

ОЧЕНЬ СИЛЬНЫЕ УВЕЛИЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ В МАКСИМУМЕ F2-СЛОЯ ЗИМНЕЙ НОЧНОЙ ИОНОСФЕРЫ НАД ИРКУТСКОМ

¹М.Г. Деминов, ¹Г.Ф. Деминова, ²Г.А. Жеребцов, ²О.М. Пирог[†], ²Н.М. Полех

VERY INTENSE ELECTRON DENSITY ENHANCEMENTS OF THE F2 LAYER MAXIMUM OF THE WINTER NIGHT IONOSPHERE OVER IRKUTSK

¹М.Г. Deminov, ¹Г.Ф. Deminova, ²Г.А. Zherebtsov, ²О.М. Pirog[†], ²Н.М. Polekh

На основе статистического анализа данных ионосферной станции Иркутск (52.5° N, 104° E) за 1958–1992, 2002–2009 гг. получено, что зимой в ночные часы (02–04 LT) очень сильные увеличения электронной концентрации в максимуме F2-слоя N_m (более чем в два раза превышающие фоновое значение) наблюдались в 1–3 % случаев. Значительная часть таких увеличений N_m соответствовала периодам магнитосферных суббурь. Очень сильные увеличения N_m при низкой геомагнитной активности чаще соответствовали низкой солнечной активности. В периоды магнитных бурь такие увеличения N_m наблюдались только при высокой солнечной активности. Наиболее ярким примером очень сильного увеличения N_m было событие 19.12.2008 г., когда ночной максимум N_m достиг значения, характерного для дневного максимума N_m . Данна качественная интерпретация статистических свойств очень сильных увеличений N_m и обсуждены возможные причины экстремального увеличения N_m 19.12.2008 г.

The statistical analysis of the ionospheric data from the station Irkutsk (52.5° N, 104° E) in 1958–1992 and 2002–2009 revealed a very dramatic increase in the electron density of the F2 layer maximum N_m (exceeding the doubled background) in 1–3 % of observations made during winter nights (02–04 LT). Most of increases corresponded to the periods of magnetospheric substorms. Very dramatic N_m increases during the periods of low geomagnetic activity usually corresponded to low solar activity. In the course of magnetic storms, such N_m increases were observed only during high solar activity. The most striking example of the very dramatic N_m increases was the event of 19 December 2008 when the nighttime N_m maximum reached a value typical of the daytime N_m maximum. We present qualitative interpretation of statistical properties of the very dramatic N_m increases and discuss possible causes of the extreme N_m increase on 19 December 2008.

Введение

Ночное увеличение электронной концентрации максимума F2-слоя ионосферы (N_m) – хорошо известное явление, которое наиболее часто наблюдается на средних широтах зимой в послеполуночные часы при низкой солнечной активности (например, [Farelo et al., 2002]). Из эмпирической модели [Деминов и др., 2009] также следует, что зимнее послеполуночное увеличение N_{m0} (индекс 0 соответствует спокойным (фоновым) условиям) является регулярной закономерностью спокойной ионосферы над Иркутском. На средних широтах зимой в ночные часы иногда могут наблюдаться очень сильные увеличения N_m (более чем в 2 раза) относительно фонового значения N_{m0} [Park, 1971; Данилов и др., 1985; Mikhailov, Förster, 1999; Richards et al., 2000; Belehaki, Tsagouri, 2002; Tsagouri, Belehaki, 2002]. Это соответствует кардинальной перестройке ионосферы, поскольку обычно очень сильное увеличение N_m/N_{m0} происходит на фоне ночного зимнего увеличения N_{m0} . Известные результаты анализа наблюдений $N_m/N_{m0}>2$ основаны на единичных случаях без статистического анализа частоты возникновения таких событий и зависимости этой частоты от солнечной и геомагнитной активностей [Park, 1971; Данилов и др., 1985; Mikhailov, Förster, 1999; Richards et al., 2000; Belehaki, Tsagouri, 2002; Tsagouri, Belehaki, 2002].

