АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2023, том 100, № 6, с. 546–556

КОРОТИРУЮЩИЕ ВОЗМУЩЕНИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В ДАННЫХ МОНИТОРИНГА МЕЖПЛАНЕТНЫХ МЕРЦАНИЙ: МОДЕЛИРОВАНИЕ И НАБЛЮДЕНИЯ

© 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, Москва, Россия*

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

Поступила в редакцию 30.05.2023 г.
После доработки 18.06.2023 г.
Принята к публикации 20.06.2023 г.

Предложена простая модель ведущей части области взаимодействия разноскоростных потоков солнечного ветра, в которой повышенная концентрация плазмы задается в виде спиральной струи с прямоугольным сечением. В рамках модели рассчитаны двумерные динамические карты распределения уровня межпланетных мерцаний, адаптированные к конфигурации радиотелескопа БСА ФИАН. Для четырех магнитных бурь 2022 и 2023 г., вызванных коротирующими возмущениями, проведено сравнение модельных расчетов с данными серий наблюдений межпланетных мерцаний, содержащих период геомагнитного возмущения. В целом имеется качественное соответствие между расчетами и наблюдательными данными. Показано, что коротирующие возмущения проявляются в усилениях мерцаний за три дня до магнитной бури около 15–16 ч московского времени. В последующие двое суток усиление мерцаний смещается к более позднему времени. При этом усиления мерцаний в утреннем секторе отсутствуют. В период магнитной бури происходит усиление ночных мерцаний. Такая последовательность усилений мерцаний соответствует приближению возмущения к Земле с восточной стороны при вращении с Солнцем. Обсуждается качественное различие между данными наблюдений для коротирующих и распространяющихся крупномасштабных возмущений.

Ключевые слова: солнечный ветер, коротирующие структуры, межпланетные мерцания

DOI: 10.31857/S0004629923070058, **EDN:** AAAKXH

1. ВВЕДЕНИЕ

В областях взаимодействия истекающих из корональных дыр быстрых потоков плазмы с медленным солнечном ветром формируются зоны с повышенной концентрацией плазмы (stream interaction regions, SIR). Если структуры типа SIR существуют более одного оборота Солнца и обладают 27-дневной повторяемостью, то они классифицируются как коротирующие структуры (corotating interaction regions, CIR). Структуры типа SIR/CIR, как и корональные выбросы массы послевспышечного происхождения (interplanetary coronal mass ejections, ICME), при взаимодействии с земной магнитосферой могут вызвать магнитные бури. При этом, как известно [1], геомагнитные возмущения в периоды вблизи минимума солнечной активности чаще связаны с SIR/CIR, а вблизи максимума активности – с CME. Для обнаружения и исследования крупномасштабных возмущений до их прихода к Земле можно использовать наблюдения межпланетных мерцаний [2–6]. Наблюдения межпланетных мерцаний в Пущинской радиоастрономической обсерватории (ПРАО) начались сразу после их обнаружения Хьюишем в 1964 г. [7]. Одной из основных характеристик мерцаний является индекс мерцаний, который примерно пропорционален средней концентрации межпланетной плазмы в области, ответственной за модуляцию амплитуды просвечивающих радиоволн [8]. В работах [9–13] на основе анализа данных наблюдений межпланетных мерцаний было замечено, что коротирующие структуры могут быть обнаружены по ослаблению ночных мерцаний за 2–3 сут до прихода CIR к Земле.

В данной работе предложена простая модель распределения уровня концентрации плазмы в коротирующих структурах. В рамках предположения о чисто вращательной кинематике CIR строятся модельные динамические карты индексов мерцаний, которые сравниваются с наблюдательными картами для четырех событий, вызвавших достаточно сильные геомагнитные возмущения.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА

Коротирующие структуры выявляются по наблюдениям за большим количеством мерцающих радиоисточников по всей небесной сфере. В настоящее время наблюдения проводятся на Большой синфазной антенне Физического института Российской академии наук (БСА ФИАН) в Пущинской радиоастрономической обсерватории (ПРАО). БСА ФИАН является радиотелескопом меридионального типа. Наблюдения ведутся в круглосуточном режиме на центральной частоте 111 МГц в полосе частот 2.5 МГц, на 96 лучах диаграммы направленности, перекрывающих область склонений (угловых расстояний областей наблюдения на небесной сфере от плоскости небесного экватора, при этом склонение положительно, если наблюдаемый объект в северном полушарии, и отрицательно – если в южном полушарии) от –8° до +42°.

Характерный пространственный масштаб дифракционной картины на частоте 111 МГц порядка сотен километров, характерный временной масштаб – порядка секунды. О крупномасштабных возмущениях можно судить по изменениям индекса мерцаний на элонгациях (угловых расстояниях между наблюдаемой областью на небесной сфере и Солнцем при наблюдениях с Земли) больше 25° и гелиоцентрических расстояниях прицельной точки на луче зрения на источники больше 0.4 а.е. В областях, расположенных ближе к Солнцу, получение информации о крупномасштабных возмущениях затруднено, так как мерцания переходят в режим насыщения и подавляются за счет влияния собственных угловых размеров источника. В области элонгаций более 90° модуляция интенсивности радиоисточников определяется областями солнечного ветра, примыкающими к орбите Земли. Таким образом, наблюдения дают возможность фиксировать связанные с крупномасштабными возмущениями, в частности SIR/CIR, изменения в уровне мерцаний в областях между 0.4 а.е. и орбитой Земли. На двумерных (по времени и склонению) приведенных ниже цветовых суточных картах усиление мерцаний отражается красным и оттенками красного цветами, невозбужденная среда – оранжевым цветом, а ослабление мерцаний – желтым цветом. Двумерные карты строятся следующим образом. Вся наблюдаемая полоска неба разбивается на квадратные пиксели размером 3° × 3°, в каждом из которых определяется средний квадрат индекса мерцаний. На динамических картах изображается отношение среднего квадрата индекса мерцаний в данный день к соответствующему значению за предыдущий день в то же время. Всего в течение суток наблюдается около 5000 мерцающих источников, и в каждый пиксель попадает до 10 компактных (мерцающих) радиоисточников. Подробнее процедура построения карт описана в работе [14].

