

УДК 523.9-466

НАБЛЮДЕНИЯ КОРОТИРУЮЩИХ ПОТОКОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НА РАДИОТЕЛЕСКОПЕ БСА ФИАН В 2016 г.

© 2019 г. И. В. Чашей^{1*}, С. А. Тюльбашев¹, И. А. Субаев¹, А. И. Чернышова¹¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

Поступила в редакцию 23.11.2018 г.; после доработки 16.12.2018 г.; принята к публикации 17.12.2018 г.

Солнечные и геомагнитные данные показывают, что на фазе спада солнечной активности в 2016 г. доминирующая роль в сильных геомагнитных возмущениях была связана с долгоживущими коротирующими областями взаимодействия разноскоростных потоков солнечного ветра. Проведен анализ результатов мониторинга межпланетных мерцаний в периоды, предшествующие приходу к Земле нескольких коротирующих возмущений солнечного ветра, наблюдавшихся в 2016 г. Целью исследования является определение характерных особенностей динамики уровня мерцаний. Показано, что за 3–4 сут 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. Приход возмущения к Земле не всегда сопровождается магнитной бурей. Для уверенного краткосрочного прогноза геомагнитной активности требуются дополнительные данные о направлении компонента B_z магнитного поля в возмущенном потоке. Данные мониторинга межпланетных мерцаний показывают, что одновременно с магнитной бурей происходит усиление секундных мерцаний, которое наиболее четко фиксируется, если буря происходит в вечерние или ночные часы. В отличие от возмущений вспышечного происхождения, для которых усиление ночных мерцаний связано с возмущенной ионосферой, в случае коротирующих возмущений сопутствующее усиление мерцаний связано с примыкающей к Земле межпланетной средой и обусловлено повышением абсолютного уровня мелкомасштабной турбулентности в сжатой части возмущения.

DOI: 10.1134/S0004629919050013

1. ВВЕДЕНИЕ

Наблюдения межпланетных мерцаний используются как для исследования глобальной структуры солнечного ветра и ее динамики в цикле солнечной активности [1–4], так и для детектирования крупномасштабных возмущений [5–9]. Одним из достоинств метода является возможность зондирования областей солнечного ветра, которые недоступны для локальных измерений при помощи установленных на космических аппаратах приборов. 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 [10], примерно пропорционален средней концентрации плазмы. Имеется два основных типа крупномасштабных возмущений: распространяющиеся возмущения (interplanetary coronal mass

ejection, ICME), которые генерируются в короне после вспышек, и коротирующие области взаимодействия быстрых и медленных потоков солнечного ветра. Эти типы возмущений в среднем сравнимы по геоэффективности [11]. Распространяющиеся возмущения преобладают в фазе максимума солнечной активности, а коротирующие чаще наблюдаются при низком уровне солнечной активности.

В рамках программы мониторинга межпланетных мерцаний на радиотелескопе БСА ФИАН были исследованы два сопровождавшихся магнитными бурями события, связанные с распространяющимися возмущениями: распространяющийся в направлении на Землю выброс ICME типа гало [12] и лимбовый ICME выброс [13]. 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. Коротирующие возмущения ранее исследовались в основном статистически, в качестве их признака использовалась 27-дневная повторяемость [14]. Детальная информация об особенностях индивидуальных событий,

*E-mail: chashey@prao.ru

позволяющих отличить такие возмущения от распространяющихся, до сих пор отсутствует. В настоящей работе анализируются данные наблюдений мерцаний, связанные с несколькими короткими возмущениями, наблюдавшимися в 2016 г. на фазе спада солнечной активности. На основании этих данных будут определены характерные особенности динамики уровня мерцаний, позволяющие детектировать короткотирующее возмущение до его прихода к Земле.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Мониторинг межпланетных мерцаний, начиная с 2013 г., проводится на радиотелескопе БСА ФИАН с рабочей частотой 111 МГц, ширина полосы 430 кГц. С частотой съема информации 0.1 с круглосуточно записываются флуктуации плотности потока излучения всех радиисточников, попадающих в 96-лучевую диаграмму направленности радиотелескопа, которая перекрывает область склонений от -8° до $+42^\circ$. В течение суток регистрируются мерцания около 5000 компактных источников. Методика наблюдений и обработки подробно описана в работах [1, 12, 13].

Исследуемая область неба разбивается на квадратные площадки (пиксели) размером $3^\circ \times 3^\circ$ (3° по склонению $\times 12$ мин по прямому восхождению), и с учетом известной дисперсии шумов для каждой площадки вычисляется количество источников N с мерцающим потоком больше 0.1 Ян, $\sigma_{sc} > 0.1$ Ян. Типичные значения N в наших измерениях от нескольких единиц до 10. Далее вычисляется величина

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

где нормировочный коэффициент

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

определяется в результате усреднения по всем площадкам за 24 ч. Использование M вместо N позволяет подавить возможные вариации уровня шумов. Как показано в [1, 2], значение M (1) пропорционально среднему по данной площадке индексу мерцаний,

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

где δI — 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. 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 2016 Г.

