

МАГНИТНЫЕ ОБЛАКА СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА КАК ПРИЧИНА ВЫСОКОШИРОТНОЙ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ

Н.А. Бархатов¹, А.Е. Левитин², Е.А. Ревунова³, А.Б. Виноградов¹

¹Нижегородский государственный педагогический университет им. Козьмы Минина,
Нижний Новгород

²Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова,
Москва

³Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет,
Нижний Новгород

Абстракт. Работа посвящена установлению особенностей генерации магнитных суббурь межпланетными магнитными облаками, с учетом участия в этом процессе их оболочек. В основу исследования положено сопоставление динамики параметров тонкой структуры магнитных облаков и их оболочек с динамикой аврорального AL-индекса и Dst-индекса глобальной геомагнитной активности. Установлено, что оболочка облака является первоначальным источником высокоширотной активности и дает старт глобальным магнитным бурям, развитие которых обеспечивается параметрами тела магнитного облака. Однако, отдельно оболочка облака редко становится причиной глобальной геомагнитной активности, вызывая, как правило, слабые или умеренные геомагнитные бури. Наиболее часто источником глобальных возмущений становится комбинация оболочки и тела, вызывая при этом классические интенсивные или многоступенчатые магнитные бури.

1. Введение

Магнитные облака солнечного ветра являются одной из основных причин интенсивных геомагнитных возмущений. Это определяется, в основном, их внутренней структурой содержащей важную с точки зрения геоэффективности отрицательную B_z компоненту межпланетного магнитного поля (ММП) [Zhang et al., 2004].

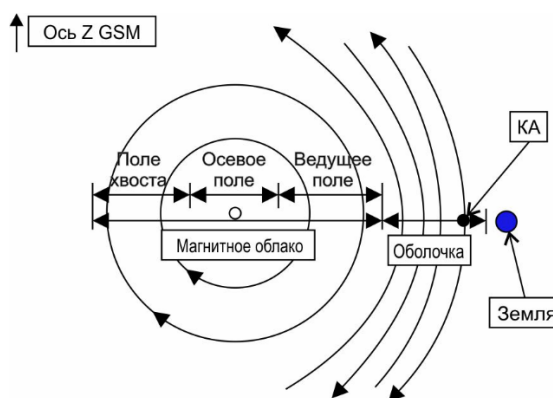


Рисунок 1. Диаграмма магнитного поля облака в плоскости XZ солнечно-магнитосферной системы координат (GSM). Магнитное облако разделено на четыре части: оболочка, ведущая область, осевое и хвостовое поле [Zhang et al., 2004]

В структуре магнитных облаков выделяют оболочку и тело облака содержащее ведущее, осевое и хвостовое поля (Рис. 1) [Zhang et al., 2004]. 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. Эти флуктуации резко прекращаются на ведущем крае магнитного облака. При определенных условиях перед оболочкой может образовываться и межпланетная ударная волна [Zhang et al., 2004]. Ударная волна является кратковременным событием с сильным, резким и одновременным увеличением скорости, плотности и температуры плазмы солнечного ветра [Ермолаев и др., 2009]. Магнитные облака, имеющие перед собой оболочку, являются источниками, как правило, сильных или экстремальных магнитных бурь [Бархатов и др., 2014]. Увеличение геоэффективности магнитных облаков с оболочкой снижает качество прогнозирования глобальной геомагнитной активности основанное на учете только значения отрицательной

Vz компоненты ММП в теле облака [Бархатов и др., 2011]. Это означает, что при прогнозе интенсивности геомагнитной бури необходимо учитывать наличие оболочек.

Высокая потенциальная геоэффективность магнитных облаков проявляется и в высокоширотной области [Дэстирак и др., 2008; Плазменная гелиогеофизика, 2008; Николаева и др., 2011 и ссылки в них]. Основным направлением исследования данных работ является изучение связи между характеристиками авроральных геомагнитных возмущений и параметрами межпланетной среды.

Целью настоящей работы является установление особенностей генерации суббурь магнитными облаками, с учетом участия в этом процессе их оболочек. В основу исследования положено сопоставление динамики параметров тонкой структуры магнитных облаков и их оболочек с динамикой аврорального AL-индекса и Dst-индекса глобальной геомагнитной активности. Исследование проводилось по 1-минутным данным о компонентах ММП, векторе электрического поля, концентрации, скорости, температуре солнечного ветра, а также AL-индекса и Dst-индекса глобальной геомагнитной активности (часовые данные). Использование в работе минутных данных обусловлено высокой скоростью протекания суббуревых процессов. В работе рассмотрено 16 событий солнечных потоков, зарегистрированных в околоземном пространстве с 1995 по 2006 гг. и определенных в литературе и каталогах как магнитные облака [Ермолаев и др., 2009; Бархатов и др., 2011]. Все события имели оболочку.

