Секция А. Астрофизика и физика Солнца. БШФФ-2026. С. 99–101.

УДК 523.98
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-99
ORCID 0000-0002-8738-9375

О СВЯЗИ МЕЖПЛАНЕТНЫХ МЕРЦАНИЙ, ИЗМЕРЯЕМЫХ НА БОЛЬШОЙ СИНФАЗНОЙ АНТЕННЕ (БСА) ФИАН, С ПЛОТНОСТЬЮ СТРУКТУРЫ SHEATH КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ

В.Р. Лукманов, В.А. Слемзин, Д.Г. Родькин, И.В. Чашей, С.А. Тюльбашев

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия,
lukmanov@prao.ru

ON RELATIONSHIP BETWEEN THE INTERPLANETARY SCINTILLATIONS MEASURED AT THE BIG SCANNING ANTENNA (BSA) OF THE LEBEDEV PHYSICAL INSTITUTE (LPI) AND THE DENSITY OF THE SHEATH STRUCTURE OF CORONAL MASS EJECTIONS

V.R. Lukmanov, V.A. Slemzin, D.G. Rodkin, I.V. Chashei, S.A. Tyul'bashev

Lebedev Physical Institute RAS, Moscow, Russia, lebedev@prao.ru

Аннотация. При прогнозировании космической погоды необходима информация о распространении корональных выбросов массы (КВМ) в гелиосфере. В отсутствие прямых измерений такую информацию можно получить из наблюдений наземными радиотелескопами космических радиоисточников, мерцания которых вызваны флуктуациями плотности плазмы в межпланетном пространстве. В значительной степени геоэффективность гало КВМ, распространяющихся в сторону Земли, определяется наиболее плотной и турбулентной частью его структуры — областью уплотнения плазмы между головной ударной волной и передней кромкой КВМ (Sheath). На примере межпланетных КВМ двух типов (эжекта и магнитное облако) рассматривается возможная связь мерцаний, измеряемых на Большой синфазной антенне (БСА) ФИАН, со средней концентрацией электронов в области уплотнения в периоды наблюдений, моделируемой на основе данных коронографа LASCO C3 и измерений параметров плазмы в лагранжевой точке L1, приведенных в базе данных OMNI.

Ключевые слова: солнечный ветер, корональные выбросы массы, межпланетные мерцания.

Abstract. Space weather forecasting requires information on propagation of coronal mass ejections (CMEs) in the heliosphere. In the absence of direct measurements, such information can be obtained from observations by ground-based radio telescopes of space radio sources, scintillation of which is caused by fluctuations in plasma density in the interplanetary space. The geoeffectiveness of a CME halo propagating toward the Earth is largely determined by the densest and most turbulent part of its structure — the plasma compaction region between the bow shock and the CME leading edge (Sheath). Using two types of interplanetary CMEs (ejecta and magnetic cloud) as an example, we examine the possible relationship between scintillations measured with the Lebedev Physical Institute's Big Scanning Antenna (BSA) and the average density of the compaction region during observation periods, modeled using LASCO C3 coronagraph data and plasma parameter measurements at the Lagrange L1 point in the OMNI database.

Keywords: solar wind, coronal mass ejections (CMEs), interplanetary scintillation.

ВВЕДЕНИЕ

Точность прогноза времени прихода корональных выбросов массы (КВМ) к Земле в настоящее время ограничена: среднеквадратичная ошибка составляет 10–15 ч по времени и ~50 км/с по скорости. Это связано с недостатком данных о структуре солнечного ветра в гелиосфере.

Один из перспективных методов улучшения прогноза — наблюдения межпланетных мерцаний (IPS) компактных радиоисточников. Мерцания возникают из-за дифракции радиоволн на неоднородностях плотности солнечного ветра и позволяют обнаруживать крупномасштабные возмущения, включая КВМ, до их подлеа к Земле [Chashei I.V. et al, 2023; Yu H.S. et al., 2015; Tokumaru M. et al., 2000].

Особый интерес представляет область сжатия (Sheath) КВМ — слой между ударной волной и передней кромкой выброса. Это самая плотная, горячая и турбулентная часть структуры, которая во многом определяет геоэффективность КВМ [Ермолаев Ю.И. и др., 2009; Kilpua E. et al., 2017; Luhmann J.G. et al., 2020; Yermolaev Y.I. et al., 2012].

Цель работы — разработка модели распространения гало-КВМ в гелиосфере, ее согласование с измерениями мерцаний на Большой синфазной антенне (БСА) ФИАН и сопоставление уровня мерцаний с модельной концентрацией электронов в области Sheath.

ДАННЫЕ И ОТБОР СОБЫТИЙ

Для анализа выбраны два одиночных гало-КВМ (табл. 1) из базы CDAW LASCO за период роста солнечной активности (весна—лето 2023 г.). Критерии отбора:

— источники в пределах 30° от центра Солнца;

— нахождение КВМ в поле зрения БСА на расстояниях 0.4–0.8 а.е.;

— отсутствие наложения других выбросов;

— заметный сигнал мерцаний выше фона.

