АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2023, том 100, № 6, с. 535–545

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ НА РАДИОТЕЛЕСКОПЕ БСА ФИАН

© 2023 г. В. Р. Лукманов[1,*], И. В. Чашей[1], С. А. Тюльбашев[1], И. А. Субаев[1]

[1] *Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Астрокосмический центр, Пущинская радиоастрономическая обсерватория, Пущино, Московская обл., Россия*

******E-mail: lukmanov@prao.ru*

Поступила в редакцию 07.03.2023 г.
После доработки 18.04.2023 г.
Принята к публикации 18.05.2023 г.

В мониторинговых данных, ежедневно получаемых на радиотелескопе Большая Синфазная Антенна (БСА), с апреля 2021 г. по октябрь 2022 г. выделено 11 событий, для которых после рентгеновских вспышек в солнечной короне на Земле происходили магнитные бури. Данные мониторинга межпланетных мерцаний рассматривались совместно с данными о вспышечной активности Солнца и простой кинематической моделью распространения выброса. На основании найденных оценок скорости выброса между Солнцем и зондируемой областью в предположении постоянства скорости вычислялось время прихода выброса к Земле. Из 11 рассмотренных событий 7 связаны с уединенными вспышками, с последующим выбросом корональной массы (CME), а 4 имеют более сложный характер и, возможно, связаны с коротирующими возмущениями или наложением коротирующих и вспышечных возмущений. Для всей совокупности событий среднее время реального начала магнитной бури после времени, предсказанного моделью, составило 3.6 ч, а среднее время между началом усиления мерцаний и началом магнитной бури составило 20.1 ч. Для событий, связанных с уединенными вспышками, магнитная буря в среднем начиналась через 0.8 ч после предсказанного времени и через 15.6 ч после начала усиления мерцаний. Запаздывание магнитных бурь относительно предвычисленного времени, по-видимому, связано с торможением выброса между зондируемой областью солнечного ветра и орбитой Земли.

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

DOI: 10.31857/S0004629923060063, **EDN:** VCBPBX

1. ВВЕДЕНИЕ

Корональные выбросы массы (CME) наряду с коротирующими структурами (CIR) при воздействии на магнитосферу Земли могут вызывать магнитные бури. Для краткосрочного прогноза космической погоды важны наблюдения таких крупномасштабных возмущений до их прихода к Земле. В разное время предпринимались попытки предсказания времени прихода возмущения с помощью эмпирических моделей (например, в работе [1]) и глобальных магнитогидродинамических моделей, таких как ENLIL [2], SUSANOO [3, 4] и EUHFORIA [5]. При расчете магнитогидродинамических моделей [1–5] обычно задается распределение магнитных полей, скорости и плотности солнечного ветра на исходной окружающей Солнце сферической поверхности радиуса около 0.1 а.е.

В данной работе рассматривается простая кинематическая модель распространения CME. В рамках модели строятся двумерные теоретические карты индексов мерцаний, которые сравниваются с картами, полученными по наблюдениям мерцаний. По данным о вспышечной активности Солнца в рентгеновском диапазоне подбирается вспышка, которая вызвала выброс, далее по сравнению модели с наблюдательными картами оценивается средняя скорость распространения выброса между короной и зондируемой областью солнечного ветра и в предположении о постоянстве скорости выброса рассчитывается время прихода выброса к Земле. Рассматриваемая кинематическая модель не учитывает возможную эволюцию выброса. Такое предположение может быть обосновано тем, что в промежутке между областью усиленных мерцаний и орбитой Земли движущийся практически радиально сформировавшийся солнечный ветер заведомо является сверхзвуковым и сверхальвеновским.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА

Распространение СМЕ можно выявить по наблюдениям мерцаний компактных радиоисточников на межпланетной плазме. При прохождении выброса поперек луча зрения изменяется степень мерцаний источников, что и позволяет фиксировать выбросы [6–11]. Наблюдения межпланетных мерцаний в Пущинской радиоастрономической обсерватории начались сразу после их обнаружения Хьюишем в 1964 г. [12]. В настоящее время наблюдения мерцаний проводятся на радиотелескопе Большая Синфазная Антенна Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (БСА ФИАН). БСА ФИАН – это радиотелескоп меридионального типа. Наблюдения на нем идут в круглосуточном режиме на центральной частоте 111 МГц, с используемой полосой частот 2.5 МГц. 96 неуправляемых лучей БСА ФИАН перекрывают склонения от –8°до +42°.

Характерный пространственный масштаб неоднородностей в солнечном ветре, возбуждающий мерцания на частоте 111 МГц, порядка сотен километров, временной порядка 1 с. Распространяющиеся возмущения можно регистрировать по усилению мерцаний на расстояниях больше 0.4–0.5 а.е. от Солнца, так как на более близких расстояниях мерцания переходят в режим насыщения и подавляются размером источника. Таким образом, имеется возможность детектирования СМЕ до прихода возмущения к Земле. В работе [13] продемонстрирован пример наблюдения усилений мерцаний перед приходом СМЕ к Земле, сопровождавшимся магнитной бурей 4 ноября 2021 г. На двумерных (по времени и склонению) цветовых суточных картах в настоящей работе усиление мерцаний отражается красным цветом и оттенками красного, не возбужденная среда – оранжевым цветом, а ослабление мерцаний – желтым цветом. При просмотре последовательных дней на картах видны области, где мерцания усилены по сравнению с днями, когда вспышки не наблюдаются.

3. РАСЧЕТ ДВУМЕРНЫХ КАРТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНДЕКСОВ МЕРЦАНИЙ НА ОСНОВЕ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СМЕ

В настоящей работе СМЕ представляется как область с повышенной концентрацией плазмы, распространяющаяся радиально от Солнца с постоянной скоростью. Эта область ограничена двумя сферическими поверхностями, находящимися на расстоянии R_1 и R_2, от центра Солнца, а внешняя граница этой области представляет собой коническую поверхность с вершиной в центре Солнца (на рис. 1 затемненная область).

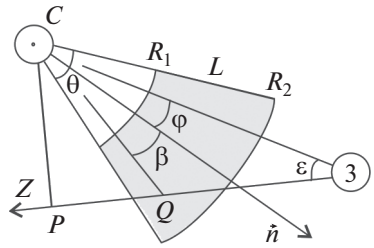


Рис. 1. Схематическое изображение модели выброса. θ – угловой раскрыв конуса возмущения, L – толщина области повышенной концентрации плазмы, $R_{1,2}$ – внутренняя и внешняя границы, P – прицельная точка луча зрения на просвечивающий источник, φ – угол межу осью СМЕ и направлением на Землю, β – текущая угловая координата, С – Солнце, З – Земля, ε – элонгация (угол между направлением на Солнце и на наблюдаемый источник при наблюдениях с Земли).

Предполагается, что все части области СМЕ двигаются с одинаковой скоростью радиально от Солнца, а значит движутся с одинаковой скоростью и сферические границы области. Таким образом, сохраняется расстояние между сферическими границами области или толщина области L. При этом концентрация частиц в области убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от Солнца. Параметрами используемой модели, при определении влияния распространения СМЕ на магнитосферу Земли, являются толщина выброса (L), угол раскрыва (θ), направление распространения выброса по отношению к Земле (угол φ между центральной осью СМЕ (направляющий единичный вектор $\bar{n}$ в направлении распространения СМЕ) и линией “центр Солнца–центр Земли”). Наиболее опасные случаи возникают в случае центрального распространения СМЕ на Землю (φ = 0, СМЕ типа гало).

