

ВЫБРОСЫ КОРОНАЛЬНОЙ МАССЫ И МАГНИТНАЯ БУРЯ 27 ФЕВРАЛЯ 2023 ГОДА ПО НАБЛЮДЕНИЯМ МЕЖПЛАНЕТНЫХ МЕРЦАНИЙ НА РАДИОТЕЛЕСКОПЕ БСА ФИАН

В. Р. Лукманов, И. В. Чашей, С. А. Тюльбашев

Рассмотрены данные наблюдений межпланетных мерцаний, полученных на радиотелескопе Большая Синфазная Антенна (БСА) Физического института им. П. Н. Лебедева (ФИАН) перед началом и в период магнитной бури, длившейся в течение 33 часов в период с 26 по 28 февраля 2023 года. Усиление наблюдаемых мерцаний началось за 11 часов до начала магнитной бури на гелиоцентрическом расстоянии 0.8 астрономических единиц. Модельные расчеты, использующие двумерные динамические карты мерцаний, позволили оценить скорость выбросов корональной массы. Установлено, что магнитную бурю вызвал выброс корональной массы после вспышки M3.7, произошедшей за 34.5 часов до начала магнитной бури. Скорость распространения выброса корональной массы оценивается в 900 км/с. Начало магнитной бури предсказано с достаточно высокой точностью, около 0.5 часа. Спустя 23 часа после вспышки M3.7 в той же активной области произошла вспышка M6.3, после которой, предположительно, произошел новый выброс, приход которого к Земле продолжил длящуюся магнитную бурю.

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

ФИАН, Астрокосмический центр, Пуштинская радиоастрономическая обсерватория, 142290 Россия, Московская обл., г. Пуцино, ПРАО; e-mail: lukmanov@prao.ru.

Введение. Солнечный ветер представляет собой поток заряженных частиц, который непрерывно истекает из солнечной короны. Этот поток частиц не стационарен и неоднороден. Солнечный ветер условно делится на квазистационарный поток и возмущенный. Квазистационарный поток делится на медленный (300–500 км/с), который в максимуме солнечной активности преобладает на всех гелиоширотах, а в минимуме солнечной активности на низких гелиоширотах, и быстрый (500–800 км/с), который преобладает на высоких гелиоширотах вблизи минимума солнечной активности. Возмущенный поток солнечного ветра вызывается возмущениями двух видов: корональные выбросы массы (КВМ) и коротирующие области взаимодействия (КОВ). Если возмущения достигают Земли, то может происходить взаимодействие земной магнитосферы с потоком заряженных частиц, приводящее к магнитным бурям, полярным сияниям и другим явлениям. Исследования межпланетной плазмы и разного рода выбросов от Солнца важны для решения проблемы космической погоды. В работе [1] исследовались долговременные изменения параметров солнечного ветра в течение 20–24 циклов солнечной активности, где было показано, что параметры на средних и высоких гелиоширотах меняются медленно и немонотонно с характерным масштабом порядка векового цикла.

Межпланетные мерцания с момента их обнаружения в 1964 году [2] широко используются для исследования крупномасштабной неоднородной и нестационарной структуры солнечного ветра [3–5]. Они возникают вследствие дифракции радиоизлучения удаленных радиоисточников на неоднородностях межпланетной плазмы. Возможность обнаружения и исследования распространяющихся в межпланетной плазме КВМ описана в работах [6–12]. Обнаруживаются КВМ по усилениям мерцаний на расстояниях от 0.4 астрономических единиц (а.е.) от Солнца. На расстояниях < 0.4 а.е. мерцания переходят в режим насыщения и подавляются размером источника. Здесь и далее в рамках данной работы под расстоянием от Солнца подразумевается расстояние от Солнца до прицельной точки (самой ближайшей к Солнцу точки на луче зрения от наблюдателя к источнику), так как именно ближайшие к Солнцу слои дают основной вклад в мерцания наблюдаемых радиоисточников. В Пуцинской Радиоастрономической Обсерватории (ПРАО) исследования межпланетных мерцаний проводятся на радиотелескопе Большая Синфазная Антенна (БСА) Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН). Наблюдения КОВ в данных межпланетных мерцаний описываются в работе [13] на примере двух событий 2016 г., где было показано, что перед приходом КОВ к Земле происходит ослабление мерцаний с последующим их усилением во время магнитной бури и в течение суток после нее. В данной работе речь будет идти о КВМ.

