

УДК 523.9-466

## КОРОТИРУЮЩИЕ И РАСПРОСТРАНЯЮЩИЕСЯ ВОЗМУЩЕНИЯ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ ПО ДАННЫМ МОНИТОРИНГА МЕЖПЛАНЕТНЫХ МЕРЦАНИЙ НА РАДИОТЕЛЕСКОПЕ БСА ФИАН В 2017 г.

© 2020 г. И. В. Чашей<sup>1,\*</sup>, Т. О. Лебедева<sup>2</sup>, С. А. Тюльбашев<sup>1,\*\*</sup>, И. А. Субаев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Пушчинская радиоастрономическая обсерватория  
им. В.В. Виткевича, Астрокосмический центр, Пушино, Россия

<sup>2</sup> Пушчинский государственный естественно-научный институт, Пушино, Россия

\*E-mail: chashey@prao.ru

\*\*E-mail: serg@prao.ru

Поступила в редакцию 06.08.2019 г.

После доработки 16.10.2019 г.

Принята к публикации 22.10.2019 г.

По данным мониторинга межпланетных мерцаний 2017 г. проведен анализ динамики уровня мерцаний в периоды, предшествующие приходу к Земле восьми крупномасштабных возмущений солнечного ветра, вызвавших сильные геомагнитные бури. Для шести событий из восьми динамика уровня мерцаний, в основном, определялась перемещением коротирующих возмущений. В двух событиях на фоне коротирующих возмущений наблюдались выбросы корональной массы, возбуждавшиеся в короне вблизи западного лимба Солнца. В одном из этих случаев магнитная буря была связана с коротирующим потоком, в другом – с мощным распространяющимся возмущением. Сравнение с результатами аналогичных данных 2016 г., также относящимися к фазе спада солнечной активности, показывает существование коротирующих возмущений с временем жизни не менее 20 оборотов Солнца. Подтвержден вывод о том, что за 3–4 дня до прихода сжатой части возмущения к Земле в вечернем секторе начинается ослабление мерцаний, которое может быть интерпретировано как существенное понижение уровня мелкомасштабной турбулентности плазмы в протяженной области перед фронтальной частью возмущения. Данные мониторинга межпланетных мерцаний 2017 г. показывают, что одновременно с магнитной бурей происходит усиление секундных мерцаний, которое наиболее четко фиксируется, если буря происходит в вечерние или ночные часы. Для рассмотренных событий сопутствующие магнитной буре усиления мерцаний связаны с повышениями уровня мелкомасштабных флуктуаций в примыкающих к Земле областях солнечного ветра, если буря возбуждается коротирующим возмущением, и с возмущенной ионосферой, если буря возбуждается возмущением вспышечной природы.

DOI: 10.31857/S0004629920010089

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Наблюдения межпланетных мерцаний используются для детектирования крупномасштабных возмущений в солнечном ветре [1–5]. Во многих случаях крупномасштабные возмущения являются геоэффективными и сопровождаются магнитными бурями [6, 7]. Наблюдения межпланетных мерцаний дают информацию об уровне флуктуаций концентрации плазмы на масштабах порядка дифракционного Френелевского масштаба в направлении на удаленный компактный источник, зондирующий среду. Одной из основных характеристик мерцаний является индекс мерцаний (относительный уровень флуктуаций потока источника), который, как показано в [8],

примерно пропорционален средней концентрации плазмы.

Известны два основных типа крупномасштабных возмущений: (а) распространяющиеся возмущения (interplanetary coronal mass ejection, ICME), которые генерируются в короне после вспышек, и (б) коротирующие области взаимодействия быстрых и медленных потоков солнечного ветра. Эти типы возмущений на длительных временных масштабах в среднем сравнимы по геоэффективности, причем распространяющиеся возмущения преобладают в фазе максимума солнечной активности, а коротирующие чаще наблюдаются при низком уровне солнечной активности [6, 7].

Ранее по данным мониторинга межпланетных мерцаний на радиотелескопе БСА ФИАН были исследованы два сопровождавшихся магнитными бурями события, связанные с распространяющимися возмущениями: движущийся в направлении на Землю выброс ICME типа гало [9] и лимбовый ICME выброс [10]. Было показано, что для этих возмущений время между регистрацией выброса по мерцаниям и вспышкой в короне примерно вдвое меньше времени распространения между Солнцем и Землей, что соответствует регистрации выброса примерно на 0.5 а.е. В работе [11] проанализированы данные мониторинга межпланетных мерцаний, связанные с коротирующими возмущениями, наблюдавшимися в течение 2016 г. на фазе спада солнечной активности. В настоящем исследовании, которое является продолжением работы [11], изучены данные наблюдений, связанные с несколькими коротирующими возмущениями, наблюдавшимися в 2017 г. Не анализируя индивидуальные солнечно-земные события в целом, мы акцентируем на особенностях динамики уровня мерцаний. Проведено сравнение полученных результатов с результатами работы [11].

## 2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Наблюдения межпланетных мерцаний проведены на радиотелескопе БСА ФИАН с рабочей частотой 111 МГц, ширина полосы составляла 430 кГц. С частотой съема информации 0.1 с круглосуточно записываются флуктуации плотности потока излучения всех радиоисточников, попадающих в 96-лучевую диаграмму направленности радиотелескопа, которая перекрывает область склонений от  $-8^\circ$  до  $+42^\circ$ . В течение суток регистрируются мерцания около 5000 компактных источников. Исследуемая область неба разбивается на квадратные площадки (пиксели) размером  $3^\circ \times 3^\circ$  (т.е.  $3^\circ$  по склонению и  $12'$  по прямому восхождению) и с учетом известной дисперсии шумов для каждой площадки вычисляется количество источников  $N$  с мерцающим потоком больше  $0.1 \text{ Ян}$ ,  $\sigma_{sc} > 0.1 \text{ Ян}$ . Типичные значения  $N$  в наших измерениях составляют от нескольких единиц до 10. Далее вычисляется величина

$$M = \frac{N}{N_{\text{eff}}}, \quad (1)$$

где нормировочный коэффициент

$$N_{\text{eff}} = \frac{\langle N^2 \rangle}{\langle N \rangle}, \quad (2)$$

определяется в результате усреднения по всем площадкам за 24 ч. Использование  $M$  вместо  $N$  позволяет подавить возможные вариации уровня шумов. Как показано в [9, 10], значение  $M(1)$

пропорционально среднему по данной площадке индексу мерцаний,

$$M \sim \langle m^2 \rangle = \frac{\langle \delta I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2}, \quad (3)$$

где  $\delta I$  — флуктуации интенсивности,  $\langle I \rangle$  — средняя интенсивность источника.

При анализе данных мониторинга измеренные величины  $M$  используются как основной параметр, характеризующий уровень мерцаний. В наших наблюдениях значения  $M$  заключены в пределах от  $0.1 < M < 1.5$ . По вычисленным значениям  $M$  строятся двумерные суточные карты распределения уровня мерцаний, где по одному из измерений отмечается время в течение полных суток наблюдений, а по другому — склонение. Сравнение суточных карт для последовательных дней позволяет проследить динамику пространственного распределения турбулентного солнечного ветра на временных масштабах порядка суток, и может быть использовано для исследования крупномасштабных возмущений. Ниже будут использованы вычисленные по исходным двумерным картам зависимости от времени суток уровня мерцаний  $M$ , усредненного по всем склонениям и по часовым интервалам.

## 3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ 2017 г.

По данным 2017 г. было проведено сопоставление данных по геомагнитной возмущенности<sup>1</sup>, характеризующейся индексом  $D_{st}$ , вспышечной активностью короны по измерениям рентгеновского спутника GOES<sup>2</sup>, и уровню межпланетных мерцаний. Геометрия взаимного расположения и вращения Солнца и Земли (диаграмма радиотелескопа вращается вместе с Землей) такова, что в предшествующие геомагнитным событиям дни просвечиваемая область солнечного ветра расположена в вечернем секторе, время суток между более  $12^{\text{h}}30^{\text{m}}$  (мск)<sup>3</sup> (кульминация Солнца на долготе Пушино) и  $18^{\text{h}}30^{\text{m}}$ . С учетом того, что информативными для метода мерцаний на частоте 111 МГц являются элонгации более  $30^\circ$ , ожидаемые возмущения уровня мерцаний будут соответствовать времени суток после  $14^{\text{h}}$ . При этом эффективно модулирующая область между  $14^{\text{h}}$  и  $18^{\text{h}}$  расположена к востоку от Солнца внутри орбиты Земли, а после  $18^{\text{h}}$  (элонгации  $>90^\circ$ ) основной

<sup>1</sup> <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/index.html>

<sup>2</sup> [http://www.thesis.lebedev.ru/sun\\_flares.html](http://www.thesis.lebedev.ru/sun_flares.html)

<sup>3</sup> Все моменты соответствуют московскому времени, если не указано иначе.