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

В рамках настоящей работы CIR представляет из себя область с повышенной концентрацией плазмы, вращающаяся вместе с Солнцем, центральная ось которой находится в плоскости солнечного экватора (рис. 1). Центральная ось CIR представляет собой архимедову спираль $r = a(\theta_0 - \theta)$. Предполагается, что на расстоянии $r = 1$ а.е. от центра Солнца $\theta_0 - \theta = \frac{\pi}{4}$, таким образом $a = \frac{4}{\pi}$ а.е.$^{-1}$. На рис. 1 ось X направлена к положению Земли в момент летнего солнцестояния, ось Y – к проекции Земли на плоскость солнечного экватора в момент осеннего равноденствия, ось Z – к солнечному северному полюсу (на рисунке направлена “на нас”), начало координат в центре Солнца. При построении карт учитывался наклон орбиты Земли к солнечному экватору, который равен 7.25°, моменты пересечения орбиты Земли и плоскости экватора в дни солнцестояний. Сечение области CIR плоскостью нормальной к центральной оси CIR в каждой точке является прямоугольником, размеры пропорциональны расстоянию точки r на центральной оси от центра Солнца, если это расстояние меньше 1 а.е., и равны $2l = 0.2$ а.е. в плоскости солнечного экватора и $2h = 0.6$ а.е. в направлении, параллельном оси Z, если расстояние r равно или превышает 1 а.е. Предполагается, что CIR вращается вместе с Солнцем в направлении движения Земли с постоянной угловой скоростью и “настигает” Землю каждые 27 сут. Геометрия используемой модели схематически изображена на рис. 1. Отметим, что нами рассматривалась и другая модель, в которой область повышенной концентрации представляла собой спиральную струю круглого сечения. Однако анализ показал, что струя с прямоугольным сечением лучше согласуется с данными наблюдений.

Индекс межпланетных мерцаний при распространении CIR вычисляется в предположении, что электронная плотность внутри области CIR превышает соответствующее значение вне ее в фиксированное количество $N = 3$ раз. В режиме слабых мерцаний индекс мерцаний вычисляется по формуле [15–17]:

$$m^2 = 2\pi \int\limits_{-1\,\text{а.е.}\,\cos\varepsilon}^{+\infty} dZ \int\limits_0^{+\infty} \Phi_e(q) \sin^2\left(\frac{q^2 Z'}{2k}\right) F^2(q)\, q\, dq, \quad (1)$$

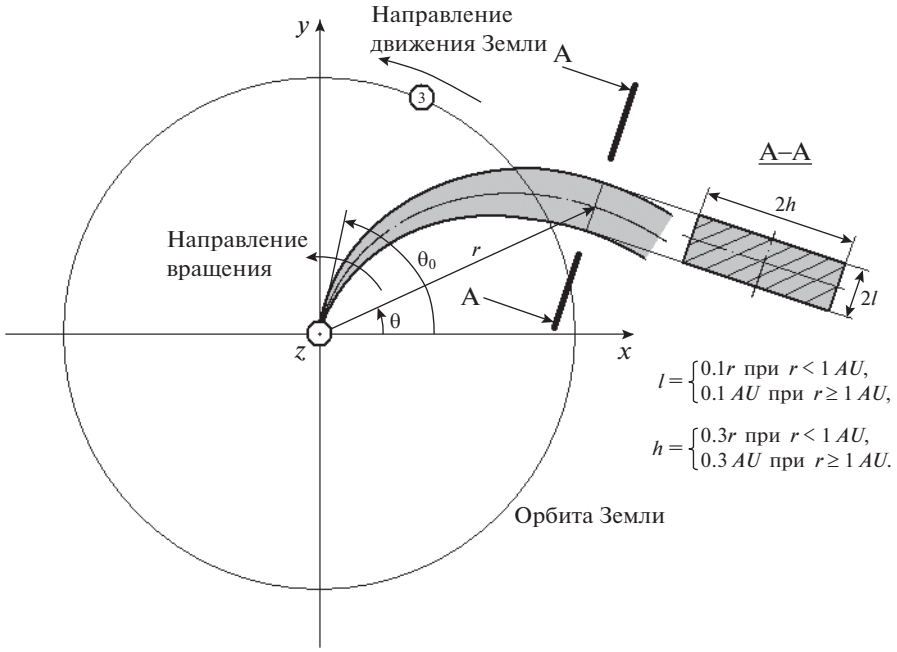


Рис. 1. Схематическое изображение модели CIR.

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, $r_0 = 1 a.e. \sin\varepsilon$ – расстояние от центра Солнца до прицельной точки P, координата Z на луче зрения отсчитывается от прицельной 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 $F(q) \equiv 1$); $Z' = Z + 1$ a.e. $\cos\varepsilon$ – расстояние от точки на луче зрения до наблюдателя, ε – элонгация.

Структурная константа C с учетом упомянутого выше предположения о повышении значения электронной плотности внутри области CIR вычисляется по формуле:

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

Константа C_0 *a priory* неизвестна. Таким образом индекс мерцаний по формуле (1) определяется с точностью до постоянного множителя. Для определения этого множителя предполагается, что индекс мерцаний принимает свое наибольшее возможное значение на элонгации 25°, которое в отсутствие CIR предполагается равным 0.6. Это соответствует работе [17].

Реальное распределение концентрации солнечного ветра при прохождении коротирующего возмущения, конечно, будет значительно сложнее, и более точная модель должна содержать значительно больше задаваемых параметров. Здесь мы ограничиваемся заведомо упрощенной моделью, которая позволяет, во-первых, определить основные качественные отличия возмущений типа CIR от возмущений типа CME, и, во-вторых, найти признаки, которые позволят по наблюдательным данным заблаговременно предсказать приход коротирующего возмущения к Земле. В рамках модели для различных расположений возмущения относительно Земли и Солнца рассчитывались динамические модельные карты, аналогичные тем, которые получаются из наблюдений. Далее модельные карты сравнивались с результатами наблюдений для серий длительностью 7 сут: трое суток до магнитной бури и трое суток после нее.

4. СРАВНЕНИЕ МОДЕЛЬНЫХ КАРТ С ДАННЫМИ НАБЛЮДЕНИЙ

Для детектирования возмущения CIR в наблюдательных данных используются динамические карты индексов мерцаний, которые получаются попиксельным делением карт текущего дня на карты предыдущего дня. В областях, не затронутых CIR в последние 2 дня, индекс мерцаний, рассчитанный по теоретической формуле (1), совпадает и при попиксельном делении отношение индексов мерцаний равно 1. Поэтому в динамических картах "спокойная" межпланетная среда исчезает, видно только возмущение, вызванное CIR. Однако в реальной ситуации даже в случае "спокойного" солнечного ветра постоянно меняется его концентрация, соответственно меняется и индекс мерцаний, поэтому при попиксельном делении отношение индексов мерцаний часто отличается от единицы. Этим объясняется пятнистость цветов на приведенных ниже наблюдательных картах в отличие от модельных.

