

## КОРРЕЛЯЦИЯ РАДИАЛЬНОЙ И МЕРИДИОНАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТ ММП И СКОРОСТИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА: ЗАВИСИМОСТЬ ОТ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ ФЛУКТУАЦИЙ

© 2019 г. Д. В. Ерофеев\*

Уссурийская астрофизическая обсерватория ДВО РАН, г. Уссурийск, Приморский край, Россия

\*e-mail: dve\_08@mail.ru

Поступила в редакцию 07.11.2017 г.

После доработки 24.05.2018 г.

Принята к публикации 27.09.2018 г.

Исследовано поведение корреляции радиальной  $B_R$  и нормальной  $B_N$ -компонент ММП в зависимости от времени, типа течения солнечного ветра и частоты флуктуаций, с учетом особенностей в секторах ММП разного знака. По данным КА WIND за 1995–2011 гг. найдено, что наиболее сильная корреляция  $B_R$  и  $B_N$  имеет место в периоды минимумов солнечной активности, при этом среднегодовые значения коэффициента корреляции  $C_{RN}$  подчиняются правилу:  $C_{RN} > 0$  или  $C_{RN} < 0$  соответственно севернее или южнее гелиосферного токового слоя. Изменение коэффициента корреляции в ходе солнечного цикла происходит приблизительно одинаковым образом в медленных и быстрых потоках солнечного ветра. Зависимость корреляции  $B_R$  и  $B_N$  от частоты флуктуаций исследована в диапазоне  $1.2 \times 10^{-5}$ – $8.3 \times 10^{-3}$  Гц, обнаружено, что корреляция максимальна на низких частотах, а начиная от  $10^{-4}$  Гц медленно уменьшается с ростом частоты. Также найдено, что на частотах около  $10^{-4}$  Гц и выше флуктуации компонент скорости солнечного ветра  $V_R$  и  $V_N$  коррелируют аналогично компонентам ММП  $B_R$  и  $B_N$ .

DOI: 10.1134/S0016794019010073

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Направление вектора межпланетного магнитного поля (ММП) претерпевает значительные вариации [Burlaga and Ness, 1997; Веселовский и Тарсина, 2001; Borovsky, 2010], что приводит, в частности, к появлению значительной меридиональной составляющей магнитного поля. Причинами появления меридиональной компоненты ММП являются крупномасштабные неоднородности гелиосферы, такие как области взаимодействия быстрых и медленных потоков солнечного ветра и вызванные солнечной активностью возмущения [Zhang and Moldwin, 2014], систематические и случайные перемещения оснований силовых линий ММП на Солнце [Fisk, 2001; Giacalone and Jokipii, 2004], присутствующие в солнечном ветре турбулентные флуктуации, в том числе альвеновские волны [Bruno and Carbone, 2005; Zhang et al., 2014], а также, возможно, и другие процессы, происходящие на Солнце и в межпланетном пространстве. Поведение меридиональной компоненты ММП является одним из диагностических параметров для исследования процессов в гелиосфере, кроме того, оно имеет значение для взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой

Земли [Zhang et al., 2014] и для переноса космических лучей в гелиосфере [Jokipii, 2001].

Несколько исследований выявили анизотропию ММП, которая характеризуется корреляцией между вариациями меридиональной и радиальной компонент вектора магнитного поля. В среднем за большой период времени эта корреляция близка к нулю, однако Понявин и Усманов [1985] и Обридко и др. [2004] нашли, что заметная корреляция меридиональной и радиальной компонент ММП существует, но она изменяет знак в течение года в связи с изменением гелиографической широты точки наблюдения. Как полагают авторы указанных работ, годовая вариация коэффициента корреляции объясняется расхождением силовых линий ММП от экватора. [Lyatsky et al., 2003] применили иной метод исследования, который позволил сравнить корреляцию компонент ММП  $B_x$  и  $B_z$  (GSE) в секторах ММП разной полярности, при этом сезонный ход корреляции не рассматривался. В результате обнаружено, что заметная корреляция  $B_x$  и  $B_z$  существует в периоды низкой солнечной активности, при этом она имеет противоположные знаки в секторах ММП разной полярности, и в каждом из секторов знак корреляции различен во время двух соседних ми-

нимумов солнечной активности. Эти результаты были подтверждены в работе [Youssef et al., 2012] на более обширном материале, охватывающем 4 минимума солнечной активности (в этой работе была также найдена слабая корреляция  $B_z$  и радиальной компоненты скорости солнечного ветра). Систематическое различие знаков корреляции  $B_x$  и  $B_z$  в секторах ММП разной полярности указывает на то, что корреляция имеет разные знаки севернее и южнее гелиосферного токового слоя (ГТС), что не вполне согласуется с результатами [Понявина и Усманова, 1985] и [Обридко и др., 2004].

Судя по результатам работ [Lyatsky et al., 2003; Youssef et al., 2012], корреляция меридиональной и радиальной компонент ММП является индикатором особого типа анизотропии флуктуаций магнитного поля, существенно связанного с характерными для периодов низкой солнечной активности условиями в гелиосфере. [Lyatsky et al., 2003] высказали предположение, что такими условиями могут быть устойчивые широтные градиенты скорости и плотности солнечного ветра, которые наблюдаются в приэкваториальной области гелиосферы в периоды минимумов солнечной активности [Kojima et al., 1998; McComas et al., 2000]. Частичное подтверждение этого предположения получено недавно при анализе данных космического аппарата Ulysses [Erofeev, 2016]. Однако для окончательного выяснения природы обсуждаемого феномена имеющейся информации недостаточно. В настоящей работе преследуется цель получить дополнительные, по возможности разносторонние, сведения о поведении корреляции меридиональной и радиальной компонент ММП. Для этого предприняты поиски ответов на следующие вопросы: 1) Как ведет себя корреляция меридиональной и радиальной компонент ММП на разных временных масштабах? 2) Имеются ли различия в поведении корреляции между низкоскоростным солнечным ветром и высокоскоростными потоками? 3) Каким образом корреляции меридиональной и радиальной компонент ММП зависят от частоты флуктуаций магнитного поля? 4) Существует ли подобная корреляция у флуктуаций радиальной и меридиональной компонент скорости солнечного ветра, и если существует, то в каком диапазоне частот? Материалом для исследования послужили данные космического аппарата WIND с минутным временным разрешением, полученные в спокойных областях солнечного ветра в период с 1995–2011 гг. При анализе данных априори учитывалась обнаруженная [Lyatsky et al., 2003] зависимость поведения корреляции от полярности сектора ММП.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОД ИХ ОБРАБОТКИ