В работе [14] продемонстрирован пример магнитной бури 4 ноября 2021 года, когда мерцания на радиотелескопе БСА ФИАН наблюдались за 15 часов до прихода возмущения, связанного с КВМ, к Земле. В настоящей работе рассмотрена магнитная буря 27 февраля 2023 года, которая произошла после серии достаточно сильных вспышек на Солнце. Для оценки скорости распространения возмущения используется простая кинематическая модель, которая в последующей работе будет использована для анализа бурь, связанных с КВМ, произошедших в 2021–2022 годах. Таким образом, демонстрируется возможность заблаговременного предсказания прихода магнитных возмущений к Земле путем наблюдения за межпланетными мерцаниями. Однако пришедшее магнитное возмущение не всегда вызывает магнитную бурю. Для более точного предсказания магнитных бурь желательна информация о межпланетной компоненте магнитного поля B_z [15], так как наличие отрицательной компоненты B_z в пришедшем к Земле КВМ – главное условие возникновения магнитной бури. В большинстве случаев даже определение знака B_z является сложной задачей. Предлагаемая модель КВМ рассматривает лишь распространение возмущений в межпланетной среде, оценку скорости распространения возмущений и время их прихода на Землю.

Радиотелескоп БСА ФИАН. БСА ФИАН – это радиотелескоп меридианного типа, сделанный на волновых диполях. В используемой конфигурации 96 лучей БСА перекрывают склонения (угловые расстояния наблюдаемых точек на небесной сфере от плоскости небесного экватора, при этом склонение положительно, если наблюдаемая точка в северном полушарии, и отрицательно – если наблюдаемая точка в южном полушарии) от -8° до $+42^\circ$. Наблюдения проводятся на центральной частоте 111 МГц, в полосе 2.5 МГц. Время опроса точки 0.1 с [16]. На этой частоте характерные масштабы мерцаний: временной порядка секунды, пространственный порядка сотен километров. Количество наблюдаемых за сутки мерцающих источников составляет около 5000. Параметры большинства из них неизвестны, поэтому используются специальные методы обработки данных, основанные на предположении однородности статистического ансамбля мерцающих источников. Подробно о характеристиках и методах обработки данных описано в [17].

Моделирование формы и распространения КВМ. КВМ регистрируются по усилению мерцаний. Мерцания характеризуются величиной, называемой индексом мерцаний (m), который определяется соотношением:

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

где I – измеряемая плотность потока в зависимости от времени, $\langle I \rangle$ – ее усредненное по времени значение.

Вся наблюдаемая область неба (около 17000 кв.град.) разбивается на маленькие области (пиксели) размером $3^\circ \times 3^\circ$. В каждом пикселе считается усредненный индекс мерцаний по всем источникам, попавшим в этот пиксель. В среднем в каждом пикселе может быть до 10 источников. По данным индексов мерцаний строятся динамические двумерные цветовые карты, где по оси абсцисс отмечается время в UT (universal time – всемирное время, время на гринвичском меридиане, от московского отличается на 3 часа), по оси ординат – склонение. Для определения усиления мерцаний используется не сам индекс мерцаний, а его отношение к значению индекса мерцаний в той же точке неба в предыдущий день. Если на Солнце была вспышка, а мерцания показывают выраженное усиление, то строятся модельные карты. Путем визуального сравнения модельных карт с наблюдательными подбирается вспышка, после которой мог последовать КВМ, вызвавший в итоге магнитную бурю. Также подбирается скорость распространения КВМ для наилучшего совпадения с наблюдательными картами, и вместе с этим предсказывается время прихода возмущения к Земле.

