

СВОЙСТВА ИЗМЕНЧИВОСТИ КОНЦЕНТРАЦИИ МАКСИМУМА F2-СЛОЯ НАД ИРКУТСКОМ ПРИ РАЗНЫХ УРОВНЯХ СОЛНЕЧНОЙ И ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ

PROPERTIES OF THE F2-LAYER MAXIMUM DENSITY VARIABILITY OVER IRKUTSK UNDER DIFFERENT LEVELS OF THE SOLAR AND GEOMAGNETIC ACTIVITY

М.Г. Деминов

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,
Москва, Троицк, Россия, deminov@izmiran.ru*

Г.Ф. Деминова

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,
Москва, Троицк, Россия*

Г.А. Жеребцов

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия*

Н.М. Полех

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, polekh@iszf.irk.ru*

M.G. Deminov

*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radiowave Propagation RAS,
Moscow, Troitsk, Russia, deminov@izmiran.ru*

G.F. Deminova

*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radiowave Propagation RAS,
Moscow, Troitsk, Russia*

G.A. Zherebtsov

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia*

N.M. Polekh

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, polekh@iszf.irk.ru*

Аннотация. По часовым данным ст. «Иркутск» за 1958–1992 гг. проведен анализ изменчивости электронной концентрации в максимуме F2-слоя N_m при разных уровнях солнечной и геомагнитной активности. В качестве характеристик этой изменчивости использованы стандартное отклонение $\sigma(x)$ флуктуаций N_m относительно спокойного уровня $x=(N_m/N_{m0}-1)\cdot 100\%$ и средний сдвиг этих флуктуаций x_{ave} . Для этого создана эмпирическая модель электронной концентрации N_{m0} в максимуме F2-слоя для магнитоспокойных условий. Получено, что изменчивость N_m слабо зависит от уровня солнечной активности и в первом приближении эту зависимость можно не учитывать. Зависимость изменчивости N_m от геомагнитной активности является одной из основных, наряду с зависимостями от времени суток и сезона. В целом дисперсия $\sigma^2(x)$ для спокойных условий меньше, чем для периодов высокой геомагнитной активности. Однако в периоды высокой геомагнитной активности ее дальнейший рост не приводит к увеличению дисперсии $\sigma^2(x)$. При высокой геомагнитной активности сдвиг x_{ave} в основном отрицателен, и с ростом геомагнитной активности он продолжает увеличиваться по абсолютной величине. В результате при достаточно высокой геомагнитной активности возможно выполнение условия $x_{ave}^2 > \sigma^2(x)$.

Ключевые слова: ионосфера, максимум F2-слоя, электронная концентрация, изменчивость.

Abstract. Using hourly data (1958–1992) from Irkutsk ionosonde station, we analyzed properties of variability of the F2-layer maximum density, N_m , under different levels of the solar and geomagnetic activity. The standard deviation $\sigma(x)$ of N_m fluctuations relative to the quiet level $x=(N_m/N_{m0}-1)\cdot 100\%$, and the average shift of these fluctuations x_{ave} were used as characteristics of this variability. For this purpose, the empirical model of the F2-layer maximum density for quiet magnetic conditions, N_{m0} , was constructed. The N_m variability was found to depend weakly on the solar activity level; in the first approximation, this dependence can be neglected. The N_m variability dependence on geomagnetic activity is among the principal ones, along with the dependences on local time and season. In general, dispersion $\sigma^2(x)$ under quiet conditions is smaller than that during the periods of high geomagnetic activity. During the periods of high geomagnetic activity, however, the dispersion does not increase with the further growth of this activity, while the absolute value of shift x_{ave} (which is mainly negative under high geomagnetic activity) still increases with growing geomagnetic activity. As a result, if this activity is high enough, the condition $x_{ave}^2 > \sigma^2(x)$ can be fulfilled.

Keywords: ionosphere, F2-layer maximum, electron density, variability.

ВВЕДЕНИЕ

Изменчивость концентрации максимума F2-слоя ионосферы N_m (или критической частоты $foF2 \sim N_m^{1/2}$) исследовалась неоднократно [Forbes et al., 2000;

Rishbeth, Mendillo, 2001; Araujo-Pradere et al., 2005; Fotiadis, Kouris, 2006; Altadill, 2007; Zhang, Holt, 2008; Pirog et al., 2011; Deminov et al., 2011, 2013; Ratovsky et al., 2014]. В этих работах изменчивость N_m оценивалась по величине стандартного (средне-

квадратичного) отклонения N_m относительно фона. В качестве фона выбирались средние за месяц значения N_m или foF2 [Forbes et al., 2000; Rishbeth, Mendillo, 2001; Araujo-Pradere et al., 2005], локальные модели средних за месяц значений высотного распределения концентрации электронов [Altadill, 2007; Zhang, Holt, 2008], медианы N_m или foF2 за 15 дней для периодов низкой солнечной и геомагнитной активности [Deminov et al., 2011, 2013], медианы N_m за 27 дней [Ratovsky et al., 2014] или медианы foF2 за месяц [Fotiadis, Kouris, 2006].

Среднее за месяц значение и медиана N_m зависят от геомагнитной активности. Однако эта зависимость обычно неизвестна, поэтому для сравнительных оценок изменчивости N_m при разных уровнях геомагнитной активности этих характеристик ионосферы недостаточно. Например, использование средних за месяц значений N_m в качестве фона делает невозможной оценку среднего сдвига (систематического изменения) концентрации электронов в максимуме F2-слоя при изменении геомагнитной активности. Поэтому задачу корректного определения свойств изменчивости N_m при разных уровнях геомагнитной активности нельзя считать решенной.

