

О КОРРЕЛЯЦИИ УРОВНЯ МЕЖПЛАНЕТНЫХ МЕРЦАНИЙ И СКОРОСТИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

© 2022 г. В. Р. Лукманов^{1,*}, И. В. Чашей¹, С. А. Тюльбашев¹

¹ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

*E-mail: lukmanov@praо.ru

Поступила в редакцию 24.07.2022 г.

После доработки 30.09.2022 г.

Принята к публикации 30.09.2022 г.

Приведены результаты наблюдений межпланетных мерцаний компактного радиоисточника 3С 48 на фазе спада 24 цикла солнечной активности. Наблюдения проводились на радиотелескопе БСА ФИАН на частоте 111 МГц. Проведено сравнение индекса (уровня) мерцаний и скорости солнечного ветра, которая вычислялась по ширине временных спектров мерцаний. Для полной серии наблюдений с 2015 по 2019 г. имеется слабая убывающая зависимость уровня мерцаний от скорости солнечного ветра, но из-за значительного разброса в данных корреляция невелика, в среднем около – 0.15. При усреднении по годичным интервалам модуль коэффициента корреляции возрастает почти до 1, причем индекс мерцаний в среднем примерно обратно пропорционален скорости солнечного ветра. Обсуждается возможная связь между пространственно-временной структурой уровня мерцаний и средней концентрацией плазмы солнечного ветра.

Ключевые слова: солнечный ветер, межпланетные мерцания, глобальная структура

DOI: 10.31857/S0004629922110147

1. ВВЕДЕНИЕ

Метод межпланетных мерцаний широко применяется для исследования пространственной структуры солнечного ветра [1–6]. Преимущество данного метода в том, что он позволяет исследовать области солнечного ветра, недоступные для прямых измерений бортовыми приборами космических аппаратов, при этом наблюдения проводятся на наземных установках. Мерцания возникают за счет дифракции излучения компактных радиоисточников на движущихся неоднородностях просвечиваемой межпланетной плазмы. Характерный пространственный масштаб межпланетных мерцаний в метровом диапазоне длин волн составляет порядка сотен километров, временной масштаб – порядка секунды. Глобальная структура солнечного ветра в максимуме солнечной активности близка к сферически симметричной с медленными потоками ветра на всех гелиоширотах, а в минимуме имеет бимодальную структуру с быстрыми потоками на высоких широтах и медленными на низких широтах [1, 7]. Многолетние серии наблюдений мерцаний позволяют исследовать глобальную структуру солнечного ветра и ее эволюцию в цикле солнечной активности. При этом предполагается, что пространственное распределение уровня мерцаний отражает соответствующее распределение сред-

ней концентрации плазмы [1]. Такое предположение требует обоснованного на экспериментальных данных обоснования. В настоящей работе по данным наблюдений сильного компактного источника 3С 48 исследуются эволюция уровня мерцаний на спаде 24 цикла солнечной активности с 2015 по 2019 г. и корреляция уровня мерцаний со скоростью солнечного ветра.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Наблюдения межпланетных мерцаний проводятся на радиотелескопе БСА ФИАН, центральная частота 111 МГц, полоса частот 2.5 МГц, период съема данных 0.1 с. БСА ФИАН является меридиональным радиотелескопом, который может фиксировать радиоисточник один раз в сутки. Полное время прохождения источника через диаграмму направленности антенны составляет около 7 мин. Индекс мерцаний вычисляется по измененным флуктуациям плотности потока на интервале около 2 мин (1200 точек) вблизи пика диаграммы направленности в центральной части диаграммы направленности согласно формуле:

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

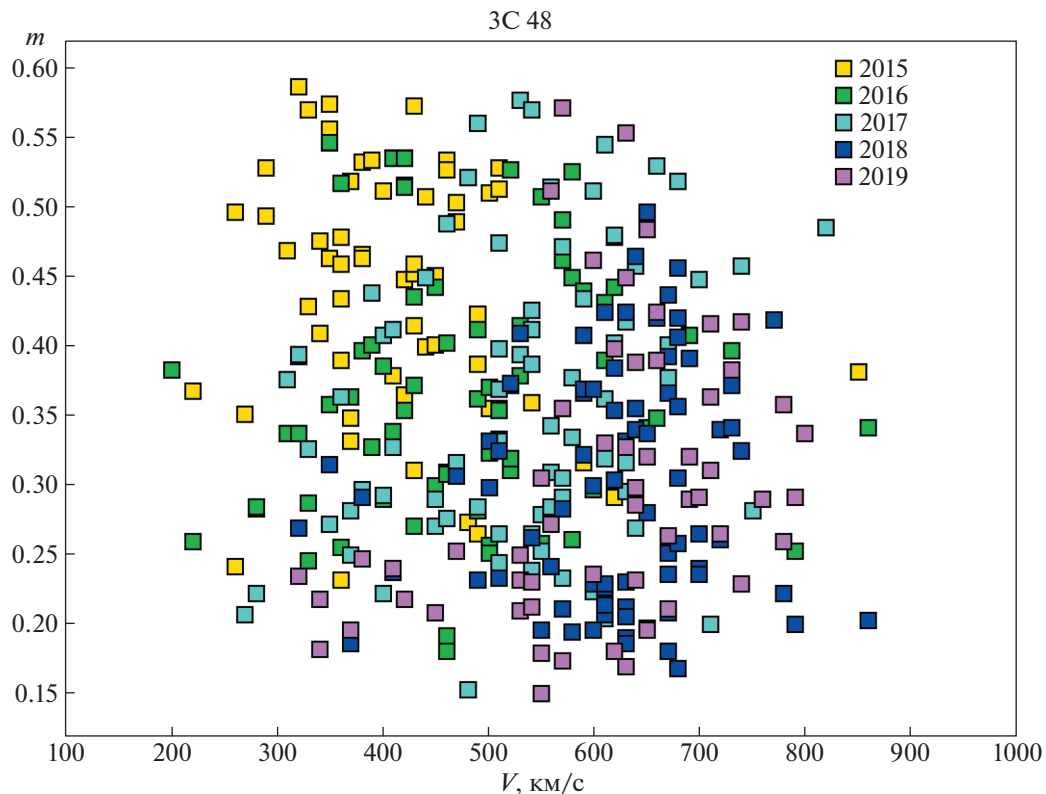


Рис. 1. Измеренные значения индекса мерцаний и скорости солнечного ветра за 2015–2019 гг.

где $I(t)$ — измеряемая плотность потока в зависимости от времени, а $\langle I \rangle$ — ее среднее значение. Индекс мерцаний пропорционален усредненному по лучу зрения среднеквадратичному уровню флуктуаций концентрации плазмы на масштабе порядка масштаба первой зоны Френеля: $m \sim \sqrt{\langle \delta n_e^2 \rangle}$. Для анализа в рамках данной работы выбран сильный компактный радиоисточник 3С 48. Наблюдения проводились на элонгациях от 25° до 60° . Это обусловлено тем, что на элонгациях меньше 25° мерцания переходят в фазу насыщения и подавляются угловым размером источника, а на элонгациях больше 60° мерцания ослабевают из-за удаления от Солнца модулирующего слоя, дающего наибольший вклад в мерцания. Отметим, что при оценке значений индексов мерцаний использовались те же данные, что и в работе [6], где оценивалась скорость солнечного ветра по временным спектрам мерцаний, а также взяты оценки скоростей солнечного ветра, полученные в рамках этой работы.

3. КОРРЕЛЯЦИЯ ИНДЕКСА МЕРЦАНИЙ И СКОРОСТИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

На рис. 1 приведена измеренная зависимость индекса мерцаний от скорости солнечного ветра в 2015–2019 гг. Разным годам наблюдений соот-

ветствуют разные цвета. Из рис. 1 видно, что для каждого года наблюдений четко выраженная зависимость уровня мерцаний от скорости солнечного ветра отсутствует. При этом на рис. 1 отчетливо видно смещение облаков точек, обозначаемых разными цветами за разные годы. Полный разброс точек по вертикальной шкале значительно больше вблизи максимума солнечной активности (2015, 2016 гг.), что естественным образом объясняется повышенной частотой возмущений, таких, как выбросы корональной массы (СМЕ).

На рис. 2 в логарифмическом масштабе показаны данные из рис. 1, усредненные за каждый год. На рис. 2 видна четкая убывающая зависимость уровня мерцаний от скорости солнечного ветра: с уменьшением уровня солнечной активности средняя скорость солнечного ветра увеличивается, а уровень мерцаний падает. Гелиоширота прицельной точки луча зрения для источника 3С 48 в течение года изменяется от примерно 50° на элонгациях около 25° до примерно 15° при элонгациях около 60° [8]. Возрастание скорости при переходе от максимума активности к минимуму связано с возрастающим вкладом высокоскоростных потоков из корональных дыр на высоких гелиоширотах (медленный ветер преобладает на широтах меньше 20° , быстрый на более высоких широтах [7]). Уменьшение индекса мер-

