

УДК 550.388.2

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПАРАМЕТРОВ МАКСИМУМА F_2 -СЛОЯ СПОКОЙНОЙ СРЕДНЕШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ ПРИ НИЗКОЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ: 2. СИЛЬНЫЕ ФЛУКТУАЦИИ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ

© 2011 г. М. Г. Деминов¹, Г. Ф. Деминова¹, Г. А. Жеребцов², О. М. Пирог², Н. М. Полех²¹ Учреждение РАН Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова, Троицк (Московская обл.)² Учреждение РАН Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск

e-mail: deminov@izmiran.ru

Поступила в редакцию 10.12.2009 г.

После доработки 04.02.2010 г.

Представлен качественный анализ свойств и конкретных примеров сильных ($10\% < |\delta foF_2| < 30\%$) и очень сильных ($|\delta foF_2| > 30\%$) флуктуаций критической частоты F_2 -слоя (foF_2) спокойной ионосферы средних широт при низкой солнечной активности по данным ст. Иркутск за 2007–2008 гг. Получено, что сильные флуктуации foF_2 ото дня ко дню связаны в основном с изменениями параметров термосферы, которые имеют характер планетарных волн и приливов. Очень сильные флуктуации foF_2 ото дня ко дню, по-видимому, вызваны наложением эффектов в ионосфере из-за изменений параметров термосферы на эффекты, связанные с комплексом процессов взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой, в том числе обусловленных поворотом вертикального компонента магнитного поля солнечного ветра с севера на юг. Наиболее ярким примером очень сильных изменений foF_2 спокойной ионосферы является увеличение foF_2 в ночные часы зимой до значений, характерных для дневного максимума foF_2 .

1. ВВЕДЕНИЕ

Ионосферу при низкой геомагнитной активности называют спокойной ионосферой [Forbes et al., 2000; Rishbeth and Mendillo, 2001; Mikhailov et al., 2004; Деминов и др., 2009]. В первой части данной работы были рассмотрены статистические свойства изменчивости параметров максимума F_2 -слоя (критической частоты foF_2 и высоты максимума hmF_2) спокойной ионосферы средних широт при низкой солнечной активности на примере данных ст. Иркутск за 2007–2008 гг. [Деминов и др., 2011]. Интервал 2007–2008 гг. был продолжительным периодом особенно низкой солнечной и геомагнитной активности, что позволяло проводить анализ свойств спокойной ионосферы при достаточно жестких ограничениях на пороговый уровень геомагнитной активности, начиная с которого ионосферу нельзя считать спокойной. Было получено, в частности, что статистические свойства слабых ($|\delta foF_2| < 10\%$), сильных ($30\% > |\delta foF_2| > 10\%$) и очень сильных ($|\delta foF_2| > 30\%$) флуктуации foF_2 отчетливо различаются. Слабые флуктуации foF_2 в значительной степени определяются высокочастотной частью изменчивости ионосферы (на временах меньше 1–3 ч). Сильные и очень сильные флуктуации foF_2 в основном определяются изменчивостью ионосферы ото дня ко дню, из которой исключена высокочастотная часть.

Считают, что изменчивость спокойной ионосферы ото дня ко дню связана в основном с внутренни-

ми крупномасштабными процессами в атмосфере, включая приливы и планетарные волны [Forbes et al., 2000; Rishbeth and Mendillo, 2001]. Наблюдаемые изменения foF_2 с периодами, характерными для планетарных волн, могут служить дополнительным аргументом в пользу существования такой связи [Apostolov et al., 1995; Lastovicka et al., 2003; Xiong et al., 2006]. Тем не менее, внутренние процессы в атмосфере являются, по-видимому, не единственной причиной сильных и, тем более, очень сильных изменений спокойной ионосферы ото дня ко дню.

Целью данной части работы является анализ причин сильных и очень сильных изменений foF_2 спокойной ионосферы ото дня ко дню на конкретных примерах. Эти примеры взяты из массива данных спокойной ионосферы, полученного в первой части работы по данным ст. Иркутск за 2007–2008 гг. [Деминов и др., 2011].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

При анализе причин сильных изменений foF_2 ото дня ко дню важно знание соответствующих изменений hmF_2 . Кроме того, целесообразно исключить из рассмотрения высокочастотную часть изменчивости ионосферы, т.е. в качестве экспериментальных данных использовать средние за 2.25 ч значения foF_2 и hmF_2 спокойной ионосферы, центрированные на данное мировое время. Массив та-

ких экспериментальных данных ст. Иркутск (52.5°N , 104°E) за 2007–2008 гг. с шагом по времени 15 мин был построен в первой части работы [Демин и др., 2011]. Он соответствует спокойной ионосфере при достаточно жестких ограничениях на уровень геомагнитной активности:

$$ap(\tau) < 7 \text{ нТл}, \quad AE_{\max} < 300 \text{ нТл}, \quad (1)$$

где $ap(\tau)$ – средневзвешенное значение ap -индекса геомагнитной активности [Wrenn, 1987; Wrenn and Rodger, 1989]:

$$ap(\tau) = (1 - \tau)(ap_0 + ap_{-1}\tau + ap_{-2}\tau^2 + \dots)$$

с характерным временем $T = 11$ ч или $\tau = \exp(-3/T) \approx 0.76$, ap_0, ap_{-1}, \dots – значения ap за данный, предыдущий трехчасовой интервал и т.д., AE – среднее за 15 мин значение AE -индекса, AE_{\max} – максимальное значение AE за предыдущие 6 ч относительно данного мирового времени. Данные индексов ap и AE были получены по Интернет (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>). Первое из условий (1) предназначено для исключения из рассмотрения периодов бурь в ионосфере, второе – интенсивных суббурь в ионосфере. В качестве фона ниже использованы спокойные медианы $(foF2)_{\text{мед}}$ и $(hmF2)_{\text{мед}}$ за 15 дней для данного мирового времени, центрированные на данную дату. Причина такого выбора фона обсуждена в первой части работы [Демин и др., 2011].