Сопоставление параметров межпланетной среды в магнитных облаках с динамикой аврорального AL-индекса, проводилось с учетом времени переноса потока от спутника до границы магнитосферы. Время задержки рассчитывалось индивидуально для каждого события, как среднее значение времени за рассматриваемый интервал ударной волны и оболочки магнитного облака [<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov>]. При выполнении исследования обращено внимание на значение поперечной Vr компоненты ММП в потоке солнечного ветра перед ударной волной магнитного облака. Это обусловлено тем, что эта компонента при проникании за ударную волну при определенных условиях может дать вклад в геоэффективную отрицательную Vz компоненту ММП [Бархатов и др., 2001].

2. Ударные волны и оболочки магнитных облаков как причины буревой и суббуревой возмущенности

Наличие ударной волны и оболочки у магнитных облаков устанавливалось на основе визуального анализа динамики параметров солнечного ветра и ММП. Известно, что для ударной волны характерное резкое и одновременное увеличение параметров солнечного ветра, таких как скорость, концентрация и температура. Кроме этого на ударной волне отмечается скачок поперечной компоненты межпланетного магнитного поля [Хундхаузен, 1976; Бархатов и др., 2001]. Согласно уравнению непрерывности $\rho v = const$ скорость потока за ударной волной должна быть ниже, чем перед ней (в системе отсчета, движущейся вместе с плазмой). При переходе в систему отсчета, связанную со спутником, уравнение непрерывности имеет вид:

$$n_1(v_1 - u) = n_2(v_2 - u),$$

где u – скорость переноса ударного фронта по отношению к неподвижному наблюдателю [Хундхаузен, 1976], которая в данном случае определяется соотношением:

$$u = \frac{n_2 v_2 - n_1 v_1}{n_2 - n_1} \quad (1)$$

Используя соотношение (1), мы оценили скорость переноса ударной волны, а, следовательно, и облака с оболочкой, а также вычислили скорость плазменного потока перед ударной волной и за ней.

Оболочка магнитного облака определяется как турбулентная область за ударной волной с сильными флуктуациями компонент межпланетного магнитного поля, высокой плотностью, скоростью и температурой потока [Клейменова и др., 2003; Ермолаев и др., 2009]. Флуктуации компонент ММП резко прекращаются на ведущем крае магнитного облака, температура и концентрация плазмы солнечного ветра падают, Vz компонента вектора ММП меняет знак, а модуль ММП V характеризуется большими и слабо меняющимися значениями [Клейменова и др., 2003].

Скачок значения поперечной составляющей ММП позволяет определить наличие ударной волны перед магнитным облаком и, соответственно, следующей за ней переходной области [Бархатов и др., 2001]. Перечисленные выше условия использовались в работе для установления границ ударных волн и оболочки магнитных облаков. Моменты регистрации на космическом аппарате (КА) тел рассматриваемых магнитных облаков устанавливались по данным каталогов и литературы с часовым разрешением [Ермолаев и др., 2009; Бархатов и др., 2010; http://lepmfi.gsfc.nasa.gov/mfi/mag_cloud_publ.html].

3. Анализ динамики параметров ММП в магнитных облаках с оболочкой, в периоды магнитосферных суббурь

В качестве примера, демонстрирующего алгоритм исследования отобранных облаков, приведем результаты анализа связи высокоширотной геомагнитной активности с магнитным облаком, зарегистрированным в околоземном пространстве 14.12.2006 (Рис. 2). На Рис. 2 тело облака показано не полностью, поскольку

время его регистрации намного больше времени регистрации оболочки. Магнитное облако имело четко выраженную ударную волну и оболочку, продолжительностью 10 ч. Скорость ударной волны составила 1000 км/с (см. (1)). Поперечная компонента ММП увеличилась на ударной волне в 4,3 раза (с 4 до 17 нТл) за счет B_y , а затем и B_z компоненты ММП. Сразу следом за ударной волной наблюдаются сильные флуктуации B_z компоненты. Область ударной волны и оболочки вызвала четыре суббури с интенсивностью по AL-индексу от -800 до -1700 нТл (Рис. 2). Оболочка магнитного облака 14.12.2006 также стала источником слабой геомагнитной бури $Dst=-50$ нТл. Затем тело магнитного облака вызвало сильную бурю с интенсивностью $Dst=-160$ нТл. Тело магнитного облака вызвало и ряд суббурь. Таким образом, в данном случае источниками геомагнитной активности стала комбинация ударной волны, оболочки и тела магнитного облака.

