

ГЕОМАГНИТНАЯ АКТИВНОСТЬ СТРУКТУРЫ МАГНИТНЫХ ОБЛАКОВ

Н.А. Бархатов¹, Е.А. Ревунова², Р.В. Романов¹, А.Б. Виноградов¹

¹Нижегородский государственный педагогический университет, г. Нижний Новгород

²Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, г. Нижний Новгород

Аннотация. Работа посвящена исследованию геомагнитной активности быстрых магнитных облаков солнечного ветра, сопровождающихся ударными волнами и турбулентными оболочками. Предположено, что геомагнитная активность обусловлена параметрами солнечного ветра изменившимися в результате воздействия на него ударной волны облака. В результате этого структура подходящего к магнитосфере магнитного облака постоянно меняется. Для оценки данной эволюции определены локальные ориентации плоскостей ударных волн и рассчитана ожидаемая на границе магнитосферы последовательность значений геоэффективной Vz компоненты межпланетного магнитного поля (ММП) в солнечно-магнитосферной системе координат. Сопоставление динамики AL индекса с измеряемыми на КА значениями Vz компоненты и с вычисленной последовательностью значений Vz на границе магнитосферы свидетельствует о необходимости учета эволюции ММП солнечного ветра на ударной волне магнитного облака.

1. Введение

Согласно современным представлениям, магнитные облака солнечного ветра вызывают наиболее интенсивные геомагнитные возмущения. На переднем фронте быстрых магнитных облаков часто образуются ударные волны, которые характеризуются резким одновременным скачком параметров солнечного ветра (скорость, концентрация, температура). За ударными волнами следуют области с флуктуациями компонент ММП и повышенной плотностью, называемые оболочкой облака [Ермолаев и др., 2009]. Оболочка перед магнитным облаком – это область сжатия, возникающая при его движении в более медленном солнечном ветре. Она представляется плотной, горячей турбулентной областью с сильной флуктуацией компонент межпланетного магнитного поля, резко прекращающихся на ведущем крае магнитного облака. Магнитные облака имеющие перед собой оболочку являются источниками, как правило, сильных или экстремальных магнитных бурь и для большинства магнитных облаков начало соответствующих им геомагнитных возмущений приходится на ударную волну и оболочку [Бархатов и др., 2014, Barkhatov et al., 2015]. Таким образом, наличие оболочки у магнитных облаков увеличивает их геоэффективность и снижает качество прогнозирования геомагнитной активности основанное на учете только зарегистрированных на КА значений отрицательной Vz компоненты ММП в теле облака [Бархатов и др., 2011]. В связи с этим для осуществления более точного прогнозирования геомагнитной активности необходимо учитывать и потенциальную геомагнитную эффективность физических процессов на переднем фронте магнитных облаков. Геомагнитная активность вызываемая оболочкой магнитных облаков может являться результатом действия на магнитосферу Земли параметров солнечного ветра изменившихся на ударной волне облака. В настоящей работе проводится оценка вклада в геомагнитную активность этого обстоятельства. Для этого определены локальные ориентации плоскостей ударных волн магнитных облаков и рассчитана ожидаемая на границе магнитосферы последовательность значений геоэффективной Vz компоненты в солнечно-магнитосферной системе координат. Выполнено сопоставление ожидаемой последовательности вычисленных значений Vz с динамикой AL индекса, характеризующего суббуриевую геомагнитную активность. Исследование выполнено на 75 событиях, зарегистрированных в околоземном космическом пространстве с 1973 по 2012 гг. (по данным спутниковой системы OMNI и с КА ACE http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/istp_public/), определенных в литературе как магнитные облака [Lepping et al., 2002, Zhang et al., 2004, Yan et al., 2013, Kilpua et al., 2012].