На протяжении всего 2016 г. было проведено сопоставление данных по геомагнитной возмущенности (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/index.html>), характеризующейся индексом D_{st} , и вспышечной активностью короны по измерениям рентгеновского спутника GOES (http://www.thesis.lebedev.ru/sun_flares.html). Найдено 5 событий, для которых величина индекса D_{st} опускалась ниже -60 нТ. Оказалось, что во всех этих случаях в течение нескольких дней, предшествующих событию, достаточно сильные рентгеновские вспышки классов M и X отсутствовали. Можно было предположить, и дальнейший анализ это подтвердил, что геомагнитные возмущения были связаны с короткотирующими областями взаимодействия разноразностных потоков солнечного ветра. Далее будут проанализированы данные мониторинга межпланетных мерцаний, относящиеся к 5 выделенным событиям. Мы не ставим задачу описать солнечно-земное явление в целом, нас будут интересовать возмущения уровня мерцаний в дни, предшествующие магнитным бурям. 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 более $12^h 30^m$ мск (кульминация Солнца на долготе Пушино). С учетом того, что информативными для метода мерцаний на частоте 111 МГц являются элонгации более 30° , ожидаемые возмущения уровня мерцаний будут соответствовать времени суток после 14^h мск. При этом эффективно модулирующая область между 14^h и 18^h расположена к востоку от Солнца внутри орбиты Земли, а после 18^h (элонгации $> 90^\circ$) основной вклад в мерцания связан с областью, прилегающей к Земле.

3.1. Событие # 1

20.01.2016 (DOY20) около 20.00 мск (17.00 UT) произошло сильное уменьшение индекса D_{st} с пиковым значением -93 нТ и величиной K_p индекса 5. На рис. 1а приведены зависимости от времени

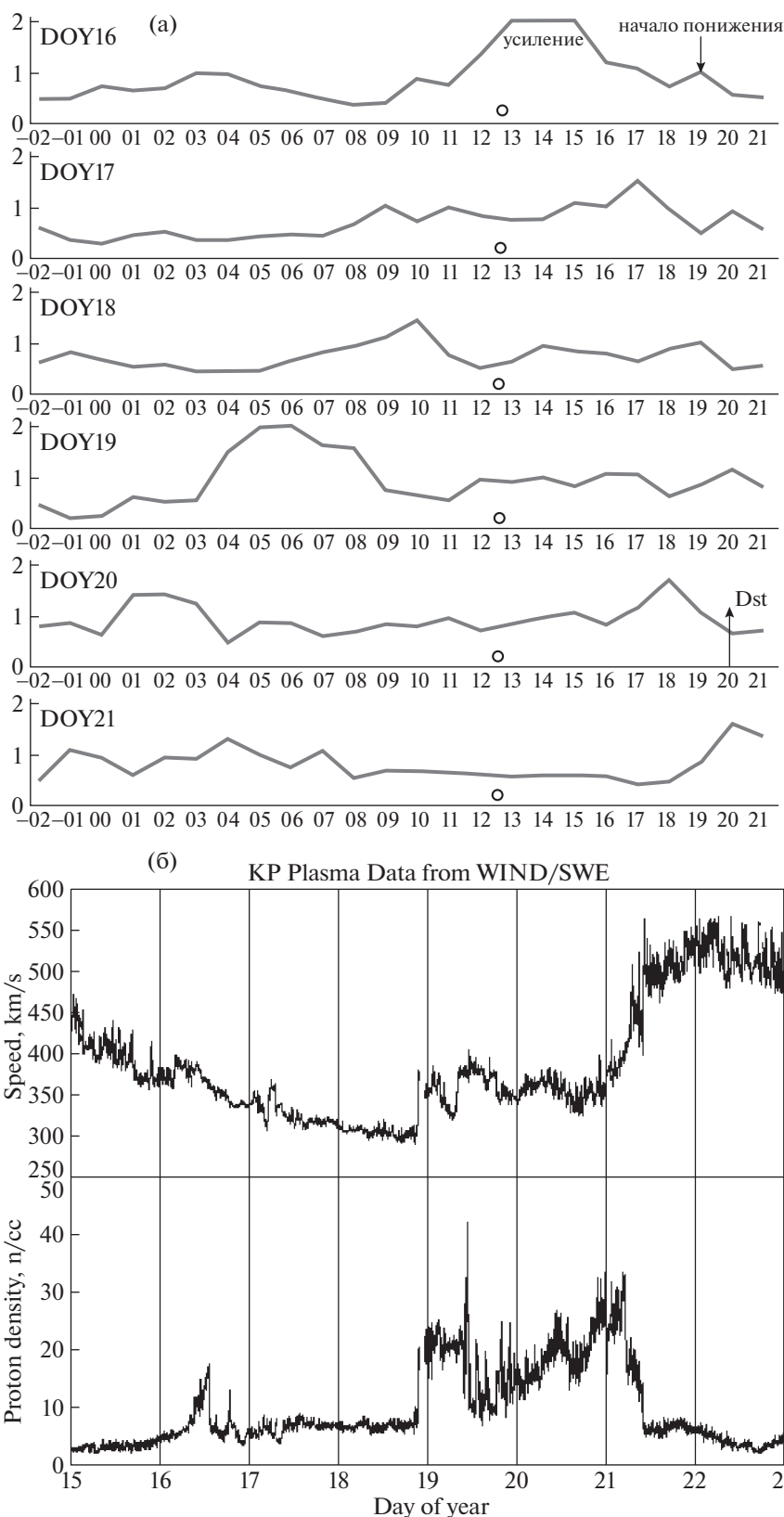


Рис. 1. а) Событие # 1, 16.01–21.01.2016. По оси ординат — отношение среднего по всем склонениям (16 пикселей) и по часовым интервалам (5 пикселей) квадрата индекса меридиан для данного дня к предыдущему дню. По оси абсцисс — московское время с 22^h предыдущего дня до 21^h данного дня. Вертикальными стрелками обозначены начало понижения уровня меридиан и время пикового уменьшения D_{st} . Кружок на горизонтальной оси соответствует кульминации Солнца. б) Событие # 1, 16.01–21.01.2016. Скорость солнечного ветра и концентрация протонов по измерениям на спутнике WIND.