Далее проводится сравнение для нескольких, сопутствующих магнитным бурям, связанным с CIR, недавних (2022, 2023 г.) серий наблюдений с модельными сериями. Для сравнения были отобраны два простых (одногорбых по графикам концентрации WIND) события 8 января и 7 декабря 2022 г. Связь этих событий с CIR подтверждается аналогичными возмущениями, наблюдавшимися ранее в периоды, отстоящие от рассматриваемых на промежутки, кратные 27 дням. Так, перед событием 8 января 2022 г. возмущенная магнитосфера (Kp = 4 – это индекс, характеризующий геомагнитную активность, если Kp < 4, магнитосфера спокойная, если Kp = 4, магнитосфера возбужденная, Kp ≥ 5 означает магнитную бурю) наблюдалась 22 сентября, 19 октября и 15–16 ноября 2021 г. После события магнитные бури G1 (G-индекс показывает силу магнитной бури и оценивается по 5-балльной шкале: G1 – слабая буря (Kp = 5), G2 – умеренная буря (Kp = 6), G3 – сильная буря (Kp = 7), G4 – очень сильная буря (Kp = 8), G5 – экстремальная буря (Kp = 9)) наблюдались 3–4 февраля, 31 марта, 27 апреля 2022 г., возбужденная магнитосфера 19 июня, 11 августа, 7–9 сентября, 4–6 октября 2022 г., затем бури G1 28 ноября и 26 декабря 2022 г. Перед событием 7 декабря 2022 г. магнитные бури G1 наблюдались 18 января, 12–13 февраля, 12 марта 2022 г., 13 марта 2022 г. магнитная буря G2, возбужденная магнитосфера 7–9 апреля, 27 июня, 26 июля, 20–21 августа 2022 г., магнитная буря G1 15 октября 2022 г., после события была магнитная буря G1 4 января 2023 г. Кроме того, рассмотрены два более сложных события (двугорбые по графикам концентрации WIND) 15 и 23–24 марта 2023 г., первый из которых также можно отнести к CIR, так как для него наблюдались предшествовавшие аналоги, а второе, по-видимому, связано с SIR. Перед событием 15 марта 2023 г. возбужденная магнитосфера наблюдалась 11 августа, 7–9 сентября 2022 г., магнитные бури G1 3 октября и 28 ноября 2022 г., возбужденная магнитосфера 23–24 декабря 2022 г. и 21 января 2023 г., магнитная буря G1 15–16 февраля 2023 г. После события возбужденная магнитосфера была 8 мая 2023 г. Следует отметить, что события 8 января 2022 г. и 15 марта 2023 г., возможно, являются следствием воздействия одного и того же CIR, поскольку длина промежутка времени между ними близка к промежутку, длина которого кратна 27 сут. Перед событием 23–24 марта 2023 г. магнитная буря G2 наблюдалась 15 января 2022 г., затем буря G1 10–11 февраля 2022 г., затем возбужденная магнитосфера 10–11 марта и 7 апреля 2022 г., затем магнитная буря G1 26 июня, 23 июля, 19 августа 2022 г. (накануне 18 августа была G2), затем возбужденная магнитосфера была 15 сентября, 7 ноября, 4 декабря 2022 г., 1–2 января, 23–24 февраля 2023 г., а после события возбужденная магнитосфера была 18–19 апреля 2023 г. Заметим, что перед событием 23–24 марта 2023 г. последняя магнитная буря, отстоящая от данного события на время, кратное 27 сут, произошла 19 августа, т.е. более, чем за полгода. Перед данным событием наблюдалась крупная корональная дыра на Солнце, из которой истекал быстрый поток солнечного ветра, в который затем попала Земля, поэтому данное событие связано, по-видимому, с SIR. Таким образом, три из четырех рассмотренных событий можно считать связанными с долгоживущими структурами типа CIR в солнечном ветре, а одно, по-видимому, с SIR. Следует отметить, что повторяющиеся структуры могут не быть полностью идентичными из-за возможной эволюции при коротации.

Событие 8 января 2022 г. Согласно данным по индексу Kp на сайте https://kp.gfz-potsdam.de/app/files/Kp_ap_since_1932.txt в этот день в период с 18:00 до 24:00 UT произошла кратковременная магнитная буря уровня G1. За 3 сут до события не было вспышек класса M и X, зафиксированы только две слабых вспышки C1.1. Поэтому маловероятно, что данная магнитная буря была вызвана CME. При моделировании мы рассматривали 7 дней (3 дня до бури, день бури, 3 дня после бури), но на рис. 2а для иллюстрации приводим карты для дат с 7 по 9 января 2022 г. (день до бури, день бури, день после бури): верхняя панель – наблюдательные динамические карты, средняя панель – динамические индексы мерцаний, усредненные по всем склонениям и по часовым интервалам на наблюдательных картах, нижняя панель – модельная карта в предположении, что центральная ось CIR проходит через проекцию Земли на плоскость солнечного экватора в середине интервала длительности магнитной бу-

ри. На рис. 2б показано изменение концентрации межпланетной плазмы и скорости солнечного ветра с 05.01.2022 (DOY 5) по 11.01.2022 (DOY 11) по данным спутника WIND. Для трех оставшихся случаев приведены карты на момент прохождения бури, как иллюстрация работоспособности предлагаемой модели.

Из данных рис. 2а видно, что наблюдательные карты качественно соответствуют модельным за 7–9 января. Таким образом, в момент прихода CIR к Земле модель в целом соответствует данным наблюдений.

Событие 7 декабря 2022 г. Согласно сайту https://kp.gfz-potsdam.de/app/files/Kp_ap_since_1932.txt в этот день в период с 12:00 до 15:00 UT была кратковременная магнитная буря G1, после в период с 15:00 до 18:00 UT магнитосфера Земли все еще оставалась возбужденной. За 3 сут до магнитной бури не наблюдалось вспышек классов M и X, наблюдалась серия кратковременных C вспышек из разных активных областей, поэтому маловероятно, что данная магнитная буря была вызвана CME. Ниже на рис. 3а приведены данные за 7 декабря. Рисунок аналогичен рис. 2а. Данные по концентрации протонов и скорости солнечного ветра показаны на рис. 3б.

На рис. 3а видно, что на качественном уровне наблюдательные динамические карты мерцаний в целом соответствуют модельным на момент бури.

Событие 15 марта 2023 г. Согласно данным сайта https://kp.gfz-potsdam.de/app/files/Kp_ap_since_1932.txt магнитные бури произошли 15 марта 2023 г. в периоды 03:00–06:00 UT и 21:00–24:00 UT (двухгорбое событие). Сильных и длительных вспышек в период за 3 сут до бури не наблюдалось. Аналогично предыдущему случаю построены динамические карты индексов мерцаний, построен график усредненного значения динамического индекса мерцаний за 15 марта (рис. 4а). Данные по концентрации протонов и скорости солнечного ветра показаны на рис. 4б.