Индекс межпланетных мерцаний при распространении СМЕ вычисляется в предположении, что внутри области СМЕ электронная плотность в некоторое фиксированное количество N раз больше, чем вне ее. Формула для вычисления индекса мерцаний в режиме слабых мерцаний следующая [14]:

$$m^2 = 2\pi \int\limits_{-1\mathrm{AU}\cos\varepsilon}^{+\infty} dZ \int\limits_{0}^{+\infty} \Phi_e(q) \sin^2\left(\frac{q^2 Z'}{2k}\right) F^2(q)\, q dq, \quad (1)$$

где $\Phi_e(q) = Cq^{-n}$ – пространственный спектр флуктуаций электронной плотности межпланетной плазмы, $C \sim n_e^2(r)$ – структурная константа, $r = \sqrt{r_0^2 + Z^2}$ – расстояние от центра Солнца до точки на луче зрения, $r_0 = 1\,\mathrm{AU}\sin\varepsilon$ – расстояние от центра Солнца до прицельной точки P, координата Z на луче зрения отсчитывается от при-

цельной точки, $n_e(r)$ – электронная плотность (в невозмущенной межпланетной среде $n_e \sim r^{-2}$), n – индекс турбулентности (в рамках данной работы предполагается, что $n = 3.6$); $\sin^2\left(\frac{q^2 Z'}{2k}\right)$ – фильтр Френеля, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число, длина волны $\lambda = 2.7$ м ; $F(q) \sim \exp\left(-\frac{1}{4}\theta_0^2 k^2 Z'^2\right)$ – пространственный спектр радиоисточника, θ_0 – радиус источника по уровню $\frac{1}{e}$ (все наблюдаемые мерцающие источники предполагаются точечными, т.е. $\theta_0 = 0$ и $F(q) \equiv 1$); $Z' = Z + 1\,\mathrm{AU}\cos\varepsilon$ – расстояние от точки на луче зрения до наблюдателя, ε – элонгация.

Структурная константа при предположении, что внутри СМЕ электронная плотность выше в N раз, чем была бы, если бы в этой точке не было СМЕ, модифицируется следующим образом:

$$C = \begin{cases} \frac{C_0}{r^4} & \text{вне СМЕ,} \\ \frac{C_0}{r^4} N^2 & \text{внутри СМЕ.} \end{cases} \quad (2)$$

Константа C_0 *a priory* неизвестна, она введена, чтобы показать, что индекс мерцаний по формуле (1) определяется с точностью до постоянного множителя. Для определения данной константы предполагается, что индекс мерцаний в отсутствие СМЕ принимает свое наибольшее возможное значение 0.6 на элонгации 25°. Согласно [14] именно на этой элонгации наблюдаемый индекс мерцаний наибольший, на меньших элонгациях мерцания переходят в режим насыщения и подавляются размером источников.

Для оценки индекса мерцаний в данном направлении (α, δ) нужно знать положение СМЕ в данный момент времени. Если известен момент вспышки, которая сопровождалась рассматриваемым СМЕ, то через время Δt внешняя граница СМЕ при заданной скорости распространения СМЕ v будет на расстоянии от центра Солнца, равном $R_2 = v\Delta t$. Критериями нахождения точки Q на луче зрения внутри СМЕ являются следующими. Во-первых, очевидно, что расстояние от центра Солнца до точки Q должно быть заключено в пределах от R_1 до R_2. Во-вторых, угол β между векторами $\overrightarrow{CQ}$ и $\vec{n}$ должен быть меньше, чем половина угла раскрыва $\frac{\theta}{2}$. Иначе, критерии попадания точки Q в СМЕ можно выразить формулой:

$$\begin{cases} R_1 \le CQ \le R_2, \\ \cos\beta = \dfrac{\left(\overrightarrow{CQ}, \vec{n}\right)}{CQ} \ge \cos\dfrac{\theta}{2}. \end{cases} \quad (3)$$

Направление вектора $\vec{n}$ может быть определено по солнечным координатам активных областей Солнца, где возникают вспышки. Информация о времени вспышек, активных областях, из которых они исходят, координаты активных областей содержатся по адресу https://tesis.xras.ru. Солнечные координаты даны в виде широты, отсчитываемой от солнечного экватора, и солнечной долготы, отсчитываемой от меридиана, в плоскости которого расположена Земля (таким образом, солнечная долгота Земли равна нулю). Так как известно время возникновения вспышки, а также угловая скорость вращения Солнца, можно оценить угол φ, и, следовательно, направление вектора $\vec{n}$.

Как сказано выше, для более ясного выделения выброса используются динамические карты, когда производится попиксельное деление карт предыдущего и текущего дней. При счете индекса мерцаний по формуле (1) мы просчитываем ожидаемый индекс мерцаний как для спокойного Солнца, так и внутри выброса. Однако для теоретической модели значения индексов мерцаний за два последовательных дня в областях, не затронутых выбросом, совпадают. Поэтому при попиксельном делении для таких областей частное получается равным единице. Таким образом, в модельных динамических картах фактически исчезает “спокойное” Солнце и виден лишь выброс. Для реальных динамических карт это, конечно, не так. В любой данной точке на небе в солнечном ветре постоянно меняются скорость и концентрация даже для “спокойного” Солнца и поэтому значение индексов мерцаний в пикселях за разные дни слегка не совпадает. Это приводит к пятнистости цветов в реальных картах индексов мерцаний, в отличие от теоретических карт.

4. СРАВНЕНИЕ МОДЕЛЬНЫХ РАСЧЕТОВ С ДАННЫМИ НАБЛЮДЕНИЙ

Оценку времени прихода СМЕ к Земле предлагается делать следующим образом. При наблюдении областей мерцаний на двумерной карте ищется вспышка за 2–3 сут до даты карты и подбираются параметры СМЕ таким образом, чтобы модельная и наблюдательная карты визуально согласовывались наилучшим образом. При вычислениях модельных пространственных распределений уровня мерцаний предполагается, что усиление концентрации (параметр N) и угловой раскрыв конуса СМЕ фиксированы. Варьируется только скорость распространения СМЕ, которая считается ключевым параметром, наиболее суще-

ственным для оценок времени прихода выброса к Земле. По подобранной скорости распространения CME (которая соответствует средней скорости выброса во внутренней области гелиоцентрических расстояний), рассчитывается время прихода возмущения к земной орбите, которое, как можно предположить, совпадает с началом магнитной бури. При этом скорость распространения возмущений предполагается постоянной на пути от Солнца до орбиты Земли. В работе [13] оценивалось замедление распространения выброса из-за нагребания фоновой плазмы на примере события в ноябре 2021 г. Средняя скорость выброса между Солнцем и зондируемой областью получилась 1060 км/с, а средняя скорость между Солнцем и Землей 990 км/с. В рамках данной работы эффектом замедления скорости выброса пренебрегается.