Основной причиной изменчивости $foF2$ спокойной ионосферы ото дня ко дню считают внутренние крупномасштабные процессы в атмосфере [Forbes et al, 2000; Rishbeth and Mendillo, 2001]. Возможно, что крупномасштабные внутренние гравитационные волны (ВГВ) в атмосфере, которые генерируются в периоды даже слабых суббурь ($AE_{\max} < 300$ нТл), вносят дополнительный вклад в изменчивость $foF2$ на средних широтах, поскольку такие суббури наблюдаются практически ежедневно. Ионосферные эффекты таких ВГВ для более интенсивных суббурь отмечались неоднократно [Носке and Schlegel, 1996; Deminova et al., 1998; Шашункина и Гончарова, 2001]. Поворот вертикального компонента межпланетного магнитного поля (B_z ММП) в солнечно-магнитосферной системе координат с севера ($B_z > 0$) на юг ($B_z < 0$) считают важной причиной генерации суббурь, связанной с процессами взаимодействия магнитосферы с солнечным ветром, поскольку межпланетное магнитное поле встроено в этот ветер [Akasofu, 1981; 2004]. С этим же поворотом B_z может быть связано усиление электрического поля магнитосферной конвекции в плазмосфере (см., например, [Ляцкий, 1978]), которое достаточно отчетливо фиксируется, например, по изменению высоты максимума $F2$ -слоя на средних [Ляцкая и Ляцкий, 1975] и низких [Deminova, 1995] широтах при низкой геомагнитной активности. Отметим, что связь электрического поля в плазмосфере с B_z ММП характер-

на для начальной стадии развития геомагнитной бури, что следует из результатов моделирования и данных измерений скорости дрейфа плазмы [Fejer and Scherliess, 1997; Fejer et al., 2007]. Поэтому при анализе возможных причин изменений $foF2$ спокойной ионосферы дополнительно использованы часовые значения B_z ММП вблизи Земли, полученные по Интернет (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>). Еще одна причина изменений $foF2$ ото дня ко дню может быть связана с изменениями уровня солнечной активности. Для оценки этого уровня использованы индексы $F10.7$ и F_m – величина потока радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см в данный день и среднее за 81 день значение этого потока, который измеряется в 10^{-22} Вт/м² Гц. Они получены по Интернет (<http://www.ngdc.noaa.gov/stp>).

На основе анализа экспериментальных данных $foF2$ и $hmF2$ и индексов солнечной и геомагнитной активности были отобраны примеры сильных и очень сильных изменений $foF2$ ото дня ко дню, которые отличаются по характеру и причинам этих изменений. Они приведены ниже. Два первых примера соответствуют случаям, когда возможные причины сильных изменений $foF2$ обусловлены процессами в термосфере, которые не связаны непосредственно с эффектами магнитосферных суббурь. Последний пример соответствует экстремально сильным изменениям $foF2$ спокойной ионосферы, которые, по-видимому, связаны с наложением эффектов магнитосферных суббурь на процессы в термосфере.

2.1. Противофазное изменение $hmF2$ и $foF2$

На рис. 1 приведены параметры максимума $F2$ -слоя по данным ст. Иркутск 7–9 ноября 2007 г. по мировому времени совместно с характеристиками солнечного ветра (B_z ММП) и геомагнитной активности (AE -индекс) для этого периода. В Иркутске мировое время UT = 0 ч соответствует местному времени LT = 6.93 ч, и первая половина суток по UT соответствует в основном дневным часам, а вторая половина – ночным часам местного времени. На рис. 1 видно, что в данный интервал времени изменения параметров максимума $F2$ -слоя ото дня ко дню максимальны в ночные часы и эти изменения носят характер квазидневных осцилляций: 7 и 9 ноября уменьшения $hmF2$ сопровождаются увеличениями $foF2$. Основная причина этих осцилляций, по-видимому, не связана с изменениями солнечной или геомагнитной активности, поскольку интервал 7–9.11.2007 г. был одним из самых спокойных периодов этого года: $ap(\tau)_{\max} \leq 4$ нТл, даже слабые суббури наблюдались редко, наиболее интенсивная из них с $AE_{\max} = 182$ нТл произошла 9 ноября 2007 г. (см. рис. 1). В интервале 7–9.11.2007 г. и в предыдущий день уровень солнечной активности почти не изменялся: $68.1 \leq F10.7 \leq 69.7$ и $71.4 \leq F_m \leq 71.7$. Оценки показывают, что причиной изменчивости

