

АНАЛИЗ ПРИЧИН МАГНИТНОЙ БУРИ 1–2 ДЕКАБРЯ 2023 ГОДА ПО НАБЛЮДЕНИЯМ МЕЖПЛАНЕТНЫХ МЕРЦАНИЙ НА РАДИОТЕЛЕСКОПЕ БСА ФИАН

© 2024 г. В. Р. Лукманов, И. В. Чашей, С. А. Тюльбашев, И. А. Субаев

*Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Астрокосмический центр,
Пушчинская радиоастрономическая обсерватория, Пушкино, Россия*

Поступила в редакцию 19.02.2024 г.

После доработки 16.05.2024 г.

Принята в печать 04.06.2024 г.

Приведены результаты анализа данных наблюдений межпланетных мерцаний, полученных на радиотелескопе Большая синфазная антенна Физического института им. П. Н. Лебедева (БСА ФИАН) перед началом, в период и после магнитной бури, произошедшей 1–2 декабря 2023 г. Проведено сравнение данных наблюдений с модельными расчетами для коротирующих и распространяющихся крупномасштабных возмущений. Результаты наблюдений мерцаний радиоисточников свидетельствуют о том, что имевшая место магнитная буря была вызвана наложением двух видов крупномасштабных возмущений солнечного ветра. В день перед началом магнитной бури наблюдались признаки взаимодействия магнитосферы Земли с коротирующей областью разноскоростных потоков солнечного ветра, тогда как позже наблюдались признаки возмущения магнитосферы выбросом корональной массы, распространяющимся после вспышки M9.8 28 ноября 2023 г.

Ключевые слова: солнечный ветер, корональные выбросы масс (КВМ), коротирующие области взаимодействия (КОВ), межпланетные мерцания

DOI: 10.31857/S0004629924070037 EDN: IUWPVQ

1. ВВЕДЕНИЕ

Распространяющиеся в межпланетном пространстве крупномасштабные возмущения солнечного ветра в случае их прихода на Землю могут приводить к магнитным бурям, полярным сияниям, другим проявлениям космической погоды. Известны два основных типа таких возмущений: корональные выбросы масс (КВМ) и коротирующие области взаимодействия (КОВ). Первые — это высокоскоростные выбросы плазмы с магнитным полем из солнечной короны в межпланетное пространство. Вторые образуются при взаимодействии разноскоростных потоков солнечного ветра, в результате чего возникает область сжатой плазмы с сильным магнитным полем, которая вращается вместе с Солнцем. Долгоживущие коротирующие области регистрируются на Земле с интервалом около 27 суток, соответствующим синодическому периоду обращения Солнца вокруг оси.

Геомагнитные возмущения в максимуме солнечной активности связаны преимущественно с КВМ, а в минимуме с долгоживущими КОВ [1]. Указанные возмущения могут быть обнаружены до их прихода к Земле по усилениям межпланетных мерцаний компактных радиоисточников [2–6], что обосновывает

возможность использования мерцаний для краткосрочного (обычно 1–3 дня) прогноза космической погоды.

Метод межпланетных мерцаний широко используется для исследования нестационарной крупномасштабной структуры солнечного ветра [7–9], такого рода работы начались сразу после открытия мерцаний в 1964 г. [10]. На частотах ~ 100 МГц, КВМ начинают обнаруживаться по усилениям мерцаний на расстояниях более 0.4 а. е. от Солнца [11]. Под расстоянием от Солнца здесь и далее подразумевается расстояние от центра Солнца до прицельной точки (ближайшая к Солнцу точка на луче зрения к наблюдаемому мерцающему радиоисточнику), так как в окрестности данной точки сосредоточен слой, дающий основной вклад в модуляцию потока энергии источника. В работе [12] обоснована возможность оценки времени прихода КВМ к Земле за 15–20 часов на примере 11 событий с магнитными бурями в 2021–2022 гг. Там же показано, что средняя погрешность предсказания времени начала магнитной бури составляет 3.6 ч. КОВ в данных межпланетных мерцаний могут быть обнаружены по ослаблению ночных мерцаний за 2–3 суток до прихода возмущения к Земле [11]. В работе [13] разработана модель ведущей части с повы-

