

О возможности краткосрочного прогноза геомагнитных возмущений на примере выброса корональной массы в ноябре 2021 г.

В. Р. Лукманов,^{*} С. А. Тюльбашев,[†] И. В. Чашей[‡]

Физический институт им. Лебедева РАН. Россия, 119991, Москва, Ленинский проспект, д. 53
(Поступила в редакцию 19.05.2022; подписана в печать 20.06.2022)

Кратко описаны результаты предыдущих работ по наблюдению межпланетных мерцаний на модернизированном радиотелескопе меридионального типа БСА ФИАН. Представлены результаты наблюдения выброса корональной массы (СМЕ) и связанной с ним сильной магнитной бури в ноябре 2021 г. Увеличение мерцаний началось на гелиоцентрическом расстоянии 0.7 астрономических единиц через 27.5 часов после вспышки, а магнитная буря началась через 14.5 часов после начала усиления мерцаний. Результаты анализа этого события иллюстрируют возможность краткосрочного предсказания космической погоды по данным мониторинга межпланетных мерцаний.

PACS: 96.60.ph

УДК: 523.9-466.

Ключевые слова: межпланетные мерцания, корональные выбросы масс (СМЕ), коротирующие структуры (CIR), космическая погода.

ВВЕДЕНИЕ

Солнечный ветер — это поток заряженных частиц, непрерывно истекающий из солнечной короны. Согласно многолетним наблюдениям, солнечный ветер является неоднородным и нестационарным. Квазистационарные потоки плазмы делятся на два класса: медленные (300–500 км/с вблизи орбиты Земли) и быстрые (500–800 км/с). В максимуме солнечной активности наблюдаются медленные потоки на всех гелиоширотах, а вблизи минимума цикла солнечной активности наблюдаются быстрые потоки на высоких гелиоширотах и медленные на низких. Возмущения вспышечного происхождения, распространяясь через фоновую плазму солнечного ветра, могут достигать орбиты Земли. Именно с ними связаны такие явления космической погоды, как магнитные бури, полярные сияния. По этой причине исследования солнечного ветра важны для решения проблем солнечно-земных связей.

С момента обнаружения Хьюишем межпланетных мерцаний в 1964 г. [1] метод межпланетных мерцаний широко используется для исследования нестационарной и неоднородной структуры солнечного ветра. Межпланетные мерцания возникают вследствие дифракции излучения компактных радиоисточников на движущихся неоднородностях электронной плотности межпланетной среды. Характерный пространственный масштаб мерцаний в метровом диапазоне длин волн составляет порядка сотен километров, а временной масштаб — порядка секунды. Межпланетные мерцания на разных частотах используются для исследования крупномасштабной структуры и циклической динамики солнечного ветра [2–4]. В ряде работ обсуждалась возможность детектирования и исследования распространяющихся от Солнца возмущений таких как

выбросы корональной массы (СМЕ — coronal mass ejection) [5–9]. Известны два вида крупномасштабных возмущений в солнечном ветре: выбросы корональных масс (СМЕ) и коротирующие структуры (CIR). Возмущения типа CIR также могут проявляться в наблюдательных данных по межпланетным мерцаниям. Как правило, СМЕ наблюдаются вблизи максимума цикла солнечной активности, а CIR — вблизи минимума цикла солнечной активности. Крупномасштабные возмущения, достигающие Земли, могут влиять на ее магнитосферу, вызывая магнитные бури и другие последствия. В Пушинской радиоастрономической обсерватории Физического института им. Лебедева РАН исследование межпланетных мерцаний проводится на модернизированном радиотелескопе БСА ФИАН с 2014 г.

