

УДК 550.385.4

ЗАВИСИМОСТЬ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ ОТ СТРУКТУРЫ МАГНИТНЫХ ОБЛАКОВ

© 2019 г. Н. А. Бархатов^{1, *}, Д. С. Долгова¹, Е. А. Ревунова²

¹Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина,
г. Нижний Новгород, Россия

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

*e-mail: nbarkhatov@inbox.ru

Поступила в редакцию 26.12.2016 г.

После доработки 21.04.2018 г.

Принята к публикации 27.09.2018 г.

Работа посвящена изучению высокоширотной геомагнитной активности в зависимости от структурных элементов “быстрых” магнитных облаков солнечного ветра, сопровождаемых ударными волнами. Установлено условие возникновения таких облаков и возможная причина их ускорения в солнечном ветре. Предположено, что в геомагнитную активность дают вклад турбулентные оболочечные облаков, параметры которых обусловлены солнечным ветром, изменившимся в результате воздействия на него ударной волны облака. Для оценки данной эволюции натекающего солнечного ветра определены локальные ориентации плоскостей ударных волн и рассчитана ожидаемая на границе магнитосферы последовательность значений геоэффективной B_z -компоненты в солнечно-магнитосферной системе координат. Сопоставление динамики AL -индекса с измеренными на КА значениями B_z -компоненты и с вычисленной последовательностью значений B_z свидетельствует о необходимости учета такой эволюции межпланетного магнитного поля (ММП) солнечного ветра на ударной волне магнитного облака за время ее переноса к магнитосфере.

DOI: 10.1134/S0016794019010024

1. ВВЕДЕНИЕ

Корональные выбросы массы (КВМ) являются одним из основных факторов космической погоды. Одним из представителей корональных выбросов массы являются магнитные облака. На переднем фронте 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 или Sheath (рис. 1, где азимутальный β и полярный углы ϵ , характеризуют ориентацию нормали \mathbf{n} к ударной волне облака в межпланетном пространстве). Далее располагается собственно тело облака, содержащее в своем объеме значительную отрицательную B_z -компоненту ММП (в солнечно-эклиптической системе координат) [Burlaga et al., 1981; Echer and Gonzalez, 2004; Wu and Lepping, 2002; Zhang et al., 2004]. Тело магнитного облака характеризуется пониженными значениями температуры, скорости, концентрации, отношения газокинетического давления к магнитному и монотонным вращением вектора ММП [Burlaga et al.,

1981; Lepping et al., 1990; Bothmer and Schwenn, 1998; Бархатов и др., 2009; Ермолаев и др., 2009], благодаря которому облака являются наиболее геоэффективными представителями КВМ. Вместе с тем, известно [Бархатов и др., 2014а], что магнитные облака, имеющие перед собой оболочку, являются источниками, как правило, сильных или экстремальных магнитных бурь.

К настоящему времени разработано несколько моделей для описания структуры магнитного поля в магнитных облаках. Широкое применение получил бессилового подход, основанный на предположении параллельности (антипараллельности) тока в облаке линиям магнитного поля. Данный подход применяют для тороидальной [Romashets and Vandas, 2001; Vandas et al., 2002] и цилиндрической [Vandas et al., 1996; Бархатов и др., 2009] конфигураций облака. Разработаны также модели магнитных облаков, учитывающие деформацию структуры облака при движении в потоке медленного солнечного ветра [Hidalgo et al., 2002a; Hidalgo, 2003]. Описание магнитного поля в магнитных облаках может быть выполнено и на не бессиловых моделях, учитывающих наличие в облаке перпендикулярной компоненты тока [Hidalgo et al., 2002b].

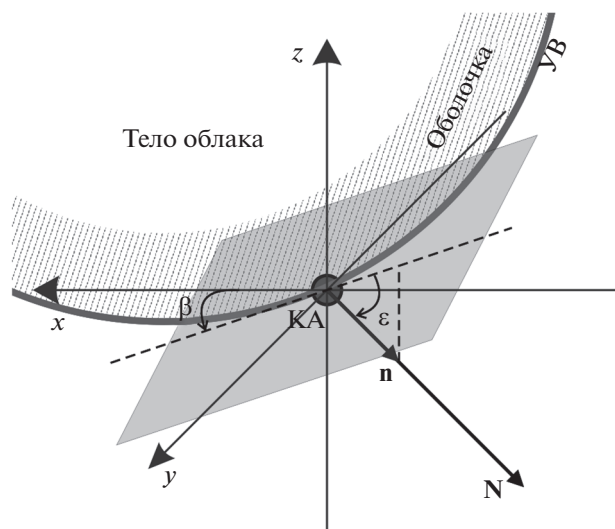


Рис. 1. Схематическое изображение структуры магнитного облака, содержащего тело, оболочку и ударную волну (УВ) с условным плоским фронтом, рассматриваемым в точке пересечения его КА. Ориентация фронта в солнечно-магнитосферной системе координат задана углами, использованными при выполнении работы.

Все описанные модели согласуются друг с другом и дают хорошее соответствие модельной и регистрируемой динамики магнитного поля в теле облака. Однако ни одна из этих моделей не учитывает наличие ударной волны и оболочки перед облаком.

Исследования геомагнитной активности, связанной с магнитными облаками, показали, что для некоторых событий начало глобальных и высокоширотных геомагнитных возмущений соответствует ударной волне и оболочке [Клейменова и др., 2003; Бархатов и др., 2015; Бархатов и др., 2018]. Таким образом, наличие оболочки у магнитных облаков увеличивает их геоэффективность и при следовании методам прогнозирования геомагнитной активности [Бархатов и др., 2011; Бархатов и др., 2014б], основанных на учете значений отрицательной B_z -компоненты ММП в теле облака, снижает их качество. Более точное прогнозирование геомагнитной активности требует учета потенциальной геомагнитной эффективности физических процессов на переднем фронте “быстрых” магнитных облаков. Параметры оболочек магнитных облаков, достигших магнитосферы и вызвавших геомагнитные возмущения, обусловлены эволюцией замагниченного солнечного ветра в процессе его поглощения быстродвигающимися магнитными облаками. Соответственно, может иметь место влияние изменившихся на ударной волне облака параметров солнечного ветра на геомагнитную активность. При этом надо иметь в виду то, что параметры турбу-

лентной оболочки, зарегистрированные на КА, отличаются от параметров оболочки достигшей магнитосферы. В настоящей работе для оценки вклада в геомагнитную активность параметров турбулентных оболочек облаков, принимается во внимание именно это обстоятельство. В результате можно повысить качество прогноза геомагнитной активности, вызванной “быстрыми” магнитными облаками.

