

УДК 550.338.1

ПРОЯВЛЕНИЕ F -РАССЕЯНИЯ ВО ВРЕМЯ БОЛЬШИХ ИЗОЛИРОВАННЫХ МАГНИТНЫХ БУРЬ

© 2022 г. О. И. Ягодкина¹, *, В. А. Панченко², В. Г. Воробьев¹, В. А. Телегин²

¹ Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова
Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: oksana41@mail.ru

Поступила в редакцию 15.10.2021 г.

После доработки 05.11.2021 г.

Принята к публикации 22.11.2021 г.

На примере двух изолированных сильных магнитных бурь 17 марта и 22–23 июня 2015 г. исследована зависимость рассеяния в слое $F2$ от геомагнитной активности и параметров солнечного ветра. Показано, что во время магнитных бурь Москва находилась в районе высыпаний аврорального овала, и регистрируемое F -рассеяние являлось результатом наложения нескольких процессов. Показана зависимость F -рассеяния, регистрируемого на главной фазе июньской магнитной бури, от AL и Dst индексов и динамического давления солнечного ветра.

DOI: 10.31857/S0367676522030267

ВВЕДЕНИЕ

Критическая частота f_oF2 и высота $HmF2$ слоя $F2$ ионосферы относятся к основным параметрам ионосферы, поскольку они связаны с распространением КВ-радиоволн и качеством радиосвязи и радионавигации. F -рассеяние изучается уже более 70 лет, и основные его закономерности известны. Исследованы, хоть и неполно, годовые, суточные и сезонные зависимости [1–5], однако остаются нерешенными некоторые вопросы, как о его природе, так и о связи с другими геофизическими явлениями. Высказывалось, в числе прочих, предположение [2], что F -рассеяние в ионосфере средних широт связано с проявлением внутренних гравитационных и акустико-гравитационных волн в верхней атмосфере. Вероятнее всего, интенсивность F -рассеяния и время его появления есть результат наложения нескольких происходящих в ионосфере процессов [4, 5].

Морфология бурь в области F , являющихся реакцией ионосферы на геомагнитные возмущения, весьма сложна [1–5]. Реакция ионосферы, в том числе и появление F -рассеяния, в разные периоды времени может быть различна и зависит как от межпланетных параметров, так и от места наблюдения. Роль геомагнитной активности в появлении F -рассеяния легче всего выявить при попадании ионизации в зону авроральных высыпаний. Для Москвы такое возможно только во

время сильных геомагнитных бурь, при которых полярные сияния наблюдаются на средних и, возможно, на более низких широтах. Для определения местоположения пункта наблюдения относительно аврорального овала использована модель авроральных высыпаний АРМ [6], в которой входными параметрами служат индексы геомагнитной активности AL и Dst (SYM/H). Для исследования были выбраны две сильные изолированные магнитные бури в 24 цикле солнечной активности: 17 марта и 22–23 июня 2015 г., в период которых Dst индекс в минимуме составлял -233 и -207 нТл. Ранее в [5] нами уже были проведены первые исследования зависимости интенсивности F -рассеяния (уширения ионограмм dFs , измеряемое в МГц) от магнитной активности, однако существующий на тот период набор данных не позволил сделать окончательных выводов.

Целью настоящей работы является исследование вариаций интенсивности F -рассеяния (dFs) и их связи с уровнем геомагнитной активности и параметрами солнечного ветра.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

В работе использованы 15 мин данные, полученные в ИЗМИРАН в результате автоматической обработки ионограмм DPS-4 (Москва, 55.45° с.ш., 37.37° в.д.), и модель авроральных высыпаний АРМ [6], размещенная на сайте <http://>

arm.pgia.ru/. Кроме того, для определения положения экваториальной границы аврорального овала в условиях высокого давления солнечного ветра 22–23 июня 2015 г. использовались данные пролета спутника DMSP F-16, представленные на портале <http://sd-www.jhuapl.edu/>. Данные по магнитной активности были взяты на сайте <http://spdf.gsfc.nasa.gov>.

