 10.25702/KSC.2588-0039.2019.42.111-114

ЧАСТОТНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУР МАГНИТНЫХ ОБЛАКОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

О.М. Бархатова¹, Н.А. Бархатов², В.Г. Воробьев³, С.Е. Ревунов², Д.С. Долгова²

¹Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Нижний Новгород

²Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина,
г. Нижний Новгород

³ФГБНУ "Полярный геофизический институт", г. Апатиты, Россия

Аннотация. В предлагаемой работе исследован УНЧ спектральный состав оболочек и переднего края тел магнитных облаков солнечного ветра различной протяженности для 33 событий. Анализ спектральной динамики модуля межпланетного магнитного поля, скорости и концентрации солнечного ветра позволил установить границы оболочек облаков и отметить области перехода к телу облака. Во всех случаях при переходе от оболочки к телу облака отмечается резкое ослабление интенсивности возмущений для всех анализируемых параметров. Характерный диапазон регистрируемых в оболочках облаков периодов УНЧ возмущений составляет от 15 до 25 минут в низкочастотной части спектра и порядка 5 минут для высокочастотной части. В телах изучаемых магнитных облаков кроме низкочастотных колебаний с периодами порядка 15-25 минут, регистрируются и высокочастотные возмущения, но в более широком диапазоне (2,5 - 10 минут).

Введение

Прямые измерения межпланетного магнитного поля на космических аппаратах показали, что одним из типов наблюдаемых корональных плазменных потоков являются магнитные облака солнечного ветра [Kilpua et al., 2013]. В структуре магнитного облака можно выделить ударную волну, турбулентную оболочку между ударной волной и ведущим краем магнитного облака, тело облака содержащее повышенные значения магнитного поля. Существует мнение, что основным источником отрицательной V_z компоненты ММП является тело облака [Wu and Lepping, 2002], и именно эта часть наиболее геоэффективна. Однако в работах [Farrugia et al., 1998; Бархатов и др., 2011] отмечено, что наличие у магнитных облаков оболочки заметно влияет на прогнозируемый уровень геомагнитной возмущенности [Клейменова и др., 2003]. Оболочки являются следствием МГД явлений, обусловленных сверхальевновским движением облаков в замагниченном солнечном ветре. В работе [Kilpua et al., 2013] были изучены УНЧ флуктуации межпланетного магнитного поля (ММП) и динамического давления солнечного ветра (СВ) при анализе 41 оболочки облаков, наблюдаемых во время 23 солнечного цикла. Авторы отмечают сильные колебания мощности около ударной волны и в непосредственной близости от переднего края тела облака. Важно, что УНЧ возмущения для ММП и динамического давления имеют различные профили внутри оболочки: возмущения магнитного поля усиливаются в ведущей части оболочки, в то время как возмущения давления нарастают к ее задней части. Распределение мощности УНЧ возмущений по оболочкам также отличается. В оболочках быстрых облаков УНЧ имеют большие амплитуды, и наблюдаются значительные расхождения в значениях мощности возмущений по всей оболочке. Более медленные облака имеют сравнительно незначительный уровень УНЧ возмущений, при этом отмечается резкий спад мощности на их переднем фронте.

Целью предлагаемого исследования является определение частотных особенностей УНЧ возмущенности оболочек и переднего края тел магнитных облаков различной протяженности, следующих за ударной волной. Анализ амплитудного частотного распределения УНЧ возмущений внутри оболочек облаков полезен для установления физических механизмов генерации магнитосферно-ионосферных возмущений.

Используемые данные и методы исследования

В работе изучены спектральные особенности МГД возмущений УНЧ диапазона в структурах 33 событий магнитных облаков (МО), опережаемых ударными волнами и следующими за ними оболочками различной протяженности. Рассмотренные события были разделены на две группы: облака с оболочками малой протяженности не более двух часов и облака с оболочками протяженностью более 2 часов. Вторая группа магнитных облаков предваряется ударными волнами, отошедшими по отношению к телам облаков далеко вперед по потоку солнечного ветра ввиду их высокой скорости.