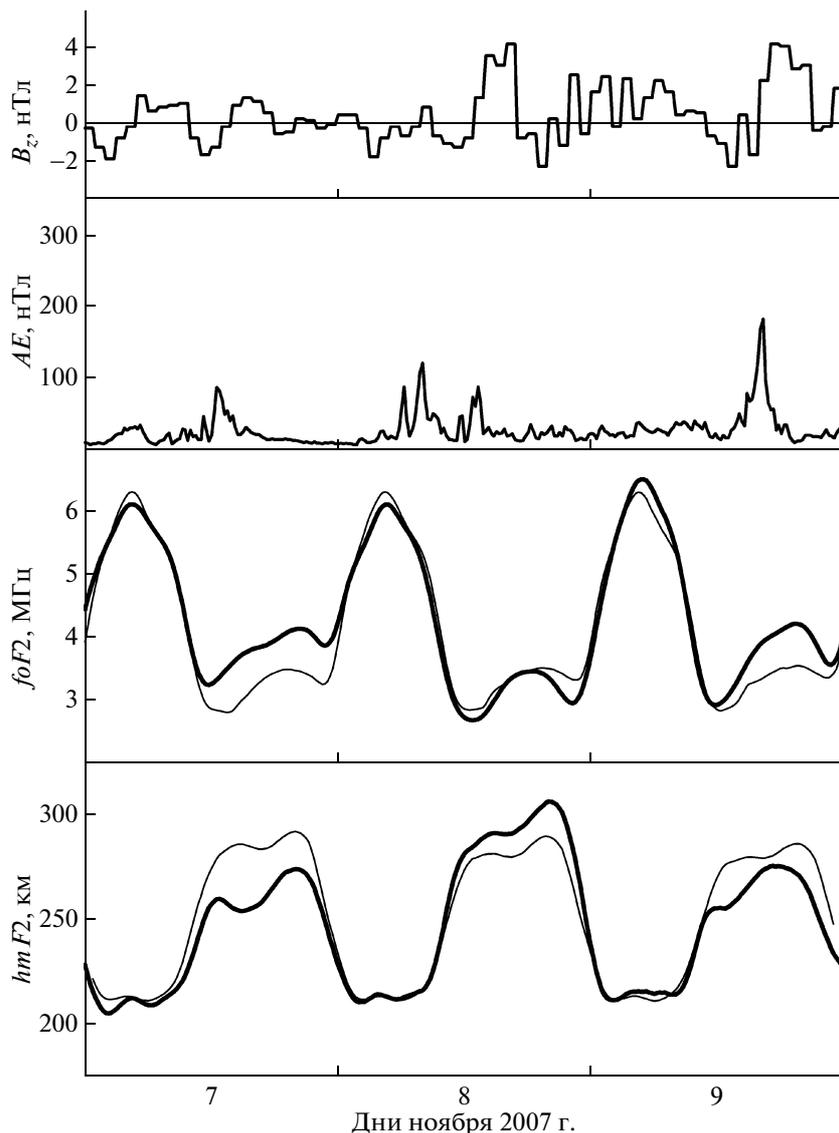


Рис. 1. Вертикальный компонент межпланетного магнитного поля B_z , AE -индекс геомагнитной активности, параметры максимума $F2$ -слоя $foF2$ и $hmF2$ (толстые линии) и их медианы для спокойных условий (тонкие линии) по данным ст. Иркутск 7–9.11.2007 г. по мировому времени.

параметров максимума $F2$ -слоя в данный интервал времени могло быть изменение коэффициента рекомбинации β в ночные часы. Это следует из приближенной зависимости концентрации максимума $F2$ -слоя N_m в ночные часы от аэрономических параметров на высоте этого максимума (индекс m) (см., например, [Кринберг и Тащилин, 1984; Деминов, 2008]):

$$N_m(t) = N_{m0} \exp(-\int \beta_m dt) + F(H_p/D_A)_m,$$

$$N_{m0} = q_m/\beta_m \sim B^2, \quad \beta_m \sim 1/B, \quad (H_p/D_A)_m \sim B, \quad (2)$$

$$W^* \sim 1/A, \quad B = A \exp(0.45 W/W^*),$$

$$A = ([O]/\beta^P)^{0.65},$$

где $N_m = 1.24 \times 10^{10} (foF2)^2$, N_m и $foF2$ измеряются в m^{-3} и МГц, q и β – скорость ионизации и коэффициент рекомбинации ионов O^+ , H_p и D_A – шкала высот плазмы и коэффициент амбиполярной диффузии, F – поток плазмы из протоносферы в область F на верхней границе этой области, N_{m0} – значение N_m вблизи, но перед заходом Солнца на высоте максимума $F2$ -слоя, интегрирование ведется от этого момента времени до данного времени t . Коэффициенты уравнения (2) зависят от параметра B , который определен на фиксированной высоте вблизи максимума $F2$ -слоя и практически не зависит от высоты, W – вертикальный компонент скорости дрейфа плазмы из-за термосферного ветра, $[O]$ – концентрация атомного кислорода, $P = H_\beta/H \approx 0.53$, H_β и H – шкалы высот β и $[O]$.

