

ВАРИАЦИИ РАДИАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТИ УРОВНЯ МЕЖПЛАНЕТНЫХ МЕРЦАНИЙ НА ФАЗЕ СПАДА 24 ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

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

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

*E-mail: arhimed89@mail.ru

Поступила в редакцию 11.11.2021 г.

После доработки 26.11.2021 г.

Принята к публикации 26.11.2021 г.

Представлены результаты длительной (2015–2019 гг.) серии наблюдений межпланетных мерцаний, выполненных на радиотелескопе БСА ФИАН на частоте 111 МГц. Анализируются радиальные зависимости относительного уровня (индекса) межпланетных мерцаний радиоисточника 3С 48, луч зрения на который в течение года смещается от низких до средних и высоких гелиоширот. Показано, что для всех годовичных серий радиальная зависимость индекса мерцаний оказывается более пологой, чем ожидается для модели сферически симметричной среды. Отличие объясняется широтным эффектом с учетом влияния приэкваториального слоя с повышенной плотностью плазмы. Моделирование низкоширотного слоя показывает, что толщина слоя на фазе спада солнечной активности в среднем в два раза больше, чем вблизи минимума активности.

Ключевые слова: солнечный ветер, глобальная структура, межпланетные мерцания

DOI: 10.31857/S0004629922030045

1. ВВЕДЕНИЕ

Межпланетные мерцания широко используются для исследования глобальной структуры солнечного ветра и ее эволюции в цикле солнечной активности [1–5]. Достоинства метода состоят в том, что используются наблюдения на наземных установках и, кроме того, возможно получение информации об областях, недоступных для систематических локальных измерений. Мерцания, или флуктуации потока излучения просвечивающего радиоисточника, обусловлены дифракцией радиоволн на движущихся неоднородностях солнечного ветра, поэтому уровень флуктуаций пропорционален абсолютному уровню флуктуаций концентрации плазмы на масштабах, близких к френелевскому. Характерный пространственный масштаб дифракционной картины в метровом диапазоне порядка нескольких сотен километров, а характерное время мерцаний порядка секунды. Обычно считается, и такое предположение подтверждается наблюдательными данными [6], что абсолютный уровень мелко-масштабных флуктуаций концентрации плазмы пропорционален средней концентрации плазмы. Поэтому пространственное распределение уровня мерцаний отражает пространственное распределение средней концентрации солнечного ветра. В настоящей работе на основе результатов дли-

тельной серии наблюдений межпланетных мерцаний, проведенных в 2015–2019 гг., исследуется динамика пространственного распределения уровня мерцаний в период, когда солнечная активность изменялась от максимума до минимума.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Наблюдения межпланетных мерцаний проводятся на высокочувствительном радиотелескопе БСА ФИАН [7] с рабочей частотой 111 МГц и полосой приема 2.5 МГц. С частотой съема информации 10 Гц измеряются флуктуации потока излучения (интенсивности) просвечивающих источников. Радиотелескоп БСА ФИАН является меридианным инструментом, позволяющим фиксировать излучение источника один раз в сутки, полная ширина диаграммы по нулевому уровню составляет около 7 мин. По измеренным флуктуациям для каждого сеанса наблюдений на временном интервале 3.5 мин в центральной части диаграммы вычисляется индекс мерцаний (относительные флуктуации интенсивности):

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

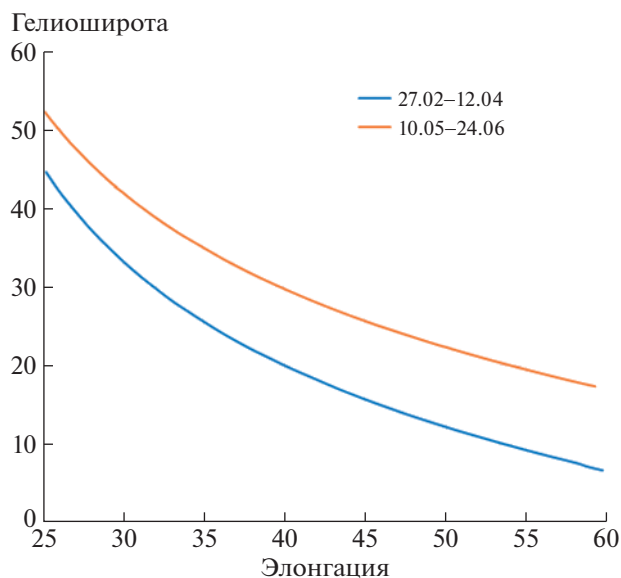


Рис. 1. Зависимость гелиошироты прицельной точки луча зрения от элонгации, выраженной в градусах, для источника ЗС 48 на фазе сближения с Солнцем (нижняя кривая) и на фазе удаления (верхняя кривая).

