

УДК 550.388.2

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПАРАМЕТРОВ МАКСИМУМА F_2 -СЛОЯ СПОКОЙНОЙ СРЕДНЕШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ ПРИ НИЗКОЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ: 1. СТАТИСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

© 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.

Представлены результаты статистического анализа свойств изменчивости параметров максимума F_2 -слоя (критической частоты f_oF_2 и высоты максимума hmF_2) спокойной ионосферы средних широт при низкой солнечной активности в дневные (10–15 LT) и ночные (22–03 LT) часы по данным ст. Иркутск за 2007–2008 гг. Получено, что плотность распределения δf_oF_2 можно представить состоящей из совокупности двух отчетливо различающихся нормальных законов этого распределения, один из которых соответствует слабым ($|\delta f_oF_2| < 10\%$), другой – сильным ($30\% > |\delta f_oF_2| > 10\%$) флуктуациям f_oF_2 . Слабые флуктуации f_oF_2 в значительной степени связаны с изменчивостью ионосферы на временах меньше 1–3 часов и определяют изменчивость δf_oF_2 в дневные часы. Сильные флуктуации f_oF_2 , в основном, связаны с изменчивостью ионосферы ото дня ко дню при фиксированном местном времени, которая увеличивается примерно в 3 раза при переходе ото дня к ночи, определяя изменчивость δf_oF_2 в ночные часы. Плотность распределения ΔhmF_2 близка к одному нормальному закону распределения. Дана интерпретация разного характера плотностей распределения δf_oF_2 и ΔhmF_2 .

1. ВВЕДЕНИЕ

Изменчивость параметров максимума F_2 -слоя и в первую очередь электронной концентрации в максимуме слоя NmF_2 (или критической частоты f_oF_2) в пределах одного часа и ото дня ко дню исследовалась неоднократно [Зевакина и др., 1990; Forbes et al., 2000; Kouris et al., 2000; Rishbeth and Mendillo, 2001; Mendillo et al., 2002; Pancheva et al., 2002; Araujo-Pradere et al., 2005; Zhang and Holt, 2008; Деминов и др., 2009; Rishbeth et al., 2009]. Считают, что изменчивость ионосферы ото дня ко дню обусловлена как процессами в атмосфере и ионосфере, связанными с флуктуациями солнечной и геомагнитной активности, так и с внутренними процессами в атмосфере (внутренние гравитационные волны, планетарные волны и приливы) [Forbes et al., 2000; Rishbeth and Mendillo, 2001]. Исключение из рассмотрения данных, соответствующих магнитовозмущенным условиям, позволяет оценить изменчивость спокойной ионосферы [Forbes et al., 2000; Rishbeth and Mendillo, 2001; Деминов и др., 2009], знание которой важно при анализе ионосферных возмущений любой природы. На этом пути возникает проблема, связанная с исключением из рассмотрения эффектов геомагнитной активности в ионосфере, поскольку в среднем эта активность повышена и периоды продолжительной низкой геомагнитной ак-

тивности встречаются не часто. Например, для интервала 1948–2008 гг. среднее значение трехчасового индекса $ap \approx 15$ нТл, изменчивость этого индекса по величине стандартного отклонения $\sigma(ap) \approx 13$ нТл. Поэтому под спокойной ионосферой обычно понимают ионосферу в периоды относительно низкой геомагнитной активности, однако критерии задания порогового уровня этой активности различны у разных авторов [Forbes et al., 2000; Rishbeth and Mendillo, 2001; Mikhailov et al., 2004; Деминов и др., 2009]. В среднем изменчивость уровня солнечной активности также существенна, что создает дополнительные сложности при анализе свойств изменчивости спокойной ионосферы. Например, для интервала 1948–2008 гг. среднее значение индекса $F10.7 \approx 128$ и $\sigma(F10.7) \approx 20$, где $F10.7$ – поток радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см, который измеряется в 10^{-22} Вт/м² Гц.

Геомагнитная активность обычно понижена при низкой солнечной активности. Это может позволить определить свойства изменчивости спокойной ионосферы в периоды низкой солнечной активности при достаточно жестких ограничениях на пороговый уровень геомагнитной активности и тем самым более уверенно судить о причинах этой изменчивости. Решение этой задачи на примере анализа изменчивости параметров максимума F_2 -слоя

(критической частоты $foF2$ и высоты максимума $hmF2$) по данным ст. Иркутск за 2007–2008 гг. и было целью данной работы. Выбор данного интервала времени связан с очень низким средним уровнем солнечной и геомагнитной активности в 2007–2008 гг.: $F10.7 \approx 71$ и $\sigma(F10.7) \approx 3$, $ap \approx 7$ нТл и $\sigma(ap) \approx 4$ нТл. При этом средние за 2008 г. значения индексов солнечной и геомагнитной активности ($F10.7 \approx 69$ и $ap \approx 6.9$ нТл) были самыми низкими за все годы регулярных измерений этих индексов ($F10.7$ с 1948 г., ap с 1932 г.).

Ниже представлены результаты решения первой части поставленной задачи – анализ статистических свойств изменчивости $foF2$ и $hmF2$ спокойной ионосферы при низкой солнечной активности для дневных (10–15 LT) и ночных (22–03 LT) часов.

