

УДК 523.62-726

## МГД-СТРУКТУРА МЕЖПЛАНЕТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ, НАБЛЮДАВШИХСЯ ВБЛИЗИ ЗЕМЛИ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНО-ЗЕМНОЙ БУРИ 7–13 НОЯБРЯ 2004 г.

© 2011 г. К. Г. Иванов

Учреждение РАН Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова  
г. Троицк (Московская обл.)

e-mail: kivanov@izmiran.troitsk.ru

Поступила в редакцию 03.10.2010 г.

МГД-структура и конфигурация межпланетных возмущений вблизи Земли в ходе гелиосферной экстратури ноября 2004 г. рассмотрена с учетом влияния секторной структуры ММП и с использованием результатов расчета нормалей к ударным волнам, магнитным облакам и секторным границам по данным измерений на околоземных ИСЗ. Три последовательных интервала возмущений соответствовали входу, нахождению внутри и выходу Земли из относительно узкого положительного сектора со вспышечно-активной областью 10696, породившей серию из ударных волн и активное трансэкваториальное волокно. Показано, что в этих трех различных положениях МГД-структура и конфигурация околоземных возмущений существенно и специфически для каждого положения зависели от секторной структуры ММП и взаимодействия ударных волн с секторными границами, волокном и магнитными облаками. В частности, это выражалось в кратных пересечениях секторных границ, сильной деформации магнитных облаков. Показано, что в рассмотренных условиях модели цилиндрических круговых облаков имеют ограниченное применение.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В работе Иванова и Харшиладзе [2009] обнаружен квазидвухлетний МГД-процесс, ответственный за возникновение, динамику, геоэффективность и исчезновение 4-секторной структуры крупномасштабного открытого магнитного поля Солнца (КОМПС) на фазе спада 23-го цикла (май 2004–декабрь 2005 г.). Процесс характеризовался МГД-возмущением, распространявшимся от зоны активных долгот в направлении вращения Солнца и диссипировавшим при завершении полного пробега вокруг Солнца при достижении обратной стороны зоны активных долгот. Процесс состоял из нескольких этапов, каждый из которых представлял собой некое замечательное состояние КОМПС и его медленную (в течение нескольких солнечных оборотов) динамику, в ходе которой возникали активные секторные границы, центры активности и специфическая для каждого этапа мощная гелиосферная буря. В итоге возникла серия гелиосферных бурь июля и ноября 2004 г., января, мая, августа и сентября 2005 г., образовавшая своеобразный кластер родственных по происхождению гелиосферных бурь.

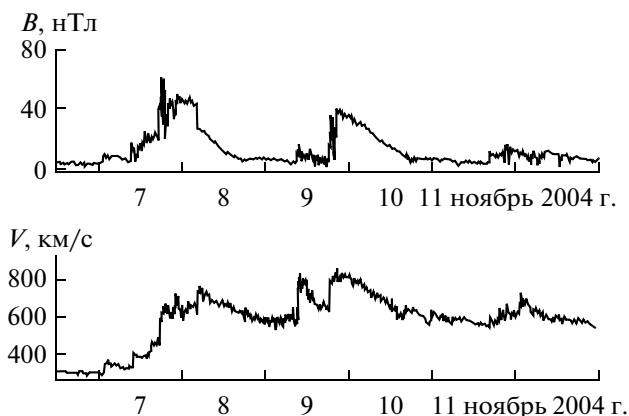
Начата работа по более детальному исследованию двух первых этапов: мая–июля (“Сверхконцентрация”), августа–декабря (“Вытеснение”) 2004 г. как в рамках такого широкого подхода, так и с учетом результатов других авторов для соответствующих гелиосферных бурь июля и ноября 2004 г. [Иванов, 2009; 2010; 2010а; 2010б].

Непосредственно солнечным источникам, межпланетным возмущениям и моделированию бури начала ноября 2004 г. уделено значительное внимание в работах [Ермолаев и др., 2005; Williams et al., 2005; Черток, 2006; Wang et al., 2007; Harra et al., 2007; Pohojolainen et al., 2007; Dasso et al., 2007; Longcope et al., 2007; Bisi et al., 2008].

В МГД-структуре межпланетных возмущений вблизи Земли идентифицированы шесть головных и две обратные ударные волны, два магнитных облака [Ермолаев и др. 2005; Harra et al., 2007]. В классе моделей бессилового кругового цилиндра оценены конфигурации, размеры и спиральность магнитных облаков [Harra et al., 2007; Dasso et al., 2007; Longcope et al., 2007], а в одном случае и магнитный поток [Longcope et al., 2007].

Более детальные представления об МГД-структуре этих возмущений можно получить: во-первых, если учесть конфигурацию межпланетных ударных волн, что существенно для более точной привязки к солнечным источникам [Иванов, 2011], и, во-вторых, если рассмотреть связь этих возмущений с секторной структурой магнитного поля Солнца.

Цель данной статьи – развитие представлений о структуре и конфигурации этих возмущений с учетом, в первую очередь, того обстоятельства, что они наблюдались в окрестностях гелиосферного токового слоя, при неоднократных пересечениях секторных границ. Кроме того, предлагается неза-



**Рис. 1.** Вариации 16-секундных значений модуля индукции ММП и 64-секундной потоковой скорости  $V$  солнечного ветра по наблюдениям на ИСЗ ACE в 3-х последовательных интервалах бури ноября 2004 г.

висимая оценка числа и конфигурации магнитных облаков. Возмущения разбиваются на три последовательных интервала (разд. 3–5), в каждом из которых наблюдались соответственно три, две и одна головные ударные волны, по одному магнитному облаку, а в первом и третьем интервалах — кратные пересечения секторных границ. Результаты обсуждаются (разд. 5) в свете работ других авторов

## 2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Использованы данные наблюдений ММП и солнечного ветра по измерениям в основном на ИСЗ ACE (<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>) ведущих экспериментаторов соответственно *N.F. Ness* и

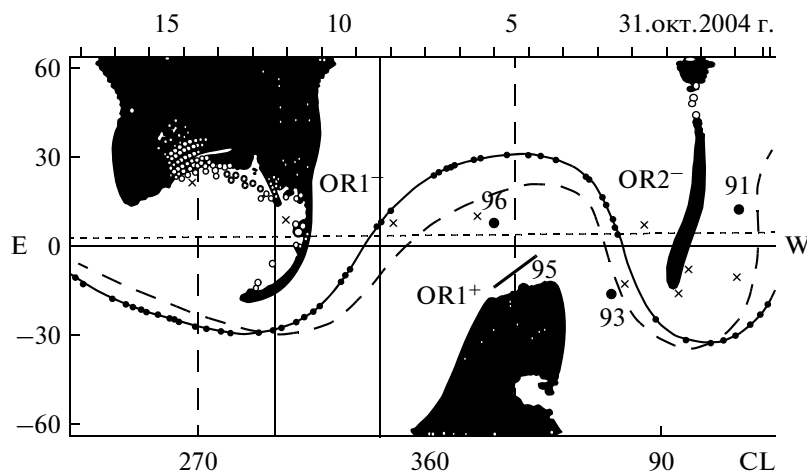
*D.J. McComas*. В отдельных случаях данные ACE сопоставлялись с данными ММП по ИСЗ *Wind* (T. Lepping) и ИСЗ *Geotail* (S. Kokubun). Нормали к сильным разрывам, времена пробега между ИСЗ, смысл и конфигурация основных структурных элементов МГД-возмущений оценивались стандартными многократно проверенными методами, например, в работе [Иванов и др., 2005]. Секторная структура — по соответствующей карте КОМПС, построенной в работе [Иванов, 2010б]. Как и в работе [Nagga et al., 2007] МГД-возмущения разбиты на три последовательных интервала, характеризующих своеобразную дискретность и затухающую интенсивность МГД-возмущения в целом (рис. 1).