Из рис. 4а видно, что наблюдательные и модельные карты за 15 марта визуально соответствуют друг другу. Таким образом, вблизи события прихода CIR к Земле для более сложного (двухгорбого) события модель также качественно подтверждается.

Событие 23–24 марта 2023 г. В данном случае сильная магнитная буря класса G3 продолжалась с 23.03.2023 12:00 UT до 24.03.2023 09:00 UT. Событие произошло в результате попадания Земли в поток быстрого солнечного ветра (событие, вызванное SIR). На рис. 5а приведены данные за 23–24 марта 2023 г. На рис. 5б показаны концентрация и скорость солнечного ветра.

Соответствие наблюдательных и модельных карт за 23 и 24 марта хорошо соотносятся на качественном уровне, что вновь подтверждает модельные расчеты. Отметим, что в указанные даты отсутствуют данные на интервалах 6:00–7:00 UT и примерно 9:30–10:30 UT, данные области на картах показаны желтым цветом.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По результатам анализа четырех событий прихода CIR и SIR к Земле можно сделать вывод, что наблюдательные карты динамических индексов мерцаний на качественном уровне соответствуют модельным картам до прихода возмущения к Земле, а также в течение суток, включающих магнитную бурю. Следует отметить, что в отдельные дни соответствие наблюдательных карт модельным не является полным, что может быть связано с несколькими причинами:

1) Реальная пространственная структура индивидуального возмущения может отличаться от использованной упрощенной модели.

2) Распределение параметров фонового солнечного ветра может отличаться от сферически симметричного, что отмечалось в работах [16, 17]. В частности, в работе [17] была продемонстрирована возможность существенного влияния плотного приэкваториального токового слоя.

3) Возможно также наложение других крупномасштабных возмущений межпланетной плазмы.

Очевидно, что индивидуальные коротирующие возмущения могут отличаться друг от друга, даже при 27-дневной повторяемости структура возмущений может изменяться за счет эволюции. Тем не менее использование простой “унифицированной” модели и ее сравнение с наблюдательными данными позволяют выявить характерные особенности временной динамики уровня межпланетных мерцаний, связанные с прохождением CIR или SIR. Выявление таких особенностей, наряду с 27-дневной повторяемостью, может быть использовано для краткосрочного прогноза прихода к Земле возмущений данного типа, а также сходных, но вновь возникших возмущений типа SIR. Отметим, что приход CIR к Земле, как и в случае CME, не всегда приводит к магнитной буре. Для более точного прогноза геомагнитных возмущений желательны данные о северо-южной компоненте межпланетного магнитного поля B_z [18].

В работе [19] на основе моделирования и сравнения с наблюдениями исследованы характерные проявления межпланетных выбросов корональной массы в данных мониторинга межпланетных мерцаний. Выброс этого типа, как правило, фиксируется по усилениям мерцаний сначала в утренние часы, а затем, в тот же день, в вечерние часы. Аналогичный анализ, проведенный в настоящей работе для коротирующих возмущений, показал иную последовательность усилений мер-

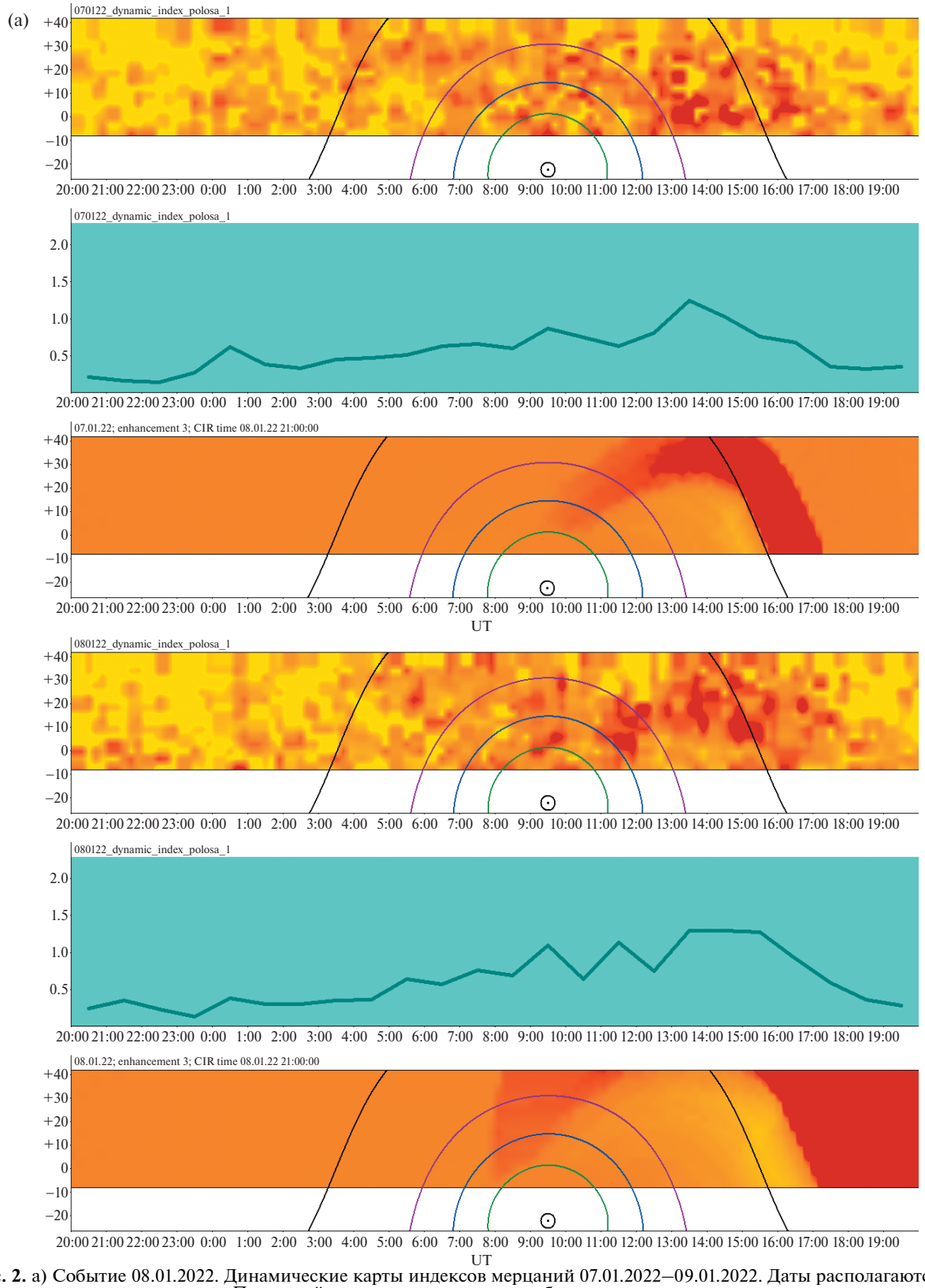
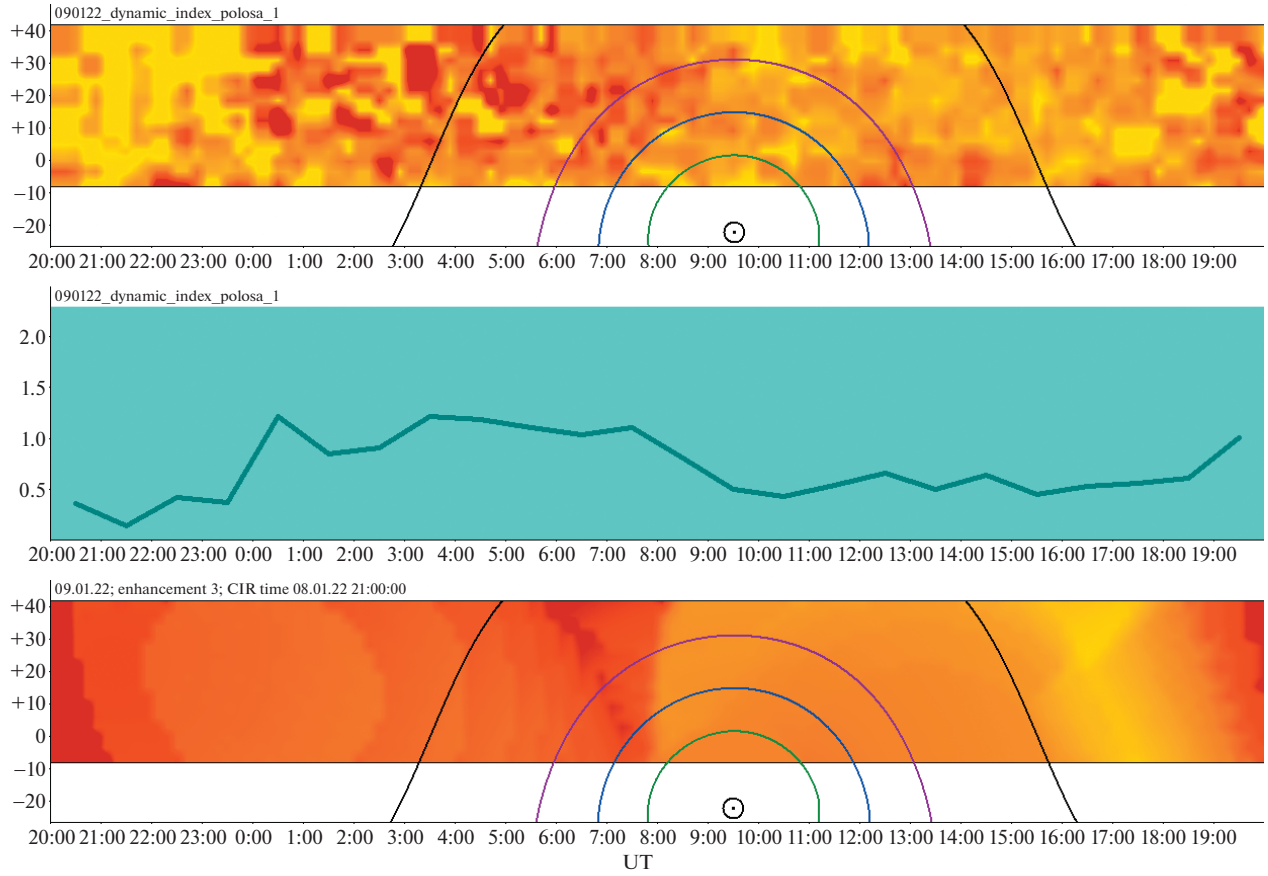