КВМ моделируется как область с повышенной концентрацией плазмы, ограниченная конической поверхностью с вершиной в центре Солнца и двумя сферическими поверхностями с центром в центре Солнца, распространяющаяся радиально от Солнца с некоторой постоянной скоростью. Предполагается, что толщина выброса $L = 0.1$ а.е., угол раскрытия $\theta = 100^\circ$. Угол между линией Солнце–Земля и центральной осью выброса определяются по солнечным координатам активной области, в которой произошла вспышка. Информация о вспышках и координатах активных областей содержится на сайте tesis.xras.ru. При подсчете теоретических значений индексов мерцаний предполагалось, что абсолютный уровень флуктуаций электронной плотности внутри КВМ увеличивается в $N = 3$ раза. В модели также предполагается, что максимально возможное значение индекса мерцаний составляет 0.6 и в отсутствие возмущений достигается на элонгации (угловое расстояние между наблюдаемой точкой на небесной сфере и Солнцем при наблюдениях с Земли) $\varepsilon = 23^\circ$ (расстояние от Солнца 0.4 а.е.) [18]. Индекс мерцаний рассчитывался по известным теоретическим формулам, включающим интегрирование по лучевым линиям в предположении, что фоновый солнечный ветер является сферически-симметричным. В случае если при подсчете в какой-то точке значение индекса мерцаний получилось больше, чем 0.6, то полученное значение заменяется на максимальное 0.6. Этим объясняется, почему на модельных картах на расстояниях,

близких к Солнцу, нет усиления или ослабления мерцаний. Если расстояние от Солнца меньше 0.4 а.е., то мерцания переходят в режим насыщения, в котором мерцания подавляются размером источника.

Вспышки и магнитная буря 27 февраля 2023 года. Сильная магнитная буря конца февраля 2023 года началась 26 февраля в период с 18:00 до 21:00 UT (согласно информации по Kp-индексу https://kp.gfz-potsdam.de/app/files/Kp_ap_since_1932.txt, если $Kp \geq 5$, то это магнитная буря), продолжалась 27 февраля весь день и завершилась 28 февраля в 3:00 UT. Пик магнитной бури пришелся на 27 февраля в период с 9:00 до 12:00 UT, G-индекс (показатель силы магнитной бури по 5-бальной шкале: G1 – слабые бури, G2 – средние, G3 – сильные, G4 – очень сильные, G5 – экстремальные) в этот период составил 3 балла из возможных 5 (G3), что классифицируется как сильная буря. Данное событие оценивается как одно из сильнейших за последние годы. Причиной бури явились КВМ после серии вспышек, произошедших в ночь (по московскому времени) с 24 на 25 и с 25 на 26 февраля. Усиление мерцаний на динамических наблюдательных картах (рис. 1(а)) стало фиксироваться 26 февраля около 7:00 UT, за 11 часов до начала магнитной бури.

В ночь с 24 на 25 февраля произошли две вспышки: балла M1.1 длительностью около 10 минут в активной области 3235, и балла M3.7 длительностью около 1.5 часов в активной области 3229. Вторая вспышка более мощная и более длительная, но место этой вспышки расположено дальше от центрального меридиана. Построены карты, моделирующие распространение КВМ после каждой из данных вспышек. На рис. 1((б),(в)) изображены динамические модельные карты за 26 февраля для вспышек M1.1 и M3.7, соответственно. В верхней панели на модельных картах приведены данные слева направо: дата, на которую построена данная модельная карта, увеличение электронной плотности внутри КВМ, угол раскрытия КВМ, подобранная скорость, гелиографические координаты места вспышки на Солнце, время UT вспышки ($t_{0.0}$), время UT захода выброса в зондируемую область ($t_{0.4}$), время UT достижения выбросом орбиты Земли ($t_{1.0}$), угол между линией Земля–Солнце и центральной осью модельного выброса (φ).