2. МЕТОДИКА ВЫДЕЛЕНИЯ СПОКОЙНЫХ УСЛОВИЙ

Исходным для анализа был массив данных параметров максимума $F2$ -слоя (критической частоты $foF2$ и высоты $hmF2$) ст. Иркутск (52.5°N , 104°E) за 2007–2008 гг. с шагом по времени 15 мин. Для получения массива данных $f = foF2$ и $h = hmF2$, соответствующего спокойной ионосфере, из исходного массива были исключены данные, которые не удовлетворяют хотя бы одному из условий:

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

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

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

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. Исходными для вычисления этих индексов были трехчасовые данные ap и одноминутные данные AE , полученные по Интернет (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>). По данным f и h были построены массивы f_m и h_m – медианы f и h за 15 дней для данного мирового времени, центрированные на данную дату. Массивы данных f, h, f_m и h_m соответствуют спокойной ионосфере и имеют шаг по времени 15 мин. Эти массивы были использованы для анализа изменчивости спокойной ионосферы над Иркутском при низкой солнечной активности (2007–2008 гг.).

Следует отметить, что первое из условий (1) позволяет исключить из рассмотрения периоды бурь в ионосфере [Wrenn and Rodger, 1989], второе – интенсивных суббурь в ионосфере. Эти условия, по-видимому, являются оптимальным компромиссом между стремлением исключить из рассмотрения все магнитовозмущенные периоды и сохранить достаточно большой массив данных параметров макси-

муму $F2$ -слоя для получения надежных статистических оценок изменчивости этих параметров. Тем не менее, эти условия являются достаточно жесткими. Так, в эмпирической модели STORM [Fuller-Rowell et al., 2000; Araujo-Pradere et al., 2002] поправка $foF2$ на бурю зависит от эффективного индекса геомагнитной активности, который слабо отличается от $ap(\tau)$ для продолжительных периодов геомагнитных бурь, и согласно этой модели поправка $foF2$ отсутствует, если $ap(\tau) \leq 9$ нТл.

Основные эффекты суббурь в ионосфере средних широт связывают с генерацией крупномасштабных внутренних гравитационных волн (ВГВ) в термосфере авроральной области, которые, распространяясь к экватору, достигают средних широт через 1–3 ч после начала генерации (см., например, [Hocke and Schlegel, 1996]). В дневные часы наиболее сильные изменения $foF2$ происходят с задержкой (сдвигом по фазе) относительно времени прохождения ВГВ над данным пунктом (см., например, [Брюнелли и Намгаладзе, 1988]), что учтено при выборе второго из условий (1). Из результатов анализа следует, что на средних широтах ионосферные эффекты таких ВГВ слабые и не намного превосходят ошибку измерения параметров максимума $F2$ -слоя, если $AE_{\max} < 500$ нТл по 2.5-минутным данным AE -индекса [Deminova et al., 1998], что примерно соответствует критерию $AE_{\max} < 400$ нТл по 15-минутным данным. Последний вывод основан на регрессионных соотношениях

$$AE_{\max}(01) \approx 1.08 AE_{\max}(05) \approx \\ \approx 1.19 AE_{\max}(15) \approx 1.5 AE_{\max}(60) \pm 60, \quad (2)$$

полученных по массиву данных AE -индекса (в нТл) за 2007–2008 гг., где в скобках указан интервал усреднения AE -индекса в минутах. В периоды суббурь характерные времена изменения AE -индекса и параметров ВГВ обычно меньше часа и использование часового AE -индекса ($AE(60)$) часто не оправдано [Deminova et al., 1998]. Это видно и из соотношений (2): коэффициент регрессии слабо увеличивается при переходе от $AE_{\max}(05)$ к $AE_{\max}(15)$ и резко возрастает при переходе к $AE_{\max}(60)$. Данное свойство AE -индекса было учтено при выборе $AE = AE(15)$ как индикатора геомагнитной активности для суббурь в ионосфере.

Выбор интервала 15 дней для вычисления спокойных медиан $foF2$ и $hmF2$ связан с необходимостью корректного учета годовых изменений $foF2$, особенно сильных в равноденствия [Mikhailov and Schlegel, 2001; Rishbeth and Mendillo, 2001; Деминов и др., 2009]. Дополнительный анализ показывает, что использование средних за 15 дней значений $foF2$ и $hmF2$ вместо медиан приводит к близким, но менее устойчивым результатам.

Изменчивость σ параметров максимума $F2$ -слоя спокойной ионосферы над Иркутском при низкой солнечной активности в дневные (10–15 LT) и ночные (22–03 LT) часы во все сезоны и в среднем за год: полная изменчивость ($ik = 0m$) и ее составляющие – изменчивость в пределах двух часов ($ik = 01$) и изменчивость средних за 2 ч значений параметров максимума $F2$ -слоя относительно спокойной медианы ($ik = 1m$)

ik	LT	Зима			Равноденствие			Лето			Год		
		$\sigma(\delta f)$ %	$\sigma(\Delta f)$ МГц	$\sigma(\Delta h)$ км	$\sigma(\delta f)$ %	$\sigma(\Delta f)$ МГц	$\sigma(\Delta h)$ км	$\sigma(\delta f)$ %	$\sigma(\Delta f)$ МГц	$\sigma(\Delta h)$ км	$\sigma(\delta f)$ %	$\sigma(\Delta f)$ МГц	$\sigma(\Delta h)$ км
0m	10-15	7	0.4	12	6	0.3	9	4	0.2	13	6	0.3	11
	22-03	13	0.4	15	11	0.4	14	9	0.3	14	11	0.4	15
01	10-15	6	0.3	11	3	0.2	7	2	0.1	11	4	0.2	10
	22-03	3	0.1	10	3	0.1	9	3	0.1	10	3	0.1	10
1m	10-15	4	0.2	4	4	0.2	4	3	0.1	6	4	0.2	5
	22-03	12	0.4	11	10	0.4	10	8	0.3	10	10	0.4	10