шенной концентрацией плазмы распространяющихся КОВ в виде спиральной струи с прямоугольным сечением, определены качественно признаки, по которым могут быть обнаружены КОВ в данных межпланетных мерцаний до их прихода к Земле: усиление мерцаний в дневной и вечерней области, в утренней области при этом усиление отсутствует до прихода КОВ к Земле. Однако, приход возмущений к Земле не всегда вызывает магнитную бурю. Для более точного прогноза магнитных бурь нужны данные о компоненте межпланетного магнитного поля B_z [14]. В настоящей работе рассмотрены проявления в данных мониторинга межпланетных мерцаний крупномасштабных возмущений, приведших к длительной магнитной буре в начале декабря 2023 г.

2. НАБЛЮДЕНИЯ, ПЕРВИЧНАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ

Наблюдения межпланетных мерцаний в Пушинской Радиоастрономической Обсерватории проводятся на модернизированном радиотелескопе БСА ФИАН (Большая Синфазная Антенна Физического института Академии наук) в круглосуточном режиме с 2014 г. Центральная частота наблюдений на данном радиотелескопе 111 МГц, полоса частот 2.5 МГц, частота съема данных составляет 10 отсчетов в секунду. Диаграмма направленности БСА ФИАН имеет 96 лучей, в интервале склонений от -8° до $+42^\circ$. БСА ФИАН является радиотелескопом меридианного типа (все наблюдения проводятся в плоскости меридиана места, т. е. вблизи верхней кульминации исследуемого объекта). В течение суток наблюдаются около 5000 мерцающих компактных радиоисточников, угловые размеры которых неизвестны, поэтому используются специальные методы обработки данных в предположении однородности статистического ансамбля радиоисточников (подробнее об этом в работе [15]).

И коротящие области взаимодействия, и корональные выбросы массы сопровождаются возрастанием интенсивности межпланетных мерцаний радиоисточников, которая характеризуется индексом мерцаний m :

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

Здесь $I(t)$ — быстро меняющаяся в процессе мерцаний измеряемая плотность потока мерцающего радиоисточника, а $\langle I(t) \rangle$ — ее усредненное значение.

КОВ моделируется как область повышенной (утроенной) концентрации плазмы в виде спиральной струи с прямоугольным сечением, центральная ось которой представляет собой архимедову спираль и лежит в плоскости солнечного экватора. Сама структура вращается вместе с Солнцем в направлении обращения Земли и потому подходит к Земле каждые 27 суток, пока существует данная КОВ. Более детально модель описана в работе [13].

КВМ моделируется как движущаяся радиально от Солнца область, имеющая повышенную концентрацию плазмы. Границы области определяются радиус-векторами, идущими от центра Солнца и сферической поверхностью переднего фронта выброса. Толщина области с повышенной концентрацией плазмы обычно принимается равной 0.1 а. е. (а. е. — астрономическая единица). Для компактных источников, лежащих на луче зрения, который пересекает эту область, будут наблюдаться возрастания индекса мерцаний. Обе модели, как модель КОВ [13], так и модель КВМ [12], являются упрощенными и имеют минимум свободных параметров. Они не позволяют работать с небольшими деталями, видимыми на картах, но, как показало моделирование, надежно отслеживают крупные структуры.

В данной работе сравнивались динамические карты индексов мерцаний, на которых приводится отношение индекса мерцаний за рассматриваемый день к соответствующему значению за предыдущий день. На рис. 1–4 красный и оттенки красного цвета означают усиление мерцаний, оранжевый — уровень мерцаний остался примерно на том же уровне, желтый — ослабление мерцаний. Наблюдательные карты строятся по наблюдениям компактных радиоисточников в течение суток, для этого вся наблюдаемая область неба разбивается на пиксели размером $3^\circ \times 3^\circ$, в каждом из которых индекс мерцаний усредняется по всем источникам в этой области. В каждой такой области до 10 компактных мерцающих радиоисточников. По оси абсцисс на картах откладывается всемирное время UT (Московское = UT + 3h), по оси ординат — склонение. Помимо этого, на рис. 1–4 нанесены дуги, соответствующие различным прицельным расстояниям от центра Солнца: зеленая дуга — 0.4 а. е., синяя — 0.6 а. е.; бордовая — 0.8 а. е.; черная — 1 а. е. Зеленая дуга является границей зоны сильных и слабых мерцаний (на меньших расстояниях мерцания переходят в режим насыщения и подавляются эффектами, связанными с угловым размером радиоисточника). В рамках данной работы рассматривается только зона слабых мерцаний, то есть на прицельных расстояниях более 0.4 а. е.