Предлагаемое исследование выполнено по минутным данным параметров СВ (скорость V , концентрация протонов N) и межпланетного магнитного поля (модуль B), полученных со спутниковой системы OMNI (<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov>). Установление границ структур МО выполнялось на основе изучения динамики рассматриваемых параметров. Анализ спектральных особенностей элементов структуры магнитных облаков был проведен с помощью сонограмм, Фурье-спектров и вейвлет-спектров с базовой функцией Добеши 4-го порядка в интервале периодов от 5 до 30 минут. Предпринятое исследование выполнялось для оболочек облаков, следующих за ударными волнами и переднего края тел облаков. При этом в оболочках спектры изучались на участках отвечающих интервалам сразу за ударной волной, между ударной волной и границей тела облака (в оболочке) и сразу на интервале за границей тела облака.

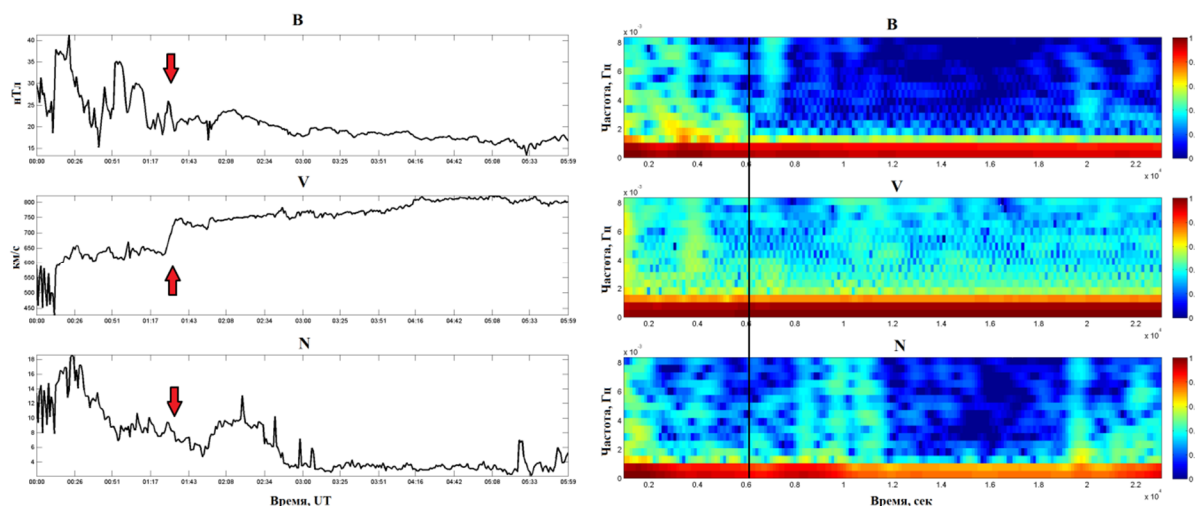


Рисунок 1. Динамика B , V и N в оболочке и на переднем крае тела события 05.04.2010. Стрелками отмечен переход из оболочки в тело МО (а); сонограммы B , V и N в оболочке и на переднем крае тела события 10.01.1997. Вертикальной черной линией отмечен переход из оболочки в тело облака (б).

Установление границ для структур МО

Границы оболочек МО и области перехода к телу устанавливались на основе анализа динамики ММП и ПСВ, и подтверждались с помощью сонограмм. Для всех рассматриваемых событий, независимо от продолжительности оболочки, наблюдалось сходное поведение ММП. При переходе из оболочки к телу облака, динамика модуля ММП демонстрирует заметный скачок со снижением его значений. Подобные скачки прослеживаются и в параметрах солнечного ветра. В эти моменты отмечается снижение интенсивности возмущений во всем рассматриваемом диапазоне частот, что отражено на соответствующих сонограммах. Это может свидетельствовать об ослаблении волновых процессов в теле МО по сравнению с оболочкой. На рис. 1 представлены динамика (а) и сонограммы (б) модуля ММП (B), скорости СВ (V) и концентрации протонов СВ (N) в оболочке и на переднем крае тела события 05.04.2010. Стрелками отмечен переход из оболочки в тело МО. Вертикальной черной линией отмечен переход из оболочки в тело облака.