Таблица 1. Журнал наблюдений

№	Дата	Обозначение, время	$D_{st, \min}$ , нТл	Примечание
1	01.03.2017	DOY 60 22 <sup>h</sup>	−61	Сильных вспышек М и Х класса в предшествующий период не наблюдалось
2	27.03.2017	DOY 86 15 <sup>h</sup>	−74	Сильных вспышек М и Х класса в предшествующий период не наблюдалось
3	28.05.2017	DOY 148 8 <sup>h</sup>	−125	Сильных вспышек М и Х класса в предшествующий период не наблюдалось
4	09.07.2017	DOY 190 11 <sup>h</sup>	−29	Сильных вспышек М и Х класса в предшествующий период не наблюдалось
5	16.07.2017	DOY 197 14 <sup>h</sup>	−72	13.07.2017 вспышка класса M2.4
6	31.08.2017	DOY 243 14 <sup>h</sup>	−50	Сильных вспышек М и Х класса в предшествующий период не наблюдалось
7	07–08.09.2017	DOY 251 01 <sup>h</sup>	−124 −103	Событиям предшествовала серия вспышек М и Х класса
8	07–08.11.2017	DOY 312 02 <sup>h</sup>	−74	Сильных вспышек М и Х класса в предшествующий период не наблюдалось

вклад в мерцания связан с областью, примыкающей к Земле.

В качестве критерия достаточно сильного геомагнитного возмущения, как и в [6, 7], использовано условие уменьшения индекса  $D_{st}$  ниже −50 нТл. В 2017 г. первоначально было обнаружено 7 событий, для которых величина индекса  $D_{st}$  опускалась до −50 нТл и ниже. В результате анализа данных к этим событиям добавлено событие #4, для которого значение  $D_{st}$  не опускалось ниже −50 нТл, но по своим характеристикам было аналогично остальным. Данные по измерениям  $D_{st}$  сопоставлялись с данными вспышечной активности короны, полученными по измерениям рентгеновского спутника GOES-15. Даты событий, минимальные значения  $D_{st}$  и сведения о вспышках классов М и Х приведены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, для 6 событий из 8 в периоды, предшествующие геомагнитным возмущениям, достаточно сильные рентгеновские вспышки классов М и Х не регистрировались. Для событий #5 и #7 произошло наложение вспышечных выбросов на коротирующее возмущение. Остановимся подробнее на индивидуальных событиях, перечисленных в табл. 1.

### 3.1. Событие #1: 01.03.2017 г.

01.03.2017 г. (DOY 60) около 22.00 UT (01.00<sup>h</sup>) произошло сильное уменьшение индекса  $D_{st}$  с пиковым значением −61 нТл и величиной индекса  $K_p \sim 6$  в пике. На рис. 1а приведены зависимости от времени суток отношения среднего по всем склонениям и по часовым интервалам уровня мерцаний в данные сутки к уровням предыдущих суток для DOY 60, пяти суток, предшествовавших DOY 60, и суток после DOY 60. Отметим, что вариации уровня мерцаний на рис. 1а и других аналогичных рисунках являются значимыми, так как

каждая точка получена усреднением по более, чем 200 индивидуальным источникам.

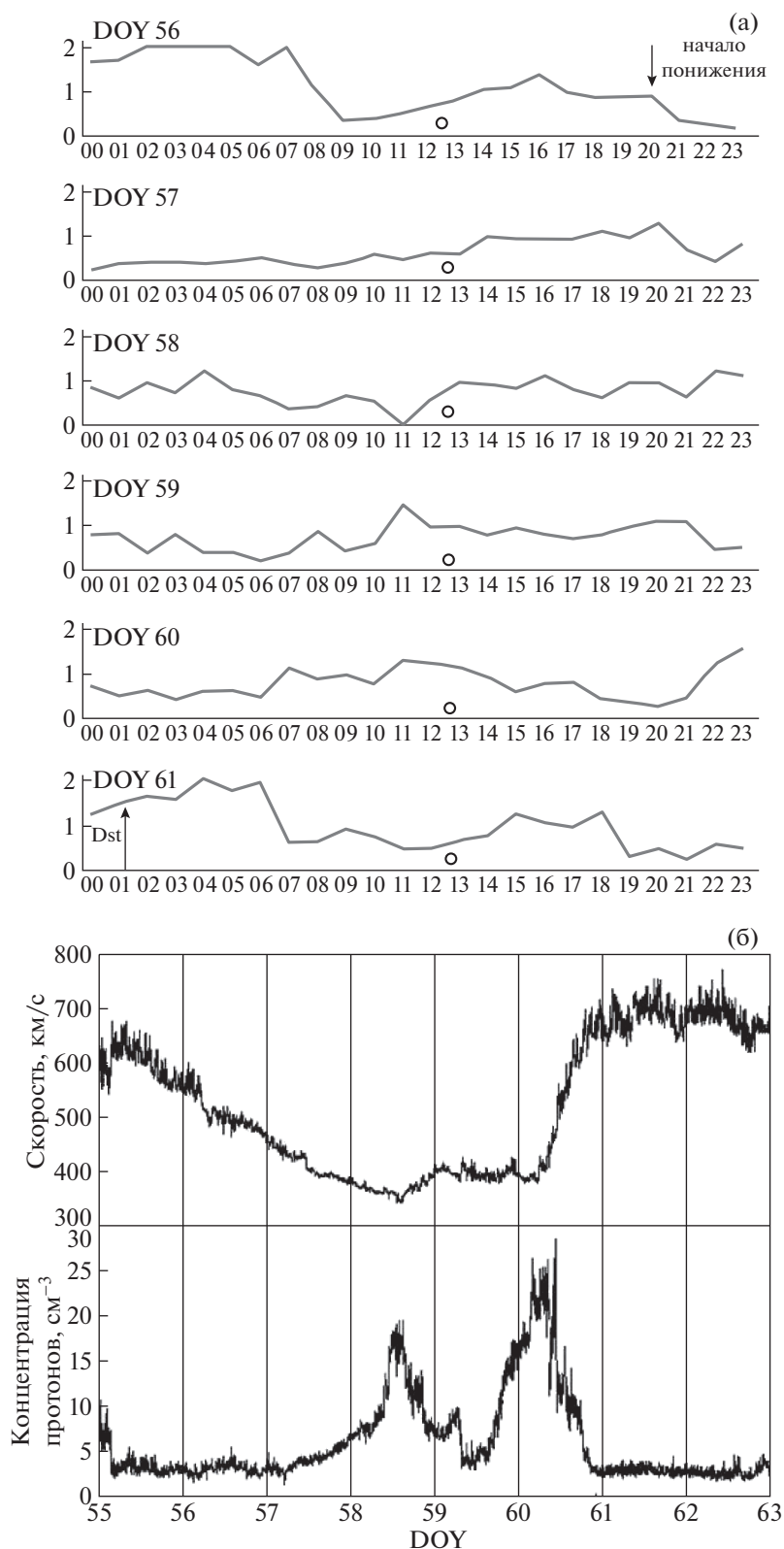
На первой панели рис. 1а видно, что в ночные часы DOY 56–57 наблюдалось сильное ослабление мерцаний, которое сохранилось в вечерние и ночные часы DOY 57–58 и DOY 58–59 и усилилось в вечерние и ночные часы DOY 59–60. Непосредственно перед  $D_{st}$  около 19.00 UT (22.00<sup>h</sup>) DOY 60 наблюдалось усиление мерцаний, которое продолжилось до 03.00 UT (03.00<sup>h</sup>) DOY 61, что соответствует приходу к Земле сжатой области возмущенного потока. В этом же промежутке времени находится и обозначенное стрелкой на рис. 1а падение  $D_{st}$  с пиком около 22.00 UT (01.00<sup>h</sup>) DOY 60.

На рис. 1б приведены данные по скорости и плотности солнечного ветра у орбиты Земли, полученные по измерениям на спутнике WIND<sup>4</sup>. Как видно из рисунка, существенное увеличение плотности плазмы в течение DOY 58–60, которое сопровождалось увеличением скорости плазмы в течение DOY 60–61. Распределения концентрации и скорости плазмы на рис. 1б в целом типичны для коротирующих возмущений. Время, прошедшее после начала понижения вечерних мерцаний в 20<sup>h</sup> DOY 56 и пиком  $D_{st}$ , составило около 100 час, что соответствует повороту Солнца на угол около 56°.

### 3.2. Событие #2: 27.03.2017 г.

DOY 86 около 15.00 UT (18.00<sup>h</sup>) произошло сильное уменьшение индекса  $D_{st}$  с пиковым значением −74 нТл и величиной индекса  $K_p \sim 6$ . На рис. 2а приведены зависимости от времени суток отношения среднего по всем склонениям и по ча-

<sup>4</sup> [http://omniweb.gsfc.nasa.gov/html/omni\\_source.html#pla](http://omniweb.gsfc.nasa.gov/html/omni_source.html#pla)



**Рис. 1.** Событие #1. (а) 01.03–02.03.2017. По оси ординат отложено отношение среднего по всем склонениям (16 пикселей) и по часовым интервалам (5 пикселей) квадрата индекса мерцаний для данного дня к предыдущему дню, по оси абсцисс – московское время с 0<sup>h</sup> до 23<sup>h</sup> текущего дня. Вертикальными стрелками обозначено время пикового уменьшения  $D_{st}$ . Кружок на горизонтальной оси соответствует кульминации Солнца. (б) Для 25.02–03.03.2017 приведены скорость солнечного ветра и концентрация протонов по измерениям на спутнике WIND.