3. ИЗМЕНЧИВОСТЬ

В качестве характеристик изменчивости параметров максимума $F2$ -слоя спокойной ионосферы использованы стандартные отклонения $\sigma(\delta f)$, $\sigma(\Delta f)$ и $\sigma(\Delta h)$, где

$$\begin{aligned} \delta f &= (f/f_m - 1)100, \%, \\ \Delta f &= (f - f_m), \text{ МГц}, \\ \Delta h &= (h - h_m), \text{ км}, \end{aligned} \quad (3)$$

f и h – измеренные значения этих параметров, f_m и h_m – их медианы. Эти стандартные отклонения приведены в таблице (в строках, обозначенных 0m) для зимы (ноябрь, декабрь, январь, февраль), равноденствия (март, апрель, сентябрь, октябрь), лета (май, июнь, июль, август) и всего года для дня (10–15 LT) и ночи (22–03 LT). Из таблицы видно, что во все сезоны изменчивость $foF2$ (в %) днем почти в 2 раза меньше, чем ночью, и в среднем $\sigma(\delta f) = 6$ и 11% днем и ночью соответственно. Изменения $\sigma(\delta f)$ с сезоном более слабые, тем не менее, наблюдается общая тенденция к увеличению $\sigma(\delta f)$ при переходе от лета к зиме. Эта же тенденция характерна для $\sigma(\Delta f)$. Разница между дневными и ночными значениями $\sigma(\Delta f)$ незначительна и в среднем $\sigma(\Delta f) = 0.3$ и 0.4 МГц днем и ночью соответственно. Изменчивость $hmF2$ днем меньше, чем ночью, для каждого из сезонов, и в среднем $\sigma(\Delta h) = 11$ и 15 км днем и ночью соответственно. Зависимость $\sigma(\Delta h)$ от сезона не отчетлива.

Изменчивость $foF2$ с характерными временами меньше 1–3 ч (высокочастотная часть) может существенно отличаться от изменчивости $foF2$ ото дня ко дню (низкочастотная часть). Для оценки этой разницы использован массив f_1 – средних за 2 ч (точнее, за 2.25 ч) значений f , центрированных на середину этого интервала времени. Это позволяет представить стандартное отклонение измеренного значения f от медианы f_m состоящим из высокочастотной и низко-

частотной частей, т.е. из стандартных отклонений f от f_1 и f_1 от f_m :

$$\begin{aligned} \sigma^2(\delta f) &= \sigma^2(\delta f_{01}) + \sigma^2(\delta f_{1m}), \\ \delta f_{01} &= (f/f_1 - 1)100, \%, \\ \delta f_{1m} &= (f_1/f_m - 1)100, \%. \end{aligned} \quad (4)$$

Величины $\sigma(\Delta f_{01})$, $\sigma(\Delta f_{1m})$ и $\sigma(\Delta h_{01})$, $\sigma(\Delta h_{1m})$ определяются аналогично величинам $\sigma(\delta f_{01})$, $\sigma(\delta f_{1m})$. Из таблицы видно, что днем (10–15 LT) во все сезоны: а) отличие $\sigma(\delta f_{01})$ от $\sigma(\delta f_{1m})$ незначительно и в среднем $\sigma(\delta f_{01}) \approx \sigma(\delta f_{1m}) \approx 4\%$; б) отличие $\sigma(\Delta f_{01})$ от $\sigma(\Delta f_{1m})$ также незначительно и в среднем $\sigma(\Delta f_{01}) \approx \sigma(\Delta f_{1m}) \approx 0.2$ МГц; в) $\sigma(\Delta h_{01}) > \sigma(\Delta h_{1m})$ и в среднем $\sigma(\Delta h_{01}) = 10$ км, $\sigma(\Delta h_{1m}) = 5$ км. Следовательно, в дневные часы высокочастотная часть изменчивости параметров максимума $F2$ -слоя вносит значительный вклад в полную изменчивость этих параметров. Для изменчивости высоты максимума $F2$ -слоя этот вклад является даже преобладающим. В ночные часы (22–03 LT) во все сезоны: а) $\sigma(\delta f_{1m})$ больше $\sigma(\delta f_{01})$ примерно в 3 раза (до 4 раз зимой) и в среднем $\sigma(\delta f_{1m}) \approx 10\%$, $\sigma(\delta f_{01}) \approx 3\%$; б) $\sigma(\Delta f_{1m})$ больше $\sigma(\Delta f_{01})$ в 3–4 раза и в среднем $\sigma(\Delta f_{1m}) \approx 0.4$ МГц, $\sigma(\Delta f_{01}) \approx 0.1$ МГц; в) отличие $\sigma(\Delta h_{1m})$ от $\sigma(\Delta h_{01})$ незначительно и в среднем $\sigma(\Delta h_{1m}) \approx \sigma(\Delta h_{01}) \approx 10$ км. Следовательно, в ночные часы полная изменчивость $foF2$ определяется в основном низкочастотной частью этой изменчивости. Полная изменчивость $hmF2$ в значительной степени зависит от высокочастотной части этой изменчивости даже в ночные часы.