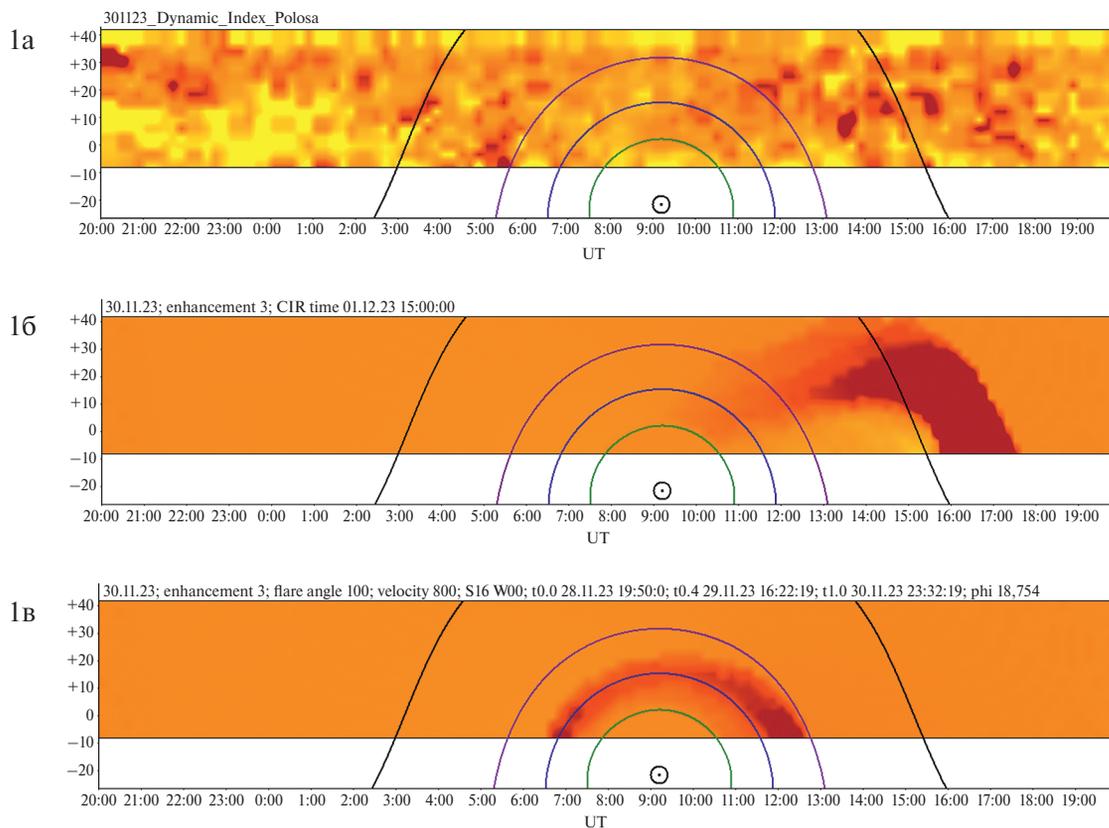


Рис. 1. Двумерные карты за 30 ноября: а) результаты наблюдений мерцаний (экспериментальные данные); б) модельная карта для КОВ, центральная ось которой проходит через проекцию Земли на плоскость солнечного экватора 1 декабря 2023 г. в 15:00 UT; в) модельная карта для КВМ после вспышки M9.8, время максимума вспышки 28.11.2023 19:50 UT, координаты места вспышки S16 W00, скорость распространения КВМ 800 км/с, оценочное время прихода КВМ в зону слабых мерцаний (от 0.4 а. е. и более) 29.11.2023 16:22 UT, оценочное время прихода КВМ к Земле 30.11.2023 23:32 UT, угол между центральной осью КВМ и линией «Земля-Солнце» $\varphi=18.754^\circ$.

3. МАГНИТНАЯ БУРЯ 1–2 ДЕКАБРЯ 2023 г.

