УДК 550.385.4

СУББУРЕВАЯ АКТИВНОСТЬ И ОРИЕНТАЦИЯ ФРОНТА УДАРНОЙ ВОЛНЫ МЕЖПЛАНЕТНОГО МАГНИТНОГО ОБЛАКА

© 2019 г. Н. А. Бархатов^{1,} *, В. Г. Воробьев², С. Е. Ревунов¹, О. М. Бархатова³, О. И. Ягодкина²

¹Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина (Мининский университет), г. Нижний Новгород, Россия ²Полярный геофизический институт (ПГИ), г. Апатиты, Россия ³Нижегородский государственный Архитектурно-строительный университет, г. Нижний Новгород, Россия *e-mail: nbarkhatov@inbox.ru Поступила в редакцию 22.10.2018 г. После доработки 14.01.2019 г. Принята к публикации 24.01.2019 г.

В работе обращено внимание на сложную структуру быстрых магнитных облаков солнечного ветра, которые, кроме собственно тела облака, содержат турбулентный переходный слой (оболочка облака) с большим и нерегулярным магнитным полем, следующим за ударной волной. Проведен расчет ориентации плоскости ударной волны магнитного облака по отношению к межпланетному магнитному полю, модифицируемому ударной волной при ее распространении в солнечном ветре для 33 случаев регистрации быстрых магнитных облаков. Исследована зависимость суббуревой активности в авроральной зоне от уровня турбулентных процессов происходящих в оболочках магнитных облаков. При этом принято во внимание, что турбулентные явления в оболочках во многом определяются ориентацией плоскости ударной волны по отношению к межпланетному магнитному полю. Показано, что уровень магнитной активности в авроральной зоне, характеризуемый интегральным индексом AL, увеличивается с уменьшением угла между направлением нормали к ударному фронту и вектором межпланетного магнитного поля. Таким образом, наиболее геоэффективными являются магнитные облака с квазипараллельной ударной волной, а наименее геоэффективными – с квазиперпендикулярной ударной волны. Сделан вывод о росте интенсивности турбулентных процессов в оболочке облака с уменьшением величины магнитного поля проникающего в оболочку и выполняющего стабилизирующую роль для турбулентных магнитогидродинамических возмущений.

DOI: 10.1134/S0016794019040047

1. ВВЕДЕНИЕ

Значительный научный и практический интерес в настоящее время вызывает класс задач, связанных с решением проблемы воздействия возмущенного солнечного ветра на магнитосферу Земли. Разработка методов решения таких задач является ключевой в изучении солнечно-земных связей. Как правило, в качестве исходных параметров для разнообразных моделей, описывающих процессы внутри магнитосферы и на ее границе, используются данные космических аппаратов, находяшихся в точке либрации на значительном удалении от Земли. Хорошо известно, что магнитные облака (МО) солнечного ветра являются проявлениями солнечной активности, вызывающими самые заметные геомагнитные возмущения [Ермолаев и др., 2009; Бархатов и др., 2014]. Обычно эту эффективность связывают с особенностями распределения магнитного поля в теле облаков и траекториями прохождения через них магнитосферы [Бархатов и др., 2009]. Прямые спутниковые измерения параметров межпланетной среды показали, что быстрые МО с магнитозвуковым числом Маха $M \ge 1$, предваряются ударными волнами (УВ). За ударной волной следует переходная область с сильными нерегулярностями плазмы и магнитного поля [Kilpua et al., 2012; Barkhatov et al., 2017], которую в дальнейшем будем именовать как оболочка облака. Динамические характеристики этих элементов магнитных облаков при взаимодействии с земной магнитосферой могут привести также к заметному росту магнитных возмущений на земной поверхности [Клейменова и др., 2003; Манакова и др., 2016]. В связи с этим, становится понятной актуальность экспериментального и теоретического анализа связи суббуревой активности с наличием турбулентных областей в солнечном ветре [Бархатов и др., 2017; Бархатов и др., 2018].

В работе [Бархатов и др., 2001] обращено внимание на то, что турбулентные явления в оболочке во многом определяются ориентацией плоскости ударной волны по отношению к межпланетному магнитному полю (ММП) солнечного ветра поглошаемому ударной волной при ее распространении в потоке солнечной плазмы. В этой связи существуют такие термины как "квазипараллельная" и "квазиперпендикулярная" ударная волна, напрямую связанные с уровнем турбулентности в оболочке облака. Предложенный нами ранее в работе [Бархатов и Ревунов, 2010] метод поиска в солнечном ветре ударных волн по данным космических аппаратов (КА) и определения ориентации их ударных плоскостей, в свою очередь, позволяет сделать вывод о степени возмущенности оболочки облака.