Такой статистический анализ по данным ст. Иркутск за 1958–1992 и 2002–2009 гг. был основной целью данной работы. Ниже последовательно представлены результаты статистического анализа частоты возникновения условия $N_m/N_{m0}>2$ и пример экстремально сильного увеличения N_m .

Частота возникновения очень сильных увеличений N_m F2

Исходными для анализа были ежечасные данные

электронной концентрации в максимуме слоя F2 (N_m) ст. Иркутск за 1958–1992 и 2002–2009 гг. для зимы (декабрь и январь) в интервале местного времени 02–04 LT, который соответствует максимуму ночного зимнего увеличения электронной концентрации для фоновых условий. Фоновые значения N_{m0} задавались с помощью эмпирической модели f_0F2 для спокойных условий над Иркутском [Деминов и др., 2009]. В качестве индикаторов солнечной и геомагнитной активности использованы индексы

$$F=(2F_{81}+F_1)/3 \text{ и } A_{pt},$$

где F_1 и F_{81} – поток солнечного радиоизлучения на длине волны 10.7 см в предыдущий день и среднее за 81 день значение этого потока (в 10^{-22} Вт/(m^2 Гц)), A_{pt} – средневзвешенное (с характерным временем 11 ч) значение A_p -индекса геомагнитной активности (в нТл). Эти индексы почти не отличаются от использованных в модели [Деминов и др., 2009].

В табл. 1 приведены результаты статистического анализа частоты возникновения условия $N_m/N_{m0}>2$ над Иркутском (n/N) в интервалах (n/N) 1958–1992, 2002–2009 гг. зимой в ночные часы (02–04 LT) при низкой ($F<100$), средней ($100<F<170$) и высокой ($F>170$) солнечной активности в периоды низкой геомагнитной активности ($A_{pt}<7$ нТл), магнитосферных суббурь ($7<A_{pt}<27$ нТл) и бурь ($A_{pt}>27$ нТл) и без разделения по уровню геомагнитной активности (все A_{pt}), где n – число таких увеличений из полного числа измерений N . Из табл. 1 можно видеть, что суммарное число наблюдений N равнялось 6960, из них только в 136 случаях выполнялось условие $N_m/N_{m0}>2$, т. е. в среднем это условие реализовывалось примерно в 2 % случаев наблюдений. Значительная часть наблюдений $N_m/N_{m0}>2$ соответствовала периодам суббурь. Очень сильные увеличения N_m при низкой

Таблица 1

Частота появления (n/N) очень сильных увеличений N_m над Иркутском зимой в ночные часы (02–04 LT) для различных интервалов солнечной (F) и геомагнитной (A_{pt} , нТл) активности

F	$(n/N) 100, \%$				N
	$A_{pt} < 7$	$7 < A_{pt} < 27$	$A_{pt} > 27$	все A_{pt}	
$F < 100$	0.6	1.4	0.0	2.0	3113
$100 < F < 170$	0.1	0.9	0.0	1.0	2068
$F > 170$	0.2	2.2	0.6	3.0	1779

геомагнитной активности чаще соответствовали низкой солнечной активности. Такие увеличения N_m в периоды магнитных бурь наблюдались только при высокой солнечной активности.

В анализируемых интервалах 1958–1992, 2002–2009 гг. зимой в ночные часы суббури возникали наиболее часто (59 % случаев), низкая геомагнитная активность наблюдалась реже (34 % случаев), бури – очень редко (7 % случаев). По-видимому, в этом одна из причин того, что в среднем очень сильные увеличения N_m часто возникают в периоды суббури, реже – при низкой геомагнитной активности и очень редко – в периоды бурь. Тем не менее, нет полного соответствия между частотой наблюдения очень сильных ночных увеличений N_m при определенном уровне геомагнитной активности и вероятностью возникновения этой активности. Например, при низкой геомагнитной активности частота возникновения условия $N_m/N_{m0} > 2$ и вероятность возникновения этой активности увеличиваются при переходе от высокой к низкой солнечной активности, но для частоты возникновения условия $N_m/N_{m0} > 2$ такое увеличение более значительно. Следовательно, существует дополнительная причина повышенной частоты возникновения условия $N_m/N_{m0} > 2$ при низкой солнечной и геомагнитной активности, которая не связана с вероятностью возникновения этих гео- и геофизических условий. Поиск этой дополнительной причины – предмет будущих исследований.