Выполнение заявляемого исследования потребовало формулировки условий существования магнитных облаков, сопровождаемых ударными волнами, уточнения границ структурных элементов магнитных облаков, анализа эволюции ориентации ММП вследствие его взаимодействия с набегающей ударной волной магнитного облака, оценки связи зарегистрированных и расчетных параметров турбулентной оболочки с высокоширотной суббуревой активностью. Основным источником данных для нашей работы является OMNI, включающая в себя данные несколько КА. Установление условий существования магнитных облаков, сопровождаемых ударными волнами (раздел 2) выполнено на часовых данных OMNI (http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/istp_public/). Во всех остальных разделах статьи (3–6) использовались минутные данные и здесь при необходимости привлекались данные с КА ACE и WIND. Это обусловлено тем, что иногда в OMNI наблюдаются пропуски в данных, особенно минутных. В этом случае мы использовали данные с первоисточника, т.е. непосредственно с КА. При этом учитывалось положение КА и время переноса солнечного ветра к земной магнитосфере.

2. УСЛОВИЯ СУЩЕСТВОВАНИЯ МАГНИТНЫХ ОБЛАКОВ, СОПРОВОЖДАЕМЫХ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ

Исследование выполнено на 75 событиях, зарегистрированных в околоземном космическом пространстве с 1973 по 2012 гг. (по данным OMNI и данным с КА ACE, http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/istp_public/) и определенных в литературе как магнитные облака [Lepping et al., 2002, Zhang et al., 2004, Yan et al., 2013, Kilpua et al., 2012]. По анализу динамики параметров солнечного ветра перед магнитными облаками и отличительным особенностям ударных волн (см. Введение) было установлено, что из рассмотренных 75 облаков 30 не имели ударных волн, а остальные 45 ими сопровождалась.

Определение условий возникновения ударных волн перед магнитными облаками выполнено путем сопоставления скоростей альвеновских V_a и звуковых V_s волн со скоростями магнитных облаков относительно солнечного ветра $V_{отн}$. Скорость магнитных облаков относительно солнеч-

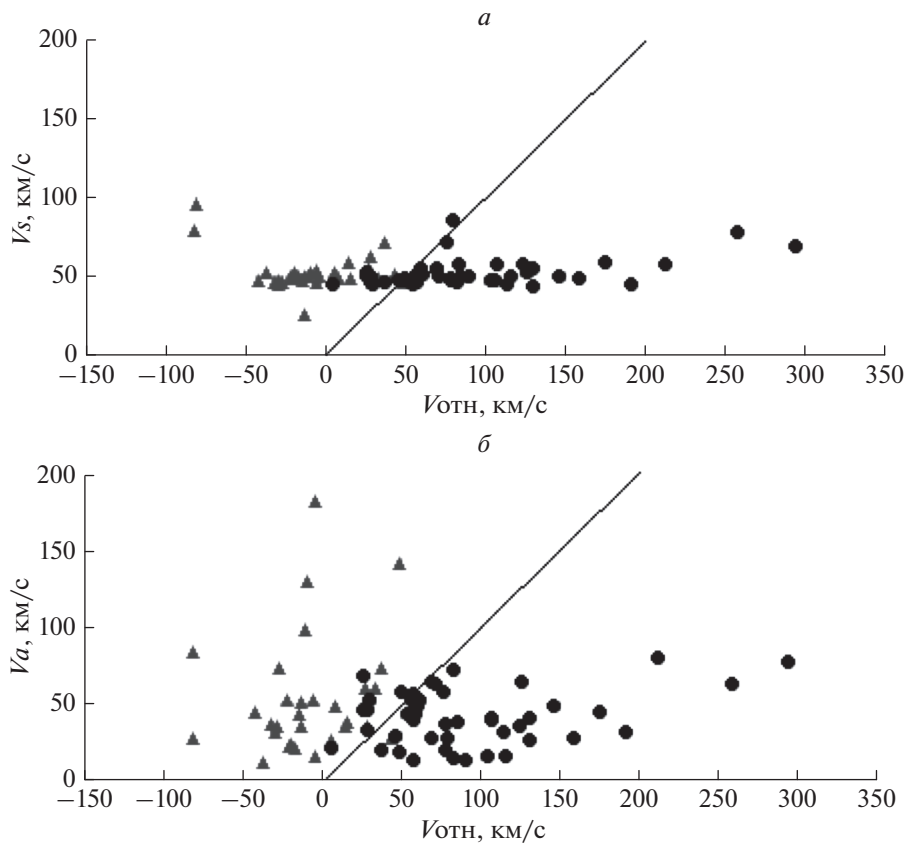


Рис. 2. Соотношение скоростей звуковых (а) и альвеновских (б) волн в солнечном ветре с относительной скоростью магнитных облаков. Серые треугольники – магнитные облака без ударных волн, черные кружочки – облака с ударными волнами. Прямая линия соответствует равенству скоростей по осям.

ного ветра вычислялась как разница скоростей тела облака и среднего значения скорости солнечного ветра перед облаком (для облаков без ударных волн) или перед ударной волной (для облаков с ударными волнами). Скорости альвеновских и звуковых волн рассчитывались на основе выражений, приведенных на ресурсе [http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/istr_public/] вместе с данными о параметрах солнечного ветра:

$V_s = \sqrt{0.12(T + 1.2 \times 10^5)}$ (км/с) и $V_a = 20B/\sqrt{n_p}$ (км/с), где T и n_p , соответственно, температура и концентрация потока частиц солнечного ветра. Из представленного на рис. 2 соотношения скоростей звуковых V_s (рис. 2а) и альвеновских V_a (рис. 2б) волн со скоростями магнитных облаков относительно солнечного ветра $V_{отн}$ следует, что для магнитных облаков без ударных волн $V_{отн}$ оказывается ниже скоростей звуковых V_s и альвеновских V_a волн (серые треугольники на рис. 2а, б располагаются вблизи оси ординат). В то время как для магнитных облаков с ударными волнами (черные кружочки на рис. 2а, б) наблюдается превышение относительной скорости облаков над звуковыми и альвеновскими скоростями. Соот-

ветствующие точки на рис. 2а, б лежат в основном ниже прямой линии отвечающей равенству скоростей. Для рассматриваемых облаков с ударными волнами их относительная скорость превышает 50 км/с.