Всего в 2021–2022 гг. было найдено 11 событий, для которых удалось таким образом оценить время прихода возмущения к Земле. Проводилось сравнение двумерных карт динамических индексов мерцаний (отношение индекса мерцаний в текущий день к индексу мерцаний в предыдущий день в том же направлении) по данным наблюдений и модельных в дни, предшествовавшим магнитным бурям. Методика построения двумерных карт распределения уровня мерцаний подробно описана в работе [13]. Индекс мерцаний индивидуального источника в наблюдениях определяется как $m^2 = \langle dI^2 \rangle / \langle I \rangle^2$. В наших наблюдениях в течение суток наблюдается несколько тысяч мерцающих источников. Вся полоса неба разбивается на квадратные пиксели размером 3° × 3°, подсчитывается количество мерцающих источников n в каждом пикселе. В соответствии с [13] и цитируемыми там работами эта величина пропорциональна среднему квадрату индекса мерцаний в данном направлении, $n \sim \langle m^2 \rangle$.

Дуги на приведенных ниже наблюдательных картах показывают гелиоцентрическое расстояние до прицельной точки (ближайшей к Солнцу точки на луче зрения). При построении модельных карт считалось, что индекс мерцаний не превышает значения 0.6 (если при подсчете по формуле (1) получалось выше этого значения, то данное значение менялось на 0.6). Самая внутренняя дуга, соответствующая расстоянию 0.4 a.e., является границей областей сильных и слабых мерцаний и соответствует элонгации 23°. В рамках данной работы мерцания рассматривались в зоне слабых мерцаний, когда $\varepsilon > 23°$.

На рис. 2–12 приведены карты в периоды, соответствующие магнитным бурям, вызванным CME. На автоматически генерируемых картах, отображающих динамические индексы мерцаний, в верхней части показана дата наблюдений. На модельных картах в верхней части дана слева направо следующая информация: дата, для которой строилась данная модельная карта; увеличение электронной концентрации внутри CME (принимается $N^2 = 9$); угол раскрыва CME (θ предполагается равным 100°); толщина CME (L предполагается равной 0.1 AU); начальное положение CME (R_2 в момент корональной вспышки предполагается равным 0.0046 AU, что соответствует поверхности Солнца); скорость распространения CME (определяется через время запаздывания прихода возмущения в зондируемую область по отношению ко времени вспышки); гелиографические координаты места вспышки; время UT вспышки; время, когда CME достигает границы областей сильных и слабых мерцаний; время, когда CME достигает орбиты Земли; угол φ между осью выброса и направлением на Землю (см. рис. 1). На приведенных далее рисунках для всех рассмотренных событий верхняя панель – это наблюдательные карты, нижняя панель – модельные карты.

В табл. 1 приведены результаты моделирования и сравнения предсказанного и реального времени магнитной бури.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Колонки в табл. 1 с данными по обнаружению усиления мерцаний на динамических картах и временем начала магнитной бури однозначно указывают, что обнаружение выброса в радиодиапазоне для всех вспышек наблюдалось раньше, чем приход выброса на Землю. Этот результат говорит о правильности модельного подхода к анализу двумерных карт с динамическими индексами мерцаний. В то же время следует отметить, что краткосрочный прогноз космической погоды рассматриваемым методом не всегда возможен и точен по ряду причин:

1) Неизвестна точная модель межпланетной среды. В рамках данной работы модель межпланетной плазмы предполагается сферически симметричной, в то время как в работе [14] показано, что солнечный ветер в среднем отличается от сферически-симметричного случая, объясняется это существованием плотного приэкваториального токового слоя.

2) Также неизвестна точная модель CME. Неизвестна реальная форма выбросов, неизвестно распределение электронной плотности внутри выброса. Неизвестны реальные размеры выброса (угол раскрыва и толщина) и как они меняются с удалением CME от Солнца. Возможно, электронная плотность убывает при отклонении от центральной оси CME: в центральной оси плотность максимальная, а при приближении к коническим краям она плавно переходит к плотности за пределами выброса.

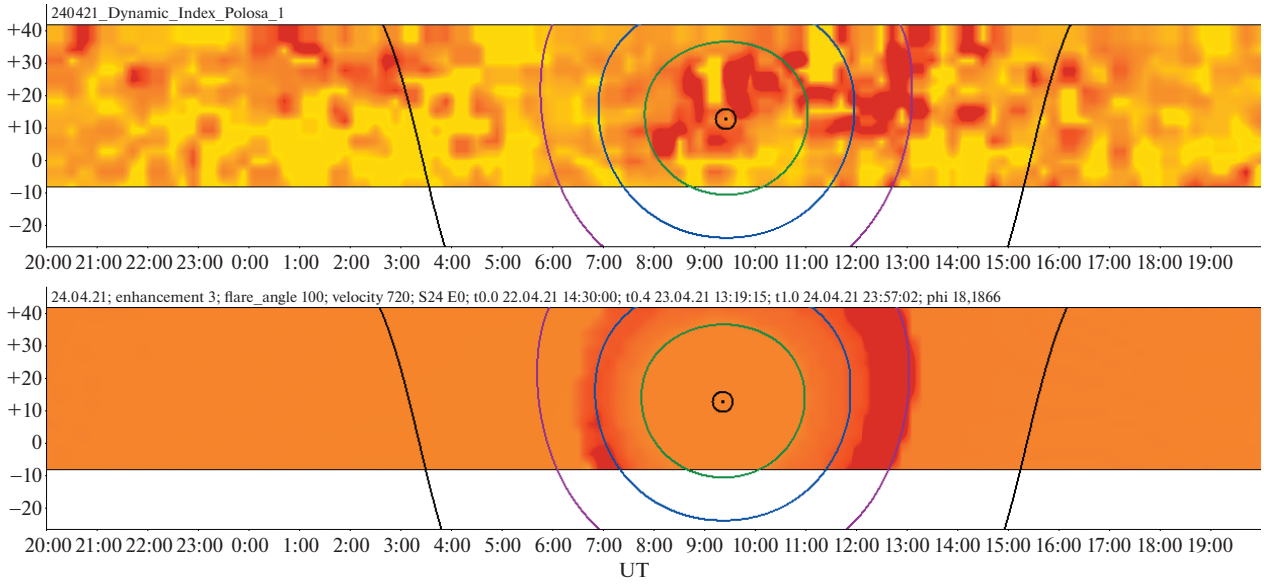


Рис. 2–12. Верхняя панель – наблюдательные карты распределения отношения уровней мерцаний за данный день к предыдущему, нижняя панель – модельные карты. По оси ординат – склонение от –8° до +42°, по оси абсцисс – локальное (московское) время суток, кульминация Солнца в 12:30 мск. Желтый цвет соответствует спокойным условиям, а насыщенный красный – усиленным по сравнению с предыдущим днем мерцаниям; Рис. 2. Буря 25.04.2021.