где $I(t)$ — измеряемая плотность потока в зависимости от времени, а $\langle I \rangle$ — ее среднее по времени значение. Эта характеристика является основной при исследовании пространственного распределения плазмы солнечного ветра. Для последующего анализа выбран компактный источник ЗС 48, один из наиболее сильных. Наибольшее сближение этого источника с Солнцем происходит в апреле-мае, для анализа использованы сеансы наблюдений, когда источник находился на оптимальных элонгациях (углах между направлениями на центр Солнца и на источник) от 25° до 60° . На элонгациях меньше 25° мерцания сильно подавлены из-за влияния собственных угловых размеров источника, на элонгациях более 60° уровень мерцаний ослабевает из-за удаления зондируемой области от Солнца. Отметим, что в настоящей работе использованы те же данные, что и в работе [8] при исследовании скоростей солнечного ветра по временным спектрам мерцаний. Особенность источника ЗС 48 состоит в том, что при изменении его положения относительно Солнца изменяется и гелиоширота лучевой линии. Это позволяет исследовать не только радиальное распределение плазмы, но также возможное влияние широтных градиентов. Рассчитанная зависимость гелиошироты прицельной точки луча зрения от элонгации для источника ЗС 48 приведена на рис. 1 для фазы сближения с Солнцем (синяя кривая) и для фазы удаления (желтая кривая). Из рис. 1 видно, что гелиоширота увеличивается при уменьшении элонгации, причем для

одних и тех же элонгаций гелиошироты отличаются при сближении и удалении источника относительно Солнца.

3. РАДИАЛЬНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ИНДЕКСА МЕЖПЛАНЕТНЫХ МЕРЦАНИЙ

На рис. 2 в логарифмическом масштабе приведены измеренные значения индексов мерцаний для 2015–2019 гг. На этом рисунке нанесены теоретические зависимости (желтые линии), которые считались по формуле [1, 8]

$$m^2 = 2\pi \int_{-1AU \cos \epsilon}^{+\infty} dz \int_0^{+\infty} \Phi_e(q) \sin^2 \left(\frac{q^2 z'}{2k} \right) F^2(q) q dq, \quad (2)$$

где $\Phi_e(q) = Cq^{-n}$ — пространственный спектр флуктуаций электронной плотности межпланетной плазмы, $C \sim \frac{1}{r^4} = \frac{1}{(r_0^2 + z^2)^2}$ — структурная константа, r — расстояние от центра Солнца до точки на луче зрения, $r_0 = 1AU \sin \epsilon$ — расстояние от центра Солнца до прицельной точки, n — индекс турбулентности (в рамках данной работы предполагалось, что $n = 3.6$); $\sin^2 \left(\frac{q^2 z'}{2k} \right)$ — фильтр

Френеля, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ — волновое число, длина волна $\lambda = 2.7$ м; $F(q) \sim \exp \left(-\frac{1}{4} \theta_0^2 k^2 z'^2 \right)$ — пространственный спектр радиоисточника, θ_0 — радиус источника по уровню $\frac{1}{e}$; $z' = z + 1AU \cos \epsilon$ — расстояние от точки на луче зрения до наблюдателя. Интегрирование по лучу зрения проводилось до 2 а.е. (после данного значения вклад незначительный) с шагом 0.01 а.е. По пространственной частоте интегрирование проводилось от 0 до 10^{-4} м^{-1} с шагом 10^{-6} м^{-1} . Коричневая прямая соответствует наилучшему вписыванию степенной зависимости по методу наименьших квадратов, найденные показатели степени составляют 1.097, 1.127, 1.008, 1.232, 1.314 для 2015–2019 гг. соответственно. Отметим, что разброс значений индекса мерцаний относительно вписанных зависимостей в 2015–2017 гг., как можно видеть из рис. 2, заметно больше, чем в 2018–2019 гг.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Желтая кривая на рис. 2 соответствует рассчитанной теоретически зависимости (2) для источника с угловым размером 0.33 угловых секунд в модели сферически симметричной среды. В этой простейшей модели радиальная зависимость индекса мерцаний $m(r_0) \sim r_0^{-\gamma}$ определяется показа-