1. НАБЛЮДЕНИЕ МЕЖПЛАНЕТНЫХ МЕРЦАНИЙ НА РАДИОТЕЛЕСКОПЕ БСА ФИАН

Радиотелескоп меридионального типа БСА ФИАН — это Большая Сканирующая Антенна, представляющая из себя прямоугольную область размером 187х364 метра в направлениях Восток–Запад и Север–Юг соответственно. Антенна состоит из 16384 диполей, ориентированных в направлении Восток–Запад. Диаграмма направленности радиотелескопа состоит из 96 лучей, перекрывающих склонения от -8° до $+42^\circ$. Радиотелескоп работает на центральной частоте 111 МГц в 6 спектральных каналах общей шириной 2.5 МГц и постоянной времени 0.1 с [10]. Наблюдения с 2014 г. ведутся круглосуточно: фиксируются мерцания всех компактных радиоисточников, которые попадают в диаграмму направленности радиотелескопа. Количество наблюдаемых в течение суток мерцающих источников составляет около 5000, параметры большинства из них неизвестны, поэтому используются специальные методы обработки и анализа данных. Подробно характеристики БСА ФИАН и методика обработки измерений, основанная на предположении однородности статисти-

* lukmanov@pra0.ru

† serg@pra0.ru

‡ chashey@pra0.ru

ческого ансамбля мерцающих источников, изложены в [11]. Вся сканируемая в течение суток область неба разбивается на маленькие области размером $3^\circ \times 3^\circ$ ($12'$ по прямому восхождению и 3° по склонению). На каждой из этих областей оценивается средний по всей области квадрат индекса мерцаний. Индекс мерцаний является основной характеристикой межпланетных мерцаний и определяется по формуле:

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

где I — измеряемая плотность потока в зависимости от времени, а $\langle I \rangle$ — ее среднее значение.

По рассчитанным значениям индексов мерцаний по формуле (1) строятся двумерные карты, отражающие распределение уровня мерцаний в переменных время суток — склонение. В рамках данной работы строились динамические карты для отношения значения индекса мерцаний за текущий день к соответствующему значению в предыдущий день в то же время и на том же склонении. Карты изменения индекса мерцаний позволяют судить о распространяющихся возмущениях межпланетной плазмы.

2. КОРОНАЛЬНЫЕ ВЫБРОСЫ МАССЫ И КОРТИРУЮЩИЕ СТРУКТУРЫ В ДАННЫХ МОНИТОРИНГА МЕЖПЛАНЕТНЫХ МЕРЦАНИЙ

2.1. Корональные выбросы массы

Корональные выбросы масс (СМЕ) — это потоки плазмы, выбрасываемые в межпланетное пространство из солнечной короны после вспышек. В настоящее время их происхождение связывают со взрывными процессами высвобождения энергии в активных областях солнечной короны. В результате воздействия на магнитосферу Земли СМЕ могут приводить к магнитным бурям. Краткосрочный прогноз геомагнитной активности состоит в детектировании СМЕ до их прихода к Земле. Метод межпланетных мерцаний позволяет по наблюдениям в метровом диапазоне волн отследить корональные выбросы масс на расстояниях от 0.4 астрономических единиц (а.е.) от Солнца до 1 а.е. (на расстояниях, меньших 0.4 а.е. мерцания являются насыщенными и подавляются за счет собственных угловых размеров источников). Как правило, скорость распространения СМЕ от нескольких сотен до 2000 км/с, таким образом СМЕ могут быть зафиксированы от нескольких часов до суток до прихода к Земле. Фиксируются СМЕ по увеличению индекса мерцаний в просвечиваемых источниками областях солнечного ветра.

В работе [12] проанализированы 9 случаев распространения СМЕ после вспышек классов М и X (вспышки X-класса самые мощные от 10^{-4} Вт/м², M-вспышки — от 10^{-5} (включительно) до 10^{-4} Вт/м², C-вспышки — от 10^{-6} (включительно) до 10^{-5} Вт/м²,

обнаруженных в рентгеновском диапазоне с июля 2011 г. по июнь 2012 г., что привело в итоге к магнитным бурям. На гелиоцентрических расстояниях 0.5–0.65 а.е. наблюдалось усиление мерцаний еще до начала магнитной бури. Установлено, что время с момента обнаружения вспышки до обнаружения мерцаний в среднем составляет примерно половину времени между вспышкой и началом магнитной бури.