Сопоставление данных о моменте начала магнитного облака, установленного по каталогу и на основе динамики параметров межпланетной среды, показало, что использование минутных данных позволяет более точно установить начало регистрации облака на КА. В данном случае момент начала регистрации облака, указанный в каталоге, в действительности, попадает в область оболочки облака.

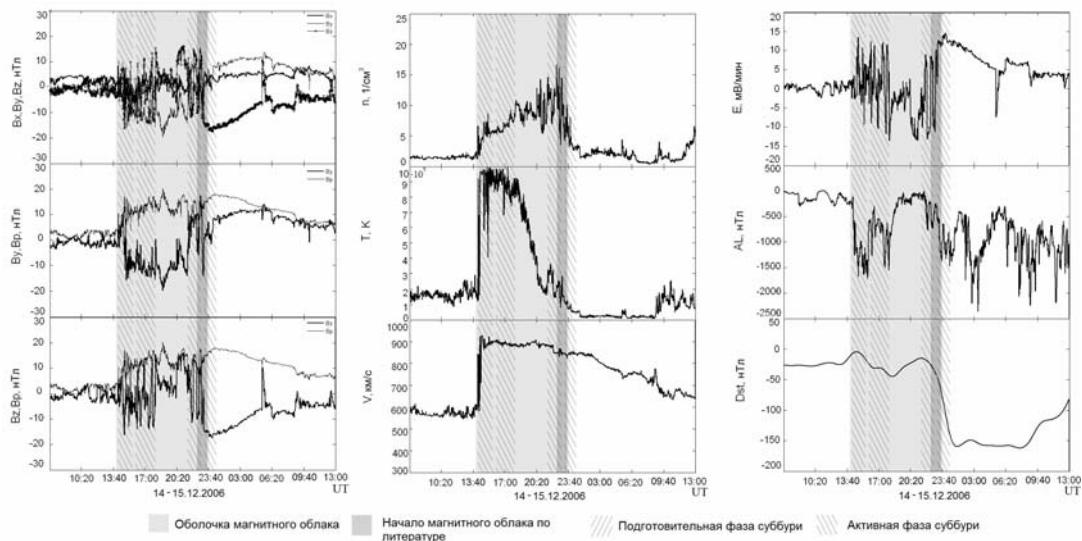


Рисунок 2. Динамика параметров межпланетной среды и индексов полярной и глобальной геомагнитной активности для облака 14.12.2006 с указанием границ оболочки облака, тела облака и фаз суббури. Типы используемой штриховки определены на рисунке

4. Обсуждение полученных результатов и заключение

Выполнено исследование связи высокоширотной геомагнитной активности с магнитными облаками солнечного ветра, с учетом современной возможности использования минутных данных для выделения особенностей структуры параметров плазмы и ММП в системе магнитного облака (ударная волна, оболочка, тело). Сопоставление моментов начала регистрации магнитных облаков, указанных в каталогах по часовым данным, с динамикой параметров межпланетной среды по минутным данным, показало заметное расхождение. В большинстве случаев принятое в каталогах время начала облака приходится на оболочку облака. Таким образом, использование данных высокого разрешения позволяет более точно установить момент регистрации тела магнитного облака.

В результате анализа 16 магнитных облаков, установлено, что перед облаками, движущимися в спокойном потоке солнечной плазмы, образуется ударная волна, а за ней сильно турбулентная плотная горячая область – оболочка. Из шестнадцати рассмотренных событий только одно облако 31.12.2005 не имело ударной волны, но оно наблюдалось на фоне высокоскоростного потока солнечного ветра (~500 км/с). Это облако характеризуется непродолжительной (всего 2 ч) оболочкой. Остальные магнитные облака, в независимости от их скорости, имели ударные волны и оболочки с продолжительностью порядка 11 ч.

