

ГЕОЭФФЕКТИВНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ ВБЛИЗИ МИНИМУМА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ ПО ДАННЫМ ДВУХЛЕТНЕЙ СЕРИИ НАБЛЮДЕНИЙ МЕЖПЛАНЕТНЫХ МЕРЦАНИЙ НА РАДИОТЕЛЕСКОПЕ БСА ФИАН

© 2021 г. И. В. Чашей^{1,*}, Т. О. Лебедева¹, С. А. Тюльбашев¹, И. А. Субаев¹

¹ Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

*E-mail: chashey@prao.ru

Поступила в редакцию 26.05.2021 г.

После доработки 07.07.2021 г.

Принята к публикации 27.07.2021 г.

Совместный анализ данных мониторинга межпланетных мерцаний с солнечными и геофизическими данными показал, что на фазе спада 24 цикла солнечной активности доминирующая роль в геомагнитных возмущениях связана с коротирующими возмущениями в солнечном ветре. В 2018–2019 гг. при приближении к глубокому минимуму активности из 13 сильных магнитных бурь 12 вызвано приходом к Земле сжатой части областей взаимодействия разноскоростных потоков и только в одном событии, 11.05.2019 г., наблюдалось наложение вспышечных возмущений на коротирующее. Сравнение с результатами аналогичных данных 2016 и 2017 г. показывает существование коротирующих возмущений с временем жизни по крайней мере несколько оборотов Солнца. Подтвержден вывод о том, что за 3–4 сут до прихода сжатой части возмущения к Земле начинается ослабление вечерних и ночных мерцаний, которое может быть интерпретировано как существенное понижение уровня мелкомасштабной турбулентности плазмы в протяженной области перед фронтальной частью возмущения. Ослабление секундных мерцаний в вечернем секторе длительностью 2–3 сут может рассматриваться как предвестник приближения к Земле коротирующего возмущения. Как и в 2016–2017 гг., одновременно с магнитной бурей происходит усиление секундных мерцаний, которое наиболее четко фиксируется, если буря происходит в вечерние или ночные часы.

Ключевые слова: солнечный ветер, крупномасштабные возмущения, межпланетные мерцания

DOI: 10.31857/S0004629921110050

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: распространяющиеся возмущения (interplanetary coronal mass ejection, ICME), которые генерируются в короне после вспышек, и коротирующие области взаи-

модействия 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: распространяющийся 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 работах [11, 12] проанализированы данные мониторинга межпланетных

мерцаний, связанные с коротящими возмущениями, наблюдавшимися в течение 2016 и 2017 г. на фазе спада солнечной активности. В настоящей работе, которая продолжает [11, 12], анализируются данные наблюдений, связанные с коротящими возмущениями, наблюдавшимися в 2018 и 2019 г. Проведено сопоставление данных по геомагнитной возмущенности (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/index.html>), характеризующейся индексом Dst, вспышечной активностью короны по измерениям рентгеновского спутника GOES (http://www.thesis.lebedev.ru/sun_flares.html) и уровню межпланетных мерцаний по данным наблюдений на радиотелескопе БСА ФИАН. Не анализируя индивидуальные солнечно-земные события в целом, мы концентрируемся на особенностях динамики уровня мерцаний. Проводится сравнение полученных результатов с результатами работ [11, 12].

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ МОНИТОРИНГА МЕЖПЛАНЕТНЫХ МЕРЦАНИЙ

Подробно методика наблюдений и обработка данных в режиме мониторинга описаны в работе [13]. Наблюдения межпланетных мерцаний проводились 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° до $+42^\circ$. В течение суток регистрируются мерцания около 5000 компактных источников. Исследуемая область неба разбивается на квадратные площадки (пиксели) размером $3^\circ \times 3^\circ$ (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 [13], значение M (1) пропорционально среднему по данной площадке индексу мерцаний,

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

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, 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 ИНДИВИДУАЛЬНЫХ СОБЫТИЙ

В 2018 г. первоначально было найдено 7 событий, для которых величина индекса Dst опускалась до -50 нТ и ниже. В результате анализа этих событий было добавлено событие #6, минимальное значение индекса Dst которого не опустилось ниже -50 , но по характеристикам аналогично остальным. В 2019 г. найдено 5 событий. Данные по изменению Dst сопоставлены с данными вспышечной активности короны по измерениям рентгеновского спутника GOES-15. Даты событий, минимальные значения Dst и сопоставление с вспышками классов M и X приведены в табл. 1.

Как можно увидеть из табл. 1, в периоды, предшествующие геомагнитным возмущениям, достаточно сильных рентгеновских вспышек классов M и X не наблюдалось. Событиям #1 и #2 2019 г. предшествовала серия рентгеновских вспышек класса C в период 04–09.05.2019 г. Остановимся подробнее на событиях, перечисленных в табл. 1.

События 2018 года

Событие #1: 18.03.2018 г.

18.03.2018 22 UT (DOY77) около 22UT (01^h мск) произошло уменьшение индекса Dst с пиковым значением -50 нТ и величиной K_p индекса 6. На рис. 1а приведены зависимости от времени суток для отношения среднего по всем склонениям и по часовым интервалам уровня мерцаний данных суток к предыдущим для DOY 77 четырех суток и суток после DOY 77. Отметим, что вариации уровня мерцаний на рис. 1а и других аналогичных рисунках являются значимыми, так как каждая

Таблица 1. События 2018 и 2019 г.

| № | Дата | $(D_{st})_{min}$, нТ | Примечание |
|-----------------|-------------------------|-----------------------|--|
| События 2018 г. | | | |
| 1 | 18.03.2018 22 UT | –50 | Вспышек С, М и Х класса в предшествующий период не наблюдалось |
| 2 | 20.04.2018 10 UT | –66 | Вспышек С, М и Х класса в предшествующий период не наблюдалось |
| 3 | 06.05.2018 02–03 UT | –56 | Вспышек С, М и Х класса в предшествующий период не наблюдалось |
| 4 | 26.08.2018 07–08 UT | –174 | Вспышек С, М и Х класса в предшествующий период не наблюдалось |
| 5 | 10.09.2018 23–24 UT | –50 | Вспышек С, М и Х класса в предшествующий период не наблюдалось |
| | 11.09.2018 11 UT | –60 | |
| 6 | 22.09.2018 04h UT | –48 | Вспышек С, М и Х класса в предшествующий период не наблюдалось |
| 7 | 07.10.2018 22 UT | –53 | Вспышек С, М и Х класса в предшествующий период не наблюдалось |
| 8 | 05.11.2018 06–07 UT | –51 | Вспышек С, М и Х класса в предшествующий период не наблюдалось |
| События 2019 г. | | | |
| 1 | 11.05.2019 22h UT | –51 | В предверии событий 1 и 2 наблюдалось множество вспышек класса С |
| 2 | 14.05.2019 09h UT | –65 | |
| 3 | 05.08.2019 21h UT | –53 | Вспышек С, М и Х класса в предшествующий период не наблюдалось |
| 4 | 01.09.2019 07h и 21h UT | –52 и –51 | Вспышек С, М и Х класса в предшествующий период не наблюдалось |
| 5 | 28.09.2019 00h UT | –49 | Вспышек С, М и Х класса в предшествующий период не наблюдалось |

точка получена усреднением по более чем 200 индивидуальным источникам.

На второй панели рис. 1а видно начало ослабления вечерних мерцаний около 18^h DOY74, которое продолжилось в ночные и утренние часы DOY75. На второй и третьей панелях рис. 1а видно, что в вечерние часы с 16^h до 21^h DOY75 наблюдалось усиление вечерних мерцаний. Падение D_{st} с пиком около 22^h DOY78 обозначено стрелкой на предпоследней панели рис. 1а. На рис. 1б приведены данные по скорости и плотности солнечного ветра у орбиты Земли, полученные по измерениям на спутнике WIND. Время, прошедшее после начала понижения вечерних мерцаний в 15^h DOY74 и пиком D_{st} 22^h DOY78, составило около 80 ч, что соответствует повороту Солнца на угол около 45°.

Событие #2: 20.04.2018 г.

20.04.2018 г. (DOY110) около 06UT (09^h мск) произошло сильное уменьшение индекса D_{st} с пиковым значением –66 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 DOY 110 четырех суток и суток после DOY 110.

На первой панели рис. 2а видно, что в ночные часы около 22^h DOY108 наблюдалось сильное ослабление мерцаний, продолжающееся до 17^h DOY108, которое усиливалось в ночные часы DOY108–DOY109 и DOY109–DOY11. На предпо-

следней панели видно усиление мерцаний в период с 06^h до 11^h.

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 для DOY110, что сопровождается увеличением скорости плазмы. Время, прошедшее после начала понижения вечерних мерцаний в 22^h DOY108 и пиком D_{st} , составило около 62 ч, что соответствует повороту Солнца на угол около 33°.

Событие #3: 06.05.2018 г.

В ночь с 05.05.2018 г. (DOY125) на 06.05.2018 г. (DOY 126) произошло уменьшение индекса D_{st} с минимумом –56 нТ в 02.00 UT (05.00 мск), величина K_p индекса при этом увеличилась до 6. 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 DOY 126, четырех суток, предшествовавших DOY 126, и суток после DOY 126. Как видно из рис. 3а, в ночные часы DOY 122 началось ослабление мерцаний, которое усилилось в ночные часы двух последующих суток DOY123–DOY124 и сохранилось в ночные часы DOY125. Около 19^h DOY 124 наблюдалось кратковременное усиление мерцаний. Усиления вечерних и ночных мерцаний DOY 125 и DOY 126 обусловлены примыкающей к Земле областью солнечного ветра.