2. Уточнение границ структурных элементов магнитных облаков

Установление времени регистрации на патрульном КА ACE ударной волны и уточнение границ оболочки и начала тела магнитного облака проводилось на основе спектрального анализа флуктуаций модуля ММП с минутным разрешением в диапазоне частот 0,0001-0,0083 Гц. На Рис.1а показан динамический спектр (нижняя панель), полученный по спутниковым данным о значениях модуля ММП (верхняя панель) за временной интервал, включающий солнечный ветер, магнитное облако 15.07.2000 с ударной волной и оболочкой. Из Рис. 1а следует, что оболочка облака характеризуется высокочастотными колебаниями магнитного поля, а в теле облака присутствуют в основном низкочастотные колебания. Следовательно, если

рассматриваемый поток данных разложить в ряд Фурье, затем удалить низкочастотные составляющие спектра и выполнить обратную свертку оставшихся гармоник, то в полученной последовательности данных останутся только высокочастотные колебания модуля магнитного поля, характеризующие оболочку облака. Таким образом можно уточнить границы оболочки магнитных облаков. Поскольку оболочка представляет собой область за ударной волной, следовательно, ее передняя граница соответствует ударной волне. На Рис.1b показаны результаты такой обработки данных для магнитного облака 15.07.2000. Верхняя панель соответствует результатам свертки высокочастотных гармоник из ряда Фурье, нижняя панель – динамический спектр, построенный на ее основе.

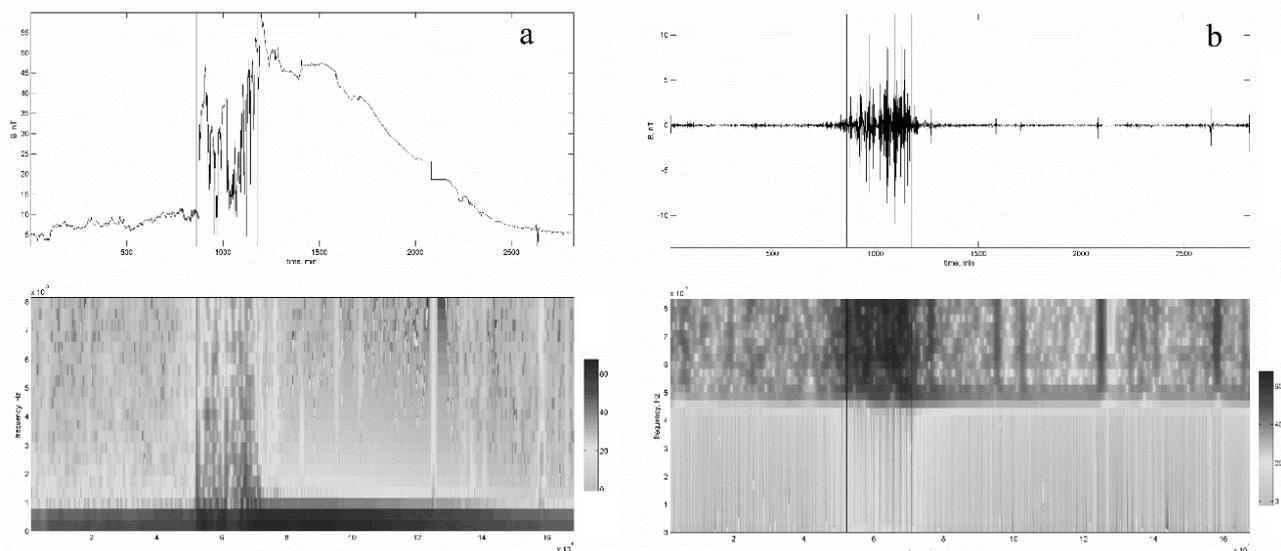


Рисунок 1. а) Динамический спектр исходных данных по модулю межпланетного магнитного поля; б) Динамический спектр высокочастотной части данных.

В результате проведенного спектрального анализа установлено, что при переходе из солнечного ветра в турбулентную оболочку мощность высокочастотной части спектра увеличивается в среднем на 2 порядка; а при переходе из оболочки в тело магнитного облака мощность высокочастотной части спектра напротив уменьшается на 2-4 порядка.

3. Условия существования магнитных облаков сопровождаемых ударными волнами

Определение условий возникновения ударных волн перед магнитными облаками выполнено путем анализа распределения основных параметров среды и магнитного поля в теле магнитных облаков по их скоростям $V_{отн}$ относительно солнечного ветра. Из рассмотренных 75 облаков 29 не имели ударных волн, а остальные 46 ими сопровождались. В качестве основных параметров магнитных облаков рассматривались их скорость относительно солнечного ветра ($V_{отн}$), скорости альвеновских (V_a) и звуковых (V_s) волн в теле облака, концентрация (n), гидродинамическое (p) и магнитное (p_m) давления и температура (T). На Рис.2, в качестве примера, показаны полученные распределения скорости альвеновских и звуковых волн (Рис.2а, б, соответственно). На диаграммах Рис. 2 треугольники отвечают магнитным облакам без ударных волн, кружки – облакам с ударными волнами.

