

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.038

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ И ДАВЛЕНИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НА СРЕДНЕШИРОТНУЮ ИОНОСФЕРУ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОЙ БУРИ 22-23 ИЮНЯ 2015 ГОДА

О.И. Ягодкина¹, В.А. Панченко², В.Г. Воробьев¹, В.А. Телегин², Г.А. Жбанков³

¹ФБНУ Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия

²ФБНУ Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова, г. Москва, г. Троицк, Россия

³Научно-исследовательский институт физики южного федерального университета,
г. Ростов-на-Дону

Аннотация. Исследована зависимость высоты $HmF2$ и критической частоты $foF2$ слоя F2 среднеширотной ионосферы от магнитной активности и динамического давления солнечного ветра в период изолированной магнитной бури 22-23 июня 2015 г. Используются данные, полученные в результате автоматической обработки 15-минутных ионограмм DPS-4 (Москва), данные спутника DMSP F16 и модель авроральных высыпаний. Показано, что во время главной фазы магнитной бури Москва находилась в районе высыпаний аврорального овала. Регистрируемые в это время параметры слоя F2 отличны от регистрируемых в предбуриевой период и на фазе восстановления бури, когда Москва находится вне зоны авроральных высыпаний. Представлены зависимости параметров слоя F2 от индексов магнитной активности и динамического давления солнечного ветра в периоды различных фаз магнитной бури.

1. Введение

Слой F2 ионосферы - наиболее ионизированная область верхней атмосферы Земли. Основными его параметрами являются высота $HmF2$ и критическая частота $foF2$. В зависимости от геомагнитной и солнечной активности они подвержены значительным изменениям. Динамика основных ионосферных параметров при разных геомагнитных условиях различна. Особый интерес представляет реакция ионосферы на большие геомагнитные бури, поскольку они приводят к планетарной перестройке ионосферы и изменению её параметров. Многочисленные экспериментальные и теоретические исследования ионосферы во время магнитных бурь разной интенсивности были проведены в течение последних десятилетий [1-5]. В этих работах выявлены основные факторы, влияющие на поведение определенных параметров ионосферы, однако полученные данные не дают полной картины реакции ионосферы на геомагнитные возмущения. Эта проблема достаточно сложна. Известно, что морфология бурь в области F зависит как от межпланетных параметров, так и от места и времени наблюдения. Роль геомагнитной активности на динамику ионосферы в период магнитных бурь легче всего выявить при попадании ионозонда 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. Мониторинг местоположения пункта наблюдения относительно зоны авроральных высыпаний возможен при использовании модели АРМ (модель авроральных высыпаний) [6]. Входными параметрами модели служат индексы геомагнитной активности AL и Dst (SYM/H), географические координаты пункта наблюдения и универсальное UT время. Для настоящего исследования была выбрана сильная изолированная магнитная буря в 24-м цикле солнечной активности 22-23 июня 2015 г, в период которой Dst индекс в минимуме составлял -207 нТл.

Целью настоящей работы является исследование динамики параметров ионосферы в период до начала главной фазы магнитной бури, на ее главной фазе и на фазе восстановления и изучению их связи с уровнем геомагнитной активности и параметрами солнечного ветра.

2. Используемые данные

В работе использованы 15-минутные данные, полученные в ИЗМИРАН в результате автоматической обработки ионограмм DPS-4 (Москва, географ. 55.45° N, 37.37° E), и модель авроральных высыпаний АРМ [6], размещенная на сайте <http://apm.pgia.ru>.

Для определения положения экваториальной границы аврорального овала в условиях высокого давления солнечного ветра 22-23 июня 2015 г. использовались данные 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 высоте $HmF2$ и критической частоте $foF2$ слоя во время выбранных интервалов.

3. Связь параметров ионосферы с геомагнитной активностью и динамическим давлением солнечного ветра

Магнитная буря 22-23 июня 2015 г (К_p=9, Dst = -207 нТл) происходила на фоне повышенного давления солнечного ветра (P_{sw}), регистрируемого во время главной фазы бури. На средних широтах наблюдались довольно интенсивные полярные сияния. Геомагнитные условия и характеристики ионосферных параметров в период 22-23 июня представлены на рис. 1. Штриховыми вертикальными линиями выделены 3 интервала: (а) до начала главной фазы магнитной бури, (б) главная фаза бури и (в) фаза восстановления.