Более точный подход к оценке изменчивости электронной концентрации этого максимума связан с использованием в качестве фона средних значений N_m для низкой геомагнитной активности. Получение таких значений N_m сопряжено с определенными трудностями, поскольку продолжительные периоды низкой геомагнитной активности наблюдаются нечасто (см., например, [Rishbeth, Mendillo, 2001]). Один из путей решения этой проблемы связан с построением локальной эмпирической модели N_m (или foF2) для низкой геомагнитной активности по данным конкретной станции за интервал не менее 30 лет, поскольку число магнитоспокойных дней в таком большом массиве данных обычно является достаточным для построения модели [Deminov et al., 2009]. Такая модель позволила получить корректные оценки изменчивости foF2 на средних широтах при низкой геомагнитной активности [Deminov et al., 2009]. Тем не менее в первом варианте модели была принята линейная зависимость foF2 от эффективного индекса солнечной активности [Deminov et al., 2009], что не позволяло использовать ее для анализа изменчивости foF2 при высокой солнечной активности.

Целью данной работы было установление статистических свойств флуктуаций N_m относительно спокойного уровня при разных уровнях солнечной и геомагнитной активности по данным конкретной среднеширотной ионосферной станции. Одним из этапов исследования было получение локальной эмпирической модели N_m для низкой геомагнитной активности, которая была бы применима при любом уровне солнечной активности.

Ниже представлены результаты анализа данных ст. «Иркутск» (52.5° N, 104° E) за 1958–1992 гг. Эти результаты приведены в следующей последовательности: локальная модель N_m для спокойных условий, статистические свойства флуктуаций N_m относительно магнитоспокойных условий при разных уровнях

солнечной и геомагнитной активности в полдень и полночь, обсуждение этих свойств и выводы.

МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ В МАКСИМУМЕ F2-СЛОЯ ДЛЯ СПОКОЙНЫХ УСЛОВИЙ

Эмпирическая модель электронной концентрации в максимуме F2-слоя для спокойных условий N_{m0} по данным конкретной станции представляет собой набор коэффициентов $a_j (j=0, 1, 2, 3)$ уравнения регрессии

$$N_{m0}(F) = a_0 + a_1 F + a_2 F^2 + a_3 F^3, \quad (1)$$

для каждого часа мирового времени (UT) с дискретностью 1 час и месяца года M ($M=1$ — январь, $M=12$ — декабрь), где

$$F = 0.5(F_{10.7} + F_m), \quad (2)$$

$F_{10.7}$ и F_m — величина потока солнечного радиоизлучения на длине волны 10.7 см (в 10^{-22} Вт/м² Гц) за предыдущий день и среднее за 81 день значение этого потока.

Коэффициенты a_j уравнения (1) для каждого фиксированного значения UT и M определялись по массиву данных N_m конкретной станции (в данном случае это часовые значения N_m на ст. «Иркутск» за 1958–1992 гг.), из которого исключались данные, не удовлетворяющие условию

$$ap(\tau) < 9, \quad (3)$$

где $ap(\tau)$ — средневзвешенное значение ap -индекса геомагнитной активности с характерным временем $T=14$ ч; $\tau = \exp(-3/T) \approx 0.8$ [Wrenn, 1987]:

$$ap(\tau) = (1-\tau)(ap_0 + ap_{-1}\tau + ap_{-2}\tau^2 + \dots), \quad (4)$$

ap_0 , ap_{-1} и т. д. — значения ap -индекса в данный, предыдущий и т. д. трехчасовые интервалы. Условие (3) предназначено для исключения эффектов магнитных бурь в ионосфере [Wrenn, Rodger, 1989]. В качестве спокойной рассматривалась ионосфера, из которой исключены эффекты магнитных бурь.

Выбор индекса F связан с тем, что аналогичный индекс использовался как достаточно адекватный индикатор солнечной активности для ежедневных значений солнечного ультрафиолетового излучения [Richards et al., 1994, 2006] и электронной концентрации максимума F2-слоя [Lei et al., 2005; Liu et al., 2006; Ma et al., 2009].

Выбор критерия (3) спокойной ионосферы, по-видимому, является оптимальным компромиссом между стремлением исключить из рассмотрения все магнитовозмущенные периоды и сохранить достаточно большой массив данных N_{m0} для получения надежных статистических оценок коэффициентов уравнения регрессии (1). В нашем случае число значений N_{m0} по данным ст. «Иркутск» для вычисления коэффициентов уравнения (1) изменялось от 275 до 464 в зависимости от выбора мирового времени или номера месяца. Отметим, что критерий (3) почти не отличается от критерия, принятого в эмпирической модели STORM: согласно этой модели, поправка foF2 на геомагнитную

бурю отсутствует, если $ap(\tau) \leq 9$ нТл [Fuller-Rowell et al., 2000; Araujo-Pradere et al., 2002].