На рис. 3б приведены данные по скорости и плотности солнечного ветра у орбиты Земли, полученные по измерениям на спутнике WIND. На

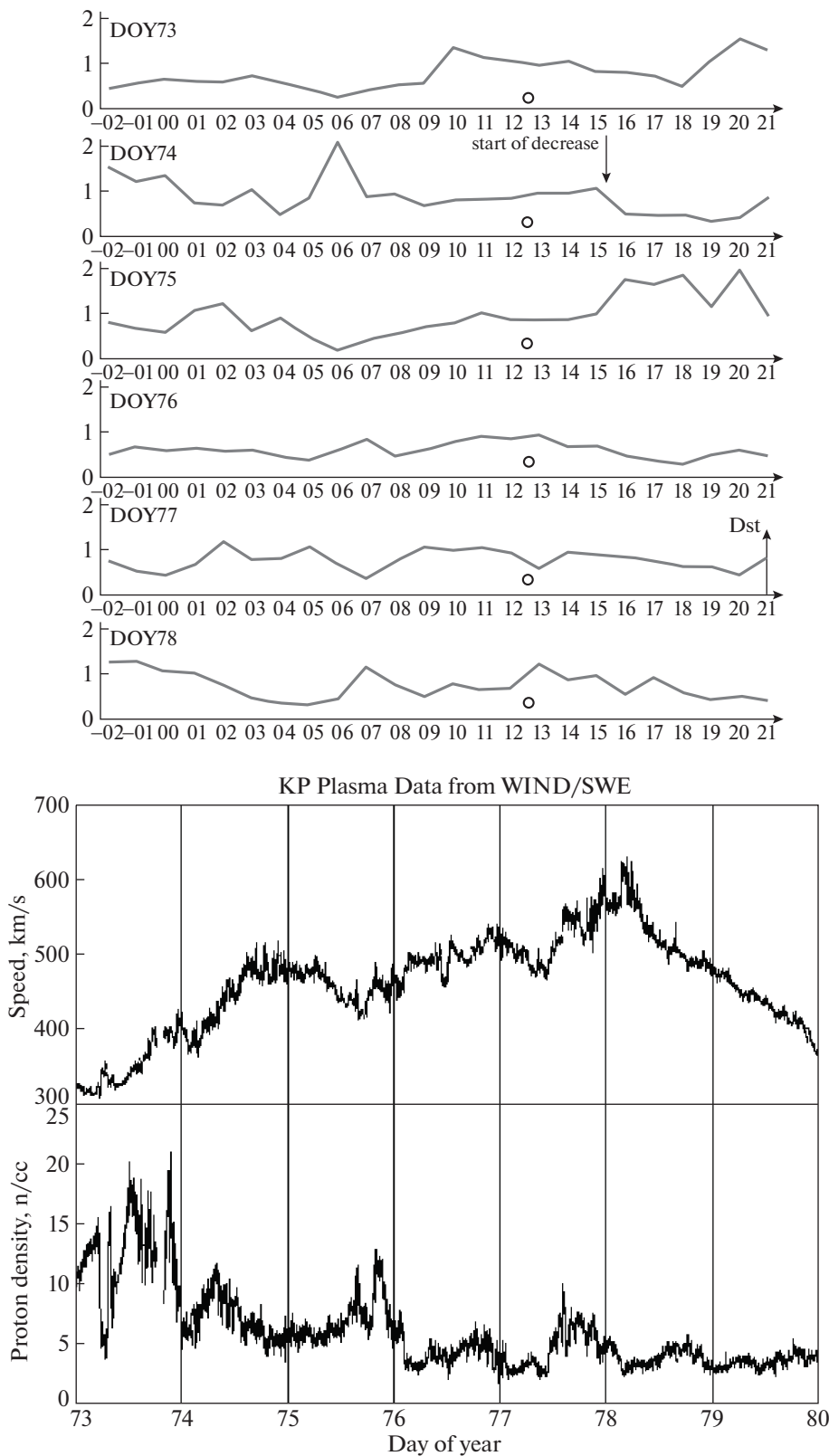


Рис. 1. Событие #1, 18.03.2018. а) По оси ординат – отношение среднего по всем склонениям (16 пикселей) и по часовым интервалам (5 пикселей) квадрата индекса мерцаний для данного дня к предыдущему дню. По оси абсцисс – московское время с 00^h до 23^h текущего дня (мск). Вертикальными стрелками обозначено время пикового уменьшения Dst. Кружок на горизонтальной оси соответствует кульминации Солнца. б) Скорость солнечного ветра и концентрация протонов по измерениям на спутнике WIND. Данные для панелей б) на этом и следующих рисунках получены в архиве OMNIWeb (http://omniweb.gsfc.nasa.gov/html/omni_source.html#pla).

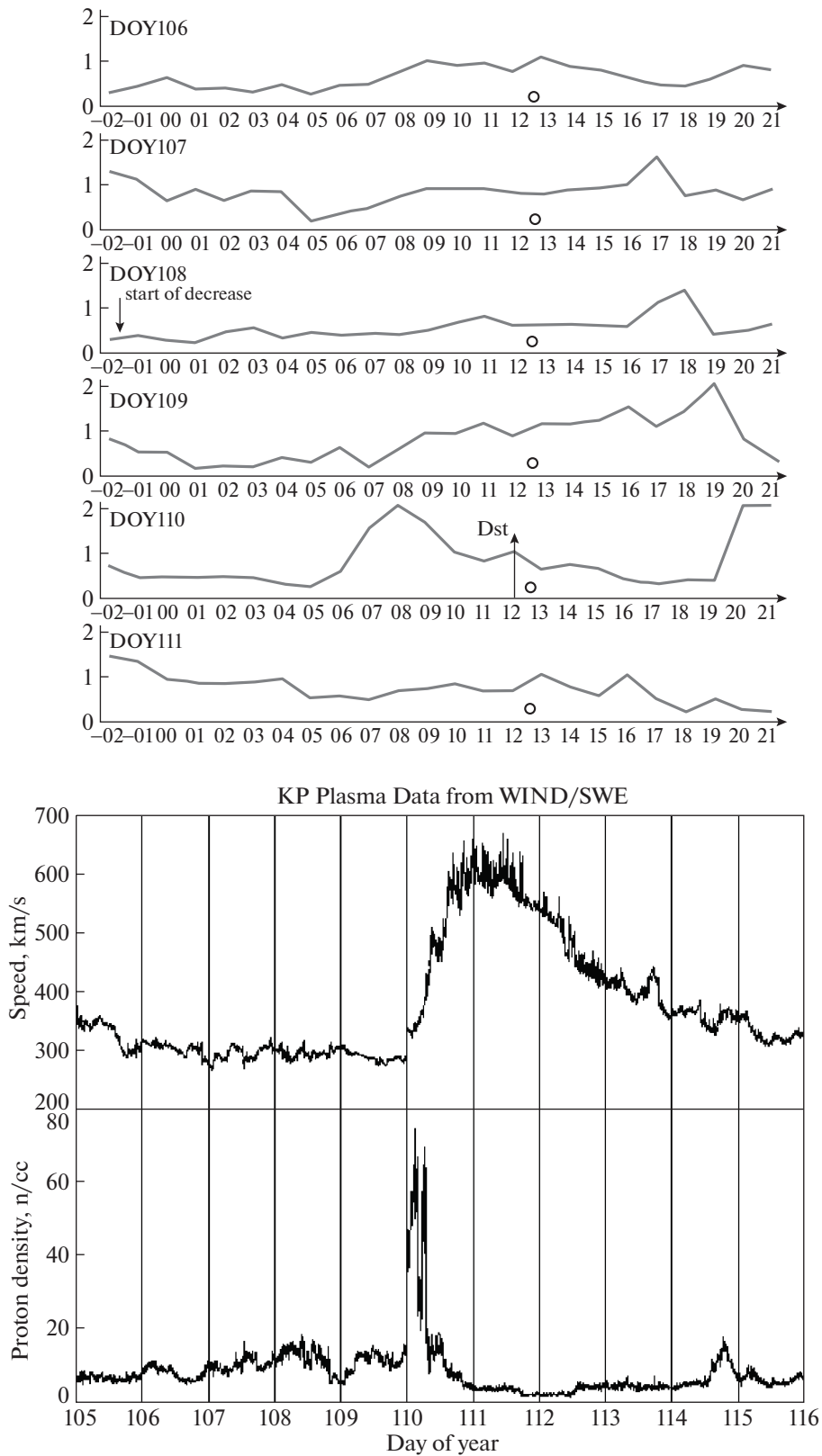


Рис. 2. Событие #2, 20.04.2018. а) По оси ординат – отношение среднего по всем склонениям (16 пикселей) и по часовым интервалам (5 пикселей) квадрата индекса мерцаний для данного дня к предыдущему дню. По оси абсцисс – московское время с 00^h до 23^h текущего дня (мск). Вертикальными стрелками обозначено время пикового уменьшения Dst. Кружок на горизонтальной оси соответствует кульминации Солнца. б) Скорость солнечного ветра и концентрация протонов по измерениям на спутнике WIND.