Целью настоящей работы является исследование зависимости суббуревой активности от уровня магнитогидродинамической (МГД) турбулентности в оболочках магнитных облаков, которая определяется ориентацией фронтов их ударных волн по отношению к ММП.

2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Известно [Ландау и Лифшиц, 1982], что для МГД ударных волн характерно сохранение плотности потока, которое приводит к увеличению концентрации плазмы за ударной волной. При переходе через ударный фронт значение нормальной составляющей магнитного поля остается неизменным при общем росте модуля магнитного поля за ударным фронтом вследствие возрастания его тангенциальной составляющей. Проникающее в оболочку магнитных облаков ММП оказывает значительное влияние на интенсивность МГД волновых движений, которые там возникают. Это происходит, несмотря на то, что энергия магнитного поля в солнечном ветре на 1-2 порядка меньше динамической энергии потока плазмы. Уровень турбулентных движений в переходной области за ударной волной определяется стабилизирующей ролью магнитного поля солнечного ветра, которое при определенных условиях подавляет развитие волновых движений плазмы в оболочке облака. Вследствие того, что тангенциальная компонента магнитного поля усиливается за ударной волной, плотность энергии магнитного поля может достигать значений того же порядка, что и динамическая энергии плазмы в оболочке облака. Магнитное поле может подавлять турбулентные движения за ударным фронтом при выполнении одного из неравенств [Бархатов и др., 2001]:

$$\left(\frac{\mathbf{B}_{1}\times\mathbf{V}_{1}}{V_{1}V_{2}}\right)^{2} \gg 4\pi\rho_{2}\frac{V_{2}^{2}}{V_{1}^{2}},\tag{1}$$

$$\left(\frac{\mathbf{B}_{1}\cdot\mathbf{V}_{1}}{V_{1}}\right)^{2} \gg 4\pi\rho_{2}V_{2}^{2},$$
(2)

где V₁ и V₂ – скорости потока перед ударной волной и за ней, соответственно, в системе отсчета, движущейся вместе с плазмой; B₁ – напряженность магнитного поля перед ударной волной. В этом случае происходит замена среды оболочки измененным на ударной волне замагниченным солнечным ветром. В случае, когда неравенства (1) или (2) не выполняются, среда за ударной волной остается принципиально турбулентной и втекающие в переходную область магнитное поле участвует в этом процессе. Поэтому ожидаемые значения компонент магнитного поля в оболочке облака 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. Такая оценка будет выполнена для рассматриваемых в настоящей работе магнитных облаков, сопровождаемых турбулентными оболочками. Проведено сопоставление уровня турбулентности в оболочке облака с уровнем возникающей при этом суббуревой активности.

Об уровне турбулентности в переходной области можно судить по ориентации фронта ударной волны магнитного облака, а именно по величине угла между направлением нормали к ударному фронту и вектором ММП. Определение величины этого угла позволяет выделить магнитные облака с квазипараллельной и квазиперпендикулярной ударной волной. Для этих целей мы применяем разработанную ранее методику определения ориентации ударной волны по отношению к направлению вектора ММП [Бархатов и Ревунов, 2010]. Учитывая неизменность величины и направления нормальной составляющей ММП к поверхности фронта ударной волны, в трехмерном пространстве компонент магнитного поля строим соответствующие радиус-вектора и определяем положение, при котором поверхность фронта ударной волны будет перпендикулярна прямой, соединяющей две точки – значения компонент поля до и после скачка. На рисунке 1 схематично продемонстрирована методика определения положения фронта ударной волны. В пространстве компонент ММП (Bx, By, Bz) векторами $\mathbf{B}_1, \mathbf{B}_2, \mathbf{B}_3$ и \mathbf{B}_4 указаны полные векторы магнитного поля в четыре момента времени *t*₁, *t*₂, *t*₃ и *t*₄. Поскольку используются минутные



Рис. 1. Определение положения фронта ударной волны в пространстве величин компонент ММП (Bx, By, Bz). ξ – угол между нормалью к плоскости ударной волны и вектором ММП, имеющим вектора **B**₂ и **B**₃ до и после разрыва, соответственно.

данные, то ситуация на рис. 1 описывает четырехминутный интервал. При этом \mathbf{B}_2 и \mathbf{B}_3 отвечают векторам до и после плоскости ударного фронта. Согласно условиям на фронте МГД ударной волны величина нормальной составляющей ММП к поверхности фронта УВ неизменна, поэтому вектор $\Delta \mathbf{B}_{23}$, показывающий изменения величины ММП, лежит в плоскости фронта ударной волны. Максимальное значение этого вектора является одним из признаков регистрации фронта ударной волны, наряду со скачками плотности и скорости потока плазмы. Исходя из этих соображений, мы определяем положение разрыва.