Также использованы параметры плазмы в точке L1 (база OMNI) и каталоги межпланетных КВМ Ричардсона и Кейн, а также ИКИ РАН.

Таблица 1. Параметры событий (по данным LASCO C3).

Параметр	КВМ 1	КВМ 2
Дата и время в C3	08.05.2023 02:18	21.04.2023 20:42
Скорость (LASCO C3), км/с	1075	1284

Скорость в гелиосфере, км/с	1374	1567
Координаты источника	N16 W06	S22 W11

НАБЛЮДЕНИЯ МЕРЦАНИЙ НА БСА

БСА работает на частоте 111 МГц, имеет 96 лучей диаграммы направленности. Наблюдения ведутся в сканирующем режиме за счет вращения Земли. Строятся динамические карты индексов мерцаний $m = \sqrt{\langle \delta I^2 \rangle}/\langle I \rangle m = \sqrt{\langle \delta I^2 \rangle}/\langle I \rangle$, где $\langle I \rangle \langle I \rangle$ — средняя по времени плотность потока излучения радиоисточника, $\sqrt{\langle \delta I^2 \rangle}\sqrt{\langle \delta I^2 \rangle}$ — среднеквадратичное отклонение.

Для обоих событий зарегистрировано устойчивое усиление мерцаний в интервалах:

— КВМ1: 09.05.2023, ~6 ч;

— КВМ2: 22.04.2023, ~5.5 ч.

Гелиоцентрические расстояния составляют 0.4–0.8 а.е., что указывает на прохождение области Sheath через луч зрения радиотелескопа [Лукманов В.Р. и др., 2023а; Лукманов В.Р. и др., 2023б].

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КВМ

Геометрия: КВМ моделируется прямым круговым конусом с плоским основанием. Ось конуса наклонена к линии Солнце—Земля на угол α, определяемый по координатам источника (17° и 25° соответственно). Полуугол раствора конуса принят равным 66° на основе рекомендаций для быстрых КВМ (>900 км/с) [Gopalswamy N., 2010].

Кинематика: Использована drag-based model (DBM) [Cargill P.J., 2004; Vrsnak B., 2013], учитывающая торможение выброса в солнечном ветре. Параметр торможения γ подбирался так, чтобы минимизировать разницу между модельным и измеренным временами прихода КВМ в точку L1 (табл. 2).

Таблица 2. Параметры расчета по DBM-модели для МКВМ 1 и 2.

Параметр	КВМ1	КВМ2
Скорость по линии С–З, км/с	1346	1496
Скорость фонового ветра, км/с	400	350
$\gamma_{оптим}$, км$^{-1}$	$4.3 \cdot 10^{-8}$	$3.2 \cdot 10^{-8}$
T(L1) модель	10.05 09:55	24.04 01:48
T(L1) каталог	10.05 12:00	24.04 01:00

Расчеты проводились для каждого момента наблюдений с шагом 1.2 мин, затем усреднялись по 12-минутным интервалам (соответствует 3° по небу). Строились модельные карты концентрации, которые накладывались на карты мерцаний в области пересечения конуса с полем зрения БСА.

РЕЗУЛЬТАТЫ СОПОСТАВЛЕНИЯ

В табл. 3 приведены ключевые количественные результаты.

Таблица 3. Результаты модельного расчета электронной концентрации в Sheath и их сопоставление с измерениями межпланетных мерцаний на БСА.

Параметр	МКВМ1	МКВМ2
Временной интервал наблюдений БСА (гелиоцентрические расстояния 0.4-0.8 а.е.) с учетом перекрытия с моделью)	09.05.2023 05:51-12:46	22.04.2023 07:24-12:49
Расстояние МКВМ от Солнца при наблюдениях БСА, L_s/L1 (модель)	0.64 – 0.73	0.39 – 0.49
Средняя концентрация протонов в Sheath в точке L1 (OMNI), см$^{-3}$	28.2±13.4	18.3±4.6
Средняя концентрация электронов в Sheath при наблюдениях БСА, (модель), см$^{-3}$	60	83
Интеграл средней концентрации электронов в Sheath по области пересечения модели с наблюдениями на БСА, Σ $\langle N_e \rangle_{Sheath}$	$(3.2 \pm 0.6) \cdot 10^{23}$	$(10.0 \pm 2) \cdot 10^{23}$
Интеграл индекса мерцаний по области пересечения модели с наблюдениями на БСА, Σ m	6.0±2	5.6±1.7
Интеграл индекса фона по области наблюдений БСА, Σ m_f	3.1±0.9	3.1±0.9
Интеграл индекса мерцаний с вычетом фона Σ ($m - m_f$)	2.9±2.2	2.5±1.9

Ключевое наблюдение:

Модельная интегральная концентрация у КВМ1 примерно в три раза меньше, чем у КВМ2. Однако интегральные мерцания (с вычетом фона) для обоих событий совпадают в пределах ошибок (~30 %).