### 2.1. Экспериментальные данные и их селекция

Экспериментальными данными для нашего исследования послужили измерения вектора ММП и вектора скорости солнечного ветра (СВ), полученные в 1995–2011 гг. приборами космического аппарата WIND в околоземной области гелиосферы. Данные о магнитном поле [Lepping et al., 1995] имеют временное разрешение 1 мин, данные о векторе скорости даны с интервалом около 92 с, который варьируется в небольших пределах. При идентификации возмущений солнечного ветра (см. ниже) принимались во внимание также измерения плотности и температуры плазмы солнечного ветра. Измерения ММП и скорости СВ были преобразованы из исходной системы отсчета GSE в систему RTN, что исключает сезонный эффект, вызванный изменением ориентации оси  $Z$  координатной системы GSE (см. [Понявин и Усманов, 1985]). Таким образом, вектор ММП представлен радиальной  $B_R$ , трансверсальной  $B_T$  и нормальной  $B_N$ -компонентами, причем нормальная компонента направлена по касательной к солнечному меридиану. При сравнении с результатами других работ следует иметь в виду, что корреляция компонент ММП  $B_R$  и  $B_N$  имеет знак, обратный знаку корреляции компонент  $B_x$  и  $B_z$  в системе GSEQ.

Для анализа были отобраны те интервалы времени, когда космический аппарат находился вне областей сильных возмущений СВ. К сильным возмущениям были отнесены, в частности, такие долгоживущие неоднородности, как области взаимодействия быстрых и медленных потоков СВ (включая фронты высокоскоростных потоков) и окрестности секторных границ ММП. Сильными возмущениями также считались резкие возрастания плотности плазмы или напряженности магнитного поля, интервалы с нестабильной ориентацией вектора ММП и другие вариации параметров, которые по морфологическим признакам могли быть связаны с эруптивными явлениями. Исключение возмущений из рядов данных производилось с помощью компьютерной программы, которая позволяла идентифицировать возмущения визуально, наблюдая графики вариаций ММП и параметров плазмы солнечного ветра на экране монитора (при этом какие-либо формальные числовые критерии не применялись). Кроме того, измерения в пределах каждого из отобранных для анализа интервалов времени помечались как относящиеся к сектору ММП определенной полярности, а также к одному из двух типов квазистационарных течений — медленному солнечному ветру или телу высокоскоростного потока. Отобранные для анализа измерения составили 64% от объема исходных данных.

## 2.2. Метод расчета функций когерентности

При расчете функций когерентности (разд. 3.3 и 3.4) мы в основном следовали методике, описанной в книге Отнеса и Эноксона [1982]. Комплексная функция когерентности  $\gamma_B(v)$  компонент магнитного поля  $B_R$  и  $B_N$  рассчитывалась по формуле

$$\gamma_B(v) = \frac{\langle F_R(v)F_N^*(v) \rangle}{\sqrt{\langle |F_R(v)|^2 \rangle \langle |F_N(v)|^2 \rangle}},$$

где  $v$  – частота,  $F_R$  и  $F_N$  – Фурье-спектры флуктуаций  $B_R$  и  $B_N$ , звездочка обозначает комплексное сопряжение, а угловые скобки – усреднение по множеству независимых оценок спектров. Для расчета спектров из ряда измерений вектора ММП извлекались выборки длиной от 2000 до 4096 мин, равномерно заполненные данными (допускалось наличие в выборке нескольких изолированных пропусков данных, которые заполнялись путем интерполяции). Из каждой выборки удалялись среднее значение и линейный тренд, затем компоненты вектора ММП нормировались путем деления на их среднеквадратичные значения. Нормированная выборка умножалась на косинусное временное окно и при необходимости дополнялась нулевыми значениями до стандартной длины 4096 мин, после чего рассчитывались Фурье-спектры  $F_R$  и  $F_N$ . Усреднение при расчете  $\gamma_B(v)$  производилось двояким образом: сначала делалось сглаживание каждого спектра по 7 точкам, а затем усреднение по множеству спектров.

Интервал дискретизации данных КА WIND о векторе скорости СВ в среднем составляет 92 с, однако он изменяется в небольших пределах. Так как это обстоятельство создает трудности при вычислении Фурье-спектров, измерения скорости были преобразованы путем интерполяции на равномерную сетку с шагом 1 мин. После этого по данным о радиальной  $V_R$  и нормальной  $V_N$ -компонентах скорости рассчитывалась их функция когерентности  $\gamma_V(v)$  описанным выше способом.

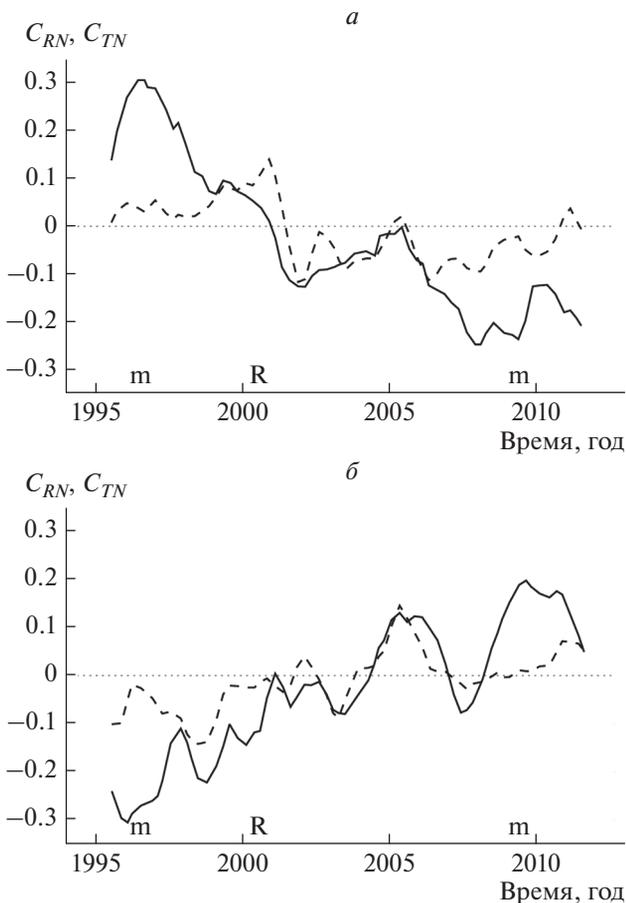
## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