2.2. Кортирующие структуры

Кортирующие структуры (CIR) возникают, когда быстрые потоки солнечного ветра догоняют медленные потоки, взаимодействуют с ними, при этом образуется вращающаяся область плазмы с повышенной концентрацией. CIR связаны с источниками возмущений на Солнце и вращаются вместе с Солнцем. CIR, как и СМЕ, тоже могут вызывать магнитные бури. Исследование проявлений CIR в солнечном ветре изложено в работах [13] по данным мониторинга межпланетных мерцаний за 2016 год, [14] по данным за 2017 г. и [15] по данным за 2018–2019 г. В качестве признаков обнаружения CIR использовались критерии: 1) 27-дневная периодичность и 2) отсутствие в короне рентгеновских вспышек класса C и выше. В 2017 г. 7 из 8 случаев возмущений, приходящих к Земле, были связаны с кортирующими структурами, и только один случай с мощным распространяющимся возмущением. В 2018–2019 гг. 12 из 13 случаев магнитных бурь были вызваны пришедшей сжатой части CIR и только один случай связан с наложением вспышечный возмущений на кортирующее. В работах [13–15] показано что за 2–3 суток до прихода CIR к Земле происходит ослабление вечерних и ночных мерцаний. В момент магнитной бури при этом мерцания усиливаются, что особенно четко проявляется в вечерние и ночные часы. Однако приход CIR к Земле не всегда сопровождается магнитной бурей, поэтому для уверенного прогноза требуются также дополнительные данные о направлении B_z — компонента магнитного поля в возмущенном потоке [6].

3. ВСПЫШКА И МАГНИТНАЯ БУРЯ В НАЧАЛЕ НОЯБРЯ 2021 Г.

В данном разделе представлены данные по СМЕ в начале ноября 2021 г. В конце октября и в начале ноября наблюдалось несколько мощных вспышек в рентгеновском диапазоне. Одна из этих вспышек класса M1.7 (мощностью 1.7×10^{-5} Вт/м²), произошедшая 2 ноября, сопровождалась распространением СМЕ, что и привело к сильной магнитной буре G4 4 ноября 2021 г. Вспышка длилась относительно долго, пик ее пришелся на 3 часа ночи по всемирному времени 2 ноября. СМЕ, которое образовалось после