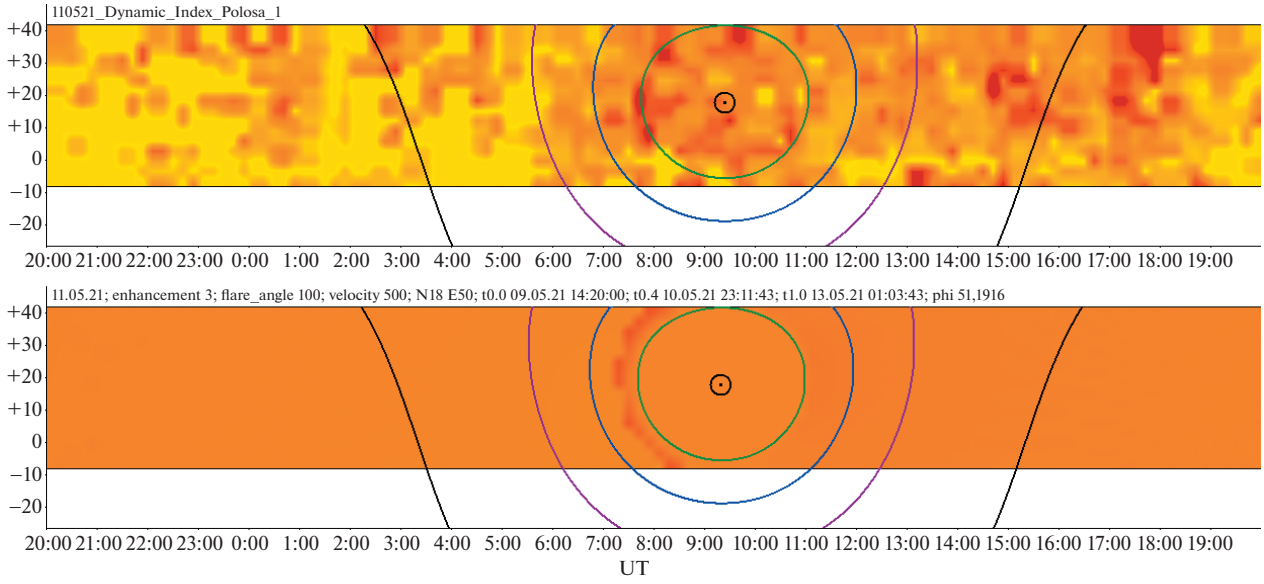


Рис. 3. Буря 12.05.2021.

3) Данная модель рассматривает только случай распространения одного CME в межпланетном пространстве, пренебрегая наличием остальных CME. Иногда происходит наложение CME после серии вспышек, при этом неизвестно распределение электронной плотности в каждом из них, и в наблюдаемые мерцания каждый выброс может вносить сравнимый вклад. Тогда становится сложным выделение конкретного выброса, который приведет к магнитной буре, и оценка времени прихода бури к Земле становится неточной. Кроме того, возможно взаимное влияние CME и CIR (коротирующих структур).

4) Не обнаружение CME ввиду ограниченности наблюдений радиотелескопа и распространение CME с высокой скоростью, когда CME до-

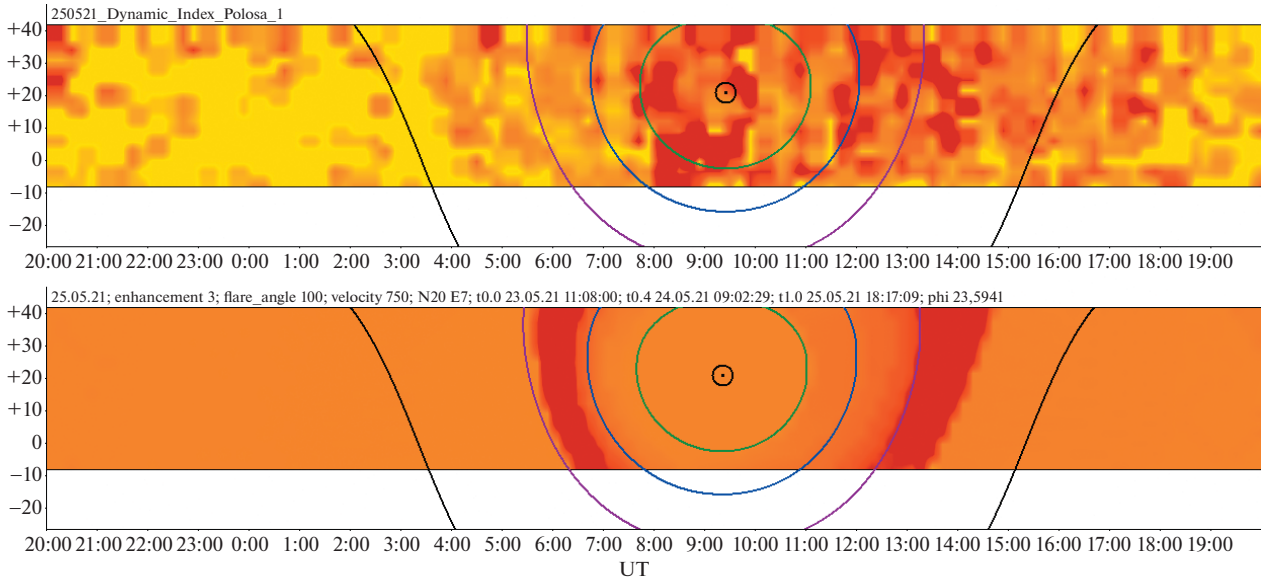


Рис. 4. Буря 26.05.2021.

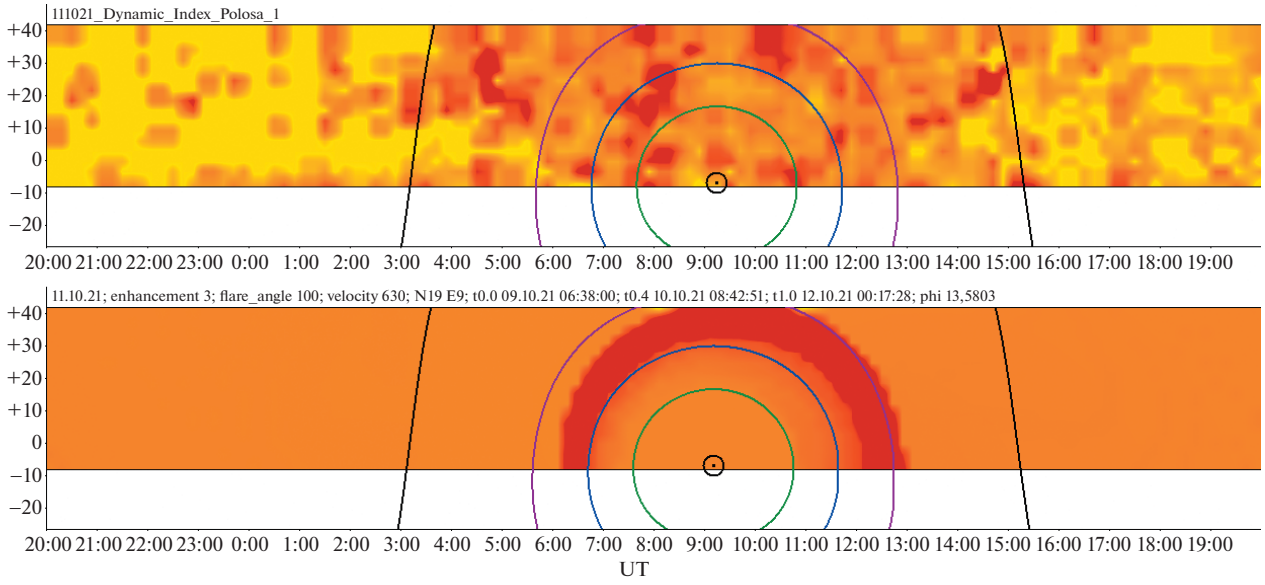


Рис. 5. Буря 12.10.2021.