В данном случае на коротких временах после захода Солнца последний член в правой части уравнения (2) становится преобладающим, и поток плазмы F из протоносферы является основной причиной относительно высоких значений $foF2$ в течение почти всех ночных часов. При фиксированном F уменьшение $hmF2$ за счет уменьшения β приводит к увеличению N_m (и $foF2$) из-за увеличения параметра A , что качественно согласуется с данными наблюдений (см. рис. 1). Данная интерпретация соответствует случаю, когда поток плазмы F из протоносферы не изменяется при изменении параметров термосферы. Для другого предельного случая, когда в ночные часы зимой изменения параметров термосферы не приводят к изменению концентрации электронов на верхней границе области F , уменьшения температуры термосферы, $[O]$, β и (или) W приведут к опусканию $F2$ -слоя и увеличению $foF2$. Выбор между этими двумя вариантами причин противофазного изменения $foF2$ и $hmF2$ возможен только на основе численного моделирования процессов вдоль всей силовой трубки геомагнитного поля, что выходит за рамки данной работы. Отметим, что в ночные часы зимой противофазные изменения $foF2$ и $hmF2$ встречаются достаточно часто, но по амплитуде они обычно меньше приведенных на рис. 1.

2.2. Сильное увеличение $foF2$ при неизменном $hmF2$

На рис. 2 приведены параметры максимума $F2$ -слоя по данным ст. Иркутск 4–6 августа 2008 г. по мировому времени совместно с характеристиками солнечного ветра (B_z ММП) и геомагнитной активности (AE -индекс) для этого периода. Видно, что в этот период существенные изменения $foF2$ ото дня ко дню происходили на фоне относительно слабых изменений $hmF2$. Геомагнитная активность в этот период была типичной для спокойной ионосферы: $ap(\tau)_{\max} \leq 4$ нТл. Слабые суббури наблюдались достаточно часто, и их частота увеличилась 6 августа 2008 г. В интервале 4–6.08.2008 г. и в предыдущий день изменения уровня солнечной активности были незначительны ($65.5 \leq F10.7 \leq 67$ и $F_m \approx 66$) и эти изменения не были причиной наблюдаемой изменчивости $foF2$ ото дня ко дню. Основной причиной этой изменчивости, по-видимому, были изменения состава термосферы, которые носили характер прилива. По оценкам, эти изменения были таковы, что произведение $[O]\beta$ на фиксированной высоте вблизи максимума $F2$ -слоя почти не изменялось ото дня ко дню (это обеспечивало слабые изменения $hmF2$), но параметр A в уравнении (2) был увеличен ночью 4 августа и вечером и ночью 5 августа по сравнению с фоновыми условиями из-за увеличения $[O]$ и уменьшения β . Первый член в правой части уравнения (2) является основным для летних условий при любом уровне солнечной активности [Кринберг и Тащилин, 1984]. Увеличение параметра A привело

к увеличению N_{m0} перед заходом Солнца 5 августа 2008 г. (см. уравнение (2)). Продолжающееся после захода Солнца увеличение параметра A привело к еще более сильному увеличению $foF2$ относительно фона из-за уменьшения β_m интегрального характера зависимости N_m от β_m в ночные часы (см. уравнение (2)). Поэтому наиболее сильные увеличения $foF2$ относительно фона наблюдались 5 августа в ночные часы перед восходом Солнца (см. рис. 2). Дополнительной причиной изменений $foF2$ 5 и 6 августа могли быть крупномасштабные ВГВ, генерируемые в авроральной области в периоды суббурь. Наиболее ярким ионосферным эффектом прохождения ВГВ над среднеширотным пунктом является увеличение $hmF2$ [Носке and Schlegel, 1996; Deminova et al., 1998; Шашуныкина и Гончарова, 2001]. На рис. 2 видно, что такое увеличение $hmF2$ отчетливо наблюдалось только ночью 6 августа. Для ионосферных эффектов крупномасштабных ВГВ в ночные часы характерно увеличение $hmF2$ и уменьшение $foF2$. Наложение таких ионосферных эффектов ВГВ на эффекты, связанные с изменением состава термосферы, могло привести к наблюдаемому увеличению $hmF2$ в ночные часы 6 августа при слабом отклонении $foF2$ от спокойной медианы (см. рис. 2).

Приведенные на рис. 1 и 2 примеры были подобраны так, чтобы отразить преобладающую роль процессов в термосфере в сильной изменчивости $foF2$ ото дня ко дню. Однако приведенный на рис. 2 пример показывает, что даже в этом случае дополнительные причины, связанные с ионосферными эффектами слабых магнитосферных суббурь, становятся заметными.

2.3. Экстремальное увеличение критической частоты $F2$ -слоя зимой ночью

На рис. 3 приведены параметры максимума $F2$ -слоя по данным ст. Иркутск 18–21 декабря 2008 г. по мировому времени совместно с характеристиками солнечного ветра (B_z ММП) и геомагнитной активности (AE -индекс). Видно, что 19 декабря значения $foF2$ в ночные часы достигают значений, характерных для дневного максимума $foF2$. Такая экстремальная ситуация в ночной зимней ионосфере средних широт наблюдается очень редко. Геомагнитная активность в период 18–21.12.2008 г. была типичной для спокойной ионосферы: $ap(\tau) \leq 4$ нТл, слабые суббури наблюдались достаточно часто, наиболее интенсивная из них с $AE_{\max} = 286$ нТл произошла 19.12.2008 г., и эти суббури были связаны в основном с поворотами B_z ММП с севера на юг. Аналогичная связь видна и для приведенных на рис. 1 и 2 примеров, но 19–20.12.2008 г. значения $B_z < 0$ по абсолютной величине были самыми высокими из приведенных на рис. 1–3 данных. В интервале 18–21.12.2008 г. и в предыдущий день изменения уровня