Ориентация фронта ударной волны, связанной с рассматриваемым облаком, может быть установлена по одномерным измерениям ММП и параметров солнечного ветра до ударной волны и после нее с помощью теоремы о компланарности ММП [Хундхаузен, 1976], согласно которой нормаль к ударной волне параллельна векторному произведению:

$$\mathbf{N} = \Delta \mathbf{B}_{23} \times (\mathbf{B}_2 \times \mathbf{B}_3), \tag{3}$$

где \mathbf{B}_2 — магнитное поле перед ударной волной, \mathbf{B}_3 — магнитное поле за ней, $\Delta \mathbf{B}_{23} = \mathbf{B}_3 - \mathbf{B}_2$. Таким образом, вектор $\Delta \mathbf{B}_{23}$ перпендикулярен вектору, нормальному к плоскости ударной волны, который обозначен на рис. 1 стрелкой с индексом **n** параллельным **N**. Для выводов о квазипараллельности или квазиперпендикулярности ударных волн рассматриваемых событий для нас будут представлять интерес значения угла ξ между векторами \mathbf{B}_2 и **n**, которые несложно вычисляются на основе скалярного произведения этих векторов [Бархатов и др., 2019].

Зная координаты вектора нормали к плоскости фронта УВ, можно определить значения угла ξ между векторами **B**₂ и **n** по известной формуле:

$$\xi = \arccos\left(\frac{(\mathbf{B}_{2} \cdot \mathbf{n})}{|\mathbf{B}_{2}| \cdot |\mathbf{n}|}\right) = \arccos\left(\frac{B_{2x}n_{x} + B_{2y}n_{y} + B_{2z}n_{z}}{\sqrt{(B_{2x})^{2} + (B_{2y})^{2} + (B_{2z})^{2}}\sqrt{(n_{x})^{2} + (n_{y})^{2} + (n_{z})^{2}}\right).$$
(4)

Учитывая установленное положение фронта УВ и прослеживая в потоке спутниковых данных изменение угла между вектором ММП **B**₂ и нормалью **n** к ударной волне, можно сделать вывод о квазипараллельности ($\xi \leq 30^{\circ}$) или квазиперпендикулярности ($\xi \geq 60^{\circ}$) ударной волны и связать ее ориентацию с уровнем магнитной активности в авроральной зоне.

3. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Проведен анализ характеристик межпланетной среды в периоды наблюдений быстрых магнитных облаков с ударными волнами и турбулентной областью. Всего рассмотрено 33 случая быстрых магнитных облаков, зарегистрированных в период 1998—2012 гг. В таблице 1 представлены даты регистрации магнитных облаков. Для целей настоящего исследования магнитные облака пронумерованы в соответствии с датой их регистрации. Для каждого магнитного облака анализировались параметры плазмы солнечного ветра (концентрация N и скорость V) и компоненты вектора магнитного поля B(Bx, By, Bz) в GSM-системе координат, а так же значения AL-индекса магнитной активности в авроральной зоне. В работе использованы прямые наблюдения спутника Advanced Composition Explorer (ACE) и данные OMNIWeb, взятые с 1-мин разрешением с узла CDAWeb (http://cdaweb.gsfc.nasa.gov). Из всех рассмотренных межпланетных магнитных облаков для иллюстрации были отобраны по три события, соответствующие наиболее сильным (13 июня 1998 г., 19 октября 1998 г., 06 ноября 2000 г.) и самым слабым (21 апреля 2001 г., 30 сентября 2001 г., 19 ноября 2007 г.) проявлениям суббуре-

N⁰	Дата	№	Дата	№	Дата	
1	06.01.1998 г.	12	03.10.2000 г.	23	14.12.2006 г.	
2	04.03.1998 г.	13	28.10.2000 г.	24	19.11.2007 г.	
3	01.05.1998 г.	14	06.11.2000 г.	25	05.04.2010 г.	
4	13.06.1998 г.	15	19.03.2001 г.	26	28.05.2010 г.	
5	24.09.1998 г.	16	21.04.2001 г.	27	03.08.2010 г.	
6	19.10.1998 г.	17	30.09.2001 г.	28	14.02.2011 г.	
7	18.02.1999 г.	18	18.03.2002 г.	29	30.03.2011 г.	
8	16.04.1999 г.	19	17.04.2002 г.	30	05.06.2011 г.	
9	20.02.2000 г.	20	20.03.2003 г.	31	25.10.2011 г.	
10	15.07.2000 г.	21	14.06.2005 г.	32	22.01.2012 г.	
11	10.08.2000 г.	22	13.04.2006 г.	33	23.04.2012 г.	