стигает Земли менее или чуть более, чем за 24 ч, и мерцания не успевают фиксироваться. Так как БСА ФИАН в каждый момент времени “смотрит” только в определенные участки неба, то выброс может еще не достигнуть зоны слабых мерцаний (на расстоянии 0.4 а.е. от Солнца), когда радиотелескоп “смотрит” на выброс, а когда выброс войдет в зону слабых мерцаний, то радиотелескоп направлен на другие участки неба. Таким образом, возможна магнитная буря без наблюдаемых мерцаний на картах.

Пункты 3–4 и, частично, пункт 2 решаются использованием для наблюдений межпланетных мерцаний с помощью другого вида радиотелескопов. Антенные решетки типа LOFAR/MWA имеют поле зрения несколько сотен квадратных градусов и диаграммы направленности, управляемые как по прямому восхождению, так и по склонению. Следовательно, на таких решетках, переключая их поле зрения в разных направлениях, можно строить квазиодновременную карту мерцаний по всему небу за примерно полчаса-час

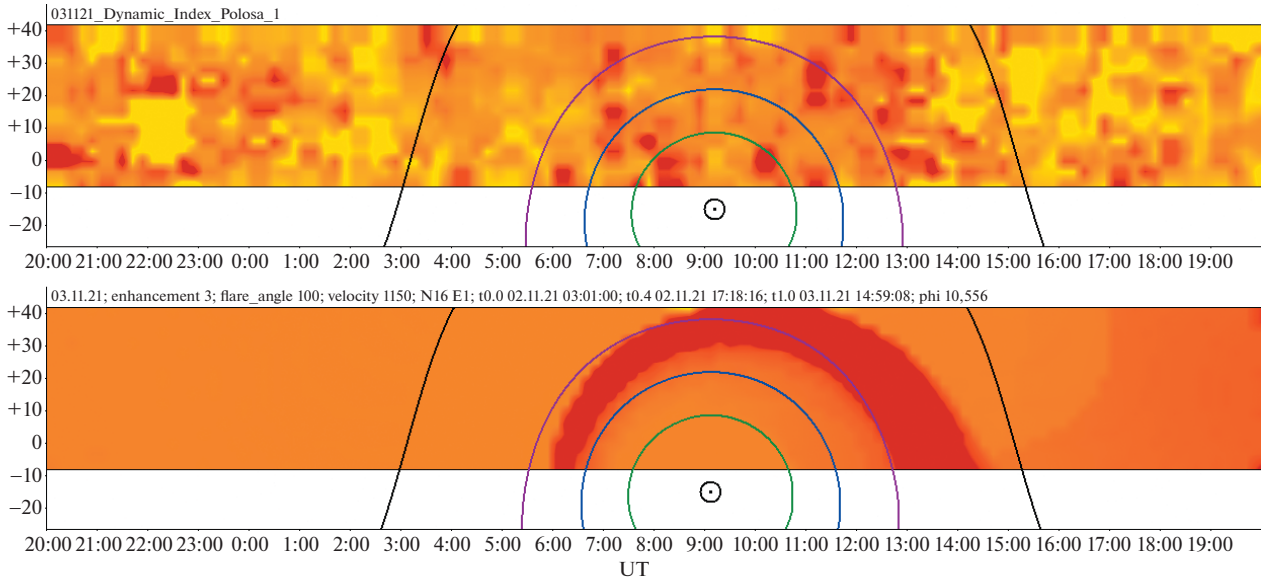


Рис. 6. Буря 03.11.2021.

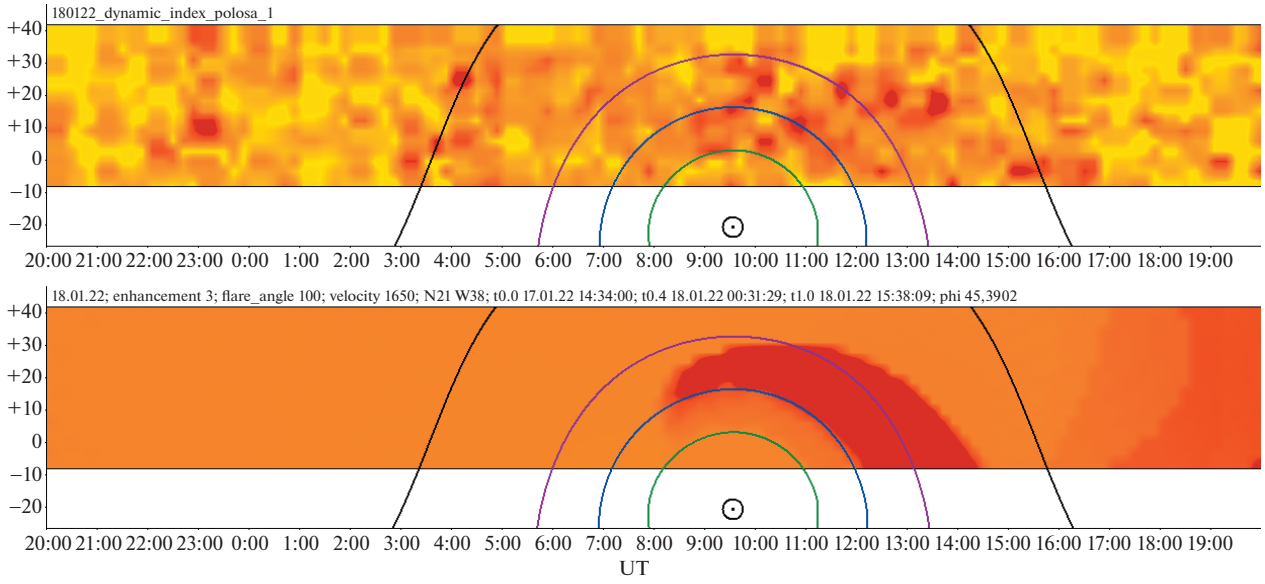


Рис. 7. Буря 19.01.2022.

