

УДК 523.9-466, 523.62-726

ГЛОБАЛЬНАЯ СТРУКТУРА СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НА ФАЗЕ СПАДА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ ПО ДАННЫМ МОНИТОРИНГА МЕЖПЛАНЕТНЫХ МЕРЦАНИЙ

© 2019 г. И. В. Чашей^{1*}, С. А. Тюльбашев^{1**}, И. А. Субаев¹, В. А. Извекова¹

¹Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН,
Пушчинская радиоастрономическая обсерватория АКЦ ФИАН, Пушкино, Россия

Поступила в редакцию 01.08.2018 г.; принята в печать 13.09.2018 г.

Приведены результаты анализа данных трехлетней серии мониторинга межпланетных мерцаний в 2015–2017 гг. на фазе спада солнечной активности. Наблюдения выполнены на радиотелескопе БСА ФИАН на частоте 111 МГц. Показано, что в течение рассматриваемого периода пространственное распределение уровня мерцаний в среднем было близко к сферически симметричному и не испытывало сильных временных вариаций на месячных и годовых интервалах. Среднемесячные значения уровня мерцаний не коррелируют с числами Вольфа.

DOI: 10.1134/S0004629919020026

Наблюдения межпланетных мерцаний в Пушчинской радиоастрономической обсерватории АКЦ ФИАН были начаты сразу после их обнаружения [1]. В результате первых наблюдений, сначала на радиотелескопе ДКР 1000 ФИАН и выносных радиотелескопах, а затем на радиотелескопе БСА ФИАН, была определена скорость солнечного ветра, исследованы глобальная структура межпланетной плазмы и ее динамика в цикле солнечной активности [2]. В частности, было показано, что наиболее сильные циклические изменения происходят на средних и высоких гелиоширотах, тогда как изменения в приэкваториальных областях сравнительно невелики [2]. В обзоре [2] подробно изложены результаты первых наблюдений и методика определения параметров турбулентной плазмы по измерениям межпланетных мерцаний.

Начиная с 2006 г., наблюдения межпланетных мерцаний проводятся на радиотелескопе БСА ФИАН в режиме мониторинга. В 2006–2011 гг. на фазе спада солнечной активности и в период вблизи минимума 23/24 цикла мониторинг межпланетных мерцаний проводился с использованием 16-лучевой диаграммы телескопа, перекрывающей полосу неба шириной 8° по склонениям. В данной конфигурации в течение суток наблюдалось несколько сотен мерцающих источников. Результаты этих наблюдений и методика обработки дан-

ных приведены в работах [3–5]. Было, в частности, показано, что в период аномально глубокого минимума активности в 2007–2009 гг. доминирующий вклад в мерцания на всех элонгациях вносила связанная с гелиосферным токовым слоем низкоширотная область солнечного ветра.

В 2012 г. проведена модернизация радиотелескопа БСА ФИАН, в результате которой повышена чувствительность радиотелескопа, а количество лучей увеличено до 96 с перекрытием полосы склонений в 50°, все лучи снабжены цифровыми приемниками. С апреля 2013 г. мониторинг межпланетных мерцаний ведется на новой 96-лучевой диаграмме, количество мерцающих источников, наблюдаемых в течение суток, в настоящее время достигает 5000 [5]. Эволюция глобальной структуры солнечного ветра по наблюдениям межпланетных мерцаний индивидуальных источников на частоте 327 МГц для предыдущих циклов солнечной активности исследовалась в работах [6, 7]. Результаты мониторинга межпланетных мерцаний на радиотелескопе БСА ФИАН в максимуме 24 цикла активности для периода 2013–2014 гг. приведены в работе [8]. В частности, было показано, что вблизи максимума 24 цикла глобальная структура распределения турбулентного солнечного ветра в среднем была близка к сферически симметричной [8]. В настоящей работе представлены результаты трехлетней серии мониторинга межпланетных мерцаний, проведенной с 2015 по 2017 г. на фазе спада 24 цикла солнечной активности.