Ниже эти возмущения последовательно анализируются более детально в связи с соответствующими источниками (рис. 2) [Иванов, 2010б; 2011] — секторной структурой, вспышками в АО 10696 и трансэкваториальной активностью между АО 10696 и 10695.

## 3. МГД-СТРУКТУРА ВОЗМУЩЕНИЙ ПЕРВОГО ИНТЕРВАЛА (00 UT 7.11–00 UT 9.11.2004 г.)

На рисунках 3 и 4 даны вариации  $B$ ,  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$  компонент ММП, концентрации  $n$ , компонент скорости  $V$ ,  $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$  и температуры  $T$  протонов солнечного ветра, а также отношения концентрации  $\alpha$ -частиц к протонам  $n_\alpha/n$  для первого интервала.

Это возмущение возникло при переходе Земли из отрицательного сектора ММП в положительный (рис. 2). Его солнечными источниками были корональные выбросы (СМЕ), связанные со вспышками из АО 10696:  $1n$ ,  $1b$  и  $2n$  соответ-



**Рис. 2.** Карта фотосферных источников КОМПС, отрицательных ( $OR1^-$ ,  $OR2^-$ ) и положительных ( $OR1^+$ ), центрированных на солнечный оборот 9 X1 2004 (Иванов, 2010б). Вертикальные линии — границы зоны активных долгот (сплошные) и ее окрестностей; кружки — центры АО 10696, 10695 и т.д.; отрезок прямой — трансэкваториальное волокно; кривые — нейтральные линии КОМПС на поверхности источника; прерывистая — на предыдущий оборот.

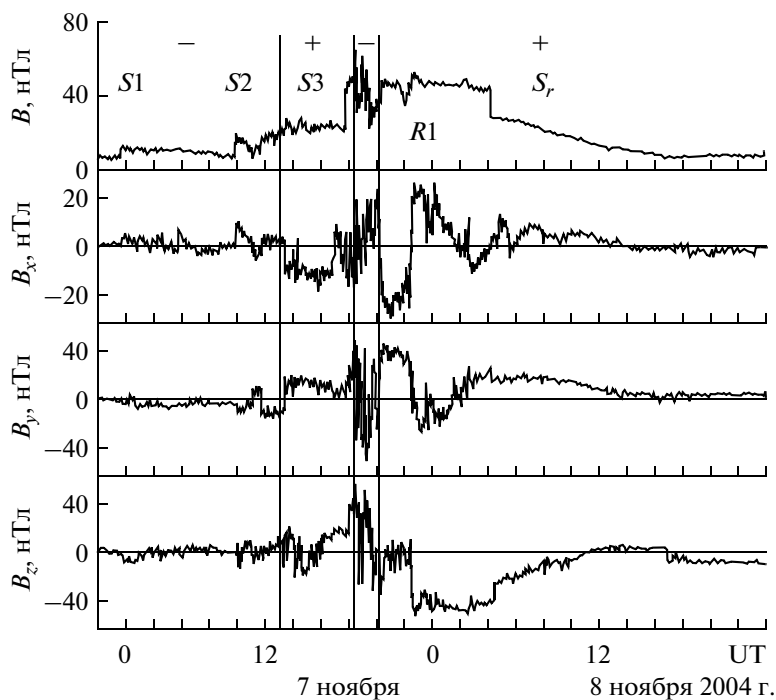


Рис. 3. Вариации ММП по наблюдениям ИСЗ ACE в 1-м интервале.  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ,  $R_1$ ,  $S_r$ -фронта 3-х головных ударных волн, передней границы облака и обратной волны соответственно; знаки плюс и минус обозначают сектора ММП.

ственно 4.11.2004 г. в 21:47 UT, N10E20; 5.1.2004 г. в 11:27 UT N07E12 и 6.11.2004 г. в 00:13 UT, N10E08 [Иванов, 2011].

Последовательное прохождение сквозь положительный сектор и взаимодействие этих СМЕ с соответствующей секторной границе обусловили характерную динамику и структуру исследуемых МГД-возмущений. Так, по свойствам МГД-структуры (рис. 3, 4) это возмущение разделяется на два последовательных интервала: во-первых, от наблюдения первой межпланетной ударной волны до наблюдения границы магнитного облака (7.11.2004 г. 02:00–22:30 UT), во-вторых, интервал прохождения магнитного облака (до ~18 UT 8.11.2004 г.). Итак, первый интервал – это приближение Земли к секторной границе между отрицательным и положительным секторами и ее пересечения, второй – интервал магнитного облака, наблюдавшегося внутри положительного сектора.

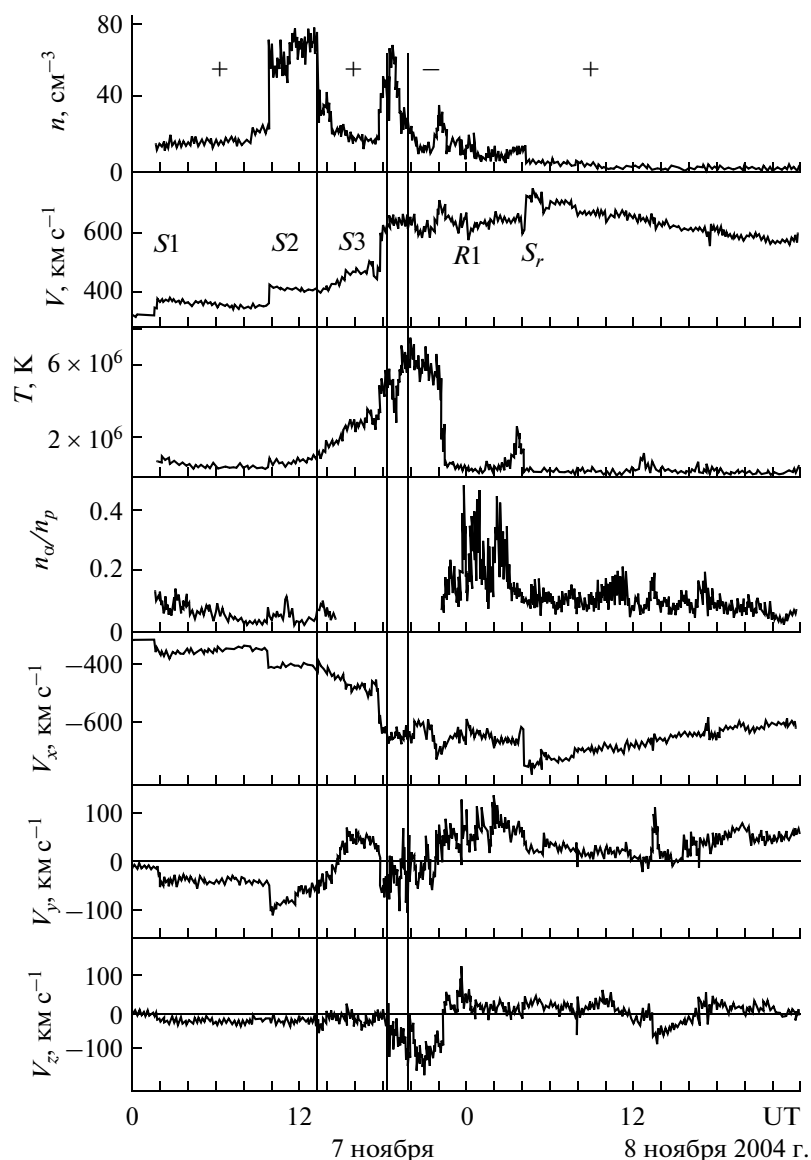
Ниже (3.1–3.2) МГД-структура и конфигурация возмущений каждого интервала рассматриваются более подробно.