с учетом их реальной чувствительности. Имея ежечасные карты, а не ежесуточные, как для БСА ФИАН, можно будет увидеть в деталях распространение выброса во времени, форму выброса, размер выброса. Даже самые быстрые выбросы, имеющие скорость 2000 км/с, распространяются от 0.4 а.е. до 1 а.е. за 12.5 ч. За время распространения выброса может быть построено несколько карт, позволяющих отследить и точно рассчитать скорость выброса, даже для случаев, когда вспышка в рентгене не фиксируется. Несколько радиотелескопов типа антенных решеток, расположенных на различных долготах, позволяют страховать риски непогоды и возникающих локальных помех. Такие ежечасные карты могут также отслеживать и слияние выбросов разной природы. Пункт первый не решается напрямую в наблюдениях, но и не влияет кардинально на возможность предсказания. Будь то превалирование сферического слоя межпланетной плазмы (в годы максимальной активности Солнца) или превалирование приэкваториального токового слоя (в годы минимальной активности Солнца) изменения индексов мерцаний компактных радиоисточни-

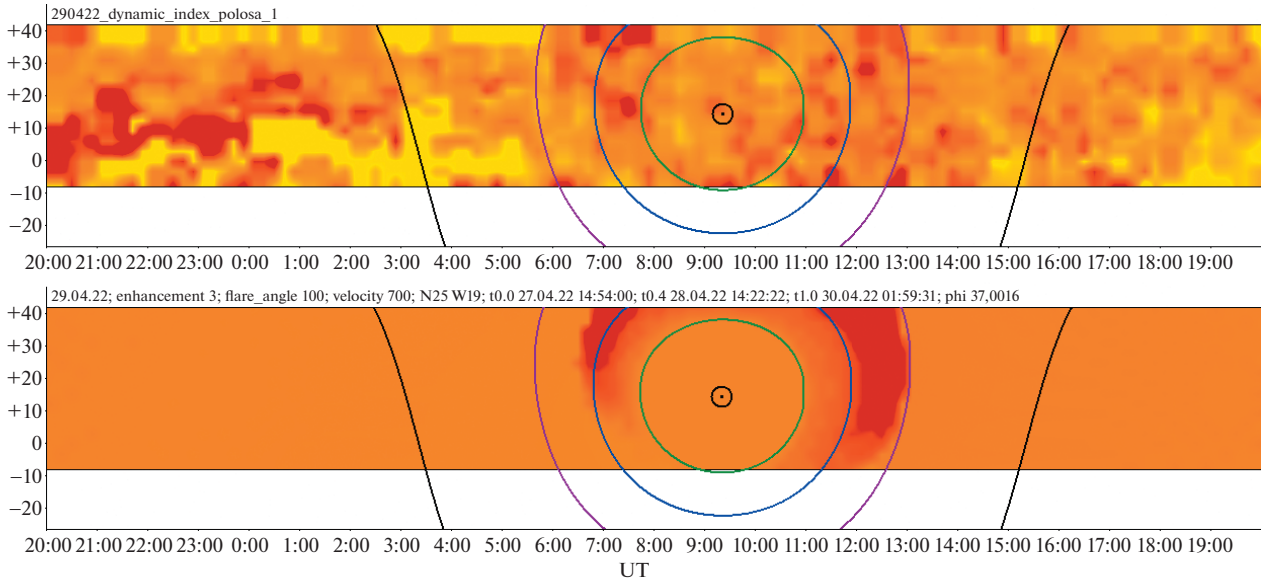


Рис. 8. Буря 30.04.2022.

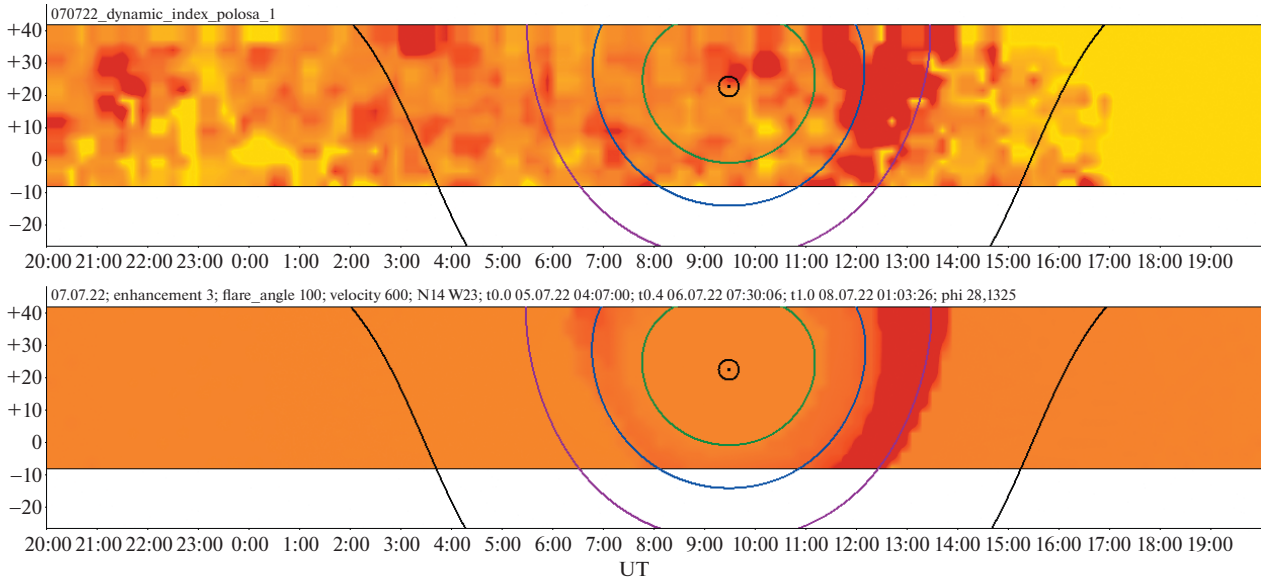


Рис. 9. Буря 07.07.2022.

ков при прохождении выброса будут наблюдаться, и, следовательно, возможности краткосрочного прогноза “Космической Погоды” существенно возрастут.

В табл. 1 и на рис. 2–12 приведены те случаи, когда мерцания наблюдались после вспышек, которые затем привели к магнитной буре. Среднее время реального начала магнитной бури после предсказанного составило 3.6 ч. Среднее время между началом наблюдения усиления мерцаний и началом магнитной бури составило 20.1 ч. Таким образом, описанная методика позволяет в большинстве случаев заблаговременно предупредить о приходе возмущения к Земле.

Отдельно следует рассмотреть события 2, 3, 6 и 9, помеченные в первом столбце табл. 1 звездочкой. В случае 2 магнитная буря наступила на 13 ч раньше прогнозируемого времени. Отметим, что приход возмущения к Земле не всегда сопровождается магнитной бурей, возмущение после рассматриваемой вспышки могло прийти уже после магнитной бури, при этом новую бурю пришед-