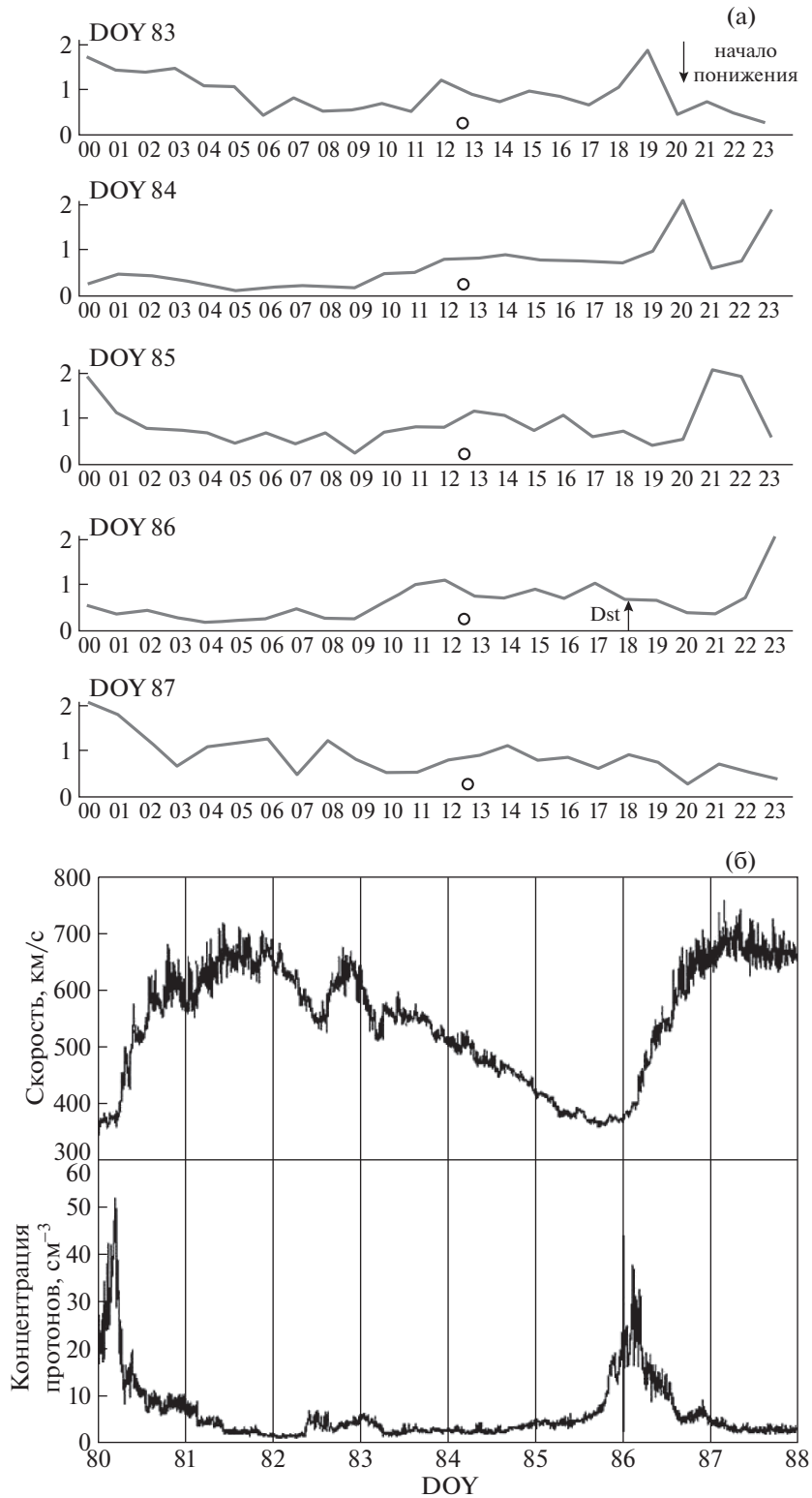


Рис. 2. То же, что на рис. 1, для события #2, 27.03.2017 (а, б).

совым интервалам уровня мерцаний данных суток к предыдущим для DOY 86, четырех суток, предшествовавших DOY 86, и суток после DOY 86.

На верхней панели рис. 2а видно начало ослабления вечерних мерцаний около 20<sup>h</sup> DOY 83, которое продолжилось в ночные и утренние часы

DOY 84. На второй и третьей панелях рис. 2а видно, что в вечерние часы около 20<sup>h</sup> DOY 84 и 21<sup>h</sup> DOY 85 наблюдалось кратковременное усиление вечерних мерцаний. Падение  $D_{st}$  с пиком около 18<sup>h</sup> DOY 86 обозначено стрелкой на предпоследней панели рис. 2а. Заметное усиление мерцаний фиксируется позже, между 23<sup>h</sup> и 02<sup>h</sup>. На рис. 2б приведены данные по скорости и плотности солнечного ветра у орбиты Земли, полученные по измерениям на спутнике WIND. На рис. 2б видно увеличение плотности плазмы для DOY 86, которое предшествует увеличению скорости плазмы. Время, прошедшее после начала понижения вечерних мерцаний в 20<sup>h</sup> DOY 83 и пиком  $D_{st}$  в 18<sup>h</sup> DOY 86, составило около 70 ч, что соответствует повороту Солнца на угол около 40°.

### 3.3. Событие #3: 28.05.2017 г.

28.05.2017 г. (DOY 148) около 08.00 UT (11.00<sup>h</sup>) произошло сильное уменьшение индекса  $D_{st}$  с пиковым значением  $-125$  нТл и величиной индекса  $K_p \sim 7$ . На рис. 3а приведены зависимости от времени суток отношения среднего по всем склонениям и по часовым интервалам уровня мерцаний данных суток к предыдущим для DOY 148 четырех суток, предшествовавших DOY 148, и суток после DOY 148.

На первой панели рис. 3а видно, что в вечерние и ночные часы около 20<sup>h</sup> DOY 145 наблюдалось сильное ослабление мерцаний, продолжающееся до 10<sup>h</sup> утра DOY 146, которое усилилось в вечерние и ночные часы DOY 146–147, сохранилось в вечерние и ночные часы DOY 147–148. На предпоследней панели видно усиление мерцаний в период с 03<sup>h</sup> до 09<sup>h</sup> DOY 148, усиление мерцаний после события незначительно, что можно объяснить тем, что луч зрения проходит на небольших элонгациях.

На рис. 3б приведены данные по скорости и плотности солнечного ветра у орбиты Земли, полученные по измерениям на спутнике WIND. На рис. 3б видны значительные увеличения плотности плазмы для DOY 147, что сопровождается увеличением скорости плазмы. Время, прошедшее после начала понижения вечерних мерцаний в 20<sup>h</sup> DOY 145 и пиком  $D_{st}$ , составило около 60 ч, что соответствует повороту Солнца на угол около 33°.

### 3.4. Событие #4: 10.07.2017 г.

09.07.2017 г. (DOY 190) около 11.00 UT (14.00<sup>h</sup>) произошло уменьшение индекса  $D_{st}$  до  $-24$ , понижение которого плавно продолжалось до 03.00 UT (06.00<sup>h</sup>) с пиковым значением  $-33$  нТл и величиной индекса  $K_p \sim 5$ . На рис. 4а приведены

зависимости от времени суток отношения среднего по всем склонениям и по часовым интервалам уровня мерцаний данных суток к предыдущим для DOY 190, четырех суток до и суток после DOY 191.

На панели DOY 188 рис. 4а видно, что в ночные часы около 23 DOY 188 наблюдалось ослабление мерцаний, которое продолжалось вплоть до прихода возмущения к Земле, вызвавшее понижение  $D_{st}$  и усиление мерцаний с 21 DOY 190 по 01<sup>h</sup> DOY 191. Нулевыми значениями между 14<sup>h</sup> и 16<sup>h</sup> на панели DOY 187 отсутствуют данные из-за технического сбоя в наблюдениях. Повышение относительного уровня мерцаний между 05<sup>h</sup> и 11<sup>h</sup> DOY 192 соответствует восстановлению абсолютного уровня мерцаний до невозмущенного состояния.

На рис. 4б приведены данные по скорости и плотности солнечного ветра у орбиты Земли, полученные по измерениям на спутнике WIND. На рис. 4б видно значительное кратковременное увеличение плотности плазмы для DOY 190, которое сопровождается последующим увеличением скорости плазмы. По-видимому, сравнительно небольшое уменьшение  $D_{st}$  обусловлено сравнительно малой протяженностью сжатой части возмущенного потока. Время, прошедшее после начала понижения вечерних мерцаний в 14<sup>h</sup> DOY 188 и понижением  $D_{st}$ , составило около 60 ч, что соответствует повороту Солнца на угол около 33°.