### 3.1. Зависимость корреляции от фазы солнечного цикла

На рисунке 1 сплошной линией показаны значения коэффициента корреляции  $C_{RN}$  радиальной  $B_R$  и нормальной  $B_N$ -компонент магнитного поля в зависимости от времени. Расчет  $C_{RN}$  был сделан по измерениям ММП, полученным в пределах отобранных нами относительно невозмущенных интервалов времени (см. раздел 2.1), отдельно для положительного и отрицательного секторов ММП. При расчете производилось усреднение данных за

интервал длиной в 1 г., который последовательно сдвигался на 0.25 г. Вероятные статистические погрешности оценок коэффициента корреляции не превышают 0.005. Графики рис. 1 демонстрируют систематическое изменение  $C_{RN}$  в ходе магнитного цикла Солнца. Наибольшие по абсолютной величине значения коэффициента корреляции достигаются вблизи минимумов солнечной активности (последние имели место в 1996 г. и 2009 г.), при этом  $C_{RN}$  имеет противоположные знаки в положительном и отрицательном секторах ММП. Кроме того, в каждом из секторов ММП  $C_{RN}$  имеет разные знаки в соседних минимумах солнечной активности, что очевидно связано с изменением знака полярного магнитного поля Солнца. Эти выводы находятся в согласии с результатами работ [Lyatsky et al., 2003; Youssef et al., 2012]. Кроме систематического изменения в ходе солнечного цикла,  $C_{RN}$  претерпевает нерегулярные вариации с временными масштабами 2–5 лет, которые мы будем называть “среднемасштабными”. В ходе таких вариаций, коэффициент корреляции иногда достигает существенно отличных от нуля значений  $|C_{RN}| \approx 0.1$  даже при высокой солнечной активности. Среднемасштабные вариации  $C_{RN}$ , происходящие в положительном и отрицательном секторах ММП, не коррелируют.

Таким образом, в периоды низкой солнечной активности знак корреляции  $B_R$  и  $B_N$  зависит как от полярности сектора ММП, так и от ориентации полярного магнитного поля Солнца. Однако эти параметры связаны между собой. Хорошо известно, что в периоды низкой солнечной активности гелиосфера разделена на две области с противоположным направлением магнитного поля, причем разделяющий эти области гелиосферный токовый слой (ГТС) расположен вблизи экватора и имеет небольшую протяженность по широте [Smith, 2008]. Поэтому в течение одного оборота Солнца наблюдающий ММП космический аппарат находится попеременно то севернее, то южнее ГТС, и в соответствии с этим он регистрирует магнитные секторы разной полярности. При этом соответствие между полярностью ММП и положением точки наблюдения относительно ГТС зависит от ориентации солнечного магнитного поля. В период минимума солнечной активности 1995–1997 гг. положительный и отрицательный секторы ММП регистрировались соответственно севернее и южнее ГТС, тогда как в эпоху минимума 2008–2010 гг. положительный сектор регистрировался южнее ГТС, а отрицательный – севернее ГТС. Сопоставление этих фактов с данными рис. 1 приводит к выводу, что в эпохи минимумов солнечной активности  $C_{RN} > 0$  севернее ГТС и  $C_{RN} < 0$  южнее ГТС, независимо от ориентации солнечного магнитного поля. Этот вывод относится к среднему значению коэффициента корреляции.



**Рис. 1.** Коэффициент корреляции  $C_{RN}$  компонент ММП  $B_R$  и  $B_N$  (сплошная линия) и коэффициент корреляции  $C_{TN}$  компонент ММП  $B_T$  и  $B_N$  (штриховая линия), в зависимости от времени. *a* – по измерениям в положительном секторе ММП, *б* – по измерениям в отрицательном секторе ММП. На графиках отмечены эпохи минимумов солнечной активности (символ *m*) и смены знака полярного магнитного поля Солнца (символ *R*).

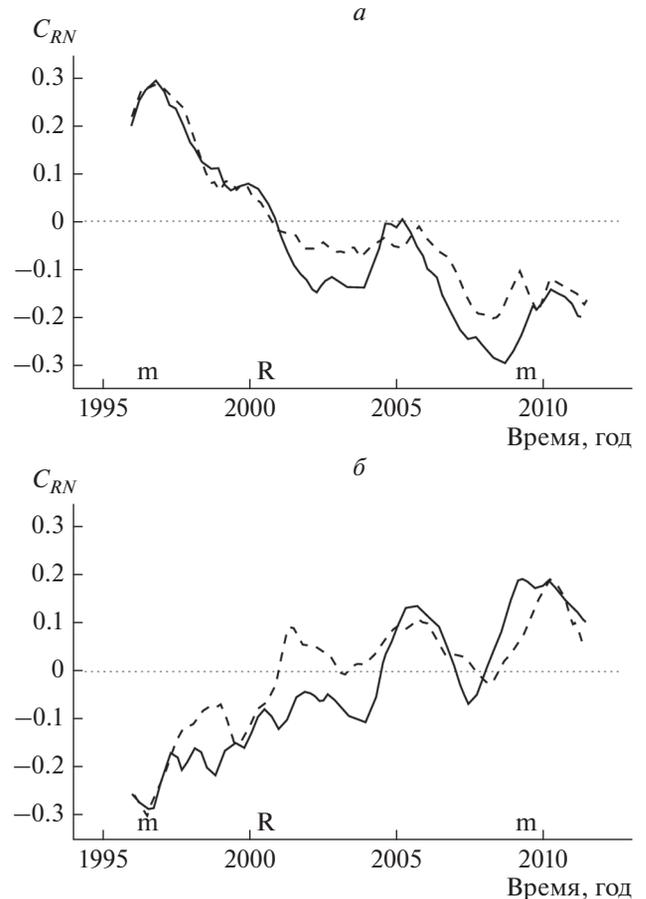
Корреляция компонент ММП  $B_R$  и  $B_N$ , очевидно, отражает присутствие флуктуаций вектора магнитного поля, преимущественно ориентированных под острым углом к координатной оси  $N$ . Систематический наклон флуктуаций к оси  $N$  может, вообще говоря, вызывать корреляцию  $B_N$  с обеими горизонтальными составляющими ММП,  $B_R$  и  $B_T$ . Поэтому интересно сравнить поведение  $C_{RN}$  с поведением коэффициента корреляции  $C_{TN}$  компонент магнитного поля  $B_T$  и  $B_N$ . Временной ход  $C_{TN}$  показан на графиках рис. 1 штриховой линией. На этих графиках можно видеть, что в годы минимумов солнечной активности (1996 г. и 2009 г.)  $C_{TN}$  близок к нулю и по абсолютной величине намного меньше  $C_{RN}$ . Это указывает на то, что флуктуации ММП, имеющие систематический наклон к оси  $N$ , ориентированы преимущественно