Для периодов низкой и средней солнечной активности ($F < 170$) свойства данной эмпирической модели N_{m0} незначительно отличаются от свойств эмпирической модели $foF2_0$ для спокойных условий [Deminov et al., 2009] с учетом зависимости $foF2 \sim N_m^{1/2}$. Поэтому здесь рассмотрена только зависимость N_{m0} от уровня солнечной активности в полдень и полночь для зимы и лета. Эта зависимость для полудня приведена на рис. 1. Там же для сравнения приведена зависимость концентрации электронов в максимуме F2-слоя от индекса F по базовой модели IRI, которая дает медиану $foF2$ (и, следовательно, медиану электронной концентрации максимума F2-слоя N_{med}) за месяц, вычисленную с использованием коэффициентов, рекомендованных Международным консультативным комитетом по радиосвязи (CCIR) [Bilitza et al., 2011]. Для наглядности принято, что индекс F для N_{m0} в данной модели совпадает с индексом F для N_{med} в модели IRI. На рис. 1 видна зимняя аномалия в N_{m0} : полуденные значения N_{m0} зимой больше, чем летом, при всех уровнях солнечной активности, и эта разница увеличивается с ростом солнечной активности. Данная закономерность связана и с тем, что для лета характерно насыщение увеличения N_{m0} с ростом F , т. е. с определенного уровня солнечной активности N_{m0} почти не увеличивается с ее дальнейшим ростом. Для зимы такое насыщение отсутствует. Эти закономерности N_{m0} , полученные по разработанной модели (1), согласуются со специально подобранными индивидуальными данными для анализа зимней аномалии в электронной концентрации максимума F2-слоя [Mikhailov, Pettone, 2011]. По современной модели IRI зимняя аномалия характерна и для медианы электронной концентрации N_{med} в максимуме F2-слоя за месяц [Bilitza et al., 2011]. В этой модели зависимость N_{med} от индекса F почти линейна (см. рис. 1). Следует отметить, что в ранних версиях модели IRI, например в модели IRI-90, было заложено условие насыщения: $N_{med}(F) = N_{med}(193)$, если $F > 193$. На рис. 1 видно, что для зимы это условие насыщения не выполнено. Концентрация в максимуме F2-слоя для спокойных условий N_{m0} отчетливо отличается от медианы N_{med} за месяц. Рисунок 1 показывает, что в полдень зимой N_{m0} меньше N_{med} при всех уровнях солнечной активности. Для лета характерна противоположная тенденция, которая наиболее отчетливо прослеживается при средней солнечной активности из-за нелинейной зависимости N_{m0} от F .

Особенности зависимостей N_{m0} и N_{med} от солнечной активности в полночь видны на рис. 2. В полночь зимой величина N_{med} практически не зависит от уровня солнечной активности. Эта зависимость для N_{m0} также очень слабая и становится заметной только при высокой солнечной активности. В полночь летом зависимости N_{m0} и N_{med} от солнечной активности достаточно отчетливо выражены и в среднем N_{m0} больше N_{med} , особенно при средней солнечной активности из-за нелинейной зависимости N_{m0} от F . Из рис. 1 и 2 видно также, что характеры зависимостей

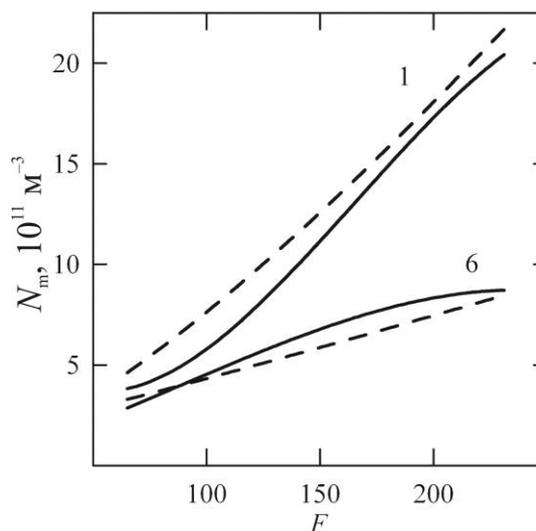


Рис. 1. Зависимость электронной концентрации в максимуме F2-слоя N_m от уровня солнечной активности F по модели (1) для спокойных условий ($N_m = N_{m0}$, сплошные линии) и по модели IRI ($N_m = N_{med}$, штриховые линии) в полдень в январе (1) и в июне (6)

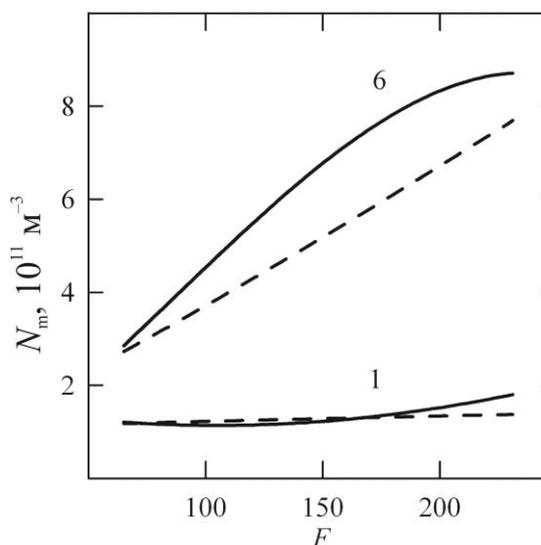


Рис. 2. Зависимость N_m от F по модели (1) для спокойных условий ($N_m = N_{m0}$, сплошные линии) и по модели IRI ($N_m = N_{med}$, штриховые линии) в полночь в январе (1) и в июне (6)

N_{m0} от солнечной активности в полдень и полночь во многом подобны для лета и существенно различаются для зимы.