Важным обстоятельством, влияющим на относительную скорость некоторых медленных облаков являются (рис. 2б) высокие значения альвеновских скоростей в окружающем солнечном ветре. Интерпретация такого явления может быть получена при рассмотрении причин ускорения и расширения облака. Известно, что граница плазменного образования неподвижна (т.е. нет расширения) при условии равенства на ней суммы газокINETического $n_p kT$ (Па) и магнитного $p_m = B^2/2\mu_0$ (Па) давлений [Кролл, Трайвелпис, 1975]. Превышение какого-либо давления с одной из сторон границы приводит к нарушению равновесия и смещению границ плазменного образования. В данном исследовании изучены изменения на границе солнечный ветер – магнитное облако суммарного газокINETического и магнитного давления (рис. 3а), изменения газокINETического и магнитного давлений в отдельности, а также зависимость относительной скорости магнитных облаков от маг-

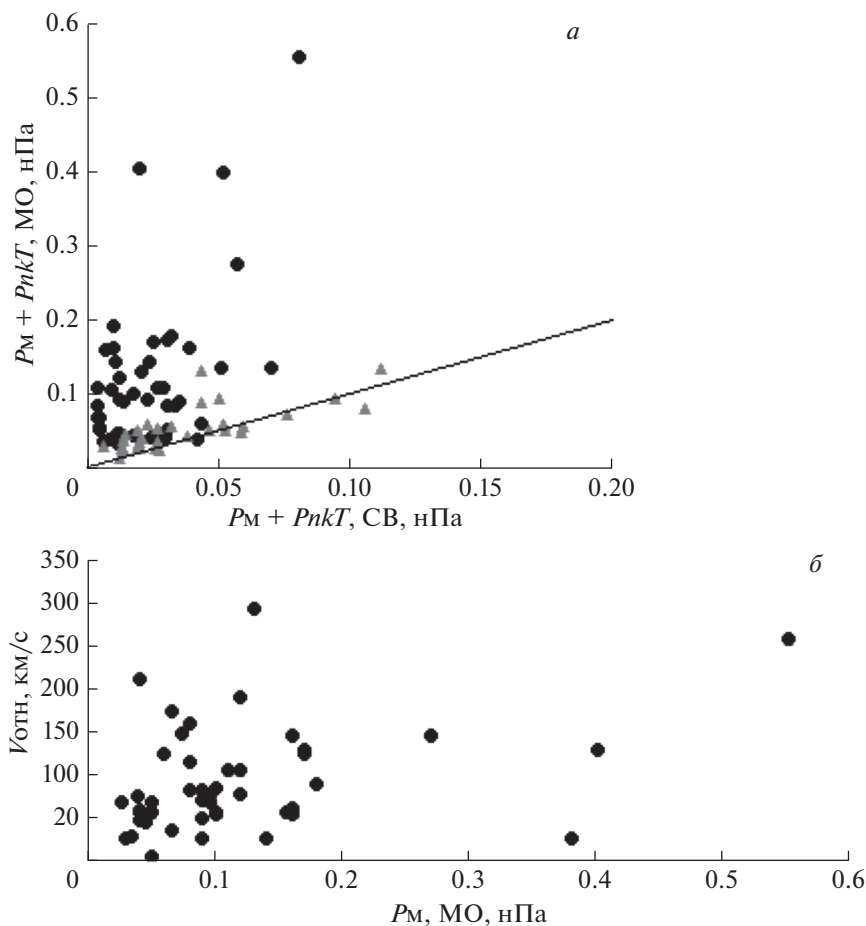


Рис. 3. Соотношения на границе солнечный ветер – магнитное облако: *a* – суммарного газокINETического и магнитного давления; и *б* – зависимость относительной скорости магнитных облаков от магнитного давления. Серые треугольники – магнитные облака без ударных волн, черные кружочки – облака с ударными волнами.

нитного давления (рис. 3б). На диаграммах рис. 3 серые треугольники отвечают магнитным облакам без ударных волн, черные кружочки – облакам с ударными волнами.

Согласно рисунку 3а для магнитных облаков без ударных волн (серые треугольники) имеет место равновесие суммарного газокINETического и магнитного давления на границе солнечный ветер – магнитное облако, которое обозначено сплошной прямой линией. Для облаков с ударными волнами (черные кружочки) отмечается превышение на порядок суммарного давления в теле облака над давлением в солнечном ветре. Это свидетельствует о том, что границы облаков с ударными волнами могут приобрести дополнительную скорость вследствие их расширения. Поскольку магнитное давление в теле облака на порядок превышает газокINETическое, основной вклад в ускорение ведущей части облака дает магнитное давление внутри облака. Зависимость (рис. 3б) относительной скорости таких облаков от магнитного давления в них имеет коэффициент корреляции 0.4. Го-

ворить про ускорение медленных облаков вообще не приходится, поскольку их средняя скорость относительно солнечного ветра равна нулю.

3. УТОЧНЕНИЕ ГРАНИЦ СТРУКТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МАГНИТНЫХ ОБЛАКОВ

Уточнение границ оболочки и тела магнитного облака проводилось на основе анализа Фурье-спектров флуктуаций модуля ММП с минутным разрешением в диапазоне частот 0.0001–0.0083 Гц в предположении того, что при переходе в тело облака волновой режим в параметрах среды и магнитного поля меняется. Следует заметить, что использование минутных данных, ограничивает частотный анализ изучением только крупномасштабных движений в оболочке, заметно превышающих движения с внутренним масштабом турбулентности. Оконное преобразование Фурье, в зависимости от выбора ширины окна, позволяет определить набор частот, присутствующих во временном интервале, или повысить временное