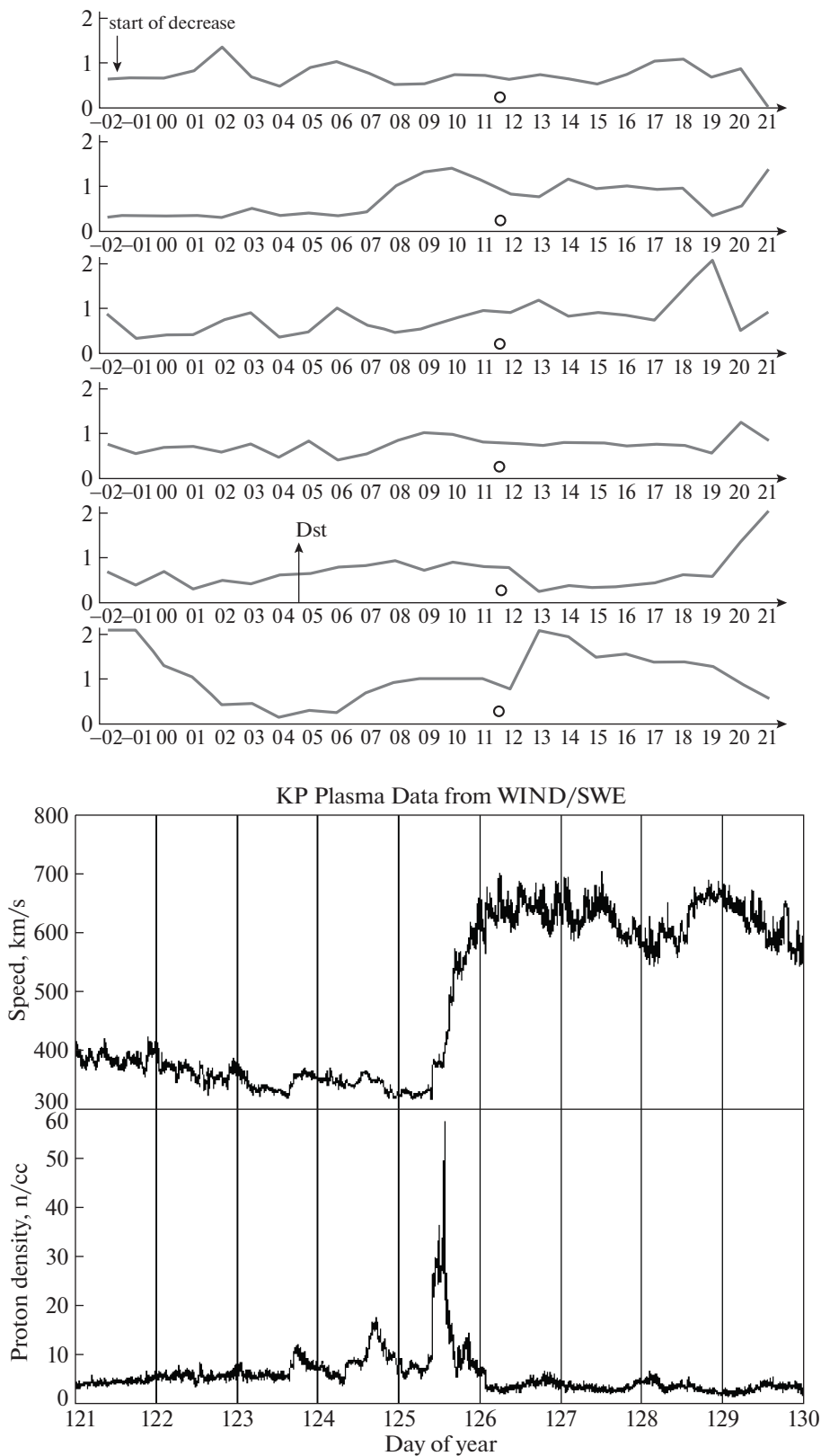


Рис. 3. Событие #3, 06.05.2018. а) По оси ординат – отношение среднего по всем склонениям (16 пикселей) и по часовым интервалам (5 пикселей) квадрата индекса мерцаний для данного дня к предыдущему дню. По оси абсцисс – московское время с 00^h до 23^h текущего дня (мск). Вертикальными стрелками обозначено время пикового уменьшения Dst. Кружок на горизонтальной оси соответствует кульминации Солнца. б) Скорость солнечного ветра и концентрация протонов по измерениям на спутнике WIND.

рис. 3б видно значительное кратковременное увеличение плотности плазмы для DOY125, которое сопровождается последующим значительным увеличением скорости плазмы. Время, прошедшее после начала понижения вечерних мерцаний в 22^h DOY121 и пиком D_{st} , составило около 102 ч, что соответствует повороту Солнца на угол около 60°.

Событие #4: 26.08.2018 г.

26.08.2017 г. (DOY238) около 07.00 UT (10.00 мск) произошло сильное уменьшение индекса D_{st} с пиковым значением -174 нТ и величиной K_p индекса 7. 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 DOY 238 четырех суток, предшествовавших DOY 238, и суток после DOY 238.

На второй панели рис. 4а видно, что в вечерние и ночные часы около 22^h DOY234 наблюдалось сильное ослабление мерцаний, продолжающееся до 8^h утра DOY235, которое усилилось в ночные часы DOY235–DOY236, вечерние и ночные часы DOY236–DOY237 и ночные часы DOY237–DOY238. В дневные часы DOY 237 наблюдалось усиление мерцаний. В вечерние часы DOY238 с 19^h до 22^h произошло значительное усиление мерцаний, сопутствующее магнитной буре и связанное с приходом к Земле возмущенного потока плазмы.

На рис. 4б приведены данные по скорости и плотности солнечного ветра у орбиты Земли, полученные по измерениям на спутнике WIND. На рис. 4б видно увеличение плотности плазмы для DOY 236, DOY237, DOY 238, что сопровождается увеличением скорости плазмы. Время, прошедшее после начала понижения вечерних мерцаний в 22^h DOY234 и пиком D_{st} , составило около 108 ч, что соответствует повороту Солнца на угол около 60°.

Событие #5: 10.09.2018 г.

В ночь с 10.09.2018 г. (DOY253) на 11.09.2018 г. (DOY 254) и днем 11.09.2018 г. произошло уменьшение индекса D_{st} с минимумом -50 нТ в 23 UT (02^h мск) и -60 нТ в 11 UT (14^h мск), величина K_p индекса при этом увеличилась до 6. На рис. 5а приведены зависимости от времени суток для отношения среднего по всем склонениям и по часовым интервалам уровня мерцаний данных к предыдущим для DOY 253 четырем суткам и суткам после DOY 253. Как видно из рис. 5а, в ночные часы DOY 250 началось сильное ослабление мерцаний, которое усилилось в ночные часы трех последующих суток DOY251–DOY253. В утренние часы 05^h UT (08 мск) DOY 251 наблюдалось кратковременное усиление мерцаний.

На рис. 5б приведены данные по скорости и плотности солнечного ветра у орбиты Земли, по-

лученные по измерениям на спутнике WIND. На рис. 5б видно увеличение плотности плазмы для DOY 253, что сопровождается увеличением скорости плазмы. Время, прошедшее после начала понижения вечерних мерцаний в 22^h DOY249 и пиком D_{st} 23^h DOY253, составило около 97 ч, что соответствует повороту Солнца на угол около 55°.

Событие #6: 22.09.2018 г.

Ночью 22.09.2018 г. (DOY 265) около 04 UT (07 мск) произошло значительное уменьшение индекса D_{st} с пиковым значением -48 нТ и увеличением индекса K_p до 5. На рис. 6а приведены зависимости от времени суток для отношения среднего по всем склонениям и по часовым интервалам уровня мерцаний данных суток к предыдущим для DOY 265, четырех суток, предшествовавших DOY 265, и суток после DOY 265. Динамика уровня мерцаний в целом аналогична событиям #1–5. Магнитной буре предшествовало снижение уровня мерцаний в вечерние и ночные часы четырех предшествующих суток, начавшееся вечером DOY261 и продолжившееся вплоть до прихода возмущения к Земле.

На рис. 6б приведены данные по скорости и плотности солнечного ветра у орбиты Земли, полученные по измерениям на спутнике WIND. Как видно из рисунка, значительные увеличения плотности плазмы для DOY264 предшествуют увеличению скорости плазмы DOY265. Время, прошедшее после начала понижения вечерних мерцаний в 14UT (17^h мск) DOY261 и пиком D_{st} 04 UT (07^h мск) DOY265, составило около 86 ч, что соответствует повороту Солнца на угол около 45°.

Событие #7: 07.10.2018 г.

07.10.2018 г. (DOY 280) около 22^h UT (01^h мск DOY281) произошло сильное уменьшение индекса D_{st} с пиковым значением -53 нТ и величиной K_p индекса 5. На рис. 7а приведены зависимости от времени суток для отношения среднего по всем склонениям и по часовым интервалам уровня мерцаний данных суток к предыдущим для DOY 280, четырех суток, предшествовавших DOY 280, и суток после DOY 280. Из второй панели видно, что около 01^h мск DOY277 началось понижение уровня мерцаний, которое становилось все существеннее в вечерние и ночные часы последующих четырех суток DOY277–DOY280.

На рис. 7б приведены данные по скорости и плотности солнечного ветра у орбиты Земли. Как видно из рис. 7б, увеличение плотности плазмы DOY280 сопровождается последующим увеличением скорости плазмы в течение DOY280–DOY281. Распределения концентрации и скорости плазмы на рис. 7б в целом типичны для коротких возмущений. Время, прошедшее после начала понижения вечерних мерцаний в 22^h UT DOY277 и пиком D_{st} в 22^h DOY281, составило око-

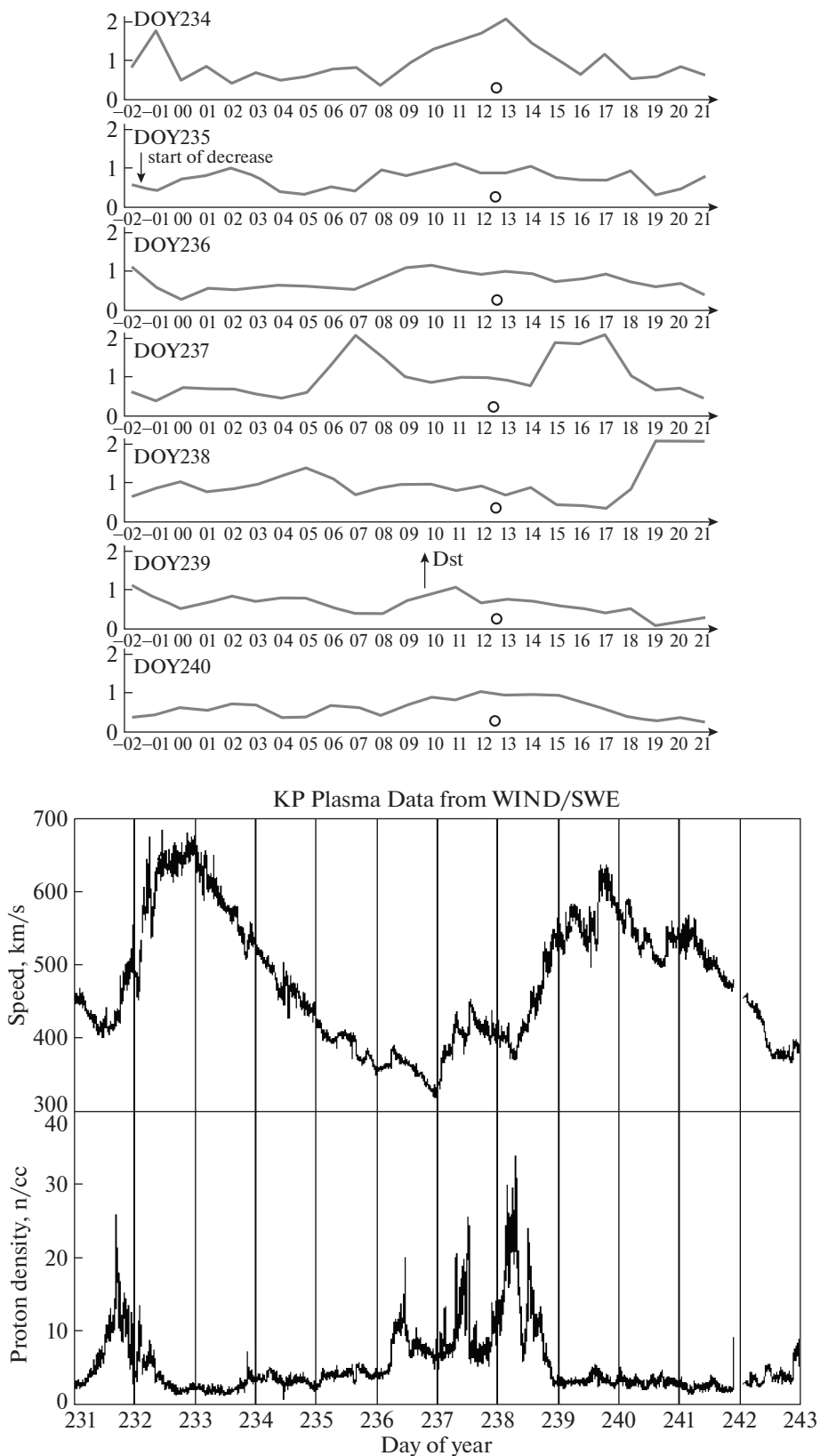


Рис. 4. Событие #4, 26.08.2018. а) По оси ординат – отношение среднего по всем склонениям (16 пикселей) и по часовым интервалам (5 пикселей) квадрата индекса мерцаний для данного дня к предыдущему дню. По оси абсцисс – московское время с 00^h до 23^h текущего дня (мск). Вертикальными стрелками обозначено время пикового уменьшения Dst. Кружок на горизонтальной оси соответствует кульминации Солнца. б) Скорость солнечного ветра и концентрация протонов по измерениям на спутнике WIND.