Таблица 1. Список быстрых магнитных облаков с датами их регистрации

вой активности. Эти события выделены жирным шрифтом в табл. 1. Для каждого такого события суббуревая активность оценивалась интегральным значением *AL*-индекса за интервал времени от момента обнаружения ударной волны до начала регистрации собственно тела магнитного облака. Отметим, что процессы в ММП, происходящие на фронте ударной волны выходят за рамки настоящего исследования, поскольку используемые минутные данные не позволяют анализировать турбулентную среду в пределах ширины фронта ударной волны.

4. АНАЛИЗ КОНКРЕТНЫХ СОБЫТИЙ

4.1. События, соответствующие наиболее сильным проявлениям суббуревой активности

4.1.1. Событие 13-14 июня 1998 г.

Это событие начинается регистрацией внезапного начала бури (SSC) в 19:25 UT, в то время как ударная волна (УВ) по данным OMNIWeb была зарегистрирована в 19:49 UT. Момент SSC определяется началом резкого роста индекса SYM/H и связан с поджатием дневной магнитосферы резким увеличением динамического давления солнечного ветра. Время регистрации УВ определялось по резкому росту динамического давления солнечного ветра в данных OMNIWeb. Таким образом, некоторое расхождение времени регистрации моментов SSC и УВ связано с ошибкой в определения времени распространения сигнала от положения спутника до магнитопаузы. Начало тела магнитного облака (МО) было зарегистрировано 14 июня в 10:00 UT. Таким образом, длительность взаимодействия магнитосферы Земли с переходной областью магнитного облака составляла ~14.5 ч.

На рисунке 2*а* показаны вариации параметров межпланетной среды и индексов геомагнитной активности в интервале времени от 12:00 UT 13 июня до 12:00 UT 15 июня 1998 г. Сверху вниз на рисунке показаны: *Bz*-компонента ММП, динамическое давление солнечного ветра, индексы геомагнитной активности *AL* и *SYM/H*. Вертикальными штриховыми линиями отмечено время регистрации SSC и начала тела магнитного облака.

Примерно в течение 3 ч до SSC/УВ геомагнитная активность была низкая, магнитные бухты не регистрировались. Магнитные возмущения не регистрировались и в течение ~4.5 ч после SSC. Таким образом, увеличения плотности, скорости и динамического давления солнечного ветра в этом событии не привели к суббуревым возмущениям до поворота на юг *Bz*-компоненты ММП.

В период взаимодействия магнитосферы с оболочкой магнитного облака можно выделить две магнитные бухты: одна стандартная (1) длительностью ~2.5 ч, которая началась примерно через 4.5 ч после SSC; вторая (2) — очень продолжительная ~12 ч. Последняя состоит из серия последовательных суббурь, которые трудно отделить друг от друга по вариациям *AL*-индекса. Возмущения (1) и (2) следуют за поворотом ММП на юг. Главная фаза бури начинается примерно за 20 мин до магнитного возмущения (2). Краткие характеристики суббурь:

1. Начало — 00:08 UT, максимум в 00:49 UT амплитудой —384
н Тл

2. Начало — 04:14 UT максимум в 05:24 UT амплитудой —728 нТл

Интегральный *AL* для данного события составил –218976 нТл, среднее минутное значение –252 нТл.

4.1.2. Событие 18-19 октября 1998 г.

В этом событии SSC было зарегистрировано в 19:52 UT, а УВ в 19:40 UT. В течение примерно 2-х часов до SSC магнитная активность была низкой, суббурь и магнитных возмущений нет. Длительность взаимодействия магнитосферы Земли с ПО магнитного облака в этом событии составила ~18.0 ч, до ~14:00 UT 19 октября.

Первая серия магнитных возмущений, состоящая из 4-х суббуря (1–4) началась примерно через 3 ч после SSC. Эта серия протекала на фоне знакопеременных значений *Bz*-компоненты ММП. Вторая серия возмущений началась после первой примерно через 4-х часовой интервал слабовозмущенного (300–400 нТл), слабоменяющегося магнитного поля. Эта серия состояла из 4-х суббурь (5–8) увеличивающейся интенсивности, которые протекали при южной ориентации ММП. Возмущения 1, 2 и 3 наблюдались на фазе DCF, а



Рис. 2. Вариации параметров межпланетной среды и индексов геомагнитной активности в период регистрации магнитных облаков 13–14 июня 1998 г. (*a*) и 21–22 апреля 2001 г. (*б*). Вертикальные штриховые линии – время регистрации SSC и начала тела магнитного облака.