*3.1. Возмущения при приближении к секторной границе и ее пересечении (02:00–22:30 UT 7.11.2004 г.).* Эти возмущения характеризуются прежде всего многократными пересечениями секторной границы с нарастающей интенсивностью и сложностью вариаций ММП и плазмы солнечного ветра (рис. 3 и 4), что обуславливалось последовательным взаимодействием с одной и той же секторной границей

3-х межпланетных ударных волн после указанных выше солнечных вспышек, и постепенным приближением Земли к окончательному пересечению этой границы. В соответствии с направлением распространения ударной волны (углы нормалей  $\varphi_N = 210, 205$  и  $210^\circ$ ,  $\varphi_N = -10, -10, -5^\circ$ ) под действием переменного динамического напора секторная граница перемещалась с востока на запад и с запада на восток. Земля по меньшей мере пять раз пересекала эту границу, включая окончательное пересечение (~20 UT 7.11.2004 г.). В соответствии с направлением распространения ударных волн и перемещениями секторной границы происходили и вариации поперечных  $V_y$  и  $V_z$ -компонент скорости солнечного ветра (рис. 4). По мере приближения Земли к окончательному входу в положительный сектор нарастала интенсивность и сложность возмущений. Так, при первом и втором входе – выходе Земли в положительный сектор и последующем окончательном ее вхождении компоненты поля  $B_x$  и  $B_y$  (рис. 3) последовательно принимали значения соответственно 5, 10 и 25 нТл и 10, 15 и 40 нТл.

Наиболее сложные и интенсивные возмущения наблюдались между третьим ударным фронтом  $S_3$  и границей магнитного облака  $R_1$  – в ударном слое. В этот слой оказалась захваченной секторная граница, и поэтому магнитное облако располагалось внутри положительного сектора.

*3.2. Магнитное облако (~20 UT 7.11.–~12 UT 8.11.2004 г.).* Магнитное облако идентифициру-



**Рис. 4.** Вариации параметров плазмы солнечного ветра по наблюдениям на ИСЗ ACE в 1-м интервале. Обозначения  $S1$  и т.д. — так же, как и на рис. 3.

ется как область сильного стабильного ММП с большой по модулю отрицательной компонентой  $B_z$ , холодной плазмой, обогащенной ядрами гелия (рис. 3 и 4).

Магнитопауза облака определяется как сильный разрыв с резким “включением”  $B_z$ -компоненты ММП, уменьшением температуры  $T$  и характерными вариациями компонент потоковой скорости  $V_{x,y,z}$ . Внутри облака (~06 UT 8.11.2004 г.) наблюдалась обратная ударная волна  $S_r$ . Хвостовая магнитопауза  $R_2$  трудноидентифицируемая и условно отнесена к моменту (~12 UT 8.11.).

Обращают на себя внимание следующие характеристики ударного слоя (переходной области меж-

ду  $\sim Sf3$  и магнитопаузой облака). Во-первых, как отмечено выше, его сложная структура с захваченной секторной границей. Во-вторых, этот слой очень горячий, что можно объяснить сильным разогревом из-за прохождения трех головных и трех обратных ударных волн, отраженных от секторной границы. В-третьих, вариации  $V_y$  и  $V_z$  компонент скорости солнечного ветра в этом слое и внутри облака (рис. 4) находятся в качественном согласии с ожидаемыми для независимо определенных нормалей к  $Sf3$  и  $R_1$  ( $210^\circ$  и  $-5^\circ$ ,  $215^\circ$  и  $-15^\circ$  соответственно), меняя свои направления на границе облака. Наконец, в-четвертых, возрастание  $V_x$  компоненты скорости на магнитопаузе облака с 600 до 700 км/ч,

естественно объясняется тем, что эта скорость равна скорости головного ударного фронта  $Sf3$

$$D = \frac{(n_2 V_2 - n_1 V_1) N}{n_2 - n_1} = 700 \text{ м/с}$$

при  $V_1 (-490, 15, 17)$ ;  $V_2 (-600, -65, -13)$  км/с;  $n_1 = 16$ ;  $n_2 = 35 \text{ см}^{-3}$ ;  $N (-0.935, -0.390, -0.065)$  и в системе координат ударного фронта эти скорости были одинаковы.

Повышенное значение  $n_{\omega}/n_p$  внутри облака допускает предположение, что мы имеем дело с той его частью, где обычно ожидается локализация волокна.

То обстоятельство, что фронт обратной волны  $S_r$  ( $\varphi_N = 30^\circ$ ;  $\theta_N \approx 5^\circ$ ) наблюдался на расстоянии от секторной границы в 4 раза большем, чем фронт прямой волны, означает, что эта волна возникла в результате отражения от секторной границы при прохождении предыдущих волн  $Sf1$  и  $Sf2$  и лишь меняла свою локализацию при прохождении очередных ударных фронтов.

Проблематичным представляется моделирование этого магнитного облака. На наш взгляд модель кругового цилиндрического облака с бессильным магнитным полем, строго говоря, не адекватна реальности и должна приводить к очень грубым погрешностям. Так, в модели кругового цилиндрического облака ось этого облака  $a$  можно оценить по формуле  $a \parallel [B_1 \times B_2] B_2$ . При измеренных на ИСЗ ACE значениях  $B_1 (-15; 35; 0)$  и  $B_2 (22; -10; -40)$  нТл, ось оказывается ориентированной в направлении  $\varphi_a = 85^\circ$  и  $\nu_a = -11^\circ$ .

Однако при такой ориентации и левой спиральности модельного магнитного жгута на начальном участке качественно верно воспроизводятся только профили  $B_x$ - и  $B_z$ -компонент, а во второй половине облака —  $B_x$  и  $B_y$ . На наш взгляд необходимо учесть, что, во-первых, это облако должно быть существенно деформировано из-за прохождения сквозь него ударной волны. Например, форма облака, как следует из результатов МГД-моделирования [Vandas et al., 1997], может превратиться из цилиндрической в эллиптическую. Во-вторых, еще более сильные деформации облака можно ожидать, если оно взаимодействует с секторной границей, а проходящая через него волна суть отраженная от этой границы, что имело место в рассматриваемом случае. В таких ситуациях облако может быть сильно сплюснутым по направлению к секторной границе, и для оценки некоторых его характеристик можно использовать модель отражения от секторной границы перпендикулярной ударной волны, падающей на “жесткую стенку” [Иванов и др., 2006]. Модель “жесткой стенки” особенно привлекательна в случае неоднократных отражений, что имело место в событиях 7–8 ноября 2004 г.).

Согласно этой модели модуль магнитного поля  $B$  за отраженной ударной волной должен возрастать в 2 раза и быть квазипостоянным, что согласуется с наблюдениями и в данном событии (рис. 3). Действительно, непосредственно на фронте обратной волны ~09:20 UT 8.11.2004 г. модуль возрастает от 27 до 45 нТл и монотонно увеличивается до 50 нТл по направлению к фронту магнитного облака (22:37 UT 7.11.2004 г.).

Интересная возможность оценки конфигурации поля внутри такого деформированного облака возникает, если принять во внимание, что магнитное поле “сплюсненного” облака постоянно вдоль малой оси облака [Vandas and Romashets, 2003]. Это означает, что в принципе можно оценить ориентацию магнитной оси такого облака, воспользовавшись этим обстоятельством. Особенно просто это сделать, когда малая ось близка по направлению или перпендикулярна какой-либо из осей солнечно-эклиптической системы координат. Так, в рассматриваемом случае она оказалась почти перпендикулярной  $OZ_{sc}$ -оси этой системы ( $\varphi_N = 215^\circ$ ,  $\theta_N = -15^\circ$  на магнитопаузе облака), и поэтому модуль  $B_z$  постоянен внутри облака, и, следовательно, ось этого магнитного облака в рамках данной модели оказывается ориентированной почти перпендикулярно плоскости эклиптики.

