

СОЛНЕЧНЫЙ ВЕТЕР ОТ МАКСИМУМА ДО МИНИМУМА 24 ЦИКЛА В ДАННЫХ МОНИТОРИНГА МЕЖПЛАНЕТНЫХ МЕРЦАНИЙ

© 2022 г. И. В. Чашей¹*, С. А. Тюльбашев¹, И. А. Субаев¹

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

*E-mail: chashey@prao.ru

Поступила в редакцию 27.07.2021 г.

После доработки 28.09.2021 г.

Принята к публикации 28.09.2021 г.

Проведено сравнение данных годовичных серий мониторинга межпланетных мерцаний, выполненных в максимуме (2015 г.) и минимуме (2019 г.) солнечной активности. Наблюдения проводились на радиотелескопе БСА ФИАН на частоте 111 МГц. Показано, что усредненные по месячным интервалам зависимости уровня мерцаний от времени суток для летних месяцев в минимуме и максимуме оказываются примерно одинаковыми. Для зимних месяцев на фазе спада и в минимуме активности в уровне мерцаний наблюдается годовая периодичность, в максимуме активности периодичность отсутствует. Полученные результаты могут быть объяснены комбинацией циклической динамики глобальной структуры солнечного ветра и изменением в течение года расположения зондируемых в эксперименте областей солнечного ветра.

Ключевые слова: солнечный ветер, глобальная структура, межпланетные мерцания

DOI: 10.31857/S0004629922010030

1. ВВЕДЕНИЕ

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 мето-

дика обработки данных приведены в работах [3–7]. Было, в частности, показано, что в период аномально глубокого минимума активности в 2007–2009 гг. доминирующий вклад в мерцания на всех элонгациях вносит низкоширотная область солнечного ветра, связанная с гелиосферным токовым слоем. 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 [8]. Эволюция глобальной структуры солнечного ветра по наблюдениям межпланетных мерцаний индивидуальных источников на частоте 327 МГц для предыдущих циклов солнечной активности исследовалась в работах [9, 10]. Данные наблюдений мерцаний сильных источников на радиотелескопе БСА ФИАН в максимуме 24 цикла активности анализировались в работе [11], а результаты мониторинга для периода 2013–2014 гг. приведены в работах [12, 13]. В частности, было показано, что вблизи максимума 24 цикла глобальная структура распределения турбулентного солнечного ветра в среднем близка к сферически симметричной [11–13].

В работе [14] по данным 2015–2017 гг. анализировалась глобальная структура солнечного ветра на начальной стадии фазы спада 24 цикла солнечной активности. В настоящей работе, которая продолжает исследование работы [14], проводится сравнение данных о глобальной структуре солнечного ветра в максимуме (2015 г.) и минимуме (2019 г.) 24 цикла солнечной активности.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Мониторинг межпланетных мерцаний проводится на радиотелескопе БСА ФИАН. Круглосуточные наблюдения флуктуаций плотности потока проводятся на 6-канальном приемнике. Ширина канала 430 кГц, центральная частота наблюдений 111 МГц, частота съема информации 0.1 с. Два регистратора записывают 96 пространственных лучей БСА ФИАН, перекрывающих 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

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

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

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

Исследуемая область неба разбивается на квадратные площадки (пиксели) размером $3^\circ \times 3^\circ$ (3° по склонению и $12'$ 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 на-

ших измерениях от нескольких единиц до 10. Далее вычисляется величина

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

где нормировочный коэффициент

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

определяется в результате усреднения по всем площадкам за 24 ч. 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 [15], 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.

3. ДАННЫЕ МОНИТОРИНГА МЕЖПЛАНЕТНЫХ МЕРЦАНИЙ В МАКСИМУМЕ И МИНИМУМЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Ниже проводится сравнение данных мониторинга межпланетных мерцаний для максимума и минимума 24 цикла солнечной активности, для чего выбраны соответственно 2015 и 2019 г. На рис. 1 приведены усредненные по месячным интервалам двумерные карты распределения уровня межпланетных мерцаний для максимума (левая панель) и минимума (правая панель) активности. Сравнение среднемесячных карт показывает, что пространственные распределения уровня мерцаний для всех 12 мес оказываются качественно сходными. Данные карт на рис. 1 были усреднены по всем склонениям (вертикальная ось) и по часовым интервалам. Результаты приведены на рис. 2а и 2б. Это усреднение приводит к тому, что в отличие от месячных карт уровни параметра M