Разработанная модель N_{m0} была использована для анализа свойств флуктуаций концентрации максимума F2-слоя, $x = (N_m/N_{m0} - 1) \cdot 100$ (в процентах), по данным ст. «Иркутск» за 1958–1992 гг.: выборочного стандартного отклонения $\sigma(x)$, среднеквадратичного отклонения $s(x)$ и среднего сдвига x_{ave} этих флуктуаций относительно спокойного уровня (см., например, [Тейлор, 1985]):

$$\begin{aligned} x_{ave} &= (1/n) \sum_i x_i, \\ \sigma^2(x) &= (1/n) \sum_i (x_i - x_{ave})^2, \\ s^2(x) &= (1/n) \sum_i x_i^2 = \sigma^2(x) + x_{ave}^2. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь $x_i = (N_m(i)/N_{m0} - 1) \cdot 100$, Σ_i обозначает сумми-

рование по индексу i от 1 до n , где n — число значений x данной выборки. Во всех рассмотренных ниже случаях величина $n > 100$, и поэтому можно не учитывать разницу между $n-1$ и n . Последнее из равенств (5) показывает, что квадрат среднеквадратичного отклонения x относительно спокойного уровня складывается из дисперсии $\sigma^2(x)$, которая характеризуется флуктуацией x относительно среднего значения, и квадрата этого среднего значения. Если модель (1) для спокойных условий является точной, то для этих спокойных условий $x_{\text{ave}}=0$. Следовательно, величина x_{ave} характеризует систематическое изменение (сдвиг) N_m относительно спокойного уровня при переходе от спокойных к возмущенным условиям. Величины $\sigma(x)$ и x_{ave} рассмотрены ниже в качестве основных характеристик флуктуаций N_m относительно спокойного уровня N_{m0} , поскольку величина $s(x)$ однозначно связана с $\sigma(x)$ и x_{ave} уравнением, приведенным выше.

Представленные ниже результаты анализа изменчивости концентрации максимума F2-слоя над Иркутском получены для двух значений местного времени (полдень и полночь), трех сезонов (зима — ноябрь, декабрь, январь, февраль; равноденствие — март, апрель, сентябрь, октябрь; лето — май, июнь, июль, август), для низкой ($F < 100$) и высокой ($F > 170$) солнечной активности, низкой ($ap(\tau) < 9$) и высокой ($ap(\tau) > 27$) геомагнитной активности. Выбор границ для высокой солнечной и геомагнитной активности был в значительной степени обусловлен необходимостью иметь достаточное число данных n для надежных статистических оценок, и для всех приведенных ниже случаев n было не меньше 200.

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ В МАКСИМУМЕ F2-СЛОЯ ПРИ РАЗНЫХ УРОВНЯХ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Анализ показал, что зависимость стандартного отклонения $\sigma(x)$ и среднего сдвига x_{ave} флуктуаций N_m от солнечной активности относительно слабая. Такой вывод следует и из данных, приведенных в табл. 1. Эти данные в значительной степени характеризуют точность модели (1) для спокойных условий, поскольку получены, как и модель (1), для $ap(\tau) < 9$. Из табл. 1 можно видеть, что для любого уровня солнечной активности выполняется условие $\sigma^2(x) \gg x_{\text{ave}}^2$, т. е. систематическая ошибка модели является относительно низкой и в большинстве случаев не превышает 3–5 %. Максимальная систематическая ошибка модели наблюдается при высокой солнечной активности для случаев, когда зависимость N_{m0} от F является относительно слабой: в полдень летом ($x_{\text{ave}} = -4.2$ %) и в полночь зимой ($x_{\text{ave}} = -6.2$ %). В полдень величина $\sigma(x)$ слабо зависит не только от солнечной активности, но и от сезона: в среднем $\sigma(x)$ изменяется в пределах 15–18 % во все сезоны при любом уровне солнечной активности. Зимой в полночь изменчивость спокойной ионосферы больше, чем летом, при любом уровне

солнечной активности. Это видно по значениям $\sigma(x)$ и x_{ave} (табл. 1). Для равноденствия и лета данная тенденция выражена менее отчетливо. При получении данных в табл. 2 не накладывалось никаких ограничений на уровень солнечной активности F , поскольку зависимость N_m от геомагнитной активности более отчетлива, чем от солнечной активности. Можно видеть (табл. 2), что во все сезоны в полдень и полночь стандартное отклонение $\sigma(x)$ при высокой геомагнитной активности больше, чем при низкой, примерно в 1.5–2 раза. В полдень и полночь зимой высокой геомагнитной активности соответствует положительный сдвиг ($x_{\text{ave}} > 0$), когда происходит увеличение N_m относительно спокойного уровня (положительная фаза бури). В полдень и полночь в равноденственный и летний периоды высокой геомагнитной активности соответствует отрицательный сдвиг ($x_{\text{ave}} < 0$), когда происходит уменьшение N_m относительно спокойного уровня (отрицательная фаза бури). Амплитуда этой отрицательной фазы максимальна для лета, когда при высокой геомагнитной активности выполняется условие $x_{\text{ave}}^2 > \sigma^2(x)$, т. е. средний сдвиг флуктуаций N_m относительно спокойного уровня превышает стандартное отклонение этих флуктуаций по абсолютной величине. Это означает также, что среднеквадратичное отклонение $s(x)$ заметно больше стандартного отклонения $\sigma(x)$ для лета при высокой геомагнитной активности, когда $s(x)$ становится более точной, чем $\sigma(x)$, характеристикой изменчивости N_m относительно спокойного уровня.