Особенности оболочек МО малой протяженности (менее 2 часов)

В группу магнитных облаков с оболочками малой протяженности попали магнитные облака с оболочками длительностью до 100 минут. Фурье и вейвлет спектральный анализ для данных событий продемонстрировал уменьшение спектральной интенсивности возмущений от оболочки к телу МО. Полученные результаты полностью согласуются с выводами, сделанными на основе сонограмм.

Выполненный анализ фурье-спектров показывает, что для оболочки продолжительностью 30 мин и передней части оболочки 100 мин наклон спектра возмущений магнитного поля свидетельствует о существовании здесь развитой турбулентности (рис. 2а). В задней части оболочки продолжительностью 100 мин интенсивность турбулентности снижается и на ее фоне возникает область характерных частот НЧ части спектра от 2,5 до 4 мГц (на рис. 2б эта область отмечена овалом). В телах облаков, в отличие от их оболочек, всегда можно выделить область характерных частот, имеющих наибольшую амплитуду. Им отвечают возмущения в диапазоне 2-6 мГц (рис. 2в).

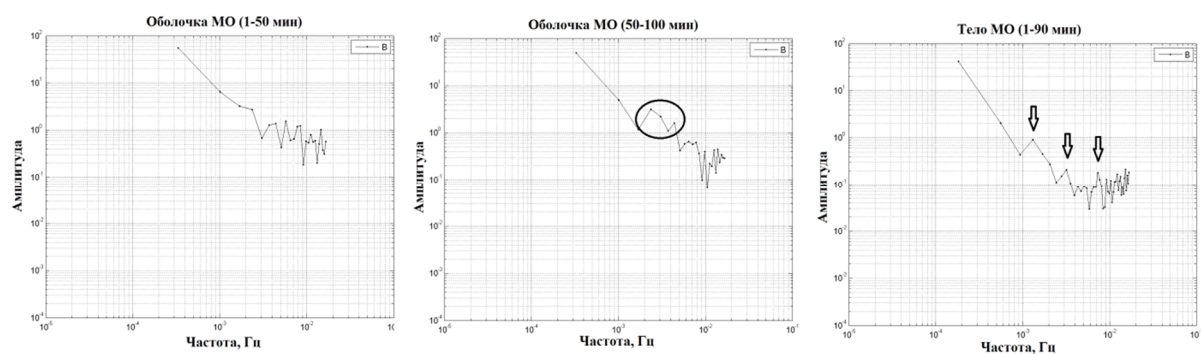


Рисунок 2. Спектры Фурье модуля ММП последовательно слева направо: в передней части оболочки, задней части оболочки и за оболочкой на переднем крае тела МО для события 10.01.1997.

Выполненный анализ вейвлет-спектров для рассматриваемой группы событий позволил установить, что в оболочках МО малой протяженности и их телах регистрируются УНЧ возмущения в параметрах ПСВ и ММП в НЧ (периоды 15-25 минут) и ВЧ (периоды 2,5 – 10 минут) диапазонах. На рис. 3 представлены вейвлет-спектры В, V и N для события 05.04.2010. Вертикальной черной линией отмечено время перехода от оболочки к телу облака. Отметим, что для модуля ММП наблюдается каскад возмущений вверх по частоте в виде последовательности спектральных максимумов. На рис. 3 эта область отмечена овалом. Здесь можно видеть затухание турбулентных процессов в малых масштабах в задней части оболочки МО.