суток для отношения среднего по всем склонениям и по часовым интервалам уровня мерцаний данных суток к предыдущим для DOY20, четырех суток, предшествовавших DOY20, и суток после DOY20. Отметим, что вариации уровня мерцаний на рис. 1а являются значимыми, так как каждая точка получена усреднением по более, чем 200 индивидуальным источникам.

Из рис. 1а видно, что между 13^h и 15^h DOY16 произошло резкое усиление мерцаний, которое может быть объяснено повышением плотности плазмы на гелиоцентрическом расстоянии около 0.5 а.е. В вечерние и ночные часы DOY16–17, как видно на первой и второй панелях, произошло ослабление мерцаний. Ослабление вечерних и ночных мерцаний продолжалось в DOY18 (третья панель) и стало более выраженным в DOY19 (четвертая панель). Отметим, что локальные усиления мерцаний на третьей (около 10^h) и четвертой (около 06^h) панелях не связаны с возмущением, вызвавшим понижение D_{st} , так как расположены с западной стороны от Солнца. На пятой панели рис. 1а стрелка соответствует пиковому значению D_{st} . Видно, что непосредственно перед пиком D_{st} , около 18^h мск произошло усиление мерцаний, что соответствует приходу к Земле сжатой области солнечного ветра. На рис. 1б приведены данные по скорости и плотности солнечного ветра у орбиты Земли, полученные по измерениям на спутнике WIND (http://omniweb.gsfc.nasa.gov/html/omni_source.html#pla). На рис. 1б видно существенное увеличение плотности плазмы в течение DOY19–20, которое сопровождалось увеличением скорости плазмы в течение DOY21. Время, прошедшее после начала понижения вечерних мерцаний в 22^h DOY17 и пиком D_{st} , составило около 73 ч, что соответствует повороту Солнца на угол около 40°.

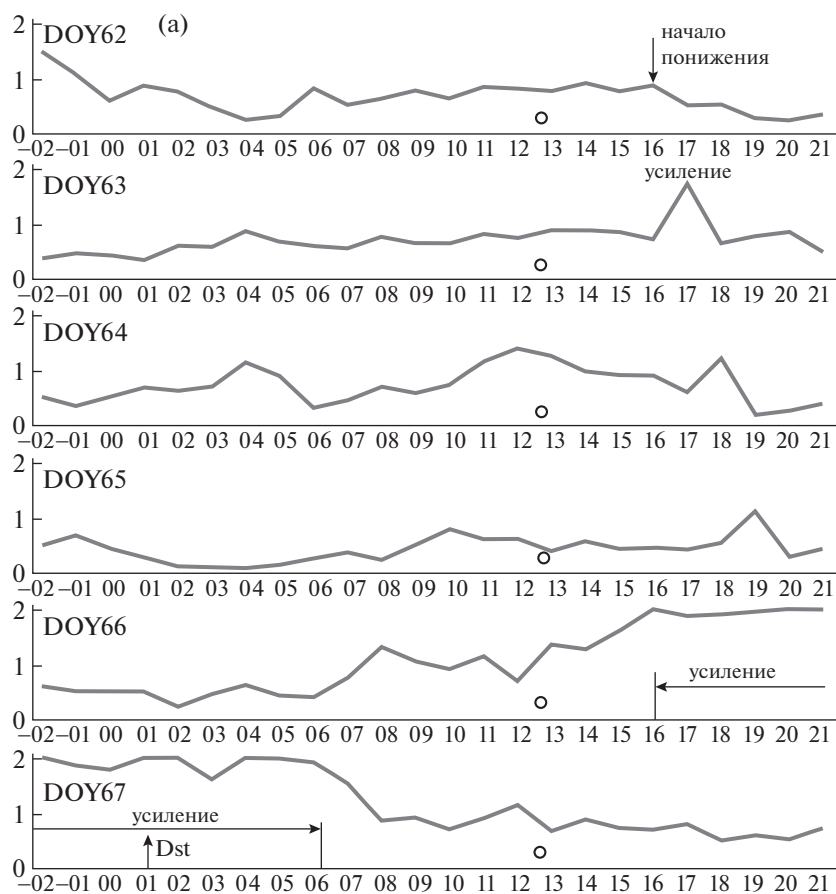
3.2. Событие # 2

07.03.2016 (DOY67) около 01.00 мск (22.00 UT 06.03) произошло сильное уменьшение индекса D_{st} с пиковым значением -98 нТ и величиной K_p индекса 6. На рис. 2а приведены зависимости от времени суток для отношения среднего по всем склонениям и по часовым интервалам уровня мерцаний данных суток к предыдущим для DOY66, четырех суток, предшествовавших DOY66, и суток после DOY66. Из верхней панели рис. 2а видно, что около 16^h DOY62 началось ослабление вечерних мерцаний, которое становилось все более существенным в течение DOY63, 64, 65, 66 (напомним, что на графиках приведено отношение уровня мерцаний в данный день к дню предыдущему). На второй панели рис. 2а видно усиление мерцаний около 17^h

DOY63, которое может быть объяснено повышением плотности плазмы на гелиоцентрическом расстоянии около 0.7 а.е. Начиная с 16^h DOY66 до 06^h DOY67 (две нижние панели рис. 2а), фиксируется усиление мерцаний длительностью около 14 ч. В этом же промежутке произошло и падение D_{st} с пиком, обозначенным стрелкой на нижней панели. Можно утверждать, что уменьшение D_{st} и усиление мерцаний связаны с приходом к Земле сжатой области солнечного ветра. На рис. 2б приведены данные по скорости и плотности солнечного ветра у орбиты Земли, полученные по измерениям на спутнике WIND. На рис. 2б видно значительное увеличение плотности плазмы в течение DOY66–67, которое предшествует увеличению скорости плазмы в течение DOY66–67. Время, прошедшее после начала понижения вечерних мерцаний в 15^h DOY62 и пиком D_{st} , составило около 105 ч, что соответствует повороту Солнца на угол около 50°.

