

## ЭФФЕКТЫ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ В НИЗКОШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЕ

© 2020 г. Д. В. Благовещенский\*

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,  
г. Санкт-Петербург, Россия

\*donatbl@mail.ru

Поступила в редакцию 22.05.2019 г.

После доработки 02.12.2019 г.

Принята к публикации 16.01.2020 г.

Выявлен широкий диапазон изменений параметров ионосферы в низких широтах за интервалы трех интенсивных магнитных бурь, имевших место в различные сезоны 2015 г. К числу ионосферных параметров по данным ионозондов (ионограммы) относятся: критические частоты  $f_oF2$ ,  $f_oE$ ,  $f_oEs$ , степень диффузности сигналов, наличие боковых отражений, многоскачковость при ВЗИ, эффект блокирования отражений сигналов от слоя  $F2$  слоем  $Es$ , наличие мод типа  $M$ . В анализе были использованы данные ионозондов по низкоширотным станциям Афины, Греция и Никозия, Кипр. Получено следующее. Для весенней бури характерно наличие боковых отражений, повышенная диффузность в  $F2$ -слое, рост числа отражений при ВЗИ в дневные часы по сравнению с ночными. Во время летней бури очень часто возникают спорадические  $Es$ -слои, имеют место отражения типа  $M$  и эффект блокирования. Для зимней бури проведен конкретный анализ, показывающий, что мощный слой  $Es$  простирается вдоль поверхности Земли на расстояние не менее 800 км и имеет время жизни порядка 7 ч.

DOI: 10.31857/S0023420620040020

### ВВЕДЕНИЕ

Нестационарные процессы в межпланетной среде и магнитосфере Земли, как известно, создаются активными областями на Солнце, например, вспышками и корональными дырами. Энергия солнечных возмущений выделяется в виде электромагнитного и корпускулярного излучений, ударных волн и выбросов вещества. Начало взаимодействия ударной волны с магнитосферой определяет момент зарождения ее возмущения, появляется внезапное начало магнитных бурь  $SSC$  в виде скачка  $H$ -компоненты геомагнитного поля за счет поля токов, текущих по поверхности магнитосферы. Для магнитных бурь характерна чрезвычайно высокая возмущенность магнитосферы [4, 8, 9]. Ионосферная буря это глобальное возмущение ПЭС, электронной концентрации в максимуме  $F$ -области и высоты максимума во время геомагнитной бури в результате различных динамических и химических процессов: выпадения энергичных частиц, изменения электрических полей и токовых систем, движущиеся атмосферные возмущения, термосферная циркуляция, изменения состава и т.д. В настоящая время статистическая картина бури уже в определенной степени известна. Длительные уменьшения электронной концентрации в слое  $F2$  и полного элек-

тронного содержания во время главной фазы бури, особенно на средних широтах, можно считать главным признаком бури в  $F2$ -слое ионосферы [3, 5]. Перед этой отрицательной фазой обычно наблюдается положительная, она может появиться во время главной фазы на низких широтах и зимой на средних. Эта классическая картина ионосферной бури основана на статистическом исследовании, сделанном в обзорах [1, 4] и подтверждена многими наблюдениями, например [7]. В работе [6] проведен анализ ионосферных эффектов геомагнитных бурь в европейском регионе, где критическая частота слоя  $F2$  оказывается много выше или ниже медианного уровня в зависимости от сезона и времени начала возмущения, и создана модель прогнозирования поведения ионосферных параметров во время бури. Глобальный отклик на магнитную бурю по данным сети ионозондов исследовался в работе [10]. Были отмечены низкоширотные сияния на большом пространстве в северном и южном полушариях. Длительное уменьшение ионизации на средних широтах есть наиболее выраженный эффект бури. Несмотря на то, что ионосферная буря является объектом исследования в течение десятилетий, до сих пор нет полного объяснения ее эффектов. Состояние ионосферы во время бури зависит от большого числа перемен-

ных, таких как местное время, геомагнитная широта, сезон, солнечная активность, время начала бури, время бури (время, прошедшее с начала бури), интенсивность бури и предбулевой активности (большие бури редко изолированы). Кроме того физика, контролирующая глобальную ионосферу и атмосферу, осложняется тем, что геомагнитные возмущения недостаточно предсказуемы. Анализ данных показывает, что наиболее сильно ионосфера подвержена влиянию магнитных бурь в высоких широтах, и это сказывается на вариациях ее параметров. Значительно меньшее внимание было уделено низким широтам (за исключением эффекта понижения  $NmF2$  и ПЭС).