суббури 4—8 на главной фазе магнитной бури. Краткая характеристика суббурь, включающая в себя примерное время начала суббури и ее интенсивность:

1. Начало – 23:07 UT,	5. Начало — 10:33 UT,
<i>AL</i> = -378 нТл;	<i>AL</i> = -806 нТл;
2. Начало – 00:02 UT,	6. Начало — 11:52 UT,
<i>AL</i> = –434 нТл;	<i>AL</i> = -862 нТл;
3. Начало – 02:35 UT,	7. Начало — 13:02 UT,
<i>AL</i> = -1029 нТл;	<i>AL</i> = -1192 нТл;
4. Начало – 03:34 UT,	8. Начало — 13:45 UT,
<i>AL</i> = -982 нТл;	<i>AL</i> = -1760 нТл.

Интегральный *AL* для данного события составил –461310 нТл, среднее минутное значение –427 нТл.

4.1.3 Событие 06 ноября 2000 г.

В этом событии SSC было зарегистрировано в 09:47 UT, а УВ в 10:00 UT — разница по времени составляет 13 мин. Примерно в течение 2 ч до SSC магнитное поле было спокойное, суббурь нет. Одновременно с SSC начался резкий рост магнитной активности. Первый пик в *AL*-индексе

ГЕОМАГНЕТИЗМ И АЭРОНОМИЯ том 59 № 4 2019

величиной -982 нТл наблюдается уже в 09:55 UT, т.е. через 8 мин после SSC. Длительность периода взаимодействия магнитосферы с ПО магнитного облака составила в этом событии ~12 ч. В этом интервале времени суббури непрерывно следовали одна за другой. Начало суббурь определить невозможно, но можно выделить 5 пиков в вариациях *AL*-индекса. Магнитные возмущения с пиками 3, 4 и 5 наблюдались в период главной фазы магнитной бури. Вертикальная компонента ММП после SSC сначала была знакопеременной, а затем примерно от 13 UT до 21 UT стабильно южной.

Пики суббуревой	активности:
-----------------	-------------

1. B 10:59 UT;	4. B 17:12 UT;
<i>AL</i> = -1259 нТл;	<i>AL</i> = –1376 нТл;
2. B 12:22 UT;	5. B 20:18 UT;
<i>AL</i> = -736 нТл;	<i>AL</i> = -1400 нТл.
3. B 14:56 UT;	
AL = -1891 нТл:	

Интегральный *AL* для данного события составил –491657 нТл, среднее минутное значение –682 нТл.

4.2. События, соответствующие наиболее слабым проявлениям суббуревой активности

4.2.1. Событие 21-22 апреля 2001 г.

В этом событии SSC было зарегистрировано в 16:01 UT, а УВ в 16:21 UT 21 апреля 2001 г. До SSC/УВ геомагнитное поле было спокойным в течение примерно 4-х ч, исключая небольшое магнитное возмущение амплитудой -256 нТл непосредственно перед моментом SSC. Взаимодействие магнитосферы с переходной областью магнитного облака происходило примерно в течение ~7.5 ч, в интервале от момента SSC до ~23:30 UT. Вариации параметров межпланетной среды и индексов геомагнитной активности для этого события показаны на рис. 26.

Сразу же после SSC начинается плавное уменьшение величины AL-индекса с минимумом в 17:01 UT величиной -187 нТл. Эту небольшую магнитную бухту мы отнесли к компрессионному возмущению: бухта наблюдалась при положительных значениях ММП, аналогичная вариация зарегистрирована как в динамическом давлении солнечного ветра, так и *PC*-индексе магнитной активности в полярной шапке.

Единственная суббуря в период взаимодействия магнитосферы с ПО магнитного облака началась в 20:35 UT с минимумом в 16:01 UT величиной –272 нТл и закончилась в 21:36 UT. Суббуря протекала фаза DCF магнитной бури при положительных значениях индекса SYM/H. Интегральный *AL* для данного события составил –38404 нТл, среднее минутное значение –85 нТл.

4.2.2.Событие 30 сентября 2001 г.