В этих интервалах исследуется динамика параметров ионосферы – высоты $HmF2$ и критической частоты $foF2$. На рис. 1 сверху вниз показаны индексы геомагнитной активности AL, SYM/H и динамическое давление солнечного ветра (P_{sw}). На двух нижних панелях показаны основные параметры ионосферы в слое F2 - высота $HmF2$ и критическая частота $foF2$.

AL-индекс достигает величины -1370 нТл в 18:50 UT 22 июня, максимальное значение SYM-H индекса - 207 нТл в 04:25 UT 23 июня. Мы используем SYM-H индекс вместо характерного для магнитных бурь Dst индекса, так как 5-минутное разрешение предпочтительнее для изучения явлений, происходящих на коротких промежутках времени. SYM-H индекс демонстрирует те же вариации что и Dst индекс.

Резкий рост динамического давления солнечного ветра, показанный на третьей панели, регистрируется на земной поверхности как SSC в 18:35 UT. Как видно из рисунка, динамика изменений $HmF2$ такова, что по форме она близка к форме изменения P_{sw}, а высота слоя достигает минимума одновременно с уменьшением давления еще до окончания главной фазы бури.

(а) Период до начала главной фазы (09:00 – 18:35 UT).

В течение периода 09:01-18:16 UT 22 июня, согласно модели APM [6], Москва находилась экваториальнее зоны авроральных высыпаний. Показанный на верхней панели рис. 1 индекс AL указывает на наличие сильной авроральной активности в высоких широтах. Наблюдались две последовательные магнитные бухты в AL с амплитудами -916 нТл в 16:40 UT и -1274 нТл в 18:15 UT. Индекс SYM/H в первом случае составлял -46 нТл, во втором -15 нТл.

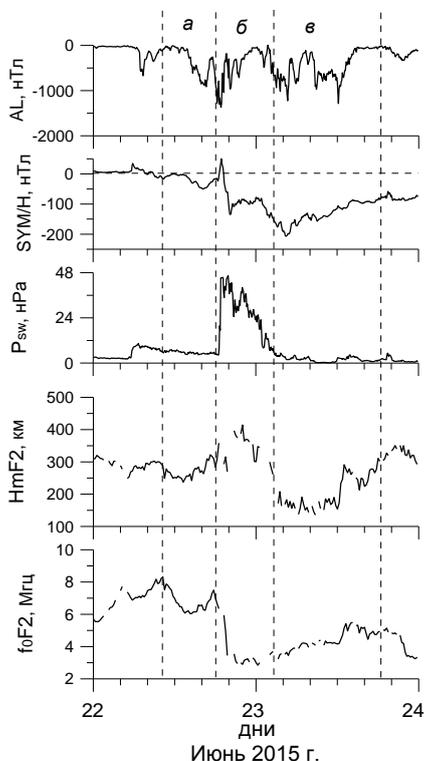


Рисунок 1. Геомагнитные условия и характеристики ионосферных параметров в период 22-23 июня 2015 г.

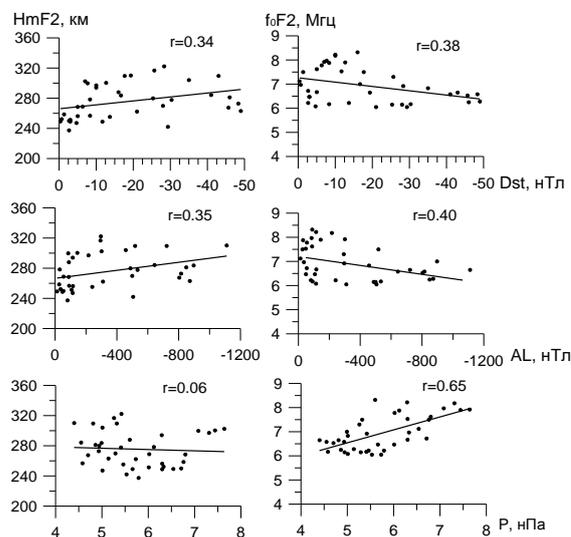


Рисунок 2. Зависимость высоты и критической частоты слоя F2 от величины SYM/H (верхняя панель), AL (средняя панель) индексов геомагнитной активности и динамического давления солнечного ветра (нижняя панель) до начала главной фазы магнитной бури.

На рис. 2 показана зависимость высоты $HmF2$ и критической частоты f_oF2 от активности и динамического давления солнечного ветра. Сплошные линии на рисунке соответствуют уравнениям линейной регрессии. Коэффициент корреляции указан на каждой панели рисунка.