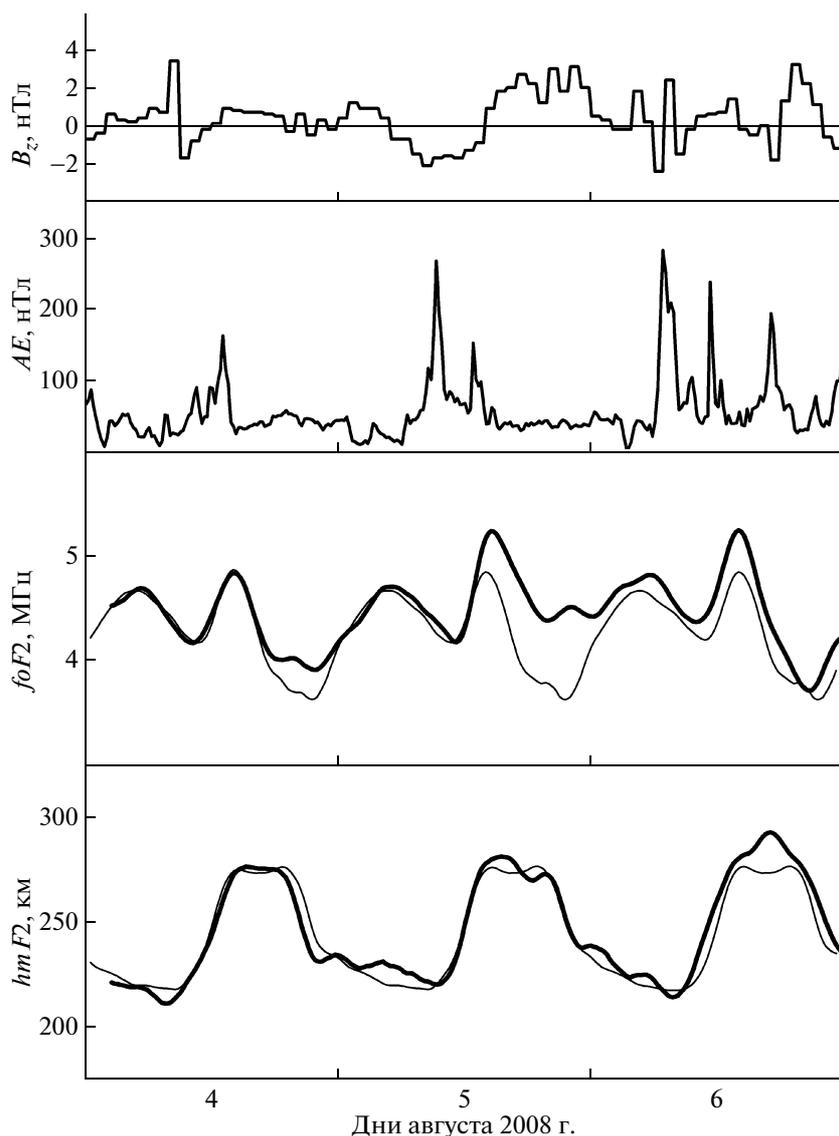


Рис. 2. Вертикальный компонент межпланетного магнитного поля B_z , AE -индекс геомагнитной активности, параметры максимума $F2$ -слоя $foF2$ и $hmF2$ (толстые линии) и их медианы для спокойных условий (тонкие линии) по данным ст. Иркутск 4–6.08.2008 г. по мировому времени.

солнечной активности были незначительны ($68.4 \leq F10.7 \leq 69.2$ и $F_m \approx 69.3$) и эти изменения не были причиной наблюдаемой изменчивости $foF2$ ото дня ко дню. По оценкам, экстремальное увеличение $foF2$ могло быть связано с наложением нескольких причин. Одна из этих причин, по-видимому, связана с изменениями состава термосферы из-за приливов в атмосфере, которые использовались для объяснения приведенных на рис. 2 данных. Увеличение параметра A из-за увеличения $[O]$ и уменьшения β при постоянном значении произведения $[O] \beta$ на фиксированной высоте вблизи максимума $F2$ -слоя могло привести к увеличению $foF2$ в дневные часы 19.12.2008 г. при слабом отклонении $hmF2$ от фона (см. рис. 3). Такое изменение состава термосферы могло сохраниться или даже усилиться со временем

при переходе к ночным часам. Зимой ночью последний член в правой части уравнения (2) является основным, и увеличение параметра A при фиксированном значении потока F из протоносферы могло привести к увеличению $foF2$ при неизменном $hmF2$ (см. уравнение (2)). Дополнительное уменьшение β могло обеспечить наблюдаемое 19.12.2008 г. опускание $F2$ -слоя и дополнительное увеличение $foF2$ из-за увеличения параметра A . Еще одна причина опускания $F2$ -слоя могла быть связана с поворотом B_z ММП с севера на юг, которое в ночные часы приводит в основном к уменьшению $hmF2$ на средних [Ляцкая и Ляцкий, 1975] и низких [Demina, 1995] широтах из-за усиления электрического поля магнитосферной конвекции. Такое направление электрического поля в плазмосфере соответствует дрей-