В этом событии SSC и УВ были зарегистрированы одновременно в 19:24 UT. Начало собственно тела MO определено в ~20:30 UT, что указывает на небольшую переходную область MO, взаимодействие магнитосферы с которой длилось чуть больше 1 ч. В течение более 5 ч до SSC магнитное поле было умеренно возмущенным, величина *AL*-индекса варьировалась вокруг –500 нТл. При отрицательной, слабо меняющейся *Bz*-компоненте MMП это возмущение можно отнести к периоду стационарной магнитосферной конвекции (CMK), на фоне которой при *AL* = –427 нТл и появляется SSC.

В период взаимодействия магнитосферы с переходной областью магнитного облака магнитная активность быстро уменьшается, хотя ММП продолжает оставаться южным. Эту ситуацию можно интерпретировать таким образом, что импульс динамического давления "сбивает" режим СМК, а следующая за ударной волной переходная область способствует не росту, но уменьшению магнитной активности в авроральной зоне. Режим СМК возобновился после 24 UT, когда ММП снова повернулось на юг.

Интегральный *AL* для данного события составил –22275 нТл, среднее минутное значение –348 нТл. Средний уровень возмущенности достаточно высокий. Однако отметим, что в период ПО магнитная активности в авроральной зоне быстро падала, от начального уровня –427 нТл в момент SSC до –151 нТл в течение одного часа.

4.2.3. Событие 19 ноября 2007 г.

В этом событии SSC было зарегистрировано в 18:11 UT, а УВ в 18:06 UT. По характеристикам плазмы солнечного ветра и ММП тело МО регистрируется примерно в 01:40 UT и таким образом длительность взаимодействия магнитосферы с ПО составляла ~7.5 ч. До моментов SSC и УВ межпланетное магнитное поле было северное, а vровень магнитной активность в авроральной зоне |AL| < 20 нТл. Момент SSC не сопровождался заметным ростом магнитной активности. В период взаимодействия магнитосферы с ПО наблюдалась лишь одна слабая магнитная бухта. Это возмущение, начавшееся в 23:00 UT имело пиковое значение -276 нТл в 21:30 UT. Суббуре предшествовал небольшой экскурс ММП на юг, начавшийся в ~22 UT. Суббуря протекала при положительных значениях индекса SYM/H. Интегральный AL для данного события составил –19453 нТл, среднее минутное значение -43 нТл.

5. АНАЛИЗ ДАННЫХ

Результаты расчета значений углов ξ , между вектором ММП в набегающем на магнитное облако потоке солнечного ветра и нормалью к ударной волне (УВ) магнитного облака для шести рассмотренных выше событий представлены на рис. 3. Время, когда космическим аппаратом был зарегистрирован фронт УВ, отмечено вертикальной линией. Согласно алгоритму определения ориентации фронта УВ (раздел 2 настоящей работы) момент регистрации УВ отмечается между двумя минутными отсчетами. По времени этот момент для версии, представленной на рис. 3, располагается между отсчетами −1 и 0. Значение угла Е непосредственно перед фронтом УВ выделено кружочком. Тогда "ноль" на горизонтальной шкале рис. З будет соответствовать началу регистрации оболочки магнитного облака.

Как видно из рисунка, события со слабой суббуревой активностью (левая часть рисунка) характеризуются углами ξ , лежащими в интервале $60^{\circ}-80^{\circ}$ (квазиперпендикулярные УВ). Напротив, в событиях со значительной суббуревой активностью (правая часть рисунка) углы ξ перед фронтом УВ небольшие и в среднем не превыша-



Рис. 3. Изменения значений углов ξ между вектором ММП и нормалью к ударной волне до и после регистрации фронта УВ (анализируемый угол отмечен маркером). (*a*, *б*, *в*) – события со слабой суббуревой активностью; (*c*, *d*, *e*) – события со значительной суббуревой активностью. Вертикальные линии – время регистрации фронта УВ. Дата события указана в правом верхнем углу каждого графика.

ют ~25° (квазипараллельные УВ). Полученные результаты подкрепляются анализом величины скачка модуля магнитного поля ΔB на УВ, динамикой углов ξ между вектором ММП и нормалью к фронту УВ в их сопоставлении с интегральными значениями AL-индекса магнитной активности. Поведение этих параметров для всех 33 событий, рассмотренных в настоящей работе, представлено на рис. 4. Поскольку уровень турбулентности в переходной области МО определяется величиной скачка магнитного поля на УВ, все изучаемые события были распределены вдоль горизонтальной оси рис. 4 в порядке убывания ΔB . Это распределение показано на рис. 4а. Серые и черные точки на рисунке условно соответствуют событиям с квазиперпендикулярными и квазипараллельными ударными волнами, соответственно. Большими кружками выделены события, представленные на рис. 3.