Заметим, что нормаль к магнитопаузе облака найдена в предположении  $N \parallel B_1 \times B_2$ , по скачку поля на границе облака; метод матрицы рассеяния дает  $\varphi_N = 225^\circ$ ,  $\theta_N = -10^\circ$ . Тестирование  $N$  по времени пробега границы между ИСЗ ACE  $(1.54; 0.15; -0.1) \times 10^6$  км и  $Wind (1.27; 0.35; -0.06) \times 10^6$  км,  $\tau = (\Delta R \times N) / V \times N = 3 \text{ мин } 20 \text{ с}$  подтвердило правильность выбора нормали (моменты наблюдения на ACE и Wind соответственно 22:36:38 и 22:40 UT).

Неопределенность возникает в идентификации хвостовой магнитопаузы облака  $R2$ : на наш взгляд, она могла бы располагаться в интервале 11–12 UT 8.11.2004 г., т.к. в этом интервале  $B_z$ -компонента становится нулевой (рис. 3), и отношение  $n_{\omega}/n_p$  становится близким к регулярному и возникают вариации  $V_z$  такого же направления, что наблюдались вне облака, в переходной области между 18 и 24 ч 7.11.2004 г. Если принять это положение  $R2$ , то поперечный размер облака  $\approx \int N V dt \approx 10^{12} \text{ см} \sim 0.2 \text{ а.е.}$ , вдоль его малой оси.

Итак, можно предположить, что облако было сильно сплюснено в направлении  $\varphi = 215^\circ$ ,  $\nu = -15^\circ$  с характерным размером в этом направлении ~0.2 а.е. и с осью, ориентированной приблизительно к югу, перпендикулярно ( $\varphi_a \approx 0^\circ$ ,  $\nu_a = -90^\circ$ ) плоскости эклиптики.

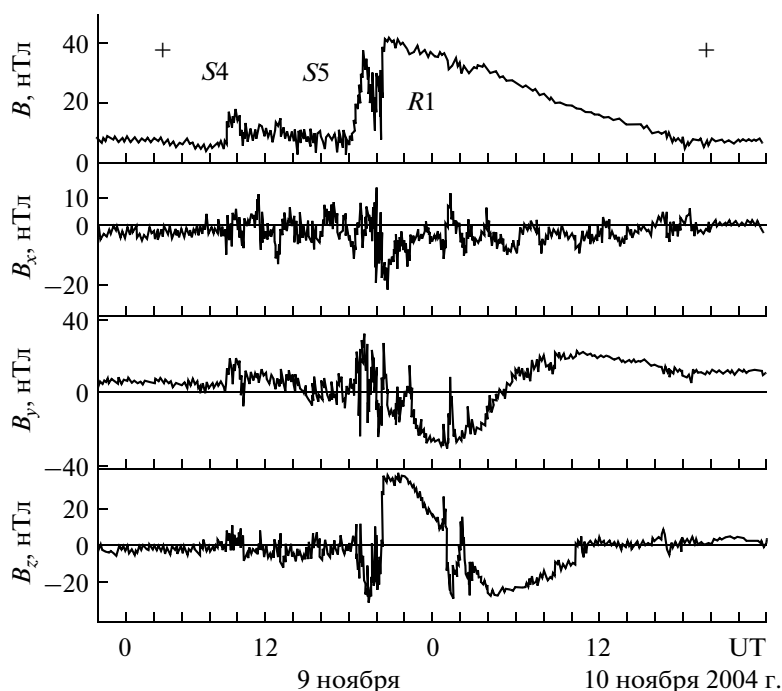


Рис. 5. Вариации ММП по наблюдениям на ИСЗ ACE во 2-м интервале. S4, S5, R1 – головные ударные волны и магнитопауза облака; знак плюс – положительного сектора ММП.

#### 4. МГД-СТРУКТУРА ВОЗМУЩЕНИЙ ВТОРОГО ИНТЕРВАЛА (00 UT 9.11.–00 UT 11.11.2004 г.)

Этот интервал состоял из последовательности трех возмущений, отличающихся друг от друга свойствами МГД-структуры. По наблюдениям на ИСЗ ACE (рис. 5 и 6) эти возмущения начались в 09:14, 18:19 и в 20:26 UT с приходом двух ударных волн и границы магнитного облака соответственно. В отличие от предыдущего интервала, когда возмущения наблюдались при многократных пересечениях Земли с западной границей положительного сектора ММП, возмущения данного интервала наблюдались целиком внутри этого сектора. Солнечными источниками этих возмущений был корональный выброс типа гало 17.11.2004 г в 16:54, ассоциированная с ним вспышка X2 в 15:42 (N09, W17), трансэкваториальное волокно (TF) (см. также [Nagga et al., 2007]), и, возможно, также выброс типа гало 8.11.2004 г в 03:54 UT, ассоциированный с серией вспышек [Иванов, 2011]. Ниже некоторые характеристики этих возмущений рассматриваются подробнее.

**4.1. Ударный фронт S4 и квазистационарное истечение из активного волокна TF.** В 09:14 UT на ИСЗ ACE наблюдался ударный фронт (S4 по работе [Иванов, 2011], наклонный как к линии Солнце–Земля ( $\varphi_N = 155^\circ$ ), так и к плоскости эклиптики ( $\nu_N = -40^\circ$ ). Вслед за этим фронтом плазма обогащена ядрами гелия ( $n_{\alpha}/n_p$  10–20%) (рис. 6). Наклон к линии Солнце–Земля подтверждается сравнени-

ем расчетного времени пробега с наблюдениями между ИСЗ ACE и Wind.

$\tau = (\Delta RN)/D \approx 270$  с, при  $R_{ACE}(1.542; 0.145; -0.097) \times 10^{11}$  см,  $R_{Wind}(1.271; 0.382; 0.053) \times 10^{11}$  см и  $D = 870$  км/с, тогда наблюдаемое время равнялось 265 с.

$D = [N(n_2 V_2 - n_1 V_1)/(n_2 - n_1)]$  – скорость ударного фронта;  $V_1(-580; 0; -30)$ ,  $V_2(-540; 50; -250)$  км/с,  $n_1 = 2$ ,  $n_2 = 5$  см<sup>-3</sup>. Сильный наклон фронта к плоскости эклиптики подтверждается большим скачком  $V_z$  после прохождения ударного фронта (рис. 6).

Мы предполагаем, что солнечным источником этого возмущения было квазистационарное истечение плазмы из активного волокна (трансэкваториального филамента, TF [Wang et al., 2007]), модифицированное ударной волной от мощной рентгеновской вспышки X2, которая сопровождалась СМЕ типа гало в 16:54 UT 7.11.2004 г. Это более детальная интерпретация возмущения по сравнению с предыдущей работой [Иванов, 2011], где источником ударной волны 09:14 UT 9.11.2004 (S4) указана вспышка X2 и соответствующее СМЕ, в согласии с более ранней работой Nagga et al. [2007], но в отличие от этой последней работы, предполагался и вклад волокна TF.