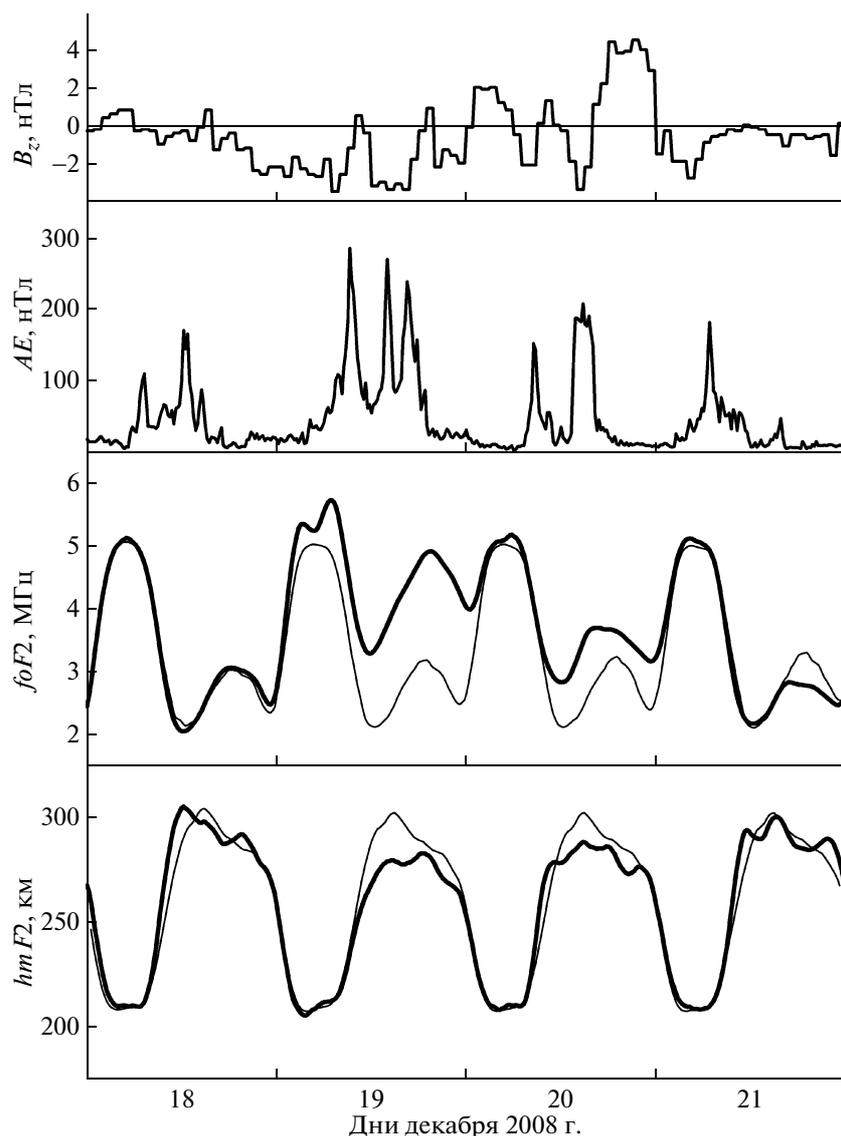


Рис. 3. Вертикальный компонент межпланетного магнитного поля B_z , AE -индекс геомагнитной активности, параметры максимума $F2$ -слоя $foF2$ и $hmF2$ (толстые линии) и их медианы для спокойных условий (тонкие линии) по данным ст. Иркутск 18–21.12.2008 г. по мировому времени.

фу плазмы из силовой трубки геомагнитного поля большего объема в силовую трубку меньшего объема, что могло обеспечить 19.12.2008 г. увеличение потока плазмы F из протоносферы вдоль геомагнитного поля и, тем самым, увеличение $foF2$ (см. уравнение (2)). Не менее важные причины увеличения потока F из протоносферы и, как следствие, $foF2$ могли быть связаны как с процессами в магнитосопреженной области ионосферы, так и с зональным дрейфом плазмы с дневной стороны на ночную из-за увеличения соответствующего компонента электрического поля магнитосферной конвекции. Совокупность перечисленных причин, по-видимому, могла обеспечить увеличение $foF2$ в ночные часы 19.12.2008 г. до

экстремальных значений. Релаксация увеличенного содержания плазмы в протоносферной части силовой трубки геомагнитного поля происходит достаточно медленно [Кринберг и Тащилин, 1984; Badin, 1994], и увеличенный поток плазмы из протоносферы в ночную зимнюю область F может сохраняться на следующие сутки после “отключения” причин такого увеличения потока. Повышенные значения $foF2$ в ночные часы 20.12.2008 г. могли быть связаны с этой причиной. Приведенная интерпретация экстремального увеличения $foF2$ зимой в ночные часы даже на качественном уровне является предварительной, и необходимы специальные исследования для определения природы этого явления.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Из результатов статистического анализа следует, что сильные ($10\% < |\delta foF2| < 30\%$) и очень сильные ($|\delta foF2| > 30\%$) флуктуации $foF2$ ночью наблюдаются гораздо чаще, чем днем, и они чаще положительны ($\delta foF2 > 0$) [Деминов и др., 2011]. Приведенные на рис. 1–3 примеры являются иллюстрацией этого статистического вывода: наиболее сильные отклонения $foF2$ от медианы наблюдаются ночью, и эти отклонения положительны.