параллельно плоскости  $RN$  (то есть, параллельно меридиональной плоскости Солнца). В среднем за периоды низкой солнечной активности (1995–1997 гг. и 2008–2010 гг.)  $C_{TN}$  систематически отличается от нуля, но все же он по абсолютной величине значительно меньше  $C_{RN}$ . Иная ситуация имеет место в периоды высокой и умеренной солнечной активности (1998–2006 гг.). В это время как  $C_{RN}$ , так и  $C_{TN}$  претерпевают вариации среднего временного масштаба (2–5 лет), причем вариации  $C_{RN}$  и  $C_{TN}$  положительно коррелируют и имеют приблизительно равные амплитуды. Это означает, что флуктуации ММП, имеющие систематический наклон к оси  $N$ , преимущественно ориентированы под большими углами к плоскости  $RN$ . При этом знаки  $C_{TN}$  и  $C_{RN}$ , как правило, совпадают, что указывает на ориентацию флуктуаций в плоскости, ортогональной к среднему направлению ММП (последнее характеризуется соотношением  $\langle B_R \rangle \approx -\langle B_T \rangle$ ). По-видимому, корреляция меридиональной и радиальной компонент ММП в периоды высокой солнечной активности имеет иную природу, чем в периоды минимумов солнечного цикла.

Можно предположить, что поведение корреляции компонент ММП  $B_R$  и  $B_N$  не одинаково в потоках солнечного ветра, имеющих разную скорость. Для проверки этого предположения, мы рассчитали временные зависимости  $C_{RN}$  отдельно по выборкам данных, полученных в медленном СВ и в телах высокоскоростных потоков (исключая их фронты). Так как в эпохи минимумов и на фазе роста 11-летнего цикла высокоскоростные потоки сравнительно редки, выборки данных длиной в 1 г. малопредставительны. Поэтому при расчете зависимостей коэффициента корреляции от времени применялось скользящее усреднение за 2 г. Результаты расчета приведены на рис. 2 сплошной линией (данные для медленного СВ) и штриховой линией (данные для высокоскоростных потоков). Графики рисунка 2 показывают подобие, в основных чертах, вариаций коэффициента корреляции в медленных и быстрых потоках СВ. В частности, между медленными и быстрыми потоками СВ нет значительного систематического различия в значениях  $C_{RN}$  для периодов низкой солнечной активности. В периоды высокой солнечной активности временные зависимости  $C_{RN}$  для медленных и быстрых потоков СВ несколько расходятся, однако при этом их вариации среднего масштаба (3–5 лет) заметно коррелируют. Таким образом, поведение коэффициента корреляции  $C_{RN}$  в медленных и быстрых потоках солнечного ветра не обнаруживает значительных различий.

### 3.2. Короткопериодические вариации и гелиоширотная зависимость коэффициента корреляции

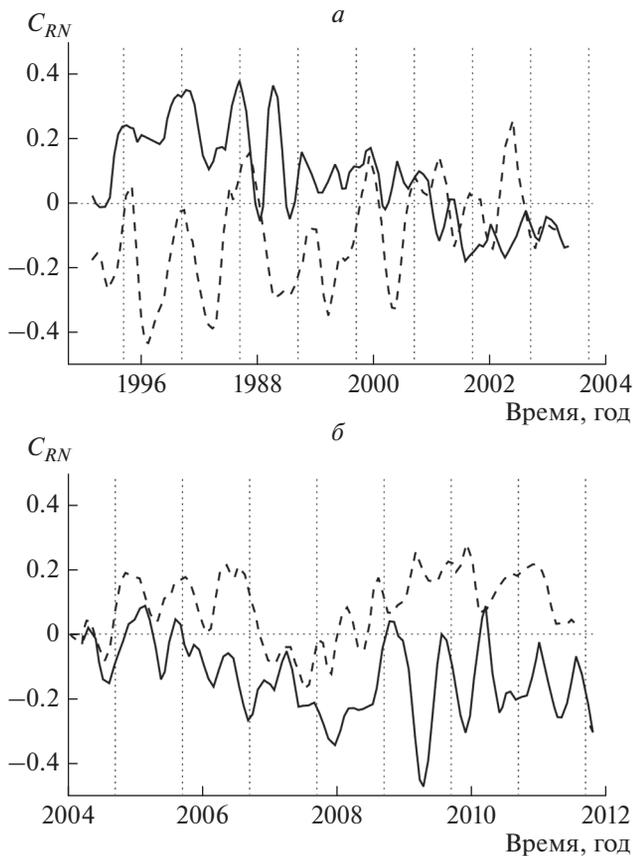
Рассмотрим теперь вариации коэффициента корреляции  $C_{RN}$ , происходящие на короткой шкале времени 0.5–1 г. Вариации с такими периодами могут быть вызваны, в частности, изменением в течение года гелиографической широты точки наблюдения в пределах  $\pm 7.25^\circ$ . Мы рассчитали  $C_{RN}$  в функции времени, усредняя данные за интервал длиной 3 оборота Бартельса (81 сут), который последовательно сдвигался с шагом в 1 оборот. При усреднении за 3 оборота стандартные ошибки коэффициента корреляции не превышают 0.01, за исключением двух плохо обеспеченных данными интервалов времени: 7 оборотов в конце 2003 г.—начале 2004 г. и три оборота в начале 1996 г., в последнем случае только для положительного сектора ММП. Результаты расчета представлены на рис. 3. Они показывают, что на короткой временной шкале  $C_{RN}$  претерпевает значительные вариации, которые, как правило, имеют нерегулярный характер, т.е. не обладают устойчивыми периодом и фазой. Заметное исключение составляет эпоха минимума солнечной активности 1995–1997 гг., когда в обоих секторах ММП происходили хорошо выраженные вариации  $C_{RN}$  с периодом 1 г. и устойчивой фазой (рис. 3а). Экстремумы этих вариаций соответствовали по времени экстремумам гелиошироты точки наблюдения. Годовые вариации коэффициента корреляции в положительном и отрицательном секторах ММП совпадали по фазе, однако они происходили относительно отличных от нуля средних значений  $C_{RN}$ , имеющих разные знаки. Поэтому абсолютные значения коэффициента корреляции в положительном и отрицательном секторах ММП изменялись противофазно. В положительном секторе ММП наименьшие значения  $|C_{RN}|$  имели место весной, когда точка наблюдения максимально смещалась к югу от экватора. Так как в 1995–1997 гг. положительный сектор ММП наблюдался севернее ГТС, при максимальном перемещении космического аппарата на юг его расстояние от ГТС было наименьшим. В отрицательном секторе ММП низкие значения  $|C_{RN}|$  имели место осенью, что также соответствует минимальному расстоянию по широте от ГТС. Отметим, что амплитуда годовой вариации  $C_{RN}$  в отрицательном секторе ММП в 1995–1997 гг. была сравнима со средним значением коэффициента корреляции, или даже несколько превосходила последнее. Вследствие этого в осенние месяцы  $C_{RN}$  уменьшался до близких к нулю значений и даже на некоторое время изменял знак. Этот факт указывает на то, что приведенная в разделе 3.1 связь знака  $C_{RN}$  с положением точки наблюдения