В настоящей работе основная цель – выяснить, как будут изменяться параметры ионосферы в низких широтах во время достаточно интенсивных магнитных бурь. К числу ионосферных параметров по данным ионозонда относятся следующие:  $foF2$ ,  $foE$ ,  $foEs$ , степень диффузности сигналов, наличие боковых отражений, многоскачковость при ВЗИ, эффект блокирования, наличие мод типа  $M$ . В анализе были использованы данные ВЗ по низкоширотным станциям Афины ( $38.00^\circ N$ ;  $23.50^\circ E$ ) и Никозия ( $35.03^\circ N$ ;  $33.16^\circ E$ ) с сайта <http://ulcar.uml.edu/didbase>. Ионограммы с данного сайта анализировались каждые два часа круглосуточно, т.е. 12 ионограмм в сутки.

### ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТНЫХ БУРЬ

Всего для анализа было выбрано три магнитных бури – одна весной, другая летом и третья зимой 2015 года. Здесь целесообразно выявить сезонные отличия, поскольку для каждого сезона в ионосфере наблюдаются свои особенности. Характеристики бурь представлены в табл. 1. Из таблицы можно видеть, что наиболее интенсивной является буря 17–20.III.2015. Две другие имеют меньшую интенсивность, но также достаточно мощные [8]. Если первая и третья бури имеют приблизительно одинаковые начала главной фазы и одинаковые начала фазы восстановления, то вторая буря отличается по этим параметрам от

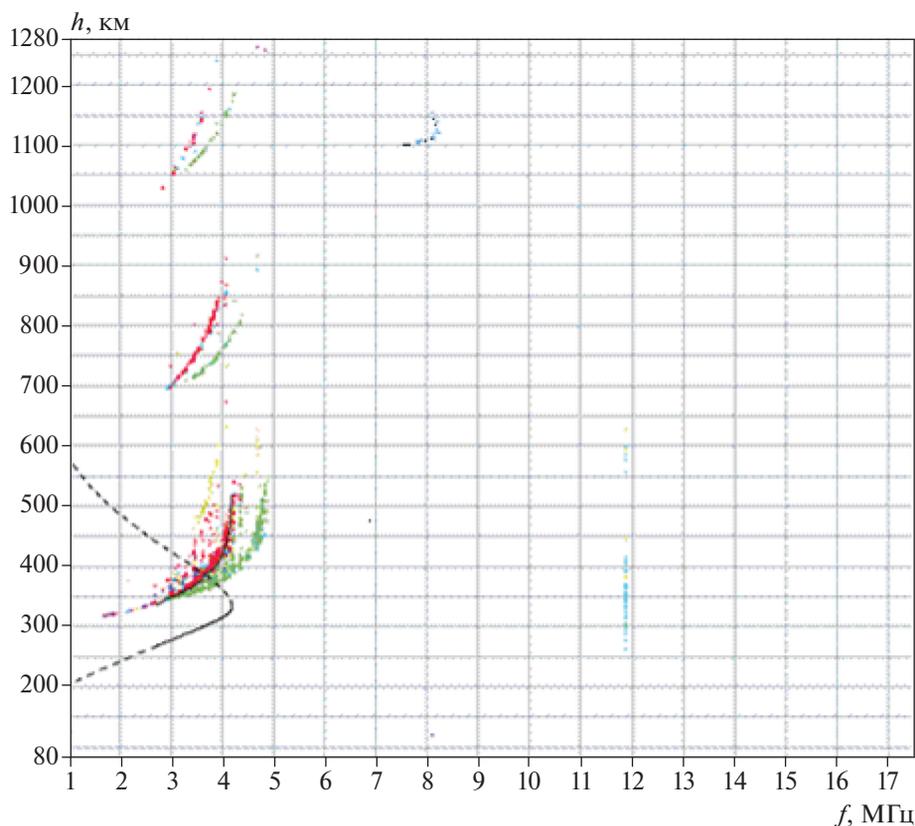
**Таблица 1.** Параметры магнитных бурь, использованных в анализе

Начало главной фазы по $Dst$	$Dst_{min}$ , нТл	Начало восстановления	$T_e$ – конец бури
08.00	–223	22.00	17.00
17.III		17.III	21.III
13.00	–204	05.00	05.00
22.VI		23.VI	25.VI
06.00	–155	22.00	23.00
20.XII		20.XII	23.XII

первой и третьей. Продолжительность всех трех бурь также различна.