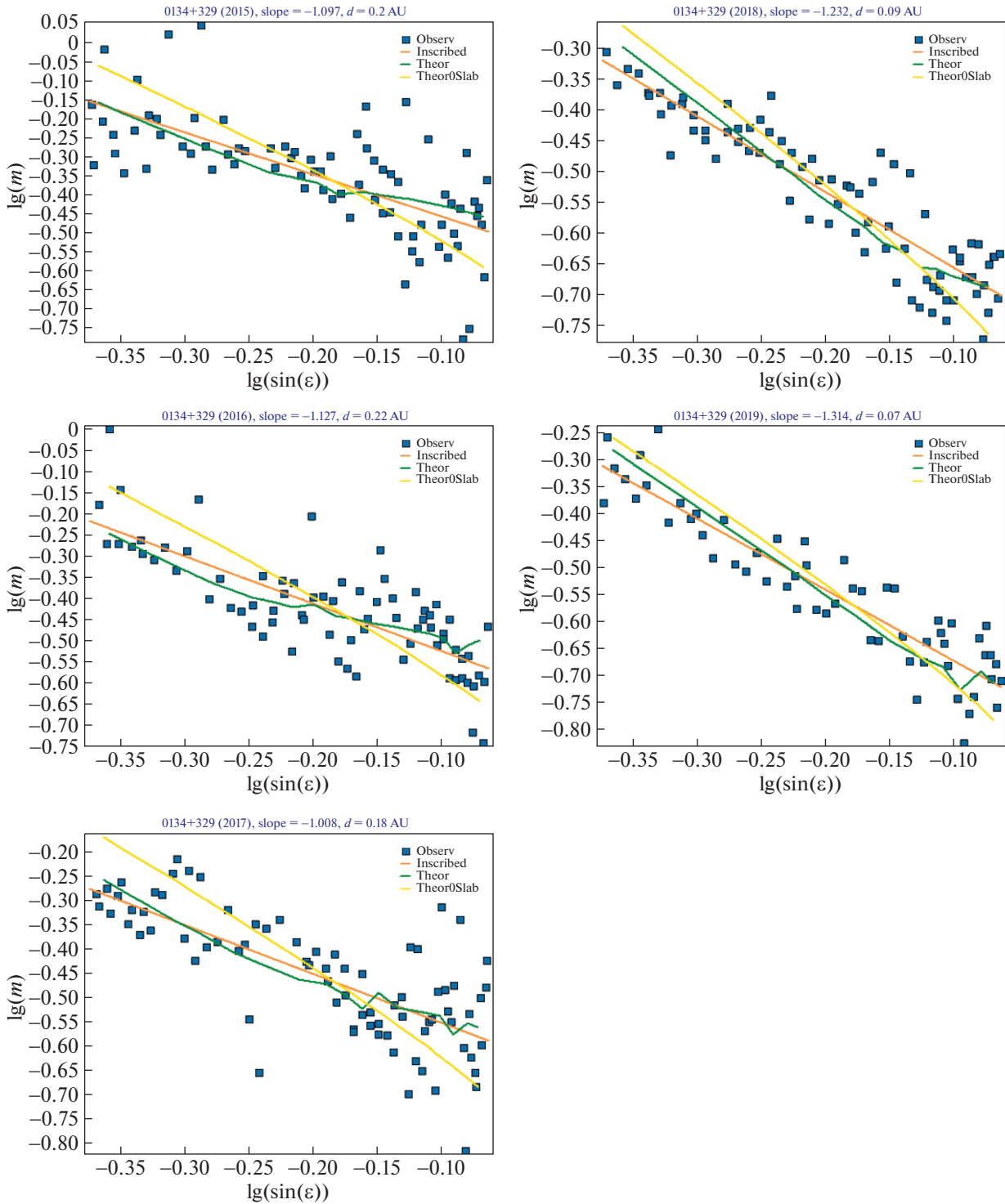


Рис. 2. Измеренные значения индекса мерцаний для 2015–2019 гг. (сверху вниз) в логарифмическом масштабе. Желтая кривая соответствует теоретической зависимости (2) для модели сферически симметричной среды; коричневая прямая – степенная зависимость по наилучшему вписыванию методом наименьших квадратов, показатели степени приведены в верхней части рисунков; зеленая линия – вписанная зависимость с учетом экваториального слоя, толщина слоя d приведена в верхней части рисунков.