Условие $ap(\tau) > 27$ соответствует периодам интенсивных магнитосферных суббурь. Условие $ap(\tau) > 48$ соответствует периодам магнитных бурь. Принятый здесь критерий для магнитных бурь аналогичен используемому в центрах прогноза космической погоды, где считают, что магнитная активность $K_p \geq 5$ (или $ap \geq 48$) соответствует магнитной буре (см., например, [http://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation]). Интенсивные суббури происходят гораздо чаще магнитных бурь. Например, общее число значений N_m в полдень из массива данных ст. «Иркутск» за 1958–1992 гг. равно 1289 для $ap(\tau) > 27$ и 337 для $ap(\tau) > 48$. Для полуночи эти числа равны 1164 для $ap(\tau) > 27$ и 294 для $ap(\tau) > 48$. Таким образом, условие $ap(\tau) > 27$ соответствует в основном периодам интенсивных магнитосферных суббурь. Статистически обоснованные оценки $\sigma(x)$ и x_{ave} для периодов магнитных бурь ($ap(\tau) > 48$) по этим данным возможны только без разделения на уровни солнечной активности и сезоны. Эти оценки приведены в табл. 3. Видно (табл. 3), что среднегодовые значения $\sigma(x)$ для интенсивных суббурь ($ap(\tau) > 27$) и магнитных бурь ($ap(\tau) > 48$) практически совпадают и не зависят от местного времени. Средний сдвиг x_{ave} флуктуаций N_m относительно спокойного уровня N_{m0} отрицателен для периодов интенсивных магнитосферных суббурь и магнитных бурь, абсолютная величина этого сдвига для магнитных бурь заметно больше, чем для суббурь. Следовательно, в среднем для периодов высокой геомагнитной активности дальнейший ее рост

Таблица 1

Стандартное отклонение $\sigma(x)$ и средний сдвиг x_{ave} флуктуаций N_m относительно спокойного уровня над ст. «Иркутск» при низкой геомагнитной активности ($ap(\tau) < 9$) в полдень (LT=12) и полночь (LT=24) для трех сезонов (зима, равноденствие, лето) при низкой ($F < 100$) и высокой ($F > 170$) солнечной активности

Сезон	LT=12				LT=24			
	$F < 100$		$F > 170$		$F < 100$		$F > 170$	
	$\sigma(x), \%$	$x_{ave}, \%$						
Зима	18.8	-0.9	15.1	1.2	31.1	-2.4	22.9	-6.2
Равноденствие	16.2	3.0	15.6	1.7	21.2	-1.8	15.1	-2.9
Лето	14.4	-1.6	18.5	-4.2	18.8	0.6	11.5	0.3

Таблица 2

Стандартное отклонение $\sigma(x)$ и средний сдвиг x_{ave} флуктуаций N_m относительно спокойного уровня над ст. «Иркутск» в полдень (LT=12) и полночь (LT=24) при низкой ($ap(\tau) < 9$) и высокой ($ap(\tau) > 27$) геомагнитной активности для трех сезонов (зима, равноденствие, лето) и всего года (год)

Сезон	LT=12				LT=24			
	$ap(\tau) < 9$		$ap(\tau) > 27$		$ap(\tau) < 9$		$ap(\tau) > 27$	
	$\sigma(x), \%$	$x_{ave}, \%$						
Зима	17.5	-1.2	27.9	6.4	28.0	-3.1	40.6	3.00
Равноденствие	15.8	2.7	30.0	-18.4	18.4	-0.2	28.3	-23.7
Лето	16.3	-2.4	24.8	-28.9	16.3	0.7	21.4	-30.0
Год	16.7	-0.5	31.2	-14.2	21.6	-0.8	32.8	-18.9

Таблица 3

Стандартное отклонение $\sigma(x)$ и средний сдвиг x_{ave} флуктуаций N_m относительно спокойного уровня над ст. «Иркутск» при $ap(\tau) > 27$ и $ap(\tau) > 48$ в полдень (LT=12) и полночь (LT=24) для всего года без разделения на сезоны

LT	$ap(\tau) > 27$		$ap(\tau) > 48$	
	$\sigma(x), \%$	$x_{ave}, \%$	$\sigma(x), \%$	$x_{ave}, \%$
12	31.2	-14.2	31.8	-28.7
24	32.8	-18.9	32.3	-35.7

приводит к увеличению отрицательного сдвига флуктуаций электронной концентрации в максимуме F2-слоя относительно спокойного уровня без изменения величины дисперсии этих флуктуаций.

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты анализа показывают, что статистические свойства флуктуаций электронной концентрации максимума F2-слоя N_m относительно спокойного уровня N_{m0} , т. е. величины $x = (N_m/N_{m0} - 1) \cdot 100$, определяются дисперсией $\sigma^2(x)$ и средним сдвигом x_{ave} этих флуктуаций. Здесь величина N_{m0} определена по эмпирической модели (1), основанной на критерии (3) спокойных условий.

Дисперсия $\sigma^2(x)$ для спокойных условий, по-видимому, обусловлена флуктуациями N_m относительно спокойного уровня из-за внутренних процессов в атмосфере (внутренние гравитационные волны, планетарные волны и приливы) [Forbes et al., 2000; Rishbeth, Mendillo, 2001]. Критерий (3) выбора спокойных условий не позволяет исключить эффекты в ионосфере из-за относительно слабых и кратковременных магнитосферных суббурь, которые возникают практически ежедневно. Эти эффекты являются достаточно важной дополнительной причиной изменчивости спокойной ионосферы (см., например, [Pirog et al., 2011]).