*E-mail: chashei@prao.ru

**E-mail: serg@prao.ru

1. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Мониторинг межпланетных мерцаний проводится на радиотелескопе БСА ФИАН с рабочей частотой 111 МГц, ширина полосы 400 кГц. С частотой съема информации 0.1 с круглосуточно записываются флуктуации плотности потока излучения всех радиоисточников, попадающих в 96-лучевую диаграмму направленности радиотелескопа, которая перекрывает область склонений от -8° до $+42^\circ$. В течение суток регистрируются мерцания около 5000 компактных источников. Одним из основных параметров, описывающих мерцания, является индекс мерцаний m , который определяется как

$$m^2 = \frac{\langle \delta I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2}, \quad (1)$$

где δI — флуктуации интенсивности, $\langle I \rangle$ — средняя интенсивность источника. Индекс мерцаний зависит от абсолютного уровня флуктуаций плотности плазмы на френелевском масштабе в направлении на источник и от углового размера источника. Поскольку для подавляющего числа источников информация об угловых размерах отсутствует, была разработана специальная методика обработки массовых измерений [6, 8]. По измеренным флуктуациям интенсивности строится структурная функция

$$D_I(\tau) = \langle [\delta I(t + \tau) - \delta I(t)]^2 \rangle \quad (2)$$

с временем усреднения 1 мин при временном сдвиге $\tau = 1$ с, соответствующем межпланетным мерцаниям. Вычисленное значение структурной функции представляет собой удвоенную сумму дисперсии шумов σ_n^2 и дисперсии мерцающего потока σ_{sc}^2

$$D(1c) = 2(\sigma_n^2 + \sigma_{sc}^2) \quad (3)$$

Исследуемая область неба разбивается на квадратные площадки (пиксели) размером $3^\circ \times 3^\circ$ (3° по склонению \times 12 мин по прямому восхождению) и с учетом известной дисперсии шумов для каждой площадки вычисляется количество источников N с мерцающим потоком больше 0.1 Ян, $\sigma_{sc} > 0.1$ Ян. Типичные значения N в наших измерениях от нескольких единиц до 10. Далее вычисляется величина

$$M = \frac{N}{N_{\text{eff}}}, \quad (4)$$

где нормировочный коэффициент

$$N_{\text{eff}} = \frac{\langle N^2 \rangle}{\langle N \rangle} \quad (5)$$

определяется в результате усреднения по всем площадкам за 24 часа. Использование M вместо N позволяет подавить возможные вариации уровня шумов. Как показано в [6, 8], значение $M(4)$

пропорционально среднему по данной площадке индексу мерцаний,

$$M \sim \langle m^2 \rangle. \quad (6)$$

Ниже измеренные величины M будут использоваться как основной параметр, характеризующий уровень мерцаний. В наших наблюдениях значения M заключены в пределах от $0.1 < M < 1.5$. По вычисленным значениям M строятся суточные карты распределения уровня мерцаний. Как показано в работе [9], индекс мерцаний m пропорционален средней плотности плазмы в направлении на данный источник. Поэтому карты уровня мерцаний отражают пространственное распределение средней концентрации плазмы солнечного ветра. Сравнение суточных карт для последовательных дней позволяет проследить динамику пространственного распределения турбулентного солнечного ветра на временных масштабах порядка суток и может быть использовано для детектирования крупномасштабных возмущений. Усредненные по интервалам достаточно большой длительности двумерные карты ниже используются для анализа глобальной структуры распределения плазмы солнечного ветра.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ СЕРИИ НАБЛЮДЕНИЙ 2015–2017 гг.

Положение Солнца относительно используемой в наблюдениях полосы склонений в течение года изменяется. Суточные карты распределения уровня мерцаний обнаруживают сильную переменность, которая связана с неоднородностью и нестационарностью солнечного ветра. Поэтому для исследования долговременной динамики солнечного ветра необходимо проводить сравнение двумерных распределений уровня мерцаний, усредненных по интервалам равной длительности для последовательных лет. В качестве таких интервалов были выбраны календарные месяцы. Усредненные по месячным интервалам с января по декабрь двумерные карты распределения уровня мерцаний в 2015, 2016 и 2017 г. приведены на рис. 1. Различие в характере карт между осенне-зимним и весенне-летним периодами связано с тем, что с сентября по март Солнце находится за пределами полосы склонений, в которой проводится сканирование неба. Из карт на рис. 1 видно, что в дневное время вокруг Солнца наблюдается примерно круговая светлая область радиусом около 15° . Понижение уровня в этой области, соответствующей насыщенным мерцаниям, связано с подавлением флуктуаций интенсивности за счет влияния собственных угловых размеров источников. Центральная часть карты с подавленными мерцаниями окружена областью максимальных мерцаний с примерно кольцевой формой радиусом около 30° , за пределами