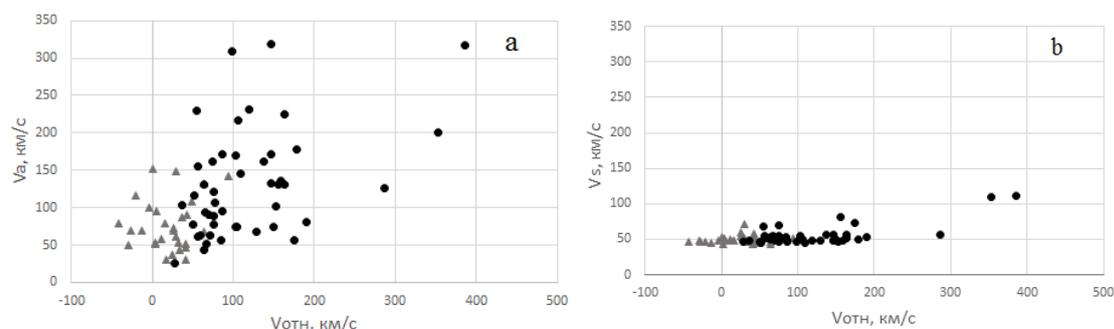


Рисунок 2. Распределение скорости альвеновских V_a (а) и звуковых V_s (б) волн, зарегистрированных в теле магнитных облаков, в зависимости от скорости облаков относительно солнечного ветра.

Полученные распределения показывают, что большинство магнитных облаков с ударной волной двигаются относительно солнечного ветра со скоростями, превышающими 50 км/с. Альвеновская скорость в теле облака в целом увеличивается с ростом относительной скорости, в то время, как скорость звуковых волн практически не меняется с ростом относительной скорости. Это может говорить об участии магнитного давления в ускорении облака. Распределение остальных параметров межпланетной среды не зависит от наличия ударных волн перед облаками. Таким образом, основным условием существования ударных волн перед облаками является превышение скорости облака над скоростью солнечного ветра более чем на 50 км/с.

4. Расчет изменившейся на ударной волне геоэффективной Vz компоненты ММП и её сопоставление с динамикой AL индекса

Расчет значений измененной на ударной волне магнитного облака Vz компоненты магнитного поля потребовал определения локальных ориентаций плоскостей ударных волн магнитных облаков. По одномерным измерениям ММП и параметров солнечного ветра ориентация ударных волн, связанных с облаками, может быть установлена с помощью теоремы о компланарности ММП [Хундхаузен, 1976], согласно которой нормаль к ударной волне параллельна векторному произведению

$$\mathbf{V}' = \Delta\mathbf{B} \times (\mathbf{V}_1 \times \mathbf{V}_2)$$

Здесь \mathbf{V}_1 – магнитное поле перед ударной волной, \mathbf{V}_2 – магнитное поле за ней, $\Delta\mathbf{B} = \mathbf{V}_2 - \mathbf{V}_1$. Таким образом, определение локальной ориентации ударного фронта возможно по данным о компонентах ММП до ударной волны и после нее.