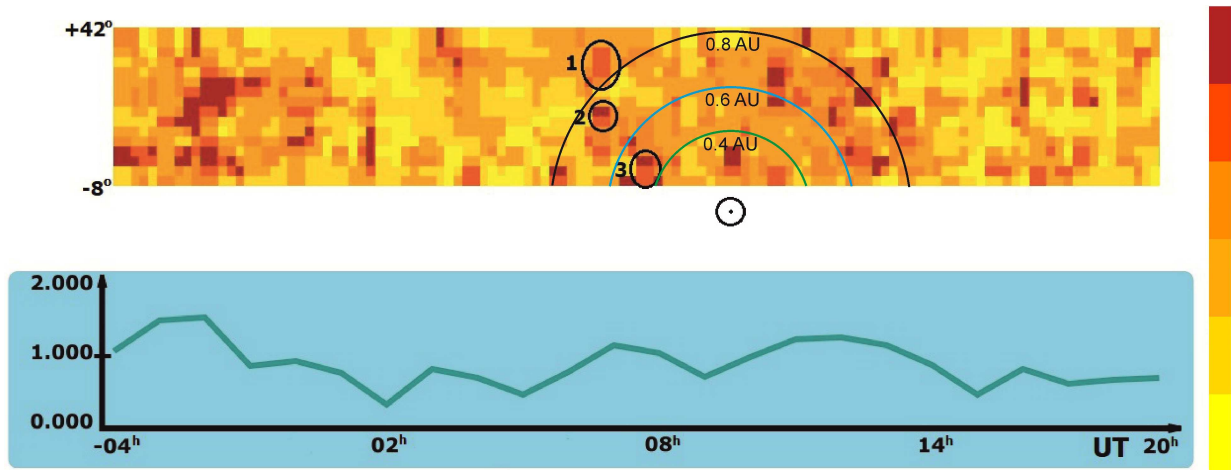


Рис. 1. Верхняя панель — динамическая карта отношения значения индекса мерцаний 3 ноября к соответствующим значениям 2 ноября, каждый пиксель соответствует области неба $3^\circ \times 3^\circ$, начальное время на горизонтальной оси $-4:00\text{UT}$ ($20:00\text{UT}$ предыдущего дня), склонения отмечены по вертикальной оси от -8° до $+42^\circ$, кульминация Солнца показана под верхней панелью. Цвета, показанные в правой вертикальной колонке, соответствуют отношениям индексов мерцаний снизу-вверх: до 0.2 включительно; от 0.2 до 0.6 включительно; от 0.6 до 1.0 включительно; от 1.0 до 1.5 включительно; от 1.5 до 2.0 включительно; от 2.0. Нижняя панель — отношения индексов мерцаний за 3 ноября к индексам за 2 ноября, усредненные по часовым интервалам и всем склонениям, всемирное время UT на горизонтальной оси отмечено от -4 ч (20 ч предыдущего дня) до 20 ч

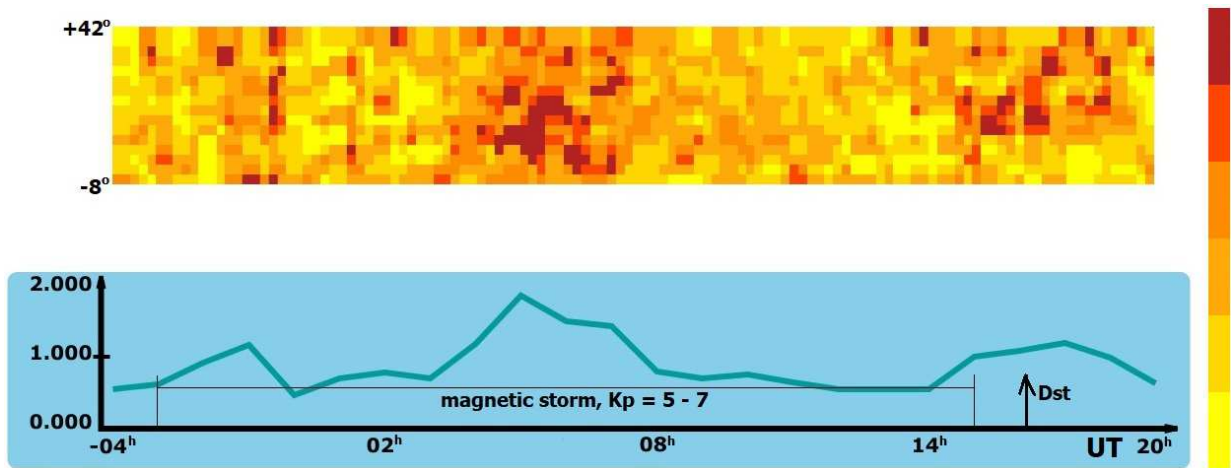


Рис. 2. Аналогичный рис. 1, только показаны отношения индексов мерцаний 4 ноября к индексам 3 ноября. Показано время магнитной бури и время наибольшего по модулю отрицательного значения геомагнитного индекса Dst

этой вспышки, согласно данным SOHO LASCO, распространялось со скоростью 700 км/с.

На рис. 1, 2 представлены динамические двумерные карты индексов мерцаний. Рис. 1 показывает отношение значений индексов мерцаний 3 ноября к значениям 2 ноября. Дуги показывают гелиоцентрическое расстояние до прицельной точки (ближайшей точки к Солнцу) на лучах зрения. Самая нижняя дуга является границей между областью сильных и слабых мерцаний.