телем степени структурной константы $C(r) \sim r^{-p}$ в формуле (2). При $p = 4$ показатель степени γ близок к 1.8. Сравнение теоретической зависимо-

сти с данными рис. 2 показывает, что наблюдаемая радиальная зависимость индекса мерцаний, для которой значения γ заключены в пределах

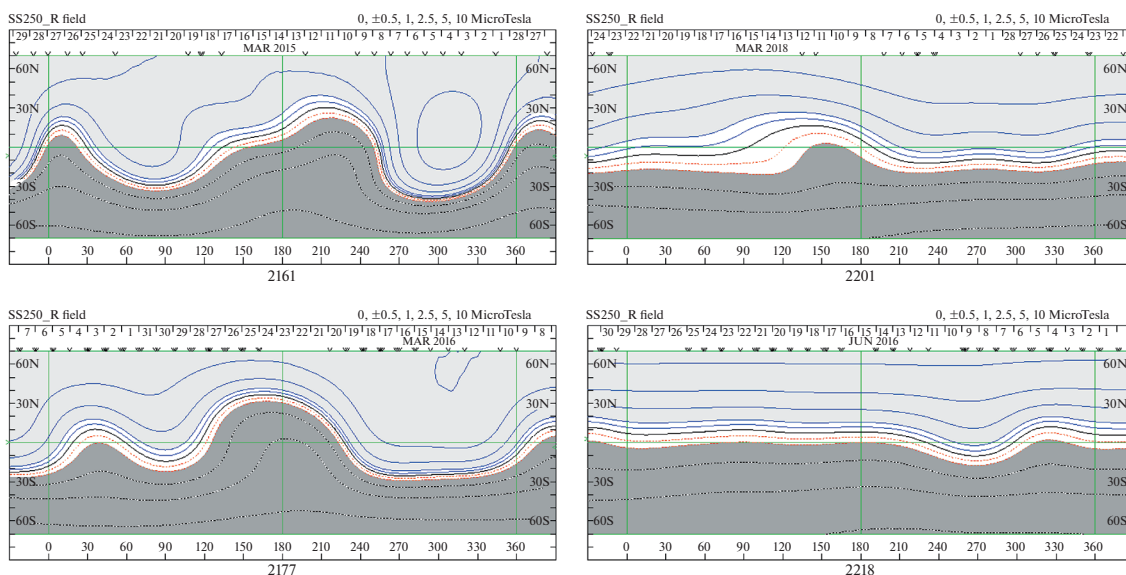


Рис. 3. Синоптические карты радиальной составляющей коронального магнитного поля на поверхности источника, гелиоцентрическое расстояние 2.5 радиусов Солнца, по данным Солнечной обсерватории Вилкокса (<http://wso.stanford.edu/synsourcel.html>): а) 2015–2016 г.г., б) 2018–2019 г.г.

$1.1 < \gamma < 1.3$, оказывается систематически более пологой, чем ожидаемая для модели сферически симметричной среды. Уплотнение радиальной зависимости индекса мерцаний может быть связано с повышенной концентрацией плазмы в области солнечного ветра, примыкающей к орбите Земли. Для объяснения наблюдаемой радиальной зависимости индекса мерцаний мы предположили, что концентрация плазмы и уровень турбулентности в два раза превышают фоновый уровень в приэкваториальном слое с полной толщиной $2d$. Пренебрегая наклоном плоскости эклиптики по отношению к плоскости солнечного экватора, можно приближенно принять, что орбита Земли лежит в плоскости экватора. При этом структурная константа в (2) будет модифицирована следующим образом:

$$C = \begin{cases} \frac{4}{r^4}, & 0 < z' < \frac{d}{\sin \lambda}, \\ \frac{1}{r^4}, & z' > \frac{d}{\sin \lambda}, \end{cases} \quad (3)$$