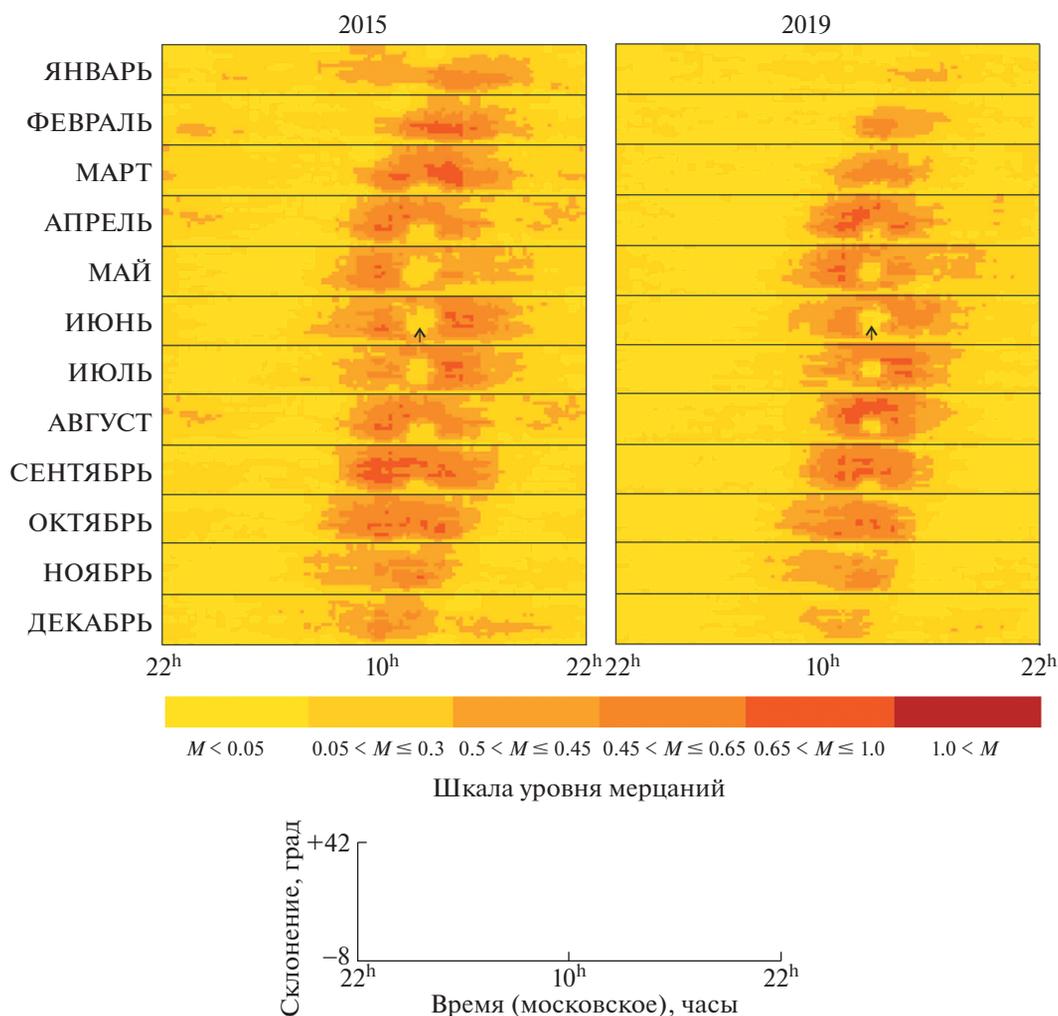


Рис. 1. Двумерные карты распределения уровня мерцаний, усредненные по месячным интервалам с января по декабрь (сверху вниз) в 2015 г. (левая панель) и в 2019 г. (правая панель). По оси абсцисс московское время с 22 ч предыдущего дня по 22 ч текущего дня московского времени, по оси ординат склонение от -8° до $+42^\circ$. Стрелкой обозначено положение Солнца. Оттенки цветов от светло-желтого до темно-красного соответствуют увеличению среднего по пикселям $3^\circ \times 3^\circ$ уровня мерцаний M от 0.1 до >1 . Цветовая шкала уровня мерцаний и масштабы среднемесячных карт по осям приведены в нижней части рисунка.

