

УДК 523.9-466

КОРОТИРУЮЩИЕ ВОЗМУЩЕНИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В ДАННЫХ МОНИТОРИНГА МЕЖПЛАНЕТНЫХ МЕРЦАНИЙ НА РАДИОТЕЛЕСКОПЕ БСА ФИАН

И. А. Субаев, С. А. Тюльбашев, И. В. Чашей

На примере двух событий 2016 г. проведен анализ изменения уровня межпланетных мерцаний при прохождении порождающих геомагнитные бури коротирующих возмущений солнечного ветра. Показано, что перед приходом к Земле плотной части возмущения происходит ослабление ночных мерцаний, которое сменяется существенным ростом в период магнитной бури и сутки после нее. Для межпланетных мерцаний в утреннем секторе подобные изменения отсутствуют: уровень мерцаний остается примерно постоянным. Сравнение с данными спутника WIND показывает, что изменения ночных мерцаний и средней концентрации плазмы вблизи орбиты Земли происходят качественно сходным образом.

Ключевые слова: солнечный ветер, коротирующие возмущения, межпланетные мерцания.

Введение. Данные мониторинга межпланетных мерцаний на фазе спада солнечной активности. Солнечный ветер представляет собой поток плазмы, формирующийся в атмосфере Солнца и распространяющийся в межпланетное пространство. Одним из основных свойств солнечного ветра является турбулентность: все параметры плазмы испытывают случайные флуктуации на всех доступных для измерений пространственных и временных масштабах. Радиоизлучение от удаленных космических источников модулируется движущимися неоднородностями плазмы солнечного ветра. Межпланетные мерцания или флуктуации интенсивности (амплитуды) радиоволн возникают из-за дифракции на неоднородностях показателя преломления, уровень модуляции про-

ФИАН, Пуштинская радиоастрономическая обсерватория (ПРАО ФИАН), 142290 Россия, Московская обл., Пушкино; e-mail: subaev@prao.ru.

порционален абсолютному уровню флуктуаций плотности плазмы на масштабах порядка френелевского масштаба, который для метрового диапазона волн составляет порядка нескольких сотен километров. Соответствующий временной масштаб флуктуаций для типичных скоростей солнечного ветра составляет порядка 1 секунды. Наблюдения межпланетных мерцаний используются для детектирования крупномасштабных возмущений в солнечном ветре [1, 2]. Во многих случаях такие крупномасштабные возмущения являются геоэффективными и сопровождаются магнитными бурями. Известны два основных источника крупномасштабных возмущений: выбросы массы (interplanetary coronal mass ejection, ICME), которые формируются в короне после вспышек, и воздействие на Землю быстрых и медленных потоков солнечного ветра. Одним из признаков возмущений от солнечного ветра является их повторяемость через период, близкий к периоду вращения Солнца – 27 дней (так называемая коротация). Оба типа возмущений на длительных временных масштабах в среднем сравнимы по геоэффективности, причем возмущения от выбросов массы преобладают в фазе максимума солнечной активности, а коротирующие возмущения, связанные с солнечным ветром, чаще наблюдаются при низком уровне солнечной активности [3]. В работах [4, 5] на основе анализа данных межпланетных мерцаний исследованы геоэффективные возмущения от солнечного ветра за двухлетний период 2016, 2017 г.г. на фазе спада солнечной активности. Исследовались события, когда значения индекса геомагнитной активности D_{St} были ниже -50 нТ. (Индекс D_{St} – это магнитное поле кольцевого экваториального тока, в спокойных условиях $D_{St} = 0$, минимальное значение D_{St} достигается в максимальной фазе магнитной бури.) Наблюдения проводились в режиме мониторинга на радиотелескопе БСА ФИАН с рабочей частотой 111 МГц. Детали обработки массовых измерений мерцаний описаны в работах [4, 5]. Оказалось, что из 13 геоэффективных событий, зафиксированных в двухлетней серии наблюдений, 12 были связаны с коротирующими возмущениями. Анализировались сравнительно короткие ряды наблюдений, включающие усредненные часовые уровни мерцаний за трое суток перед минимумами D_{St} и в течение суток после него. На основе сравнения уровня мерцаний в заданные сутки и уровня мерцаний в предыдущие сутки было показано, что за 2–3 суток до минимума D_{St} происходит ослабление мерцаний в вечернем и ночном секторах. В настоящей работе рассматривается изменение не относительного, а абсолютного уровня мерцаний на более длинных, в среднем 14 суток, интервалах, включающих события с минимальными значениями индекса D_{St} .