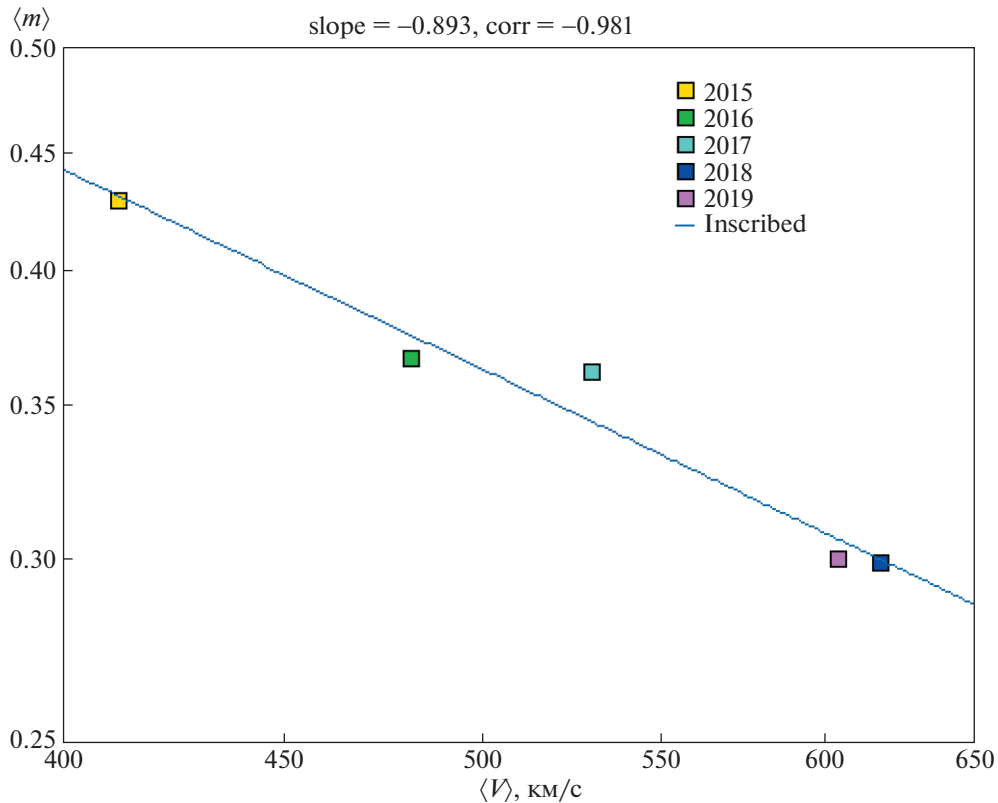


Рис. 2. Среднегодовые значения индекса мерцаний и скорости солнечного ветра в логарифмическом масштабе со вписанной прямой. Коэффициент наклона прямой приведен в верхней части рисунка.

цаний с ростом скорости, видимое на рис. 2, может быть объяснено более низкой концентрацией плазмы в высокоскоростных потоках, если предположить, что существует пропорциональность между уровнем мелкомасштабных флуктуаций и средней концентрацией плазмы.

В табл. 1 приведены результаты численного анализа: количества наблюдений (n), среднегодовых значений скорости солнечного ветра и индекса мерцаний ($\langle v \rangle$ и $\langle m \rangle$), их среднеквадратичные отклонения (σ_v и σ_m) и коэффициент корреляции по Пирсону $\left(r_{vm} = \frac{\langle vm \rangle - \langle v \rangle \langle m \rangle}{\sigma_v \sigma_m} \right)$ за каждый год, доверительный интервал для коэффициента корреляции при доверительной вероятности 0.95.

Из табл. 1 видно, что наблюдаются значительные вариации коэффициента корреляции год от года, причем средние значения коэффициента, как правило, невелики. Поэтому можно утверждать, что явная корреляция между уровнем мерцаний и скоростью солнечного ветра на интервалах длительностью в один год отсутствует. Среднее по всем данным на рис. 1 значение коэффициента корреляции оказывается равным -0.15 , что указывает в среднем на убывающую, но слабую зависимость индекса мерцаний от скорости солнечного ветра.

Аналогичный анализ данных, приведенных на рис. 2, показывает, что между среднегодовыми значениями индекса мерцаний и скорости солнечного ветра имеется достаточно высокая отри-

Таблица 1. Результаты численного анализа

Год	n	$\langle v \rangle$, км/с	σ_v , км/с	$\langle m \rangle$	σ_m	r_{vm}	Довер. интервал для r_{vm}
2015	62	412	98	0.429	0.093	-0.156	от -0.391 до 0.098
2016	68	482	124	0.366	0.086	0.060	от -0.181 до 0.294
2017	77	530	114	0.362	0.102	0.260	от 0.038 до 0.457
2018	79	618	96	0.299	0.083	0.096	от -0.128 до 0.311
2019	57	604	118	0.300	0.100	0.353	от 0.102 до 0.562

цательная корреляция: коэффициент корреляции составляет -0.981 . Линейная зависимость, вписанная в данные рис. 2 в логарифмическом масштабе, по нашим оценкам имеет коэффициент наклона примерно -0.9 .