Из рис. 1 видно, что обе модельные карты подходят под наблюдательную карту. В случае вспышки M3.7 в левой части карты усиление мерцаний начинается около 7:00 UT, как и на наблюдательной карте. Точность предсказания начала магнитной бури выше, чем в случае вспышки M1.1, что свидетельствует о том, что, по-видимому, именно вспышка M3.7 ответственна за магнитную бурю 27 февраля. Кроме того, модельная карта для вспышки M3.7

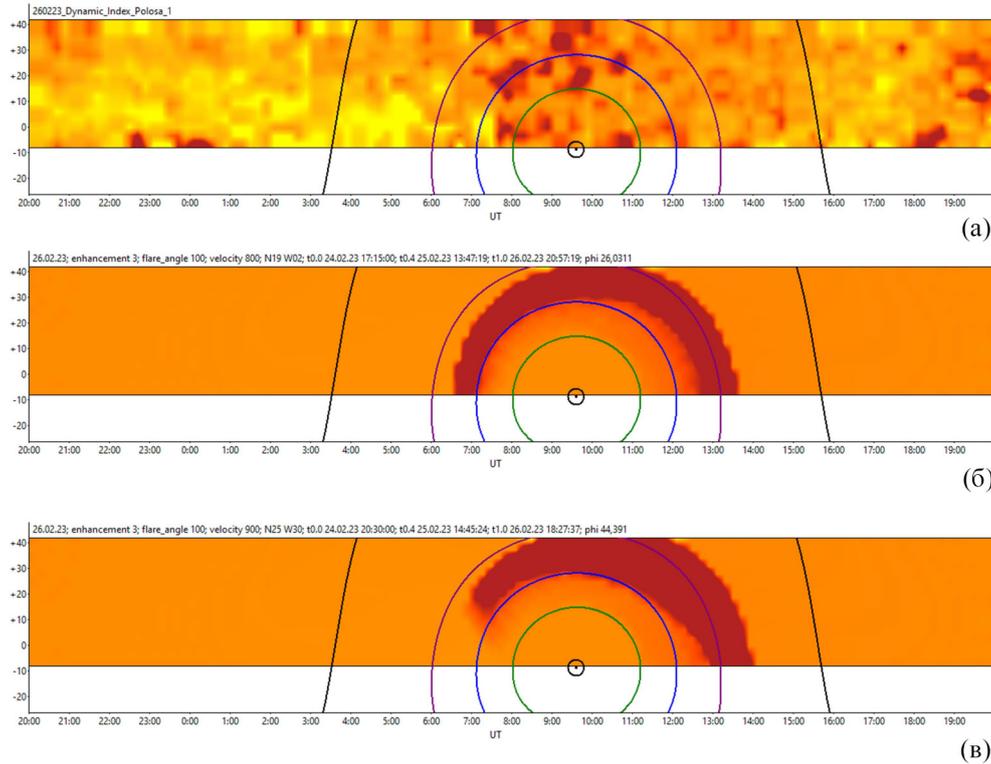


Рис. 1: Двумерные карты за 26 февраля: (а) наблюдательная карта; (б) модельная карта для вспышки M1.1, время максимума вспышки 24.02.2023 17:15 UT, координаты места вспышки N19 W02, угол между центральной осью КВМ и линией Земля–Солнце $\varphi = 26^\circ$, скорость возмущения 800 км/с, оценочное время прихода возмущения к Земле 26.02.2023 20:57 UT; (в) модельная карта для вспышки M3.7, время максимума вспышки 24.02.2023 20:30 UT, координаты места вспышки N25 W30, $\varphi = 44^\circ$, скорость возмущения 900 км/с, оценочное время прихода возмущения к Земле 26.02.2023 18:27 UT. Цвета на карте соответствуют цветам в работе [14]. На картах нанесены дуги, соответствующие расстояниям от Солнца: зеленая – 0.4 а.е., синяя – 0.6 а.е., фиолетовая – 0.8 а.е., черная – 1.0 а.е.