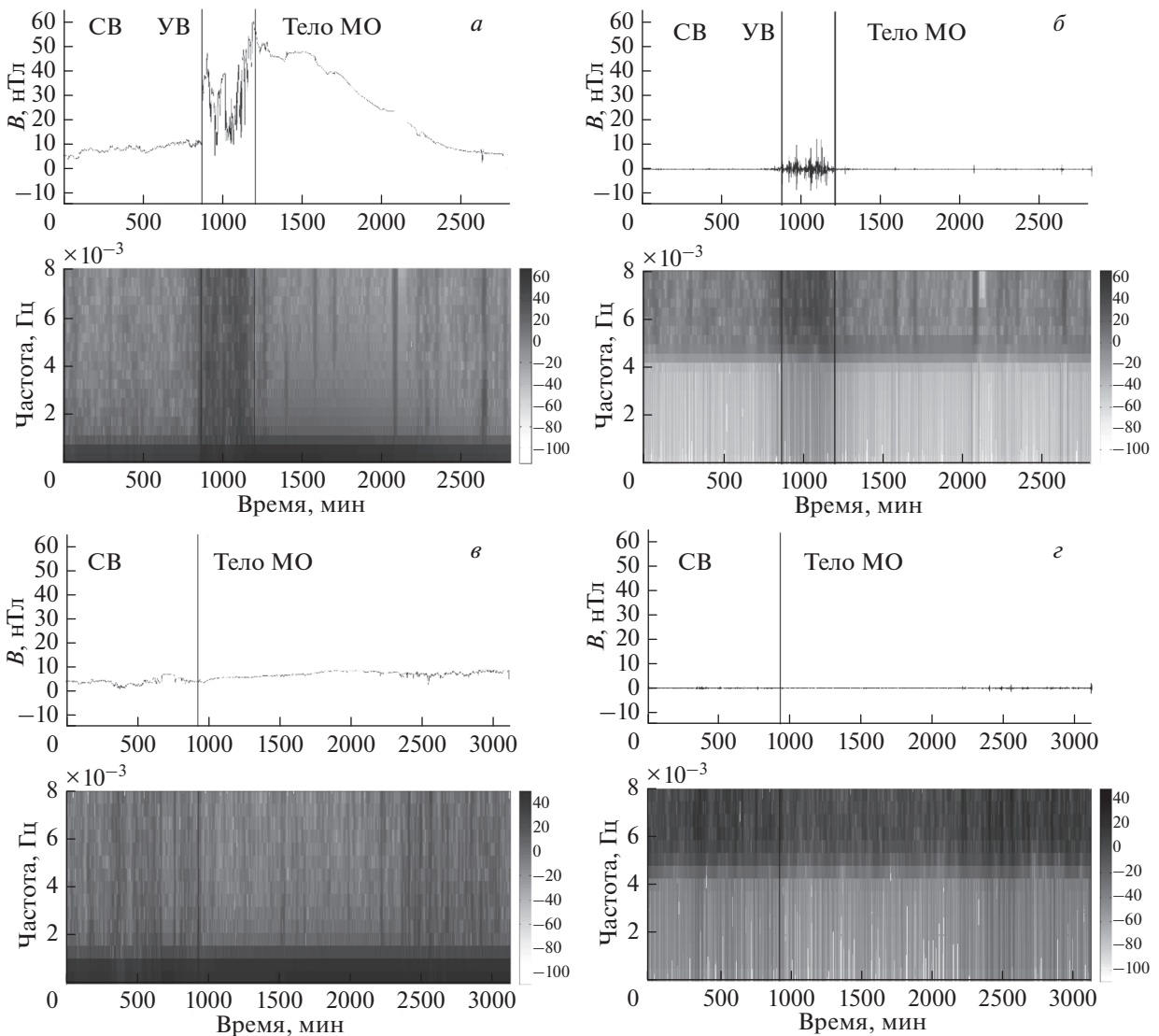


Рис. 4. *a* – Динамический спектр исходных данных по модулю вектора межпланетного магнитного поля магнитного облака 15.07.2000 с ударной волной; *б* – Динамический спектр высокочастотной части данных магнитного облака 15.07.2000 с ударной волной; *в* – Динамический спектр исходных данных по модулю вектора межпланетного магнитного поля магнитного облака 07.08.1996 без ударной волны; *г* – Динамический спектр высокочастотной части данных магнитного облака 07.08.1996 без ударной волны.

разрешение и установить границы структурных элементов исследуемого объекта. На рисунке 4*a* показан динамический спектр (нижняя панель), полученный по спутниковым данным о значениях модуля вектора ММП (верхняя панель) за временной интервал, включающий солнечный ветер, магнитное облако 15.07.2000 с ударной волной и оболочкой. Из рис. 4*a* следует, что оболочка облака характеризуется более высокочастотными колебаниями магнитного поля, чем тело облака. Магнитным облакам без ударных волн такие особенности не характерны (рис. 4*в*). Следовательно, если рассматриваемый поток данных разложить в ряд Фурье, затем удалить низкочастотные состав-

ляющие спектра и выполнить обратную свертку оставшихся гармоник, то в полученной последовательности данных останутся только высокочастотные колебания модуля вектора магнитного поля, характеризующие оболочку облака. Таким образом можно уточнить границы оболочки магнитных облаков. Поскольку оболочка представляет собой область за ударной волной, то ее передняя граница соответствует ударной волне. На рис. 4*б* показаны результаты такой обработки данных для магнитного облака, зарегистрированного на КА ACE 15.07.2000. Верхняя панель соответствует результатам свертки высокочастотных гармоник из ряда Фурье, нижняя панель – динамиче-

ский спектр, построенный на ее основе. Рисунок 4з демонстрирует результат обработки магнитного облака без ударной волны, где видно отсутствие сильных высокочастотных колебаний ММП, характерных для оболочки.

В результате проведенного спектрального анализа установлено, что при переходе из солнечного ветра через ударную волну в турбулентную оболочку мощность рассматриваемой высокочастотной части спектра увеличивается в среднем на 2 порядка; при переходе из оболочки в тело магнитного облака мощность высокочастотной части спектра напротив уменьшается на 2–4 порядка. Это означает, что путем удаления низкочастотных колебаний модуля магнитного поля и сравнением мощности высокочастотной части спектра могут быть найдены границы оболочки магнитных облаков и, соответственно, моменты регистрации ударной волны на КА. Кроме того, такой спектральный подход позволяет надежно сепарировать магнитные облака на “быстрые” и “медленные”.

4. ЭВОЛЮЦИЯ ОРИЕНТАЦИИ ММП СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НАБЕГАЮЩЕЙ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ МАГНИТНОГО ОБЛАКА

Известно, что магнитные облака с ударными волнами и оболочкой являются наиболее геоэффективными событиями [Бархатов, 2013]. Обычно предполагают, что это является результатом действия на магнитосферу Земли самого тела облака. Однако могут иметь место случаи, когда увеличение геоэффективности облака определяется изменившимися на ударной волне параметрами межпланетной среды. В частности может измениться значение геоэффективной B_z -компоненты ММП в солнечно-магнитосферной системе координат. Для расчета значений измененной B_z -компоненты магнитного поля необходимо определить локальные ориентации плоскостей ударных волн магнитных облаков. По одномоментным 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 \mathbf{n} к ударной волне параллельна векторному произведению

$$\mathbf{N} = \Delta \mathbf{V} \times (\mathbf{V}_1 \times \mathbf{V}_2),$$

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

В настоящей работе установление ориентаций ударных волн, связанных с магнитными облаками, выполнялось по пятиминутным данным о

компонентах ММП. В результате были определены азимутальный β и полярный углы ϵ , характеризующие ориентацию в межпланетном пространстве нормали к ударной волне (см. рис. 1)

$$\beta = \arctg \frac{N_y}{N_x}, \quad \epsilon = \arctg \frac{N_z}{N_{xy}}, \quad (1)$$

где $N_{xy} = \sqrt{(N_x)^2 + (N_y)^2}$.