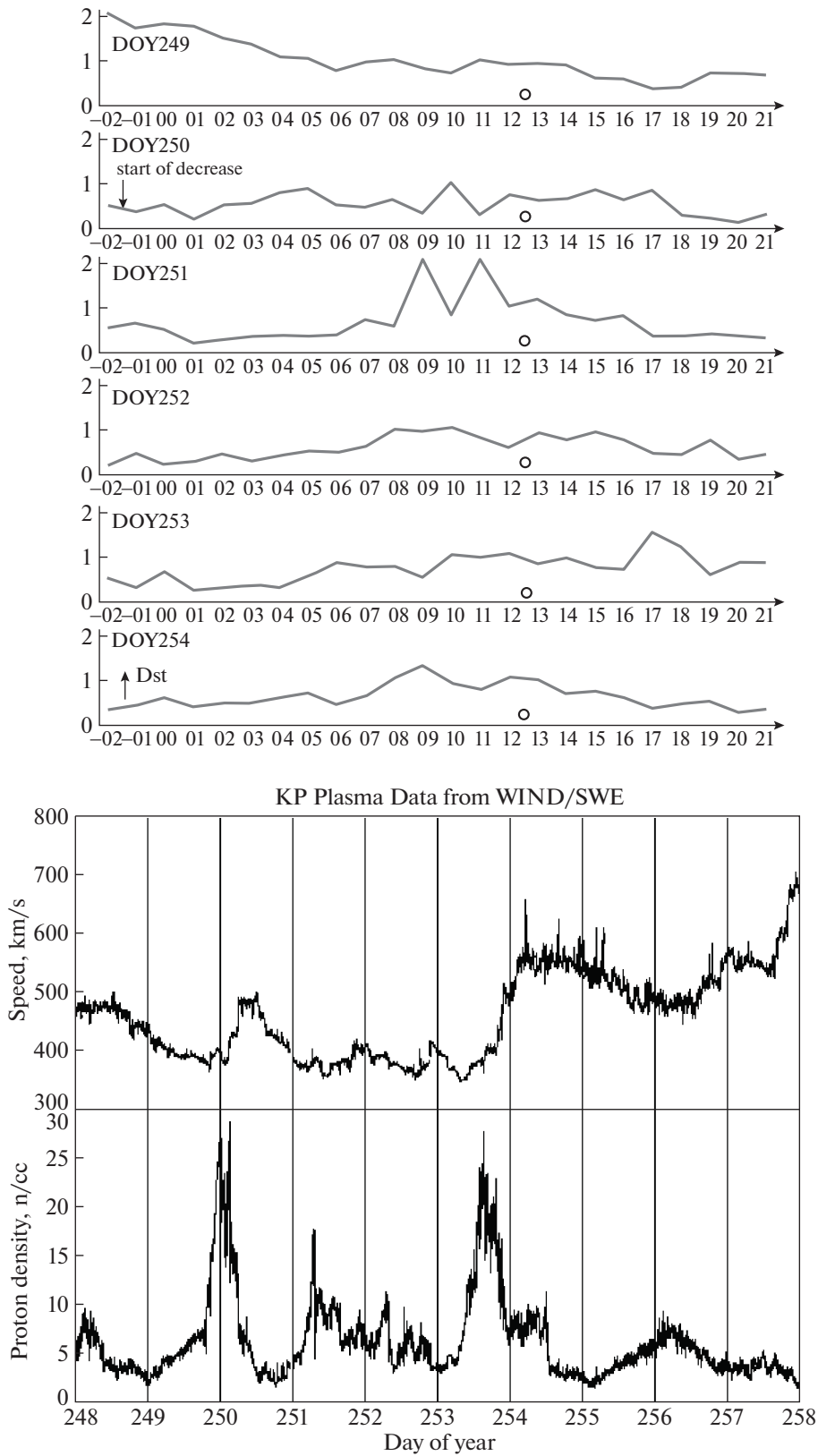


Рис. 5. Событие #5, 10.09.2018. а) По оси ординат – отношение среднего по всем склонениям (16 пикселей) и по часовым интервалам (5 пикселей) квадрата индекса мерцаний для данного дня к предыдущему дню. По оси абсцисс – московское время с 00^h до 23^h текущего дня (мск). Вертикальными стрелками обозначено время пикового уменьшения Dst. Кружок на горизонтальной оси соответствует кульминации Солнца. б) Скорость солнечного ветра и концентрация протонов по измерениям на спутнике WIND.

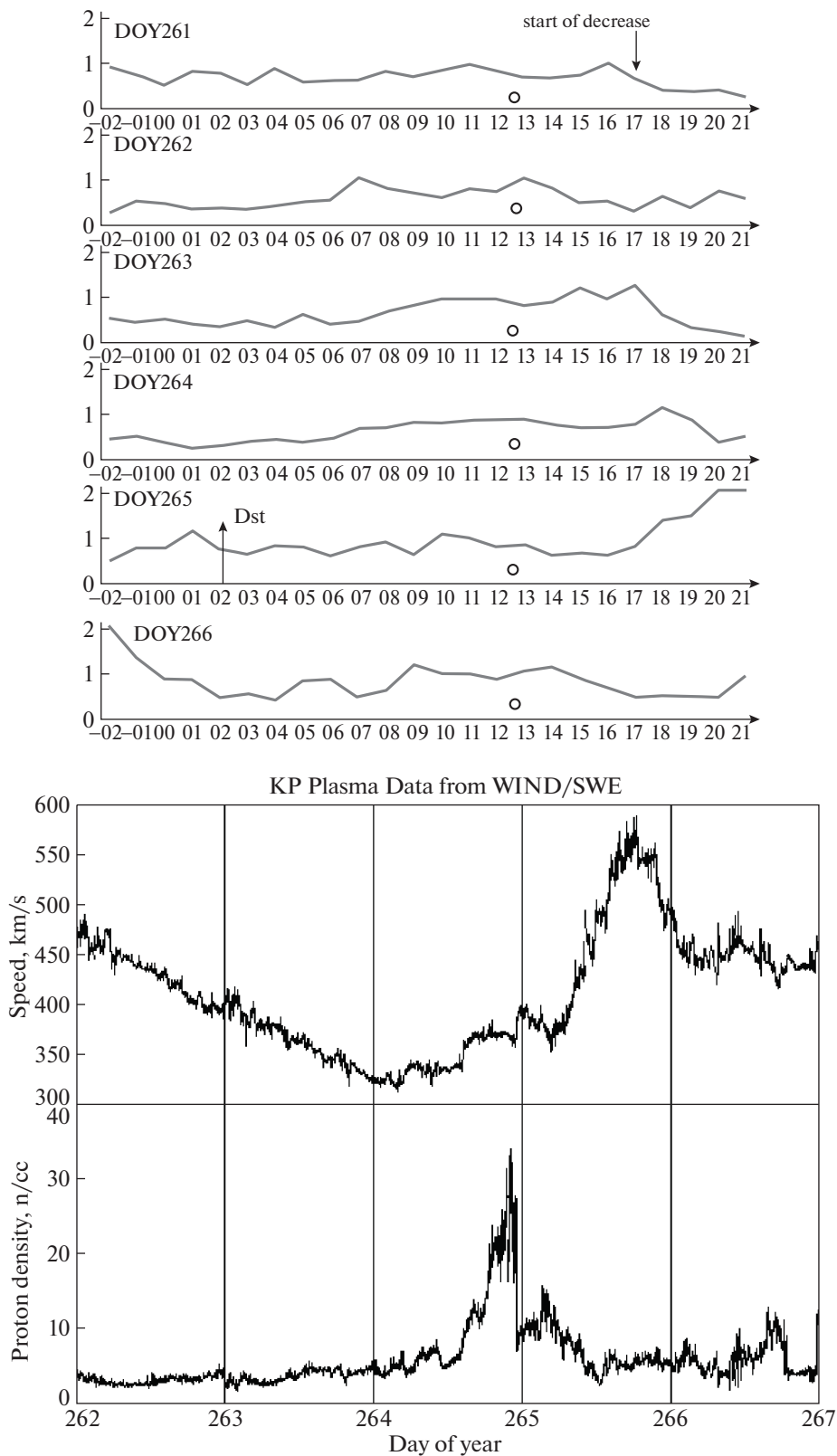


Рис. 6. Событие #6, 22.09.2018. а) По оси ординат – отношение среднего по всем склонениям (16 пикселей) и по часовым интервалам (5 пикселей) квадрата индекса мерцаний для данного дня к предыдущему дню. По оси абсцисс – московское время с 00^h до 23^h текущего дня (мск). Вертикальными стрелками обозначено время пикового уменьшения Dst. Кружок на горизонтальной оси соответствует кульминации Солнца. б) Скорость солнечного ветра и концентрация протонов по измерениям на спутнике WIND.