лучше соответствует наблюдательной карте, чем модельная карта для вспышки M1.1. Согласно каталогу Cactus вспышка M1.1 не сопровождалась КВМ (https://www.sidc.be/cactus/catalog/LASCO/2_5_0/qkl/2023/02/latestCMEs.html), что подтверждает предположение о причастности КВМ после вспышки M3.7 к рассматриваемой магнитной буре. Ниже на рис. 2 и 3 приведены соответствующие карты за 27 и 28 февраля.

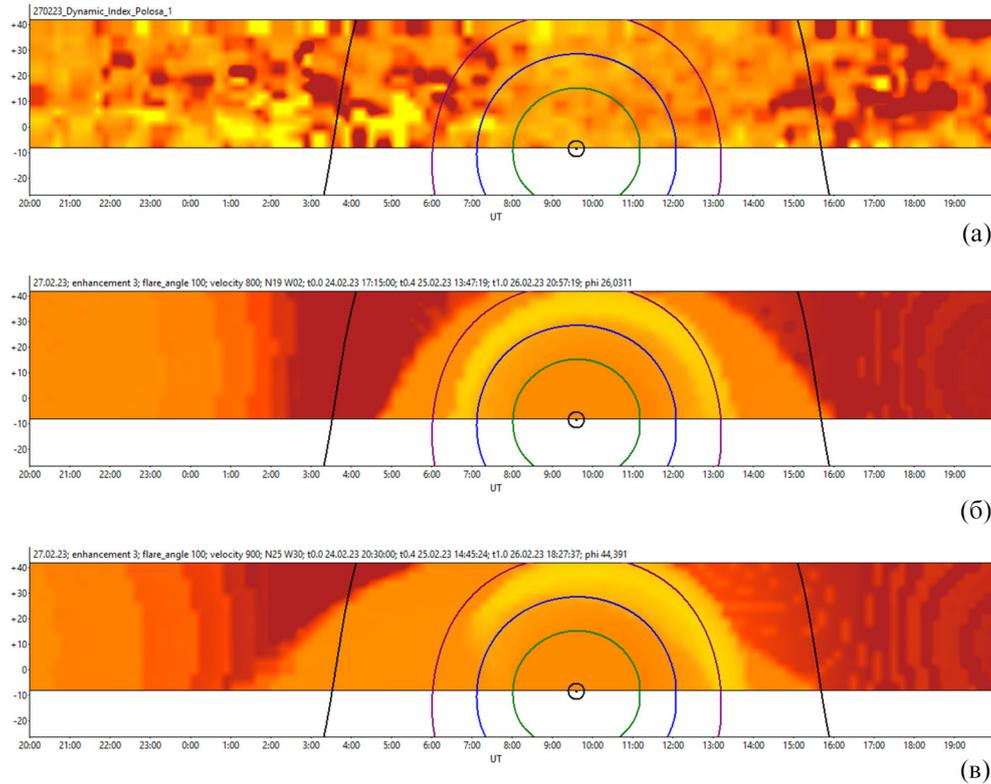


Рис. 2: Двумерные карты за 27 февраля. Аналогично рис. 1.

Из рис. 2 видно, что усиление мерцаний 27 февраля по сравнению с предыдущим днем наблюдается на больших расстояниях от Солнца. На модельных картах на расстояниях примерно до 0.8 а.е. от Солнца наблюдается ослабление мерцаний по сравнению с предыдущим днем, это означает, что выброс ушел из этих областей и мерцания вернулись к нормальному уровню. На наблюдательной карте такого ослабления нет. Возможная причина в том, что через сутки после указанных вспышек произошли еще две вспышки, КВМ после которых тоже внес свой вклад в мерцания: M1.0 из активной области 3236 и M6.3 из активной области 3229 (из той же области, что и M3.7 накануне). 28 февраля (рис. 3) усиленные мерцания наблюдаются в первой половине дня, что соответствует уходу возмущения и окончанию магнитной бури. На рис. 2 и 3 модельные карты для вспышки M1.1 к соответствующим наблюдательным картам подходят больше, чем модельные карты для вспышки M3.7, в отличие от рис. 1. Это может быть связано с тем, что 27 и 28 февраля на мерцания стали влиять КВМ после вспышек M1.0 и M6.3. При прогнозе космической погоды усиления мерцаний стоит привязывать к более мощным и более длительным вспышкам, в рассматриваемом случае