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 B_z -компоненты в оболочке облака.

Значения нормальных к ударной волне компонент ММП перед ней рассчитывались по следующей схеме. Согласно определению скалярного произведения выражение для нормальной составляющей ММП в солнечном ветре следующее:

$$B_{nl} = (n_x B_{x1} + n_y B_{y1} + n_z B_{z1}) / n.$$

Далее, исходя из геометрических соображений, могут быть получены компоненты нормальной составляющей:

$$B_{nx1} = \sqrt{\frac{B_{nl}^2 - B_{nz1}^2}{1 + \operatorname{tg}^2 \beta}}, \quad B_{ny1} = B_{nx1} \operatorname{tg} \beta, \\ B_{nz1} = B_{nl} \sin \epsilon.$$

Здесь β и ϵ , углы, характеризующие ориентацию ударного фронта (рис. 1).

Путем пересчета компонент вектора из одной плоскости в другую были найдены тангенциальные к ударной волне составляющие вектора ММП перед ударной волной:

$$B_{tx1} = B_{x1} - B_{nx1}, \\ B_{ty1} = B_{y1} - B_{ny1}, \quad B_{tz1} = B_{z1} - B_{nz1}.$$

Нормальные к ударной волне составляющие вектора ММП не изменяются, а тангенциальные, согласно уравнению непрерывности, увеличиваются пропорционально скачку плотности $k = n_2/n_1$.

Тангенциальные составляющие ММП за ударной волной можно записать с помощью учета направляющих косинусов:

$$B_{tx2} = k B_{tx1} \cos \alpha_x, \\ B_{ty2} = k B_{ty1} \cos \alpha_y, \quad B_{tz2} = k B_{tz1} \cos \alpha_z.$$

С учетом неизменности направления B_t при переходе через УВ, направляющие косинусы можно записать через B_{t1} :

$$\begin{aligned} \cos \alpha_x &= B_{tx1}/B_{tl}, \\ \cos \alpha_y &= B_{ty1}/B_{tl}, \quad \cos \alpha_z = B_{tz1}/B_{tl}. \end{aligned}$$

С учетом неизменности нормальных компонент ММП получаем требуемое выражение для B_{z2} -компоненты магнитного поля за ударной волной в солнечно-магнитосферной системе координат:

$$\begin{aligned} B_{z2} &= B_{tz2} + B_{nz1}, \\ B_{z2} &= kB_{tz1} \cos \alpha_z + B_{nl} \sin \varepsilon. \end{aligned} \quad (2)$$

Таким образом, по данным о компонентах ММП перед ударной волной, используя выражение для B_{z2} (2), можно получить изменившуюся на ударной волне последовательность значений геоэффективной B_z -компоненты. Это было выполнено для 13 магнитных облаков по минутным данным о параметрах межпланетной среды, зарегистрированных на КА в околоземном космическом пространстве.

5. УСЛОВИЯ ПОДАВЛЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ОБОЛОЧКАХ МАГНИТНЫХ ОБЛАКОВ

На интенсивность волновых движений в оболочке магнитных облаков значительное влияние оказывает проникающее в них ММП, несмотря на то, что энергия магнитного поля в солнечном ветре на 1–2 порядка меньше динамической энергии потока плазмы. Согласно граничным условиям на ударной волне и уравнению непрерывности $\rho V = \text{const}$ за ударной волной скорость плазмы резко падает (в системе отсчета, движущейся вместе с плазмой), а тангенциальная составляющая магнитного поля существенно возрастает. Уровень турбулентных движений в области за ударной волной определяется с помощью двух основных механизмов. Первый из них заключается в том, что вмороженное в плазму магнитное поле играет стабилизирующую роль и подавляет развитие волновых движений плазмы в оболочке облака. Тангенциальная компонента магнитного поля усиливается за ударной волной, плотности энергии магнитного поля и динамической энергии плазмы в оболочке облака становятся одного порядка, и оно может подавить турбулентные движения за ударным фронтом. Магнитное поле будет подавлять развитие волновых движений плазмы в оболочке облака при выполнении одного из неравенств [Бархатов и др., 2001]:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\mathbf{H}_1 \times \mathbf{V}_1}{V_1 V_2} \right)^2 &\gg 4\pi\rho_2 \frac{V_2^2}{V_1^2}; \\ \left(\frac{\mathbf{H}_1 \cdot \mathbf{V}_1}{V_1} \right)^2 &\gg 4\pi\rho_2 V_2^2. \end{aligned} \quad (3)$$

где V_1, V_2 – скорости и ρ_1, ρ_2 – плотности потока среды перед ударной волной и за ней в системе отсчета, движущейся вместе с плазмой, соответственно, H_1 – напряженность магнитного поля перед ударной волной. В этом случае происходит замена среды оболочки измененным на ударной волне замагниченным солнечным ветром. В противном случае среда за ударной волной остается принципиально турбулентной и втекающие значения магнитного поля участвуют в этом процессе. Поэтому ожидаемые значения компонент магнитного поля в оболочке можно получить последовательным суммированием компонент магнитного поля за ударной волной с измененными на ней значениями магнитного поля солнечного ветра, втекающего в оболочку. Таким образом, оценка плотностей энергии магнитного поля и динамической энергии плазмы в оболочке облака, позволяет сделать вывод о наличии или отсутствии в ней турбулентных движений. Эта информация представлена в табл. 1. Там же приведены сведения о выполнении условий (3) для затухания волновых движений в оболочке.