Согласно информации по Kp-индексу возмущенности магнитного поля Земли¹ в период с 1 декабря 2023 г. 0:00 UT до 2 декабря 6:00 UT магнитосфера Земли была возбужденной, магнитная буря происходила в периоды 1 декабря с 9:00 UT до 15:00 UT и с 18:00 UT 1 декабря до 3:00 UT 2 декабря. Данное событие произошло после мощной и длительной солнечной вспышки M9.8 28 ноября, пик которой пришелся на 19:50 UT. Активная область была расположена вблизи центрального меридиана Солнца. Магнитная буря могла быть вызвана КВМ после указанной вспышки. Однако, данные межпланетных мерцаний по наблюдениям на БСА ФИАН указывают на то, что указанное событие, по-видимому, было вызвано КОВ. Как отмечалось выше, долгоживущие структуры типа

КОВ регистрируются на Земле с периодом примерно 27 суток. Магнитная буря также была 5–6 ноября и могла быть вызвана тем же КОВ, что и рассматриваемое в настоящей статье событие. На рис. 1 приведены динамические карты индексов мерцаний за 30 ноября (день накануне начала магнитной бури): рис. 1а — карта по данным наблюдений, 1б — модельная карта для КОВ, при этом момент прохождения центральной оси через проекцию Земли на плоскость солнечного экватора (при моделировании учитывается наклон земной эллиптики по отношению к солнечному экватору) соответствует ожидаемому периоду возмущения, поскольку приходится на 1 декабря 15:00 UT.

Кроме того, на рис. 1в для сравнения приведена модельная карта для коронального выброса массы (КВМ) после вспышки M9.8 28 ноября, который при скорости распространения около 800 км/с должен был прийти на Землю в момент начала возмущения