Динамика уровня мерцаний при прохождении коротких возмущений. Для демонстрации изменения абсолютного уровня межпланетных мерцаний из данных [4, 5] были выбраны 2 типичных события 2016 г., когда максимальная возмущенность геомагнитного поля (минимум D_{st} – индекса) приходилась на ночные часы. Для этих событий проведен посуточный анализ вариаций уровня мерцаний в период за неделю до минимума D_{st} и неделю после него. Уровень мерцаний описывается индексом мерцаний m ,

$$\langle m^2 \rangle = \langle \Delta I^2 \rangle / \langle I \rangle^2, \quad (1)$$

который вычислялся как ежедневное значение относительной дисперсии флуктуаций интенсивности I , усредненное по всем источникам, попадающим в многолучевую диаграмму направленности радиотелескопа за период времени t длительностью 5 часов между $-3^h < t < +2^h$ для ночных мерцаний и длительностью 3 часа $+8^h < t < +11^h$ для утренних мерцаний. В ночные часы мерцания обусловлены турбулентностью плазмы, примыкающей к Земле, а в утренние часы модуляция связана в основном с областью межпланетной плазмы, расположенной в среднем на расстоянии 0.5 а.е. (1 а.е. – расстояние от Солнца до Земли) к востоку от Солнца.

Событие # 1.

07.03.2016 (DOY67) около 01.00 мск (22.00 UT 06.03) произошло сильное уменьшение индекса D_{st} с пиковым значением -98 нТ (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/index.html>). На рис. 1 приведены зависимости усредненного индекса утренних, 1(а), и ночных, 1(б), мерцаний от даты наблюдения. Из рис. 1(б) видно, что перед магнитной бурей в период DOY62-66 происходило монотонное понижение уровня ночных мерцаний, которое сменилось резким усилением в период DOY67-68, то есть во время и после магнитной бури. На этом же рисунке видно еще одно усиление мерцаний, в период DOY73-74, которое, наиболее вероятно связано с другим возмущением в солнечном ветре. На рис. 1(в) для того же периода времени приведены данные по скорости (верхняя панель) и концентрации протонов (нижняя панель) плазмы солнечного ветра вблизи орбиты Земли по измерениям на спутнике WIND (http://omniweb.gsfc.nasa.gov/html/omni_source.html#pla). Сравнение данных рис. 1(б) и рис. 1(в) показывает, что уровень ночных мерцаний и средняя концентрация плазмы в период магнитной бури меняются качественно сходным образом. Уровень утренних мерцаний, как следует из рис. 1(а), в период DOY62-70, смежный магнитной буре, в отличие от рис. 1(б), не испытывает сильных вариаций.