3.3. Событие # 3

08.05.2016 (DOY129) около 12.00 мск (09.00 UT) произошло сильное уменьшение индекса D_{st} с пиковым значением -83 нТ и величиной K_p индекса 7. На рис. 3а приведены зависимости от времени суток для отношения среднего по всем склонениям и по часовым интервалам уровня мерцаний данных суток к предыдущим для DOY129, четырех суток, предшествовавших DOY129, и суток после DOY129. На верхней панели рис. 3а видно кратковременное усиление мерцаний около 18^h DOY125, однако это усиление не связано с геоэффективным возмущением, которое приходит к Земле существенно позднее. Это же относится и к усилению мерцаний около 20^h DOY126. Из третьей панели рис. 3а видно, что в вечерние часы около 22^h DOY126 началось ослабление вечерних мерцаний, которое продолжалось в ночные часы DOY127, сохранилось в вечерние и ночные часы DOY128, стало еще более существенным в ночные часы DOY129. Падение D_{st} с пиком около 12^h DOY129 обозначено стрелкой на предпоследней панели рис. 3а. Заметное усиление мерцаний фиксируется позже, между 13^h и 15^h. Причина сравнительно несильной выраженности повышения уровня мерцаний в данном событии состоит в том, что луч зрения на источник проходит на малых элонгациях, где в спокойных условиях мерцания части источников подавляются за счет влияния собственных угловых размеров. Усиление дневных мерцаний можно объяснить тем, что возмущенная область, расположенная близко к наблюдателю, вносит в модуляцию вклад, сравнимый со вкладом от спокойных областей, расположенных на гелиоцентрических расстояниях около 0.5 а.е. На



(б)

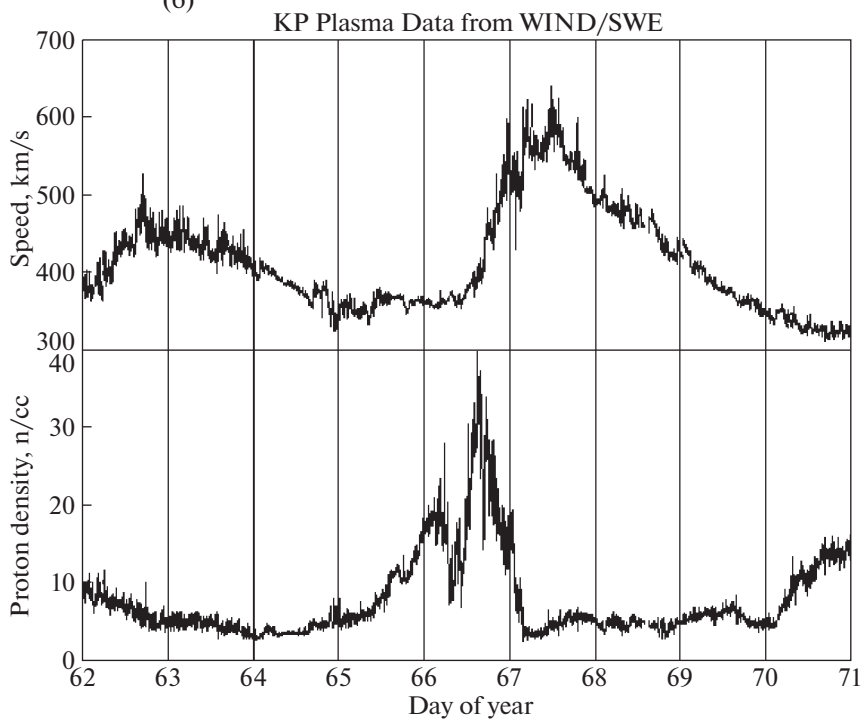


Рис. 2. а) То же, что рис. 1а, но для события # 2, 02.03–07.03.2016. б) То же, что рис. 1б, но для события # 2, 02.03–07.03.2016.