Как видно из рисунка, с увеличением магнитной активности наблюдается некоторая тенденция к росту высоты $HmF2$ и падению критической частоты f_oF2 . Изменение динамического давления солнечного ветра влияет только на поведение критической частоты слоя, но не влияет на его высоту. С увеличением давления происходит рост f_oF2 .

(б) Главная фаза магнитной бури (18:35 UT 22 июня - 04:41 UT 23 июня).

Как видно из рисунка 1, до начала возмущения значение критической частоты ~ 7 МГц, высоты ~ 380 км. Одновременно с регистрацией SSC в 18:35 UT резкий рост динамического давления солнечного ветра сопровождается перестройкой ионосферы: резко, до ~ 3 МГц падает критическая частота слоя F2, но увеличивается до ~ 400 км его высота. По мере развития магнитной активности и уменьшения давления солнечного ветра высота слоя $HmF2$ падает до минимума ~ 200 км, а критическая частота f_oF2 возрастает до ~ 3.5 МГц. Динамическое давление солнечного ветра достигает своего предбурового значения еще до окончания главной фазы бури.

На рис. 3а представлено глобальное распределение авроральных высыпаний по модели АРМ в начале главной фазы магнитной бури в 19:30 UT. В это время динамическое давление солнечного ветра составляло 40.5 нПа. Входные параметры модели: $AL = -365$ нТл, $Dst = -47$ нТл. Обсерватория Москва при таких параметрах геомагнитной активности не попадает в зону авроральных высыпаний, поэтому наблюдение полярных сияний в таких условиях кажется невозможным. Однако известно, что во время бури полярные сияния наблюдались не только в г. 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, более 30 нПа, уровень Psw .

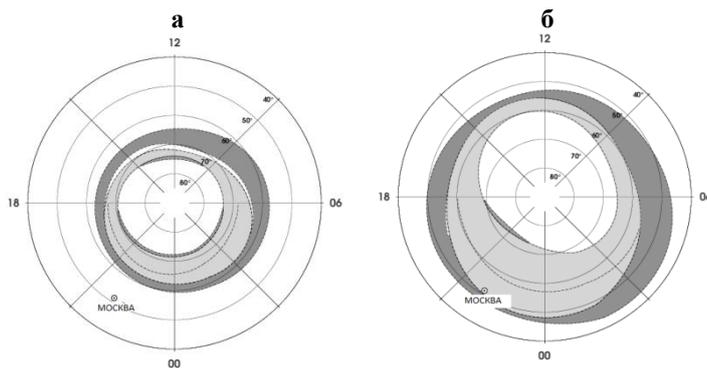


Рисунок 3. Глобальное распределение авроральных высыпаний по модели АРМ в 19:30 UT в период начала главной фазы магнитной бури: (а) при реальных геомагнитных параметрах $AL = -365$ нТл, $SYM/H = 47$ нТл; (б) при высоком уровне Psw .

Москвы относительно зоны авроральных высыпаний с учётом высокого динамического давления. При этих условиях станция наблюдения располагается внутри зоны авроральных высыпаний. Из сравнения положений авроральных овалов на рис. 3а и 3б видно, что в данном событии динамическое давление солнечного ветра сдвигает границу авроральных высыпаний примерно на 10° в более низкие широты.

Таким образом, в процессах, происходящих во время бури, существенную роль, наряду с магнитной активностью, играет высокое динамическое давление солнечного ветра.

Прохождение над Москвой зоны высыпаний во время главной фазы бури полностью подтверждается ионограммами, показанными на рис. 4. Следы от ~ 1.5 МГц до ~ 4.7 МГц (б) на высотах от ~ 110 км до $\sim 160 \div 190$ км являются чёткими признаками авроральных высыпаний.

Для изучения зависимости высоты $HmF2$ и критической частоты f_oF2 от геомагнитной активности и динамического давления солнечного ветра были рассмотрены данные в интервале наблюдений от скачка давления в момент SSC 22 июня до 04:40 UT 23 июня. Это время главной фазы магнитной бури и нахождения Москвы в зоне авроральных высыпаний. Рассматривались периоды ночных регистраций сигнала. Зависимость $HmF2$ и f_oF2 от индексов магнитной активности AL и Dst и динамического давления солнечного ветра Psw иллюстрирует рис. 5. Сплошные линии на рисунке соответствуют уравнениям линейной регрессии, на каждой панели рисунка указан коэффициент корреляции.