### МАГНИТНАЯ БУРЯ 17–20.III.2015

Рассмотрим сначала три почти спокойных дня перед бурей 17–20.III по ст. Афины. Здесь для 14.III значение  $\Sigma Kp = 11-$ , для 15.III значение  $\Sigma Kp = 14-$  и 16.III значение  $\Sigma Kp = 19-$ . Начало возмущения 17.III характеризуется  $\Sigma Kp = 48$ . Итак, представляет интерес интервал 14–16.III. Здесь значения  $foF2$  день ото дня отличаются незначительно. Они имеют четкую суточную зависимость – повышение с 00.00 UT ( $foF2 = 4.5$  МГц в среднем) до 10.00 UT ( $foF2_{max} = 11.5$  МГц в среднем) в 10.00. Далее идет снова спад к концу дня до исходных значений  $foF2 = 4.7$  МГц. Величины  $foE$  фиксируются редко: 2–3 значения до 10.00. Величины  $foEs$  наоборот фиксируются после 10.00 – тоже 2–3 значения. Также отмечается тенденция уменьшения числа скачков при ВЗ от полуночи (3–4) к дневным часам (1) и снова рост их к концу дня (3–4). Это, скорее всего, связано с исчезновением слоя  $D$  ночью и уменьшением поглощения. Что касается таких параметров, как диффузность, наличие боковых отражений, эффекта блокирования – то они отсутствуют. Рассмотрим теперь возмущенные дни 17–20.III. Данные по возмущенным дням целесообразно сравнивать с данными спокойных дней 14–16.III. Первый возмущенный день 17.III демонстрирует отсутствие каких-либо существенных изменений в параметрах ионосферы. Скорее всего, она здесь проявляет определенную инерционность. Так, 17.III значения  $foF2$  были близки к этим же значениям для 16.III. Спорадических  $Es$  не наблюдалось вовсе. Величины  $foE$  были зафиксированы 3 раза в утреннее время. По величине они соответствовали значениям для 16.III. Единственное отличие возмущенного дня от спокойного – появление боковых отражений во второй половине дня (дважды). В остальном отличий не наблюдалось. Возмущенный день 18.III ( $\Sigma Kp = 39+$ ) уже заметно отличается по параметрам от спокойного дня 16.III. Прежде всего, здесь имеет место заметный спад значений  $foF2$  после полудня (10.00) и до конца дня. Данный факт (уменьшение значений  $foF2$  во время магнитной бури) общеизвестен и здесь подтверждается. Что касается значений  $foEs$  и  $foE$ , то они фиксируются так же редко, как и в спокойный день. Теперь об отличиях. Прежде всего, в течение всего возмущенного дня 18.III наблюдаются боковые отражения. Скорее всего, они обусловлены пертурбациями в ионосфере во время бури. Дополнительно, с утра 18.III существенно увеличена диффузность в слое  $F2$ . Пример бокового отражения и диффузности в слое  $F2$  показан на рис. 1 для 18.III в 04.00. На данной ионограмме можно видеть интенсивную диффуз-



**Рис. 1.** Ионограмма вертикального зондирования ионосферы (ВЗИ) по ст. Афины, показывающая диффузность в слое  $F2$  (4 МГц, 450 км) и наличие бокового отражения (8 МГц, 1130 км).

ность в интервалах 3–5 МГц и 350–550 км на первом скачке. Боковое отражение фиксируется на частоте 8 МГц и высоте 1100 км. Другая особенность дня 18.ІІІ по сравнению с невозмущенным днем состоит в том, что наблюдается рост числа скачков отражений при ВЗ до 3 вместо 1 в дневные часы. Возмущенные дни 19 и 20.ІІІ характеризуются небольшим спадом степени возмущенности (от  $\Sigma Kp = 30+$  до  $\Sigma Kp = 28$ ). Главное то, что значения  $foF2$  существенно меньше значений для спокойных условий. Это характерно для интенсивной магнитной бури. Параметры  $foEs$  (2 случая) и  $foE$  (4 случая) имеют значения 3–4 МГц и сосредоточены возле полдня. Диффузность в рассматриваемые дни отсутствует. Число боковых отражений по мере спада степени возмущенности уменьшается. Так, для 19.ІІІ их 8, а для 20.ІІІ их всего 4. И, наконец, число скачков при ВЗ близко к числу при спокойных условиях — возле полдня один скачок. **Итог.** К числу необычных эффектов во время максимума возмущения по сравнению со спокойным интервалом относятся следующие. Это наличие боковых отражений, повышенная диффузность в  $F2$ -слое, рост числа отражений при ВЗ в дневные часы по сравнению с ночными. Подтвержден факт, что во время возмущения в

низких широтах уменьшается значение  $foF2$  по сравнению со спокойным периодом. Особенность бури (как сезона равноденствия) — очень малое число случаев появления спорадических  $Es$ -слоев.

#### МАГНИТНАЯ БУРЯ 22–25.VI.2015

Три спокойных дня перед началом возмущения следующие: 19.VI с  $\Sigma Kp = 6-$ , 20.VI с  $\Sigma Kp = 1+$  и 21.VI с  $\Sigma Kp = 12$ . Параметры ионосферы за данные дни отличаются незначительно. Как и выше, значения  $foF2$  имеют суточный ход — возрастают от 6 МГц в 00.00 UT до 9 МГц в полдень (10.00 UT) и снова до 6 МГц в полночь (в среднем). Значения  $foE$  фиксируются возле полдня (4–7) случаев с  $foE = 2$ –3.5 МГц. Что касается значений  $foEs$ , то здесь ситуация резко отличается от ситуации для бури 17–19.ІІІ. Имеет место почти круглосуточное появление спорадических слоев, точнее более 80%. Причем значения  $foEs$  лежат в пределах 3–9 МГц. Диффузность наблюдается как в слое  $F2$ , так и в слое  $Es$  преимущественно в ночные часы. Число отражений сигналов при ВЗИ днем мало — одно, редко 2, но к ночи увеличивается до трех. Боковые отражения не наблюдаются вовсе. Здесь, как