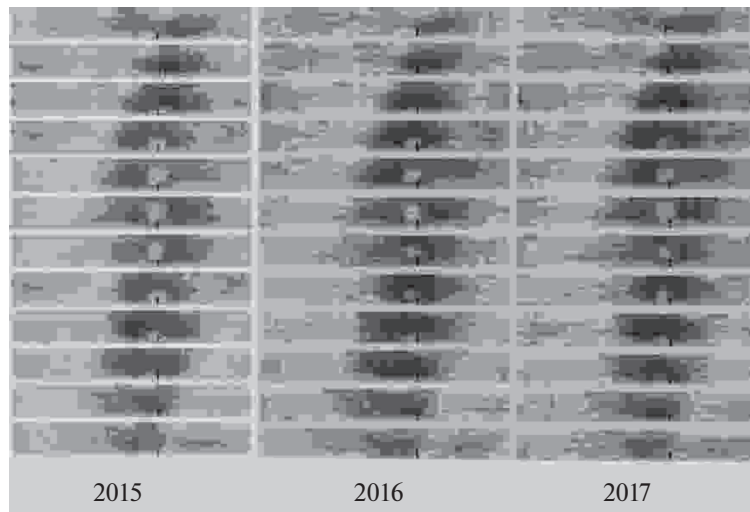


Рис. 1. Двумерные карты распределения уровня мерцаний, усредненные по месячным интервалам, с января по декабрь (сверху вниз) для 2015–2017 гг. По оси абсцисс московское время с 22 час предыдущего дня по 22 час текущего дня московского времени, по оси ординат склонение от -8° до $+42^\circ$. Оттенки от светло-серого до черного соответствуют увеличению среднего по пикселям $3^\circ \times 3^\circ$ уровня мерцаний M от 0.1 до > 1 . Стрелкой обозначено положение Солнца.

которой происходит ослабление мерцаний за счет падения плотности плазмы с удалением от Солнца. В зимние месяцы на картах видна только верхняя часть кольцевых структур. Кажущаяся анизотропия представленных на рис. 1 распределений обусловлена тем, что доступная область склонений, имеющая ширину 50° (вертикальное направление) значительно уже временной области, соответствующей углу 360° . По этой причине для летних месяцев границы области максимального уровня мерцаний практически совпадают с границами доступной области склонений.

На среднемесячных картах рис. 1 для всех трех лет виден светлый наклонный тренд в ночные часы. Этот тренд не связан со структурой, примыкающей к орбите Земли межпланетной плазмы, а возникает вследствие комбинации перемещения Солнца по отношению к полосе склонений и сезонных вариаций эффективной площади радиотелескопа. Сезонные вариации эффективной площади достаточно слабы по отношению к среднегодовому значению, но использованная методика, основанная на подсчете источников в пикселях, в ночное время, когда уровень мерцаний сравнительно низок, оказывается чувствительной к небольшим вариациям параметров телескопа. Указанный тренд не влияет на результаты анализа глобальной структуры солнечного ветра, которые относятся к областям гелиоцентрических расстояний меньше 1 а.е.

На рис. 2а–в приведены зависимости уровня мерцаний от времени суток для всех месяцев 2015, 2016 и 2017 г., полученные усреднением карт рис. 1 по всем склонениям (16 пикселей по вертикали) и по часовым интервалам (5 пикселей по горизонтали). Эти зависимости отражают изменение средне-

го уровня мерцаний при удалении просвечиваемых областей от Солнца. В целом серии зависимостей, изображенных на рис. 2, имеют сходный характер для трех последовательных лет (а, б, в). С апреля по сентябрь в центральной части рис. 2а–в наблюдается провал, окруженный двумя максимумами. Провал соответствует максимальному сближению просвечиваемых областей с Солнцем, когда мерцания в режиме насыщения подавляются за счет конечных угловых размеров источников. Два максимума относятся к кольцевым структурам с максимальным уровнем мерцаний. В зимний период, с октября по март, вместо структуры с провалом и двумя максимумами возникает примерно симметричная структура колоколообразной формы. Изменение характера зависимости обусловлено тем, что в зимний период Солнце находится за пределами используемой полосы склонений. Как правило, два максимума для летних месяцев имеют разные уровни, причем систематическое различие в предполуденном и послеполуденном максимальных уровнях отсутствует. Такая динамика может быть объяснена влиянием долгоживущих коротирующих крупномасштабных возмущений, вклад от которых в разные месяцы преобладает с западной или восточной стороны от линии Земля–Солнце. Индивидуальные события, связанные с коротирующими возмущениями в данных мониторинга мерцаний, будут рассмотрены в отдельной работе.