В работе [7, рис. 7], показано, что с ростом Psw происходит смещение авроральных высыпаний в более низкие широты. Для оценки величины такого смещения в рассматриваемом событии была использована следующая процедура. Рассмотрен пролёт спутника DMSP F16 в 19:27-19:34 UT, близкий к началу бури. Динамическое давление солнечного ветра в это время менялось от 40.7 нПа до 38.7 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. Рисунок 3б демонстрирует положение

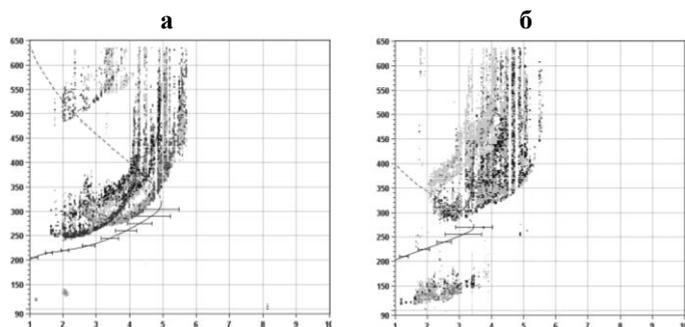


Рисунок 4. Ионограммы во время главной фазы магнитной бури 22 июня: (а) в 19:31 UT: $HmF2=315.5$ км, $f_oF2=4.95$ МГц. (б) в 19:46 UT: $HmF2=269.9$ км, $f_oF2=3.45$ МГц.

следует из правой панели рис. 5, поведение критической частоты на главной фазе бури не зависит ни от магнитной активности, ни от динамического давления. На протяжении всей главной фазы частота практически остается на одном уровне в пределах 3 МГц. Таким образом, на главной фазе только высота слоя F2 оказывается чувствительной к таким факторам как геомагнитная активность и динамическое давление солнечного ветра.

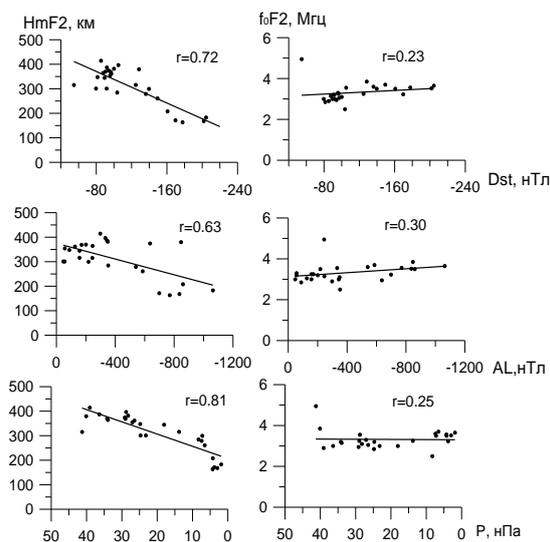


Рисунок 5. Зависимости высоты и критической частоты слоя F2 от геомагнитной активности и динамического давления солнечного ветра на главной фазе магнитной бури.

Как видно из рис. 1, динамика изменений $HmF2$ такова, что она совпадает с динамикой P_{sw} и по времени заканчивается одновременно с уменьшением давления еще до окончания главной фазы бури (03:00 UT). Резкий рост P_{sw} способствует росту высоты $HmF2$ от ~ 360 км до 400 км. Следующее затем постепенное ее уменьшение связано с ростом геомагнитной активности и уменьшением P_{sw} . В 03:00 UT динамическое давление достигает величины ~ 4 нПа, в это время $HmF2 \sim 200$ км, геомагнитная активность $AL=-939$ нТл и $Dst=-167$ нТл. Дальнейшее смещение слоя до ~ 150 км, которое регистрируется в максимуме бури, происходит за счет геомагнитной активности, что мы наблюдаем на рис. 1. Как

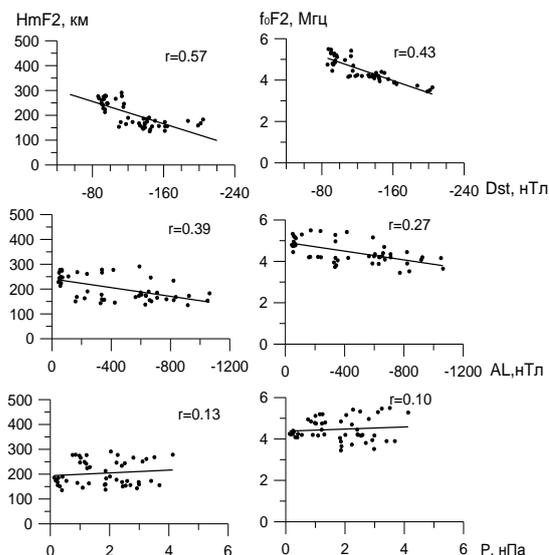


Рисунок 6. Зависимости высоты и критической частоты слоя F2 от геомагнитной активности и динамического давления солнечного ветра на фазе восстановления магнитной бури.