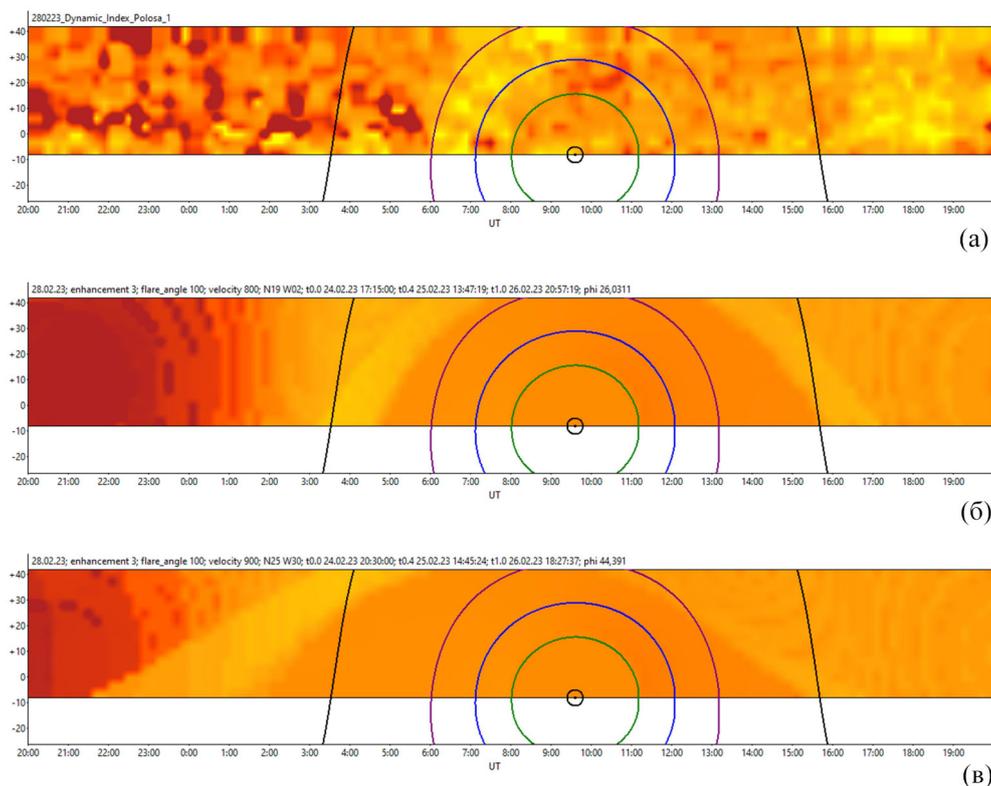


Рис. 3: Двумерные карты за 28 февраля. Аналогично рис. 1–2.

это вспышка M3.7. Предполагается, что выброс после M3.7 привел к магнитной буре, а сутки спустя после вспышки M6.3 из той же активной области произошел повторный выброс, который затем продолжил начавшуюся магнитную бурю. На карте 28 февраля во второй половине дня видно ослабление мерцаний на наблюдательной карте, что свидетельствует об уходе выбросов и возвращении мерцаний к нормальному режиму.

Заключение. На примере недавней бури 27 февраля 2023 года продемонстрирована возможность предсказания прихода возмущения к Земле. Усиление мерцаний на наблюдательных картах началось за 11 часов до начала возмущения. Путем сравнения наблюдательных и модельных карт удалось подобрать вспышку, после которой произошел выброс, ответственный за магнитную бурю. Это оказалась вспышка M3.7, произошедшая 24 февраля в 20:30 UT. Скорость распространения оценивалась в 900 км/с. Оценочное время прихода возмущения к Земле 26 февраля в 18:27 UT, тогда как буря началась в период около 18:00 UT. В данном случае прогноз космической погоды выполнен с достаточно высокой точностью.