¹https://kp.gfz-potsdam.de/app/files/Kp_ap_since_1932.txt

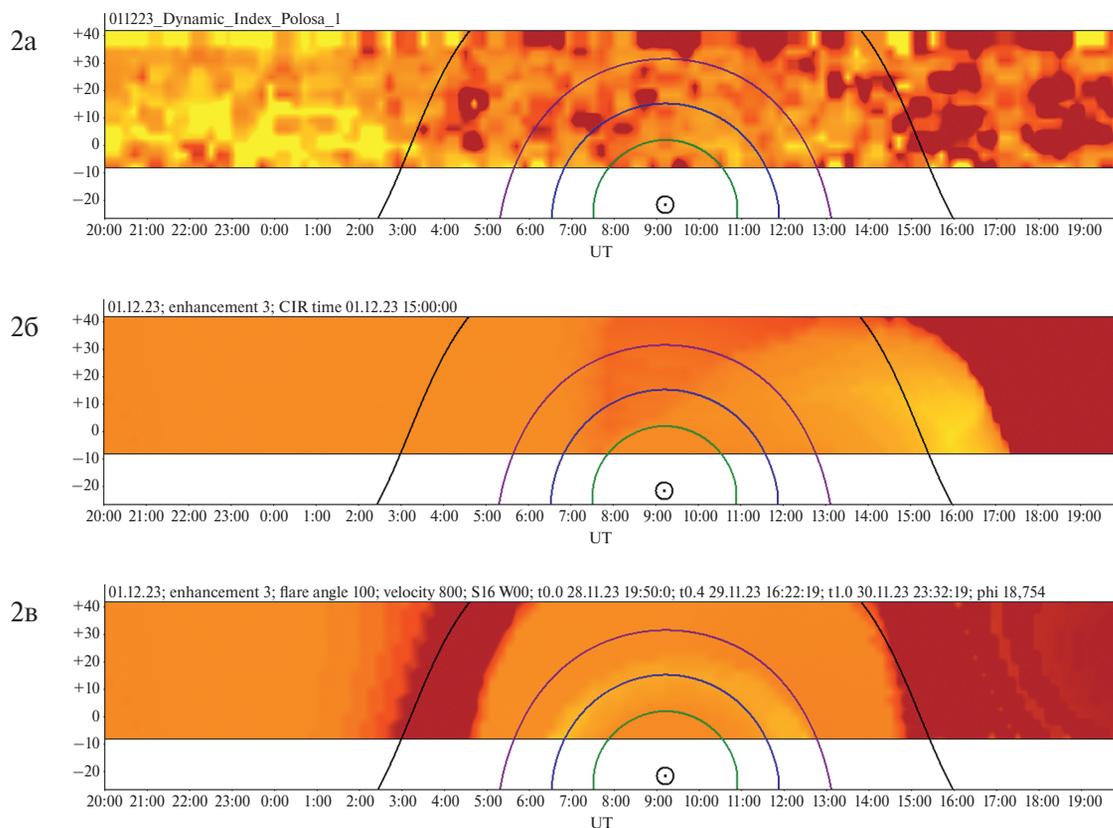


Рис. 2. Двумерные карты за 1 декабря. Аналогично рис. 1.

магнитосферы 1 декабря в 0:00 UT. Подробнее использовавшаяся модель КВМ описана в работе [12].

На рис. 1 видно, что модельная карта для КОВ (рис. 1б) намного лучше соответствует экспериментальным данным, чем модельная карта для КВМ (рис. 1в). На наблюдательной карте имеются признаки распространения КОВ до их прихода к Земле: усиление мерцаний в дневной и вечерней области, в утренней области усиление отсутствует (за исключением пятнистости локальных областей вследствие нестационарности структуры солнечного ветра). В случае центрального распространения КВМ усиление мерцаний сначала наблюдается в утренней области, затем в тот же день в вечерней области, как это видно на рис. 1в в случае вспышки M9.8. На рис. 2 показаны аналогичные карты за 1 декабря.

Как видно, на модельной карте для КОВ за 1 декабря значительного усиления мерцаний в утренней области все еще не наблюдается, в то время как на карте по данным наблюдений это усиление в утренней области имеется. И в то же время усиление в утренней области наблюдается на модельной карте для КВМ примерно в те же часы, что и на карте по данным наблюдений. Также усиление ве-

черных мерцаний на карте для КВМ начинается примерно в то же время, что и на наблюдательной карте. По-видимому, выброс после вспышки M9.8 также повлиял на возмущение магнитосферы, хоть он и не наблюдался в данных за 30 ноября. На рис. 3 показаны карты за 2 декабря.

В данных за 2 декабря наблюдается усиление ночных мерцаний, а в дневной и в вечерней области мерцания вернулись в нормальный режим после ухода возмущений. Модельная карта для КВМ лучше соотносится с наблюдательной картой, чем модельная для КОВ. Аналогичный результат наблюдается и при сравнении карт за 3 декабря, когда мерцания полностью вернулись в нормальный режим, но на модельной карте для КОВ все еще видно усиление ночных мерцаний (рис. 4).

Таким образом, на картах видны признаки распространения двух видов возмущений. За сутки до начала магнитной бури в данных мерцаний проявилось исключительно КОВ, а после начала бури — КВМ. Распространение КВМ после вспышки M9.8 подтверждается данными из каталога Cactus². Оче-