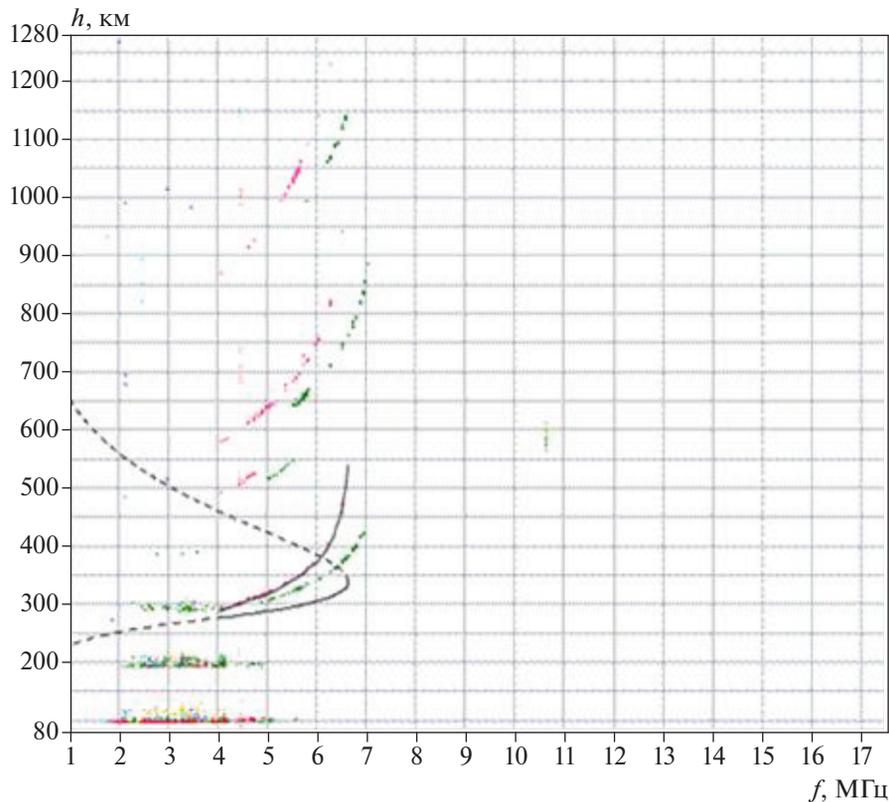


Рис. 2. Ионограмма ВЗИ по ст. Афины, показывающая многоскачковые отражения от  $E_s$ -слоя (2–5 МГц) и  $M$ -отражение (5 МГц, 520 км).

и ранее, данные спокойных дней будут сравниваться с данными возмущенных. Рассмотрим теперь возмущенные дни 22–25.VI. Начало главной фазы бури имело место в 13.00 22.VI ( $\Sigma Kp = 35+$ ). Индекс  $Dst$  достиг своего минимума  $Dst = -204$  нТл 23.VI ( $\Sigma Kp = 42-$ ) в 05.00 (максимум возмущения). Вблизи минимума  $Dst$ -индекса в течение нескольких часов наблюдается явление блокирования  $F_2$ -отражений спорадическими  $E_s$ -отражениями ( $foEs > foF_2$ ). Здесь не рост значений  $foEs$ , а спад значений  $foF_2$  во время сильного возмущения, поэтому и происходит блокирование. Пример блокирования на ионограмме можно видеть на рис. 4. Боковые сигналы за 22 и 23.VI отсутствуют. В этом отличие от предыдущей бури 17–19.III. Характерно, что 24.VI ( $\Sigma Kp = 23+$ ) по данным ВЗ наблюдаются так называемые  $M$ -отражения [2]. Суть  $M$ -отражения в том, что луч от Земли идет вверх, отражается от слоя  $F_2$  и устремляется к нижележащему  $E_s$ -слою, затем от него снова отражается и идет вверх к слою  $F_2$ , потом отражается от него и идет к Земле. Подобное поведение, скорей всего, можно объяснить наличием достаточно мощных спорадических слоев. Пример  $M$ -отражения представлен на ионограмме за 24.VI в 20.00, рис. 2. Здесь  $M$ -отражение имеет место в интервале 4.5–5.5 МГц и на высоте 520 км между первым

и вторым скачком. Обращает на себя внимание факт, что в отличие от предыдущей бури 17–20.III, рассматриваемая буря сопровождается очень частым появлением спорадических слоев  $E_s$  со значениями  $foEs = 2-9$  МГц. Так, эти слои появляются в возмущенные дни 24 и 25.VI круглосуточно. Причем, в силу своей интенсивности, они в ночное и вечернее время характеризуются двумя-четырьмя отражениями от ионосферы. Примеры интенсивного спорадического слоя  $E_s$  с многоскачковостью показаны на рис. 2, где имеют место 4 скачка в области 2–5 МГц, и по аналогии на рис. 4. Из последнего видно, что спорадический слой совершенно блокирует слой  $F_2$ . Что касается слоя  $E$ , то значения  $foE$  фиксируются одинаково часто в спокойные и возмущенные дни.