на рис. 2 не превышают единицы. Легко заметить, что временные зависимости на рис. 2а и 2б для всех месяцев оказываются подобными. Более того, временные профили с апреля по ноябрь практически идентичны. Кривые для декабря, января, февраля и марта хотя и имеют одинаковую структуру, но в минимуме активности расположены заметно ниже, чем в максимуме. Провал в центре рис. 2а, б, хорошо заметный на среднемесячных профилях с марта по сентябрь, соответствует положению Солнца и объясняется тем, что мерцания на элонгациях менее 20° переходят в режим насыщения, где уровень флуктуаций подавляется за счет влияния собственных угловых размеров источников. На рис. 1 область насыщенных мерцаний видна как светлое пятно вокруг направления на Солнце.

На рис. 3 приведены данные для уровня мерцаний, усредненные по месячным интервалам (левая ось ординат) за длительный период с мая 2014 г. по декабрь 2020 г., включающий фазы максимума, спада и минимума 24 цикла активности. Для сравнения на этом же рисунке приведены среднемесячные значения чисел Вольфа (правая ось ординат). Рисунок 3 показывает, что выраженная корреляция между вариациями уровня мерцаний и вариациями чисел Вольфа отсутствует. Вместе с тем средний уровень мерцаний на фазе спада и в минимуме активности, 2016–2019 гг., оказывается несколько ниже, чем в максимуме, 2014–2015 гг. Это уменьшение невелико, обусловлено понижением уровня мерцаний в зимние месяцы и в среднем составляет около 20%. Наиболее интересная особенность в данных рис. 3 состоит в