² https://www.sidc.be/cactus/catalog/LASCO/2_5_0/qkl/2023/11/latestCMEs.html

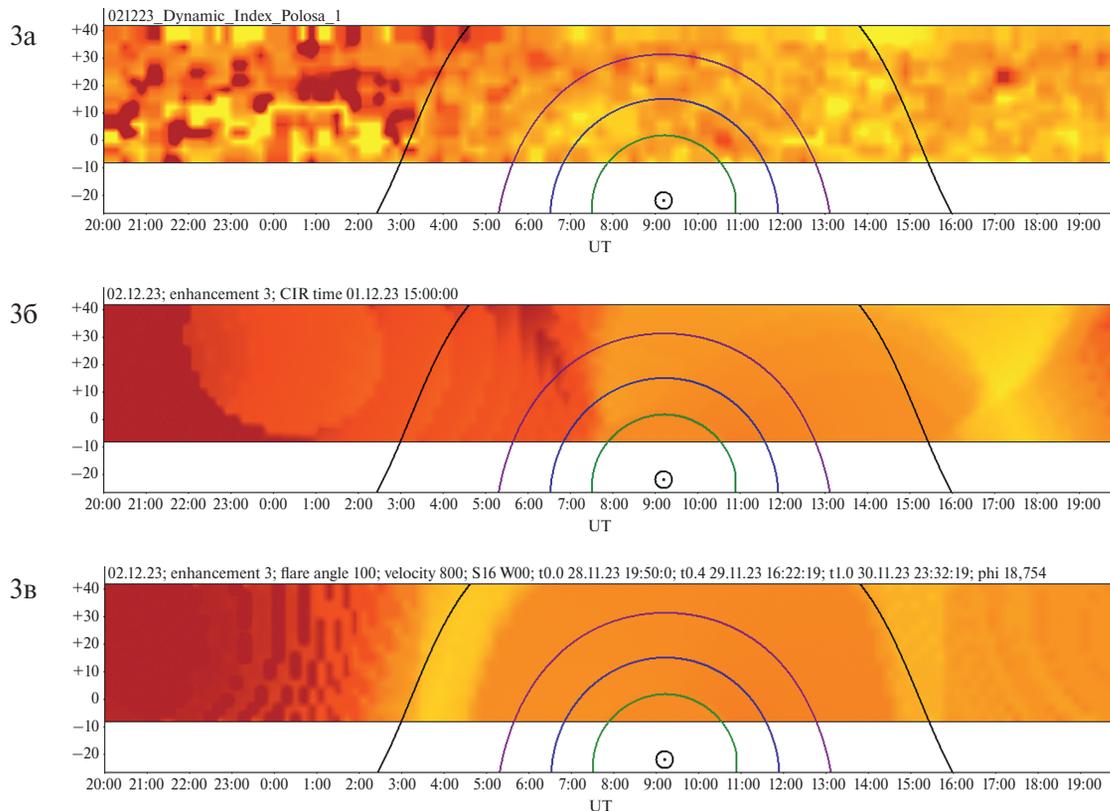


Рис. 3. Двумерные карты за 2 декабря. Аналогично рис. 1–2.

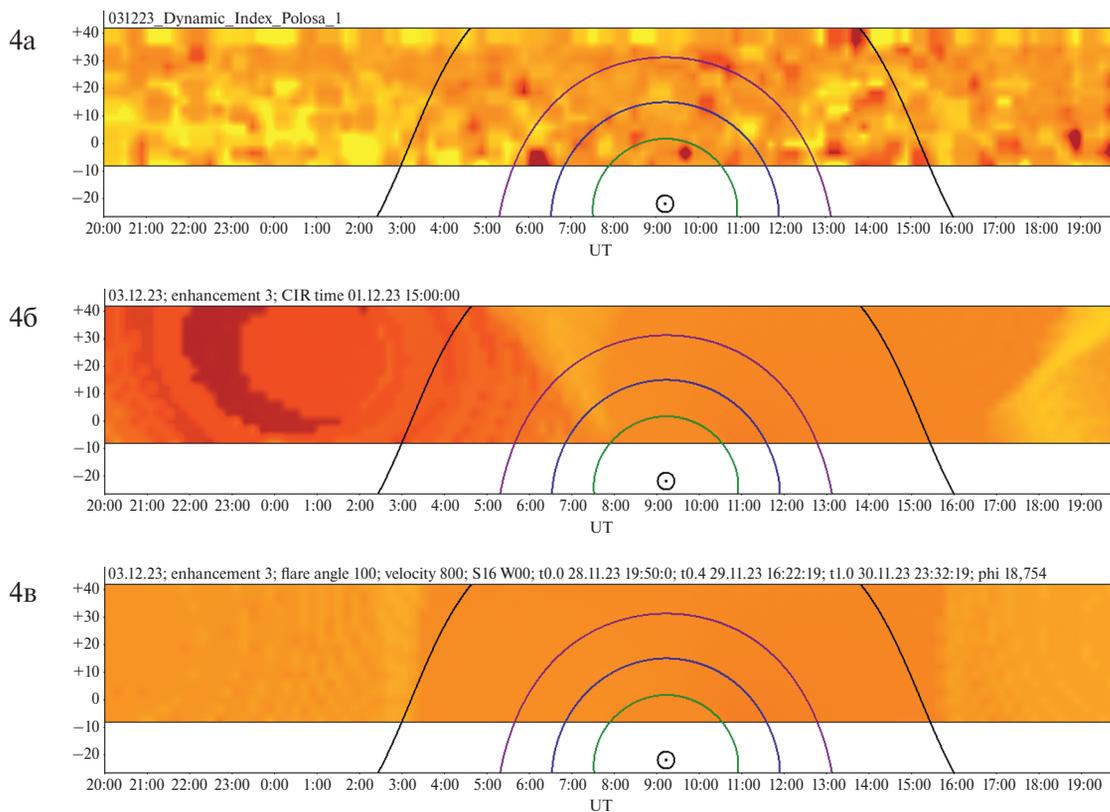


Рис. 4. Двумерные карты за 3 декабря. Аналогично рис. 1–3.