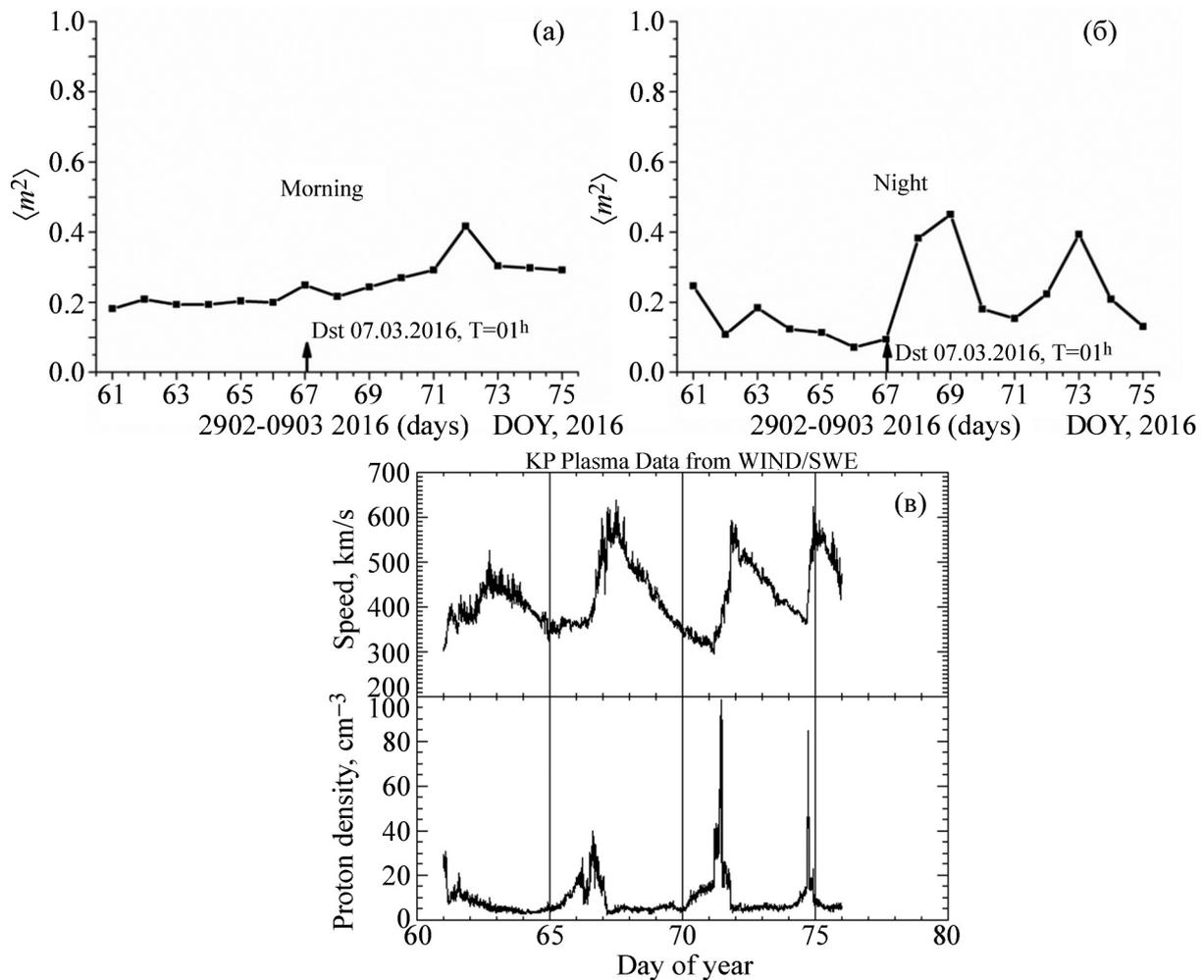


Рис. 1: (а) Временная динамика утренних мерцаний для события #1, положение стрелки соответствует времени минимума индекса D_{st} , (б) временная динамика ночных мерцаний для события #1, (в) скорость и концентрация плазмы солнечного ветра по измерениям на спутнике WIND, DOY (dayofyear) – порядковый номер дня года.

Событие # 2.

13.10.2016 (DOY 287) около 21.00 мск (18.00 UT) произошло сильное уменьшение индекса D_{st} с пиковым значением -104 нТ (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/index.html>). На рис. 2 приведены зависимости от даты усредненного индекса утренних, 2(а), и ночных, 2(б), мерцаний. Из рис. 2(б) видно, что перед магнитной бурей в период DOY283-285 происходило понижение уровня ночных мерцаний, которое сменилось резким усилением в период DOY288-289 во время и после магнитной бури. На этом же рисунке видно монотонное понижение уровня