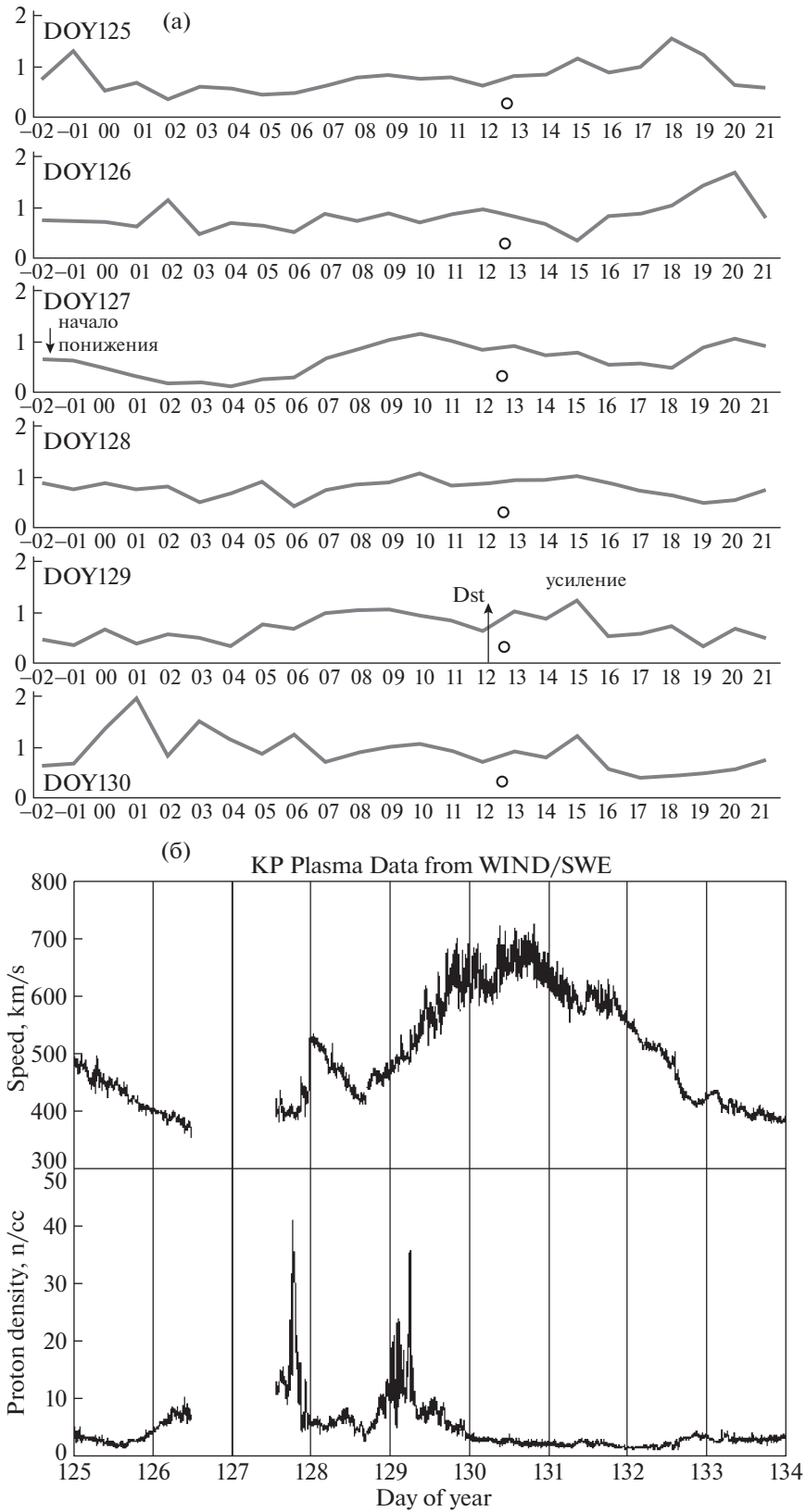


Рис. 3. а) То же, что рис. 1а, но для события # 3, 04.05–09.05.2016. б) То же, что рис. 1б, но для события # 3, 04.05–09.05.2016.

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 DOY128 и 129, которые предшествуют увеличению скорости плазмы. Время, прошедшее после начала понижения вечерних мерцаний в 22^h DOY126 и пиком D_{st} , составило около 60 ч, что соответствует повороту Солнца на угол около 30°.

3.4. Событие # 4

24.08.2016 (DOY237) около 01.00 мск (22.00 UT 23.08) произошло сильное уменьшение индекса D_{st} с пиковым значением -74 нТ и величиной K_p индекса 5. На рис. 4а приведены зависимости от времени суток для отношения среднего по всем склонениям и по часовым интервалам уровня мерцаний данных суток к предыдущим для DOY237, четырех суток, предшествовавших DOY237, и в течение суток DOY237. На двух верхних панелях рис. 4а видно кратковременное усиление мерцаний между 19^h и 23^h DOY232, однако, как и для события # 3, это усиление не связано с геоэффективным возмущением, которое приходит к Земле существенно позднее. На второй панели рис. 4а видно, что в ночные часы около 01^h DOY233 началось ослабление мерцаний, которое усилилось в вечерние и ночные часы DOY234, сохранилось в вечерние и ночные часы DOY235, стало еще более существенным в вечерние и ночные часы DOY235–236. Заметное повышение уровня мерцаний зафиксировано между 18^h DOY236 и 01^h DOY237 (две нижних панели). В этом же промежутке времени находится и обозначенное стрелкой на нижней панели рис. 4а падение D_{st} с пиком около 01^h DOY237. На рис. 4б приведены данные по скорости и плотности солнечного ветра у орбиты Земли, полученные по измерениям на спутнике WIND. На рис. 4б видны значительные увеличения плотности плазмы для DOY234 и 236, которые предшествуют увеличениям скорости плазмы. Геомагнитное возмущение, по-видимому, связано со вторым возрастанием плотности плазмы. Время, прошедшее после начала понижения вечерних мерцаний в 01^h DOY233 и пиком D_{st} , составило около 97 ч, что соответствует повороту Солнца на угол около 50°.