В табл. 2 (для анализируемого интервала 1958–1992, 2002–2009 гг.) приведены даты наблюдения очень сильных увеличений N_m над Иркутском зимой в ночные часы при низкой солнечной активности, значения уровней солнечной и геомагнитной активности и максимальные в интервале 19–21 UT величины N_m/N_{m0} в эти дни. Отметим, что для ст. Иркутск 19–21 UT примерно равно 02–04 LT. Приведенные в таблице данные подтверждают результаты статистического анализа: зимой при низкой солнечной активности очень сильные ночные увеличения N_m соответствовали спокойным периодам или периодам суббури ($0 \leq A_{pt} \leq 24$ нТл). Наиболее сильные увеличения N_m зарегистрированы 11.12.1965 г. ($N_m/N_{m0} = 2.65$), 15.12.1986 г. ($N_m/N_{m0} = 2.81$) и 19.12.2008 г. ($N_m/N_{m0} = 2.92$), причем самое сильное увеличение N_m/N_{m0} наблюдалось при самой низкой солнечной и геомагнитной активности: $F = 79$, 73 и 69 , $A_{pt} = 13$, 12 и 03 нТл для 11.12.1965, 15.12.1986 и 19.12.2008 г. соответственно. Дополнительный анализ показывает, что для очень широкого диапазона изменений солнечной активности ($F < 230$) без ограничения по уровню геомагнитной активности, т. е. почти

Таблица 2

Очень сильные ночные (19–21 UT, 02–04 LT) увеличения концентрации максимума F2-слоя ($N_m/N_{m0} > 2$) зимой над Иркутском при низкой солнечной активности ($F < 100$) без ограничения по уровню геомагнитной активности (A_{pt} , нТл)

Дата	F	A_{pt}	N_m/N_{m0}
09.12.1962	83	07	2.53
11.12.1962	81	10	2.34
13.01.1963	80	15	2.29
11.12.1965	79	13	2.65
12.12.1965	79	12	2.55
05.01.1966	82	13	2.41
06.12.1973	81	19	2.48
21.01.1975	78	09	2.06
07.01.1976	74	19	2.03
18.12.1976	76	19	2.53
08.01.1977	76	06	2.01
07.01.1985	74	05	2.03
19.01.1986	76	06	2.56
15.12.1986	73	12	2.81
19.12.1986	73	07	2.21
20.12.1986	73	07	2.11
22.12.1986	73	14	2.11
16.01.1987	72	08	2.58
29.12.2004	99	24	2.07
20.12.2005	88	16	2.29
01.01.2006	86	12	2.13
29.01.2007	82	08	2.16
19.12.2008	69	03	2.92
24.12.2008	69	13	2.37
10.01.2009	70	07	2.35
09.12.2009	75	01	2.16
10.12.2009	76	00	2.53
20.12.2009	80	02	2.01
26.12.2009	77	05	2.16
31.12.2009	79	00	2.36
02.01.2010	79	01	2.05

для всего анализируемого массива данных, условие $N_m/N_{m0} \geq 2.9$ было выполнено только 19.12.2008 г.

Анализ показал, что увеличение N_m в ночные часы 19.12.2008 г. было настолько сильным, что ночной максимум N_m достиг фоновых значений дневного максимума N_m . Такая ситуация названа экстремальным увеличением N_m в ночные часы зимой. Отметим, что экстремальное увеличение N_m не наблюдалось ни в одном из случаев, приведенных в работах [Park, 1971; Данилов и др., 1985; Mikhailov, Förster, 1999; Richards et al., 2000; Belehaki, Tsagouri, 2002; Tsagouri, Belehaki, 2002], т. е. ночной максимум N_m обычно был отчетливо меньше типичного для спокойных условий дневного максимума N_m . Ниже приведены свойства и качественный анализ возможных причин экстремального увеличения N_m .