### 3.5. Событие #5: 16.07.2017 г.

16.07.2017 г. (DOY 197) около 14.00 UT (17.00<sup>h</sup>) произошло сильное уменьшение индекса  $D_{st}$  с пиковым значением  $-64$  нТл и величиной индекса  $K_p \sim 6$ . В течение DOY 194–195 в короне между 23<sup>h</sup> DOY 194 и 04<sup>h</sup> DOY 195 произошли четыре вспышки класса C, а также более сильная и длительная вспышка класса M 2.4 в 05<sup>h</sup> DOY 195. Вспышки были связаны с активной областью 2665, которая находилась вблизи западного лимба Солнца.

На рис. 5а приведены зависимости от времени суток отношения среднего по всем склонениям и по часовым интервалам уровня мерцаний данных суток к предыдущим для DOY 197, четырех суток, предшествовавших DOY 197, и суток после DOY 197. На верхней панели DOY 193 наблюдается ослабление мерцаний с началом около 01<sup>h</sup>. В последующие дни уровень мерцаний отличался заметной переменностью. Повышение уровня мерцаний между 06<sup>h</sup> и 11<sup>h</sup> DOY 195 к западу от Солнца может быть интерпретировано как прохождение через зондирующую область ведущей части выброса корональной массы, которая за время око-

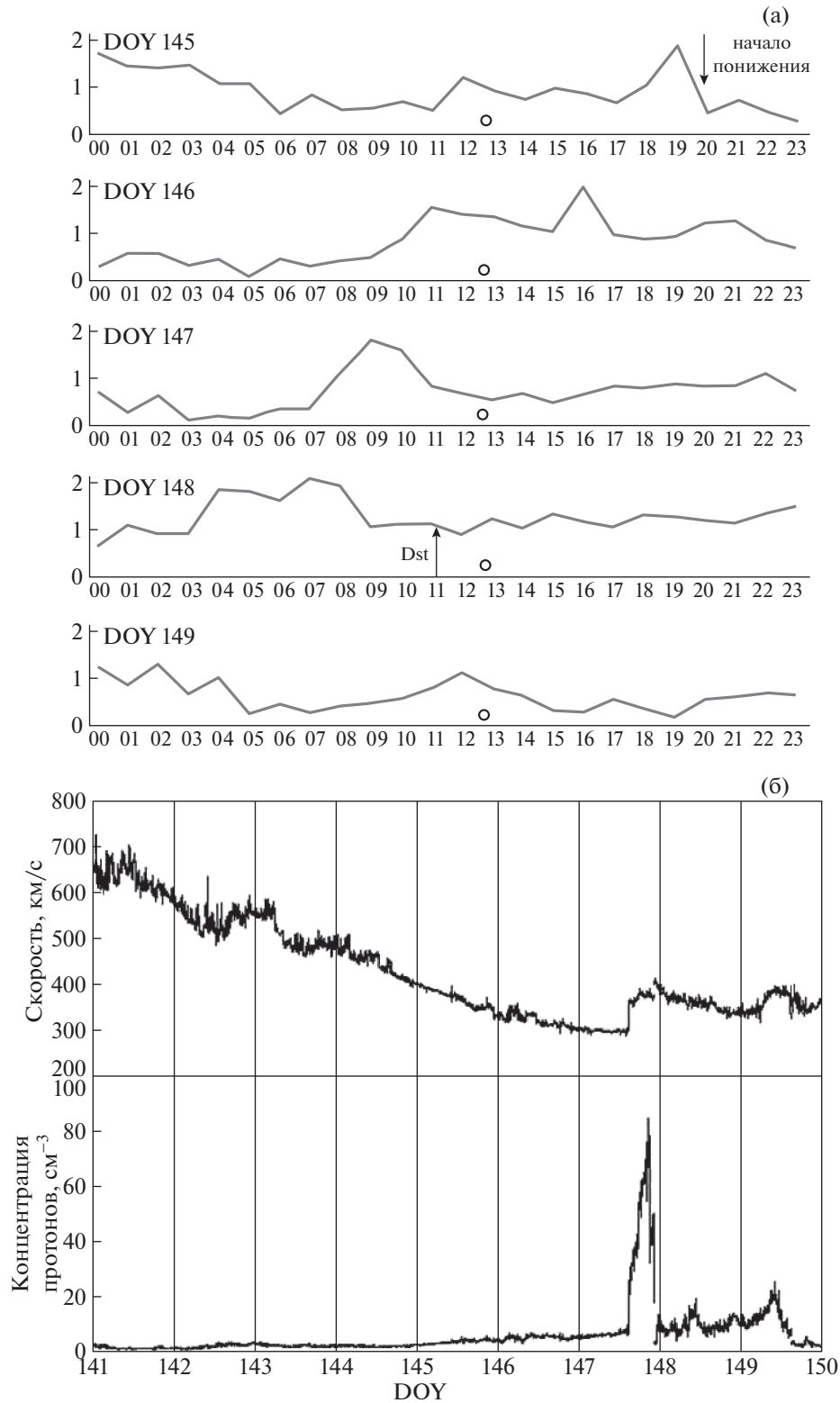
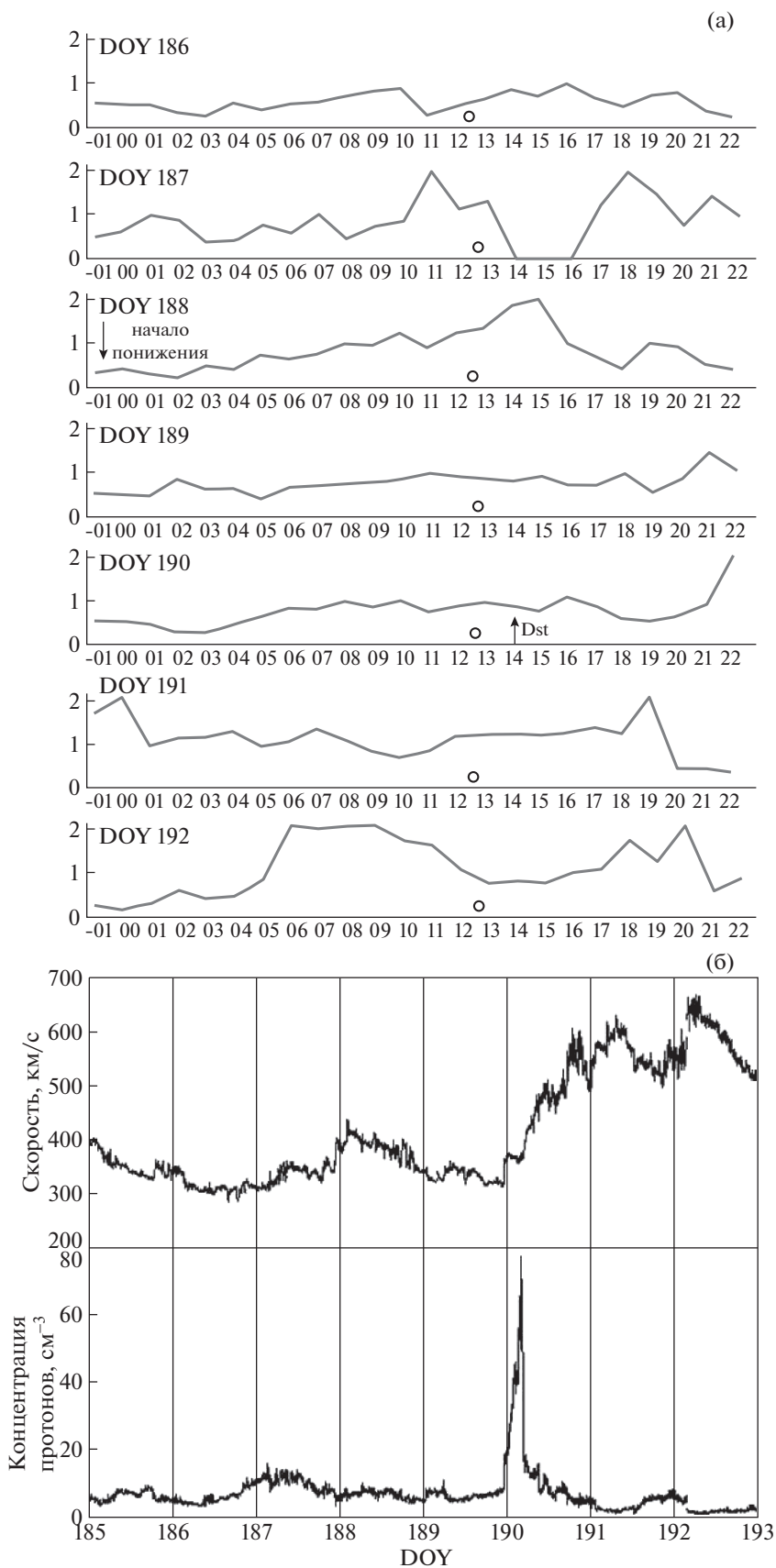


Рис. 3. То же, что на рис. 1, для события #3, 28.05.2017 (а) и 27.03.2017 (б).