где λ – гелиоширота источника при заданной элонгации. Соотношение (3) означает, что часть луча зрения, погруженная в плотный слой, увеличивается при уменьшении гелиошироты источника. При расчетах модифицированных теоретических зависимостей учитывалась зависимость гелиошироты источника от элонгации на каждый день наблюдений (рис. 1). Полутолщина гелиосферного слоя d варьировалась от 0 до 0.5 а.е. с интервалом 0.01 а.е. Методом наименьших квадратов определялся параметр модели d , при котором теоретическая кривая наилучшим образом

вписывается в экспериментальные точки (зеленая линия на рис. 2). Изломы в теоретических кривых на рис. 2 связаны с тем, что гелиошироты источника при одних и тех же элонгациях различны для фазы сближения с Солнцем и удаления от Солнца. Результаты моделирования на рис. 2 показывают, что толщина слоя уменьшается при понижении уровня солнечной активности: значение составляет $d \approx 0.2$ а.е. на фазе спада в 2015–2017 гг. и $d \approx 0.1$ а.е. вблизи минимума в 2018–2019 гг.

Крупномасштабная широтно-долготная структура солнечного ветра в области сформировавшегося течения, по-видимому, отражает характер взаимодействия движущейся плазмы с корональными магнитными полями в области формирования потока. На рис. 3 для иллюстрации приведены синоптические карты распределения радиальной составляющей магнитного поля на поверхности источника (гелиоцентрическое расстояние 2.5 радиуса Солнца), построенные в Солнечной обсерватории Вилкокса для каррингтоновских оборотов 2161 (2015 г.), 2177 (2016 г.), 2201 (2018 г.) и 2218 (2019 г.). Из рис. 3 видно, что нейтральная линия магнитного поля на фазе спада активности (панели а) имеет достаточно сложную конфигурацию и на протяжении одного оборота может несколько раз пересекать плоскость экватора. Вблизи минимума активности (панели б) структура магнитного поля становится более упорядоченной. Эти характерные особенности могут служить объяснением того, что на фазе спада активности приэкваториальный слой при усреднении за год имеет значительно большую толщину, чем вблизи минимума активности.

5. ВЫВОДЫ

Глобальная структура сформировавшегося солнечного ветра в цикле солнечной активности меняется таким образом, что в минимуме имеется бимодальная структура с медленными и более плотными потоками на низких широтах и быстрыми и более разреженными потоками на высоких широтах, тогда как в максимуме активности на всех широтах преобладает медленный солнечный ветер [1, 9]. Из полученных выше результатов следует, что солнечный ветер в среднем отличается от сферически симметричного не только в минимуме, но и в максимуме солнечной активности. При этом более плотный приэкваториальный слой существует и вблизи максимума солнечной активности, причем его толщина оказывается больше, чем в минимуме. Вывод о существовании приэкваториального слоя с повышенной плотностью плазмы вблизи максимума и на фазе спада солнечной активности получен по результатам анализа данных наблюдений межпланетных мерцаний, проведенных на частоте 111 МГц. В связи с этим следует отметить преимущество метрового диапазона волн, который оказывается более чувствительным к областям солнечного ветра, примыкающим к орбите Земли,

чем более высокочастотный диапазон 327 МГц [4, 5], для которого модель сферически симметричной среды является достаточно хорошим приближением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *В. И. Власов, И. В. Чашей, В. И. Шишов, Т. Д. Шишова*, Геомагн. и аэрон. **19**, 401 (1979).
2. *С. К. Глубокова, С. А. Тольбашев, И. В. Чашей, В. И. Шишов*, Астрон. журн. **90**, 639 (2013).
3. *С. К. Глубокова, А. В. Глянецв, С. А. Тольбашев, 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. *S. J. Tappin*, Planetary and Space Science **34**, 93 (1986).
7. *В. И. Шишов, И. В. Чашей, В. В. Орешко, С. В. Логвиненко, С. А. Тюльбашев, И. А. Субаев, П. М. Свицкий, В. Б. Лапшин, Р. Д. Дагкесаманский*, Астрон. журн. **93**, 1045 (2016).
8. *I. V. Chashei, V. R. Lukmanov, S. A. Tyul'bashev, and M. Tokumaru*, Solar Phys. **296**, 63 (2021).
9. *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).