Итог: особенность данной бури в том, что во время нее очень часто возникают спорадические  $E_s$ -слои, имеют место отражения типа  $M$  и эффект блокирования. Необычный факт – отсутствие боковых отражений во время бури. Естественно, что значения  $foF_2$  в подавляющем большинстве случаев во время данного возмущения ниже, чем в спокойное время. Заметим в конце, что параметры ионосферы, фиксируемые на ионограммах ВЗ, для данной бури отличаются от параметров предыдущей бури.

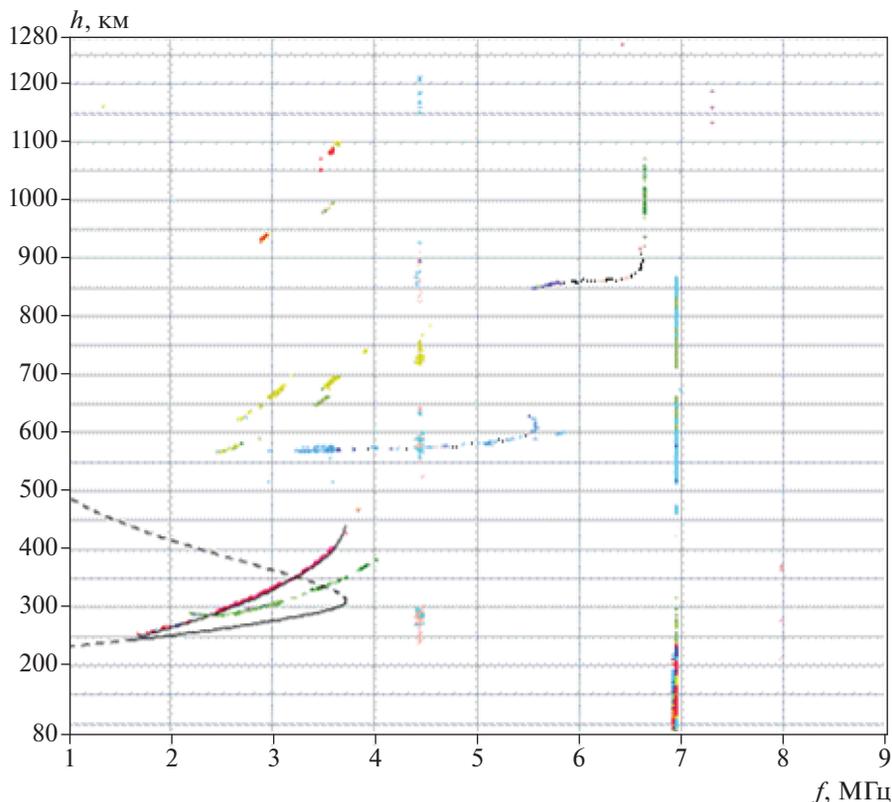
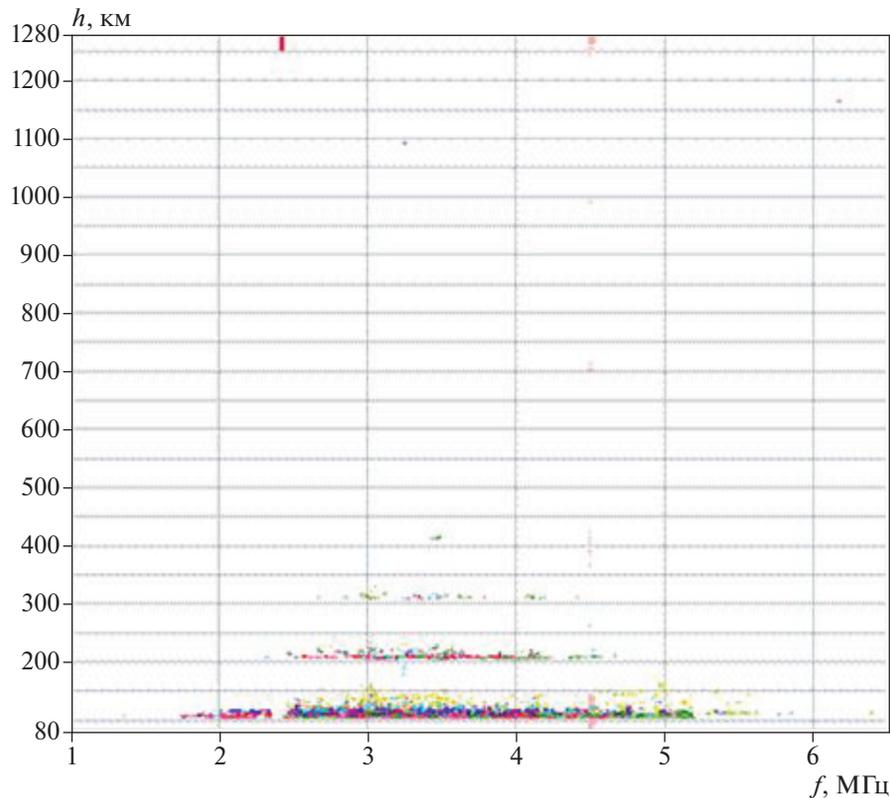