На нижней панели рис. 1 показаны усредненные по всем склонениям и часовым интервалам отношения значения индексов мерцаний текущего дня к значениям предыдущего дня. Усреднение по склонениям ис-

пользовано по той причине, что радиотелескоп БСА является меридианным инструментом, при таком усреднении точки на кривой дают информацию о среднем по всем источникам, наблюдаемым в течение часа на разных расстояниях от Солнца, уровне мерцаний. Каждая точка на рисунке нижней панели получена усреднением по 80 пикселям, содержащим в сумме по меньшей мере несколько сотен просвечивающих источников, поэтому увеличение уровня мерцаний, по нашим оценкам превышающее 10% , является значимым. Заметно увеличение уровня мерцаний после $6:30\text{UT}$ 3 ноября. Области, в которых зафиксировано усиление мерцаний в $6:30\text{UT}$ показаны кружочками 1 и 2 на верх-

ней панели рис. 1. Вертикальное разделение областей 1 и 2 соответствует протяженности СМЕ по гелиоширотам. Увеличение индекса мерцаний после 6:30 UT, в частности в области, выделенной кружочком 3, связано с возмущенной плазмой на лучах зрения, через которые фронт СМЕ уже прошел.

На рис. 2 показано отношение значений индексов мерцаний 4 ноября к соответствующим значениям 3 ноября. Время магнитной бури и наибольшее по модулю отрицательное значение геомагнитного индекса Dst показано на нижней панели рис. 2. Из рис. 2 видно, что межпланетная плазма сильно возбуждена во время магнитной бури в утренние часы, между 5:00 и 10:00 по московскому времени (UT+3).

Время, прошедшее от пика рентгеновской вспышки в короне до начала усиления мерцаний, составило примерно 27,5 часов. Время, прошедшее от пика рентгеновской вспышки до начала магнитной бури, составило около 42 часов. Таким образом, усиление мерцаний обнаружено примерно за 15 часов до начала магнитной бури. Оценки средних скоростей распространения СМЕ на этих временных интервалах 1060 км/с и 990 км/с соответственно, что означает, что не наблюдается значительного замедления солнечного ветра на пути к Земле, таким образом СМЕ распространяется с примерно одинаковой скоростью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данные наблюдений межпланетных мерцаний в метровом диапазоне позволяют фиксировать два типа крупномасштабных возмущений (СМЕ и CIR) в солнечном ветре на гелиоцентрических расстояниях от 0.4 до 1 а.е.

Крупномасштабные возмущения фиксируются до их прихода к Земле, таким образом возможно использование данных наблюдений для краткосрочного прогноза космической погоды. Возмущения, вызванные выбросами корональной массы, фиксируются по усилениям мерцаний, а возмущения, вызванные корототирующими структурами, — по ослаблению вечерних и ночных мерцаний за 2–3 суток до их прихода к Земле.

Качество и надежность предсказания космической погоды с использованием данных наблюдений межпланетных мерцаний могут быть улучшены при кооперации с центрами, которые проводят наблюдения на различных диапазонах волн в разных точках Земли. Полезна информация о мощных рентгеновских вспышках в короне. Также для более надежного предсказания магнитных бурь желательна информация о компоненте B_z межпланетного магнитного поля. Отметим, что точные количественные критерии проявления геоэффективных возмущений в данных мерцаний находятся в процессе разработки, для их формулировки потребуются дальнейшие наблюдения в режиме мониторинга и сравнение наблюдательных данных с результатами численного моделирования. Однако накопленные к настоящему времени данные об индивидуальных возмущениях показывают, что даже на качественном уровне наблюдения мерцаний, которые относятся к промежуточным между короной и орбитой Земли областям солнечного ветра, позволяют заблаговременно оценить время прихода возмущения к Земле.

Авторы выражают благодарность технической команде БСА ФИАН за предоставление данных радиотелескопа, используемых в данной работе.