3.5. Событие # 5

13.10.2016 (DOY287) около 21.00 мск (18.00 UT) произошло сильное уменьшение индекса D_{st} с пиковым значением -104 нТ и величиной K_p индекса 6. На рис. 5а приведены зависимости от времени суток для отношения среднего по всем

склонениям и по часовым интервалам уровня мерцаний данных суток к предыдущим для DOY287, четырех суток, предшествовавших DOY287, и суток после DOY287. На верхней панели рис. 5а видно ослабление мерцаний после 14^h DOY283, но это изменение носит нерегулярный характер и меняется на усиление около 23^h, которое видно на второй панели. На второй панели рис. 5а видно ослабление вечерних мерцаний с началом около 16^h DOY284, которое продолжалось до 06^h DOY285. Через сутки ослабление мерцаний примерно той же длительности стало еще более заметным, панель DOY286. Около 15^h DOY286 наблюдалось усиление мерцаний длительностью примерно 3 ч, которое соответствует элонгациям около 60° и гелиоцентрическим расстояниям около 0.7 а.е. Усиление мерцаний может быть объяснено попаданием на луч зрения сжатой части коротирующего возмущения. На предпоследней и последней панелях четко видно усиление мерцаний между 16^h и 23^h DOY287. В этом же промежутке времени находится и обозначенное стрелкой на нижней панели рис. 5а падение D_{st} с пиком около 21^h DOY287. Совпадение по времени усиления вечерних мерцаний и магнитной бури можно объяснить приходом к Земле сжатой области возмущения. На рис. 5б приведены данные по скорости и плотности солнечного ветра у орбиты Земли, полученные по измерениям на спутнике WIND. На рис. 5б видно резкое, более чем в три раза, увеличение плотности плазмы в начале DOY287, которое в данном случае по времени примерно совпадает с увеличением скорости ветра. Время, прошедшее после начала понижения вечерних мерцаний в 16^h DOY285 и пиком D_{st} , составило около 100 ч, что соответствует повороту Солнца на угол более 50°.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассмотренные выше события связаны, как показывает сравнение времен возмущений D_{st} , с коротирующими крупномасштабными возмущениями в солнечном ветре. Действительно, событие # 3 произошло примерно через 109 ч после события # 1, это запаздывание кратно 27 сут и соответствует примерно 4 оборотам Солнца. Событие # 4 произошло примерно через 4 оборота после события # 3, а событие # 5 — еще примерно через 2 оборота после события # 4. Можно утверждать, что события # 1, 3, 4, 5 вызваны одной и той же областью межпланетной плазмы, вращающейся вместе с Солнцем. Эта область является долгоживущей и существует на протяжении, по крайней мере, 10 оборотов Солнца. Событие # 2 отделено от события # 1 промежутком времени, не кратным

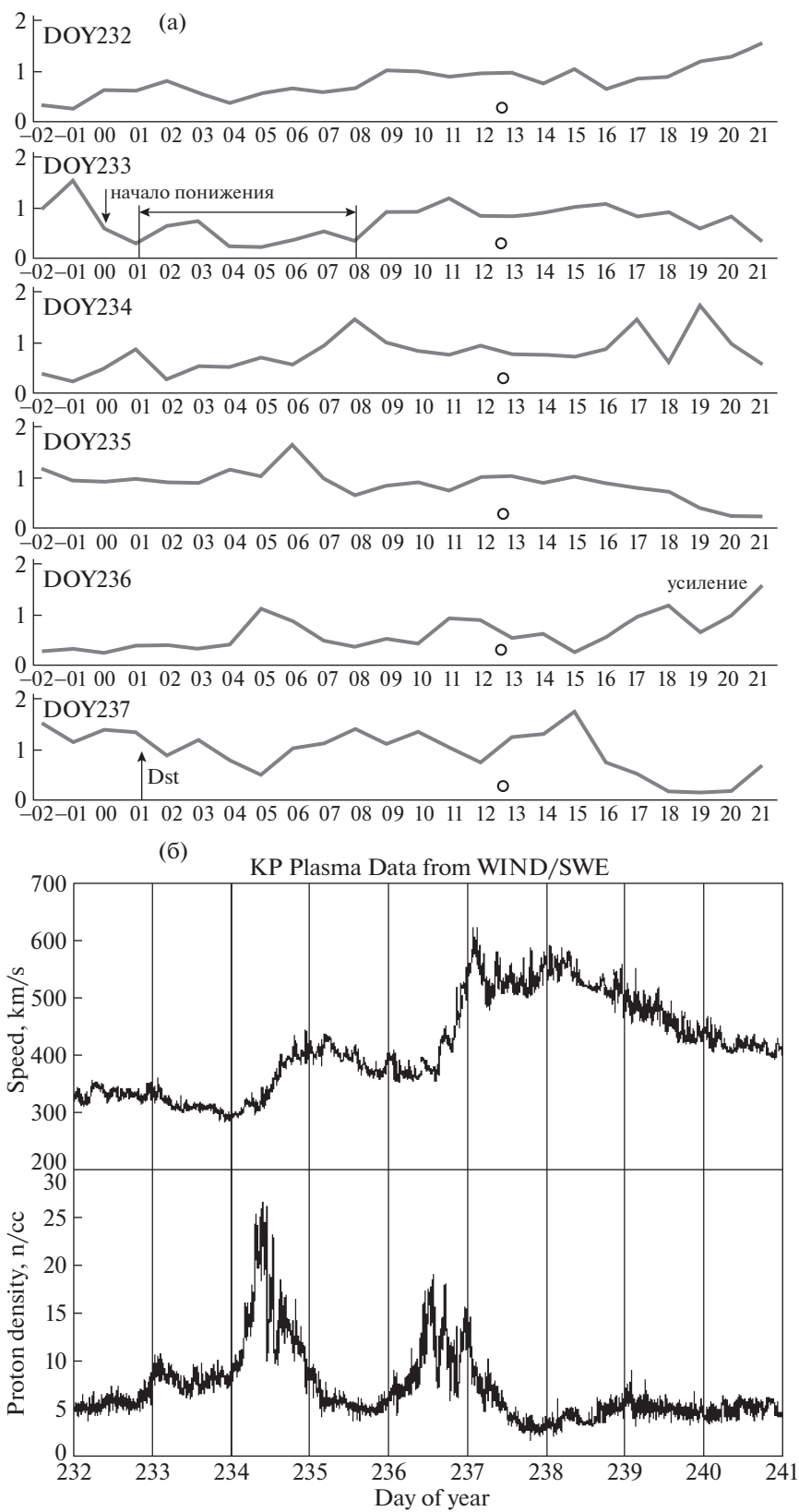


Рис. 4. а) То же, что рис. 1а, но для события # 4, 19.08–24.08.2016. б) То же, что рис. 1б, но для события # 4, 19.08–24.08.2016.