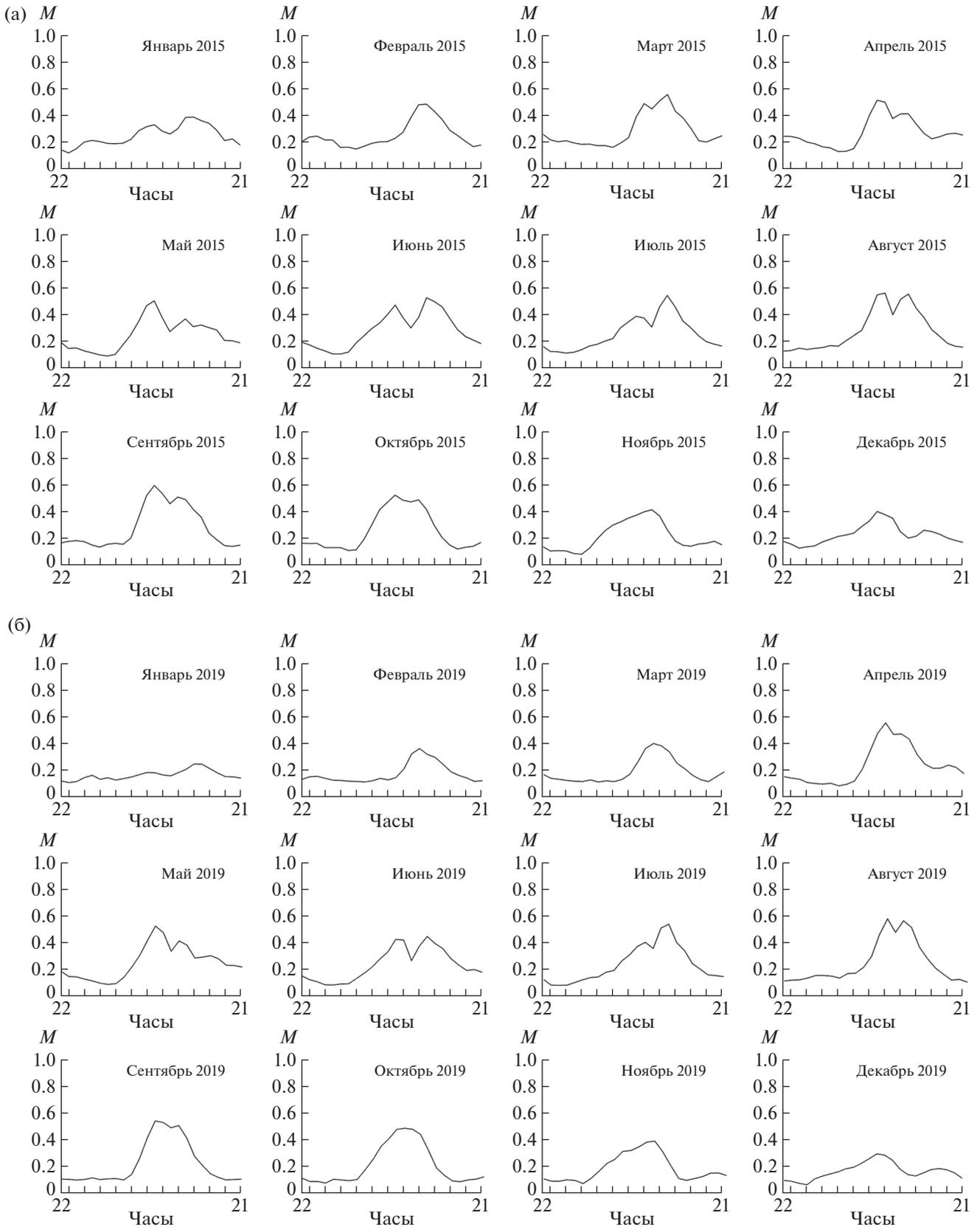


Рис. 2. (а) Уровень мерцаний, вычисленный усреднением по всем склонениям и часовым интервалам, по месяцам для 2015 г. По оси абсцисс московское время с -2 ч по 21 ч. (б) Уровень мерцаний, вычисленный усреднением по всем склонениям и часовым интервалам, по месяцам для 2019 г. По оси абсцисс московское время с -2 ч по 21 ч.

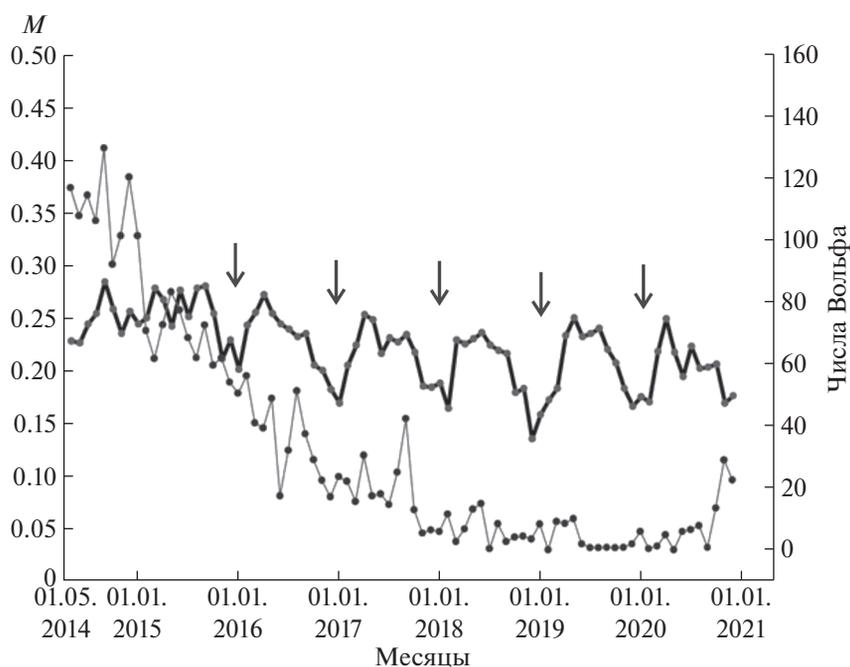


Рис. 3. Среднемесячные значения уровня мерцаний для периода с 01.05.2014 г. по 31.12.2020 г. (тонкая кривая, левая ось ординат); среднемесячные значения чисел Вольфа за тот же период (жирная кривая, правая ось ординат). Стрелками показаны положения минимумов годовой периодичности в индексах мерцаний, наблюдаемой в годы низкой солнечной активности.