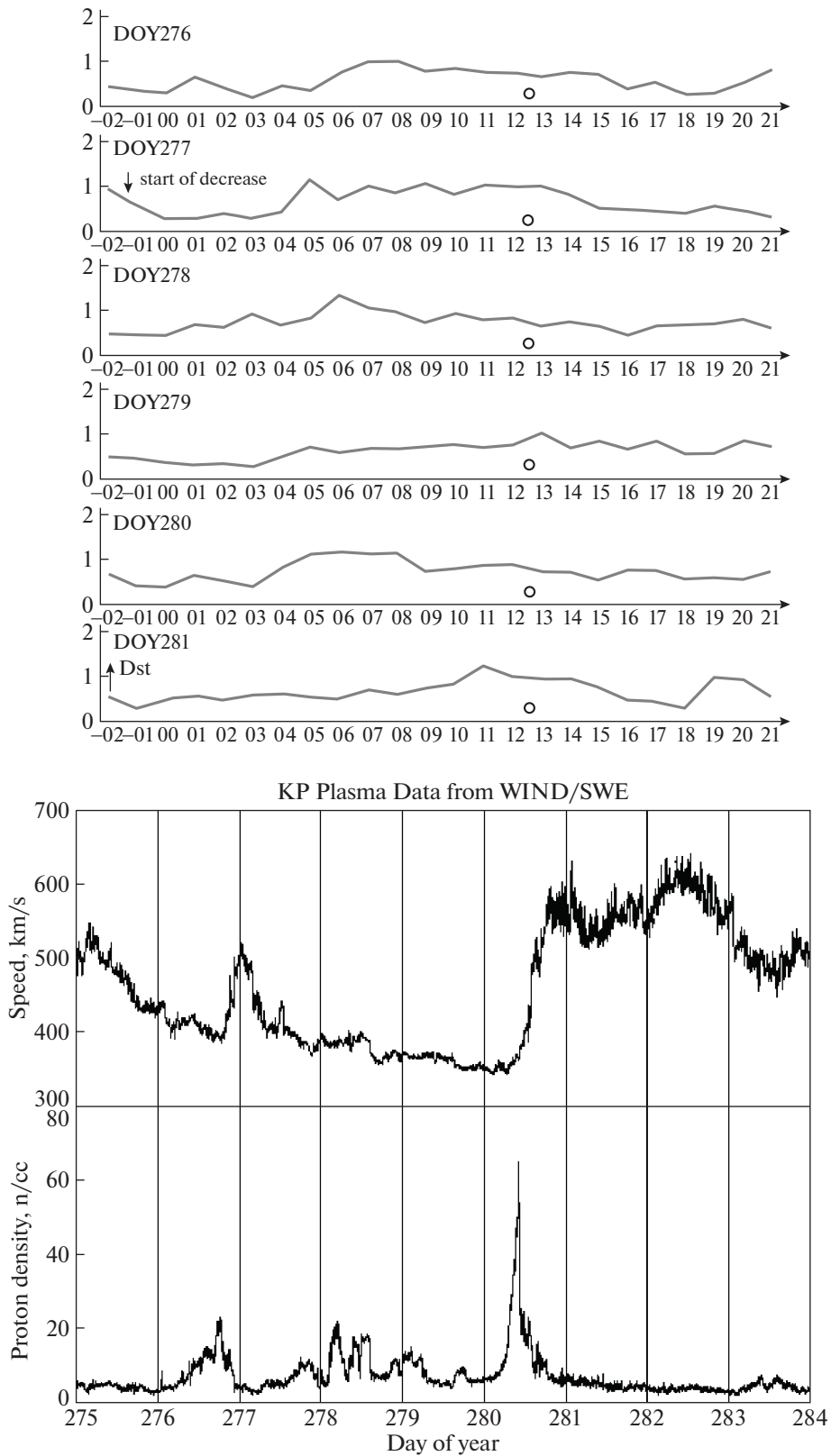


Рис. 7. Событие #7, 07.10.2018. а) По оси ординат – отношение среднего по всем склонениям (16 пикселей) и по часовым интервалам (5 пикселей) квадрата индекса мерцаний для данного дня к предыдущему дню. По оси абсцисс – московское время с 00^h до 23^h текущего дня (мск). Вертикальными стрелками обозначено время пикового уменьшения Dst. Кружок на горизонтальной оси соответствует кульминации Солнца. б) Скорость солнечного ветра и концентрация протонов по измерениям на спутнике WIND.

ло 96 ч, что соответствует повороту Солнца на угол около 55° .

Событие #8: 05.11.2018 г.

05.11.2018 г. (DOY 309) около 06.00 UT (09.00 мск) произошло сильное уменьшение индекса D_{st} с пиковым значением -51 нТ. На рис. 8а приведены зависимости от времени суток для отношения среднего по всем склонениям и по часовым интервалам уровня мерцаний данных суток к предыдущим для DOY 309, пяти суток, предшествовавших DOY 309, и суток после DOY 309. Магнитной буре предшествовало снижение уровня мерцаний в вечерние и ночные часы четырех предшествующих суток, начавшееся в ночь на DOY305 и продолжившееся вплоть до прихода возмущения к Земле.

На рис. 8б приведены данные по скорости и плотности солнечного ветра у орбиты Земли, полученные по измерениям на спутнике WIND. Как видно из рисунка, значительные увеличения плотности плазмы для DOY308 предшествуют увеличениям скорости плазмы DOY309. Время, прошедшее после начала понижения вечерних мерцаний в 22^h UT DOY 304 и пиком D_{st} 06^h UT DOY 309, составило около 104 ч, что соответствует повороту Солнца на угол около 58° .

События 2019 года:

События #1 и #2: 11.05.2019 г. 22^h UT и 14.05.2019 г. 09^h UT

11.05.2019 г. (DOY 131) около 22.00 UT (01.00 мск DOY132) и 14.05.2019 г. (DOY 134) около 09 UT (12.00 мск DOY134) произошло уменьшение индекса D_{st} с пиковым значением -51 нТ для события #1 и -65 нТ для события #2 и величинами K_p индекса 5 и 7 соответственно. На рис. 9а и 10а приведены зависимости от времени суток для отношения среднего по всем склонениям и по часовым интервалам уровня мерцаний данных суток к предыдущим для DOY 131, четырех суток, предшествовавших DOY 131, и суток после DOY 131.

Событию #1 2019 г. предшествовала серия вспышек С класса, связанных с активной областью 2740, располагающейся вблизи восточного лимба Солнца. Солнечная активность продолжалась в течение шести суток, DOY124–DOY129, в табл. 2 приведены баллы вспышек и времена максимального рентгеновского излучения. Отождествление усиления мерцаний с индивидуальными событиями в короне в случаях длительных вспышечных серий затруднительно в силу возможного наложения выбросов распространяющихся возмущений, связанных с мощной вспышечной активностью, на коротярующее возмущение.

Таблица 2. Даты и классы вспышек, предшествующих событию #1 2019 г.

| Класс вспышки | Время |
|---------------|----------------------|
| | 04.05.2019 (DOY 124) |
| C1.0 | 02:31:00 |
| | 05.05.2019 (DOY 125) |
| C2.1 | 01:43:00 |
| | 06.05.2019 (DOY 126) |
| C9.9 | 08:10:00 |
| C1.7 | 10:41:00 |
| C2.0 | 11:47:00 |
| C1.5 | 13:02:00 |
| C7.3 | 16:54:00 |
| C1.0 | 20:49:00 |
| C1.0 | 22:50:00 |
| | 07.05.2019 (DOY 127) |
| C1.2 | 13:48:00 |
| C1.4 | 14:56:00 |
| | 09.05.2019 (DOY 129) |
| C6.7 | 08:51:00 |

Как видно из рис. 9а, около 22^h UT DOY 128 наблюдалось ослабление мерцаний, которое продолжилось в вечерние и ночные часы DOY128–129. В последующие сутки наблюдались, как видно из рис. 9а и 10а, кратковременные усиления мерцаний: в утренние часы DOY129 и DOY130, ночные часы DOY131. Максимальная вспышечная активность, как следует из табл. 2, наблюдалась в течение DOY 126. Усиления вечерних и ночных мерцаний DOY 131 и DOY 132 обусловлены примыкающей к Земле областью солнечного ветра. Запаздывание возмущений в межпланетной среде, наблюдавшихся в течение DOY 129–131, может быть объяснено как вращением активной области вместе с Солнцем, так и распространением фланговой части ICME. В следующие двое суток DOY132 и DOY133 наблюдается продолжение ослабления мерцаний.

На рис. 9б и 10б приведены данные по скорости и плотности солнечного ветра у орбиты Земли, полученные по измерениям на спутнике WIND для событий #1 и #2 соответственно. Распределение концентрации и скорости плазмы на рис. 10б для события #2 типичны для коротярующих возмущений. Вместе с тем в ночном возмущении DOY 130–131 (рис. 9б) происходит практически одновременное увеличение скорости и концентрации плазмы, что характерно для выбросов типа ICME. Отметим, что характер возмущений в уровне мерцаний для событий #1 и #2 отличается от остальных, проанализированных в данной работе.