**Рис. 2.** Коэффициент корреляции  $C_{RN}$  компонент ММП  $B_R$  и  $B_N$  в зависимости от времени, рассчитанный по измерениям в медленном солнечном ветре (сплошная линия) и в хвостовых частях высокоскоростных потоков (штриховая линия). *a* — для положительного сектора ММП, *б* — для отрицательного сектора ММП.

относительно ГТС верна только в среднем за достаточно большой интервал времени (1 г. или более).

В период следующего минимума солнечной активности 2008–2010 гг. в положительном секторе ММП происходили интенсивные короткопериодические вариации  $C_{RN}$ , амплитуда которых была сравнима со средним значением коэффициента корреляции. Однако только на протяжении одного года, с осени 2008 г. по осень 2009 г., период и фаза этих вариаций приблизительно соответствовали изменению гелиошироты. Отсутствие устойчивой годовой вариации  $C_{RN}$  свидетельствует о том, что гелиоширотная зависимость коэффициента корреляции была нестабильной. Отчетливо выраженная годовая вариация  $C_{RN}$  не имела места и в отрицательном секторе ММП. Однако в 2007–2009 гг. в отрицательном секторе ММП происходили регулярные колебания коэффициента корреляции с периодом около полуго-



**Рис. 3.** Коэффициент корреляции  $C_{RN}$  компонент ММП  $B_R$  и  $B_N$  в зависимости от времени, рассчитанный с усреднением за 3 оборота Солнца. Сплошной и штриховой линиями показаны результаты расчетов по измерениям ММП в положительном и отрицательном секторах ММП, графики *a* и *б* показывают разные интервалы времени. Вертикальными линиями на графиках отмечены моменты, когда географическая широта точки наблюдения достигала наибольшего значения  $+7.25^\circ$ .

да, причем максимумы  $C_{RN}$  приблизительно совпадали по времени с экстремумами гелиошироты точки наблюдения (на графике рис. 3б можно различить до 6 таких максимумов). Полугодовая вариация может свидетельствовать о существенной нелинейности зависимости коэффициента корреляции от гелиошироты.

Таким образом, зависимость коэффициента корреляции от географической широты точки наблюдения имеет место, однако она проявляется в разные периоды времени в разной степени и, по-видимому, в разной форме — как годовая или полугодовая вариация.

### 3.3. Зависимость корреляции от частоты флуктуаций

Частотная зависимость коэффициента корреляции компонент магнитного поля  $B_R$  и  $B_N$  была

исследована с помощью комплексной функции когерентности  $\gamma_B(\nu)$  (см. раздел 2.2). Для расчета  $\gamma_B(\nu)$  взяты измерения ММП, полученные в периоды минимумов солнечной активности, в 1995–1997 гг. и 2008–2010 гг. Отобранные данные были разделены на две выборки в зависимости от положения точки наблюдения севернее или южнее ГТС. Такое разделение данных необходимо ввиду систематического различия знаков коэффициента корреляции  $C_{RN}$  (см. раздел 3.1), из которого априори следует различие функций когерентности по фазе на  $180^\circ$ . Всего для расчета функций когерентности использовано около 380 оценок Фурье-спектров. Исследован диапазон частот от  $1.2 \times 10^{-5}$  до  $8.3 \times 10^{-3}$  Гц с разрешением около  $2.5 \times 10^{-5}$  Гц. При средней скорости солнечного ветра 400 км/с указанный частотный диапазон приблизительно соответствует диапазону пространственных масштабов от  $5 \times 10^4$  до  $3 \times 10^7$  км.

На рисунке 4 представлены модуль функции когерентности  $|\gamma_B|$  (который будем называть просто когерентностью) и ее фаза  $\arg(\gamma_B)$  в зависимости от частоты. Оценки  $\arg(\gamma_B)$ , рассчитанные по измерениям севернее и южнее ГТС, систематически различаются и поэтому показаны на рис. 4б отдельно. Оценки  $|\gamma_B|$  усреднены по всем измерениям и имеют стандартную ошибку  $\approx 0.02$ . На рис. 4а можно видеть, что когерентность максимальна в низкочастотном диапазоне от  $1.2 \times 10^{-5}$  до  $10^{-4}$  Гц (периоды соответственно 23 и 2.8 ч). Начиная от частоты приблизительно  $10^{-4}$  Гц и до верхней границы исследованного диапазона  $8.3 \times 10^{-3}$  Гц (период 2 мин) происходит монотонный спад когерентности, причем на верхней границе исследованного частотного диапазона  $|\gamma_B|$  еще достоверно отличается от нуля. Аппроксимация когерентности степенной зависимостью  $|\gamma_B| \sim \nu^n$  в диапазоне  $\nu \geq 10^{-4}$  Гц дает значение  $n = -0.40 \pm 0.01$ . Оценки фазы функции когерентности (рис. 4б) концентрируются вблизи нулевого значения для данных, полученных севернее ГТС, и вблизи  $180^\circ$  для данных, полученных южнее ГТС. Различие функций когерентности по фазе на  $180^\circ$ , очевидно, обусловлено систематическим различием в знаке коэффициента корреляции компонент ММП  $B_R$  и  $B_N$ .