Приведенные свойства изменчивости параметров максимума $F2$ -слоя показывают, что изменчивость $foF2$ днем в значительной степени определяется высокочастотной частью этой изменчивости. При переходе от дневных к ночным часам низкочастотная часть изменчивости $foF2$ увеличивается в 3–4 раза и становится основной частью этой изменчивости, обеспечивая отчетливое увеличение пол-

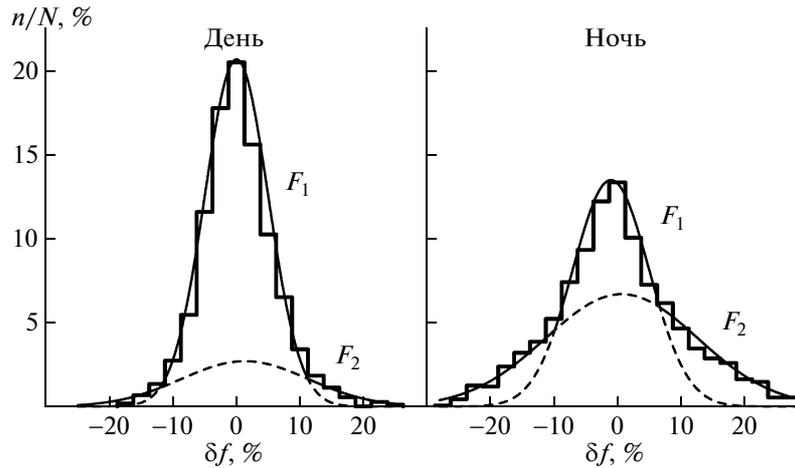


Рис. 1. Гистограммы относительных изменений критической частоты F_2 -слоя δf (толстые линии) и нормальные законы распределения F_1 и F_2 с учетом нормировки объединяющего их закона (тонкие линии) для дня (10–15 LT) и ночи (22–03 LT).

ной изменчивости foF_2 при таком переходе. Днем и ночью изменчивость hmF_2 в значительной степени определяется высокочастотной частью этой изменчивости.

Дополнительный анализ показывает, что корреляция между δf и Δh слабая. Тем не менее, для каждого из сезонов днем величина δf коррелирует с Δh и в среднем коэффициент корреляции $K = 0.25$. Ночью для каждого из сезонов величина δf антикоррелирует с Δh и в среднем $K = -0.15$.

4. ПЛОТНОСТЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Дополнительные свойства изменчивости параметров максимума F_2 -слоя могут быть получены из анализа гистограмм, например, гистограммы δf – числа случаев n попадания δf в определенный интервал значений относительно полного числа случаев N , где δf определена уравнением (3). Такие гистограммы для ночных и дневных часов приведены на рис. 1 для всего года, т.е. без разделения на сезоны. В данном случае для дневных часов $N = 7172$ и диапазон изменений δf ограничен интервалом $25\% \geq \delta f \geq -18\%$, для ночных часов $N = 7388$ и $63\% \geq \delta f \geq -35\%$. На рис. 1 приведены также нормальные (гауссовы) законы распределения вида (см., например, [Крамер, 1975]):

$$F(x) = F_0 \exp(-0.5 ((x - a)/\sigma_F)^2), \quad (4)$$

где a – коэффициент сдвига, σ_F – коэффициент масштаба, F_0 – амплитуда с учетом нормировки к 1 (или 100%) интегрального (в диапазоне $x = \pm\infty$) значения $F(x)$. В данном случае $x = \delta f$ и величины σ_F и a подбираются так, чтобы закон $F(\delta f)$ слабо отличался от гистограммы δf . Анализ показывает, что невозможно подобрать одну функцию F , слабо отличающуюся от гистограммы δf в широком диапазоне из-

менений δf . Поэтому введен закон распределения F_S , состоящий из двух различающихся нормальных законов F_1 и F_2 с учетом нормировки F_S , в которых $F_S = F_1$ и $F_S = F_2$ для относительно слабых и сильных флуктуаций δf соответственно. Из рис. 1 видно, что в целом гистограмма δf подчиняется закону распределения F_S . В данном случае для дня $F_{01} = 20.7\%$, $\sigma_{F1} = 5\%$, $a_1 = 0$, $F_{02} = 2.7\%$, $\sigma_{F2} = 10\%$, $a_2 = 1.3\%$, для ночи $F_{01} = 13.5\%$, $\sigma_{F1} = 6\%$, $a_1 = -1\%$, $F_{02} = 6.7\%$, $\sigma_{F2} = 12\%$, $a_2 = 0.7\%$. Видно, что значения σ_{F1} отчетливо отличаются от σ_{F2} , оставаясь почти неизменными при переходе от дневных к ночным часам.