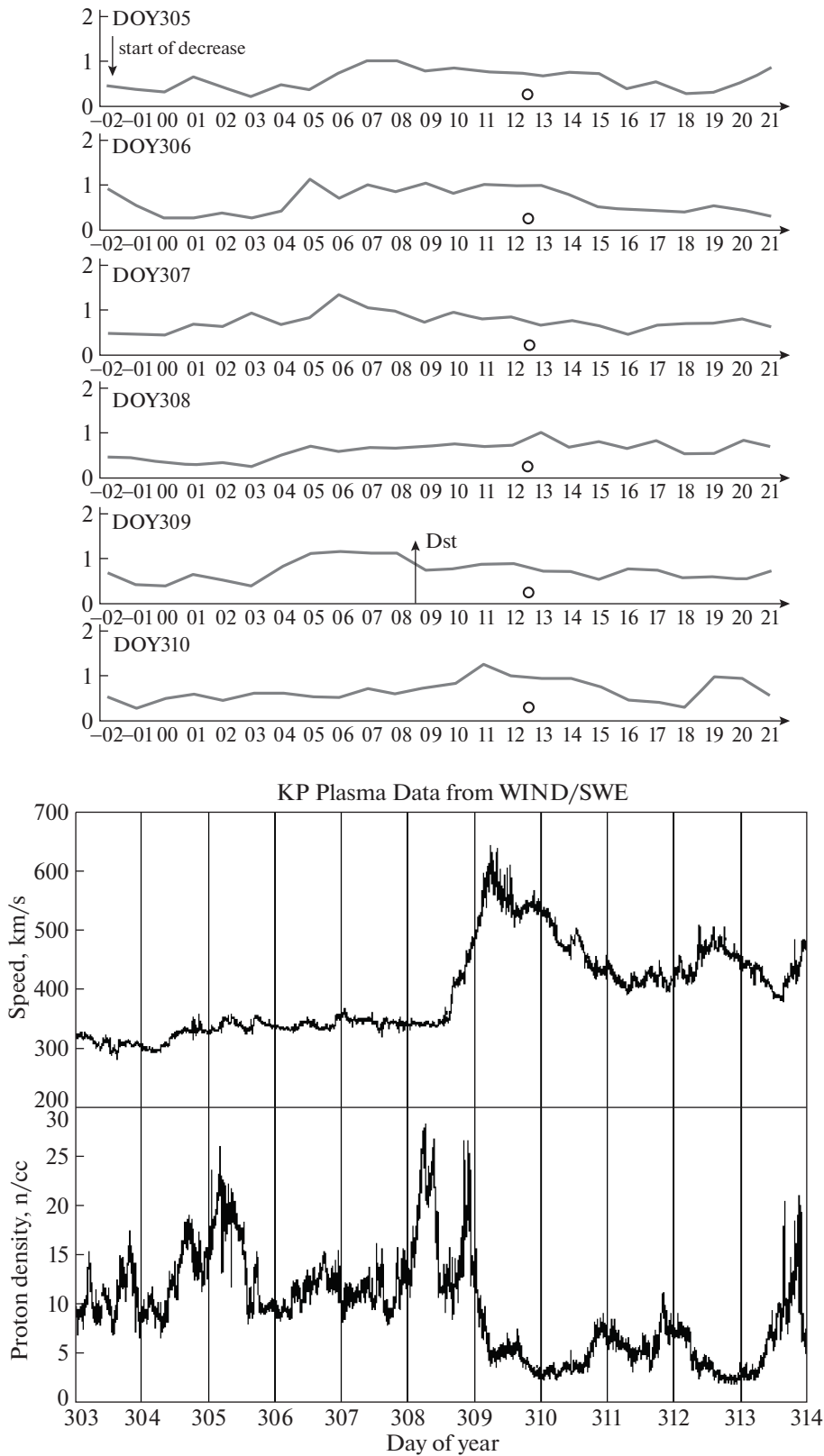


Рис. 8. Событие #8, 05.11.2018. а) По оси ординат – отношение среднего по всем склонениям (16 пикселей) и по часовым интервалам (5 пикселей) квадрата индекса мерцаний для данного дня к предыдущему дню. По оси абсцисс – московское время с 00^h до 23^h текущего дня (мск). Вертикальными стрелками обозначено время пикового уменьшения Dst. Кружок на горизонтальной оси соответствует кульминации Солнца. б) Скорость солнечного ветра и концентрация протонов по измерениям на спутнике WIND.

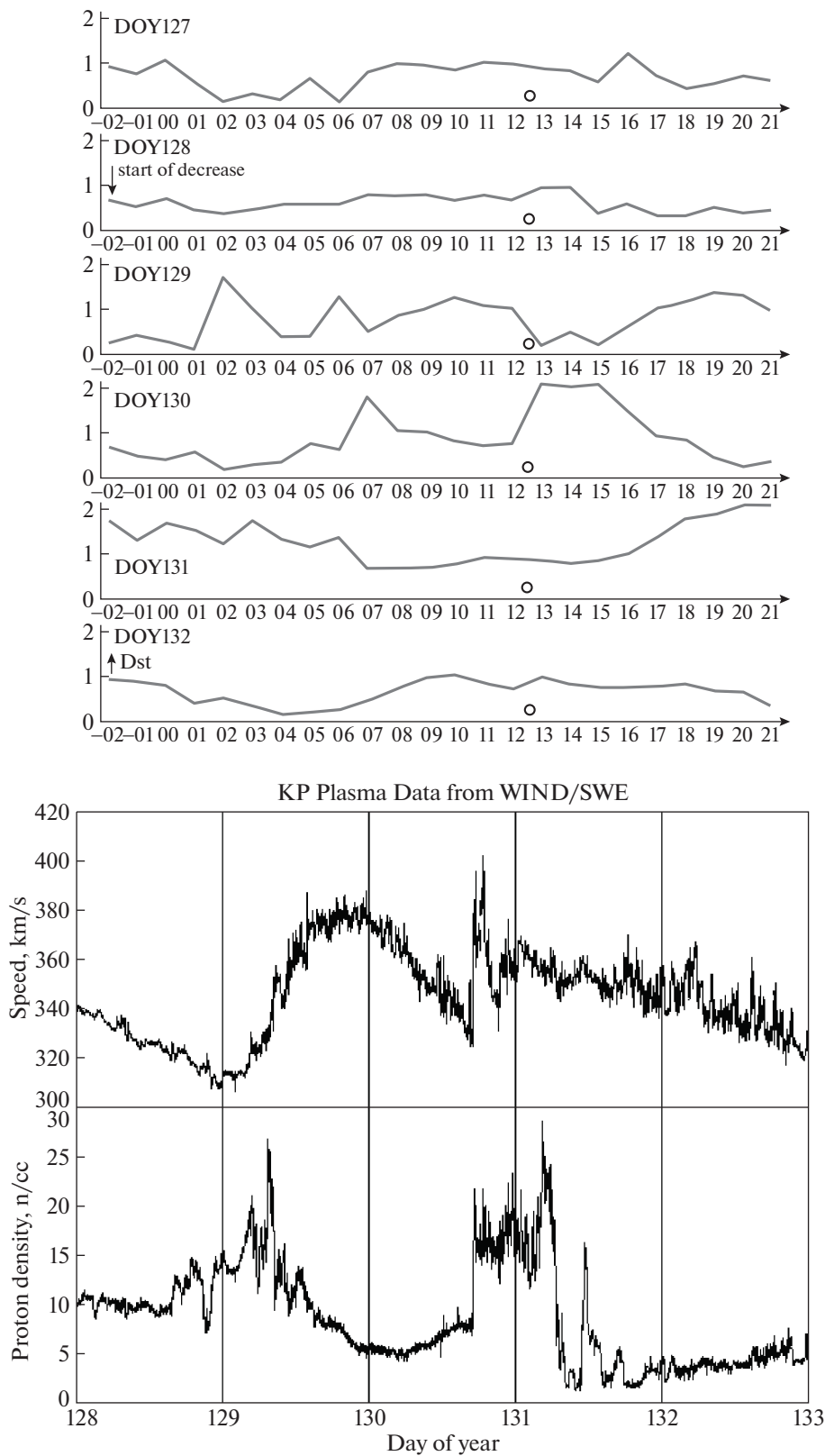


Рис. 9. Событие #1, 11.05.2019. а) По оси ординат – отношение среднего по всем склонениям (16 пикселей) и по часовым интервалам (5 пикселей) квадрата индекса мерцаний для данного дня к предыдущему дню. По оси абсцисс – московское время с 00^h до 23^h текущего дня (мск). Вертикальными стрелками обозначено время пикового уменьшения Dst. Кружок на горизонтальной оси соответствует кульминации Солнца. б) Скорость солнечного ветра и концентрация протонов по измерениям на спутнике WIND.

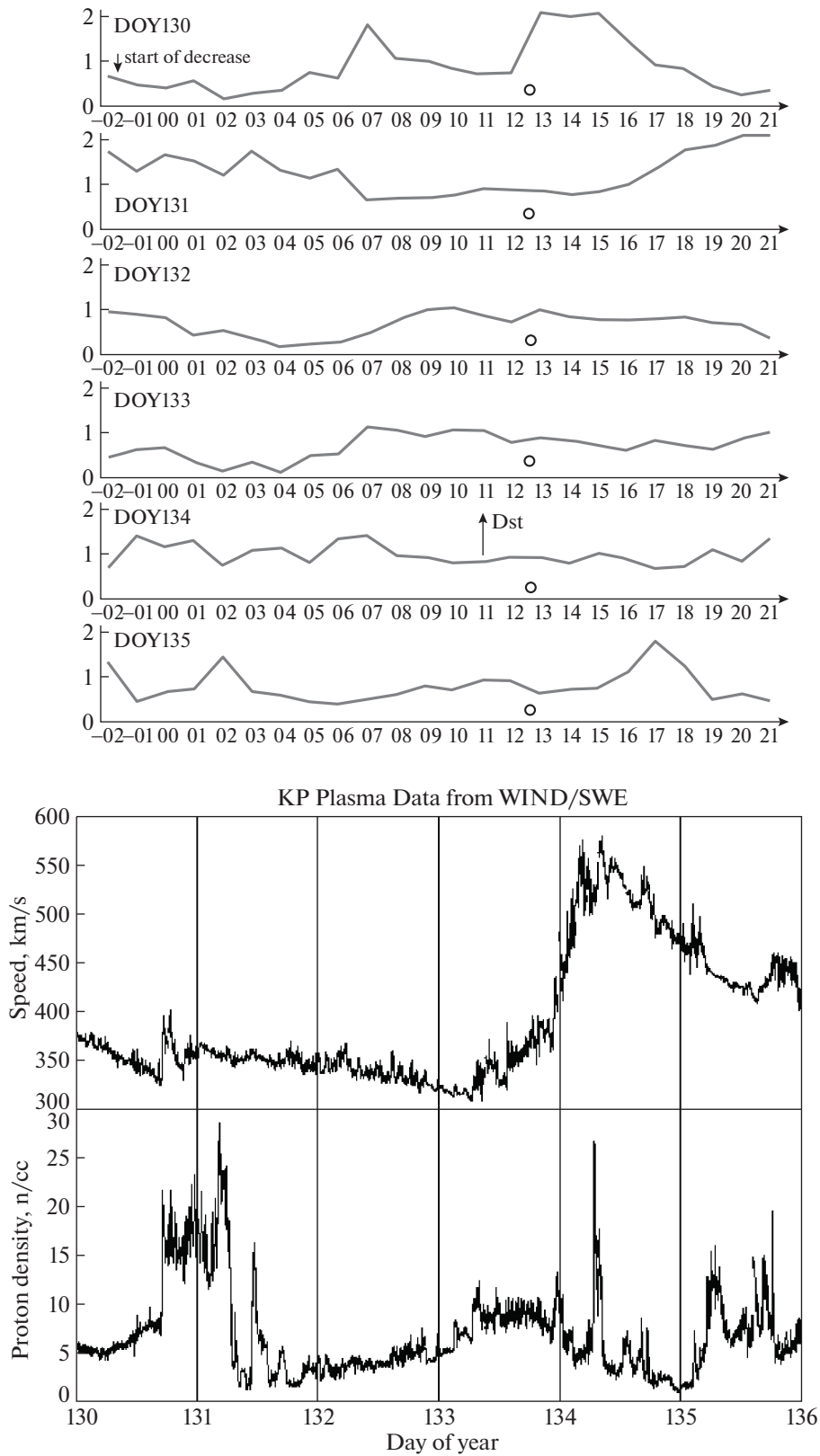


Рис. 10. Событие #2, 14.05.2019. а) По оси ординат – отношение среднего по всем склонениям (16 пикселей) и по часовым интервалам (5 пикселей) квадрата индекса мерцаний для данного дня к предыдущему дню. По оси абсцисс – московское время с 00^h до 23^h текущего дня (мск). Вертикальными стрелками обозначено время пикового уменьшения Dst. Кружок на горизонтальной оси соответствует кульминации Солнца. б) Скорость солнечного ветра и концентрация протонов по измерениям на спутнике WIND.