Ионосферная буря обычно проявляется в вариациях электронной концентрации в широком интервале высот от примерно 200 до 800–1000 км, поэтому основное внимание в работе уделяется критической $foF2$ частоте слоя и уширению ионограммы по частоте во время рассматриваемых событий.

СВЯЗЬ F-РАССЕЯНИЯ С ПАРАМЕТРАМИ ИОНОСФЕРЫ И МАГНИТНОЙ АКТИВНОСТЬЮ

В 24 солнечном цикле произошли две крупнейшие геомагнитные бури – 17 марта и 22–23 июня 2015 г. Магнитная буря в марте ($Kp = 8$, $Dst = -233$ нТл) отмечена внезапным началом SSC в 04:45 UT. Геомагнитной буре 22 июня ($Kp = 9$, $Dst = -207$ нТл) также предшествовало SSC в 18:35 UT. Обе бури происходили на фоне повышенного давления солнечного ветра (P_{sw}), регистрируемого во время главной фазы каждой из бурь. На средних широтах наблюдались довольно интенсивные полярные сияния. Характеристики ионосферных параметров в периоды этих событий представлены на рис. 1. Как уже отмечалось выше, поведение ионосферы во время магнитных бурь достаточно сложно и существенно меняется от одной бури к другой. Подобную ситуацию мы наблюдаем и в рассматриваемых нами событиях.

Магнитная буря 17 марта 2015 г.

Как показано ниже, во время главной фазы бури Москва находилась в зоне высыпаний аврорального овала. Из третьей панели рис. 1а видно, что наблюдается предбуревое изменение критической частоты, начавшееся примерно 8 марта, т.е. за несколько суток до начала бури. В этот период в ночные часы $foF2$ увеличивается, а в дневные падает, хотя среднее значение остается на уровне ~ 6 МГц. Значительных изменений в положении высоты $HmF2$ не наблюдается. Как видно на нижней панели рисунка, происходит плавное, вплоть до фонового, уменьшение dFs (уровень $dFs \leq 0.25$ МГц обычно рассматривается как отсутствие рассеяния, т.е. считается фоновым). Внезапное начало бури сопровождается резким, до 12 МГц, всплеском критической частоты с последующим ее падением до ~ 2 МГц на главной фазе бури, уменьшением высоты слоя и небольшим нарастанием dFs во время главной фазы бури.

Увеличение динамического давления солнечного ветра до ~ 28 нПа также регистрируется в период главной фазы бури. В начале фазы восстановления, при $|SYM/H| < 0$, начинается рост величины $foF2$, которая достигает предбуревое значения лишь через несколько суток. Высота слоя также претерпевает изменения – после смещения от ~ 250 до ~ 150 км она возвращается к предбуревому уровню. Уширение сигнала по частоте dFs сразу после главной фазы бури становится фоновым, а потом увеличивается одновременно с ростом $foF2$. Таким образом, в данном событии независимо от знака SYM/H мы наблюдаем как уменьшение, так и рост dFs при увеличении критической частоты слоя. Эти ситуации отмечены на рисунке красными сплошными линиями. Следует заметить, что в течение бури 17 марта 2015 г. слой $F2$ периодически перекрывался нижележащей ионизацией: спорадическим слоем от авроральных высыпаний, как это видно на левой ионограмме рис. 3, или слоем $F1$, что тоже бывает при больших бурях. При этом автоматический алгоритм не мог правильно определить параметр dFs . Отсюда, возможно, и описанное выше поведение dFs во время этой бури. 20 марта имело место солнечное затмение, вносящее специфический вклад в ионосферные процессы, поэтому поведение dFs после 20 марта не рассматривается.

Буря 22–23 июня 2015 г.