Сравнивая значения σ_F с приведенными в таблице значениями $\sigma(\delta f)$, можно видеть, что $\sigma_{F1} \approx \sigma_a(\delta f) \approx 6\%$, $\sigma_{F2} \approx \sigma_n(\delta f) \approx 11\%$, где $\sigma_a(\delta f)$ и $\sigma_n(\delta f)$ – стандартные отклонения $\sigma(\delta f)$ для дня и ночи. Из этих приближенных равенств следует, что днем стандартное отклонение $\sigma(\delta f)$ определяется в основном слабыми флуктуациями δf , ночью – сильными флуктуациями δf , отражая увеличение относительного вклада сильных флуктуаций в плотность распределения δf при переходе от дневных к ночным часам (см. рис. 1). Выше отмечалось, что днем изменчивость foF_2 в значительной степени определяется высокочастотной частью этой изменчивости, ночью изменчивость foF_2 в основном определяется низкочастотной частью этой изменчивости. Сравнивая свойства изменчивости foF_2 со свойствами закона распределения F_S , состоящего из F_1 и F_2 , можно заключить, что слабые флуктуации δf , которые подчиняются закону F_1 , в значительной степени определяют высокочастотную часть изменчивости foF_2 . Сильные флуктуации δf , которые подчиняются закону F_2 , в основном определяют низкочастотную часть изменчивости foF_2 . Отчетливо различающиеся свойства законов F_1 и F_2 озна-

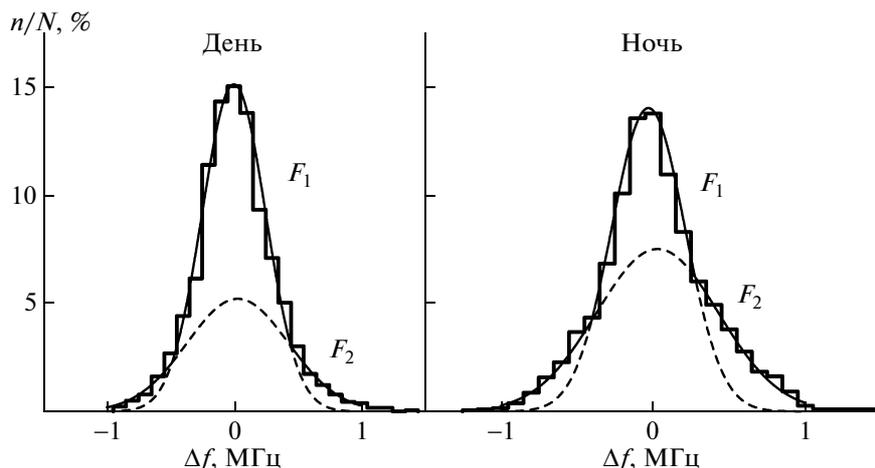


Рис. 2. Гистограммы отклонений критической частоты F_2 -слоя от спокойной медианы Δf (толстые линии) и нормальные законы распределения F_1 и F_2 с учетом нормировки объединяющего их закона (тонкие линии) для дня (10–15 LT) и ночи (22–03 LT).

чают, что основные причины слабых и сильных флуктуаций foF_2 различны.

Коэффициенты сдвига a_1 и a_2 в законах F_1 и F_2 отражают асимметрию в частоте появления положительных и отрицательных значений δf . Для слабых флуктуаций днем сдвиг практически отсутствует ($a_1 \approx 0$), ночью он достаточно отчетлив ($a_1 \approx -1\%$). Следовательно, ночью слабые возмущения foF_2 чаще отрицательны ($\delta f < 0$). Днем и ночью сильные возмущения foF_2 чаще положительны ($\delta f > 0$), поскольку в среднем $a_2 \approx 1\%$.

Анализ показывает, что закон F_2 перестает быть справедливым для очень сильных возмущений foF_2 ($|\delta f| > 3\sigma_{F_2}$). Для качественных оценок можно принять $\sigma_{F_2} \approx 10\%$, что почти не отличается от приведенных выше средних значений σ_{F_2} . В этом случае днем и ночью флуктуации $|\delta f| < 10\%$, $10\% < |\delta f| < 30\%$ и $|\delta f| > 30\%$ соответствуют слабым, сильным и очень сильным флуктуациям. Слабые флуктуации δf наблюдаются наиболее часто: 91% и 70% случаев днем и ночью. Сильные флуктуации δf наблюдаются менее часто: 9% и 29% случаев днем и ночью. Очень сильные флуктуации наблюдаются редко: ни одного случая из анализируемого массива данных для дневных часов, примерно 1% для ночных часов (0.9% положительных и 0.1% отрицательных возмущений δf). Приведенные результаты показывают, что сильные флуктуации δf чаще положительны и ночью наблюдаются гораздо чаще, чем днем. Для очень сильных флуктуаций δf эти тенденции выражены более ярко — они в основном положительны и характерны для ночных часов. Дополнительный анализ показывает, что плотность распределения очень сильных флуктуаций δf отличается от нормального закона. Более детальный анализ свойств этой плотности затруднен из-за относительно ма-

лого количества очень сильных флуктуаций в анализируемом массиве данных δf .