6. РАСЧЕТ B_z -КОМПОНЕНТЫ ММП, ИЗМЕНИВШЕЙСЯ НА УДАРНОЙ ВОЛНЕ

В качестве примера, вычисления B_z -компоненты ММП, изменившейся на ударной волне, выполним для двух магнитных облаков 18.02.1999 (рис. 5 левая панель) и 16.04.1999 (рис. 5 правая панель). В случае магнитного облака 18.02.1999 отмечено превышение динамической энергии над магнитной, а, следовательно, турбулентность за ударной волной сохранится. Таким образом, для данного облака получение ожидаемой последовательности значений B_z компоненты за ударной волной выполнялось путем сложения ее значений в оболочке B_z со значениями в плазме солнечного ветра, изменившимися на ударной волне $B_z m$ (полученными по выражению (2)). В оболочке магнитного облака 16.04.1999 напротив, магнитная энергия превосходит динамическую. В этом случае выполнялась замена среды оболочки измененным на ударной волне замагниченным солнечным ветром. Далее проводился расчет числа минутных данных, которые будут поглощены ударной волной за время ее переноса от КА до магнитосферы Земли. Их число соответствует разнице времени движения ударной волны и потока солнечного ветра от КА до магнитосферы (рис. 5а, штриховка с наклоном вправо). На рис. 5 для магнитных облаков 18.02.1999 и 16.04.1999 показана динамика значений B_z , зарегистрированных на КА (рис. 5а, левая и правая панель, соответственно) и изменившихся на ударной волне $B_z m$ (рис. 5б) компонент ММП. На рис. 5в представлены результирующие значения компоненты ММП $B_z s$ для облака 18.02.1999, полученные сум-

Таблица 1. Выполнение условий (3) для затухания волновых движений в оболочке и анализируемые коэффициенты корреляции

№	Дата регистрации облака	Выполнение условий (3) для затухания волновых движений в оболочке	Турбулентные движения в оболочке по данным КА	Коэффициенты корреляции $AL-\Sigma Bz$	Коэффициенты корреляции $AL-\Sigma Bzm$	Коэффициенты корреляции $AL-\Sigma Bzs$
1	18.10.1995		+	0.92	0.97	0.93
2	13.06.1998	+		0.78	0.67	0.82
3	28.08.1998		+	0.89	0.53	0.87
4	18.02.1999		+	0.19	0.79	0.86
5	16.04.1999	+		0.48	0.75	0.81
6	06.11.2000	+	Есть сразу за УВ, далее –нет	0.98	0.95	0.97
7	12.04.2001	+	+	0.88	0.69	0.72
8	19.11.2007	+		0.74	0.71	0.75
9	28.05.2010	+		0.67	0.52	0.8
10	03.08.2010		+	0.95	0.9	0.97
11	14.02.2011		+	0.74	0.78	0.73
12	04.06.2011		+	0.62	0.76	0.94
13	24.10.2011		+	0.25	0.97	0.94

мированием значений Bzm и Bz и, полученные заменой Bz на Bzm , величины $B'z$ для облака 16.04.1999. На рисунке 5а штриховкой с наклоном влево показан интервал, в котором будет происходить взаимодействие среды оболочки и проникающего в нее солнечного ветра за время движения облака от КА до магнитосферы Земли; двойной штриховкой отмечены значения измененного магнитного поля, пришедшие к магнитосфере Земли, УВ – положение ударной волны. Здесь меткой М отмечены значения магнитного поля, достигшие магнитосферы Земли в момент регистрации ударной волны на КА. На рис. 5в метка М соответствует моменту времени, когда УВ дошла до магнитосферы.

7. СВЯЗЬ РАСЧЕТНОГО ММП С СУББУРЕВОЙ АКТИВНОСТЬЮ, ОЦЕНИВАЕМОЙ ПО ИНДЕКСУ AL

Оценка влияния на суббуревую активность параметров солнечного ветра, меняющихся на ударной волне всех рассмотренных магнитных облаков, выполнялась корреляционным анализом динамики AL -индекса со значениями Bz -компоненты ММП, полученными тремя разными способами (см. табл.): со значениями Bz -компоненты, зарегистрированными на КА; с рассчитанными значениями Bzm -компоненты с помощью уравнения (2) (см. п. 4); со значениями Bzs -компоненты ММП, полученными в результате суммирования Bz - и Bzm -компонент. Рассмотрению подлежали также

значения произведений VBz , $VBzm$ и $VBzs$. Кроме того, учитывая, что суббуревые явления обеспечиваются процессом непрерывного поступления и постепенного накопления энергии в магнитосфере Земли, мы включили в корреляционный анализ суммарные величины ΣBz , ΣBzm , ΣBzs , ΣVBz , $\Sigma VBzm$ и $\Sigma VBzs$, полученные путем накопления соответствующих значений за предшествующий величине AL -индекса интервал времени в 30 мин. Временная задержка по AL -индексу составила ~15–20 мин. Проведенный анализ показал, что коэффициент корреляции максимален при использовании значений суммарной величины компоненты ΣBzs ММП (см. табл.). Корреляции с величинами ΣVBz , $\Sigma VBzm$ и $\Sigma VBzs$, характеризующими электрические поля за ударной волной, оказались незначительными. На рис. 6 показано соотношение числа событий с коэффициентами корреляции с шагом равным 0.2 по суммарным величинам ΣBz , ΣBzm , ΣBzs . Согласно рис. 6 коэффициенты корреляции $AL-\Sigma Bzs$ для всех рассмотренных облаков лежат в пределах от 0.7 до 0.97, в то время как при использовании ΣBz часть событий имеет коэффициент корреляции ниже 0.5.

Таким образом, результаты проведенного исследования показывают заметное влияние на суббуревую активность измененной на ударной волне Bz -компоненты межпланетного магнитного поля. Несмотря на различные механизмы участия ММП, проникшего из солнечного ветра в обо-