Квазистационарные истечения плазмы из активных волокон – одно из типичных явлений солнечно-земной физики [Иванов и Ромашец, 2000]. Они могут сопровождаться спорадическими выбросами этих волокон (нестационарной фазой), что,

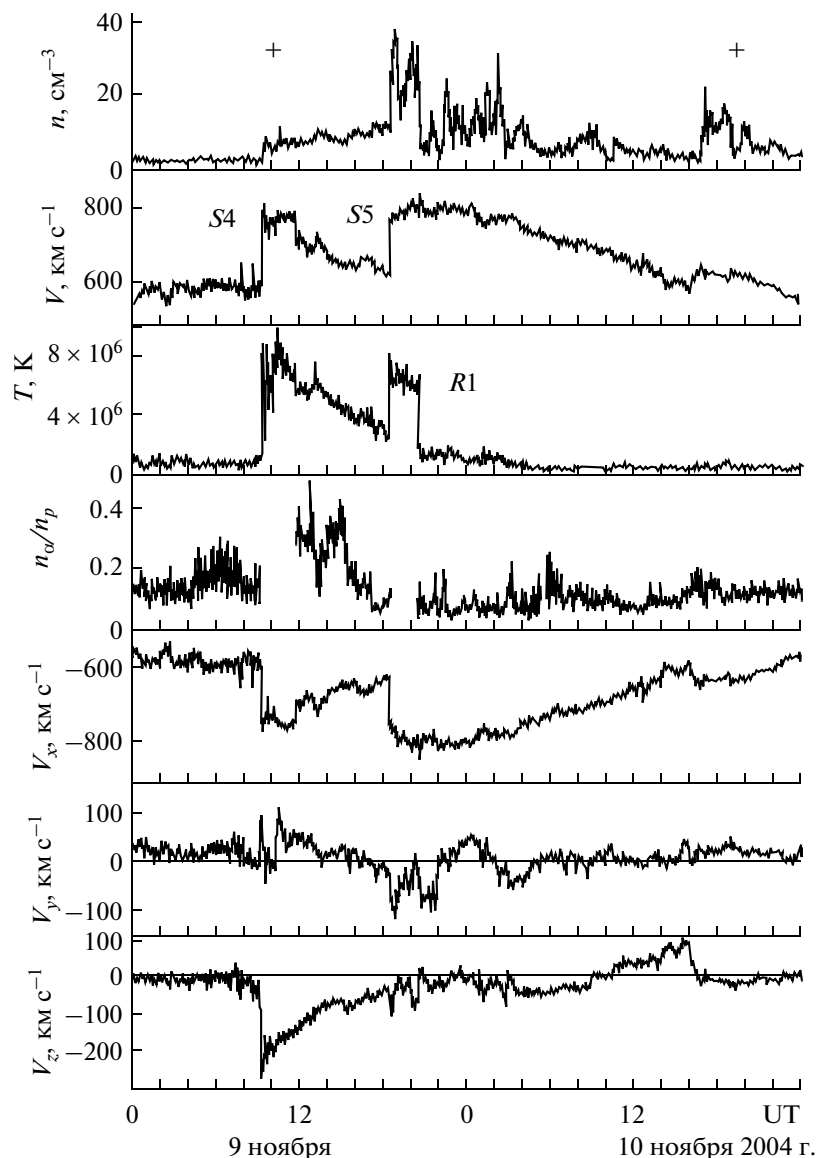


Рис. 6. Вариации параметров плазмы солнечного ветра по наблюдениям на ИСЗ ACE. S4, S5, R1 – головные ударные волны и магнитопауза облака соответственно.

по-видимому, стало источником второго возмущения в этом интервале с ударной волной в 18:19 UT (МКВ5 в [Иванов, 2011]).

Конфигурация соответствующего СМЕ и локализация транзиентных корональных дыр (диммингов), (рисунки 2г, 3г, 4д–з, в работе Черток, [2006]) согласуется с указанной выше наклонной конфигурацией МУВ4 (см. 4.2), наклонной же конфигурацией МУВ5, что допускает предположение о последовательности квазистационарного и спорадического истечения плазмы из трансэкваториального волокна TF.

4.2. Ударная волна (S5) и нестационарный волоконный поток. В 18:19 UT, 9.11.2004 г. на ИСЗ ACE наблюдался ударный фронт (S5), наклонный как к линии Солнце–Земля ( $\phi_N = 168^\circ$ ), так и к плоскости

эклиптики ( $v_N = -55^\circ$ ) почти аналогично фронту предыдущей волны (S4, разд. 4.1.). Вслед за ним 18:19–20:21 UT – весьма нестационарный, быстрый, горячий поток (ударный слой) (рис. 6) с сильным магнитным полем по-преимуществу южного направления (рис. 5). Наклон ударного фронта подтверждается сравнением теоретического и экспериментального значений времени пробега фронта между ИСЗ ACE  $(1.54; 0.142; -0.096) \times 10^{11}$  см и Wind  $(1.27; 0.39; -0.5) \times 10^{11}$  см. Действительно, фронт наблюдался на ИСЗ ACE и Wind соответственно в 18:20:50 и 18:25:50 (время пробега  $\tau = 300$  с), тогда как расчет по  $\tau = (\Delta RN)/D$  (обозначения как в 4.1.) при  $V_1(-630; -30; -40)$ ,  $V_2(-770; -100; -110)$  км/с,  $n_1 = 11$ ,  $n_2 = 25$  см $^{-3}$ , приводит к  $\tau = 280$  с.

Нормаль к границе магнитного облака  $R_1$  была определена кинематическим методом по данным трех ИСЗ: ACE (1.54; 0.41; -00953); Wind (1.27; 0.391; -0.0514) и Geotail (0.068; -0.111; 0.327)  $\times 10^{11}$  см. Моменты наблюдения границы соответственно 20:27:30, 20:26:30 и 21:04:00 UT.

Решалась система 3-х уравнений для нахождения направляющих косинусов нормали к границе  $N$  ( $l_N, m_N, n_N$ ); в двух видах

$$l_N(\Delta R_x - \tau V_x) + m_N(\Delta R_y - \tau V_y) + n_N(\Delta R_z - \tau V_z) = 0$$

для разностей координат  $\Delta R$  и пробегов  $\tau$  в паре ACE-Wind и ACE-Geotail с использованием в качестве 3-го уравнения условия

$$l_N^2 + m_N^2 + n_N^2 = 1.$$

При указанных положениях ИСЗ и моментах наблюдения границы, а также наблюдаемых значениях ее скорости  $V$  (-830; -40; 10) км/с нормаль  $N$  оказалась ориентированной в направлении  $\varphi_N \approx 212$ ,  $v_N \approx -14^\circ$ .

Нормаль к этой же границе, определенная другим методом (по односекундным средним значениям вектора магнитной индукции, в предположении  $N // B_1 \times B_2$ , и по измерениям на ИСЗ ACE  $B_1$  (-11.5; 14.5; 10),  $B_2$  (-17.5; 15.5; 26)), оказалась близкой по ориентации ( $\varphi_N = 209^\circ$ ,  $v_N = -17^\circ$ ), определенной кинематическим методом.

Нормаль к границе магнитного облака существенно отличалась от нормали к ударному фронту  $S5$  ( $\varphi_N = 168^\circ$ ,  $v_N = -55^\circ$ ), предшествовавшему этой границе; угол между нормалью равнялся  $\sim 60^\circ$ . Это различие в ориентации нормалей представляется загадочным, т.к. обычно, в других случаях, такие нормали квазипараллельны [Иванов и др., 2005], что является естественным следствием связи с границей облака, генерирующей эту ударную волну. В данном случае приходится допустить, что ударный фронт генерировался не границей магнитного облака, а имел своим источником некоторые спорадические явления на Солнце независимо от генерации магнитного облака, например, корональный выброс типа гало в 03:54 UT 8.11.2004 г. и ассоциированную с ним серию вспышек, как это предположено в работе [Иванов, 2011]. Далее можно допустить, что эта волна  $S5$  прошла сквозь магнитное облако, сильно деформировав его (см. 4.3 и Обсуждение), и распространялась по истечению магнитоплазмы из активного трансэкваториального волокна  $TF$ , делая его весьма нестационарным, плотным и горячим.