Величина Δf пропорциональна δf с точностью до нормировки на медиану f_m (см. уравнение (3)). Поэтому свойства гистограмм Δf и δf во многом аналогичны. Это можно видеть из гистограмм Δf для дневных и ночных часов, приведенных на рис. 2 для всего года, т.е. без разделения на сезоны. Там же приведен закон распределения $F_S(\Delta f)$, состоящий из двух различающихся нормальных законов F_1 и F_2 , в которых $F_S = F_1$ и $F_S = F_2$ для относительно слабых и сильных флуктуаций Δf соответственно (см. уравнение (4), где $x = \Delta f$). В данном случае днем и ночью $\sigma_{F_1} \approx 0.25$ МГц и $\sigma_{F_2} \approx 0.4$ МГц, что почти не отличается от $\sigma(\Delta f)$ в дневные и ночные часы соответственно (см. таблицу). Для закона F_1 днем сдвиг отсутствует, ночью $a_1 \approx -0.03$ МГц, и среди слабых флуктуаций Δf ночью преобладают отрицательные возмущения ($\Delta f < 0$). Для закона F_2 днем и ночью $a_2 \approx 0.03$ МГц, и среди сильных флуктуаций Δf днем и ночью преобладают положительные возмущения. Из рис. 2 видно, что ночью частота наблюдения сильных флуктуаций Δf больше, чем днем, поэтому днем изменчивость foF_2 определяется в основном слабыми флуктуациями Δf , ночью — сильными флуктуациями Δf .

На рис. 3 приведены гистограммы Δh для дневных и ночных часов без разделения на сезоны. В данном случае для дневных часов $N = 7172$ и диапазон изменений Δh ограничен интервалом $59 \geq \Delta h \geq -38$ км, для ночных часов $N = 7388$ и $46 \geq \Delta h \geq -49$ км. На рис. 3 приведены также аппроксимации этих гистограмм нормальными законами распределения F (см. уравнение (4), где $x = \Delta h$), в которых для дневных часов $F_0 = 20.5\%$, $\sigma_F = 10.2$ км и коэффициент сдвига $a = 0$, для ночных часов $F_0 = 15\%$, $\sigma_F = 14$ км и $a = 0$.

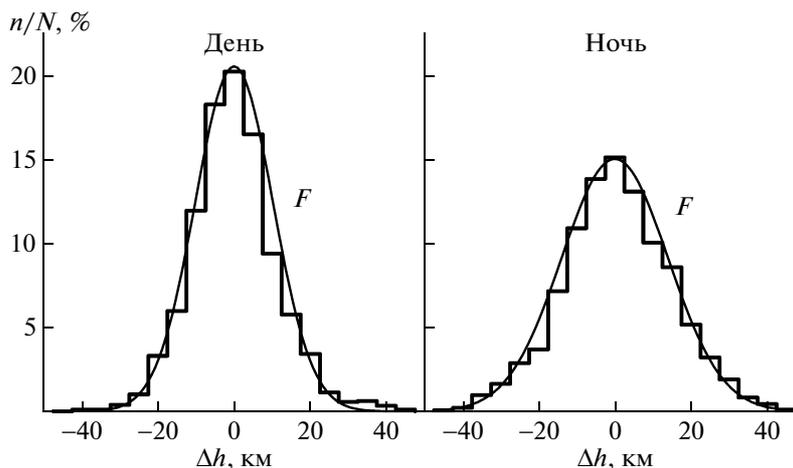


Рис. 3. Гистограммы отклонений высоты максимума F_2 -слоя от спокойной медианы Δh (толстые линии) и нормальные законы распределения F (тонкие линии) для дня (10–15 LT) и ночи (22–03 LT).

Из рис. 3 видно, что аппроксимация гистограммы Δh одним нормальным законом распределения является достаточно точной как для дневных, так и для ночных часов. Исключение составляют редкие случаи очень сильных возмущений высоты максимума F_2 -слоя ($|\Delta h| > 3\sigma_F$), для которых нормальный закон несправедлив. Для нормального закона распределения Δh величина σ_F равна стандартному отклонению $\sigma(\Delta h)$ [Крамер, 1975]. Полученные значения σ_F слабо отличаются от приведенных в таблице значений $\sigma(\Delta h)$, подтверждая справедливость этого закона в большинстве случаев. При переходе от дневных к ночным часам низкочастотная часть изменчивости Δh увеличивается (см. таблицу), что обеспечивает увеличение частоты наблюдения сильных ($3\sigma_F > |\Delta h| > \sigma_F \approx \sigma(\Delta h) \approx 15$ км) флуктуаций Δh при таком переходе (см. рис. 3). Тем не менее, низкочастотная часть изменчивости Δh даже ночью не больше высокочастотной части этой изменчивости (см. таблицу). Следовательно, слабые и сильные флуктуации Δh в значительной степени зависят от высокочастотной части Δh . В этом, по-видимому, основная причина существования одного нормального закона распределения Δh , справедливого для слабых и сильных флуктуаций Δh .

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Приведенные статистические свойства изменчивости параметров максимума F_2 -слоя (относительно низкий уровень этой изменчивости на временах меньше 1–3 ч, увеличение изменчивости foF_2 при переходе от дневных к ночным часам, разный характер законов распределения слабых и сильных флуктуаций foF_2) в целом согласуются с известными [Зевакина и др., 1990; Forbes et al., 2000; Kouris et al., 2000; Rishbeth and Mendillo, 2001]. Однако возможность представления плотности распределения

слабых и сильных флуктуаций foF_2 в виде совокупности двух нормальных законов распределения этих флуктуаций показана, по-видимому, впервые.