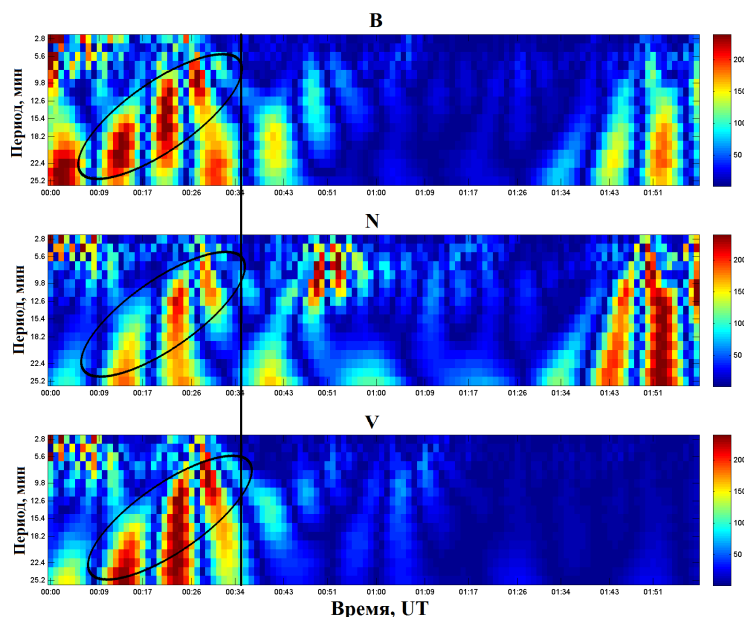


Рисунок 3. Вейвлет-спектры В, V, N для события 05.04.2010. Вертикальной черной линией отмечено время перехода от оболочки к телу облака.

Особенности оболочек МО большой протяженности (более 2 часов)

Анализ фурье-спектров для облаков с протяженными оболочками показывает, что для данной группы событий имеют место характерные частоты как в оболочках, так и в телах облаков. Диапазон регистрируемых частот на переднем крае и в задней части оболочки составляет 3 - 10 мГц, что соответствует периодам 2 - 5 минут. Эта частотная особенность всех рассмотренных протяженных оболочек отличает их от непродолжительных, в которых, как было отмечено выше, характерные частоты могут отсутствовать. Фактически это означает, что такие продолжительные оболочки не являются в полной мере турбулентными областями. Они представляют собой структуры с сильными флуктуациями магнитного поля, скорости и концентрации СВ, превышающими флуктуации в теле облака. Это следует, в том числе, из сопоставления интенсивностей спектров. По сравнению с оболочками в телах МО имеют место и более низкочастотные колебания 1-2 мГц (периоды 8-17 минут). ВЧ части спектра оболочек и тел характеризуются частотами в близких диапазонах 6-8 мГц (периоды 2-3 минуты).

Выполненный спектральный вейвлет-анализ компонент ММП и ПСВ для исследуемых событий МО с продолжительными оболочками позволяет сделать дополнительные выводы об уровне и частотно-временном

распределении возмущенности внутри их оболочек и на переднем крае тел облаков. Для событий с протяженными оболочками характерны УНЧ возмущения в диапазоне 5-25 минут, которые следуют сериями каскадов возмущений вверх по частоте в виде последовательности спектральных максимумов (отмечены на рис. 4 овалами). Это может свидетельствовать о наличии турбулентного режима не во всей оболочке, а только в данных областях. Таким образом, продолжительные оболочки отличаются наличием перемежаемости турбулентности.