Экстремальное увеличение $N_m F2$

Для анализа свойств экстремального увеличения $N_m = N_m F2$ 19.12.2008 г. были взяты N_m и высоты h_m максимума F2-слоя. По этим данным были вычислены их спокойные медианы (N_{m0} и h_{m0}), т. е.

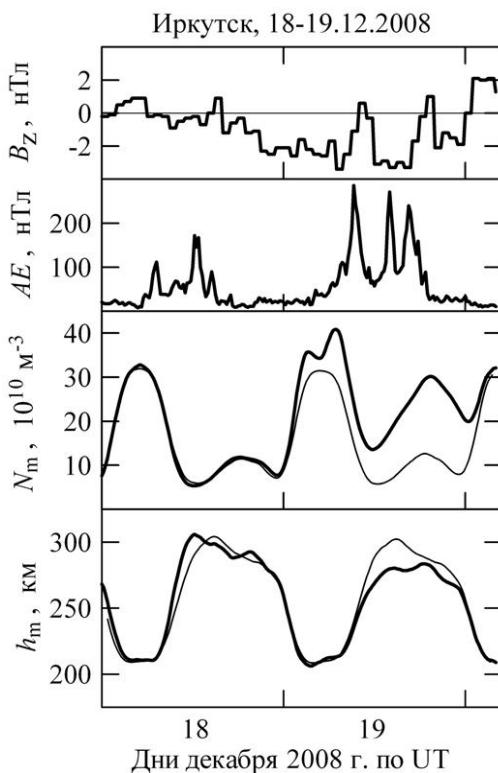
медианные значения для геомагнитно-спокойных условий:

$$A_{\text{pt}} < 7 \text{ нТл}, AE_{\text{max}} < 300 \text{ нТл},$$

где AE_{max} – максимальное значение 15-минутного AE -индекса за предыдущие 6 ч. Исходными для вычисления этих индексов были трехчасовые данные A_p и однominутные данные AE , взятые на сайте <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>. Эти спокойные медианы были использованы в качестве фоновых значений параметров максимума F2-слоя.

Флуктуации параметров максимума F2-слоя включают высокочастотную (на временах меньше 1–3 часов) и низкочастотную (ото дня ко дню) составляющие. Предварительный анализ показал, что свойства экстремально сильного увеличения N_m определяются в основном низкочастотной составляющей флуктуаций. Поэтому для анализа использованы скользящие средние за 2.25 ч (данное мировое время, предыдущие и последующие четыре 15-минутных интервала) N_m , N_{m0} и h_m , h_{m0} .

Эти параметры максимума F2-слоя для 18–19 декабря 2008 г. совместно с вертикальной составляющей межпланетного магнитного поля (B_z ММП) вблизи Земли и AE -индексом геомагнитной активности приведены на рисунке. В Иркутске UT=0 ч соответствует LT=6.93 ч и первая половина суток по мировому времени соответствует в основном дневным часам, а вторая половина – ночным часам местного времени. Видно, что 18 декабря параметры максимума F2-слоя почти не отличались от фоновых. Днем 19 декабря N_m была повышенной, а h_m не отличалась от фонового значения. Увеличение N_m усилилось при переходе от дневных к ночным часам и достигло значений $N_m/N_{m0}=2.4$ –3.0 в послеполу-



B_z ММП, AE -индекс геомагнитной активности, параметры максимума F2-слоя N_m и h_m (толстые линии) и их медианы для спокойных условий (тонкие линии).

ночные часы. Ночной максимум N_m 19 декабря точно совпал с дневным максимумом N_{m0} для спокойных условий и слабо отличался от дневного максимума N_m 18 декабря. Это и есть экстремальное увеличение N_m зимой в ночные часы. На рисунке видно также, что увеличение N_m в ночные часы 19 декабря сопровождалось уменьшением h_m .