Рис. 2. а) Событие 08.01.2022. Динамические карты индексов мерцаний 07.01.2022–09.01.2022. Даты располагаются в верхних левых углах рисунков. По каждой дате: верхняя панель – наблюдательная карта, средняя панель – усредненные значения индексов мерцаний по всем склонениям и по часовым интервалам (в одной точке графика усреднено 80 пикселей), нижняя панель – модельные карты в предположении, что центральная ось CIR проходит через проекцию Земли на плоскость солнечного экватора в середине интервала длительности магнитной бури. б) Изменение концентрации протонов в межпланетной плазме и скорости солнечного ветра по данным спутникам WIND с 05.01.2022 (DOY 5) по 11.01.2022 (DOY 11).



(б)

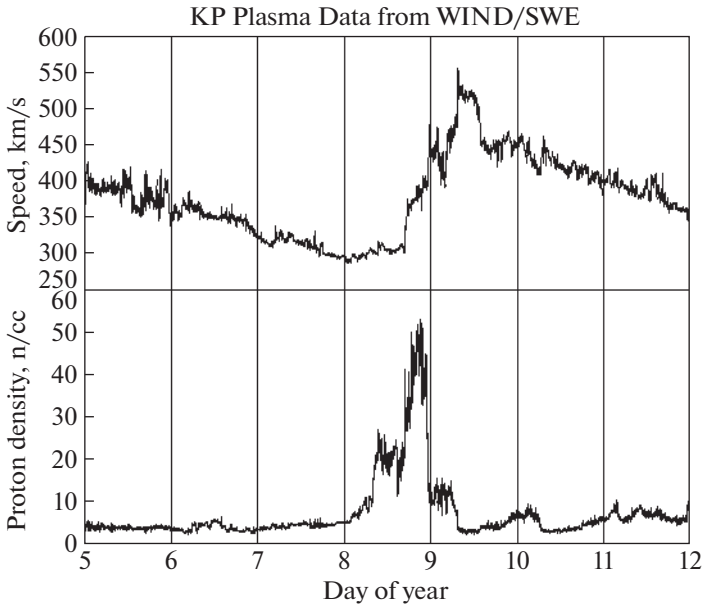
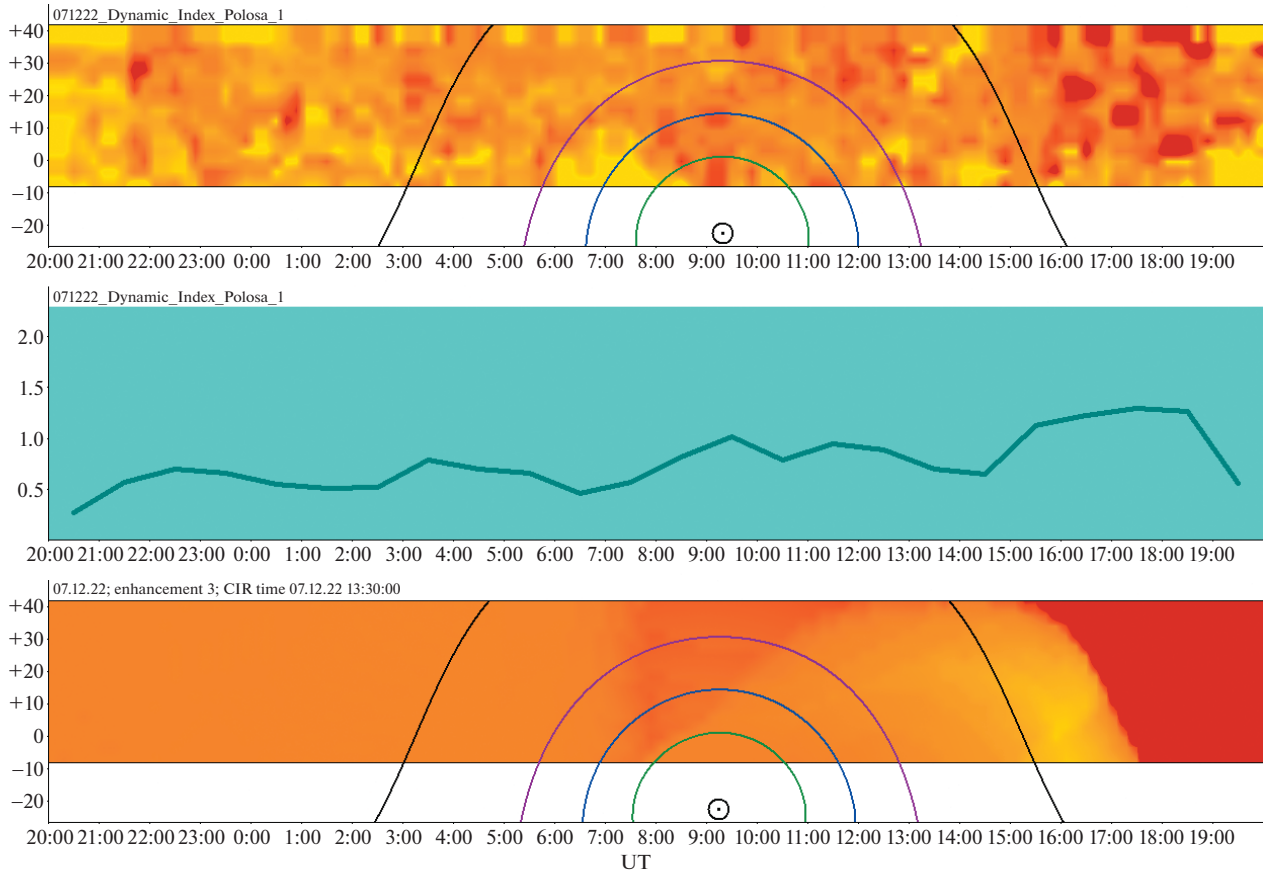


Рис. 2. Окончание

цаний на суточных динамических картах. Коротирующие возмущения проявляются в усилениях мерцаний за три дня до магнитной бури около 15–16 часов московского времени. В последующие двое суток усиление мерцаний смещается к более позднему времени. При этом усиления мерцаний в утреннем секторе отсутствуют. Усиления мерцаний перед приходом возмущений видны в

(а)



(б)

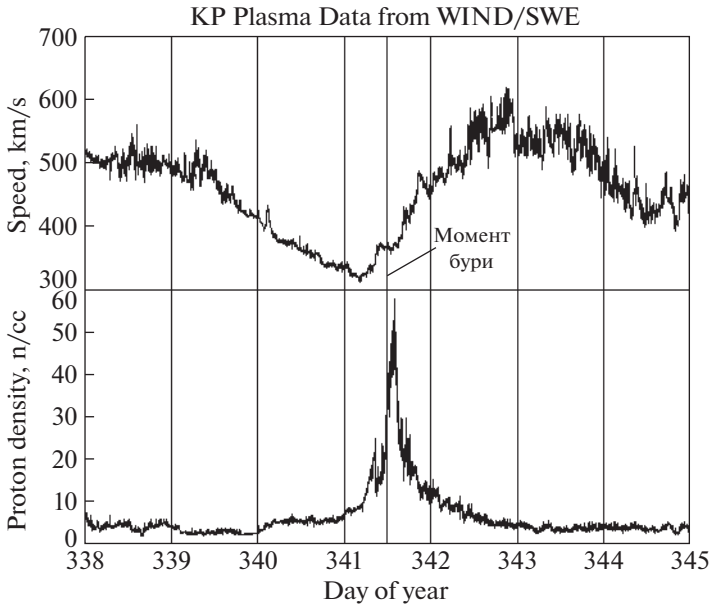
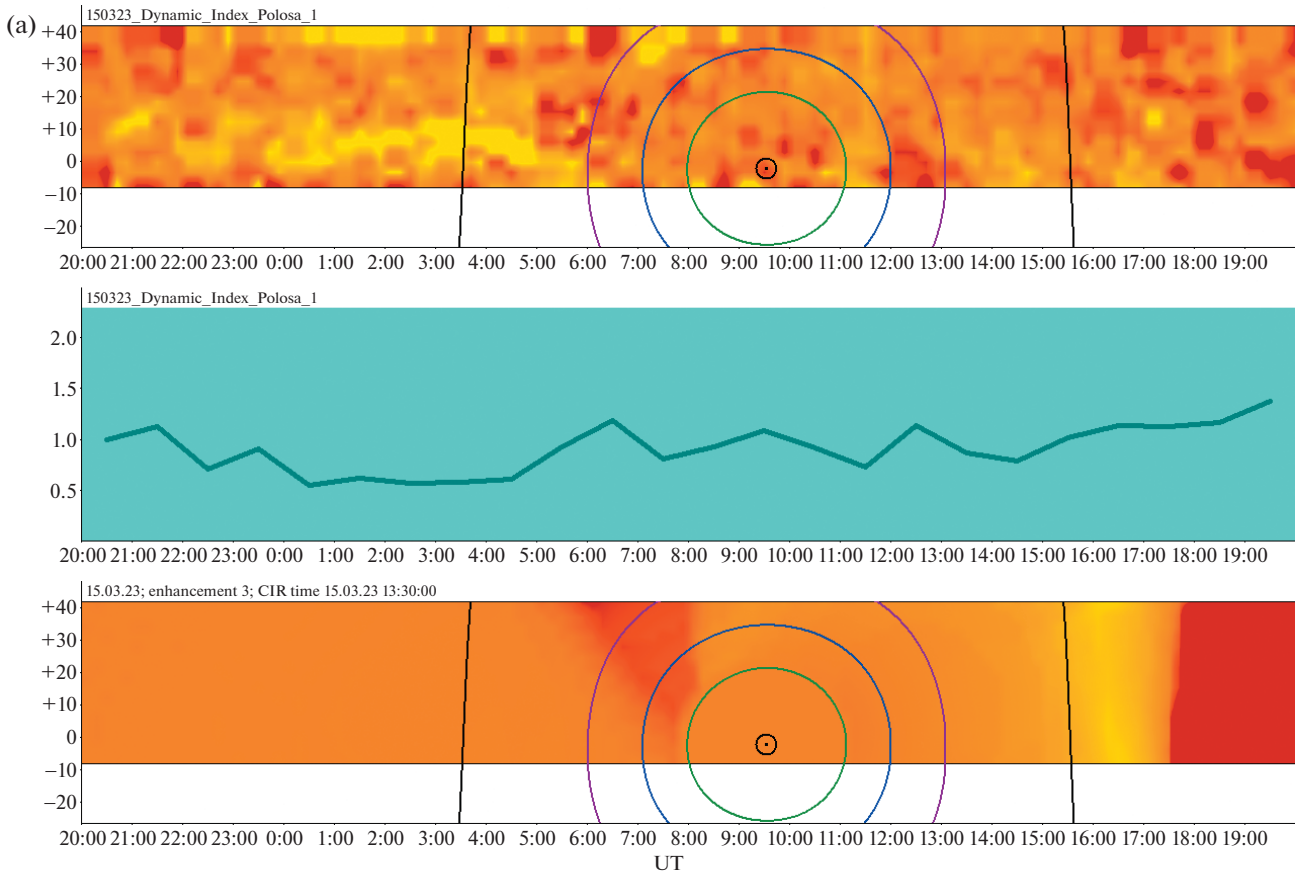