Приведенные в таблице оценки изменчивости foF_2 спокойной ионосферы над Иркутском для низкой солнечной активности не сильно отличаются от полученных ранее для средней (за 1958–1992 гг.) солнечной активности [Деминов и др., 2009], отражая увеличение изменчивости foF_2 (в %) при переходе от дневных к ночным часам и общую тенденцию к увеличению этой изменчивости при переходе от летних к зимним условиям. Более детальное сопоставление этих результатов показывает, что изменчивость foF_2 спокойной ионосферы в ночные часы (22–03 LT) при низкой солнечной активности не меньше, чем в полночь при средней солнечной активности. Для дневных часов (10–15 LT) характерна тенденция к увеличению изменчивости foF_2 с ростом солнечной активности.

Слабые флуктуации foF_2 ($|\delta f| < 10\%$) обычно связывают с ионосферными эффектами внутренних гравитационных волн с периодами примерно 10–100 мин, которые существуют практически всегда, генерируются в нижних слоях атмосферы и, распространяясь вверх, достигают высот области F (см, например, [Гершман и др., 1984]). Приведенные выше свойства слабых флуктуаций foF_2 служат дополнительным обоснованием данного утверждения. Слабые флуктуации foF_2 подчиняются закону F_1 (см. рис. 1), который реализуется достаточно часто (примерно в 90% и 70% случаев днем и ночью) и в значительной степени связан с высокочастотной частью этих флуктуаций (с характерными временами меньше 1–3 ч). Для ионосферных эффектов ВГВ ночью характерно уменьшение foF_2 (см., например, [Demina et al., 1998]), что согласуется с отрицательным сдвигом (преобладанием $\delta f < 0$) для закона F_1 в ночные часы (см. рис. 1). Отмеченная выше

связь между δf и Δh (корреляция днем и антикорреляция ночью) в значительной степени относится к слабым возмущениям, поскольку они реализуются наиболее часто. Аналогичная связь характерна и для ионосферных эффектов ВГВ (см., например, [Брюнелли и Намгаладзе, 1988; Deminova et al., 1998]). Следовательно, закон F_1 в значительной степени отражает статистические свойства ионосферных эффектов ВГВ с периодами 10–100 мин, подтверждая преобладающую роль таких ВГВ в формировании слабых флуктуаций $foF2$.

Сильные и очень сильные флуктуации $foF2$ ($|\delta foF2| > 10\%$) спокойной ионосферы обусловлены изменчивостью ионосферы ото дня ко дню. Основную часть этой изменчивости связывают с внутренними процессами в термосфере, включая планетарные волны и приливы [Forbes et al., 2000; Rishbeth and Mendillo, 2001]. Эти процессы являются, по-видимому, не единственной причиной сильных и тем более очень сильных флуктуаций $foF2$. Результаты анализа возможных причин сильных и очень сильных флуктуаций $foF2$ спокойной ионосферы при низкой солнечной активности на конкретных примерах данных ст. Иркутск приведены во второй части данной работы.

Сильные отклонения $NmF2$ от скользящей медианы при низкой геомагнитной активности, для которых $|\delta NmF2| > 40\%$ (что примерно соответствует $|\delta foF2| > 15\text{--}25\%$), называют Q-возмущениями [Mikhailov et al., 2004]. В качестве критерия низкой геомагнитной активности было принято требование, чтобы значения каждого из 3-часовых *ap*-индексов за предыдущие 24 ч были меньше 7 нТл, и использовалась скользящая за 27 дней медиана $NmF2$, центрированная на данный день, вычисленная без исключения магнитовозмущенных периодов, т.е. обычная медиана [Mikhailov et al., 2004]. Результаты анализа закономерностей частоты появления положительных и отрицательных Q-возмущений и конкретные примеры таких возмущений приведены в работах [Mikhailov et al., 2004; 2007a; 2007b; 2009]. На основе анализа данных 29-ти ионосферных станций от высоких до низких широт получено, в частности, что на всех широтах и при любом уровне солнечной активности положительные Q-возмущения наблюдаются чаще отрицательных [Mikhailov et al., 2004]. Сильные и очень сильные отклонения $foF2$ от спокойной медианы по данным ст. Иркутск при низкой солнечной активности также преимущественно положительны (см. рис. 1). Качественное совпадение этого свойства изменчивости спокойной ионосферы с характерным свойством Q-возмущения, по-видимому, связано с тем, что продолжительным периодам низкой солнечной активности обычно соответствует относительно низкая геомагнитная активность, когда обычная медиана не сильно отличается от спокойной медианы. Определение свойств изменчивости спокойной ионосферы (с учетом спокойной медианы) для периодов высокой

солнечной активности требует специального исследования.

6. ВЫВОДЫ

Проведенный анализ статистических свойств изменчивости параметров максимума $F2$ -слоя (критической частоты $foF2$ и высоты максимума $hmF2$) спокойной ионосферы средних широт при низкой солнечной активности в дневные (10–15 LT) и ночные (22–03 LT) часы по данным ст. Иркутск за 2007–2008 гг. позволяет сделать следующие выводы.

1. Плотность распределения $\delta foF2$ можно представить состоящей из совокупности двух отчетливо различающихся нормальных законов этого распределения, один из которых соответствует слабым ($|\delta foF2| < 10\%$), другой – сильным ($30\% > |\delta foF2| > 10\%$) флуктуациям $foF2$.