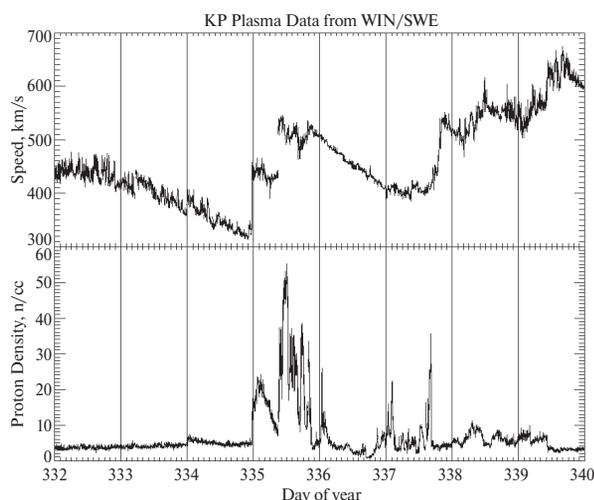


Рис. 5. Временные зависимости скорости солнечного ветра и концентрации протонов межпланетной плазмы по данным спутника WIND на интервале с 28 ноября по 5 декабря 2023 г., содержащем рассматриваемое событие 1–2 декабря 2023 г.

видно, имело место наложение возмущений. Разработанные модели для КОВ и КВМ рассматривают распространение одиночных возмущений в сферически-симметричной межпланетной среде. В случае распространения одиночных возмущений чаще всего возможно их заблаговременное обнаружение до прихода к Земле в данных мерцаний путем сравнения наблюдательных и модельных карт.

На рис. 5 показаны графики скорости солнечного ветра и концентрации протонов межпланетной плазмы по данным спутника WIND³ на интервале с 28 ноября по 5 декабря 2023 г., содержащем рассматриваемое событие 1–2 декабря 2023 г.

Рис. 5 показывает, что взаимодействие КВМ и КОВ привело к формированию у орбиты Земли протяженного двойного возмущения ударными волнами на фронтах. Концентрация плазмы на фронтах меняется примерно в 4 раза, то есть ударные волны являются сильными: в соответствии с известными соотношениями Рэнкина-Гюгонио максимальная величина скачка уплотнения при показателе адиабаты $5/3$ не превосходит 4.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере магнитной бури 1–2 декабря 2023 г. продемонстрирована возможность прогноза прихода возмущений типа КОВ к Земле. 30 ноября в данных межпланетных мерцаний наблюдались признаки приближения к Земле коротящейся