Рис. 3. Ионограмма ВЗИ по ст. Афины, показывающая боковые отражения: первое (6.6 МГц, 870 км) и второе (5.5 МГц, 600 км).

### МАГНИТНАЯ БУРЯ 20–22.XII.2015

Как и выше, начнем с рассмотрения трех спокойных дней перед началом магнитной бури. Это следующие дни: 17.XII с  $\Sigma Kp = 11$ , 18.XII с  $\Sigma Kp = 9$  и 19.XII с  $\Sigma Kp = 15$ —. Все указанные дни имеют примерно одинаковые ионосферные параметры. Так, значения  $foF2$  имеют величину порядка 3.2 МГц (в среднем) в 00.00 UT, затем происходит рост до  $foF2 = 7.3$  МГц в местный полдень 10.00 и снова спад до  $foF2 = 3.2$  МГц в 22.00. Параметр  $foEs$  фиксируется несколько раз возле полдня и лежит в пределах  $foEs = 2.5$ –4.0 МГц. Соответственно значения  $foE$  также наблюдаются возле полдня два-три раза со значениями порядка 2.3–2.9 МГц. Число скачков утром и вечером 2–3, в районе полдня – 1. Диффузность, боковые сигналы,  $M$ -моды и блокирование в течение рассматриваемых трех дней отсутствуют. Первый сильно возмущенный день для данной бури – 20.XII с  $\Sigma Kp = 45$ —. Здесь сразу же наблюдаются отличия от спокойных дней. Растет число случаев появления спорадических слоев до 4 вместо 2–3 и рост значений  $foEs$ . Имеет место диффузность в этих слоях (3 случая). Наблюдаются боковые отражения. Число скачков днем увеличивается до 2–3 вместо одного. Однако параметр  $foE$  сохраняет свои значения по

сравнению со значениями спокойных дней. И не наблюдаются  $M$ -моды и явление блокирования. Следующий возмущенный день для рассматриваемой бури – 21.XII ( $\Sigma Kp = 31$ ) соответствует минимальным значениям  $Dst$ -индекса. В этот день наблюдаются существенные изменения в ионосфере по сравнению со спокойными днями. Прежде всего возросло число случаев появления спорадических слоев  $Es$  с большими значениями  $foEs = 3.0$ –4.5 МГц, хотя возмущение не сказалось на значениях  $foE$ . Число скачков в районе полдня рассматриваемого дня также увеличивается до 3 вместо одного. Наблюдаются случаи диффузности как в  $F$ -слое, так и в слое  $Es$ . Характерным является наличие боковых отражений,  $M$ -мод (см. рис. 2) и эффекта блокирования. Пример боковых отражений показан на рис. 3 для 21.XII в 00.00. На ионограмме можно видеть первый боковой в диапазоне частот 5.5–6.7 МГц и на высотах 850–900 км. Второй боковой имеет координаты 3.2–5.5 МГц и 570–630 км, где перегиб кривой расположен на частоте 5.5 МГц и на высоте 600 км. Представляло интерес сравнить наличие боковых отражений в одно и то же время для ст. Афины и ст. Никозия, где расстояние между ними примерно равно 800 км. Оказалось, что на



**Рис. 4.** Ионограмма ВЗИ по ст. Афины, показывающая многоскачковость при отражении сигнала от слоя  $E_s$  (2–5.5 МГц) и явление блокирования слоя  $F_2$  слоем  $E_s$ .

ст. Никозия имеется один боковой с перегибом на частоте 5.5 МГц и на высоте уже 500 км. Следовательно, можно с большой вероятностью сказать, что ионосферная область, создающая боковой сигнал, является общей для Афин и Никозии, поскольку боковой присутствует одновременно на ионogramмах Афин и Никозии. На рис. 4 показан пример блокирования. Здесь слой  $F_2$  блокируется нижележащим слоем  $E_s$  с большим значением  $foE_s = 4.63$  МГц. Данный слой настолько мощный и диффузный, что образует многоскачковость в виде четырех отражений на высотах 102.5 км (первое), 205 км (второе), 307.5 (третье) и 410 км (четвертое). Поскольку рассматриваемый слой достаточно интенсивен, то и здесь можно сравнить ионogramмы Афин и Никозии. Для Никозии ионограмма показана на рис. 5. Видно, что имеется диффузный спорадический  $E_s$ -слой с частотой  $foE_s = 2.63$  МГц, который расположен на высоте 101.3 км. Первый скачок от слоя  $E_s$  происходит на высоте 101.3 км, второй – на высоте 202.6 км. Исходя из представленных данных, можно полагать, что слой  $E_s$  в данном случае простирается вдоль поверхности Земли на расстояние не менее 800 км. К тому же время жизни этого слоя по данным ионозонда Афин лежит в пределах 21.00–03.45 =