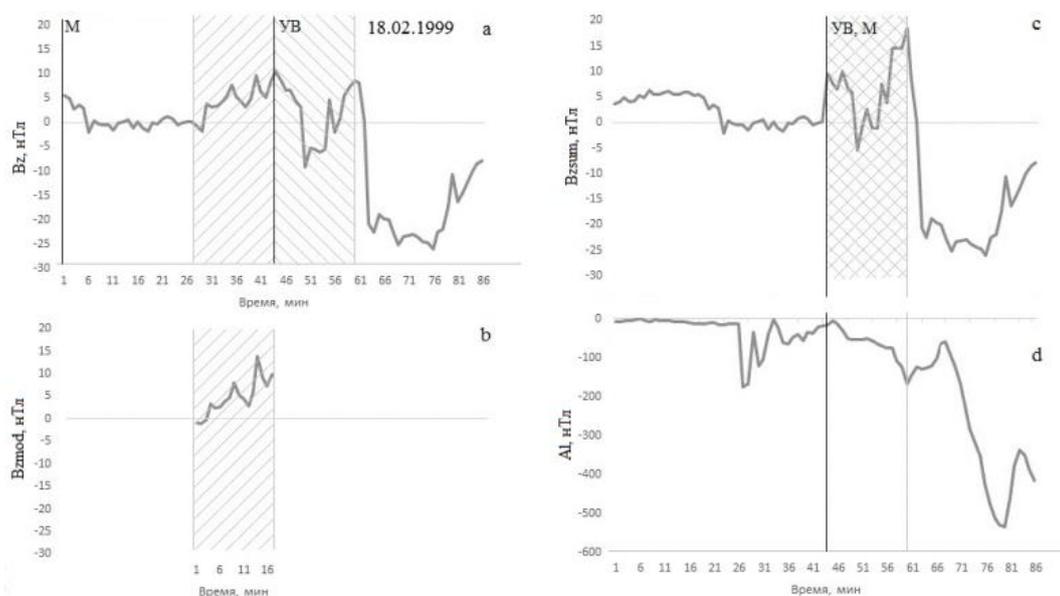


Рисунок 3. Сопоставление значений Vz компоненты ММП, зарегистрированных на КА (а), измененных значений Vzmod компоненты ММП на ударной волне (b), результирующих значений Vzsum компоненты ММП (c) и динамики AL-индекса (d) для магнитного облака 18.02.1999

Установление ориентаций ударных волн, связанных с магнитными облаками, выполнялось по пятиминутным данным о компонентах ММП. В результате были определены два угла β и ϵ , характеризующие ориентацию нормали к ударной волне в межпланетном пространстве. Полученные сведения об ориентации ударного фронта магнитного облака позволяют рассчитать значения нормальных и тангенциальных компонент ММП к плоскости ударной волны до и после нее. Условия на ударном разрыве дали возможность получить выражение для вычисления значений геоэффективной Vz компоненты в оболочке облака.

Расчет изменившихся на ударной волне значений Vz компонент ММП был выполнен по минутным данным о параметрах межпланетной среды, зарегистрированных на КА, для 13 магнитных облаков. В качестве примера, демонстрирующего алгоритм исследования, приведем результаты анализа одного магнитного облака. Сначала рассчитывался временной интервал данных в солнечном ветре, способных эволюционировать в результате воздействия на него ударной волны магнитного облака. Он соответствует разнице времени движения потока солнечного ветра и ударной волны от КА до магнитосферы (Рис. 3а, штриховка с наклоном вправо). На Рис. 3 для магнитного облака 18.02.1999 показана динамика значений Vz зарегистрированных на КА (Рис. 3а) и измененных на ударной волне Vzmod (Рис. 3б) компонент ММП.

Поток солнечного ветра, проходя сквозь ударную волну, попадает в более плотную и быструю среду и увлекается ею. В связи с этим, результирующие значения Bz_{sum} компоненты ММП могут быть получены суммированием изменившихся на ударной волне значений (Bz_{mod}) и зарегистрированных (Bz) за ударной волной на КА. Эти значения (Bz_{sum}) представлены на Рис. 3с и имеют непосредственное отношение к взаимодействию замагниченного солнечного ветра с земной магнитосферой. Положение ударной волны (УВ) и положение границы магнитосферы (М) также показано на Рис. 3.

Для оценки влияния на суббуревую активность параметров солнечного ветра, меняющихся на ударной волне магнитных облаков, был проведен корреляционный анализ динамики AL-индекса со значениями Bz компоненты ММП, полученными тремя способами: 1) значения Bz компоненты, зарегистрированные на КА, 2) рассчитанные значения Bz_{mod} компоненты, 3) значения Bz_{sum} компоненты ММП, полученные в результате суммирования Bz и Bz_{mod} компонент. Кроме того, рассмотрению подлежали интегральные величины ΣBz , ΣBz_{mod} , ΣBz_{sum} , ΣVBz , ΣVBz_{mod} и ΣVBz_{sum} (V – скорость потока солнечного ветра), полученные путем суммирования соответствующих значений за предшествующий величине AL интервал времени в 30 мин. В результате выполненного корреляционного анализа было установлено, что коэффициент корреляции максимален (0,6-0,97) при использовании интегральной величины компоненты ΣBz_{sum} .