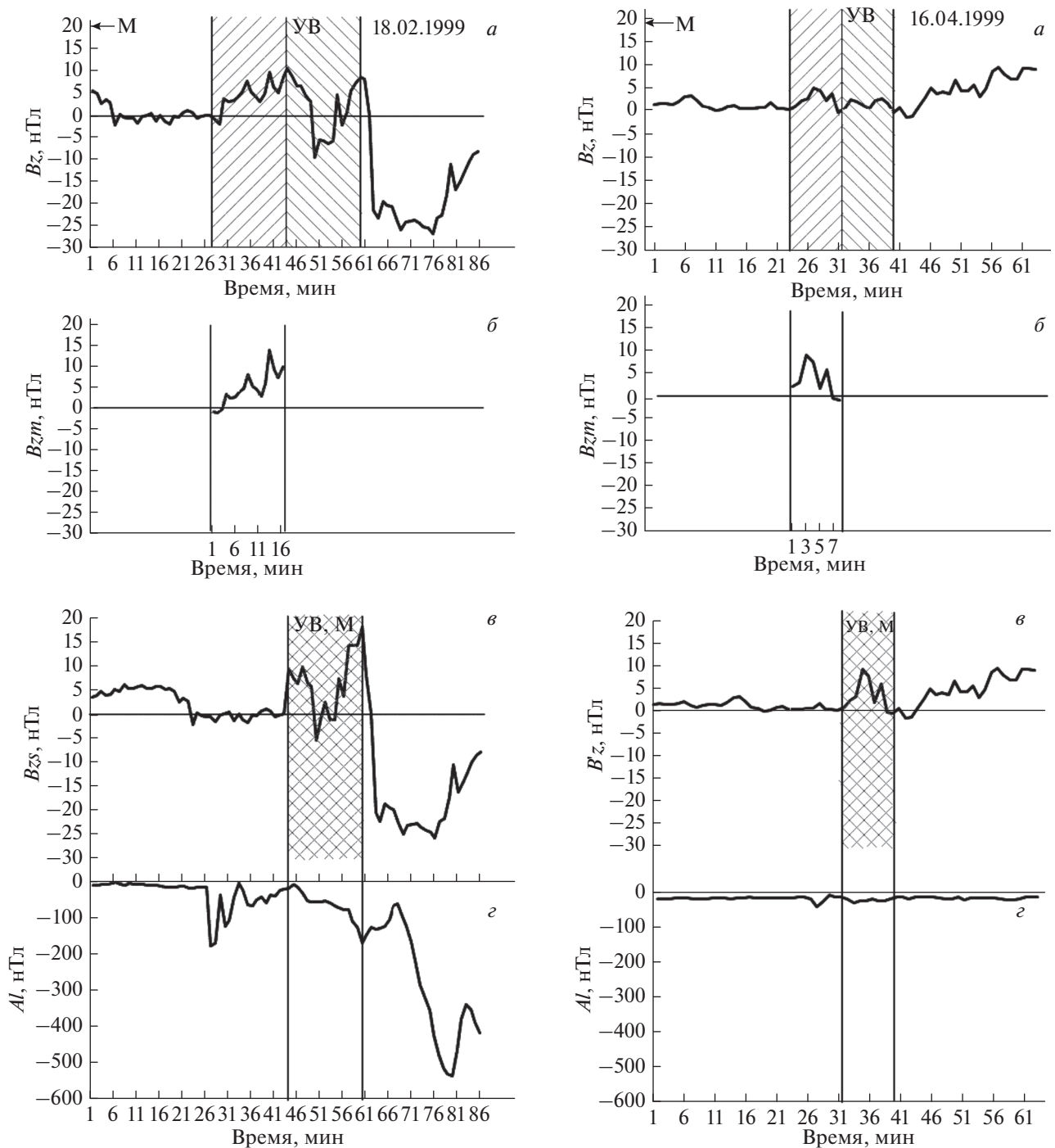


Рис. 5. Сопоставление значений B_z -компоненты ММП, зарегистрированных на КА (а), измененных значений V_z -компоненты ММП на ударной волне (б), результирующих значений B_z и V_z' -компоненты ММП (в) и динамики AL -индекса (з) для магнитных облаков 18.02.1999 и 16.04.1999 М – положение границы магнитосферы; УВ – положение ударной волны; штриховкой с наклоном вправо показан интервал данных, которые будут поглощены ударной волной за время ее переноса от КА до магнитосферы Земли; штриховкой с наклоном влево показан интервал, в котором будет происходить взаимодействие среды оболочки и проникающего в нее солнечного ветра за время движения облака от КА до магнитосферы Земли; двойной штриховкой отмечены значения измененного магнитного поля, пришедшие к магнитосфере Земли.

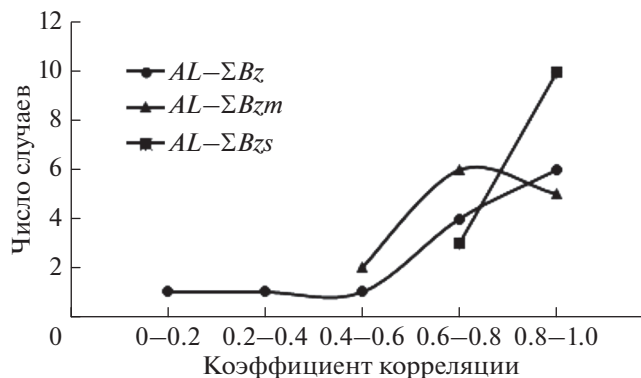


Рис. 6. Соотношение коэффициентов корреляции AL -индекса с суммарными величинами ΣBz , ΣBzm , ΣBzs .

лочку облака, для большинства магнитных облаков наибольшие значения коэффициентов корреляции отмечаются для пары $AL-\Sigma Bzs$. Это означает, что проникающее магнитное поле согласно экспериментальным данным реально вовлекается в турбулентный процесс и оказывается недостаточным для полной стабилизации волновых движений, которая должна происходить согласно теоретическим представлениям (3).

8. ВЫВОДЫ

В работе обращено внимание на зависимость высокоширотной геомагнитной активности от существования структурных элементов сопровождающих “быстрые” магнитные облака. Для этого предварительно определены условия возникновения ударных волн перед магнитными облаками путем исследования соотношения скоростей звуковых и альвеновских волн в солнечном ветре с относительной скоростью магнитных облаков $U_{отн}$. Установлено, что основным условием существования ударных волн перед облаками является превышение скорости облака над скоростью солнечного ветра более чем на 50 км/с. При этом относительная скорость облака оказывается выше скоростей звуковых и альвеновских волн в солнечном ветре. На основе соотношений на границе солнечный ветер — магнитное облако суммарного газокинетического и магнитного давления, газокинетического и магнитного давлений в отдельности, а также зависимости относительной скорости магнитных облаков от этих двух давлений, показано, что ускорение магнитных облаков возможно происходит за счет превышения магнитного давления в их телах над давлением в окружающем солнечном ветре.

Уточнение границ элементов магнитного облака выполнено с помощью спектрального анализа возмущений модуля вектора ММП. При

этом установлено, что оболочки облаков характеризуются высокочастотными колебаниями модуля ММП, а их тела — низкочастотными колебаниями. Переход из солнечного ветра через ударную волну в турбулентную оболочку сопровождается увеличением мощности высокочастотной части спектра в среднем на 2 порядка; а при переходе из оболочки в тело магнитного облака мощность высокочастотной части спектра напротив уменьшается на 2–4 порядка. Путем удаления низкочастотных составляющих спектра и сравнением мощности высокочастотных флуктуаций, установлены моменты регистрации ударной волны и границы оболочки магнитных облаков на КА.