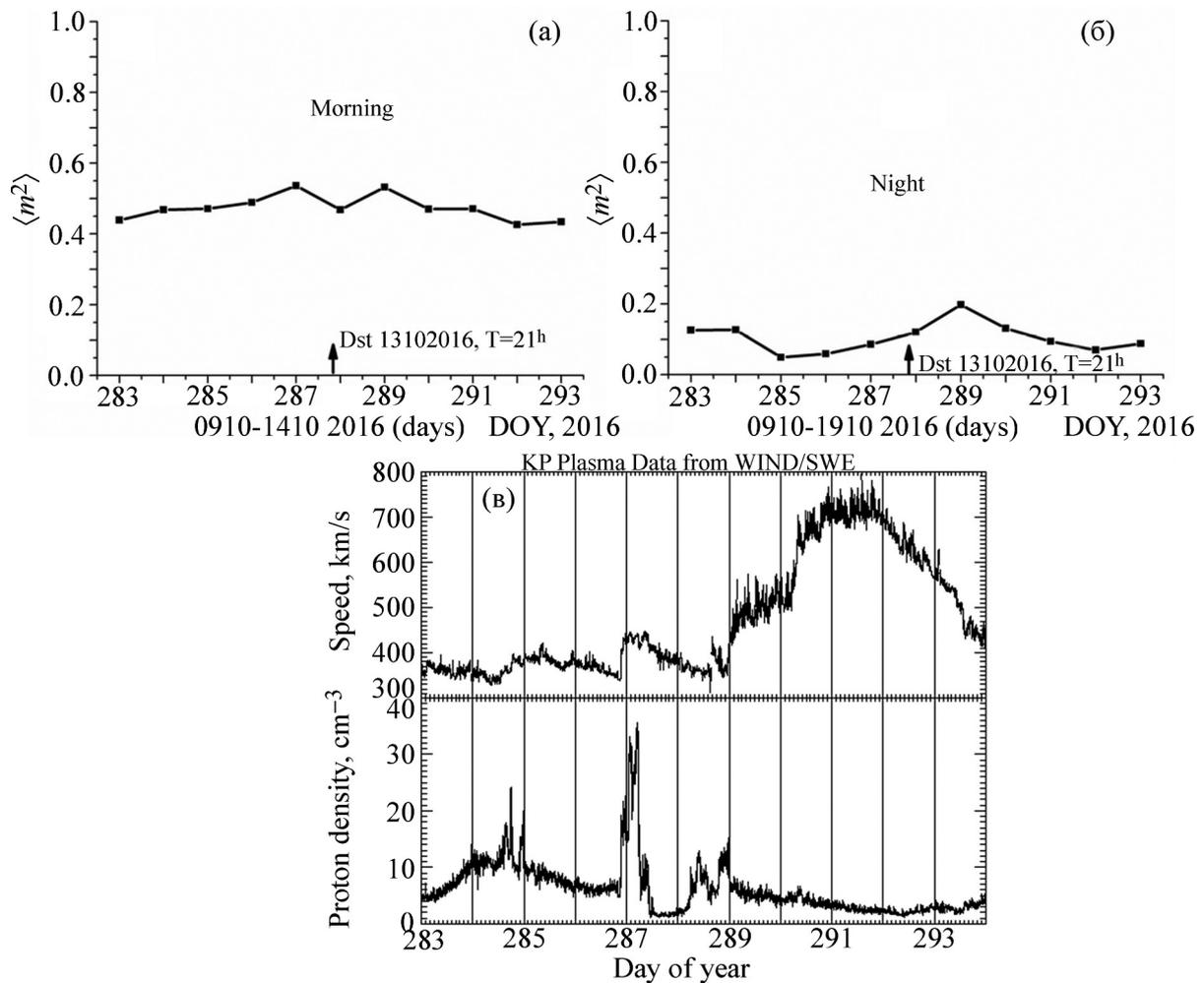


Рис. 2: (а) Временная динамика утренних мерцаний для события #2, положение стрелки соответствует времени минимума индекса D_{st} , (б) временная динамика ночных мерцаний для события #2, (в) скорость и концентрация плазмы солнечного ветра по измерениям на спутнике WIND, DOY (dayofyear) – порядковый номер дня года.

мерцаний после магнитной бури, DOY289-292. На рис. 2(в) для того же периода времени приведены данные по скорости (верхняя панель) и концентрации протонов (нижняя панель) плазмы солнечного ветра вблизи орбиты Земли по измерениям на спутнике WIND (http://omniweb.gsfc.nasa.gov/html/omni_source.html#pla). Сравнение данных рис. 2(б) и рис. 2(в) показывает, что уровень мерцаний и средняя концентрация плазмы в рассматриваемый период меняются качественно сходным образом. Уровень утренних мерцаний, как следует из рис. 2(а), за весь период DOY283-293, смежный магнитной буре, в отличие от рис. 2(б), не испытывает заметных вариаций.