**4.3. Магнитное облако. Его колебания, деформация и изгиб.** Ось магнитного облака, будучи приблизительно определенной по соотношению  $a // N \times B_2$ , где  $N$  (-0.758; -0.477; -0.242),  $B_2$  (-17.5; 15.5; 26) нТл, оказалась ориентированной в направлении  $\varphi_a =$

$= 290^\circ$ ,  $v_a = -2^\circ$ , почти перпендикулярно линии Солнце-Земля.

Не останавливаясь детально на характеристиках этого облака, обратим внимание на следующие его свойства (рис. 6), указывающие на его сильную нестационарность. Во-первых, большие как резкие, импульсные, так и более плавные колебания компонент ММП, иногда с изменениями их знаков. Во-вторых, не плавный, а необычно резкий переход через ноль в  $B_z$ -компоненте. В-третьих, если принять, что ось магнитного облака была ориентирована так, как выше указано (см. также [Harrt et al., 2007; Dasso et al., 2007]), и облако левоспиральное, то не удается удовлетворительно согласовать ход  $B_y$  и  $B_z$  компонент ММП в начале и середине облака с их ходом в хвостовой части облака.

Эти свойства можно предположительно качественно объяснить взаимодействием этого облака с сильной ударной волной, прошедшей сквозь облако под большим углом к его оси. Подтверждением этого является (см. 4.2.) волна  $S5$  и большой угол между нормалью к фронту этой волны и к границе облака. Указанные выше три особенности этого облака качественно объяснимы взаимодействием с этой волной как колебания, деформация и изгиб облака.

## 5. МГД-СТРУКТУРА ТРЕТЬЕГО ИНТЕРВАЛА (14:00 UT, 11.11.04-00:00 UT, 13.11.2004 г.)

В отличие от первого и второго интервалов, в которых околосолнечные МГД-возмущения наблюдались соответственно на входе в положительный сектор ММП и внутри сектора (см. разд. 3, 4), возмущения третьего интервала (рис. 1) происходили на выходе из этого сектора, при пересечении его восточной границы (рис. 2).

В МГД-структуре этого возмущения по измерениям на ИСЗ ACE идентифицируются соответственно головная ударная волна  $S6$  (рис. 7-8) 16:44 UT, фрагмент магнитного облака (граница  $R_1$ ) в 21:33 UT 11.11.2004 г. и несколько пересечений секторной границы, в частности, в 22:29 UT 11.11.2004 г. и в  $\sim 08:45$  UT 12.11.2004 г.

Нормали к  $S6$  и  $R_1$ , будучи определенными по односекундным средним значениям ММП соответственно по теореме о компланарности и по соотношению  $N // B_1 \times B_2$ , оказались ориентированными в направлении  $\varphi_N = 145^\circ$ ,  $v_N = -55^\circ$  и  $\varphi_N = 175^\circ$ ,  $v_N = -50^\circ$ .

Таким образом, эти фронты пришли к Земле с западной полусферы Солнца и имели большой отрицательный наклон к эклиптике. Эта конфигурация фронтов вполне согласуется с их солнечными источниками [Иванов, 2011]: два корональных асимметричных (с позиционными углами 299 и 302) выброса типа гало, очень быстрых, с начальными



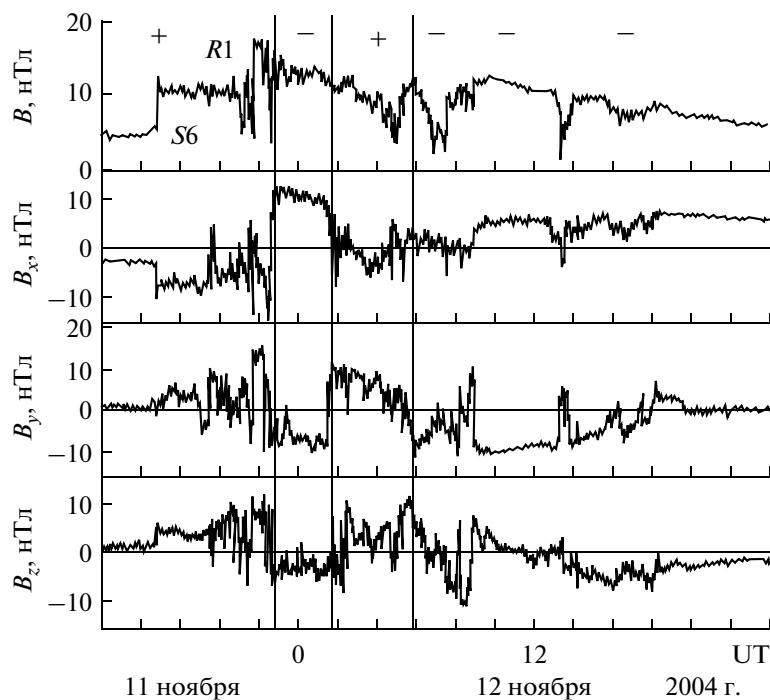


Рис. 7. Вариации ММП по наблюдениям на ИСЗ ACE в 3-м интервале. *S6*, *R1* – головной ударный фронт и магнитопауза магнитного облака; знаки плюс и минус обозначают направления поля в соседних секторах ММП.

скоростями в 17:26 UT 9.11.2004 г. ( $>2000$  км/с) и в 02:26:05 UT 10.11.2004 г., ассоциированные соответственно со вспышками в 17:05–18:29 (*2n*, N07, W51) и в 02:04–03:15 UT (*3b*, N09 W49).

Ударная волна – одна, из-за нагона ударных волн от двух корональных выбросов; профили концентрации, скорости и температуры – сложные ввиду взаимодействия между выбросами и многократного пересечения секторной границы.

Нормали же к указанным выше секторным границам оказались равными соответственно  $\varphi_N = 235^\circ$  и  $\nu_N = -15^\circ$  и  $263^\circ$  и  $-15^\circ$ , что подтверждает правильность их идентификации.

В целом это возмущение оказалось более простым, чем возмущения предыдущих интервалов.

## 6. ОБСУЖДЕНИЕ

В разделах 3–5 рассмотрена по данным околоземных ИСЗ МГД-структура межпланетных возмущений трех последовательных интервалов (7–8).11.; (9–10).11. и (11–12).11.2004 г. во время солнечно-земной бури ноября 2004 г.