Показано, что выводы о геоэффективности магнитных облаков, сопровождаемых ударными волнами, требуют учета изменения на ударном разрыве компонент магнитного поля солнечного ветра, для чего установлены локальные ориентации плоскостей ударных волн магнитных облаков. Расчет ожидаемой на границе магнитосферы последовательности значений геоэффективной Bz -компоненты в солнечно-магнитосферной системе координат выполнен разными способами. Однако, корреляционный анализ уровня связи динамики AL -индекса со значениями Bz -компонент, показал: для большинства магнитных облаков независимо от уровня интенсивности волновых движений в их оболочках, наиболее высокая (до 0.97) корреляция имеет место между AL -индексом и суммарной величиной ΣBzs . Эта суммарная величина получена суммированием измененной на ударной волне Bz -компоненты и зарегистрированных на КА значений этой компоненты и дальнейшим накоплением за 30 мин интервал времени, предшествующий значению AL -индекса. Такой вывод свидетельствует о зависимости суббуриных явлений от процесса непрерывного поступления и постепенного накопления энергии в магнитосфере Земли (см. также [Бархатов и др., 2017]). Кроме того это говорит о том, что проникающее в оболочку магнитное поле оказывается недостаточным для стабилизации волновых движений и, согласно экспериментальным данным, реально вовлекается в турбулентный процесс и может суммироваться с фоновой турбулентностью.

Таким образом, выполненное сопоставление динамики AL -индекса с измеренными на КА значениями Bz -компоненты и с вычисленной последовательностью значений Bz свидетельствует о необходимости учета эволюции магнитного поля солнечного ветра на ударной волне магнитного облака за время ее переноса к магнитосфере.

Работа поддержана грантами РФФИ № 16-05-00608, № 18-35-00430 и выполнена в рамках Госзадания Минобрнауки РФ № 5.5898.2017/8.9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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 // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 44. № 12. С. 993–1002. 2001.
- Бархатов Н.А., Калинина Е.А., Левитин А.Е. Проявление конфигураций магнитных облаков солнечного ветра в геомагнитной активности // Космич. исслед. Т. 47. № 4. С. 300–310. 2009.
- Бархатов Н.А., Ревунова Е.А., Левитин А.Е. 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. Разработка методов прогнозирования геомагнитного состояния магнитосферы на основе поиска фундаментальных закономерностей солнечно-земных связей // Вестн. НГПУ. ISSN 2307–1281. № 2. 2013.
- 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 аэрономия. Т. 54. № 2. С. 185–191. 2014а.
- Бархатов Н.А., Левитин А.Е., Ревунова Е.А. Прогноз интенсивности геомагнитных бурь, вызываемых магнитными облаками солнечного ветра // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 54. № 6. С. 718–726. 2014б.
- Бархатов Н.А., Виноградов А.Б., Левитин А.Е., Ревунова Е.А. Суббуревая геомагнитная активность, связанная с магнитными облаками // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 55. № 5. С. 596–602. 2015.
- Бархатов Н.А., Воробьев В.Г., Ревунов С.Е., Ягодкина О.И. Отражение динамики параметров солнечного ветра в процессе формирования суббуревой активности // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 57. № 3. С. 273–279. 2017.
- Бархатов Н.А., Ревунов С.Е., Воробьев В.Г., Ягодкина О.И. Динамика высокоширотной геомагнитной активности, обусловленная межпланетными магнитными облаками // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 58. № 2. С. 155–162. 2018.
- Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю. Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2000 г. // Космич. исслед. Т. 47. № 2. С. 99–113. 2009.
- 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., “BASTILLE DAY EVENT”) // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 43. № 3. С. 321–331. 2003.
- Кролл Н., Трайвеллис А. Основы физики плазмы. М.: Мир, 525 с. 1975.
- Хундхаузен А. Расширение короны и солнечный ветер. М.: Мир, 302 с. 1976.
- Bothmer V., Schwenn R. The structure and origin of magnetic clouds in the solar wind // Ann. Geophysicae. V. 16. № 1. P. 1–24. 1998.
- Burlaga L., Sittle E., Mariani F., Schwenn N. Magnetic loop behind an interplanetary shock: Voyager, Helios and IMP 8 observations // J. Geophys. Res. № 86. P. 6673–6684. 1981.
- Echer E., Gonzalez W.D. Geoeffectiveness of interplanetary shocks, magnetic clouds, sector boundary crossings and their combined occurrence // Geophys. Res. Lett. V. 31. L09808. 2004. doi 10.1029/2003GL019199
- Hidalgo M.A., Nieves-Chinchilla T., Cid C. Elliptical cross-section model for the magnetic topology of magnetic clouds // Geophys. Res. Lett. V. 29. № 13. P. 1637. 2002a. doi 10.1029/2001GL013875
- Hidalgo M.A., Vinas A.F., Sequeiros J. A non-force-free approach to the topology of magnetic clouds in the solar wind // J. Geophys. Res. V. 106. № A1. P. 1002. 2002b. doi 10.1029/2001JA900100
- Hidalgo M.A. A study of the expansion and distortion of the cross section of magnetic clouds in the interplanetary medium // J. Geophys. Res. V. 108. № A8. P. 1320. 2003. doi 10.1029/2002JA009818
- Kilpua K.J., Li Y., Luhmann J.G., Jian L.K., Russell C.T. On the relationship between magnetic cloud field polarity and geoeffectiveness // Ann. Geophysicae. V. 30. № 7. P. 1037–1050. 2012. doi 10.5194/angeo-30-1037-2012
- Lepping R.P., Jones J.A., Burlaga L.F. Magnetic field structure of interplanetary magnetic clouds at 1 AU // J. Geophys. Res. № 95. P. 11.957–11.965. 1990.
- Lepping R.P., Berdichevsky D., Szabo A., Lazarus A.J., Thompson B.J. Upstream shocks and interplanetary magnetic cloud speed and expansion: Sun, WIND, and Earth observations // COSPAR Colloquia Series. Proc. COSPAR Colloquium. V. 12. P. 87–96. doi 10.1016/S0964-2749(02)80210-4. 2002.
- Romashets E.P., Vandas V. Dynamics of a toroidal magnetic clouds in the solar wind // J. Geophys. Res. V. 106. № A6. P. 10.615–10.624. 2001.
- Vandas M., Fischer S., Dryer M., Smith Z., Detman T. Simulation of magnetic cloud propagation in the inner heliosphere in two-dimensions. A loop parallel to the ecliptic plane and the role of helicity // J. Geophys. Res. V. 101. № A2. P. 2505–2510. 1996.
- Vandas M., Odstreil D., Watari S. Three-dimensional MHD simulation of a loop-like magnetic cloud in the solar wind // J. Geophys. Res. V. 107. № A9. P. 1236. 2002. doi 10.1029/2001JA005068
- 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. № A10. P. 1314–1321. 2002. doi 10.1029/2001JA000161
- Yan Li, Luhmann J.G., Lynch B.J., Kilpua E.K.J. Magnetic clouds and origins in STEREO era // J. Geophys. Res. 2013. doi 10.1002/2013JA019538
- 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. 2004. doi 10.1029/2004JA010410