Нетрудно видеть, что большие углы (рис. 4*б*) для квазиперпендикулярных УВ при неизменной нормальной составляющей магнитного поля ведут к заметному скачку ММП. Напротив, малые

ГЕОМАГНЕТИЗМ И АЭРОНОМИЯ том 59 № 4 2019

углы для квазипараллельных случаев вызывают малые изменения модуля ММП. Согласно соображениям, изложенным в разд. 2, большие значения модуля магнитного поля (большое ΔB) за ударной волной должны стабилизировать волновые процессы в переходной области и понижать уровень интенсивности турбулентных движений [Бархатов и др., 2001]. Действительно, в соответствие с рис. 4*в* эти значения отвечают наименьшей суббуревой активности оцениваемой интегральным значением *AL*-индекса за интервал времени от момента обнаружения ударной волны до начала регистрации собственно тела магнитного облака, т.е. во время попадания магнитосферы в оболочку магнитного облака.

Полученные выводы относительно связи ориентации плоскости ударной волны МО с уровнем турбулентности в оболочке облака и, соответственно, со степенью суббуревой активности, подкреплены сопоставлением активности с выполнением условий (1 и 2, см. разд. 2) подавления в ней турбулентных движений [Бархатов и др., 2019]. Результаты по выполнению условий приведены в табл. 2. Анализ результатов приведенных в





Рис. 4. Величина скачков ММП на УВ (a); значения углов ξ между вектором ММП и нормалью к фронту УВ (b); величина интегрального AL-индекса (в). Серые точки – квазиперпендикулярные УВ, черные точки – квазипараллельные УВ. Сплошные линии – аппроксимация полиномом 3 порядка. На оси абсцисс указаны номера событий согласно табл. 1.

табл. 2 согласуется с выводами о зависимости уровня интегральной суббуревой активности от уровня МГД-турбулентности в оболочке облаков.

6. ВЫВОДЫ

Проведен анализ геомагнитной активности одного из элементов структуры магнитных облаков – их турбулентных оболочек. Изучена зависимость суббуревой активности от уровня МГЛ турбулентных процессов происходящих в переходном слое (оболочке) между ударной волной и собственно телом магнитного облака. При этом принято во внимание, что, турбулентные явления в оболочке облака во многом определяются ориентацией плоскости ударной волны по отношению к ММП поглощаемому ударной волной при ее распространении в солнечном ветре.

Применение предложенного нами ранее метода поиска ударных волн в потоке солнечного ветра [Бархатов и Ревунов, 2010] и определение ориентации их ударных плоскостей позволило установить динамику угла между ММП непосредственно перед фронтом ударной волны и нормалью к ее фронту. Расчет ориентации фронтов УВ выполнен для 33 случаев регистрации магнитных облаков, которым предшествовала ударная волна и турбулентная переходная область. Рассмотренные события содержали ударные волны квазиперпендикулярной направленности с углами между вектором ММП в набегающем потоке солнечного ветра и нормалью к ударной волне в интервале 70°-80°, и ударные волны квазипараллельной ориентации с углами в интервале 25°-35°. Сопоставление степени суббуревой активности, характеризуемой интегральным индексом AL, с ориентацией ударных фронтов свидетельствует о зависимости геомагнитных возмущений от уровня

Nº	Дата	Соотн. (1) выполняется	Соотн. (2) выполняется	Турбулентность за фронтом УВ	Величина интегрального AL
1	06.01.1998 г.	Нет	Нет	Сохраняется	Значительная
2	04.03.1998 г.	Да	Нет	Гасится	Низкая
3	01.05.1998 г.	Да	Да	Гасится	Низкая
4	13.06.1998 г.	Да	Да	Гасится	Значительная
5	24.09.1998 г.	Да	Нет	Гасится	Низкая
6	19.10.1998 г.	Дa	Нет	Гасится	Значительная
7	18.02.1999 г.	Нет	Нет	Сохраняется	Значительная
8	16.04.1999 г.	Да	Нет	Гасится	Значительная
9	20.02.2000 г.	Дa	Дa	Гасится	Низкая
10	15.07.2000 г.	Да	Нет	Сохраняется	Средняя
11	10.08.2000 г.	Нет	Нет	Сохраняется	Значительная
12	03.10.2000 г.	Нет	Нет	Сохраняется	Значительная
13	28.10.2000 г.	Нет	Нет	Сохраняется	Средняя
14	06.11.2000 г.	Да	Дa	Гасится	Значительная
15	19.03.2001 г.	Дa	Нет	Сохраняется	Значительная
16	21.04.2001 г.	Да	Дa	Гасится	Средняя
17	30.09.2001 г.	Дa	Нет	Гасится	Низкая
18	18.03.2002 г.	Дa	Дa	Гасится	Средняя
19	17.04.2002 г.	Нет	Нет	Сохраняется	Значительная
20	20.03.2003 г.	Дa	Нет	Сохраняется	Значительная
21	14.06.2005 г.	Да	Дa	Гасится	Значительная
22	13.04.2006 г.	Да	Дa	Гасится	Низкая
23	14.12.2006 г.	Да	Нет	Сохраняется	Средняя
24	19.11.2007 г.	Дa	Дa	Гасится	Низкая
25	05.04.2010 г.	Нет	Нет	Сохраняется	Значительная
26	28.05.2010 г.	Да	Дa	Гасится	Средняя
27	03.08.2010 г.	Нет	Нет	Сохраняется	Значительная
28	14.02.2011 г.	Да	Нет	Сохраняется	Низкая
29	30.03.2011 г.	Нет	Нет	Сохраняется	Значительная
30	05.06.2011 г.	Дa	Нет	Сохраняется	Значительная
31	25.10.2011 г.	Дa	Нет	Сохраняется	Значительная
32	22.01.2012 г.	Нет	Нет	Сохраняется	Значительная
33	23.04.2012 г.	Да	Да	Гасится	Низкая