Слабые флуктуации $foF2$ в значительной степени определяются изменчивостью ионосферы на временах меньше 1–3 ч и обусловлены в основном внутренними гравитационными волнами в атмосфере с периодами примерно 10–100 мин, существующими в термосфере практически всегда. Эти флуктуации определяют изменчивость (величину стандартного отклонения) $\delta foF2$ в дневные часы. В ночные часы слабые флуктуации $foF2$ чаще отрицательны ($\delta foF2 < 0$).

Сильные флуктуации $foF2$ в основном определяются изменчивостью ионосферы ото дня ко дню при фиксированном местном времени, которая увеличивается примерно в 3 раза при переходе от дневных к ночным часам. Эти флуктуации определяют в основном изменчивость $\delta foF2$ в ночные часы. В дневные и ночные часы сильные флуктуации $foF2$ чаще положительные. Очень сильные ($|\delta foF2| > 30\%$) флуктуации в основном положительные и характерны для ночных часов. (Причины этих флуктуаций рассмотрены во второй части данной работы.)

2. В дневные и ночные часы плотность распределения $\Delta hmF2$ близка к нормальному закону распределения. Возможность аппроксимации этой плотности одним нормальным законом распределения связана с тем, что флуктуации $hmF2$ на временах меньше 1–3 ч вносят значительный вклад в слабые и сильные флуктуации $hmF2$ и днем, и ночью. Тем не менее, флуктуации $hmF2$ ото дня ко дню существенны, особенно ночью, и увеличение изменчивости $\Delta hmF2$ при переходе от дневных к ночным часам связано с этими флуктуациями. Зависимость изменчивости $\Delta hmF2$ от сезона не отчетлива.

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., Казимировский Э.С., Кокоуров В.Д., Чернобровкина Н.А. Явление F-рассеяния в ионосфере. М.: Наука, 141 с. 1984.
- Деминов М.Г., Жеребцов Г.А., Пирог О.М., Шубин В.Н. Регулярные изменения критической частоты F2-слоя спокойной ионосферы средних широт // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 49. № 3. С. 393–399. 2009.
- Зевакина Р.А., Жулина Е.М., Носова Г.Н., Сергеенко Н.П. Руководство по краткосрочному прогнозированию. М.: МГКАН СССР, 71 с. 1990.
- Крамер Г. Математические методы статистики. М.: Мир, 648 с. 1975.
- Araujo-Pradere E.A., Fuller-Rowell T.J., Codrescu M.V. STORM: An empirical storm-time ionospheric correction model, 1, Model description // Radio Sci. V. 37. № 5. P. 1070, doi:10.1029/2001RS002467. 2002.
- Araujo-Pradere E.A., Fuller-Rowell T.J., Codrescu M.V., Bilitza D. Characteristics of the ionospheric variability as a function of season, latitude, local time, and geomagnetic activity // Radio Sci. V. 40. RS5009, doi:10.1029/2004RS003179. 2005.
- 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.
- Forbes J.M., Palo S.E., Zhang X. Variability of the ionosphere // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 62. № 8. P. 685–693. 2000.
- Fuller-Rowell T.J., Araujo-Pradere E.A., Codrescu M.V. An empirical ionospheric storm-time correction model // Adv. Space Res. V. 25. № 1. P. 139–146. 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.
- Kouris S.S., Zolesi B., Fotiadis D.N., Bianchi C. On the variability within-the-hour and from hour-to-hour of the F-region characteristics above Rome // Phys. Chem. Earth (Part C). V. 25. № 4. P. 347–351. 2000.
- Mendillo M., Rishbeth H., Roble R.G., Wroten J. Modelling F2-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., Schlegel K. Equinoctial transitions in the ionosphere and thermosphere // Ann. Geophysicae. V. 19. № 7. P. 783–796. 2001.
- Mikhailov A.V., Depueva A.Kh., Leschinskaya T.Yu. Morphology of quiet time F2-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 NmF2 and NmE daytime variations as a key to the mechanism of quiet-time F2-layer disturbances // Ann. Geophysicae. V. 25. № 2. P. 483–493. 2007a.
- Mikhailov A.V., Depuev V.H., Depueva A.H. Daytime F2-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 F2-layer disturbances: seasonal variations of the occurrence in the daytime sector // Ann. Geophysicae. V. 27. № 1. P. 329–337. 2009.
- Pancheva D., Mitchell N., Clark R.R., Drojbeva J., Lastovicka J. Variability in the maximum height of the ionospheric F2-layer over Millstone Hill (September 1998–March 2000); influence from below and above // Ann. Geophysicae. V. 20. № 11. P. 1807–1819. 2002.
- Rishbeth H., Mendillo M. Patterns of F2-layer variability // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 63. № 15. P. 1661–1680. 2001.
- Rishbeth H., Mendillo M., Wroten J., Roble R.G. Day-by-day modelling of the ionospheric F2-layer for year 2002 // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 71. № 8–9. 848–856. 2009.
- Zhang S.-R., Holt J.M. Ionospheric climatology and variability from long-term and multiple incoherent scatter radar observations: variability // Ann. Geophysicae. V. 26. № 6. P. 1525–1537. 2008.
- 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 foF2 // Radio Sci. V. 24. № 1. P. 99–111. 1989.