= 06 ч 45 мин. Здесь максимальное значение  $foE_s = 6.4$  МГц наблюдается в 21.30 для 21.XII. Далее, из рис. 5 видно, что вместо четких отражений от слоя  $F_2$  имеет место сильная диффузность, поэтому на ионogramме значение  $foF_2$  не определено. В конце рассмотрим возмущенный день 22.XII с  $\Sigma Kp = 20+$ . Этот день менее возмущен, чем первые два. Однако и здесь в наличии все признаки возмущенной ионосферы. Прежде всего, случаев появления спорадических  $E_s$  за 22.XII заметно больше, чем за 23.XII. Рассматриваемый день характеризуется наличием диффузности в слоях  $F_2$  и  $E_s$ . Имеют место боковые отражения. Число скачков в полдень увеличено, как и в предыдущий день, до трех. Наблюдается явление блокирования. Однако в этот день  $M$ -моды отсутствуют.

Итог: для зимней бури 20–22.XII принципиальных отличий в значениях параметров ионосферы во время бури по сравнению с двумя предыдущими бурями не выявлено. Можно отметить разницу в значениях  $foF_2$  для весны, лета и зимы. Так, среднее значение  $foF_2$  по ст. Афины для полуденных часов спокойных дней весны  $foF_2 = 11.5$  МГц, для лета  $foF_2 = 9$  МГц и для зимы  $foF_2 = 7.2$  МГц.

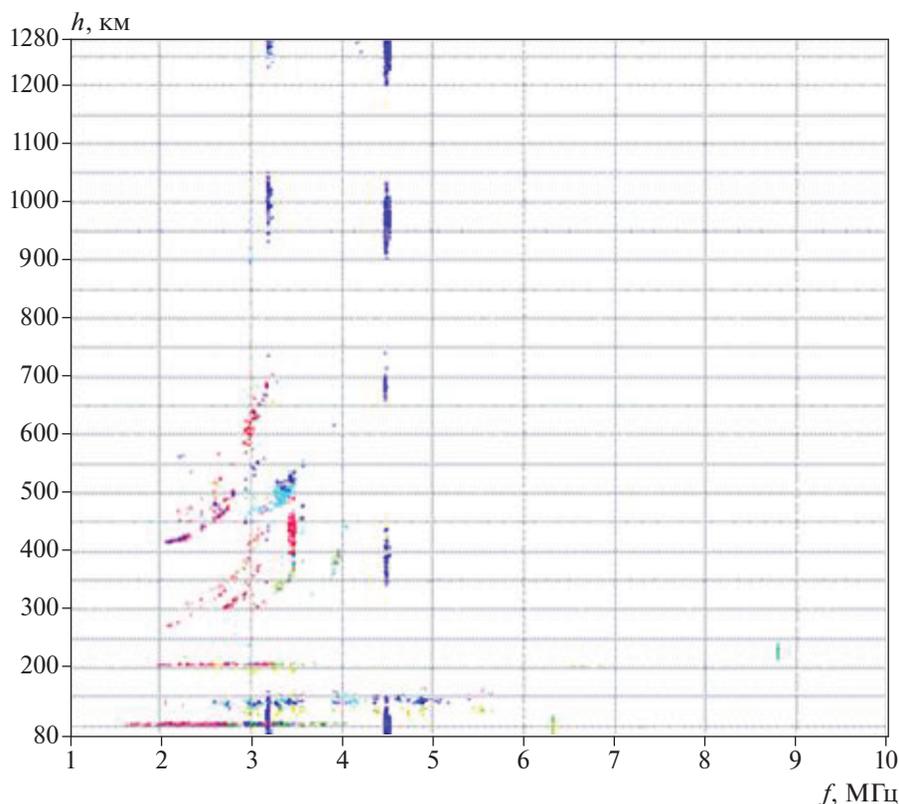


Рис. 5. Ионограмма ВЗИ по ст. Никозия, показывающая интенсивный слой  $E_s$  (2–4 МГц) и диффузность в слое  $F_2$  (2–3.5 МГц, 300–700 км).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Произведенный в работе анализ выявил широкий диапазон изменений параметров ионосферы в низких широтах за интервалы трех интенсивных магнитных бурь (в основном главной фазы), имевших место в различные сезоны 2015 г. Общим для всех бурь является изменения следующих ионосферных параметров по данным ионозондов: критических частот  $foF_2$  (уменьшение),  $foE$ ,  $foEs$  (рост), увеличение степени диффузности сигналов, возникновение боковых отражений, рост многоскачковости при ВЗИ, возникновение эффекта блокирования отражений сигналов от слоя  $F_2$  слоем  $E_s$ , появление мод типа  $M$ . Все перечисленные изменения отсутствуют при спокойных условиях. В анализе были использованы данные ионозондов по низкоширотной станции Афины, Греция (38.00° N; 23.50° E) и частично по Никозии, Кипр (35.03° N; 33.16° E).