Поведение ионосферы в этой магнитной буре существенно отличается от рассмотренного выше события. Как видно из рис. 1б, до начала возмущения изменение критической частоты довольно хаотично, его среднее значение составляет ~ 6 МГц. Средняя высота слоя ~ 250 км. В течение ~ 3 суток, с 19:30 UT 19 июня по 18:35 UT 22 июня, магнитное поле спокойно, dFs остается фоновым, в пределах 0.25 МГц, вплоть до начала бури и резкого увеличения до ~ 40 нПа в 19:30 UT динамического давления солнечного ветра. Рост P_{sw} сопровождается перестройкой ионосферы: резко, до ~ 3 МГц падает критическая частота слоя, растет до ~ 400 км его высота. Критическая частота начинает восстанавливаться еще до начала фазы восстановления бури, в период уменьшения P_{sw} . Слой $F2$ регистрируется на высоте ~ 150 км. Как и в предыдущем случае, критическая частота не восстанавливается до предбуревое значения. С началом фазы восстановления регистрируется рост как $foF2$, так и $HmF2$. Что касается dFs , то его поведение в период главной фазы и в начале фазы восстановления детально будет показано на следующем рисунке. Геомагнитные условия в период главной фазы и в начале фазы восстановления каждой из бурь иллюстрирует рис. 2. Сверху вниз показаны индексы геомагнитной активности AL и SYM/H , динамическое давление солнечного ветра (P_{sw}) и $F2$ -

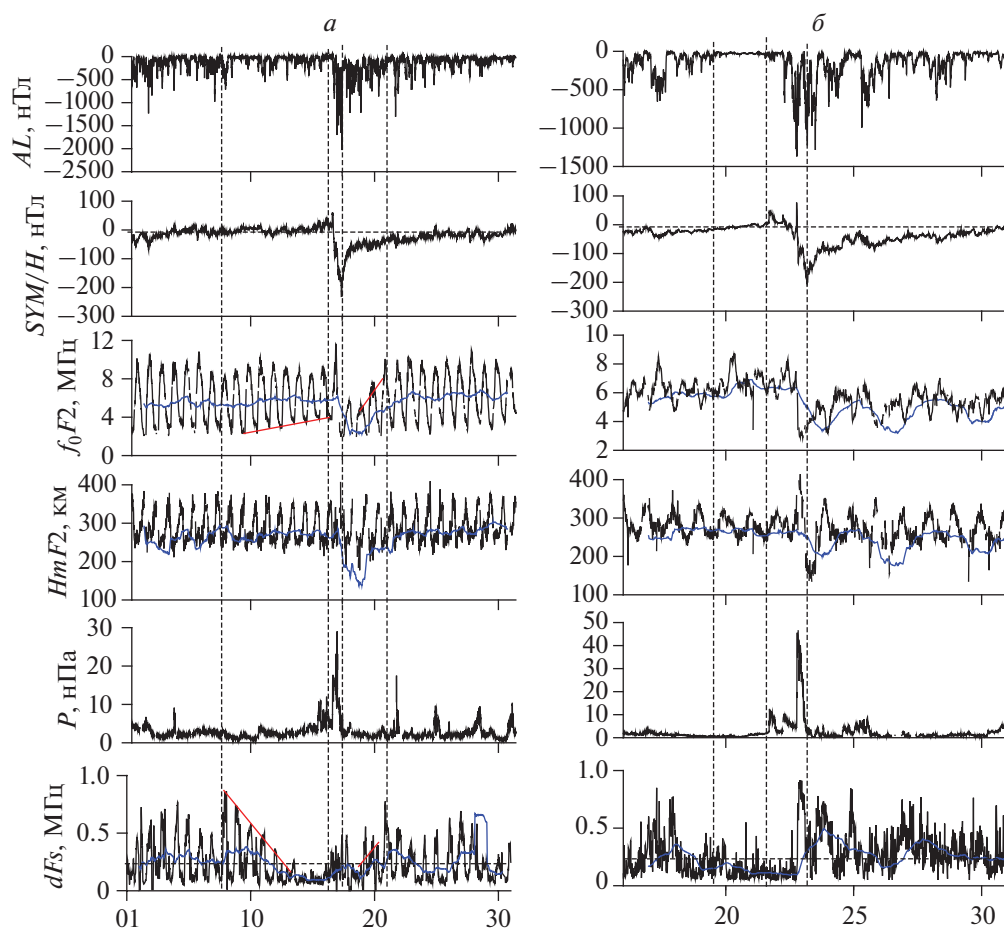


Рис. 1. Геомагнитная ситуация и параметры ионосферы во время магнитных бурь 17 марта (а) и 22–23 июня (б) 2015 г. Сверху вниз показаны индексы магнитной активности AL и SYM/H , критическая частота f_0F_2 и высота HmF_2 слоя, динамическое давление солнечного ветра P_{sw} и dFf_2 уширение. Синие линии – среднесуточные вариации параметров, полученные методом скользящего арифметического среднего.