Рис. 3. а) Событие 07.12.2022. Аналогично рис. 2а, дата 07.12.2022. б) Аналогично рис. 2б, даты 04.12.2022–10.12.2022 (DOY 338–344).

правой части рис. 2а–5а. В период магнитной бури возмущенными оказываются ночные мерцания. Такая последовательность усилений мерцаний соответствует приближению возмущения к Земле с восточной стороны при вращении с Солнцем. Усиление ночных мерцаний в момент



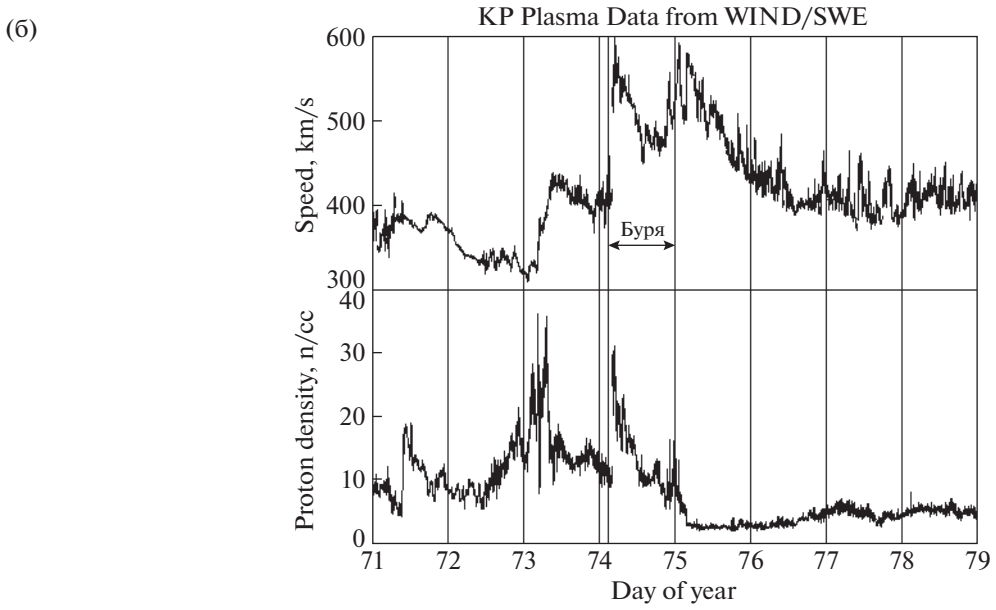


Рис. 4. а) Событие 15.03.2023. Аналогично рис. 2а–3а, дата 15.03.2023. б) Аналогично рис. 2–3б, даты с 12.03.2023–19.03.2023 (DOY 71–78).

магнитной бури связано с приходом возмущения в области межпланетной плазмы, примыкающие к земной орбите.

Еще одним из признаков прохождения коротирующей структуры является ослабление степени ночных мерцаний за 2–3 сут до прихода CIR к