ло 8 часов прошла расстояние около 0.4 а.е., если начало выброса совпадает с началом вспышечной активности. Соответствующее значение скорости

ведущей части составляет около 2000 км/с и оказывается еще больше, если выброс ассоциирован со вспышкой М 2.4. Промежуток времени между



**Рис. 4.** То же, что на рис. 1, для события #4, 09.07.2017 (а, б). По оси абсцисс на панели (а) указано московское время с 23<sup>h</sup> предыдущего по 22<sup>h</sup> текущего дня.



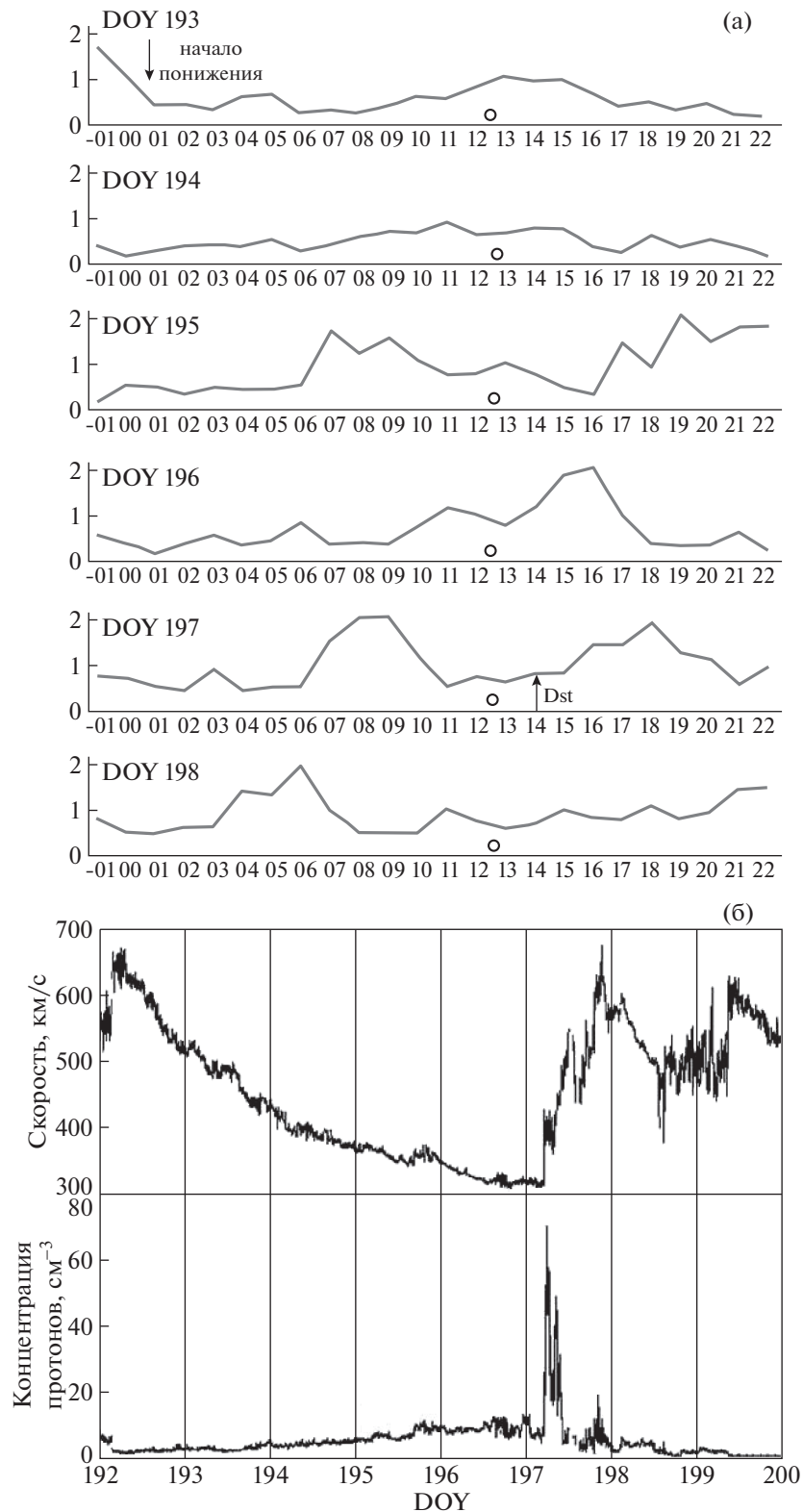


Рис. 5. То же, что на рис. 4, для события #5, 16.07.2017 (а, б).

10<sup>h</sup> и 15<sup>h</sup> не является эффективным для наблюдений мерцаний, так как в близких к Солнцу областях мерцания подавлены за счет влияния соб-

ственных угловых размеров источников. Повышение уровня флуктуаций после 16<sup>h</sup> DOY 195 связано с тем, что выброс занимает все больший

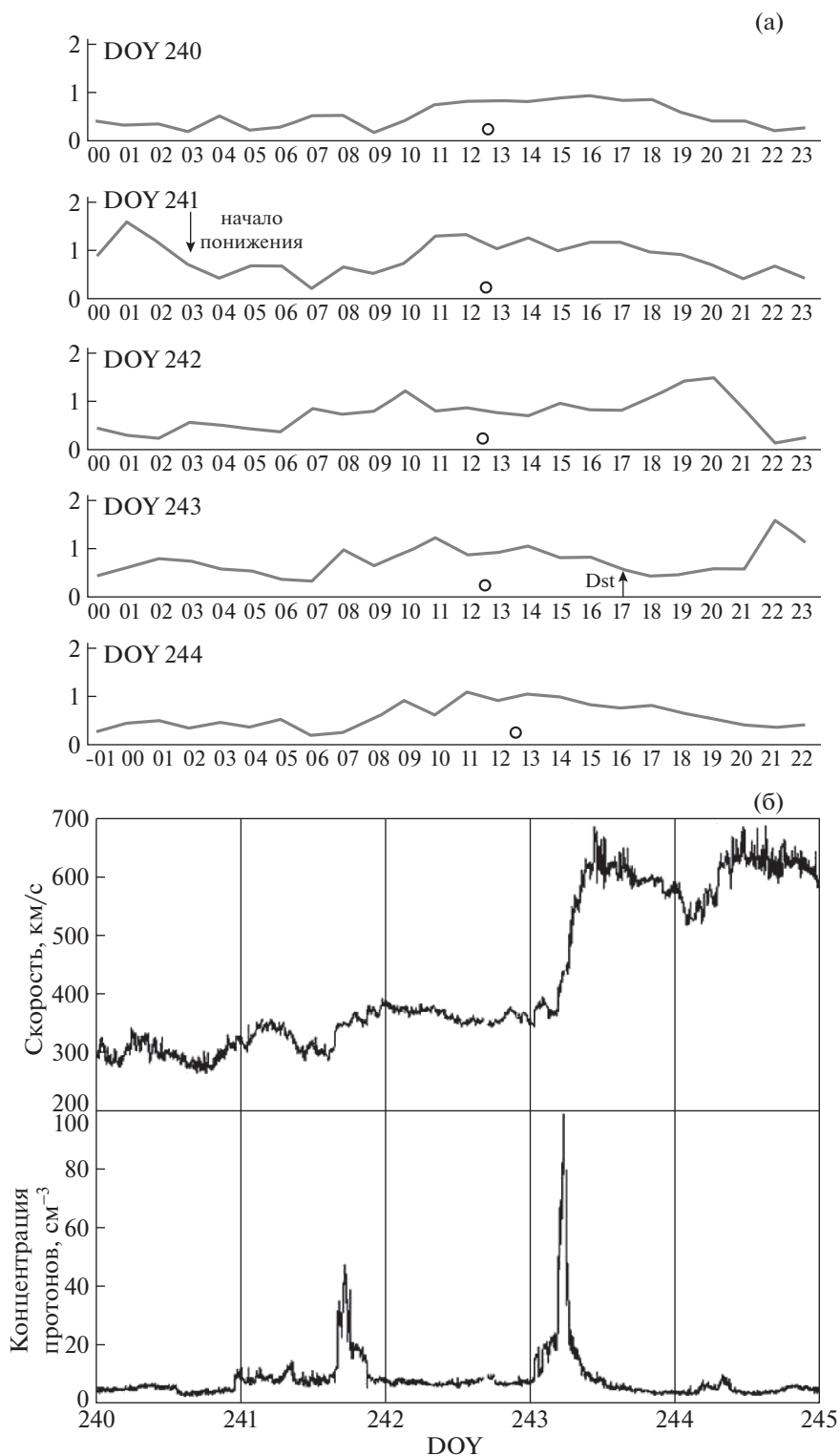
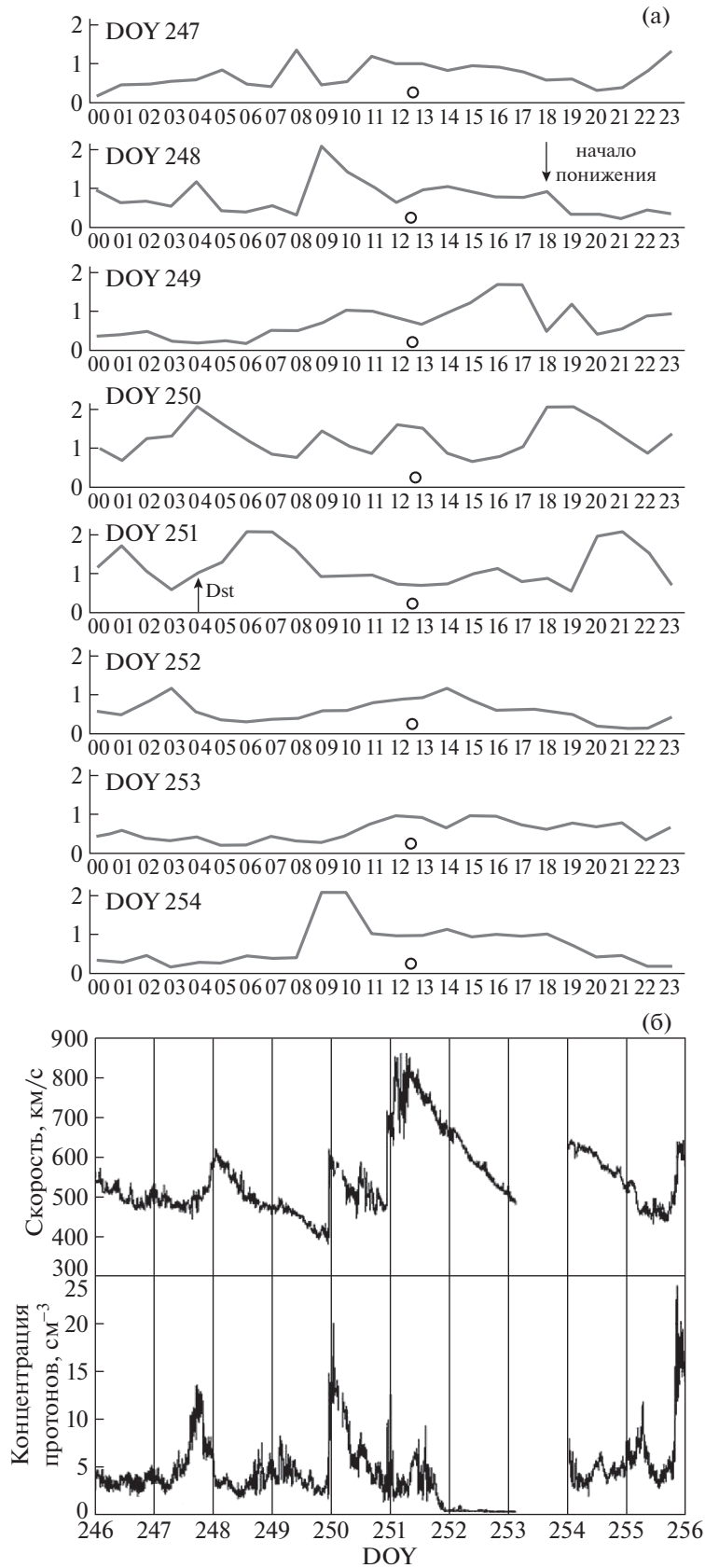