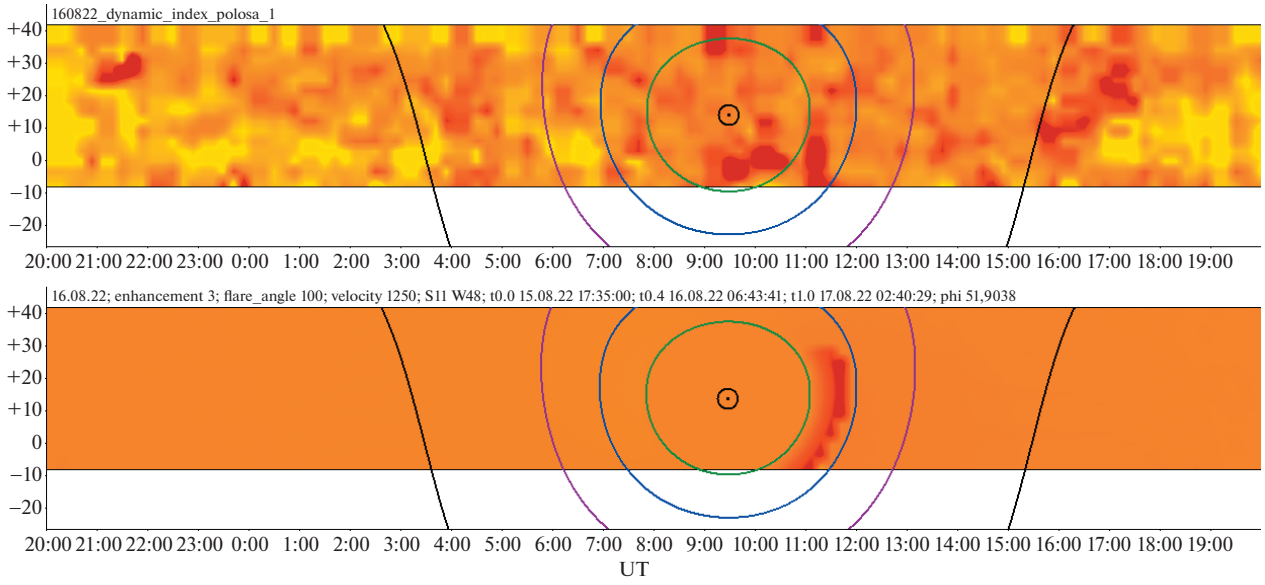


Рис. 10. Буря 17.08.2022.

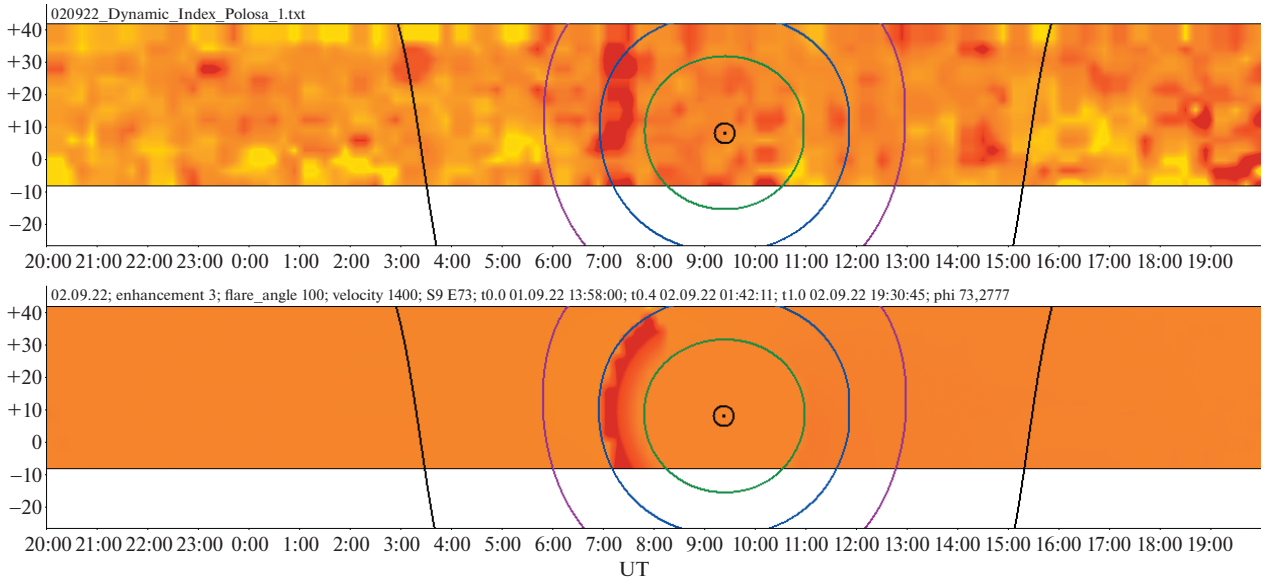


Рис. 11. Буря 03.09.2022.

шее возмущение не вызвало. А сама магнитная буря 12 мая 2021 г. могла быть вызвана приходом коротирующей структуры к Земле. Коротирующие структуры вращаются вместе с Солнцем и приходят на Землю с периодом примерно 27 дней. Магнитные бури фиксировались 25.01.2021, 20.03.2021, 15.04.2021, 02.08.2021, 28.08.2021, т.е. через промежутки времени, кратные 27 дням, относительно события 2. В случае 3 магнитная буря была через сутки после прогнозируемого времени. Бури были 07.02.2021 и 01.12.2021, что соответствует времени, кратному 27 сут между указанными датами и рассматриваемой бурей 26.05.2021. В случае 6 буря 19.01.2022 пришла через 8.4 ч после предсказанного времени. Через временные промежутки, кратные 27 сут относительно события 6, магнитные бури были зафиксированы 13.03.2022, 10.04.2022, 15.10.2022. В случае 9 для бури 17.08.2022, которая пришла через 15.5 ч после предсказанного времени, бури, даты которых отстоят от бури 17.08.2022 на интервалы, кратные 27 сут, происходили 30.04.2022, 28.05.2022, 25.06.2022, 21.07.2022, а также 30.12.2022. Кроме того, перед бурей 17.08.2022 фиксировалась серия

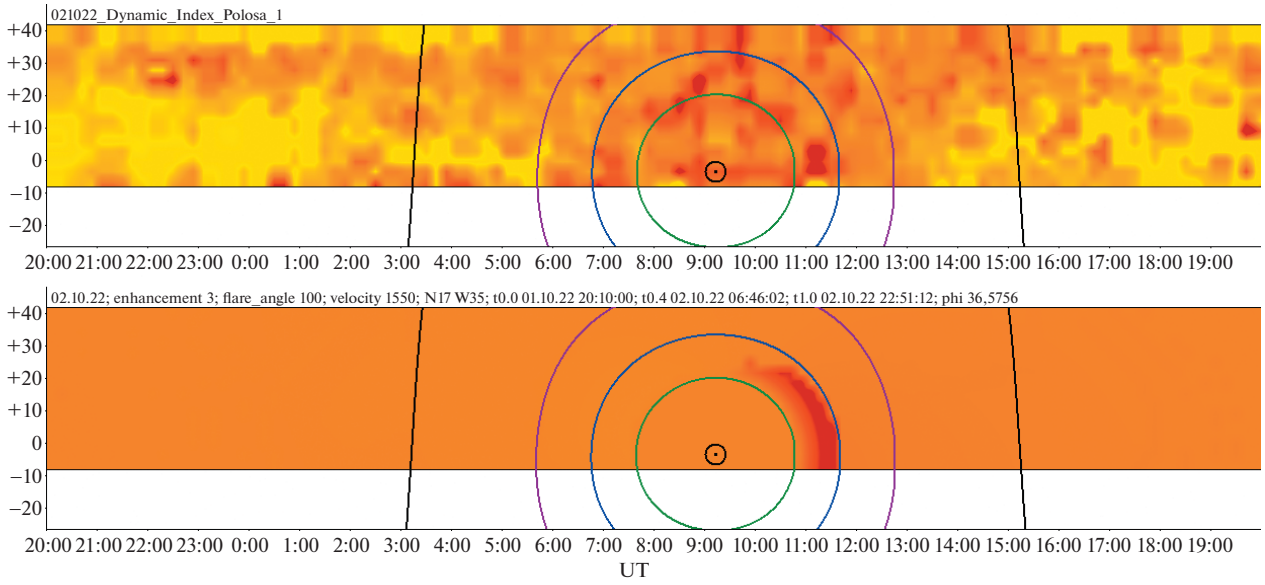


Рис. 12. Буря 02.10.2022.