ОБСУЖДЕНИЕ

Авторы предлагают несколько возможных объяснений этого расхождения.

1. Пространственная неоднородность КВМ2 (магнитный жгут). Наиболее плотные фрагменты могли не попасть в ограниченную область наблюдений БСА, тогда как модель дает среднюю по всему конусу концентрацию.

2. Разная турбулентность плазмы. По данным OMNI в точке L1, дисперсия параметров в области Sheath у КВМ1 примерно в три раза выше, чем у КВМ2. Поскольку индекс мерцаний пропорционален уровню флуктуаций плотности ($m \sim \sqrt{\langle \delta n_e^2 \rangle} m \sim \sqrt{\langle \delta n_e^2 \rangle}$), более сильная турбулентность может компенсировать меньшую среднюю плотность [Лукманов В.Р. и др., 2022].

3. Неидеальный учет фона. Фон определялся по спокойному интервалу 1–2 мая 2023 г. и принимался одинаковым для обоих событий, однако возможны наложения от других КВМ.

Важный положительный результат состоит в том, что в обоих случаях при попадании области Sheath в поле зрения БСА наблюдается четкое усиление мерцаний выше фона. Это подтверждает, что метод чувствителен именно к плотной и турбулентной структуре КВМ, а не к другим возмущениям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совместное использование измерений межпланетных мерцаний, моделирования DBM и плазменных данных в точке L1 позволяет не только детектировать приближение КВМ к Земле, но и получать информацию о структуре его области сжатия (Sheath).

Прямой пропорциональности между средней концентрацией электронов и индексом мерцаний может не наблюдаться из-за различий в турбулентности и неоднородности, однако высокая корреляция в целом подтверждает связь.

Метод перспективен для среднесрочного прогнозирования геоэффективности КВМ ещё до их подлёта к Земле.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю. Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2000 гг. // Космические исследования. 2009. Т. 47, № 2. С. 99–113.

Лукманов В.Р., Чашей И.В., Тюльбашев С.А. О корреляции уровня межпланетных мерцаний и скорости солнечного ветра // Астрономический журнал. 2022. Т. 99, № 12. С. 1280–1283.

Лукманов В.Р., Чашей И.В., Тюльбашев С.А., Субаев И.А. Анализ возможностей краткосрочного прогноза геомагнитных возмущений по наблюдениям корональных выбросов массы на радиотелескопе БСА ФИАН // Астрономический журнал. 2023а. Т. 100, № 6. С. 535–545.

Лукманов В.Р., Чашей И.В., Тюльбашев С.А., Субаев И.А. Коротирующие возмущения солнечного ветра в данных мониторинга межпланетных мерцаний: моделирование и наблюдения // Астрономический журнал. 2023б. Т. 100, № 6. С. 546–556.

Cargill P.J. On the Aerodynamic Drag Force Acting on Interplanetary Coronal Mass Ejections // Solar Phys. 2004. V. 221. N 1. P. 135–149.

Chashei I.V., Tyul'bashev S.A., Lukmanov V.R., Subaev I.A. ICMEs and CIRs monitored in IPS data at a frequency of 111 MHz // Adv. in Space Res. 2023. V. 72, N 12, P. 5371–5375.

Gopalswamy N., Yashiro S., Michalek G. et al. A Catalog of Halo Coronal Mass Ejections from SOHO // Sun & Geosph. 2010. V. 5. N 1. P. 7–16.

Kilpua E., Hannu E.J. Koskinen, Tuija I. Pulkkinen. Coronal mass ejections and their sheath regions in interplanetary space // Liv. Rev. Solar Phys. 2017. V. 14. Article N 5.

Luhmann J.G., Gopalswamy N., Jian L. K., Lugaz N. ICME Evolution in the Inner Heliosphere // Solar Phys. 2020. V. 295. N 4. Article N 61.

Tokumaru M., Kojima M., Fujiki K., Yokobe A. Three-dimensional propagation of interplanetary disturbances detected with radio scintillation measurements at 327 MHz // J. Geophys. Res. 2000. V. 105, A5, P. 10435–10454.

Yermolaev Y.I., Nikolaeva N.S., Lodkina I.G., Yermolaev M.Y. Geoeffectiveness and efficiency of CIR, sheath, and ICME in generation of magnetic storms // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. A00L07.

Yu H.S., Jackson B.V., Hick P.P. et al. 3D Reconstruction of interplanetary scintillation (IPS) remote-sensing data: global solar wind boundaries for driving 3D-MHD models // Solar Phys. 2015, V. 290, N 9, P. 2519–2538.

Vrsnak B., Zic T., Vrbanec D., et al. Propagation of interplanetary coronal mass ejections: the drag-based model // Solar Phys. 2013. V. 295. P. 295–315.