На рис. 3 приведены усредненные за интервалы длительностью в один месяц уровни мерцаний M (пунктирная линия) и среднемесячные значения чисел Вольфа (сплошная линия). Данные по мерцаниям дополнены результатами для периода с мая по декабрь 2014 г. (левая часть рисунка), отно-

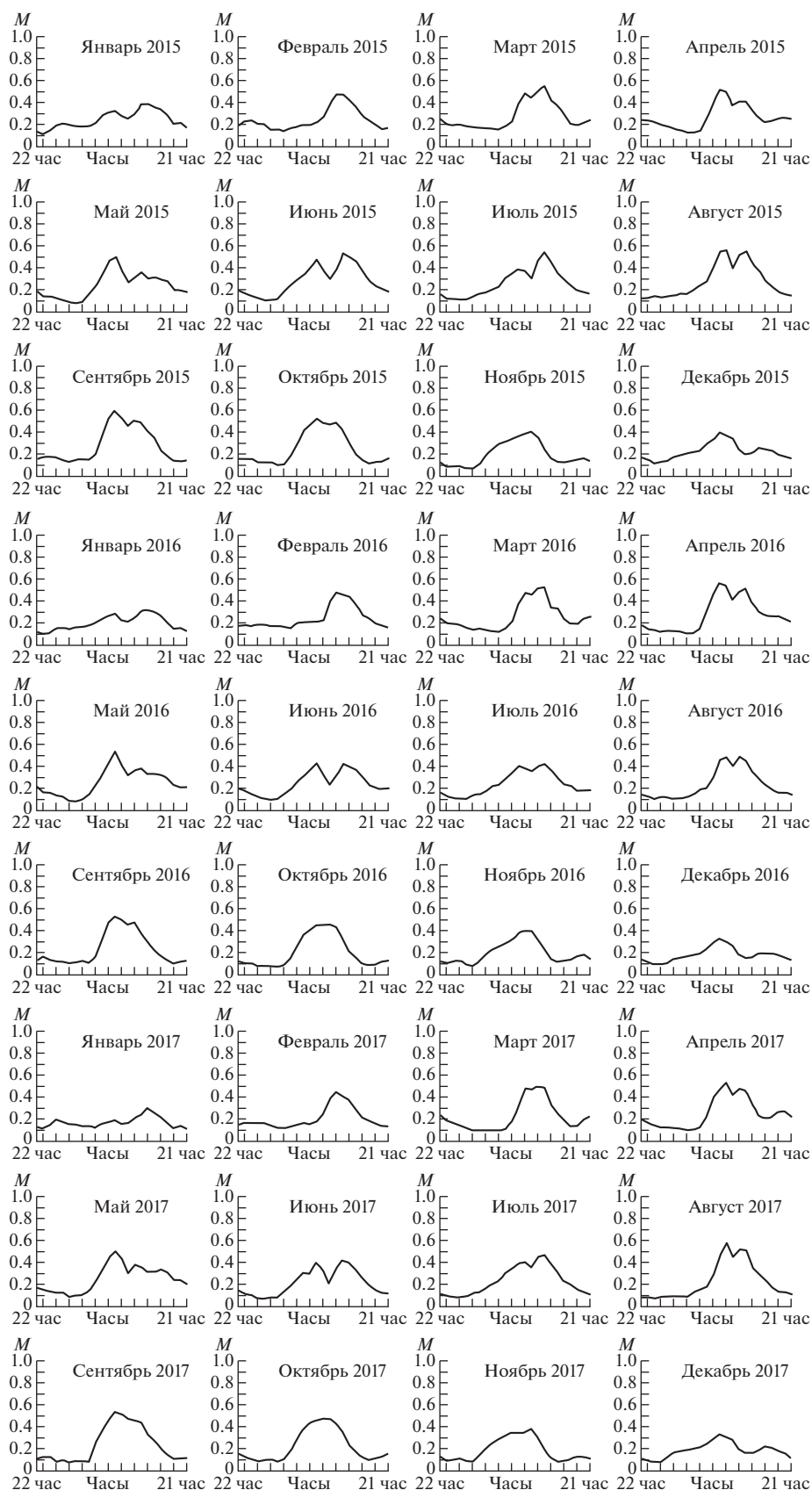


Рис. 2. Уровень мерцаний, вычисленный для карт рис. 1 усреднением по всем склонениям и часовым интервалам, по месяцам для 2015 (а), 2016 (б) и 2017 (в) г. По оси абсцисс московское время с –2 час по 21 час.