Обсуждение результатов. Выводы. Геомагнитные бури #1 и #2 по всей вероятности связаны с прохождением одной и той же долгоживущей коротирующей области, сформированной в результате взаимодействия потоков солнечного ветра разных скоростей. Это подтверждается как характером вариаций скорости и концентрации плазмы на рис. 1(в) и 2(в), так и значением временного сдвига между DOY067 и DOY287, который составляет примерно 8 оборотов Солнца. Для обоих событий перед приходом возмущения к Земле наблюдалось понижение уровня ночных мерцаний, которое сменяется резким ростом вблизи минимума D_{st} и на следующий день. Заметные вариации в уровне утренних мерцаний при этом отсутствуют. Отметим, что для других коротирующих возмущений, как показывает предварительный анализ, качественная картина вариаций уровня мерцаний оказывается сходной с приведенной выше для двух событий.

Индекс мерцаний, как отмечалось, определяется абсолютным уровнем флуктуаций плотности плазмы на масштабах порядка Френелевского [1],

$$\langle m^2 \rangle = A \langle \Delta N_{lf}^2 \rangle L_0 \Delta z_{ef}, \quad (2)$$

где $A = \text{const}$ – постоянная, зависящая от вида спектра турбулентности и длины волны, $\langle \Delta N_{lf}^2 \rangle$ – дисперсия флуктуаций плотности на Френелевском масштабе $lf = (\lambda z_0 / 4\pi)^{1/2}$, λ – длина радиоволны, z_0 – расстояние от наблюдателя до эффективно модулирующего слоя, L_0 – внешний масштаб турбулентности, Δz_{ef} – толщина эффективно модулирующего слоя. Если пространственный спектр турбулентности является степенным с показателем степени n (значения n заключены в интервале $3 < n < 4$ [1]), то для $\langle \Delta N_{lf}^2 \rangle$ имеем

$$\langle \Delta N_{lf}^2 \rangle = \langle \sigma_N^2 \rangle (lf/L_0)^{n-3}, \quad (3)$$

здесь $\langle \sigma_N^2 \rangle$ – дисперсия флуктуаций плотности плазмы. Сходный характер временных вариаций ночных значений $\langle m^2 \rangle$ и средней концентрации плазмы N , рис. 1((б),(в)), рис. 2((б),(в)), указывает на существование корреляции между $\langle \sigma_N \rangle$ и N , причем дисперсия флуктуаций и среднее значение концентрации в случае ночных мерцаний относятся к близким областям солнечного ветра, примыкающим к орбите Земли. Этот вопрос требует отдельного рассмотрения с привлечением данных не только в возмущенные периоды, но и для спокойных условий в солнечном ветре. При этом следует иметь в виду, что данные WIND получены по измерениям в одной точке пространства, а данные мерцаний относятся к достаточно протяженной области толщиной порядка 0.1 а.е.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] В. И. Власов, И. В. Чашей, В. И. Шишов, Т. Д. Шишова, Геомagnetизм и аэрономия **19**(3), 401 (1979).
- [2] M. M. Bisi, A. R. Vreen, V. V. Jackson, et al., Solar Physics **265**(1-2), 49 (2010). DOI: 10.1007/s11207-010-9543-2.
- [3] Н. С. Николаева, Ю. И. Ермолаев, И. Г. Лодкина, М. Ю. Ермолаев, Геомagnetизм и аэрономия **57**(5), 555 (2017). DOI: 10.1134/S0016793217050152.
- [4] И. В. Чашей, С. А. Тюльбашев, И. А. Субаев, А. И. Чернышова, Астрон. Журн. **96**(5), 407 (2019). DOI: 10.1134/S0004629919050013.
- [5] И. В. Чашей, Т. О. Лебедева, С. А. Тюльбашев, И. А. Субаев, Астрон. Журн. **97**(1), 73 (2020). DOI: 10.1134/S0004629920010089.

Поступила в редакцию 20 ноября 2020 г.

После доработки 29 апреля 2021 г.

Принята к публикации 30 апреля 2021 г.