Рис. 6. То же, что на рис. 1, для события #6, 31.08.2017 (а, б).

объем и его фланговая часть захватывает уже области к востоку от Солнца. Усиление мерцаний при распространении выброса продолжается в последующие два дня, что видно между 14<sup>h</sup> и

17<sup>h</sup> DOY 196 (к востоку от Солнца). Усиление мерцаний между 07<sup>h</sup> и 10<sup>h</sup> DOY 197 уже не связано с выбросом, а обусловлено приходом к Земле сжатой части коротирующего потока, что следует



**Рис. 7.** То же, что на рис. 1, для события #7, 08.09.2017 (а, б). Событию #7 предшествовала серия вспышек класса М и Х (см. табл. 1, 2). Усиление мерцаний DOY 251 вероятно можно связать с одной из вспышек, произошедших 04–07.09.2017 г.

из рис. 5б. Магнитная буря произошла около 14<sup>h</sup> DOY 197 и сопровождалась усилением мерцаний между 15<sup>h</sup> и 21<sup>h</sup>.

На рис. 5б приведены данные по скорости и плотности солнечного ветра у орбиты Земли, полученные по измерениям на спутнике WIND. На рис. 5б видно значительное кратковременное увеличение плотности плазмы для DOY 197, которое сопровождается увеличением скорости плазмы. Время, прошедшее после начала понижения вечерних мерцаний в 01<sup>h</sup> DOY 193 и пиком  $D_{st}$ , составило около 110 ч, что соответствует повороту Солнца на угол около 60°.

### 3.6. Событие #6: 31.08.2017 г.

31.08.2017 г. (DOY 243) около 14.00 UT (17.00<sup>h</sup>) произошло сильное уменьшение индекса  $D_{st}$  с пиковым значением –50 нТл и величиной индекса  $K_p \sim 5$ . На рис. 6а приведены зависимости от времени суток отношения среднего по всем склонениям и по часовым интервалам уровня мерцаний данных суток к предыдущим для DOY 243, четырех суток, предшествовавших DOY 243, и суток после DOY 243. Динамика уровня мерцаний в целом аналогична событиям #1–4. Магнитной буре предшествовало понижение уровня мерцаний, которое началось около 03<sup>h</sup> DOY 241, понижение усиливалось в ночные часы DOY 242, 243. После магнитной бури между 21<sup>h</sup> и 23<sup>h</sup> DOY 243 произошло сравнительно кратковременное и не очень сильное повышение уровня мерцаний. Такое поведение уровня мерцаний в конце DOY 243 связано, по-видимому, с невысокой продолжительностью прохождения сжатой части возмущения (рис. 6б). Время запаздывания магнитной бури по отношению к началу понижения мерцаний составило 62 ч, что соответствует повороту Солнца на угол около 35°.

### 3.7. Событие #7: 08.09.2017 г.

08.09.2017 г. (DOY 251) около 01.00 UT (04.00<sup>h</sup>) произошло сильное уменьшение индекса  $D_{st}$  с пиковым значением –124 нТл и величиной индекса  $K_p \sim 8$ . Из всех событий 2017 г. это событие было самым мощным, магнитная буря продолжалась около суток. На рис. 7а приведены зависимости от времени суток отношения среднего по всем склонениям и по часовым интервалам уровня мерцаний данных суток к предыдущим для DOY 251, четырех суток, предшествовавших DOY 251, и трех суток после DOY 251. Около 18<sup>h</sup> DOY 248 наблюдается ослабление мерцаний, которое соответствует приближению к Земле коротирующего возмущения с восточной стороны. Событию #7 предшествовала серия вспышек M

**Таблица 2.** Даты и классы вспышек для события #7

Дата	Класс вспышки	Время
04.09.2018 DOY 247	M1.2	08:49:00
	M1.5	18:30:00
	M1.0	21:22:00
	M1.7	22:37:00
	M1.5	23:02:00
05.09.2018 DOY 248	M5.5	23:33:00
	M2.1	01:14:00
	M4.2	04:08:00
	M1.0	06:51:00
	M3.2	07:53:00
06.09.2018 DOY 249	M3.8	09:40:00
	M2.3	20:43:00
	X2.2	12:10:00
	X9.3	15:02:00
	M2.5	18:56:00
07.09.2018 DOY 250	M1.4	22:30:00
	M1.2	02:39:00
	M2.4	08:02:00
	M1.4	12:54:00
	M7.3	13:15:00
07.09.2018 DOY 250	X1.3	17:36:00

X классов, высокая активность короны продолжалась в течение четырех суток, DOY 247–250; баллы вспышек и времена максимального рентгеновского излучения приведены в табл. 2. Вспышки были связаны с активной областью 2673, которая располагалась вблизи западного лимба Солнца. отождествление усилений мерцаний с индивидуальными событиями в короне в случае длительных вспышечных серий затруднительно в силу неоднозначности временной привязки и возможного наложения выбросов. Общая картина динамики уровня мерцаний обусловлена наложением распространяющихся возмущений, связанных с мощной вспышечной активностью, на коротирующее возмущение. Из рис. 7а видно, что в течение DOY 248–251 суточное распределение относительного уровня мерцаний было сильно нестационарным.