При возрастании частоты статистические флуктуации оценок  $\arg(\gamma_B)$  возрастают вследствие уменьшения когерентности, однако во всем исследованном диапазоне частот фаза не имеет заметных трендов или систематических отклонений от значений 0 и  $180^\circ$ . Последнее означает, что флуктуации компонент магнитного поля  $B_R$  и  $B_N$  не имеют относительных фазовых или временных сдвигов (кроме постоянного фазового сдвига на  $180^\circ$  для данных, полученных южнее ГТС).

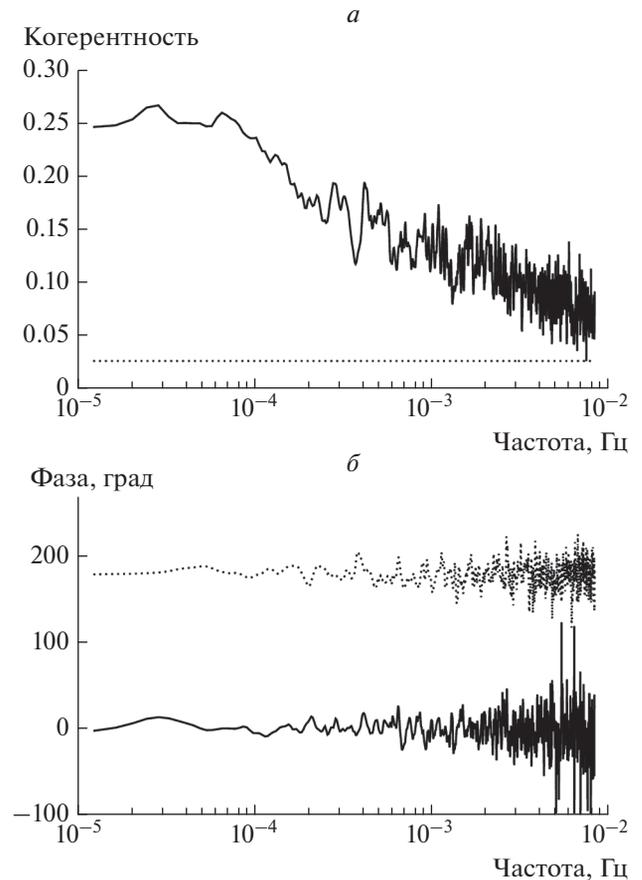
### 3.4. Корреляция компонент скорости $V_R$ и $V_N$

Хорошо известно, что в часовом и минутном диапазонах периодов турбулентность солнечного ветра является альвеновской, то есть флуктуации векторов скорости и магнитного поля приблизительно коллинеарны (см., например, [Bruno and Carbone, 2005]). Исходя из этого факта, можно предположить, что в периоды низкой солнечной активности флуктуации компонент скорости солнечного ветра  $V_R$  и  $V_N$  коррелируют подобно флуктуациям компонент ММП  $B_R$  и  $B_N$ . С целью проверки этого предположения мы рассчитали функцию когерентности  $\gamma_V(\nu)$  компонент скорости  $V_R$  и  $V_N$ , используя данные космического аппарата WIND за 1995–1997 гг. и 2008–2010 гг. (см. разд. 2.2). Также как при исследовании ММП в разделе 3.3, измерения скорости были разделены на две выборки в зависимости от положения космического аппарата севернее или южнее ГТС. Полученные функции когерентности компонент скорости  $\gamma_V(\nu)$  представлены на рис. 5. Сначала обратим внимание на поведение фазы  $\arg(\gamma_V)$  (рис. 5б). Можно отметить, что за исключением области самых низких частот  $\nu < 5 \times 10^{-5}$  Гц оценки фазы концентрируются около нулевого значения или около  $180^\circ$ , в зависимости от положения точки наблюдения севернее или южнее ГТС. Как отмечалось в предыдущем разделе, такое же поведение характерно для фазы функции когерентности компонент магнитного поля. Поэтому можно сделать вывод, что в часовом и минутном диапазонах периодов флуктуации  $V_R$  и  $V_N$  имеют тот же знак корреляции, что и флуктуации компонент ММП  $B_R$  и  $B_N$ . Когерентность компонент скорости  $|\gamma_V|$  (рис. 5а) имеет максимум на частотах между  $5 \times 10^{-5}$  и  $10^{-4}$  Гц и затем медленно уменьшается с ростом частоты.

Степенная аппроксимация  $|\gamma_V| \sim \nu^n$  в диапазоне  $\nu \geq 10^{-4}$  Гц дает значение  $n = -0.36 \pm 0.02$ , которое близко к значению  $n = -0.40$ , полученному для  $|\gamma_B|$ . Таким образом, при  $\nu \geq 10^{-4}$  Гц функции когерентности скорости и магнитного поля обнаруживают одинаковое поведение, хотя значения  $|\gamma_V|$  в среднем несколько меньше значений  $|\gamma_B|$ . Однако в низкочастотном диапазоне  $\nu \leq 5 \times 10^{-5}$  Гц (периоды флуктуаций больше 5 ч) когерентность компонент скорости  $V_R$  и  $V_N$  быстро падает с уменьшением частоты, что резко отличает ее поведение от поведения когерентности компонент ММП (ср. рис. 5а и рис. 4а).

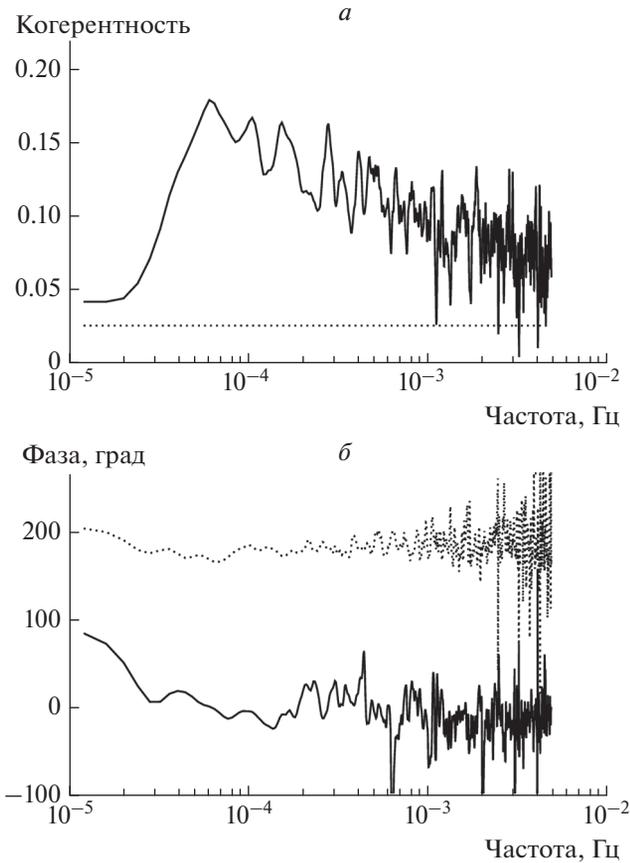
## 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В работах [Понявина и Усманова, 1985] и [Обридко и др., 2004] было найдено, что коэффициент корреляции радиальной и меридиональной компонент ММП имеет разные знаки север-