Сильные флуктуации $foF2$ ото дня ко дню при низкой солнечной активности, по-видимому, связаны в основном с изменениями параметров термосферы, которые имеют характер планетарных волн и приливов. Приведенные на рис. 1 и 2 данные являются примерами таких флуктуации. Тем не менее, даже для этой части флуктуации $foF2$ эффекты магнитосферных суббурь в ионосфере, связанные с генерацией крупномасштабных ВГВ в авроральной области, могут быть существенны, что следует из анализа данных на рис. 2. При прочих равных условиях эти эффекты на средних широтах будут увеличиваться с ростом солнечной активности из-за уменьшения затухания таких ВГВ, распространяющихся из авроральной области, поскольку такое затухание определяется молекулярной вязкостью, коэффициент которой обратно пропорционален плотности атмосферы (см., например, [Гершман, 1974; Брюнелли и Намгаладзе, 1988]). Для волн в атмосфере, распространяющихся вверх из более низких слоев атмосферы, характерна противоположная тенденция: амплитуда таких волн при переходе из нижней в среднюю термосферу увеличивается сильнее при низкой солнечной активности из-за более высокого темпа уменьшения плотности атмосферы с высотой (см., например, [Гершман, 1974; Госсард и Хук, 1978]). Поэтому полученный для низкой солнечной активности вывод о преобладающем вкладе планетарных волн и приливов в сильные флуктуации $foF2$ спокойной ионосферы может оказаться несправедливым для высокой солнечной активности. Следует отметить, что приливы могут генерироваться (или усиливаться) непосредственно в термосфере в периоды геомагнитных возмущений [Muller-Wodarg, 2001; Карпов и Бессараб, 2005], и такие приливы могут продолжать существовать в течение нескольких суток после геомагнитного возмущения [Карпов и Бессараб, 2005]. Поэтому приливы в спокойной ионосфере не обязательно связаны с процессами в нижних слоях атмосферы.

Очень сильные флуктуации $foF2$ спокойной ионосферы при низкой солнечной активности наблюдаются редко (примерно в 1% случаев) [Деминов и др., 2011]. Такие флуктуации $foF2$, по-видимому, обусловлены наложением ионосферных эффектов планетарных волн и приливов на эффекты, связанные с процессами взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой. Экстремальное увеличение $foF2$ в

ночной зимней ионосфере средних широт является примером такой ситуации (см. рис. 3).

Сильные и очень сильные отклонения $NmF2$ спокойной ионосферы от медианы, для которых $|\delta NmF2| > 40\%$ (что примерно соответствует $|\delta foF2| > 15\text{--}25\%$), называют Q -возмущениями [Mikhailov et al., 2004]. Конкретные примеры Q -возмущений на различных широтах и при разном уровне солнечной активности приведены в работах [Mikhailov et al., 2004, 2007a, 2007b, 2009]. Эти примеры сложно сопоставлять с приведенными на рис. 1–3 данными, поскольку критерии выбора спокойных условий и медиан для Q -возмущений отличаются от приведенных здесь для флуктуаций спокойной ионосферы при низкой солнечной активности. Тем не менее, они показывают еще большее разнообразие возможных вариантов сильных изменений $NmF2$ (или $foF2$) спокойной ионосферы по сравнению с приведенными на рис. 1–3. Это отражает сложную картину протекающих в спокойной ионосфере процессов, которая далеко не полностью изучена.

4. ВЫВОДЫ

Проведенный качественный анализ свойств и конкретных примеров сильных ($10\% < |\delta foF2| < 30\%$) и очень сильных ($|\delta foF2| > 30\%$) флуктуаций критической частоты $F2$ -слоя спокойной ионосферы средних широт ото дня ко дню при низкой солнечной активности по данным ст. Иркутск позволяет сделать следующие выводы.

1. Сильные флуктуации $foF2$ ото дня ко дню связаны с изменениями параметров термосферы, которые имеют характер планетарных волн и приливов. Поэтому основная часть сильных флуктуаций $foF2$ спокойной ионосферы при низкой солнечной активности, по-видимому, обусловлена планетарными волнами и приливами в атмосфере. Дополнительной причиной сильных флуктуации $foF2$ ото дня ко дню могут быть крупномасштабные внутренние гравитационные волны (ВГВ) в термосфере, которые генерируются в авроральной области в периоды слабых суббурь, характерных для спокойной ионосферы.