Первое усиление мерцаний произошло около 09<sup>h</sup> DOY 248 при расположении просвечиваемой области к западу от Солнца, его можно связать с первой, не самой мощной, вспышечной серией DOY 247. При этом средняя скорость ведущей части выброса между короной и расстоянием 0.5 а.е. составляла около 1300 км/с, если выброс возник в начале серии между 18<sup>h</sup>30<sup>m</sup>, и около 2000 км/с, ес-

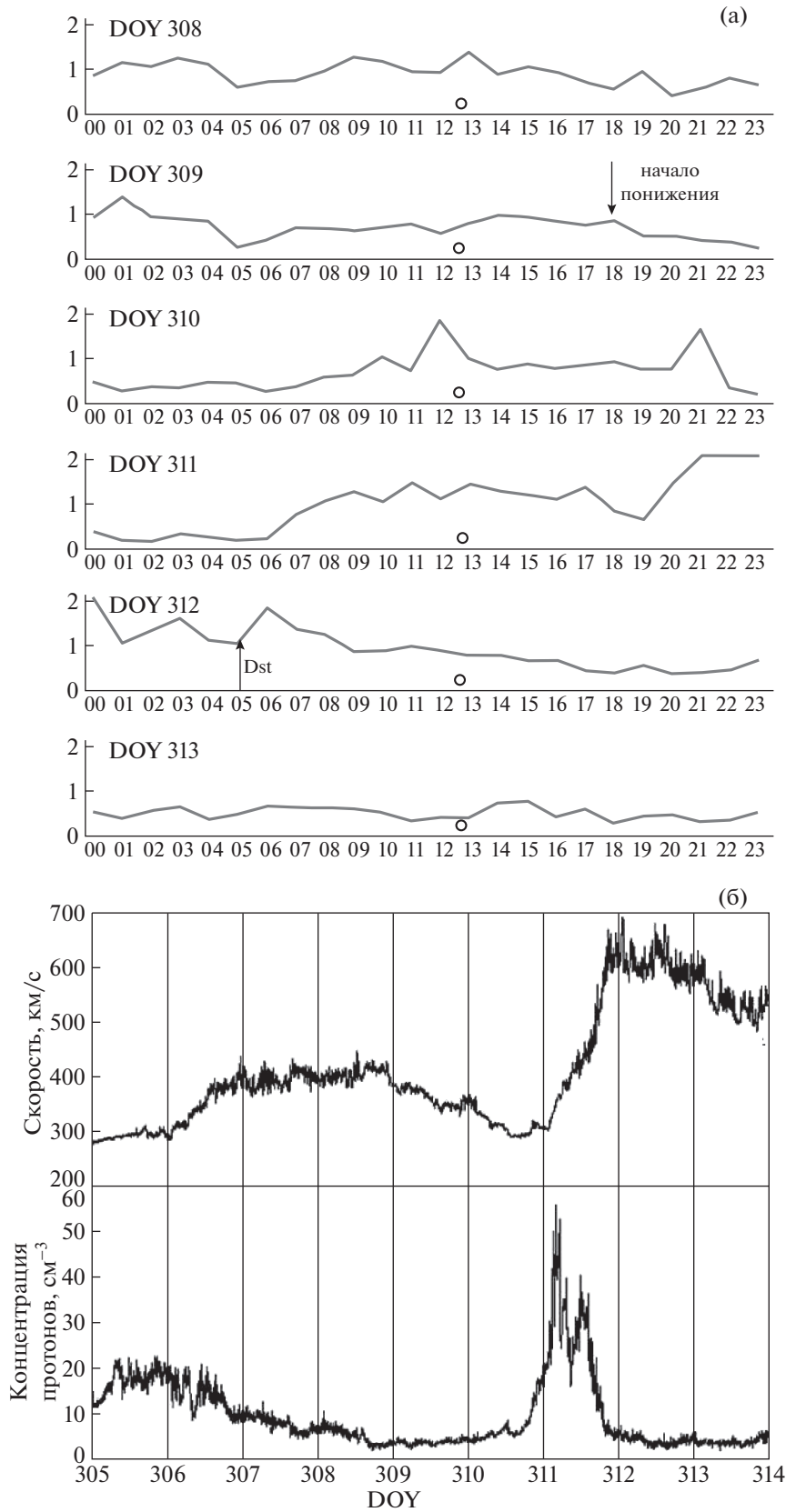


Рис. 8. То же, что на рис. 1, для события #8, 07–08.11.2017 (а, б).

ли выброс связан с наиболее сильной вспышкой серии M 5.5 в 09<sup>h</sup>30<sup>m</sup> (табл. 2).

Второе усиление мерцаний наблюдается между 15<sup>h</sup> и 17<sup>h</sup> DOY 249, что соответствует возмущенности межпланетной плазмы на расстояниях около 0.5 а.е. к востоку от Солнца. На протяжении всех суток DOY 250 межпланетная плазма была сильно возмущенной на всех расстояниях от Солнца. Возмущенность значительно усилилась для DOY 251 (на кривых рис. 7а показано отношение уровня мерцаний в данный день к предыдущему). Более подробно событие #7 для DOY 249–251 проанализировано в работах [10, 12], в частности, в [10] усиления мерцаний связывались с выбросами после вспышек M 3.2 DOY 248 и X 9.3 DOY 249 (табл. 2). Сделанные в [10] оценки показали, что средние скорости выбросов между короной и 0.5 а.е. составляли около 1000 и ~2000 км/с соответственно. Отметим, что предшествующее выбросам коротирующее возмущение в работах [10, 12] не рассматривалось.

На рис. 7б приведены данные по скорости и концентрации плазмы на спутнике WIND, виден приход к Земле серии сильных возмущений. Усиления вечерних и ночных мерцаний DOY 250 и DOY 251 обусловлены примыкающей к Земле областью солнечного ветра, аналогичные усиления концентрации можно видеть в эти же дни на рис. 7б. В последующие дни DOY 252 и DOY 253 на рис. 7а видно сильное ослабление уровня мерцаний. Средняя концентрация плазмы в эти дни согласно рис. 7б была также аномально низкой, с чем связан разрыв в данных для DOY 253. Сильная магнитная буря для события #7 вызвана, по всей видимости, вспышечным возмущением, которое “поглотило” коротирующее возмущение. Это следует также из временных зависимостей скорости и концентрации плазмы в начале DOY 251, которые заметно отличаются от типичных для областей взаимодействия разноскоростных потоков. Сильное падение средней концентрации и уровня флуктуаций для DOY 252 и DOY 253 может быть объяснено “выметанием” фоновой плазмы и плазмы коротирующего потока мощными выбросами типа гало вспышечного происхождения.

### 3.8. Событие # 8: 07–08.11.2017 г.

Событию 07–08.11.2017 г. не предшествовало вспышек класса C и выше. В ночь с 07.11.2017 г. (DOY 311) на 08.11.2017 г. (DOY 312) произошло сильное уменьшение индекса  $D_{st}$  с минимумами –70 нТл в 23.00 UT (02.00<sup>h</sup>), –74 нТл в 02.00 UT (05.00<sup>h</sup>) и –70 нТл в 05.00 UT (08.00<sup>h</sup>), величина индекса  $K_p$  при этом увеличилась до 6. На рис. 8а приведены зависимости от времени суток отно-

шения среднего по всем склонениям и по часовым интервалам уровня мерцаний данных суток к предыдущим для DOY 311, четырех суток, предшествовавших DOY 311, и суток после DOY 312. В целом событие #8 качественно аналогично коротирующим событиям #1–4, 6. Как видно из рис. 8а, в вечерние часы DOY 309 началось ослабление мерцаний, которое продолжалось в вечерние и ночные часы двух последующих суток. Кратковременное усиление мерцаний около 12<sup>h</sup> DOY 310 относится к западной стороне и не связано с коротирующим потоком. Около 20<sup>h</sup> DOY 311 началось усиление мерцаний, которое сопровождало магнитной буре, продолжалось до 08<sup>h</sup> DOY 312 и было связано с приходом к Земле сжатой части возмущенного потока плазмы.

На рис. 8б приведены данные по скорости и плотности солнечного ветра у орбиты Земли, полученные по измерениям на спутнике WIND. На рис. 8б видно значительное кратковременное увеличение плотности плазмы для DOY 311, которое сопровождалось последующим значительным увеличением скорости плазмы. Время, прошедшее после начала понижения вечерних мерцаний в 18<sup>h</sup> DOY 309 и пиком  $D_{st}$ , составило около 59 ч, что соответствует повороту Солнца на угол около 33°.