рассеяние (dFf_2). Черными вертикальными линиями выделены главные фазы бури. Рисунки 2в, 2г и 2д показывают глобальную картину авроральных высыпаний во время, выделенное на рис. 2а и 2б красными штриховыми линиями. Положение областей различных типов высыпаний получено с помощью модели АРМ [6].

В левой части рис. 2 представлены данные с 16 по 19 марта 2015 г. Как видно из рисунка, 17 марта в 21:35 UT ($AL = -1283$ нТл, $SYM/H = -182$ нТл, $P_{sw} = 3.2$ нПа) станция находилась в полуночном секторе на экваториальной кромке авроральных высыпаний. В течение всей главной фазы бури рассеяние в области F_2 ионосферы незначительно увеличилось, но оставалось слабым, близким к фоновому уровню. Динамическое давление солнечного ветра достигало ~ 28 нПа, что привело, как это будет показано ниже, к значительному дополнительному смещению границы авроральных высыпаний в низкие широты. Правая часть рисунка иллюстрирует ситуацию во время июньской бу-

ри. Как видно на нижней панели рис. 2б, до начала возмущения dFf_2 было фоновым. Резкий рост динамического давления сопровождается значительным увеличением рассеяния. Динамика изменений dFf_2 такова, что по форме она совпадает с формой изменения P_{sw} и по времени заканчивается одновременно с уменьшением давления еще до окончания главной фазы бури. Величина dFf_2 уменьшается с 0.8 до 0.4 МГц. Таким образом, в процессах, происходящих во время данной бури, существенную роль, наряду с магнитной активностью, играет высокое динамическое давление солнечного ветра.

На рис. 2г представлено модельное глобальное распределение авроральных высыпаний в 19:30 UT, в период начала главной фазы магнитной бури при высоком уровне P_{sw} . Входные параметры модели: $AL = -365$ нТл, $Dst = -47$ нТл. Москва, положение которой отмечено красной звездочкой на рисунке, при таких параметрах геомагнитной активности не попадает в зону авроральных высыпа-