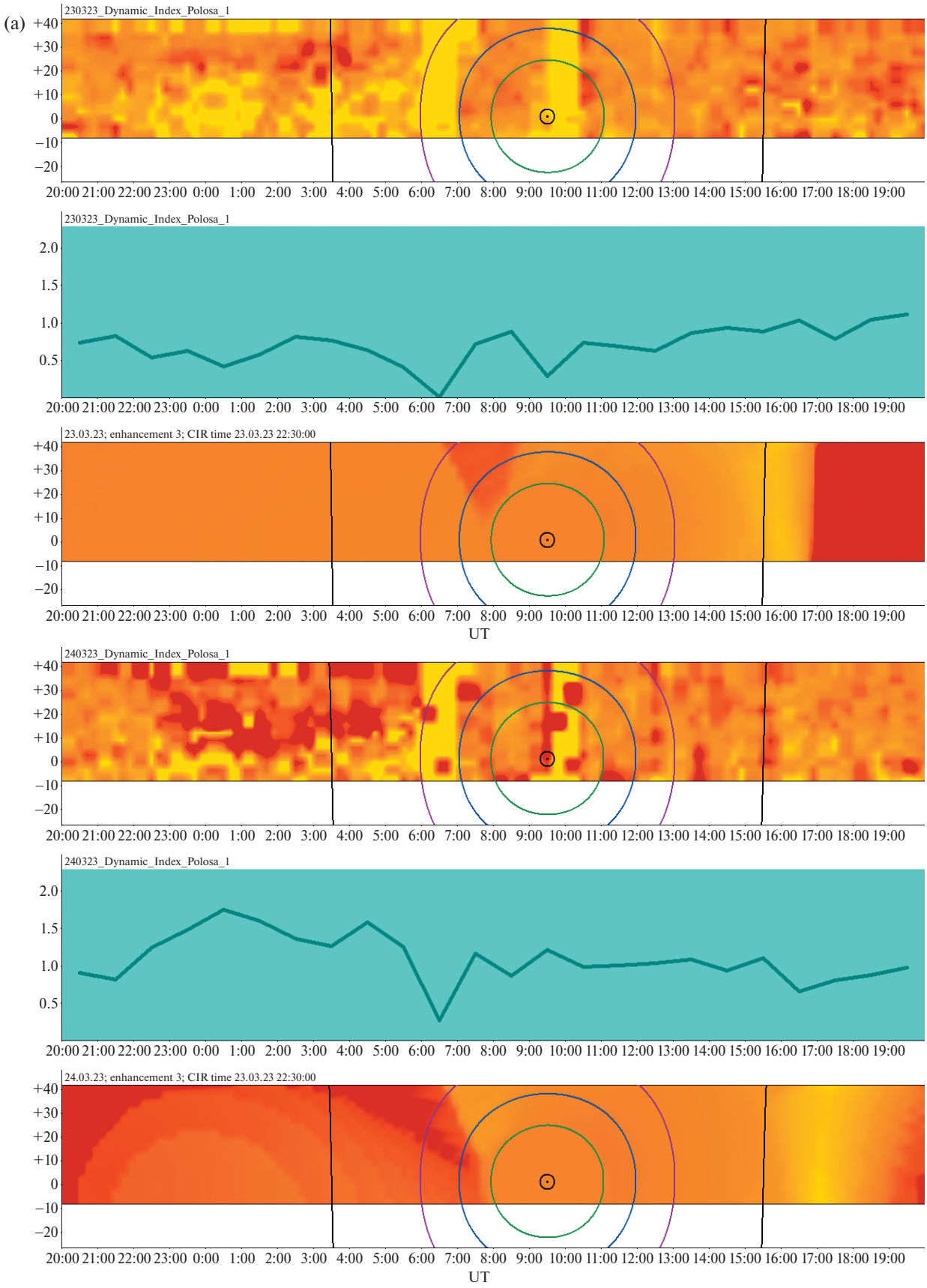


Рис. 5. а) Событие 23–24.03.2023. Аналогично рис. 2а–4а, даты 23.03.2023–24.03.2023. б) Аналогично рис. 2–4б, даты 20.03.2023 – 27.03.2023 (DOY 79–86).

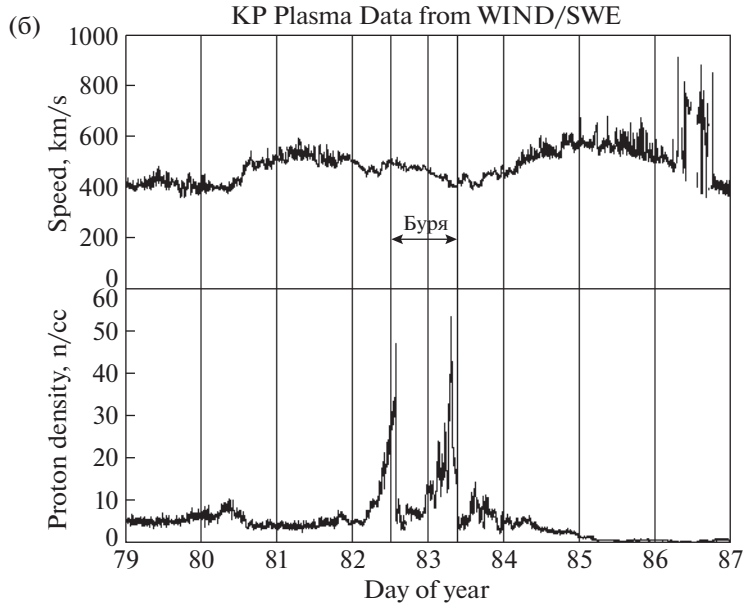


Рис. 5. Окончание

Земле. Эта особенность наблюдается и для всех четырех событий, рассмотренных в настоящей работе. Ослабление ночных мерцаний может быть объяснено пониженным абсолютным уровнем мелкомасштабной турбулентности в достаточно протяженной области перед сжатой частью CIR. Такое понижение в целях упрощения не было включено в рассмотренную выше модель CIR. Тем не менее ослабление ночных мерцаний (наряду с усилениями в вечерние часы) может рассматриваться как дополнительный предвестник прихода CIR к Земле.

Модельные расчеты, результаты которых приведены выше, адаптированы к наблюдениям на меридиональном радиотелескопе БСА ФИАН. Точность прогноза геомагнитной активности может быть улучшена при использовании нескольких инструментов, расположенных на разных географических долготах, или при использовании достаточно чувствительных радиотелескопов с управляемыми диаграммами направленности, таких как LOFAR или MWA.

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. *M. M. Bisi, A. Gonzalez-Esparza, B. V. Jackson, M. Tokumaru, J. Leibacher*, Solar Phys. **290**, 2393 (2015).
4. *Iju, M. Tokumaru, K. Fujiki*, Solar Phys. **289**, 2157 (2014).
5. *Johri and P. K. Manoharan*, Solar Phys. **291**,1433 (2016).
6. *M. Tokumaru, M. Kojima, K. Fujiki, A. Yakobe*, J. Geophys. Res. **105**, 10435 (2000).
7. *A. Hewish, P. E. Scott, D. Wills*, Nature **203**, 1214 (1964).
8. *S. J. Tappin*, Planetary and Space Science **34**, 93 (1986).
9. *И. В. Чашей, С. А. Тюльбашев, Ю. В. Писанко*, Метеорология и гидрология **3**, 28 (2021).
10. *И. В. Чашей, С. А. Тюльбашев, И. А. Субаев, А. И. Чернышова*, Астрон. журн. **96**, 407 (2019).
11. *И. В. Чашей, Т. О. Лебедева, С. А. Тюльбашев, И. А. Субаев*, Астрон. журн. **97**, 73 (2020).
12. *И. В. Чашей, Т. О. Лебедева, С. А. Тюльбашев, И. А. Субаев*, Астрон. журн. **98**, 949 (2021).
13. *И. А. Субаев, С. А. Тюльбашев, И. В. Чашей*, Кратк. Сообщ. по физ. **6**, 50 (2021).
14. *I. V. Chashei, S. A. Tyul'bashev, V. R. Lukmanov, I. A. Subaev*. Adv. Space Res. (2022) https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.05.050
15. *В. И. Власов, И. В. Чашей, В. И. Шишов, Т. Д. Шишова*, Геомагн. аэрон. **19**, 401 (1979).
16. *I. V. Chashei, V. R. Lukmanov, S. A. Tyul'bashev, M. Tokumaru*, Solar Phys. **296**, 63, 14 (2021).
17. *В. Р. Лукманов, И. В. Чашей, С. А. Тюльбашев*, Астрон. журн. **99**, 160 (2022).
18. *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**, No. 1, L1, 5 (2015).
19. *В. Р. Лукманов, И. В. Чашей, С. А. Тюльбашев, И. А. Субаев*. Астрон. журн. **100**, в печати (2023).