Событие #3: 05.08.2019 г. 21h UT

Событию #3 не предшествовало вспышек С, М и Х класса.

Днем и вечером 05.08.2019 г. (DOY 217) произошло сильное уменьшение индекса D_{st} с минимумами -50 нТ в 10^h UT (13^h мск) и -53 нТ в 21^h UT (00^h мск), величина K_p индекса при этом увеличилась до 5. На рис. 11а приведены зависимости от времени суток для отношения среднего по всем склонениям и по часовым интервалам уровня мерцаний данных суток к предыдущим для DOY 217, четырех суток, предшествовавших DOY 217, и суток после DOY 217. Как видно из рис. 11а, в вечерние часы DOY 215 началось ослабление мерцаний, которое продолжалось в вечерние и ночные часы DOY 216. Около 08^h UT DOY 217 началось усиление мерцаний, связанное с приходом возмущенной области плазмы к Земле.

На рис. 11б приведены данные по скорости и плотности солнечного ветра у орбиты Земли, полученные по измерениям на спутнике WIND. На рис. 11б видно значительное кратковременное увеличение плотности плазмы для DOY 217, которое сопровождается последующим значительным увеличением скорости плазмы. Время, прошедшее после начала понижения вечерних мерцаний в 20^h UT DOY 215 и пиком D_{st} , составило около 36 ч, что соответствует повороту Солнца на угол около 20° .

Событие #4: 01.09.2019 00h UT

01.09.2019 г. (DOY 244) произошло уменьшение индекса D_{st} до -52 нТ в 07.00 UT (10.00 мск), величина K_p индекса при этом увеличилась до 6. На рис. 12а приведены зависимости от времени суток для отношения среднего по всем склонениям и по часовым интервалам уровня мерцаний данных суток к предыдущим для DOY 244, четырех суток, предшествовавших DOY 244, и суток после DOY 244. Как видно из рис. 12а, в вечерние часы DOY 240 началось ослабление мерцаний, которое усилилось в ночные часы последующих суток DOY 241–DOY 243.

На рис. 12б приведены данные по скорости и плотности солнечного ветра у орбиты Земли, полученные по измерениям на спутнике WIND. На рисунке видно значительное кратковременное увеличение плотности плазмы для DOY 243, которое сопровождается последующим значительным увеличением скорости плазмы DOY 244. Время, прошедшее после начала ослабления вечерних мерцаний в 16^h UT DOY 240 и пиком D_{st} , составило около 85 ч, что соответствует повороту Солнца на угол около 45° .

Событие #5: 28.09.2019 00h UT

В ночь с 27.09.2018 г. (DOY 270) на 28.09.2019 г. (DOY 271) произошло уменьшение индекса D_{st} с

минимумом -49 нТ в 00^h UT (03.00 мск), величина K_p индекса при этом увеличилась до 5. На рис. 13а приведены зависимости от времени суток для отношения среднего по всем склонениям и по часовым интервалам уровня мерцаний данных суток к предыдущим для DOY 271, четырех суток, предшествовавших DOY 271, и суток после DOY 271. Как видно из рис. 13а, в ночные часы DOY 269 началось ослабление мерцаний, которое усилилось в последующие сутки DOY 270–DOY 271.

На рис. 13б приведены данные по скорости и плотности солнечного ветра у орбиты Земли, полученные по измерениям на спутнике WIND. На рис. 13б видно значительное кратковременное увеличение плотности плазмы для DOY 270, которое сопровождается последующим значительным увеличением скорости плазмы. Время, прошедшее после начала понижения вечерних мерцаний в 22^h DOY 269 и пиком D_{st} , составило около 52 ч, что соответствует повороту Солнца на угол около 30° .

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Событие #6 2018 г. произошло примерно через 647 ч после события #4 2018 г., что соответствует примерно одному обороту Солнца. События #7 и #8 2018 г. произошли примерно через 1 и 2 оборота Солнца после события #5 2018 г., с событием #5 также, по-видимому, связаны события #2, #3, #4, #5 2019 г. Таким образом можно утверждать, что события #5, #7, #8 2018 г. и #2, #3, #4, #5 2019 г. связаны с одной и той же областью, вращающейся вместе с Солнцем. События #1 и #2 2018 г. коррелируют соответственно с событиями 2017 и 2016 г. [11, 12]: событие #1 (DOY 77) отделено от событий DOY 236 2016 г., DOY 60, DOY 86, DOY 197 и DOY 251 2017 г. соответственно 21, 14, 13, 9 и 7 оборотами Солнца, событие #2 (DOY 110) 2018 г. отделено от событий DOY 148 и DOY 312 – 12 и 6 оборотами Солнца. Это позволяет сделать вывод, что возмущение связано с долгоживущей коротирующей областью, которая существует по крайней мере несколько оборотов Солнца.

Проведенный анализ подтверждает сделанные в работах [11, 12] выводы, касающиеся коротирующих возмущений: за 3–4 сут до геомагнитного возмущения для всех таких 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. Данные мониторинга межпланетных мерцаний не позволяют с достаточной точностью фиксировать время начала понижения, поэтому вывод о существова-

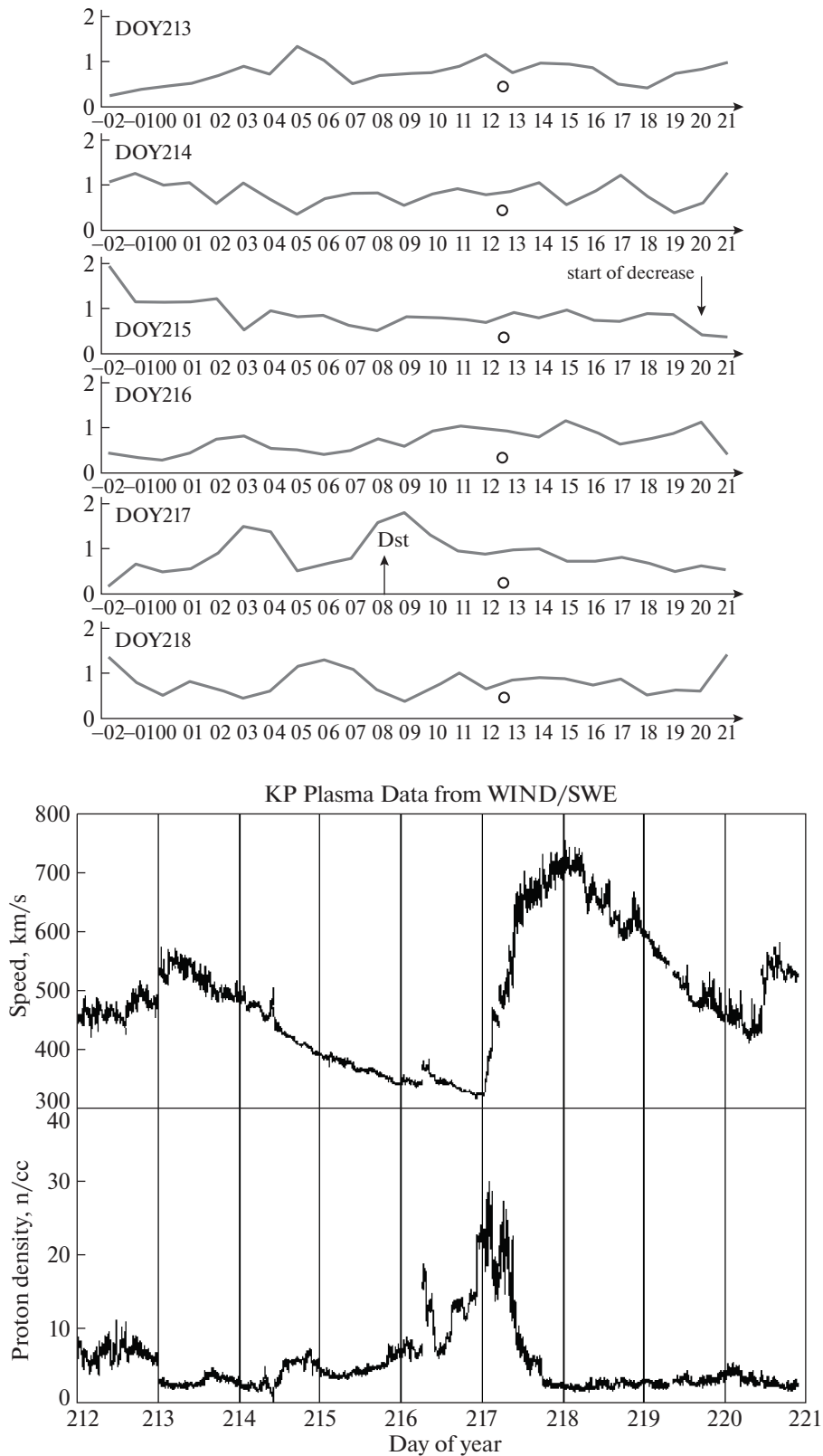


Рис. 11. Событие #3, 05.08.2019. а) По оси ординат – отношение среднего по всем склонениям (16 пикселей) и по часовым интервалам (5 пикселей) квадрата индекса мерцаний для данного дня к предыдущему дню. По оси абсцисс – московское время с 00^h до 23^h текущего дня (мск). Вертикальными стрелками обозначено время пикового уменьшения Dst. Кружок на горизонтальной оси соответствует кульминации Солнца. б) Скорость солнечного ветра и концентрация протонов по измерениям на спутнике WIND.