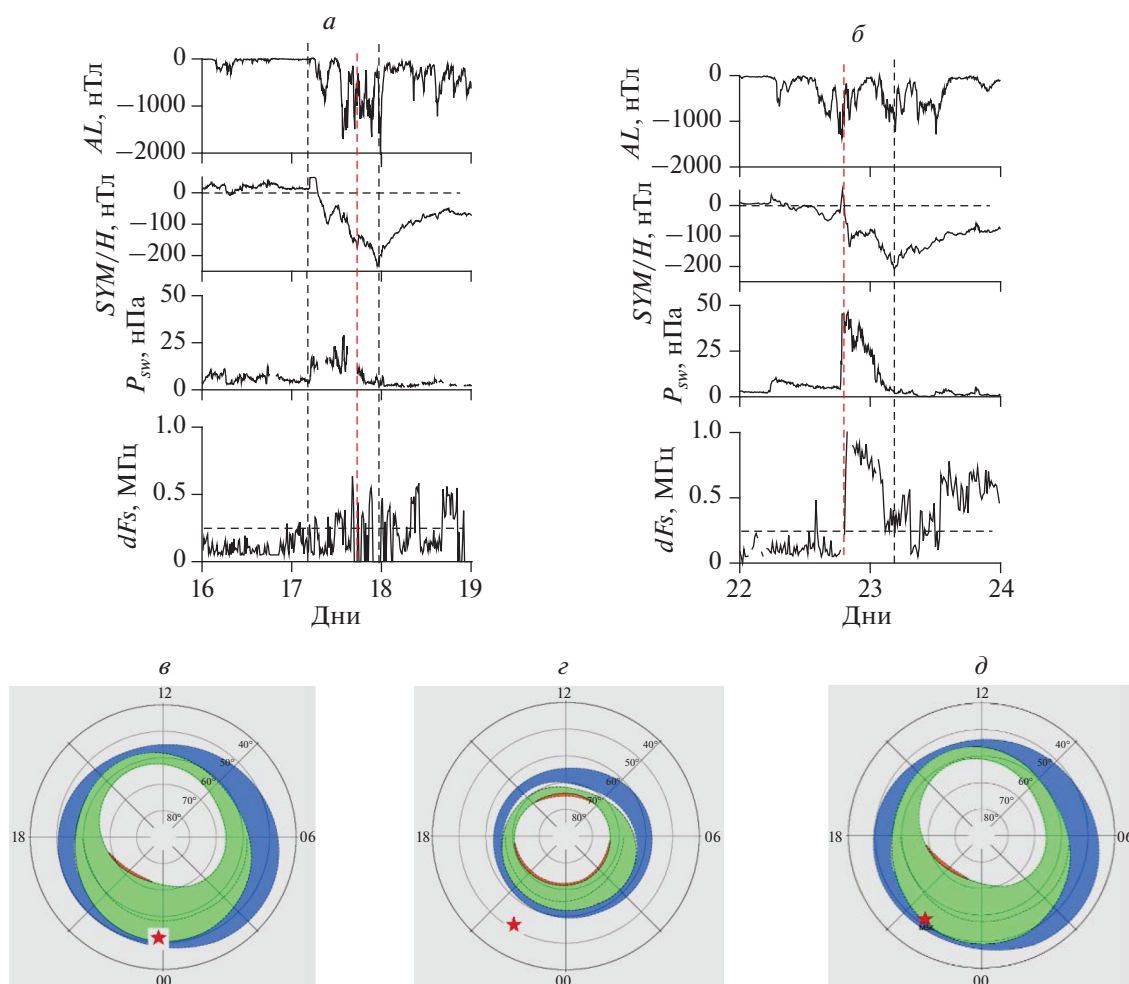


Рис. 2. Геомагнитные условия (*а, б*) и глобальные распределения авроральных высыпаний во время главной фазы магнитных бурь 17 марта (*в*) и 22–23 июня 2015 г. (*г, д*). Положение Москвы отмечено красной звездочкой, зеленым цветом обозначен овал полярных сияний, синий цвет – зона жестких диффузных высыпаний, красный цвет – зона мягких диффузных высыпаний.

ний, поэтому наблюдение полярных сияний в таких условиях кажется невозможным. Однако известно, что во время этой бури полярные сияния наблюдались не только в Москве, но и на более южных широтах, т.е. в данном случае модель АРМ не вполне корректно отражает реальную ситуацию. Модель создана при условии среднего уровня динамического давления 2–3 нПа, но, как показано выше, в рассматриваемый период был зарегистрирован необычно высокий уровень P_{sw} . Известно, что с ростом P_{sw} происходит смещение авроральных высыпаний в более низкие широты. Для оценки величины такого смещения в рассматриваемом случае была использована следующая процедура. Рассмотрен пролет спутника DMSF F16 в 19:27–19:34 UT, близкий к началу бури. Время пролета отмечено на рис. 2б красной вертикальной штриховой линией. Динамическое давление солнечного ветра в это время составляло 40.5 нПа. По

данным спутника F16 определено положение экваториальной границы авроральных высыпаний на широте 50.4° CGL. С помощью модели АРМ была смоделирована такая ситуация, когда в области траектории F16 данные спутника совпали с модельными значениями (рис. 2д). Красная звездочка иллюстрирует положение Москвы относительно зоны авроральных высыпаний с учетом высокого динамического давления. При этих условиях станция наблюдения располагается внутри зоны авроральных высыпаний. Из сравнения положений авроральных овалов на рис. 2г и 2д видно, что в данном случае динамическое давление солнечного ветра сдвигает границу овала примерно на 10° к югу. Во время бури 17 марта величина динамического давления солнечного ветра достигала ~28 нПа, поэтому мы можем прогнозировать, что Москва располагалась не на экваториальной кромке овала, а ближе к его центру, что и способствова-