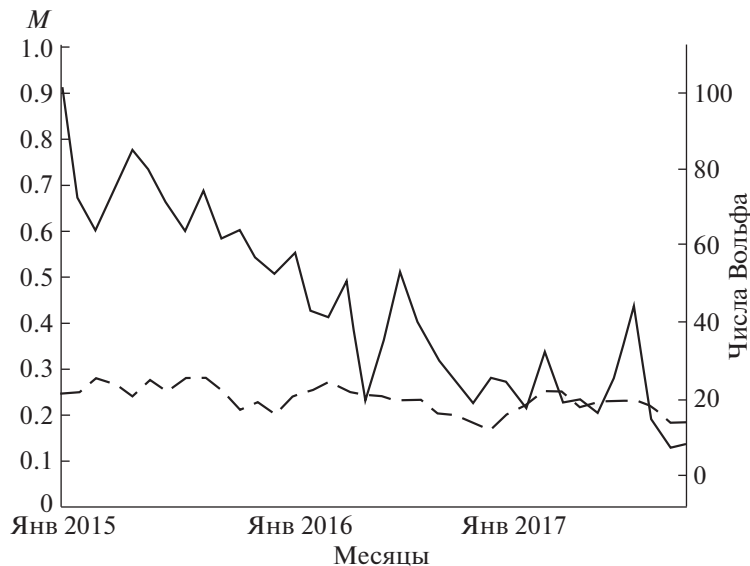


Рис. 3. Среднемесячные значения уровня мерцаний для периода с 01.05.2014 г. по 31.12.2017 г. (нижняя пунктирная кривая, левая ось ординат); среднемесячные значения чисел Вольфа за тот же период (верхняя сплошная кривая, правая ось ординат).

сящегося к максимуму солнечной активности. Как следует из рис. 3, уровень мерцаний на фазе спада активности в 2015–2017 гг. в среднем практически не меняется со временем и примерно совпадает с уровнем, наблюдавшимся в максимуме активности. Некоторое понижение уровня ночных мерцаний в 2016, 2017 г. по сравнению с 2015 г. (рис. 1) по существу не заметно на рис. 3, так как основной вклад в среднемесячные значения связан со значительно более сильными дневными мерцаниями. Сравнение двух зависимостей на рис. 3 показывает отсутствие корреляции между уровнем мерцаний и уровнем солнечной активности, причем как для долговременных трендов, так и для вариаций от месяца к месяцу.

3. ВЫВОДЫ

Данные мониторинга межпланетных мерцаний позволяют исследовать эволюцию глобальной структуры солнечного ветра в цикле солнечной активности на основе анализа усредненных по месячным сериям наблюдений двумерных распределений уровня мерцаний. На фазе спада 24 цикла солнечной активности распределение плотности плазмы солнечного ветра, как и в период максимума [8], в среднем близко к сферически симметричному и не обнаруживает заметных вариаций на годовых и месячных интервалах. В минимуме 23/24 цикла влияние гелиосферного токового слоя проявилось в существенном подавлении радиальной зависимости уровня мерцаний [3]. Полученные результаты показывают, что в 24 цикле активности гелиосферный слой вплоть до 2017 г. еще не сформировался. Отсутствие

корреляции уровня мерцаний с числами Вольфа показывает, что магнитные поля пятен практически не оказывают влияния на пространственное распределение сформировавшегося солнечного ветра. По-видимому, глобальное пространственное распределение солнечного ветра и его циклическая динамика определяются крупномасштабными магнитными полями солнечной короны.

Работа частично поддержана грантом РФФИ 16-02-00442.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. Hewish, P. E. Scott, and D. Wills, *Nature* **203**, 1214 (1964).
2. В. И. Власов, И. В. Чашей, В. И. Шишов и Т. Д. Шишова, *Геомагнетизм и аэрономия* **19**, 269 (1979).
3. V. I. Shishov, S. A. Tyul'bashev, I. V. Chashei, I. A. Subaev, K. A. Lapaev, *Solar Phys.* **265**, 277 (2010).
4. I. V. Chashei, V. I. Shishov, S. A. Tyul'bashev, I. A. Subaev, V. V. Oreshko, *Solar Phys.* **285(1)**, 142 (2013).
5. В. И. Шишов, И. В. Чашей, В. В. Орешко, С. В. Логвиненко, С. А. Тюльбашев, И. А. Субаев, П. М. Свидский, В. Б. Лапшин и Р. Д. Дагкесаманский, *Астрон. журн.* **93**, 1045 (2016).
6. M. Tokumaru, M. Kojima, and K. Fujiki, *Geophys. Res.* **117**, 6108 (2012).
7. P. K. Manoharan, *Astrophys. J.* **751**, 128 (2012)
8. I. V. Chashei, V. I. Shishov, S. A. Tyul'bashev, I. A. Subaev, V. V. Oreshko, and S. V. Logvinenko, *Solar Phys.* **290**, 2577 (2015).
9. S. J. Tappin, *Planetary and Space Science* **34**, 93 (1986).