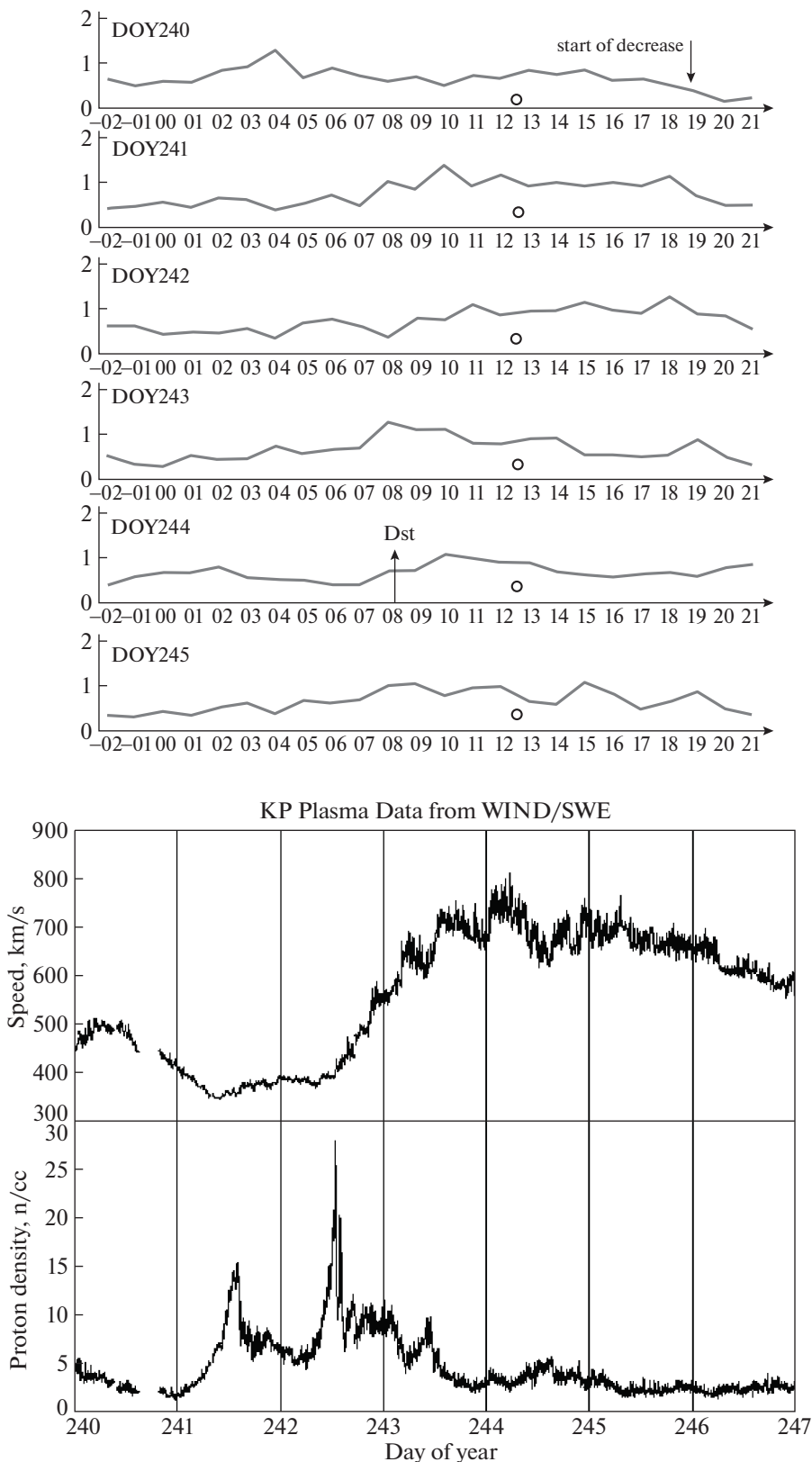


Рис. 12. Событие #4, 01.09.2019. а) По оси ординат – отношение среднего по всем склонениям (16 пикселей) и по часовым интервалам (5 пикселей) квадрата индекса мерцаний для данного дня к предыдущему дню. По оси абсцисс – московское время с 00^h до 23^h текущего дня (мск). Вертикальными стрелками обозначено время пикового уменьшения Dst. Кружок на горизонтальной оси соответствует кульминации Солнца. б) Скорость солнечного ветра и концентрация протонов по измерениям на спутнике WIND.

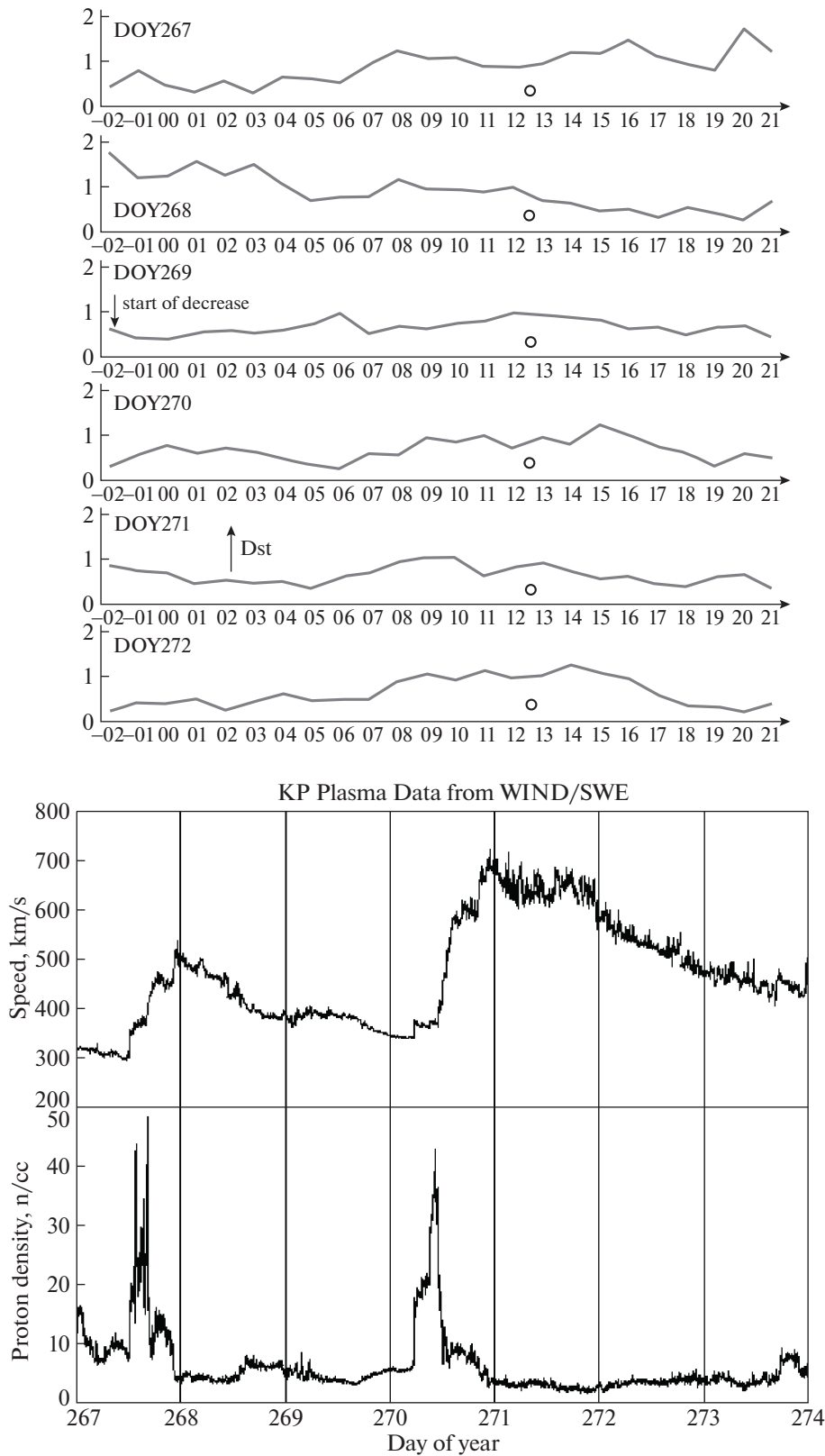


Рис. 13. Событие #5, 28.09.2019. а) По оси ординат — отношение среднего по всем склонениям (16 пикселей) и по часовым интервалам (5 пикселей) квадрата индекса мерцаний для данного дня к предыдущему дню. По оси абсцисс — московское время с 00^h до 23^h текущего дня (мск). Вертикальными стрелками обозначено время пикового уменьшения Dst. Кружок на горизонтальной оси соответствует кульминации Солнца. б) Скорость солнечного ветра и концентрация протонов по измерениям на спутнике WIND.

нии предвестников коротирующих возмущений носит качественный характер. Как и в [11, 12], практически одновременно с магнитной бурей происходит заметное усиление секундных мерцаний, которое выражено более четко, если буря происходит в вечерние или ночные часы. Эти усиления мерцаний связаны с повышением уровня мелкомасштабной турбулентности в области солнечного ветра, примыкающей к орбите Земли [11, 12].

5. ВЫВОДЫ

1. В 2018–2019 гг. на фазе приближения к глубокому минимуму солнечной активности из 13 сильных геомагнитных возмущений 12 было связано с коротирующими областями взаимодействия разноскоростных потоков солнечного ветра. Коротирующие потоки 2018–2019 гг. по 27-дневной периодичности ассоциируются с аналогичными возмущениями 2016, 2017 г., что показывает их долгоживущий характер с временем жизни по крайней мере несколько оборотов Солнца.

2. Данные мониторинга межпланетных мерцаний позволяют фиксировать коротирующие возмущения до их прихода к Земле. Как и в 2016, 2017 г. [11, 12], 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 связано, по-видимому, с существенным уменьшением уровня мелкомасштабной турбулентности плазмы в протяженной (30° – 50° по долготе) области перед фронтальной частью возмущения.

3. В одном из событий (#1 2019 г.) наблюдалось наложение вспышечных возмущений, приходя-

щих с восточного лимба, на коротирующее возмущение, причем магнитная буря, по-видимому, была вызвана вспышечным возмущением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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, E. A. Jensen, A. G. Wood, M. J. Owens, M. Tokumaru, P. K. Manoharan, I. V. Chashei, A. Giunta, J. A. Linker, V. I. Shishov, S. A. Tyul'bashev, G. Agalya, S. K. Glubokova, M. S. Hamilton, K. Fujiki, P. P. Hick, J. M. Clover, and B. Pinter, Solar Phys.* **265**, 49 (2010).
2. *M. M. Bisi, A. Gonzalez-Esparza, B. V. Jackson, M. Tokumaru, and J. Leibacher, Solar Phys.* **290** (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**, 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, Planet. and Space Sci.* **34**, 93 (1986).
9. *I. V. Chashei, S. A. Tyul'bashev, V. I. Shishov, and 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. *И. В. Чашей, Т. О. Лебедева, С. А. Тюльбашев, И. А. Субаев, Астрон. журн.* **97**, 73 (2020).
13. *В. И. Шишов, И. В. Чашей, В. В. Орешко, С. В. Логвиненко и др., Астрон. журн.* **93**, 1045 (2016).