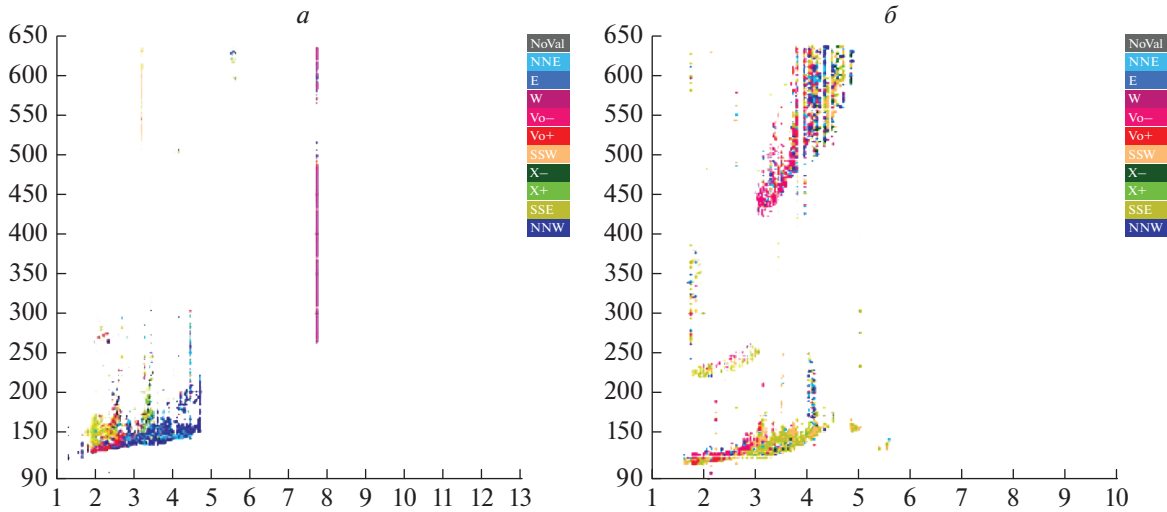


Рис. 3. Ионограммы во время главной фазы магнитных бурь: 17 марта в 19:46 UT (а) и 22–23 июня в 20:01 UT (б).

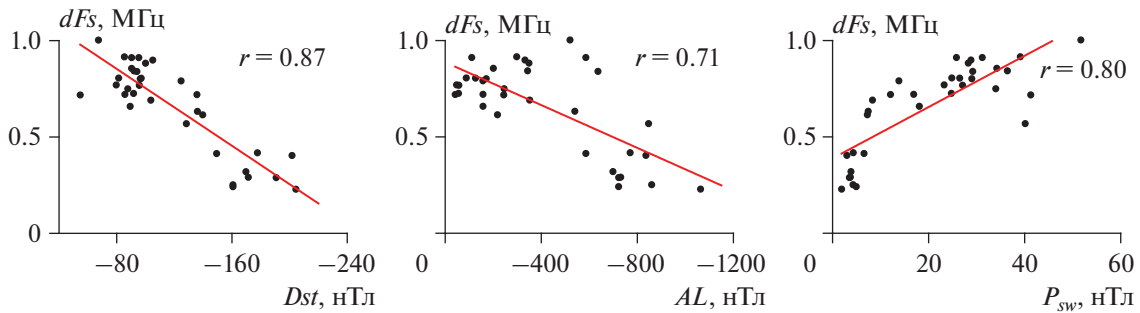


Рис. 4. Зависимость dF_s от индексов магнитной активности AL и SYM/H и динамического давления солнечного ветра P_{sw} на главной фазе магнитной бури 22–23 июня 2015 г.

ло наблюдению мощных полярных сияний. Прохождение над Москвой зоны высыпаний во время главной фазы обеих бурь полностью подтверждается ионограммами, показанными на рис. 3. Следы от ~ 1.5 до ~ 4.7 МГц (б) на высотах от ~ 110 до ~ 160 – 190 км являются четкими признаками авроральных высыпаний.