**Рис. 4.** Комплексная функция когерентности  $\gamma_B(\nu)$  компонент ММП  $B_R$  и  $B_N$  для периодов низкой солнечной активности. *а* – Когерентность (модуль функции когерентности), пунктирной линией показано смещение оценок; *б* – фаза функции когерентности, рассчитанная отдельно по измерениям севернее ГТС (сплошная линия) и южнее ГТС (пунктир).

нее и южнее гелиографического экватора. Этот результат был получен без учета информации о положении точки наблюдения относительно ГТС. Судя по результатам работ [Lyatsky et al., 2003; Youssef et al., 2012], а также настоящей работы, в периоды низкой солнечной активности корреляция радиальной и меридиональной компонент ММП имеет разные знаки севернее и южнее ГТС. Однако это правило также не является совершенно точным, поскольку оно иногда нарушается на короткой шкале времени, в частности в ходе годового изменения гелиошироты точки наблюдения. Из этого обстоятельства можно сделать вывод, что связь знака корреляции с положением ГТС имеет косвенный характер. [Lyatsky et al., 2003] высказали предположение о связи корреляции меридиональной и радиальной компонент ММП с широтным градиентом скорости солнечного ветра. К сожалению, измерения широтного градиента скорости СВ вблизи плоскости эклип-



**Рис. 5.** Комплексная функция когерентности  $\gamma_V(\nu)$  компонент скорости солнечного ветра  $V_R$  и  $V_N$  для периодов низкой солнечной активности. Обозначения такие же, как на рис. 4.

тики имеют лишь эпизодический характер [Crooker et al., 1997; Веселовский и Шугай, 2010]. Сравнение измерений КА Ulysses и WIND позволило [Crooker et al., 1997] реконструировать широтно-долготную зависимость скорости СВ для небольшого интервала времени в начале 1995 г. В это время изменение знака широтного градиента скорости происходило на поверхности, по форме подобной ГТС, однако менее искривленной и вследствие этого занимавшей промежуточное положение между ГТС и плоскостью гелиографического экватора. Если такое поведение широтного градиента скорости СВ характерно в целом для периодов низкой солнечной активности, то оно хорошо объясняет как связь знака корреляции компонент ММП с положением ГТС, так и эпизодически происходящие нарушения этой связи.

Частотная зависимость корреляции компонент ММП  $B_R$  и  $B_N$  демонстрирует определенное соответствие со спектром турбулентности солнечного ветра. Корреляция максимальна в области низких частот, т.е. самых больших простран-

ственных масштабов, и постепенно уменьшается в том диапазоне масштабов, который соответствует инерционному интервалу турбулентности СВ. С другой стороны, корреляция компонент скорости солнечного ветра  $V_R$  и  $V_N$  мала или отсутствует в области больших масштабов, но в инерционном интервале она ведет себя аналогично корреляции компонент ММП  $B_R$  и  $B_N$ . По-видимому, физический процесс, вызывающий корреляцию  $B_R$  и  $B_N$ , воздействует в наибольшей степени на крупномасштабные структуры ММП, но при этом он не вызывает корреляцию компонент скорости  $V_R$  и  $V_N$ . Уменьшение корреляции  $B_R$  и  $B_N$  в инерционном интервале свидетельствует о падении эффективности вызывающего корреляцию процесса при уменьшении пространственных масштабов флуктуаций магнитного поля. Это может быть связано с меньшим временем воздействия процесса, так как структуры малых масштабов образуются на сравнительно больших гелиоцентрических расстояниях. Корреляция компонент скорости  $V_R$  и  $V_N$  в инерционном интервале масштабов, по-видимому, возникает как следствие корреляции компонент магнитного поля и альвеновского характера турбулентности.

### 5. ВЫВОДЫ

Мы рассмотрели корреляцию радиальной  $B_R$  и нормальной  $B_N$ -компонент ММП в зависимости от времени, скорости течения солнечного ветра и частоты флуктуаций, с учетом различия поведения корреляции в секторах ММП разного знака. Для сравнения рассмотрены также корреляция компонент магнитного поля  $B_T$  и  $B_N$  и корреляция компонент скорости солнечного ветра  $V_R$  и  $V_N$ . Анализировались измерения КА WIND, сделанные в областях солнечного ветра, не содержащих сильных возмущений. Получены следующие результаты:

1. Максимальные по абсолютной величине значения коэффициента корреляции  $C_{RN}$  компонент ММП  $B_R$  и  $B_N$  наблюдаются в периоды минимумов солнечной активности. Знаки среднегодовых значений коэффициента корреляции в периоды низкой солнечной активности подчиняются простому правилу:  $C_{RN} > 0$  или  $C_{RN} < 0$  соответственно севернее или южнее гелиосферного токового слоя.
2. Кроме систематического изменения в ходе солнечного цикла, коэффициент корреляции компонент ММП  $B_R$  и  $B_N$  претерпевает нерегулярные вариации с временными масштабами 2–5 лет.
3. В медленном солнечном ветре и в телах высокоскоростных потоков изменение коэффициента корреляции компонент ММП  $B_R$  и  $B_N$  в ходе солнечного цикла происходит приблизительно одинаковым образом.

4. В периоды низкой солнечной активности корреляция  $B_R$  и  $B_N$  обусловлена флуктуациями вектора магнитного поля, ориентированными параллельно плоскости солнечного меридиана. В периоды высокой солнечной активности корреляция  $B_N$  и  $B_R$  в большей степени обусловлена флуктуациями, ориентированными ортогонально к среднему направлению ММП.