Таблица 1. Информация о рентгеновских вспышках на Солнце, ассоциированных с ними магнитных бурях на Земле и результатах модельных расчетов времени прихода выбросов к Земле

№	Вспышка			v, км/с	φ, град	Буря				
	Класс вспышки	Место вспышки	Время вспышки, UT			Оценочное время прихода, UT	Интервал времени прихода, UT	Время между началом обнаружения мерцаний и началом бури, ч	Разница реального и предсказанного времени, ч	G-индекс
1	C2.5	S24 E00	22.04.2021 14:30	720	18.2	24.04.2021 23:57	25.04.2021 00:00–03:00	13.5	0.05	G1
2*	C4.0	N18 E50	09.05.2021 14:20	500	51.2	13.05.2021 01:04	12.05.2021 12:00–15:00	28.25	−13.07	G3
3*	M1.1	N20 E07	23.05.2021 11:08	750	23.6	25.05.2021 18:17	26.05.2021 18:00–21:00	35.5	23.72	G1
4	M1.6	N19 E09	09.10.2021 06:38	630	13.6	12.10.2021 00:17	12.10.2021 00:00–03:00	18	−0.28	G2
5	M1.7	N16 E01	02.11.2021 03:01	1100	10.6	03.11.2021 14:59	03.11.2021 21:00–24:00	13.5	6.02	G3
6*	C2.8	N21 W38	17.01.2022 14:34	1600	45.4	18.01.2022 15:38	19.01.2022 00:00–03:00	14.25	8.37	G2
7	C7.6	N25 W19	27.04.2022 14:54	700	37.0	30.04.2022 02:00	30.04.2022 03:00–06:00	20.5	1	G1
8	C9.8	N14 W23	05.07.2022 04:07	600	28.1	08.07.2022 01:03	07.07.2022 21:00–24:00	14	−4.05	G1
9*	C9.0	S11 W48	15.08.2022 17:35	1250	51.9	17.08.2022 02:40	17.08.2022 18:00–21:00	34	15.33	G2
10	C4.1	S09 E73	01.09.2022 13:58	1400	73.2	02.09.2022 19:31	03.09.2022 00:00–03:00	17	4.48	G1
11	M5.8	N17 W35	01.10.2022 20:10	1550	36.6	02.10.2022 2 2:51	02.10.2022 21:00–24:00	13	−1.85	G1

* Помечены случаи, когда роль указанных вспышек в магнитных бурях неочевидна.

вспышек, которые могли вызвать несколько взаимодействующих друг с другом выбросов, поэтому трудно выделить именно тот выброс, который вызвал магнитную бурю. Без учета 4 указанных случаев, которые, возможно, связанны с CIR или наложением CME и CIR, магнитная буря в среднем начиналась через 0.8 ч после предсказанного времени начала бури и через 15.6 ч после начала наблюдения усиления мерцаний.

Для более точного прогноза космической погоды желательно проведение аналогичных наблюдений за мерцаниями в разных точках планеты. Кроме того, так как приход возмущений не всегда сопровождается магнитной бурей, желательны данные о B_z компоненте межпланетного магнитного поля [15]. Также необходимо учитывать магнитные бури, вызванные CIR. В настоящее время модель CIR находится в стадии разработки. Но известно, что CIR приходят каждые 27 сут к Земле. Поэтому если какая-то магнитная буря, вызванная CIR, уже произошла, то можно ожидать, что примерно через 27 сут (или через время, кратное 27 сут) магнитная буря, вызванная тем же CIR, может снова повториться.

6. ВЫВОДЫ

Проведенный анализ показывает, что регулярный мониторинг межпланетных мерцаний совместно с простой моделью и данными о вспышечной активности солнечной короны позволяет с опережением 15–20 ч предсказывать приход к Земле возмущений типа CME. Надежность краткосрочного прогноза оказывается выше в случае уединенных вспышек. Для совокупности рассмотренных событий магнитные бури в среднем начинаются позже прогнозируемого времени их начала. Такое запаздывание, по-видимому, объясняется торможением выбросов в области гелиоцентрических расстояний между 0.5 и 1 а.е. Сходная картина имела место и для рассмотренного в работе [13] события в ноябре 2021 г.: средняя скорость выброса между Солнцем и зондируемой областью составляла 1060 км/с, а средняя скорость между Солнцем и орбитой Земли была несколько меньше, 990 км/с. Торможение выброса обусловлено нагребанием фоновой плазмы и достаточно хорошо описывается эмпирической моделью drag force [16]. Пространственные распределения наблюдаемых и моделируемых усиленных мерцаний не всегда детально совпадают. Более точное соответствие может быть достигнуто варьированием не только скорости выброса, но и других параметров модели.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят антенную группу БСА ФИАН за обеспечение непрерывности наблюдений в мониторинговом режиме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *N. Gopalswamy, A. Lara, S. Yashiro, M. L. Kaiser, and R. A. Howard*, J. Geophys. Res. **106**, 29207 (2001).
2. *D. Odstrcil*, Adv. Space Res. **32**, 497 (2003).
3. *D. Shiota, R. Kataoka, Y. Miyoshi, T. Hara, C. Tao, K. Masunaga, Y. Futaana, and N. Terada*, Space Weather **12**, 187 (2014).
4. *D. Shiota and R. Kataoka*, Space Weather **14**, 56 (2016).
5. *J. Pomoell and S. Poedts*, J. Space Weather Space Climate **8**, A35 (2018).
6. *M. Tokumaru, K. Fujiki, K. Iwai, S. Tyul'bashev, and I. Chashei*, Solar Phys. **294**, 15 (2019).
7. *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 Physics **265**, 49 (2010).
8. *M. M. Bisi, A. Gonzalez-Esparza, B. V. Jackson, M. Tokumaru, and J. Leibacher*, Solar Physics **290**, 2393 (2015).
9. *Iju, M. Tokumaru, and K. Fujiki*, Solar Physics **289**, 2157 (2014).
10. *Johri and P. K. Manoharan*, Solar Physics **291**, 1433 (2016).
11. *K. Iwai, D. Shiota, M. Tokumaru, K. Fujiki, M. Den*, *and Y. Kubo* (2022). https://doi.org/10.48550/arXiv.2209.12486
12. *A. Hewish, P. E. Scott, and D. Wills*, Nature **203**, 1214 (1964).
13. *I. V. Chashei, S. A. Tyul'bashev, V. R. Lukmanov, and I. A. Subaev*. Adv. Space Res. (2022). https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.05.050
14. *В. Р. Лукманов, И. В. Чашей, С. А. Тюльбашев*, Астрон. журн. **99**, 160 (2022).
15. *B. V. Jackson, H. S. Yu, P. P. Hick, A. Buffington, M. M. Bisi, M. Tokumaru, J. Kim, S. Hong, B. Lee, J. Yi, and J. Yun*, Astrophys. J. Lett. **803**, No. 1, L1, 5p (2015).
16. *P. J. Cargill*, Solar Phys. **221**, 135 (2004).