Границы ударных волн и оболочек магнитных облаков устанавливаются на основе известных признаков [Клейменова и др., 2003; Ермолаев и др., 2009; Partamies et al., 2013]. Сопоставление динамики индексов высокоширотной (AL-индекс) геомагнитной активности с границами ударных волн и оболочек облаков показало, что первоначальным источником возмущений является оболочка магнитного облака. Суббуревая активность непосредственно на ударной волне отмечена только для трех событий, имеющих высокую скорость распространения 700, 1100 и 1000 км/с. Во всех рассмотренных случаях область оболочки стала источником еще как минимум двух суббурь. При этом, для суббурь рассматриваемых магнитных облаков

отмечены следующие особенности: интенсивности суббурь, вызванных оболочками медленных облаков (скорость ~450 км/с), лежат в интервале от -300 до -1000 нТл по AL-индексу, и вторая суббуря оказывается интенсивнее первой; суббури с интенсивностями до -1700 нТл генерировались оболочками более быстрых облаков (скорость от 500 до 800 км/с), а оболочка облака со скоростью выше 1000 км/с вызвала суббури с $AL < -2500$ нТл. Тела магнитных облаков также вызывают магнитосферные суббури.

Оболочка облака сама по себе редко становится причиной глобальной геомагнитной активности. В этом случае она, как правило, вызывает слабые или умеренные геомагнитные бури. Из 16 рассмотренных событий только у двух облаков оболочка сгенерировала интенсивные геомагнитные бури. Наиболее часто источником глобальных возмущений становится комбинация оболочки и тела магнитного облака, вызывая при этом классические интенсивные или многошаговые бури.

Анализ изменения поперечной V_r составляющей ММП в солнечном ветре на ударной волне перед магнитным облаком обусловленной V_z и V_y компонентами показал, что она увеличивается в среднем в 5 раз. Ее скачок в половине рассмотренных случаев происходит за счет изменения обеих компонент, для остальных облаков рост осуществляется сначала за счет одной компоненты, а затем и другой. Соответственно, за ударной волной в турбулентной оболочке возрастает геоэффективная V_z компонента стимулирующая геомагнитные возмущения. Факт роста поперечной составляющей ММП может быть использован для идентификации ударной волны и оболочки в солнечном ветре. Явление роста можно применить при создании метода прогнозирования высокоширотной и глобальной геомагнитной активности.

Таким образом, результаты проведенного исследования показывают, что основную роль в высокоширотной активности играют изменения параметров околоземной среды за ударной волной, т.е. в оболочке магнитного облака. Именно она становится источником суббуревой активности и дает старт глобальной магнитной буре, развитие которой обеспечивается параметрами тела магнитного облака.

Работа выполнена в рамках Госзадания Министерства образования и науки РФ «Фундаментальные закономерности влияния солнечной активности на магнитосферно-ионосферные электромагнитные и плазменные процессы» и проекта РФФИ № 13-05-00233.

Литература

- Бархатов Н.А., Беллюстин Н.С., Бужере Ж.-Л., Сахаров С.Ю., Токарев Ю.В. Влияние магнитного поля солнечного ветра на турбулентность переходной области за отошедшей ударной волной // *Известия ВУЗов "Радиофизика"*. Т. 44. № 12. С. 993-1002. 2001.
- 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.
- 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.
- Дэспирак И.В., Любич А.А., Яхнин А.Г., Козелов Б.В., Биернат Х.К. Суббури, связанные с различными потоками в солнечном ветре // *Солнечно-Земная физика*. Вып. 12. Т. 1. С. 150-154. 2008.
- 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. 2009.
- Николаева Н.С., Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г. Зависимость геомагнитной активности во время магнитных бурь от параметров солнечного ветра для разных типов течений // *Геомагнетизм и аэронавигация*. Т. 51. № 1. С. 51-67. 2011.
- Клейменова Н.Г., Козывева О.В., Шотт Ж.Ж. Волновой геомагнитный отклик магнитосферы на подход к Земле межпланетного магнитного облака (14-15 июля 2000 г., "BASTILLE DAY EVENT") // *Геомагнетизм и аэронавигация*. Т. 43. №3. С. 321-331. 2003.
- Плазменная гелиогеофизика. Т.1. / Под редакцией Л.М. Зеленого, И.С. Веселовского. ФИЗМАТЛИТ. 672 с. 2008.
- Хундхаузен А. Расширение короны и солнечный ветер. М.: Мир. 302 с. 1976.
- 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.* 109, A09101, doi:10.1029/2004JA010410, 2004.