В среднем изменчивость индекса геомагнитной активности гораздо больше изменчивости индекса солнечной активности: $\sigma(ap) \approx 60-80 \%$, $\sigma(F10.7) \approx 10-15 \%$ (см., например, [Deminov et al., 2011]). Поэтому на средних широтах изменчивость электронной концентрации в максимуме F2-слоя практически не зависит от изменчивости солнечной активности [Rishbeth, Mendillo, 2001]. Слабая зависимость стандартного отклонения $\sigma(x)$ и среднего сдвига x_{ave} флуктуаций N_m от солнечной активности связана именно с этим (см. табл. 1).

Для низкой солнечной и геомагнитной активности величина $\sigma(x)$ больше зимой, чем летом и в равноденствие, и во все сезоны в полночь больше, чем в полдень (см. табл. 1), что согласуется с полученными ранее оценками [Forbes et al., 2000; Rishbeth, Mendillo, 2001; Araujo-Pradere et al., 2005; Deminov et al., 2011]. Величина $\sigma(x)$ максимальна зимой в полночь при любом уровне геомагнитной активности (см. табл. 1 и 2). Это свойство ионосферы отмечалось и ранее (см., например, [Araujo-Pradere et al., 2005]). Зимой в полночь величина N_m в значительной степени определяется диффузионными потоками ионосферной плазмы между сопряженными областями ионосферы (см., например, [Кринберг, Тащилин, 1984]), и относительно сильная изменчивость ночной зимней ионосферы, по-видимому, обусловлена изменчивостью этих потоков плазмы.

В целом дисперсия $\sigma^2(x)$ для спокойных условий меньше, чем для периодов высокой геомагнитной активности. Однако в периоды высокой геомагнитной активности ($ap(\tau) > 27$) ее дальнейший рост не приводит к увеличению дисперсии $\sigma^2(x)$. Такое своеобразное насыщение в увеличении дисперсии флуктуаций электронной концентрации в максимуме F2-слоя установлено, по-видимому, впервые. Чем обусловлено это свойство ионосферы, нам неизвестно.

Для спокойных условий средний сдвиг x_{ave} флуктуаций N_m относительно спокойного уровня N_{m0} практически отсутствует ($\sigma^2(x) \gg x_{ave}^2$), что характеризует качество разработанной модели N_{m0} для спокойных условий. Для периодов высокой геомагнитной активности он отражает бурю в ионосфере, т. е. систематические изменения N_m относительно спокойного уровня в эти периоды. Общие закономерности бури в ионосфере средних широт известны (см., например, [Bounsanto, 1999]): положительная фаза ($x_{ave} > 0$) чаще всего наблюдается зимой в дневные часы, отрицательная фаза ($x_{ave} < 0$) максимальна летом в ночные часы. В среднем отрицательная фаза становится преобладающей закономерностью бури в ионосфере для продолжительных периодов высокой геомагнитной активности. Эти же закономерности видны и из табл. 2. В среднем геомагнитная активность повышена. Разница между электронной концентрацией в максимуме F2-слоя для спокойных условий N_{m0} и медианой N_{med} отражает это свойство геомагнитной активности: в среднем в полдень и полночь летом $N_{med} < N_{m0}$ аналогично отрицательной фазе бури, но с меньшей амплитудой; в полдень зимой $N_{med} > N_{m0}$ аналогично положительной фазе бури в ионосфере (см. рис. 1, 2 и табл. 2). Поэтому модель STORM [Araujo-Pradere et al., 2002], которая дает поправку к foF2 на геомагнитную бурю относительно медианы foF2, недостаточно точно отражает ионосферную бурю в foF2 как отклонение foF2 от спокойного уровня.

Отсутствие насыщения в величине сдвига x_{ave} для отрицательной фазы бури в ионосфере (см. табл. 3), т. е. продолжающееся уменьшение N_m с ростом геомагнитной активности, отмечалось и ранее (см., например, [Bounsanto, 1999]). Насыщение в увеличении дисперсии $\sigma^2(x)$ при продолжающемся увеличении геомагнитной активности и отсутствие этого насыщения для среднего сдвига x_{ave} приводят к тому, что в среднем условие $x_{ave}^2 > \sigma^2(x)$ выполняется в полночь в периоды магнитных бурь, когда $ap(\tau) > 48$ (см. табл. 3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе часовых данных ст. «Иркутск» за 1958–1992 гг. проведен анализ свойств изменчивости концентрации электронов в максимуме F2-слоя N_m в зависимости от солнечной и геомагнитной активности. В качестве характеристик изменчивости использованы стандартное отклонение $\sigma(x)$ флуктуаций N_m относительно спокойного уровня ($x = (N_m/N_{m0} - 1) \cdot 100$ [%]) и средний сдвиг этих флуктуаций x_{ave} . Создана эмпирическая модель электронной концентрации N_{m0} в максимуме F2-слоя для магнитоспокойных условий, которая дает нелинейную зависимость N_{m0} от уровня солнечной активности для каждого часа мирового времени и каждого месяца года.