Таблица 2. Связь ориентации плоскости ударной волны МО с уровнем турбулентности в оболочке облака (жирным выделены реперные события)

турбулентности в переходной области. На этом основании делается вывод о росте уровня интенсивности турбулентных процессов оболочке облака с уменьшением величины магнитного поля проникающего в оболочку и выполняющего стабилизирующую роль для турбулентных МГД-возмущений. В результате исследования было показано, что в случаях квазипараллельных ударных волн магнитных облаков интенсивность суббуревых процессов нарастает. Полученные выводы относительно связи ориентации плоскости удар-

ной волны магнитных облаков с уровнем турбулентности в оболочке облака определяющей степень суббуревой активности, подкреплены сопоставлением геомагнитной активности с выполнением условий подавления в оболочке облака турбулентных движений. В целом выполненное исследование показало, что теоретические представления о возможной связи ориентации фронта ударной волны магнитного облака и, соответственно, уровня турбулентности в оболочке облака, с уровнем суббуревой активности экспериментально подтверждаются. Таким образом, результаты, полученные при обработке экспериментальных данных, согласуются с аналитическими оценками.

7. ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Параметры межпланетного магнитного поля, плазмы солнечного ветра и индексы магнитной активности взяты на страницах (http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/) и (http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/), соответственно. Работа Н.А. Бархатова и С.Е. Ревунова поддержана Госзаданием Минобрнауки РФ № 5.5898.2017/8.9. Работа О.М. Бархатовой грантом Российского фонда фундаментальных исследований РФФИ № 18-35-00430.

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., Ревунов С.Е. Нейросетевая классификация разрывов параметров космической плазмы // Солнечно-земная физика. Выпуск 14(127). С. 42–51. 2010.

– 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., 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. 2014.

Бархатов Н.А., Воробьев В.Г., Ревунов С.Е., Ягодкина О.И.
 Проявление динамики параметров солнечного ветра

на формирование суббуревой активности // Геомагнетизм и аэрономия. Т.57. № 3. С. 273–279. 2017. https://doi.org/10.1134/S0016793217030021

– 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.

https://doi.org/10.7868/S0016794018020013

– Бархатов Н.А., Долгова Д.С., Ревунова Е.А. Геомагнитная активность структуры магнитных облаков // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 59. № 1. С. 19–29. 2019.

– 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.

– Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. Теоретическая физика. Т. 8. М.: Наука. 624 с. 1982.

– 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.

– Манакова Ю.В., Пехтелева К.А., Бархатов Н.А., Ревунов С.Е. Пространственно-временной анализ возмущений диапазона РС4-5 в периоды магнитных бурь корреляционно-скелетонным методом // Вестн. Мининского университета. № 1. 2016.

— Хундхаузен А. Расширение короны и солнечный ветер. М.: Мир. 302 с. 1976.

– Barkhatov N.A., Revunova E.A., Vinogradov A.B. Possible cause of solar wind magnetic cloud shock waves // Proc. XL Annual Seminar "Physics of Auroral Phenomena". Apatity. P. 76–77. 2017.

- Kilpua E.K.J., Li Y., Luhmann J.G., Jian L.K., Russell C.T. On the relationship between magnetic cloud field polarity and geoeffectiveness // Ann. Geophys. V. 30. P. 1037– 1050. 2012.

https://doi.org/10.5194/angeo-30-1037-2012