Для исследования зависимости уширения dF_s от геомагнитной активности и динамического давления солнечного ветра были выбраны наблюдения после скачка давления в интервале от 19:16 UT 22 июня до 04:41 UT 23 июня. Это время главной фазы магнитной бури, в период которой Москва находилась в зоне авроральных высыпаний. Зависимость dF_s от AL и SYM/H индексов и от P_{sw} иллюстрируют рис. 4а, 4б и 4в. Сплошные линии на рис. 4 соответствуют уравнениям линейной регрессии с коэффициентами корреляции, $r = 0.87$, 0.71 и 0.80 соответственно. Как видно из рисунков, по мере увеличения магнитной активности и уменьшения величины P_{sw} уши-

рение dF_s уменьшается. В максимуме бури $dF_s \sim 0.4$ МГц, что соответствует dF_s при $P_{sw} \sim 2$ – 3 нПа, что мы и наблюдаем на рис. 4в. Такую динамику можно видеть и на рис. 2б: резкий рост dF_s от фонового уровня до максимального 0.8 МГц и постепенное его уменьшение с ростом $|AL|$ и $|Dst|$ до 0.4 МГц, которое, вероятно, определяется влиянием P_{sw} на положение экваториальной границы высыпаний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано влияние магнитных бурь на параметры F -рассеяния. Использованы ионосферные данные, полученные в результате автоматической обработки 15 мин ионограмм вертикального зондирования DPS-4 (Москва). Для исследования были выбраны две изолированные сильные магнитные бури в 24 цикле солнечной активности: 17 марта и 22–23 июня 2015 г. Индекс SYM/H в минимуме составлял -233 и -207 нТл соответ-

ственно. Обе бури проходили при высоком динамическом давлении солнечного ветра.

Установлено, что во время главной фазы каждой бури Москва находилась в районе высыпаний аврорального овала. Внезапное начало бурь сопровождалось резким ростом критической частоты $foF2$ с последующим ее спадом во время главной фазы бури. В эти же периоды высота слоя $HmF2$ сначала растет, а затем падает. Показана зависимость величины F -рассеяния, dFs , от индексов магнитной активности и динамического давления солнечного ветра на главной фазе бури. Уширение частотного диапазона рассеяния во время главной фазы бурь связано как с увеличением геомагнитной активности, так и с ростом динамического давления солнечного ветра. Таким образом, регистрируемое ионозондами F -рассеяние может являться результатом наложения нескольких про-

цессов, приводящих к появлению неоднородностей электронной концентрации в слое F .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Деминов М.Г. // ИЗМИРАН-75. 2015. С. 295.
2. Деминова Г.Ф. // Геомагн. и аэронаом. 2004. Т. 44. № 2. С. 231; Deminova G.F. // Geomagn. Aeron. 2004. V. 44. No. 2. P. 209.
3. Данилов А.Д. // Гелиогеофиз. иссл. 2013. Т. 5. С. 1; Danilov A.D. // Geliogeophys. Invest. 2013. V. 5. P. 1.
4. Bowman G.G. // J. Atm. Terr. Phys. 1981. V. 43. No. 1. P. 65.
5. Панченко В.А., Телегин В.А., Воробьев В.Г. и др. // Геомагн. и аэронаом. 2018. Т. 58. № 2. С. 241; Panchenko V.A., Telegin V.A., Vorobjev V.G. et al. // Geomagn. Aeron. 2018. V. 58. No. 2. P. 229.
6. Vorobjev V.G., Yagodkina O.I., Katkalov Y. // J. Atm. Sol.-Terr. Phys. 2013. V. 102. P. 157.

Manifestation of F -scattering during large isolated magnetic storms

O. I. Yagodkina^{a, *}, V. A. Panchenko^b, V. G. Vorobjev^a, V. A. Telegin^b

^a Polar Geophysical Institute, Apatity, 184209 Russia

^b Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 108840 Russia

*e-mail: oksana41@mail.ru

The dependence of F -scattering on geomagnetic activity and solar wind parameters is studied using the example of two independent strong magnetic storms on March 17 and June 22–23, 2015. It is shown that during the magnetic storms, Moscow was in the auroral oval precipitation, and the observed F -scattering was the result of the superposition of several processes. The dependence character of F -scattering in the main phase of the June magnetic storm on the AL and Dst indices, as well as on the dynamic pressure of the solar wind, were shown.