-
- [1] Hewish A., Scott P.E., Wills D. // Nature. 1964. **203**. N 9. P. 1214.
 - [2] Tokumaru M., Kojima M., Fujiki K. // J. Geophys. Res. 2012. **117**. N 6. P. 06108.
 - [3] Manoharan P.K. // Astrophys. J. 2012. **751**. N 7. P. 128.
 - [4] Chashei I.V., Shishov V.I., Tyul'bashev S.A., Subaev I.A., Oreshko V.V. // Solar Phys. 2013. **285**(1-2). P. 141.
 - [5] Tokumaru M., Fujiki K., Iwai K., Tyul'bashev S., Chashei I. // Solar Phys. 2019. **294**(7) id87. P. 15.
 - [6] Bisi M.M., Breen A.R., Jackson B.V., Fallows R.A., Walsh A.P., Mikic Z., Riley P., Owen C.J., Gonzalez-Esparza A., Aguilar-Rodriguez E. et al. // Solar Physics. 2010. **265**(1-2). P. 49.
 - [7] Bisi M.M., Gonzalez-Esparza A., Jackson B.V., Tokumaru M., Leibacher J. // Solar Phys. 2015. **290**(9). P. 2393.
 - [8] Iju T., Tokumaru M., Fujiki K. // Sol. Phys. 2014. **289**(6). P. 2157.
 - [9] Johri A., Manoharan P.K. // Sol. Phys. 2016. **291**(5). P. 1433.
 - [10] Глубокова С.К., Глянцев А.В., Тюльбашев С.А., Чашей И.В., Шишов В.И. // Астрон. ж. 2015. **92**. № 1. С. 38.
 - [11] Шишов В.И., Чашей И.В., Орешко В.В., Логвиненко С.В., Тюльбашев С.А., Субаев И.А., Свидский П.М., Лапшин В.Б., Дагжесаманский Р.Д. // Астрон. ж. 2016. **93**, № 12. С. 1045.
 - [12] Глянцев А.В., Тюльбашев С.А., Чашей И.В., Шишов В.И. // Астрон. ж. 2015. **92**, № 1. С. 46.
 - [13] Чашей И.В., Тюльбашев С.А., Субаев И.А., Чернышова А.И. // Астрон. ж. 2019. **96**, № 5. С. 407.
 - [14] Чашей И.В., Лебедева Т.О., Тюльбашев С.А., Субаев И.А. // Астрон. ж. 2020. **97**, № 1. С. 73.
 - [15] Чашей И.В., Лебедева Т.О., Тюльбашев С.А., Субаев И.А. // Астрон. ж. 2021. **98**, № 11. С. 949.

On a possibility of short-term forecast of geomagnetic disturbances using an example of a coronal mass ejection in November 2021

V.R. Lukmanov^a, S.A. Tsytl'bashev^b, I.V. Chashey^c

¹*Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow 119991, Russia*

E-mail: ^alukmanov@prao.ru, ^bserg@prao.ru, ^cchashey@prao.ru

The results of previous papers of interplanetary scintillation observation at the modernized meridian-type radio telescope BSA LPI are briefly described. Observation results for the coronal mass ejection (CME) and associated magnetic storm in November 2021 are presented. Scintillation enhancement started at a heliocentric distance of 0.7 AU 27.5 hours after the flare, the geomagnetic storm started 14.5 hours after the start of scintillation enhancement. The possibility of short-time space weather forecast by interplanetary scintillation monitoring data is demonstrated by the analysis results for this event.

PACS: 96.60.ph.

Keywords: interplanetary scintillation, coronal mass ejections (CME), corotating interaction regions (CIR), space weather.

Received 19 May 2022.

Сведения об авторах

1. Лукманов Владислав Рамильевич — мл. науч. сотрудник; e-mail: lukmanov@prao.ru.
2. Тюльбашев Сергей Анатольевич — доктор физ.-мат. наук, директор Пушинской Радиоастрономической обсерватории (ПРАО); тел.: (495) 668-88-88 доб. 2053, e-mail: serg@prao.ru.
3. Чашей Игорь Владимирович — доктор физ.-мат. наук, зам. директора ПРАО; тел.: (495) 668-88-88 доб. 2098, e-mail: chashey@prao.ru.