области взаимодействия. Однако, после начала магнитной бури наблюдались и признаки распространения коронального выброса массы после вспышки M9.8. Очевидно, что данная магнитная буря явилась следствием комбинации возмущений магнитосферы Земли, вызванных и тем, и другим. Поскольку в зоне, где наблюдались усиления мерцаний, эти возмущения были разнесены во времени, их комбинация у орбиты Земли сказалась в основном на продолжительности магнитной бури. В более сложных случаях, когда оба типа возмущений в зоне повышенных мерцаний накладываются друг на друга, требуется соответствующая модификация модели. Используемый нами метод мерцаний не позволяет фиксировать резкие границы типа фронтов (рис. 5), но реагирует на повышенный уровень турбулентности за фронтами. Проведенный выше анализ показывает, что в рассматриваемом сложном случае внутри орбиты Земли сначала регистрировалось возмущение типа КОВ, а двойная структура формируется на подходе к 1 а. е. от центра Солнца. Можно утверждать, что даже в случае комбинированных возмущений КОВ/КВМ мониторинг межпланетных мерцаний позволяет детектировать крупномасштабные возмущения до их прихода к Земле.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Дагкесаманскому Рустаму Давудовичу за полезные ценные замечания к статье, технической группе БСА ФИАН за обеспечение наблюдений в режиме мониторинга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ю. И. Ермолаев, И. Г. Лодкина, Н. С. Николаева, М. Ю. Ермолаев, М. О. Рязанцева, *Космич. Исслед.* 55, 189 (2017).
2. M. M. Bisi, A. R. Breen, B. V. Jackson, R. A. Fallows, A. P. Walsh, Z. Mikic, P. Riley, C. J. Owen, A. Gonzalez-Esparza, E. Aguilar-Rodriguez, H. Morgan, A. G. Wood, M. Tokumaru, P. K. Manoharan, I. V. Chashei, A. Giunta, E. A. Jensen, J. A. Linker, V. I. Shishov, S. A. Tyul'bashev, S. K. Glubokova, M. S. Hamilton, J. M. Clover, K. Fujiki, S. E. Prise, B. Pinter, P. P. Hick and A. Buffington, *Solar Phys.* 265, 49 (2010).
3. T. Iju, M. Tokumaru, K. Fujiki, *Solar Phys.* 289, 2157 (2014).
4. M. M. Bisi, A. Gonzalez-Esparza, B. V. Jackson, M. Tokumaru and J. Leibacher, *Solar Phys.* 290, 2393 (2015).
5. A. Johri, P.K. Manoharan, *Solar Phys.* 291, 1433 (2016).

³https://omniweb.gsfc.nasa.gov/ftpbrowser/wind_swe_kp.html

6. *M. Tokumaru, M. Kojima, K. Fujiki, A. Yakobe*, J. Geophys. Res. 105, 10435 (2000).
7. *M. Tokumaru, M. Kojima, K. Fujiki*, J. Geophys. Res. 117, 06108 (2012).
8. *P. K. Manoharan*, Astrophys. J. 751, 128 (2012).
9. *I. V. Chashei, V. I. Shishov, S. A. Tyul'bashev, I. A. Subaev, V. V. Oreshko*, Solar Phys. 285, 141 (2013).
10. *A. Hewish, P. E. Scott, D. Wills*, Nature 203, 1214 (1964).
11. *И. В. Чашей, С. А. Тюльбашев, Ю. В. Писанко*, Метеорология и гидрология 46, 28 (2021).
12. *В. Р. Лукманов, И. В. Чашей, С. А. Тюльбашев, И. А. Субаев*, Астрон. журн. 100, 535 (2023).
13. *В. Р. Лукманов, И. В. Чашей, С. А. Тюльбашев, И. А. Субаев*, Астрон. журн. 100, 546 (2023).
14. *B. V. Jackson, H. S. Yu, P. P. Hick, A. Buffington, M. M. Bisi, M. Tokumaru, J. Kim, S. Hong, B. Lee, J. Yi, J. Yun*, Astrophys. J. Lett. 803(1), L1, 5 (2015).
15. *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. Дагкесаманский*, Астрон. журн. 93, 1045 (2016).

ANALYSIS OF REASONS OF THE GEOMAGNETIC STORM ON DECEMBER 1–2, 2023, FROM INTERPLANETARY SCINTILLATION OBSERVATIONS AT THE BSA LPI RADIO TELESCOPE

V. R. Lukmanov, I. V. Chashei, S. A. Tyul'bashev, I. A. Subaev

Lebedev Institute of Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

The results of the analysis of interplanetary scintillation observation data obtained by the radio telescope Big Scanning Antenna of the Lebedev Physical Institute (BSA LPI) before, during and after the magnetic storm that occurred on December 1–2, 2023, are presented. The observational data are compared with model calculations for corotating and propagating large-scale disturbances. The results of observations of scintillating radio sources indicate that the magnetic storm that took place was caused by a superposition of two types of large-scale solar wind disturbances. On the day before the start of the magnetic storm, signs of interaction between the Earth's magnetosphere and the corotating region of multi-velocity solar wind flows were observed, whereas later signs of magnetosphere disturbance by coronal mass ejection spreading after the M9.8 solar flare on November 28, 2023, were observed.

Keywords: solar wind, coronal mass ejection (CME), corotating interaction region (CIR), interplanetary scintillation