## 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Событие #2 произошло примерно через 617 часов после события #1, это запаздывание соответствует примерно 1 обороту Солнца. События #5 и #7 произошли примерно через 5 и 7 оборотов после события #1 или через 4 и 6 оборотов после события #2. События #3 и #8 отделяет примерно 6 оборотов Солнца. Можно утверждать, что события #1, #2, #5 вызваны одной и той же крупномасштабной структурой, вращающейся вместе с Солнцем. События #3 и коротирующий поток события #8 связаны с другой пространственной структурой. Причем для событий #1, #2, #5 имеется корреляция с событиями 2016 г. (событие #1 DOY 60 2017 г. отделяет примерно 5 оборотов Солнца от события DOY 287 2016 г.). Это позволяет утверждать, что связанная с корональной дырой пространственная структура в солнечном ветре является долгоживущей и существует, по крайней мере, 20 оборотов Солнца. Событие #6 произошло через 53 дня после события #4, что соответствует примерно 2 оборотам Солнца. Эти события также коррелируют с событиями 2016 г. (DOY 67 2016 г.). Особое место занимает событие #7, время которого по кратности периоду вращения Солнца формально находится в одном ряду с событиями #1, #2, #5, но для этого события магнитная буря была вызвана вспышечным выбросом.

Проведенный анализ позволяет выделить следующие особенности в динамике уровня межпланетных мерцаний на временных интервалах, предшествующих магнитным бурям. За 3–4 дня до геомагнитного возмущения для всех рассмотренных событий начинается ослабление вечерних и ночных мерцаний, которое продолжается в последующие сутки. Ослабление мерцаний можно объяснить уменьшением абсолютного уровня мелкомасштабных флуктуаций плотности плазмы в медленном солнечном ветре перед сжатой частью возмущения на достаточно больших удалениях от Солнца. Природа падения уровня флуктуаций пока остается неясной. Желателен анализ аналогичных возмущений на других фазах солнечного цикла, которые могли бы подтвердить систематический характер этой особенности в долготном распределении флуктуаций плотности плазмы. В шести событиях из 8 (#1–4, #6, #8) динамика уровня мерцаний определяется короткими потоками. Для событий #5 и #7 одновременно с коротирующими потоками происходили выбросы вспышечного происхождения, распространяющимися из окрестности западного лимба Солнца. При этом для события #5 магнитная буря была вызвана коротирующим потоком, что может быть объяснено сравнительно невысокой мощностью выброса. Событие #7 может рассматриваться как уникальное: к Земле с востока приближался коротирующий поток, а с запада — мощный выброс после вспышки класса X 9.3. Коротирующий поток перед его приходом к Земле был поглощен вспышечным выбросом, который и вызвал магнитную бурю.

Практически одновременно с магнитной бурей происходит заметное усиление мерцаний, которое выражено более четко, если буря происходит в вечерние или ночные часы. Выше анализировались данные об уровне мерцаний с характерными временами около 1 с. Усиления секундных мерцаний, как правило, связаны с повышениями уровня турбулентности межпланетной плазмы. Однако в периоды магнитных бурь существенный вклад в секундные мерцания может вносить возмущенная ионосфера [9, 10]. По этой причине наблюдения индивидуальных источников, а также массовые измерения в возмущенные периоды не позволяют разделить межпланетные и ионосферные мерцания. В особенности это относится к вечерним и ночным мерцаниям, когда уровень межпланетных мерцаний сравнительно низок.

Для определения происхождения усиления мерцаний, сопутствующих магнитным бурям, был проведен специальный анализ, основанный на использовании “опорных” источников. В периоды времени, соответствующие усиленным мерцаниям на фоне магнитных бурь, сравнивались мерцания двух близко расположенных ис-

точников (пары источников различны для различных событий). Один из них был компактным, угловой размер порядка  $0.1''$ , второй был протяженным с угловым размером более  $1'$ . Компактный источник мерцает как на межпланетной, так и на ионосферной плазме. Для протяженного источника межпланетные мерцания сильно подавляются и возможны только мерцания на ионосфере. Оказалось, что для событий #1–6, #8 уровень мерцаний компактного источника значительно превосходит уровень мерцаний протяженного источника. Это показывает, что секундные мерцания, сопутствующие магнитной буре, связаны с повышением уровня мелкомасштабной турбулентности в области солнечного ветра, прилегающей к орбите Земли.

Для события #7, как показано в [10], сопутствующее магнитной буре усиление секундных мерцаний имеет место как для компактного, так и для протяженного источников, что однозначно указывает на связь усиления мерцаний с возмущенной ионосферой и подтверждает кардинальное отличие этого события от всех других, рассмотренных выше. Характерные особенности события #7 могут быть использованы при моделировании взаимодействия выбросов корональной массы с коротирующими потоками. В настоящей работе рассматриваются в основном проявления крупномасштабных возмущений двух типов в динамике уровня мерцаний. По этой причине мы ограничились данными с КА WIND только по скорости и плотности плазмы. Для более детального исследования воздействия возмущенных потоков на магнитосферу Земли могут быть использованы дополнительные параметры плазмы такие, как температура и параметр бета, приведенные, например в каталоге, размещенном на сайте ИКИ РАН<sup>5</sup>. Отметим, что при использовании наблюдений межпланетных мерцаний для краткосрочного прогноза геомагнитной активности желательны дополнительные данные о Vz компоненте межпланетного магнитного поля в возмущенных потоках [13].

## 5. ВЫВОДЫ

Проведенное рассмотрение позволяет сделать следующие выводы.

1. В 2017 г. на фазе спада солнечной активности большинство сильных геомагнитных возмущений было связано с коротирующими областями взаимодействия разноскоростных потоков солнечного ветра. Коротирующие потоки 2017 г. по 27-дневной периодичности ассоциируются с аналогичными возмущениями 2016 г., что показыва-

<sup>5</sup> <http://ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/>

ет их долгоживущий характер с временем жизни не менее 20 оборотов Солнца.

2. Данные мониторинга межпланетных мерцаний позволяют фиксировать коротирующие возмущения до их прихода к Земле. Как и в 2016 г. [11], в вечернем секторе за 3–4 дня до прихода сжатой части возмущения фиксируется ослабление мерцаний, которое сохраняется или даже усиливается в течение последующих суток. Понижение уровня мерцаний связано, по-видимому, с существенным уменьшением уровня мелкомасштабной турбулентности плазмы в протяженной ( $30^\circ$ – $50^\circ$  по долготе) области перед фронтальной частью возмущения.

3. В некоторых событиях на фоне коротирующих возмущений наблюдаются выбросы корональной массы. При этом магнитные бури в зависимости от мощности распространяющихся возмущений могут вызываться или возмущениями вспышечного происхождения или коротирующим потоком даже в тех случаях, когда выброс генерируется в короне вблизи западного лимба Солнца.

4. Для всех наблюдавшихся событий одновременно с магнитной бурей происходит усиление секундных мерцаний, которое наиболее четко фиксируется, если буря происходит в вечерние или ночные часы. Для рассмотренных нами событий 2016–2017 гг. сопутствующие магнитной буре усиления мерцаний связаны с повышениями уровня мелкомасштабных флуктуаций в примыкающих к Земле областях солнечного ветра, если буря возбуждается коротирующим возмущением, и с возмущенной ионосферой, если буря возбуждается возмущением вспышечной природы.

## БЛАГОДАРНОСТИ

В части ночных мерцаний работа поддержана Программой КП19-270 “Вопросы происхождения и эволюции Вселенной с применением методов наземных наблюдений и космических исследований”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *M. M. Bisi, A. R. Breen, B. V. Jackson, R. A. Fallows, et al.*, *Solar Phys.* **265**, 49 (2010).
2. *M. M. Bisi, A. Gonzalez-Esparza, B. V. Jackson, M. Tokumaru, and J. Leibacher*, *Solar Phys.* **290** (9), 2393 (2015).
3. *T. Iju, M. Tokumaru, and K. Fujiki*, *Solar Phys.* **289**, 2157 (2014).
4. *A. Johri and P. K. Manoharan*, *Solar Phys.* **291**, 1433 (2016).
5. *M. Tokumaru, M. Kojima, K. Fujiki, and A. Yakobe*, *J. Geophys. Res.* **105** (A5), 10435 (2000).
6. *Yu. I. Yermolaev, N. S. Nikolaeva, I. G. Lodkina, and M. Yu. Yermolaev*, *J. Geophys. Res.* **51**, 21 (2011).
7. *Ю. И. Ермолаев, И. Г. Лодкина, Н. С. Николаева, М. Ю. Ермолаев, М. О. Рязанцева*, *Космич. исслед.* **55**, 189 (2017).
8. *S. J. Tappin*, *Planetary and Space Science* **34**, 93 (1986).
9. *I. V. Chashei, S. A. Tyul'bashev, V. I. Shishov, I. A. Subaev*, *Space Weather* **14**, 682 (2016).
10. *И. В. Чашей, С. А. Тюльбашев, В. И. Шишов, И. А. Субаев*, *Астрон. журн.* **95**, 366 (2018).
11. *И. В. Чашей, С. А. Тюльбашев, И. А. Субаев, А. И. Чернышова*, *Астрон. журн.* **96**, 407 (2019).
12. *M. Tokumaru, K. Fujiki, K. Iwai, S. Tyul'bashev, and I. Chashei*, *Solar Phys.* **294**, 15 (2019).
13. *B. V. Jackson, P. P. Hick, A. Buffington, H.-S. Yu, M. M. Bisi, M. Tokumaru, X. Zhao*, *Astrophys. J.* **803**, L1 (2015).