5. Заключение

Выполнено исследование геомагнитной активности быстрых магнитных облаков сопровождающихся ударными волнами и турбулентными оболочками. На основе спектрального анализа показано, что оболочки облаков характеризуются высокочастотными колебаниями модуля магнитного поля. Переход из солнечного ветра в турбулентную оболочку сопровождается увеличением мощности высокочастотной части спектра в среднем на 2 порядка; а при переходе из оболочки в тело магнитного облака соответствующая мощность напротив уменьшается на 2-4 порядка. Таким образом, путем удаления низкочастотных составляющих спектра и сравнением мощности высокочастотной части точно установлены время регистрации ударной волны и границы оболочки магнитных облаков. Условием существования ударных волн перед облаками является превышение скорости облака скорости солнечного ветра более чем на 50 км/с. По всей вероятности, в ускорении облака играет роль магнитное давление в его теле.

Оценка геоэффективности магнитных облаков с ударными волнами требует учета изменений на ударной волне компонент ММП в солнечном ветре, поглощаемым быстрым облаком. Определены локальные ориентации плоскостей ударных волн магнитных облаков и на их основе выполнен расчет ожидаемой на границе магнитосферы последовательности значений геоэффективной Bz компоненты в солнечно-магнитосферной системе координат.

Выполнен корреляционный анализ динамики AL индекса с измеряемыми на КА значениями Bz компоненты и с вычисленными последовательностями значений Bz_{mod} и Bz_{sum} компонент ММП. Показано существенное увеличение значений коэффициентов корреляции для интегральных значений Bz_{sum} компоненты взятых за предшествующий 30 минутный интервал. При этом коэффициенты корреляции для всех рассматриваемых облаков оказываются выше 0,6 и достигают значений 0,9. Это свидетельствует о необходимости учета эволюции межпланетного магнитного поля солнечного ветра на ударной волне магнитного облака.

Литература

- Хундхаузен А. Расширение короны и солнечный ветер. М.: Мир. 1976. 302 с.
- Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина, И.Г., Ермолаев М.Ю. Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976 – 2000 г. // Космические исследования. Т. 47. № 2. С. 99–113. 2009
- Бархатов Н.А., Е.А. Ревунова, А.Е. Левитин. Краткосрочный прогноз интенсивности геомагнитных бурь, ожидаемых при воздействии магнитных облаков на магнитосферу Земли // Солнечно-земная физика. Вып. 19. С. 40-45. 2011
- Бархатов Н.А., Левитин А.Е., Ревунова Е.А. Классификация комплексов космической погоды с учетом типа солнечного источника, характеристик плазменного потока и создаваемого им геомагнитного возмущения // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 54. № 2. С. 185-191. 2014
- Barkhatov N. A., A. B. Vinogradov, A. E. Levitin, E. A. Revunova. Geomagnetic Substorm Activity Associated with Magnetic Clouds // Geomagnetism and Aeronomy. V. 55. № 5. P. 596–602. 2015
- Zhang J., Liemohn M. W., Kozyra J. U., Lynch B. J., Zurbuchen T. H. A statistical study of the geoeffectiveness of magnetic clouds during high solar activity years // J. Geophys. Res. V. 109. A09101. doi:10.1029/2004JA010410. 2004
- Yan Li, J. G. Luhmann, B. J. Lynch and E. K. J. Kilpua. Magnetic clouds and origins in STEREO era // Journal of Geophysical Research. 10.1002/2013JA019538. 2013
- Lepping R.P., D. Berdichevsky, A. Szabo, A.J. Lazarus, B.J. Thompson. Upstream shocks and interplanetary magnetic cloud speed and expansion: Sun, WIND, and Earth observations // COSPAR Colloquia Series. Proceedings of the COSPAR Colloquium. V. 12. P. 87–96. doi:10.1016/S0964-2749(02)80210-4. 2002.
- Kilpua E. K. J., Y. Li, J. G. Luhmann, L. K. Jian, C. T. Russell. On the relationship between magnetic cloud field polarity and geoeffectiveness // Ann. Geophys. V. 30. P. 1037–1050. doi:10.5194/angeo-30-1037-2012. 2012