том, что с 2016 по 2020 г., на фазе спада и в минимуме активности, в уровне наблюдается годичная периодичность, которая отсутствует в максимуме, 2014–2015 гг. На соответствующей временной зависимости четко видны максимумы, которые приходятся на летние месяцы, и минимумы в зимние месяцы. Самый низкий уровень мерцаний достигается 1 января, эти точки соответствуют усреднению за декабрь.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Качественные выводы предыдущего раздела могут быть интерпретированы следующим образом. Стабильное год от года временное распределение среднемесячного уровня мерцаний (рис. 2а, б) обусловлено геометрией эксперимента. Взаимное расположение полосы неба, содержащей зондирующие источники, и глобальной пространственной структуры солнечного ветра в силу изменения положения Солнца изменяется от месяца к месяцу, но мало меняется год от года. Это обстоятельство отмечалось в работе [14] для фазы спада солнечной активности. Приведенные выше данные позволяют обобщить такой вывод на весь солнечный цикл. При этом характерное для зимних месяцев понижение уровня мерцаний на фазе спада и в минимуме активности по сравнению с максимумом при качественном сохранении временной зависимости уровня мерцаний от

времени суток связано с тем, что в зимние месяцы Солнце находится за пределами зондирующей полосы неба, что видно на двумерных картах рис. 1. Отметим, что положение минимумов уровня мерцаний на рис. 3 точно совпадает с 1 января. Эти значения получены усреднением за декабрь, внутри которого находится зимнее солнцестояние. В максимуме солнечной активности солнечный ветер близок к сферически симметричному, и плазма в низкоширотных и высокоширотных областях на одинаковых расстояниях от Солнца имеет в среднем одинаковую концентрацию. В минимуме и на фазе спада активности связанные с гелиосферным токовым слоем низкоширотные области имеют повышенную концентрацию, а высокоширотные области более разрежены. В летние месяцы низкоширотные и высокоширотные области вносят примерно одинаковый вклад в мерцания. В зимние месяцы, когда Солнце и медленный низкоширотный солнечный ветер выходят из просвечиваемой зоны, наблюдаемые мерцания определяются более разреженной плазмой. Такая циклическая динамика солнечного ветра объясняет отсутствие годовой периодичности в максимуме активности и ее появлением на фазе спада и в минимуме активности. Следует отметить, что найденные временные распределения уровня мерцаний (рис. 2а,б) могут быть использованы для детектирования крупномасштабных возмущений дифференциальным

методом, поскольку возмущения будут более контрастно проявляться на фоне среднемесячных временных профилей. Отсутствие выраженной корреляции между среднемесячными значениями уровня межпланетных мерцаний и чисел Вольфа означает, что крупномасштабные возмущения типа выбросов корональной массы, которые преобладают в максимуме активности, и коротирующие области взаимодействия разноскоростных потоков, преобладающие в минимуме, вносят несущественный вклад в характеристики мерцаний при усреднении за времена порядка одного оборота Солнца.

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, Т. Д. Шишова*, *Геомагнетизм и аэрономия* **19**, 269 (1979).
3. *С. К. Глубокова, А. В. Глянецв, С. А. Тюльбашев, И. В. Чашей, В. И. Шишов*, *Геомагнетизм и аэрономия* **51**, 794 (2011).
4. *В. И. Шишов, С. А. Тюльбашев, И. А. Субаев, И. В. Чашей*, *Астрономический вестник* **42**, 341 (2008).
5. *V. I. Shishov, S. A. Tyul'bashev, I. V. Chashei, I. A. Subaev, and K. A. Lapaev*, *Solar Phys.* **265**, 277 (2010).
6. *I. V. Chashei, V. I. Shishov, S. A. Tyul'bashev, I. A. Subaev, and V. V. Oreshko*, *Solar Phys.* **285**, 142 (2013).
7. *И. В. Чашей, В. И. Шишов, С. А. Тюльбашев, А. В. Глянецв, И. А. Субаев*, *Космические исследования* **51**, 28 (2013).
8. *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).
9. *M. Tokumaru, M. Kojima, K. Fujiki*, *J. Geophys. Res.* **117**, 06108 (2012).
10. *P. K. Manoharan*, *Astrophys. J.* **751**, 128 (2012).
11. *С. К. Глубокова, А. В. Глянецв, С. А. Тюльбашев, И. В. Чашей, В. И. Шишов*, *Астрон. журн.* **92**, 38 (2015).
12. *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).
13. *И. В. Чашей, В. И. Шишов, С. А. Тюльбашев, И. А. Субаев*, *Космические исследования* **54**, 188 (2016).
14. *И. В. Чашей, С. А. Тюльбашев, И. А. Субаев, В. А. Извекова*, *Астрон. журн.* **96**, 172 (2019).
15. *S. J. Tappin*, *Planetary and Space Sci.* **34**, 93 (1986).