(в) Фаза восстановления магнитной бури (04:41 UT - 23:55 UT 23 июня).

В начале фазы восстановления магнитной бури Москва находилась в утреннем секторе MLT вне зоны авроральных высыпаний. Как и в течение предбуревого периода, индекс AL указывал на наличие существенной авроральной активности, длительное, примерно 4-х часовое увеличение AL-индекса с амплитудой до -1285 нТл в 12:10 UT и -1274 нТл в 18:15 UT. Индекс SYM/H составлял -106 нТл и -15 нТл соответственно. На рис. 6 для временного интервала 04:15 - 17:45 UT показаны зависимости высоты и критической частоты слоя F2 от геомагнитной активности и динамического давления солнечного ветра. Формат рисунка такой же, как рис. 2 и 5. Как видно из рисунка, с уменьшением геомагнитной активности происходит рост как критической частоты слоя, так и увеличение его высоты. Ни тот, ни другой параметр не зависят от динамического давления солнечного ветра.

4. Заключение

По данным среднеширотной ионосферной станции (Москва) исследована зависимость высоты $HmF2$ и критической частоты $foF2$ слоя F2 ионосферы от уровня геомагнитной активности и динамического давления солнечного ветра в период изолированной магнитной бури 22-23 июня 2015 г. Основные результаты исследований можно сформулировать следующим образом.

1. Показано, что во время главной фазы магнитной бури Москва располагается в районе высыпаний аврорального овала. В этих условиях параметры слоя F2 (высота, критическая частота) отличаются от параметров во время нахождения Москвы вне зоны высыпаний овала, т.е. до начала бури и в течение фазы ее восстановления.

2. Получены зависимости высоты $HmF2$ и критической частоты $foF2$ от геомагнитной активности и динамического давления солнечного ветра. Определено, что наиболее чувствительным параметром, реагирующим на изменение внешних условий, является высота слоя $HmF2$. В частности:

(а) В предбуриевой период с увеличением геомагнитной активности уменьшается критическая частота и растет высота слоя F2. От изменения динамического давления зависит только частота $foF2$, с уменьшением давления частота $foF2$ падает.

(б) На главной фазе бури только высота слоя F2 оказывается чувствительной к изменениям геомагнитной активности и динамического давления солнечного ветра. В течение всей главной фазы $foF2$ остается на уровне ~ 3 МГц.

(в) На фазе восстановления бури уменьшение геомагнитной активности сопровождается ростом критической частоты $foF2$ и высоты $HmF2$ слоя. Эти параметры не зависят от динамического давления солнечного ветра.

Литература

1. Деминов М.Г. Ионосфера земли: закономерности и механизмы // Юбилейный сборник ИЗМИРАН-75. Москва, 2015, С. 295-346.
2. Шубин В.Н., Деминов М.Г. Глобальная динамическая модель критической частоты F2-слоя ионосферы // Геомагнетизм и аэрномия, 2019, Т. 59, № 4, С. 461–473.
3. Данилов А.Д. Реакция области F на геомагнитные возмущения (обзор) // Гелиогеофизические исследования, 2013, выпуск 5, С. 1–33.
4. Bowman G.G. The nature of ionospheric spread-F irregularities in mid-latitude regions // J. Atmos. Terr. Phys., 1981, V. 43, N. 1, P. 65–79.
5. Palul K.S., Haralamdous H., Oikonomou C. et. al. Multi-station investigation of spread F over Europe during low to high solar activity // J. Space Weather Space Clim., 2018, V. 8, A27, doi: 10.1051/swsc/2018006
6. Vorobjev V.G., Yagodkina O.I., Katkalov Y. Auroral Precipitation Model and its applications to ionospheric and magnetospheric studies // J. Atm. S.-Terr. Phys., 2013, V. 102, P. 157-171, doi: 10.1016/j.jastp.2013.05.007
7. Воробьев В.Г., Ягодкина О.И., Антонова Е.Е. Ионное давление на границах авроральных высыпаний и его связь с динамическим давлением солнечного ветра // Геомагнетизм и аэрномия, 2019, Т. 59, № 5, С. 582–593, doi: 10.1134/S0016794019050146