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Таким образом, наблюдения мерцаний индивидуального источника на годичных интервалах показывают слабую отрицательную корреляцию между индексом мерцаний и скоростью солнечного ветра. При усреднении по годичным интервалам корреляция индекса мерцаний и скорости солнечного ветра резко увеличивается. Наблюдательные данные примерно соответствуют обратной пропорциональности между индексом мерцаний и скоростью солнечного ветра. Такая зависимость между параметрами мерцаний может рассматриваться как косвенное подтверждение пропорциональности между уровнем ответственных за мерцания мелкомасштабных флуктуаций и средней концентрацией плазмы, поскольку в соответствии с данными измерений КА Ulysses [7] плазма в быстрых потоках является более разреженной, чем в медленных, причем плотность потока частиц (и плотность потока массы) оказывается примерно постоянной, $\langle Nv \rangle \approx \text{const}$. Примерное постоянство потока массы потоков спокойного солнечного ветра обусловлено тем, что значительная часть выходящего в корону потока энергии расходуется на работу против гравитации Солнца [9].

Отметим, что убывающая зависимость уровня мерцаний от скорости солнечного ветра была найдена также в работе [10] в результате томографического анализа наблюдений межпланетных мерцаний, проведенных на трехпунктовой системе Нагойского университета. Эта зависимость проявилась при усреднении по всем лучам зрения для использованной в наблюдениях сетки источников. Как показано в работе [11], полученная в [10] зависимость согласуется с примерным постоянством потока массы солнечного ветра. Зависимость между уровнем мерцаний и скоростью солнечного ветра является следствием пропорциональности между уровнем мелкомасштабных флуктуаций плотности и средней концентрацией плазмы, ее существование может рассматриваться как основание для исследования глобальной структуры солнечного ветра. В недавней работе [12] найдена высокая корреляция уровня межпла-

нетных мерцаний с измерениями средней концентрации солнечного ветра вблизи орбиты Земли на спутнике ACE. Этот результат также получен при усреднении данных мерцаний по большому числу лучей зрения. Результаты [10, 12] показывают, что наблюдения мерцаний большого числа источников в среднем описывают пространственное распределение концентрации плазмы солнечного ветра. Из результатов настоящей работы следует, что наблюдения индивидуальных источников при усреднении за периоды около года также дают информацию, которая может быть использована для исследования циклической динамики солнечного ветра. Для интервалов порядка периода вращения Солнца целесообразно использовать данные мониторинга межпланетных мерцаний, в которых в течение суток наблюдается несколько тысяч компактных радиоисточников [13].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В. И. Власов, И. В. Чашей, В. И. Шишов, Т. Д. Шишова, Геомагнетизм и аэрон. **19**, 401 (1979).
2. С. К. Глубокова, С. А. Тюльбашев, И. В. Чашей, В. И. Шишов, Астрон. журн. **90**, 639 (2013).
3. С. К. Глубокова, А. В. Глянецев, С. А. Тюльбашев, И. В. Чашей, В. И. Шишов, Астрон. журн. **92**, 38 (2015).
4. M. Tokumaru, M. Kojima, and K. Fujiki, J. Geophys. Res. **117**, 06108 (2012).
5. P. K. Manoharan, Astrophys. J. **751**, 128 (2012).
6. I. V. Chashei, V. R. Lukmanov, S. A. Tyul'bashev, and M. Tokumaru, Solar Phys. **296**, № 63, 14P (2021).
7. D. J. McComas, H. A. Elliott, N. A. Schwadron, J. T. Goslig, R. M. Skoug, and B. E. Goldstein, Geophys. Res. Lett. **30**, 1517 (2003).
8. В. Р. Лукманов, И. В. Чашей, Астрон. журн. **99**. 160 (2022).
9. I. V. Chashei, Adv. Space Res. **20**, 31 (1997).
10. K. Asai, M. Kojima, M. Tokumaru, A. Yokobe, B. V. Jackson, P. L. Hick, and P. K. Manoharan, Journal of Geophysical Research **103**, 1991 (1998).
11. И. В. Чашей, М. Коджима, И. Шимизу, Геомагнетизм и аэрон. **42**, 7 (2002).
12. B. V. Jackson, M. Tokumaru, R. A. Fallows, M. M. Bisi, K. Fujiki, I. Chashei, S. Tyul'bashev, O. Chang, D. Barnes, A. Buffington, L. Cota, and M. Bracamontes, Adv. Space Res. (2022)
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.06.029>
13. В. И. Шишов, И. В. Чашей, В. В. Орешко, С. В. Логвиненко, С. А. Тюльбашев, И. А. Субаев, П. М. Свидский, В. Б. Лапшин, Р. Д. Дагжесаманский, Астрон. журн. **93**, 1045 (2016).