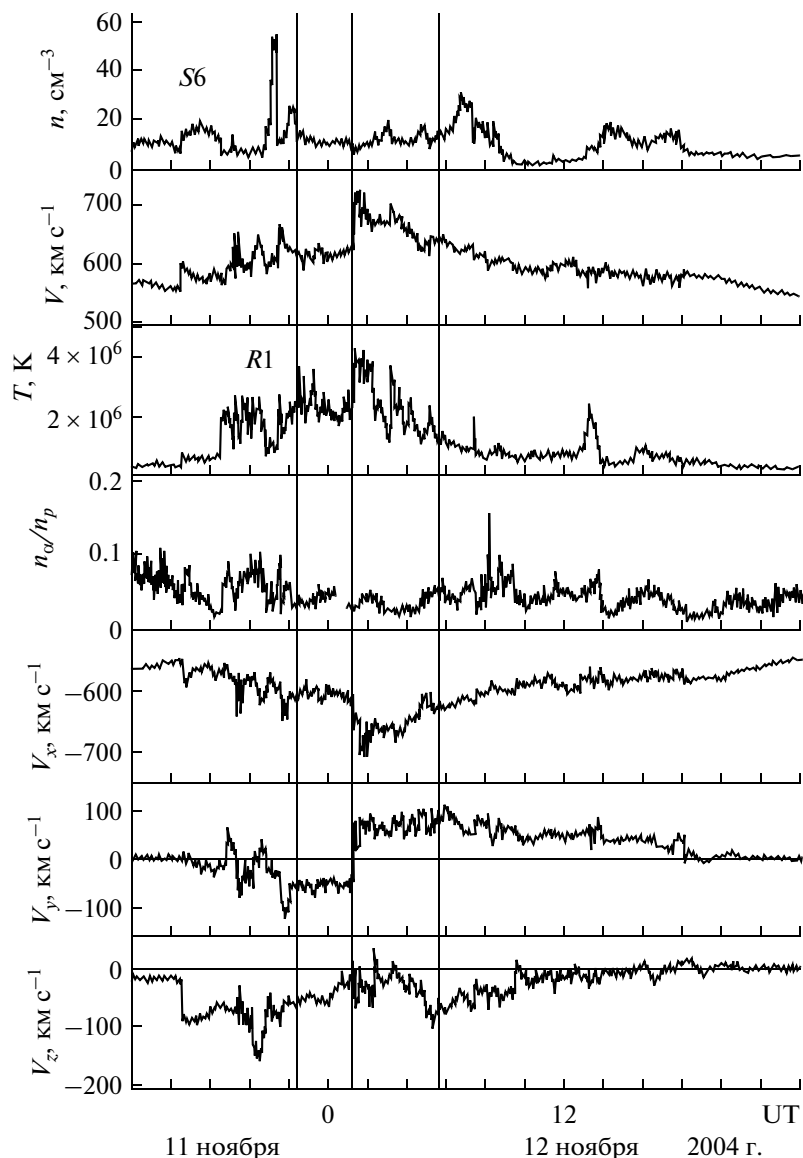
Впервые это рассмотрение проведено в связи с секторной структурой солнечного и межпланетного магнитных полей и показано, что каждому интервалу соответствовало свое специфическое положение Земли в этой структуре, существенно определявшее структуру, конфигурацию и динамику околоземных возмущений, а именно на входе, внутри и на выходе

относительно узкого положительного сектора ММП.

Как следствие, МГД-структура 1-го интервала характеризовалась серией ударных волн, преломленных на западной границе сектора с эффектами нарастающей интенсивности по мере приближения Земли к этой границе, кратными ее пересечениями и магнитным облаком, сильно деформированным из-за многократного прохождения сквозь него прямых и отраженных волн и взаимодействия с секторной границей.

Структура 2-го интервала по нашим представлениям, характеризовалась квазистационарным и нестационарным потоками из активного трансэкваториального волокна, модифицированных ударными волнами после серии вспышек. Кроме того, в структуру этого интервала входило магнитное облако, сильно нестационарное, деформированное и изогнутое проходившими сквозь него ударными волнами, природа которого остается неясной.

Структура 3-го интервала, на выходе из сектора, оказалась наиболее простой, возникла после серии 2-х тесно расположенных во времени, очень быстрых асимметричных корональных выбросов типа гало, ассоциированных с дублетом мощных вспышек баллов *2n* и *3b*. Она состояла: из одной головной ударной волны, образовавшейся ввиду слияния двух волн при нагонном эффекте; из фрагмента магнитного облака и кратных пересечений восточной границы сектора.



**Рис. 8.** Вариации параметров плазмы солнечного ветра по наблюдениям на ИСЗ ACE в 3-м интервал. *S6*, *R1* — головная волна и магнитопауза магнитного облака; знаки плюс и минус обозначают направление поля в соседних секторах ММП.

Впервые при анализе всей этой структуры определялись такие важные конфигурационные характеристики, как нормали к ударным фронтам и границам магнитных облаков, что на наш взгляд способствовало выяснению гидродинамического смысла возмущений и идентификации их источников.

МГД-структура этих возмущений вблизи Земли ранее рассматривалась с разных точек зрения в работах [Ермолаев и др., 2005; Narra et al., 2007; Longcore et al., 2007; Dasso et al., 2007; Bisi et al., 2008].

Значительное внимание было уделено идентификации головных ударных волн и привязке их к солнечным источникам [Ермолаев и др., 2005; Narra et al., 2007]. Наша точка зрения по этому вопросу изложена в работе [Иванов, 2011].

Именно в работе [Narra et al., 2007] впервые предложено разделить эти возмущения на три интервала, ассоциированные по определениям этих авторов с межпланетными проявлениями корональных выбросов (ICME), интервалы: *A* (7.11.22:30 UT–9.11.09:15 UT); *B* (9.11.20:25 UT–11.11.18:45 UT) и *C* (12.11.05:20 UT–13.11.21:35 UT).

Выделенные нами интервалы (см. 3–5) 1-й (7–8.11), 2-ой (9–10.11) и 3-ий (11–12.11) несколько отличаются от *A*, *B* и *C* по времени и гидродинамическому смыслу. Действительно интервалы *A* и 1-й почти совпадают по времени; хорошее совпадение имеет место в первой половине интервалов 2-го и *B*. Однако во второй половине интервалов 2-го и *B*

имеются существенные различия, и уже совсем не совпадают интервалы 3-й и С.

На наш взгляд это связано с двумя обстоятельствами: во-первых, с некоторым различием в идентификации солнечных источников этих возмущений, на что указано в работе Иванова [2011]; во-вторых, в некоторых различиях в интерпретации гидродинамического смысла тонких особенностей МГД-структуры этих возмущений, требующей учета влияния секторной структуры ММП, в частности, кратных пересечений секторных границ. Это особенно сказалось на совпадении интервалов 3-го и С. Так, если в нашей трактовке возмущения 3-го интервала (разд. 5) начинаются с головной ударной волны (рис. 7–8) 11.11.16:40 UT и далее наблюдался фрагмент магнитного облака и серия кратных пересечений секторной границы, то авторы [Narra et al., 2007, Table 1] включили эту волну в “хвост” интервала В, интервал же С начинается 12.11. в 05:20 UT, как раз в середине серии кратных пересечений секторной границы. Такой выбор начала интервала С в работе [Narra et al., 2007] представляется нам нелогичным и является следствием неучета этими авторами влияния секторных границ на структуру этих возмущений.

Narra et al., [2007] также впервые рассмотрели вопрос о конфигурации магнитного облака 8.11. (разд. 3, рис. 3, 4) и определили ориентацию его оси ( $\varphi_a = 86^\circ$ ,  $\nu_a = -16^\circ$ ) и диаметр 0.3 а.е. в модели кругового цилиндра. Однако, на наш взгляд, эта модель дает очень большие погрешности в данном случае, т.к. облако сильно деформировано многократными прохождением через него ударных волн и “сплющено” взаимодействием с секторной границей. Как следствие, модель кругового цилиндра не позволяет правильно воспроизвести наблюдаемые профили  $B_y$  и  $B_z$  компонент ММП. Более адекватным наблюдениям представляется южная ориентация оси магнитного облака.

Следует подчеркнуть, что магнитные облака, возникающие вблизи секторных границ и в особенности, если сектор относительно узкий, как это было в ноябрьской гелиосферной буре, могут быть сильно деформированы взаимодействием с секторными границами и ударными волнами.