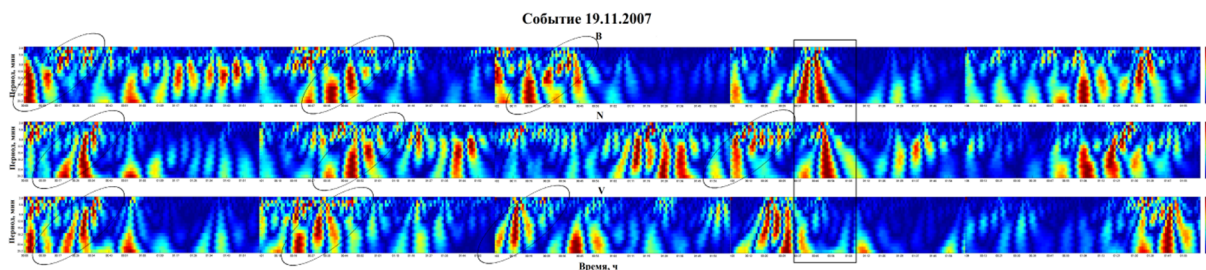


Рисунок 4. Вейвлет-спектры В, V, N для события 19.11.2007. Черным прямоугольником отмечено время перехода от оболочки к телу облака. Овалами выделены группы возмущений с каскадами спектральных максимумов.

Выводы

Исследован УНЧ спектральный состав оболочек и переднего края тел магнитных облаков различной протяженности для 33 событий. На основе анализа динамики возмущений модуля ММП, скорости и концентрации СВ установлены границы оболочек облаков. Во всех случаях при переходе от оболочки к телу облака отмечается резкое ослабление интенсивности возмущений всех анализируемых параметров. В оболочках и телах МО УНЧ возмущения регистрируются в НЧ (периоды 15-25 минут) и ВЧ (периоды 2,5 – 10 минут) диапазонах.

Распределения интенсивностей регистрируемых УНЧ возмущений отличаются для оболочек малой и большой протяженности. В оболочках малой протяженности (менее 2 ч) УНЧ возмущенность содержит каскад возмущений вверх по частоте в виде последовательности спектральных максимумов с постепенным затуханием турбулентности в малых масштабах. В оболочках большой протяженности (более 2 ч) УНЧ возмущения следуют сериями каскадов возмущений вверх по частоте, что свидетельствует о наличии перемежаемости турбулентности. Выполненный анализ амплитудного и частотного распределения УНЧ возмущений внутри оболочек облаков полезен для установления физических механизмов генерации магнитосферно-ионосферных возмущений вызываемых магнитными облаками солнечного ветра.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №16-05-00608, №18-35-00430 и Госзадания Минобрнауки РФ № 5.5898.2017/8.9. Работа Бархатовой О.М. и Долговой Д.С. поддержана грантом РФФИ №18-35-00430. Работа Воробьева В.Г. выполнена при поддержке Программы Президиума РАН «Арктика – научные основы новых технологий освоения, сохранения и развития». Работа Бархатова Н.А., Ревунова С.Е. выполнена в рамках Госзадания Минобрнауки РФ №5.5898.2017/8.9. Авторы благодарят администрацию веб-узлов <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/> и <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/> за предоставление свободного доступа к размещенным на них материалам и базам данных.

Литература

- Farrugia C.J. et al., Geoeffectiveness of three Wind magnetic clouds: a comparative study // J. Geophys. Res., V.103, N A8, P.17261-17278, 1998.
- Kilpua E. K. J., Isavnin A., Vourlidas A., Koskinen H. E. J., and Rodriguez L. On the relationship between interplanetary coronal mass ejections and magnetic clouds // Ann. Geophys., 31, p. 1251–1265, 2013. doi:10.5194/angeo-31-1251-2013.
- Wu C. C., Lepping R. P. Effects of magnetic clouds on the occurrence of geomagnetic storms: The first 4 years of Wind // J. Geophys. Res., V. 107. N A10, P. 1314-1321. 2002. doi:10.1029/2001JA000161.
- Бархатов Н.А., Ревунова Е.А., Левитин А.Е. Краткосрочный прогноз интенсивности геомагнитных бурь, ожидаемых при воздействии магнитных облаков на магнитосферу Земли // Сб. Солнечно-земная физика, вып. 19. с. 40-45, 2011.
- Клейменова Н. Г., Козырева О. В., Шотт Ж. Ж. Волновой геомагнитный отклик магнитосферы на подход к земле межпланетного магнитного облака (14-15 июля 2000 г., "Bastilledayevent") // Геомагнетизм и аэрномия, Т.43, № 3, с. 321-331, 2003.