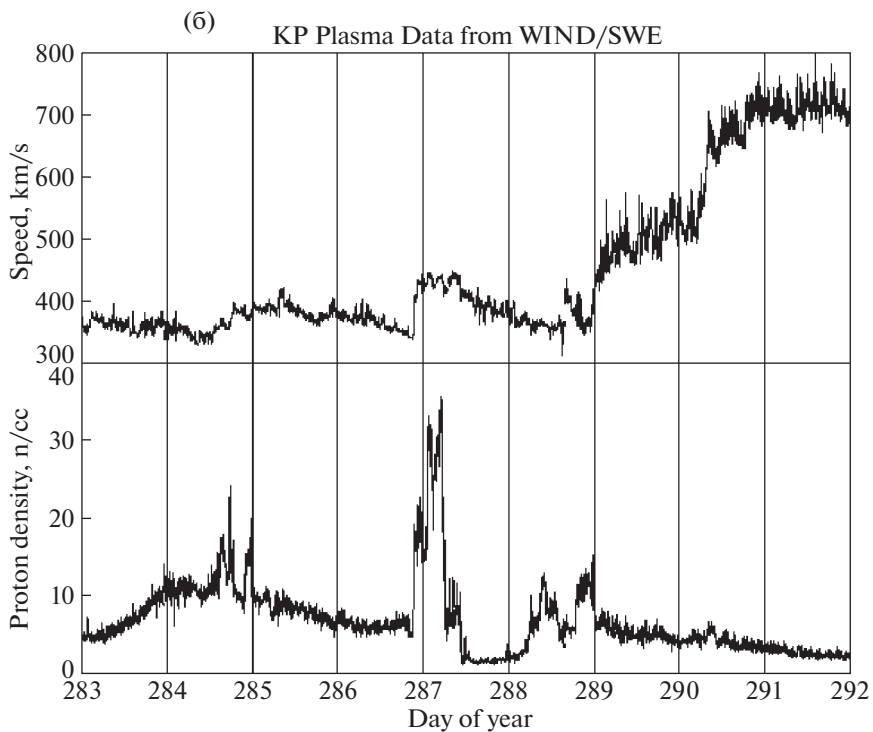
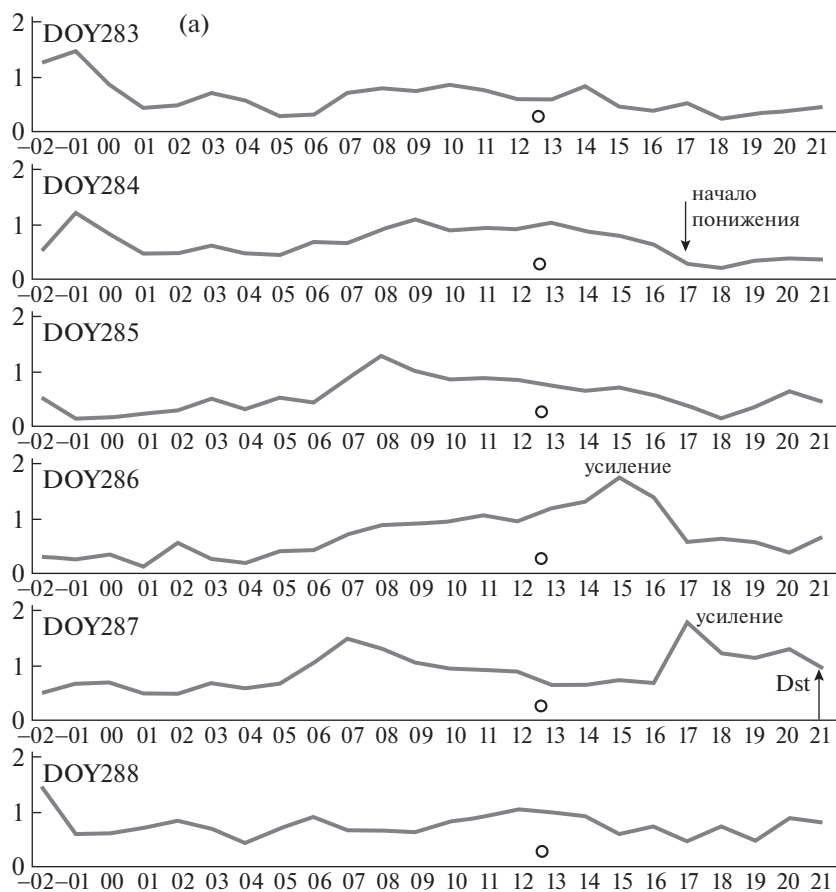


Рис. 5. а) То же, что рис. 1а, но для события # 5, 09.10–14.10.2016. б) То же, что рис. 1б, но для события # 5, 09.10–14.10.2016.

27 сут. Общий характер события # 2, как показывают рис. 2а, б, носит качественно близкий к другим событиям характер и, по-видимому, связано с другой коротярующей областью.