Авторы благодарят антенную группу БСА ФИАН за обеспечение непрерывности наблюдений в мониторинговом режиме, а также команде сайта tesis.xras.ru за предоставление информации по вспышкам, активным областям, Кр-индексам.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] В. И. Власов, Р. Д. Дагкесаманский, В. А. Потапов и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **49**(1), 10 (2022). <https://elibrary.ru/contents.asp?id=47301121>.
- [2] A. Hewish, P. E. Scott, D. Wills, Nature **203**(9), 1214 (1964). DOI: 10.1038/2031214a0.
- [3] M. Tokumaru, M. Kojima, K. Fujiki, J. Geophys. Res. **117**(6), 06108 (2012). DOI: 10.1029/2011JA017379.
- [4] P. K. Manoharan, Astrophys. J. **751**(7), 128 (2012). DOI: 10.1088/0004-637X/753/1/93.
- [5] I. V. Chashei, V. I. Shishov, S. A. Tyul'bashev, et al., Solar Phys. **285**(1-2), 141 (2013). DOI: 10.1007/s11207-012-9952-5.
- [6] M. Tokumaru, K. Fujiki, K. Iwai, et al., Solar Phys. **294**(7), id87, 15 (2019). DOI: 10.1007/s11207-019-1487-6.
- [7] M. M. Bisi, A. R. Breen, B. V. Jackson, et al., Solar Phys. **265**(1-2), 49 (2010). DOI: 10.1007/s11207-010-9602-8.
- [8] M. M. Bisi, A. Gonzalez-Esparza, B. V. Jackson, et al., Solar Phys. **290**(9), 2393 (2015). DOI: 10.1007/s11207-015-0784-y.
- [9] T. Iju, M. Tokumaru, K. Fujiki, Sol. Phys. **289**(6), 2157 (2014). DOI: 10.1007/s11207-014-0472-3.
- [10] A. Johri, P. K. Manoharan, Sol. Phys. **291**(5), 1433 (2016). DOI: 10.1007/s11207-016-0900-7.
- [11] B. V. Jackson, P. L. Hick, M. Kojima, A. Yokobe, Adv. Space Res. **20**(1), 23 (1997). DOI: 10.1016/S0273-1177(97)00474-2.
- [12] P. K. Manoharan, M. Tokumaru, M. Pick, et al., The Astrophys J. **559**(2), 1180 (2001). DOI: 10.1086/322332.
- [13] И. А. Субаев, С. А. Тюльбашев, И. В. Чашей, Краткие сообщения по физике ФИАН, **48**(6), 50 (2021). <https://elibrary.ru/contents.asp?id=45847688>.
- [14] I. V. Chashei, S. A. Tyul'bashev, V. R. Lukmanov, I. A. Subaev, Adv. Space Res., May (2022). DOI: 10.1016/j.asr.2022.05.050.

- [15] B. V. Jackson, H. S. Yu, P. P. Hick, et al., *Astrophys. J. Lett.* **803**(1), L1, 5p (2015). DOI: 10.1088/2041-8205/803/1/L1.
- [16] С. К. Глубокова, А. В. Глянцев, С. А. Тюльбашев и др., *Астрон. журн.* **92**(1), 38 (2015). DOI: 10.1134/S1063772915010035.
- [17] В. И. Шишов, И. В. Чашей, В. В. Орешко и др., *Астрон. журн.* **93**(12), 1045 (2016). DOI: 10.1134/S1063772916110068.
- [18] В. Р. Лукманов, И. В. Чашей, С. А. Тюльбашев, *Астрон. журн.* **99**(2), 160 (2022). DOI: 10.1134/S1063772922030040.

Поступила в редакцию 6 марта 2023 г.

После доработки 15 мая 2023 г.

Принята к публикации 16 мая 2023 г.