Это обстоятельство подтверждается (разд. 4.3) и анализом МГД-структуры магнитного облака 9 ноября. Это облако – внутри сектора, и в работе [Dasso et al., 2007] с помощью различных модификаций динамических моделей кругового цилиндра удается довольно точно воспроизвести средние профили компонент ММП внутри этого облака (левоспирального, с осью  $\varphi_a = 275^\circ$ ,  $\nu_a = -10^\circ$ ). Однако скачкообразная, вместо плавной, смена знаков в  $B_z$ -компоненте (рис. 5) остается вне моделирования, что привело авторов [Dasso et al., 2007] к предположению о быстрой нестационарной эволюции облака из-за взаимодействия его с внешней средой. Это

предположение подтверждается (разд. 4) очень большим углом между нормальными к  $S5$  и магнитопаузе этого облака, указывающим на то, что эта волна прошла сквозь облако и под большим углом к траектории его распространения.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Впервые проанализированы МГД-структура, конфигурация и динамика межпланетных возмущений вблизи Земли в ходе гелиосферной экстробури 7–12 ноября 2004 г. с учетом секторной структуры ММП и сведений о нормалях к ударным фронтам, магнитопаузам магнитных облаков и секторным границам, полученным по данным измерений на околоземных ИСЗ.

2. Показано, что предложенному ранее Narra et al., [2007] разделению этих возмущений на три последовательных интервала соответствуют три специфические положения Земли относительно секторной структуры, а именно: приближение и вход в относительно узкий положительный сектор ММП (пересечение его западной границы), нахождение внутри сектора и выход из него (пересечение восточной границы).

3. Показано, что эти три различных положения Земли относительно секторной структуры существенно влияли на околоземные возмущения, а именно: в первом положении интенсивность возмущений нарастала с приближением к секторной границе, наблюдались ее многократные пересечения, сильный разогрев ее западных окрестностей из-за прохождения серии преломленных и отраженных ударных волн, сильная деформация облака этими волнами и взаимодействием с секторной границей; во втором положении наблюдались квазистационарная и (предположительно) нестационарная фаза истечения плазмы из трансэкваториального активного волокна, модифицированные наклонными ударными волнами, а также магнитное облако с нерегулярными профилями компонент магнитного поля, большеамплитудными низкочастотными колебаниями и, возможно, искривленное; в третьем положении, на выходе из сектора, наблюдались многократные пересечения восточной секторной границы, которым предшествовали головная ударная волна и фрагмент третьего магнитного облака.

4. Ранее полученный результат [Dasso et al., 2007], что средние профили компонент ММП в магнитном облаке 8–9 ноября (второй интервал) воспроизводятся различными модификациями динамических моделей кругового цилиндра, но резкие нерегулярные вариации профилей указывают на сильное взаимодействие с окружающей средой, подтверждается обнаружением (разд. 4) прохождения через это облако наклонной ударной волны под большим углом к траектории распространения облака.

Благодарю N.F. Hess'a (Bartal Research Institute) и D.J. McComas'a (SWRI), R. Lepping'a (NASA/GSFC), S. Kokubun (STELAB, Nagoya Univ.) и CDAWeb за данные ИСЗ ACE, Wind и Geotail, А.И. Завойкину — за помощь в оформлении.

Работа частично финансово поддержана Программой фундаментальных исследований Президиума РАН VI.15 “Плазменные процессы в солнечной системе”.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ермолаев Ю.И., Зелёный Л.М., Застенкер Г.Н. и др. Год спустя: гелиосферные и магнитосферные возмущения в ноябре 2004 г. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 45. № 6. С. 723–763. 2005.
- Иванов К.Г. Сверхконцентрация фотосферных источников крупномасштабного открытого магнитного поля Солнца в главной зоне активных долгот, блокировка дифференциального вращения, возникновение четырехсекторной структуры: 1. Динамика поля и солнечная активность // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 49. № 5. С. 585–594. 2009.
- Иванов К.Г. Сверхконцентрация... 2. Геоэффективность // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 50. № 1. С. 3–16. 2010.
- Иванов К.Г. Вытеснение крупномасштабных открытых магнитных полей Солнца из зоны активных долгот и гелиосферная буря 3–10 ноября 2004 г.: 1. Динамика поля и солнечная активность // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 50. № 3. С. 298–310. 2010а.
- Иванов К.Г. Вытеснение... 2. “Взрыв” “сингулярности”, динамика пятнообразования и энерговыделения // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 50. № 6. С. 1–16. 2010б.
- Иванов К.Г. Солнечные источники межпланетных ударных волн 7–11 ноября 2004 г. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 51. №. С. 2011.
- Иванов К.Г., Ромашец Е.П. Некоторые типичные и необычные явления солнечно-земной физики в январе–июне 1999 г. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 40. № 5. С. 15–24. 2000.
- Иванов К.Г., Харшиладзе А.Ф. МГД-природа возникновения, динамики, геоэффективности и исчезновения четырехсекторной структуры магнитного поля Солнца на фазе спада 23-го цикла // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 49. № 3. С. 291–307. 2009.
- Иванов К.Г., Ромашец Е.П., Вандас М. Солнечно-земные экстратури мая–октября 2000 г. 4. Структура головного ударного слоя и конфигурация магнитного облака вблизи Земли 15 июля // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 45. № 3. С. 336–346. 2005.
- Иванов К.Г., Ромашец Е.П., Харшиладзе А.Ф. Солнечно-земная буря 18–20 ноября 2003 г. 1. Возмущения в солнечном ветре вблизи Земли // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 46. № 3. С. 291–309. 2006.
- Черток И.М. Крупномасштабная активность в мощных эруптивных событиях ноября 2004 г. по данным SOHO // Астрон. журн. Т. 83. № 1. С. 76–87. 2006.
- Bisi M.M., Jackson B.V., Hick P.P., Buffington A., Odstreil D., Clover J.M. Three-dimensional reconstructions of the early November 2004 coordinated data analysis workshop geomagnetic storms: Analysis of STELab IPS speed and SMEI density data // J. Geophys. Res. V. 113. A00A11, doi: 10.1020/2008JA013222.2008.
- Dasso S., Nakwackl M.S., Demoulin P., Mandrini C.H. Progressive transformation of a flux rope to an ICME // Solar Phys. V. 244. № 1. P. 115–137. 2007.
- Harra L.K., Grooker N.U., Mandrini C.H. et al. How does large activity from the same region produce oppositely directed magnetic cluds? // Solar Phys. V. 244. № 1. P. 95–114. 2007.
- Longcope D., Beveridge C., Oiu J., Ravindra B., Barnes, Dasso S. Modeling and measuring the flux reconnected and ejected by the two ribbon Flare/CME event on 7 November 2004 // Solar Phys. V. 244. № 1. P. 45–73. 2007.
- Pohjolainen S., Diel-Gesztelyi J.L., Manoharan P.H., Elliott H.A. CME propagation characteristics from radio observations // Solar Phys. V. 244. № 1. P. 167–188. 2007.
- Vandas M., Romashets E.P. Force free field with constant alpha in an oblate cylinder: a generalization of the Lundquist Solution // Astron. Astrophys. № 398. P. 801–807. 2003.
- Vandas M., Fisher S., Dryer M., Shuth Z., Detman T., Geranios A. // MHD simulation of an interaction of a shock wave with a magnetic cloud // J. Geophys. Res. V. 102. № 12. P. 22295–22300. 1997.
- Wang J., Zhang Y., Zhou G., Harra L.K., Williams D.R., Jiang Y. Solar trans-equatorial activity // Solar Phys. V. 244. № 1. P. 75–94. 2007.
- Williams D.R., Torok T., Demoulin P., Driel-Gesztelyi L., Kleim B. Eruption of kink-unstable filament in NOAA active region 10696 // Astrophys. J. V. 627. L163–L166. 2005.