5. В пределах исследованного интервала времени 1995–2011 гг. изменение гелиографической широты точки наблюдения отчетливо проявлялось в форме годовой вариации коэффициента корреляции только в минимуме активности 1995–1997 гг. Обнаружены признаки того, что изменение гелиографической широты может выражаться также в форме полугодовой вариации коэффициента корреляции.

6. В периоды минимумов солнечной активности корреляция  $B_R$  и  $B_N$  имеет место во всем исследованном диапазоне частот  $1.2 \times 10^{-5}$ – $8.3 \times 10^{-3}$  Гц, при этом она максимальна на частотах ниже  $10^{-4}$  Гц, а на более высоких частотах уменьшается приблизительно по степенному закону  $v^n$  с показателем  $n = -0.4$ .

7. В периоды низкой солнечной активности компоненты скорости СВ  $V_R$  и  $V_N$  коррелируют аналогично компонентам ММП  $B_R$  и  $B_N$  на частотах около  $10^{-4}$  Гц и выше, однако низкочастотные флуктуации  $V_R$  и  $V_N$  с периодами более 5 ч не коррелируют.

Использованные в настоящей работе данные космического аппарата WIND получены под руководством R. Lepping (измерения магнитного поля), K.W. Ogilvie и A.J. Lazarus (измерения параметров плазмы солнечного ветра). Все данные взяты из архивов National Space Science Data Center and Space Physics Data Facility ([ftp://nssdcftp/gsfsc.nasa.gov/spacecraft\\_data/](ftp://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/spacecraft_data/)).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Веселовский И.С., Тарсина М.В. Угловое распределение вектора межпланетного магнитного поля // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 41. № 4. С. 471–476. 2001.
- Веселовский И.С., Шугай Ю.С. Высокоскоростные потоки солнечного ветра вблизи орбиты Земли и их источники на Солнце по стереоскопическим наблюдениям в минимуме 23-го цикла // Космич. исслед. Т. 48. № 1. С. 33–42. 2010.
- Обридко В.Н., Гольшев С.А., Левитин А.Е. Связь структуры крупномасштабного магнитного поля Солнца в циклах солнечной активности со структурой ММП, оказывающей влияние на геомагнитную активность // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 44. № 4. С. 449–452. 2004.
- Отнес Р., Энксон Л. Прикладной анализ временных рядов. М.: Мир, 424 с. 1982.
- Понявин Д.И., Усманов А.В. Годовые вариации соотношения  $B_x$ - и  $B_z$ -компонент ММП в GSEQ-, GSE- и GSM-системах координат // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 25. № 1. С. 128–129. 1985.
- Borovsky J.E. On the variations of the solar wind magnetic field about the Parker spiral direction // J. Geophys. Res. V. 115. A09101. 2010. doi 10.1029/2009JA015040
- Burlaga L.F., Ness R.F. Global patterns of heliospheric magnetic field polarities and elevation angles: 1990 through 1995 // J. Geophys. Res. V. 102. № A9. P. 19.731–19.742. 1997. doi 10.1029/97JA01568
- Bruno R., Carbone V. The solar wind as a turbulence laboratory // Living Rev. Solar Phys. V. 2. P. 1–186. 2005.
- Crooker N.U., Lazarus A.J., Phillips J.L. et al. Coronal streamer belt asymmetries and seasonal solar wind variations deduced from Wind and Ulysses data // J. Geophys. Res. V. 102. № A3. P. 4673–4679. 1997. doi 10.1029/96JA03681
- Erofeev D.V. Effect of the meridional velocity gradient on the anisotropy of turbulence in solar wind // Geomagn. Aeronomy. V. 56. № 8. P. 1006–1009. 2016. doi 10.1134/S0016793216080053
- Fisk L.A. On the global structure of the heliospheric magnetic field // J. Geophys. Res. V. 106. № A8. P. 15. 849–15. 857. 2001.
- Giacalone J., Jokipii J.R. Magnetic footpoints diffusion at the Sun and its relation to the heliospheric magnetic field // Astrophys. J. V. 616. P. 573–577. 2004. doi 10.1086/424870
- Jokipii J.R. Latitudinal heliospheric magnetic field: stochastic and causal components // J. Geophys. Res. V. 106. № A8. P. 15.841–15.847. 2001. doi 10.1029/2000JA000116
- Kojima M., Tokumaru M., Watanabe H., et al. Heliospheric tomography using interplanetary scintillation observations 2. Latitude and heliocentric distance dependence of solar wind structure at 0.1–1 AU // J. Geophys. Res. V. 103. № A2. P. 1981–1989. 1998. doi 10.1029/97JA02162
- Lepping R.P., Acuna M.H., Burlaga L.F. et al. The WIND magnetic field investigation // Space Sci. Rev. V. 71. P. 207–229. 1995. doi 10.1007/BF00751330
- Lyatsky W., Tan A., Lyatskaya S. Effect of the Sun's magnetic field polarity on interplanetary magnetic field  $B_z$  // Geophys. Res. Lett. V. 30. L2258. 2003. doi 10.1029/2003GL017431
- McComas D.J., Barraclough B.L., Funsten H.O. et al. Solar wind observations over Ulysses' first full polar orbit // J. Geophys. Res. V. 105. № A5. P. 10.419–10.433. 2000. doi 10.1029/1999JA000383
- Smith E.J. The global heliospheric magnetic field // The Heliosphere through the Solar Activity Cycle. Eds. Balogh A., Lanzerotti L.J., Suess S.T. Chichester: Springer. P. 79–150. 2008.
- Youssef M., Mahrous A., Mawad R. et al. The effect of the solar magnetic polarity and the solar wind velocity on Bz-component of the interplanetary magnetic field // Adv. Space Res. V. 49. P. 1198–1202. 2012. doi 10.1016/j.asr.2011.07.023
- Zhang X.-Y., Moldwin M.B. The source, statistical properties, and geoeffectiveness of long-duration southward interplanetary magnetic field intervals // J. Geophys. Res. V. 119. № 2. P. 658–669. 2014. doi 10.1002/2013JA018937
- Zhang X.-Y., Moldwin M.B., Steinberg J.T., Skoug R.M. Alfvén waves as a possible source of long-duration, large-amplitude, and geoeffective southward IMF // J. Geophys. Res. V. 119. P. 3259–3266. 2014. doi 10.1002/2013JA019623