Получено, что изменчивость N_m слабо зависит от уровня солнечной активности и в первом приближении эту зависимость можно не учитывать. Зависимость изменчивости N_m от геомагнитной активности является одной из основных, наряду с зависимостями

от времени суток и сезона. В целом дисперсия $\sigma^2(x)$ для спокойных условий меньше, чем для периодов высокой геомагнитной активности. Однако в периоды высокой геомагнитной активности дальнейший рост геомагнитной активности не приводит к увеличению дисперсии $\sigma^2(x)$. Причина такого насыщения в увеличении $\sigma^2(x)$ неизвестна. Средний сдвиг x_{ave} флуктуаций N_m относительно спокойного уровня N_{m0} в основном отрицателен для периодов интенсивных суббурь и магнитных бурь, абсолютная величина этого сдвига для магнитных бурь заметно больше, чем для суббурь. Следовательно, в среднем для периодов высокой геомагнитной активности дальнейший ее рост приводит к увеличению отрицательного сдвига флуктуаций электронной концентрации в максимуме F2-слоя относительно спокойного уровня без изменения дисперсии этих флуктуаций. В результате для периодов высокой геомагнитной активности возможно выполнение условия $x_{ave}^2 > \sigma^2(x)$.

Работа частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (гранты № 14-05-00179 и № 14-05-00259).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Кринберг И.А., Тащилин А.В. Ионосфера и плазма-сфера. М.: Наука, 1984. 189 с.
- Тейлор Дж. Введение в теорию ошибок: пер. с англ. М.: Мир, 1985. 272 с.
- Altadill D. Time/altitude electron density variability above Ebro, Spain // *Adv. Space Res.* 2007. V. 39. P. 962–969.
- Araujo-Pradere E.A., Fuller-Rowell T.J., Codrescu M.V. STORM: An empirical Storm-Time Ionospheric Correction Model. 1. Model description // *Radio Sci.* 2002. V. 37. P. 1070. DOI: 10.1029/2001RS002467.
- 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 // *Ibid.* 2005. V. 40. RS5009. DOI: 10.1029/2004RS003179.
- Bilitza D., McKinnell L.-A., Reinisch B., Fuller-Rowell T. The international reference ionosphere today and in the future // *J. Geodesy.* 2011. V. 85. P. 909–920.
- Buonsanto M.J. Ionospheric storms: A review // *Space. Sci. Rev.* 1999. V. 88. P. 563–601.
- Deminov M.G., Zhrebtsov G.A., Pirog O.M., Shubin V.N. Regular changes in the critical frequency of the F2 layer of the quiet midlatitude ionosphere // *Geomagnetism and Aeronomy.* 2009. V. 49. P. 374–380.
- Deminov M.G., Deminova G.F., Zhrebtsov G.A., et al. Variability of parameters of the F2-layer maximum in the quiet midlatitude ionosphere under low solar activity: 1. Statistical properties // *Ibid.* 2011. V. 51. P. 348–355.
- Deminov M.G., Deminova G.F., Zhrebtsov G.A., Polekh N.M. Statistical properties of variability of the quiet ionosphere F2-layer maximum parameters over Irkutsk under low solar activity // *Adv. Space Res.* 2013. V. 51. P. 702–711.
- Forbes J.M., Palo S.E., Zhang X. Variability of the ionosphere // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2000. V. 62. P. 685–693.
- Fotiadis D.N., Kouris S.S. A functional dependence of foF2 variability on latitude // *Adv. Space Res.* 2006. V. 37. P. 1023–1028.
- Lei J., Liu L., Wan W., Zhang S.-R. Variations of electron density based on long-term incoherent scatter radar and ionosonde measurements over Millstone Hill // *Radio Sci.* 2005. V. 40. RS2008. DOI: 10.1029/2004RS003106.

Liu L., Wan W., Ning B., et al. Solar activity variations of the ionospheric peak electron density // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. A08304. DOI: 10.1029/2006JA011598.

Ma R., Xu J., Wang W., Yuan W. Seasonal and latitudinal differences of the saturation effect between ionospheric N_mF2 and solar activity indices // *Ibid.* 2009. V. 114. A10303. DOI: 10.1029/2009JA014353.

Mikhailov A.V., Perrone L. On the mechanism of seasonal and solar cycle N_mF2 variations: A quantitative estimate of the main parameters contribution using incoherent scatter radar observations // *Ibid.* 2011. V. 116. A03319. DOI: 10.1029/2010JA016122.

Pirog O., Deminov M., Deminova G., et al. Peculiarities of the nighttime winter foF2 increase over Irkutsk // *Adv. Space Res.* 2011. V. 47. P. 921–929.

Ratovsky K.G., Medvedev A.V., Tolstikov M.V. Diurnal, seasonal and solar activity pattern of ionospheric variability from Irkutsk Digisonde data // *Ibid.* 2014. DOI: org/10.1016/j.asr.2014.08.001.

Richards P.G., Fennelly J.A., Torr D.G. EUVAC: A solar EUV flux model for aeronomic calculations // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99. P. 8981–8992.

Richards P.G., Woods T.N., Peterson W.K. HEUVAC: A new high resolution solar EUV proxy model // *Adv. Space Res.* 2006. V. 37. P. 315–322.

Rishbeth H., Mendillo M. Patterns of F2-layer variability // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2001. V. 63. P. 1661–1680.

Wrenn G.L. Time-weighted accumulations $ap(\tau)$ and $K_p(\tau)$ // *J. Geophys. Res.* 1987. V. 92. P. 10125–10129.