Весенняя магнитная буря 17–20.III является наиболее интенсивной с  $Dst_{\min} = -223$  нТл. Во время максимума возмущения по сравнению со спокойным интервалом обнаружено следующее. Наличие боковых отражений, повышенная диффузность в  $F_2$ -слое, рост числа отражений при ВЗИ в дневные часы по сравнению с ночными.

Дан пример ионограммы с указанными особенностями. Подтвержден факт, что во время возмущения в низких широтах уменьшается значение  $foF_2$  по сравнению со спокойным периодом.

Летняя магнитная буря 22–25.VI относится к классу интенсивных бурь с  $Dst_{\min} = -204$  нТл. Особенность поведения параметров ионосферы во время данной бури в том, что очень часто возникают спорадические  $E_s$ -слои, имеют место отражения типа  $M$  и эффект блокирования. Дан пример ионограммы с отражениями типа  $M$  и многоскачковостью посредством слоя  $E_s$ . Необычный факт – отсутствие боковых отражений во время бури. Как и для предыдущей бури значения  $foF_2$  в подавляющем большинстве случаев во время данного возмущения ниже, чем в спокойное время.

Для зимней бури 20–22.XII с  $Dst_{\min} = -155$  нТл принципиальных отличий в аномальных параметрах ионосферы во время бури по сравнению с двумя предыдущими бурями не выявлено. Для данной бури произведены количественные оценки в поведении боковых сигналов и спорадических слоев  $E_s$  по данным ионозондов Афин и Никозии ( $D = 800$  км). Дан пример, когда ионосферная область, создающая боковой сигнал, является общей для Афин и Никозии, поскольку боковой

присутствует одновременно на ионограммах Афин и Никозии. Другой пример показывает, что мощный слой  $E_s$  простирается вдоль поверхности Земли на расстояние не менее 800 км. И время жизни этого слоя составляет порядка 07 ч.

С точки зрения сезонных отличий имеется особенность у бури 17–20.III (как сезона равноденствия) — очень малое число случаев появления спорадических  $E_s$ -слоев. Параметры ионосферы, фиксируемые на ионограммах ВЗ, для летней бури 22–25.VI отличаются от параметров предыдущей бури 17–20.III. Например, боковые сигналы летом отсутствуют. Можно отметить разницу в значениях  $foF2$  для весны, лета и зимы. Так, среднее значение  $foF2$  по ст. Афины для полуденных часов спокойных дней весны  $foF2 = 11.5$  МГц, для лета  $foF2 = 9.0$  МГц и для зимы  $foF2 = 7.2$  МГц.

Автор выражает благодарность службе Lowell GYRO Data Center с сайтом <http://ulcar.uml.edu/database> за возможность доступа к ионосферным данным мировой сети ионозондов. Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 18-05-00343.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилов А.Д. Ионосферные бури в  $F2$ -области. Морфология и физика // Геомагнетизм и аэрономия. 1985. Т. 23. № 5. С. 705–719.
2. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. Москва. Изд-во Мир, 1973.
3. Ban P.-P., Sun S.-J., Chen C., Zhao Z.-W. Forecasting of low-latitude storm-time ionospheric  $foF2$  using support vector machine // Radio Sci. 2011. V. 46. RS6008, <https://doi.org/10.1029/2010RS004633>
4. Buonsanto M.J. Ionospheric storms — a review // Space Science Reviews. 1999. V. 88. P. 563–601.
5. Cander L.R. Ionospheric Space Weather, Chapter 5. Ionospheric Storm Morphology, Springer Geophysics, [https://doi.org/10.1007/978-3-319-99331-7\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-99331-7_5). 2019.
6. Cander L.R., Mihajlovic S.J. Forecasting ionospheric structure during the great geomagnetic storms // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. № A1. P. 391–398.
7. Goncharenko L.P., Foster J., Coster A., Huang C., Aponte N., Paxton L. Observations of a positive storm phase on September 10, 2005 // J. Atmos. Solar Terr. Phys. 2007. V. 69. P. 1253–1272.
8. Gonzalez W.D., Joselyn J.A., Kamide D., Kroehl H.W., Rostoker G., Tsurutani B.T., Vasyliunas P. What is a geomagnetic storm? // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. P. 5771–5792.
9. Khazanov G.V. Kinetic theory of the inner magnetospheric plasma. Springer. 2011.
10. Yeh K.C., Ma S.Y., Lin K.H., Conkright A. Global ionospheric effects of the October 1989 geomagnetic storm // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. № A4. P. 6201–6218.