Проведенный анализ позволяет выделить следующие особенности в динамике уровня межпланетных мерцаний на временных интервалах, предшествующих магнитным бурям. За 3–4 сут до геомагнитного возмущения для всех рассмотренных событий начинается ослабление вечерних и ночных мерцаний, которое продолжается в последующие сутки. В трех событиях из пяти за 2–4 сут до магнитной бури наблюдалось непродолжительное усиление мерцаний, которое происходило как перед началом понижения уровня мерцаний (одно событие), так и после начала понижения (два события). При этом сжатая область межпланетного возмущения находилась на гелиоцентрических расстояниях 0.5–0.7 а.е. 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 [12, 13]. 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, сопутствующим 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 источников (пары источников различны для различных событий). Один из них был компактным, угловой размер порядка 0.1 секунд дуги, второй был протяженным с угловым размером более 1 секунды дуги. 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 указанных периодов времени уровень мерцаний компактного источника значительно превосходит уровень мерцаний протяженного источника. Это однозначно указывает, что секундные мерцания, сопутствующие магнитной буре, связаны с повышением уровня мелкомасштабной турбулентности в области, примыкающей к орбите Земли.

В рассмотренных выше событиях из десяти случаев, когда Земля оказывается в возмущенном потоке, только в четырех случаях происходила магнитная буря. Нами отдельно рассмотрены периоды времени, кратные 27 сут после события # 1, когда геомагнитная обстановка была сравнительно спокойной. Оказалось, что для всех таких периодов общая картина динамики уровня мерцаний была качественно сходной с картиной для событий # 1, 3, 4, 5. Это обстоятельство также подтверждает коротярующий характер рассмотренных возмущений.

Отметим, что, как показывают синоптические карты распределения магнитного поля на поверхности источника (<http://wso.stanford.edu/synopticl.html>), на протяжении всего 2016 г. в южном полушарии Солнца существовала долгоживущая протяженная корональная дыра, захватывающая экваториальные широты.

5. ВЫВОДЫ

Проведенное рассмотрение позволяет сделать следующие выводы.

1. На фазе спада солнечной активности в 2016 г. доминирующая роль в сильных геомагнитных возмущениях была связана с долгоживущими коротярующими областями взаимодействия разноскоростных потоков солнечного ветра.

2. Приход коротярующего возмущения к Земле может быть зафиксирован по данным мониторинга межпланетных мерцаний. При этом в вечернем секторе за 3–4 сут до прихода сжатой части возмущения фиксируется ослабление мерцаний, которое сохраняется или даже усиливается в течение последующих суток. Понижение уровня мерцаний может быть объяснено существенным уменьшением уровня мелкомасштабной турбулентности плазмы в протяженной (30°–50° по долготе) области перед фронтальной частью возмущения.

3. Приход возмущения к Земле не всегда сопровождается магнитной бурей. Для уверенного краткосрочного прогноза геомагнитной активности требуются дополнительные данные о направлении компонента B_z магнитного поля в возмущенном потоке. Принципиальная возможность прогноза компонента B_z на основании солнечных данных совместно с данными о солнечном ветре внутри орбиты Земли продемонстрирована в работе [15].

4. Наблюдения межпланетных мерцаний показывают, что одновременно с магнитной бурей происходит усиление секундных мерцаний, которое наиболее четко фиксируется, если буря происходит в вечерние или ночные часы. В отличие от возмущений вспышечного происхождения, для которых усиление ночных мерцаний связано с возмущенной ионосферой [12, 13], в случае коротярующих возмущений сопутствующее усиление

мерцаний обусловлено повышением абсолютного уровня мелкомасштабной турбулентности в сжатой части возмущения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №. 16-02-00442.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В. И. Шишов, И. В. Чашей, В. В. Орешко, С. В. Логвиненко и др., *Астрон. журн.* **93**, 1045 (2016).
2. P. K. Manoharan, *Astrophys. J.* **751**, 128 (2012).
3. M. Tokumaru, M. Kojima, and K. Fujiki, *Geophys. Res.* **117**, 6108 (2012).
4. H.-S. Yu, B. V. Jackson, P. P. Hick, A. Buffington, *et al.*, *Solar Phys.* **290**, 2519 (2015).
5. M. M. Bisi, A. R. Breen, B. V. Jackson, R. A. Fallows, *et al.*, *Solar Phys.* **265**, 49 (2010).
6. M. M. Bisi, A. Gonzalez-Esparza, B. V. Jackson, M. Tokumaru, and J. Leibacher, *Solar Phys.* **290** (2015).
7. T. Iju, M. Tokumaru, and K. Fujiki, *Solar Phys.* **289**, 2157 (2014).
8. A. Johri and P. K. Manoharan, *Solar Phys.* **291**, 1433 (2016).
9. M. Tokumaru, M. Kojima, K. Fujiki, and A. Yakobe, *J. Geophys. Res.* **105**, 10435 (2000).
10. S. J. Tappin, *Planetary and Space Science* **34**, 93 (1986).
11. Ю. И. Ермолаев, И. Г. Лодкина, Н. С. Николаева, М. Ю. Ермолаев, М. О. Рязанцева, *Космич. исслед.* **55**, 189 (2017).
12. I. V. Chashei, S. A. Tyul'bashev, V. I. Shishov, and I. A. Subaev, *Space Weather* **14**, 682 (2016).
13. И. В. Чашей, С. А. Тюльбашев, В. И. Шишов и И. А. Субаев, *Астрон. журн.* **95**, 366 (2018).
14. А. В. Глянцев, С. А. Тюльбашев, И. В. Чашей и В. И. Шишов, *Астрон. журн.* **92**, 40 (2015).
15. B. V. Jackson, P. P. Hick, A. Buffington, H.-S. Yu, M. M. Bisi, M. Tokumaru, and X. Zhao, *Astrophys. J. Lett.* **803**, L1 (2015).