Wrenn G.L., Rodger A.S. Geomagnetic modification of the mid-latitude ionosphere – Toward a strategy for the improved forecasting of foF2 // *Radio Sci.* 1989. V. 24. P. 99–111.

Zhang S.-R., Holt J.M. Ionospheric climatology and variability from long-term and multiple incoherent scatter radar observations: Variability // *Ann. Geophys.* 2008. V. 26. P. 1525–1537.

URL: <http://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>.

REFERENCES

Altadill D. Time/altitude electron density variability above Ebro, Spain. *Adv. Space Res.* 2007, vol. 39, pp. 962–969.

Araujo-Pradere E.A., Fuller-Rowell T.J., Codrescu M.V. STORM: An empirical Storm-Time Ionospheric Correction Model. 1. Model description. *Radio Sci.* 2002, vol. 37, pp. 1070. DOI: 10.1029/2001RS002467.

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.* 2005, vol. 40, RS5009. DOI: 10.1029/2004RS003179.

Bilitza D., McKinnell L.-A., Reinisch B., Fuller-Rowell T. The international reference ionosphere today and in the future. *J. Geodesy.* 2011, vol. 85, pp. 909–920.

Buonsanto M.J. Ionospheric storms: A review. *Space. Sci. Rev.* 1999, vol. 88, pp. 563–601.

Deminov M.G., Zherebtsov G.A., Pirog O.M., Shubin V.N. Regular changes in the critical frequency of the F2 layer of the quiet midlatitude ionosphere. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2009, vol. 49, pp. 374–380.

Deminov M.G., Deminova G.F., Zherebtsov G.A., Pirog O.M., Polekh N.M. Variability of parameters of the F2-layer maximum in the quiet midlatitude ionosphere under low solar activity: 1. Statistical properties. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2011, vol. 51, pp. 348–355.

Deminov M.G., Deminova G.F., Zherebtsov G.A., Polekh N.M. Statistical properties of variability of the quiet ionosphere F2-layer maximum parameters over Irkutsk under low solar activity. *Adv. Space Res.* 2013, vol. 51, pp. 702–711.

Forbes J.M., Palo S.E., Zhang X. Variability of the ionosphere. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2000, vol. 62, pp. 685–693.

Fotiadis D.N., Kouris S.S. A functional dependence of foF2 variability on latitude. *Adv. Space Res.* 2006, vol. 37, pp. 1023–1028.

Krinberg I.A., Tashchilin A.V. Ionosfera i plazmosfera [Ionosphere and Plasmosphere]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 189 p. (in Russian).

Lei J., Liu L., Wan W., Zhang S.-R. Variations of electron density based on long-term incoherent scatter radar and ionosonde measurements over Millstone Hill. *Radio Sci.* 2005, vol. 40, RS2008. DOI: 10.1029/2004RS003106.

Liu L., Wan W., Ning B., Pirog O.M., Kurkin V.I. Solar activity variations of the ionospheric peak electron density. *J. Geophys. Res.* 2006, vol. 111, A08304. DOI: 10.1029/2006JA011598.

Ma R., Xu J., Wang W., Yuan W. Seasonal and latitudinal differences of the saturation effect between ionospheric N_mF2 and solar activity indices. *J. Geophys. Res.* 2009, vol. 114, A10303. DOI: 10.1029/2009JA014353.

Mikhailov A.V., Perrone L. On the mechanism of seasonal and solar cycle N_mF2 variations: A quantitative estimate of the main parameters contribution using incoherent scatter radar observations. *J. Geophys. Res.* 2011, vol. 116, A03319. DOI: 10.1029/2010JA016122.

Pirog O., Deminov M., Deminova G., Zherebtsov G., Polekh N. Peculiarities of the nighttime winter foF2 increase over Irkutsk. *Adv. Space Res.* 2011, vol. 47, pp. 921–929.

Ratovsky K.G., Medvedev A.V., Tolstikov M.V. Diurnal, seasonal and solar activity pattern of ionospheric variability from Irkutsk Digisonde data. *Adv. Space Res.* 2014, DOI: org/10.1016/j.asr.2014.08.001.

Richards P.G., Fennelly J.A., Torr D.G. EUVAC: A solar EUV flux model for aeronomic calculations. *J. Geophys. Res.* 1994, vol. 99, pp. 8981–8992.

Richards P.G., Woods T.N., Peterson W.K. HEUVAC: A new high resolution solar EUV proxy model. *Adv. Space Res.* 2006, vol. 37, pp. 315–322.

Rishbeth H., Mendillo M. Patterns of F2-layer variability. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2001, vol. 63, pp. 1661–1680.

Taylor J.R. Vvedenie v teoriyu oshibok [An introduction to error analysis]. Moscow, Mir Publ., 1985. 272 p. (Eng. ed.: Taylor J.R. An introduction to error analysis. California, Univer. Sci. Books, 1982).

Wrenn G.L. Time-weighted accumulations $ap(\tau)$ and $K_p(\tau)$. *J. Geophys. Res.* 1987, vol. 92, pp. 10125–10129.

Wrenn G.L., Rodger A.S. Geomagnetic modification of the mid-latitude ionosphere – Toward a strategy for the improved forecasting of foF2. *Radio Sci.* 1989, vol. 24, pp. 99–111.

Zhang S.-R., Holt J.M. Ionospheric climatology and variability from long-term and multiple incoherent scatter radar observations: Variability. *Ann. Geophys.* 2008, vol. 26, pp. 1525–1537.

Available at: <http://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>.