2. Очень сильные флуктуации $foF2$ спокойной ионосферы наблюдаются редко (примерно в 1% случаев). Они, по-видимому, вызваны наложением эффектов в ионосфере из-за изменений параметров термосферы на эффекты, связанные с комплексом процессов взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой, в том числе обусловленные поворотом вертикального компонента магнитного поля солнечного ветра с севера на юг. Наиболее ярким примером очень сильных изменений $foF2$ является увеличение $foF2$ в ночные часы зимой до значений, характерных для дневного максимума $foF2$.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (гранты № 07-05-00104, № 07-05-92100) и Программой Президиума РАН № 16, часть 3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 527 с. 1988.
- Гершман Б.Н. Динамика ионосферной плазмы. М.: Наука, 256 с. 1974.
- Госсард Э., Хук У. Волны в атмосфере. М.: Мир, 532 с. 1978.
- Деминов М.Г. Ионосфера Земли // Плазменная геологофизика. М.: Физматлит. Т. 2. С. 92–163. 2008.
- Деминов М.Г., Жеребцов Г.А., Пирог О.М., Шубин В.Н. Регулярные изменения критической частоты F_2 -слоя спокойной среднеширотной ионосферы при низкой солнечной активности: 1. Статистические свойства // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 49. № 3. С. 393–399. 2009.
- Деминов М.Г., Деминова Г.Ф., Жеребцов Г.А., Пирог О.М., Полев Н.М. Изменчивость параметров максимума F_2 -слоя спокойной среднеширотной ионосферы при низкой солнечной активности: 1. Статистические свойства // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 51. № 3. С. 352–359. 2011.
- Карпов И.В., Бессараб Ф.С. Модельное исследование динамики приливных вариаций на высотах средней термосферы в период геомагнитных возмущений // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 45. № 2. С. 255–262. 2005.
- Кринберг И.А., Таццилин А.В. Ионосфера и плазмосфера. М.: Наука, 189 с. 1984.
- Ляцкая А.М., Ляцкий В.Б. Магнитное поле солнечного ветра и вертикальное движение ночной ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 15. № 6. С. 977–981. 1975.
- Ляцкий В.Б. Токовые системы магнитосферно-ионосферных возмущений. М.: Наука, 198 с. 1978.
- Шашунькина В.М., Гончарова Е.Е. Дневные ионосферные эффекты ВГВ по ст. Москва // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 41. № 1. С. 99–104. 2001.
- Akasofu S.-I. Energy coupling between the solar wind and magnetosphere // Space Sci. Rev. V. 28. № 2. P. 121–129. 1981.
- Akasofu S.-I. Several ‘controversial’ issues on substorms // Space Sci. Rev. V. 113. № 1. P. 1–40. 2004.
- Apostolov E.M., Altadill D., Alberca L. Characteristics of quasi-2-day oscillations in the foF_2 at northern middle latitudes // J. Geophys. Res. V. 100. № A7. P. 12163–12171. 1995.
- Badin V.I. Quasi-equilibrium theory of the midlatitude protonosphere // J. Atmos. Terr. Phys. V. 56. № 1. P. 141–146. 1994.
- Deminova G.F. Modifications in the night-time low-latitude ionosphere after southward turnings of the IMF // J. Atmos. Terr. Phys. V. 57. № 12. P. 1459–1467. 1995.
- Deminova G.F., Shashunkina V.M., Goncharova E.E. A global empirical model of effects of large-scale internal gravity waves in the night-time ionosphere // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 60. № 2. P. 227–245. 1998.
- Fejer B.G., Scherliess L. Empirical models of storm time equatorial zonal electric fields // J. Geophys. Res. V. 102. № A11. P. 24047–24056. 1997.
- Fejer B.G., Jensen J.W., Kikuchi T., Abdu M.A., Chau J.L. Equatorial ionospheric electric fields during the November 2004 magnetic storm // J. Geophys. Res. V. 112. A10304, doi:10.1029/2007JA012376. 2007.
- Forbes J.M., Palo S.E., Zhang X. Variability of the ionosphere // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 62. № 8. P. 685–693. 2000.
- Hocke K., Schlegel K. A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982–1995 // Ann. Geophysicae. V. 14. № 9. P. 917–940. 1996.
- Lastovicka J., Krizan P., Sauli P., Novotna D. Persistence of the planetary wave type oscillations in foF_2 over Europe // Ann. Geophysicae. V. 21. № 7. P. 1543–1552. 2003.
- Mendillo M., Rishbeth H., Roble R.G., Wroten J. Modeling F_2 -layer seasonal trends and day-to-day variability driven by coupling with the lower atmosphere // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 64. № 18. P. 1911–1931. 2002.
- Mikhailov A.V., Depueva A.Kh., Leschinskaya T.Yu. Morphology of quiet time F_2 -layer disturbances: High to lower latitudes // Int. J. Geomag. Aeronom. V. 5. G11006, doi:10.1029/2003G1000058. 2004.
- Mikhailov A.V., Depuev V.H., Depueva A.H. Synchronous NmF_2 and NmE daytime variations as a key to the mechanism of quiet-time F_2 -layer disturbances // Ann. Geophysicae. V. 25. № 2. P. 483–493. 2007a.
- Mikhailov A.V., Depuev V.H., Depueva A.H. Daytime F_2 -layer negative storm effect: what is the difference between storm-induced and Q -disturbance events? // Ann. Geophysicae. V. 25. № 7. P. 1531–1541. 2007b.
- Mikhailov A.V., Depueva A.H., Depuev V.H. Quiet time F_2 -layer disturbances: seasonal variations of the occurrence in the daytime sector // Ann. Geophysicae. V. 27. № 1. P. 329–337. 2009.
- Muller-Wodarg I.C.F., Aylward A.D., Fuller-Rowell T.J. Tidal oscillations in the thermosphere: a theoretical investigation of their sources // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 63. № 9. 899–914. 2001.
- Rishbeth H., Mendillo M. Patterns of F_2 -layer variability // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 63. № 15. P. 1661–1680. 2001.
- Wrenn G.L. Time-weighted accumulations $ap(\tau)$ and $Kp(\tau)$ // J. Geophys. Res. V. 92. № A9. P. 10125–10129. 1987.
- Wrenn G.L., Rodger A.S. Geomagnetic modification of the mid-latitude ionosphere – Toward a strategy for the improved forecasting of foF_2 // Radio Sci. V. 24. № 1. P. 99–111. 1989.
- Xiong J., Wan W., Ning B., Liu L., Gao Y. Planetary wave-type oscillations in the ionosphere and their relationship to mesospheric/lower thermospheric and geomagnetic disturbances at Wuhan (30.6°N, 114.5°E) // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 68. № 3–5. P. 498–508. 2006.