Интервал 18–19.12.2008 г. был типичным для спокойных геомагнитных условий: $A_{\text{pt}} \leq 4$ нТл, $A_p \leq 5$ нТл, слабые суббури наблюдались достаточно часто, и наиболее интенсивная из них с $AE=286$ нТл произошла 19.12.2008 г. Солнечная активность была почти постоянной в этом интервале времени ($F \approx 69$). Экстремальное увеличение N_m сопровождалось опусканием F2-слоя, что не характерно для наблюдавшихся в ночные часы ионосферных эффектов крупномасштабных внутренних гравитационных волн (ВГВ), генерируемых в авроральной области во время суббури [Hocke, Schlegel, 1996; Deminova et al., 1998]. Поэтому солнечная активность и крупномасштабные ВГВ не могли быть причинами такого увеличения N_m .

Экстремальное увеличение N_m могло быть обусловлено наложением нескольких причин. Одной из этих причин, по-видимому, является изменение состава термосферы: увеличение отношения $A=[\text{O}]/[\text{N}_2]^p$ при неизменном произведении $B=[\text{O}][\text{N}_2]$, где $[\text{O}]$ и $[\text{N}_2]$ – концентрации атомарного кислорода и молекулярного азота на фиксированной высоте в области максимума F2-слоя (например, на высоте 300 км), показатель степени $P=16/28$. Такое изменение состава термосферы приводит к увеличению N_m при почти неизменной h_m , если учесть, что коэффициент рекомбинации ионов атомарного кислорода $\beta \sim [\text{N}_2]$ (см., например, [Кринберг, Ташилин, 1984; Деминов, 2008]). Увеличение A при почти неизменном B , по-видимому, началось в дневные часы 19 декабря, что привело к повышению N_m без изменения h_m относительно фонового значения (см. рисунок). Такое изменение состава термосферы, видимо усилилось при переходе к ночным часам 19 декабря, что привело к дальнейшему росту N_m . На рисунке видно, что 19 декабря при переходе от дневных к ночным часам вертикальная составляющая межпланетного магнитного поля B_z повернулась с севера ($B_z > 0$) на юг ($B_z < 0$), что обычно приводит к увеличению западной составляющей электрического поля E_y в ночные часы на средних широтах [Akasofu, 1981; Ляцкий, Мальцев, 1983]. В ночные часы увеличение E_y приводит к опусканию F2-слоя и увеличению N_m [Park, 1971; Mikhailov, Förster, 1999]. Наблюдавшиеся в ночные часы 19 декабря опускание F2-слоя и дополнительное увеличение N_m могли быть вызваны этой причиной. Еще одной причиной повышенных значений N_m в ночные часы 19 декабря могло быть возрастание потока плазмы из плазмосферы из-за увеличения N_m в магнитосопряженной (летней) ионосфере, поскольку параметры ночной зимней ионосферы существенно зависят от величины этого потока [Кринберг, Ташилин, 1984]. Полученные по Интернет (www.ngdc.noaa.gov/stp/IONO) данные ст. Канберра (35.3° S, 149° E) косвенно подтверждают это предположение: 19 декабря в интервале 05–10 UT

значения f_0F2 были выше месячной медианы на 0.3–1.0 МГц. Наложение перечисленных причин, по-видимому, могло привести к экстремальному увеличению N_m над Иркутском ночью 19 декабря. Приведенная интерпретация экстремального увеличения N_m даже на качественном уровне является предварительной, и необходимы специальные исследования для определения природы этого редкого явления.

Выводы

Проведенный анализ свойств очень сильных увеличений концентрации максимума F2-слоя N_m (более чем в 2 раза относительно фонового значения) зимой в ночные часы (02–04 LT) по данным ст. Иркутск за 1958–1992, 2002–2009 гг. позволяет сделать следующие выводы.

1. Очень сильные увеличения N_m в среднем наблюдались в 1–3 % случаев. Такие увеличения N_m наиболее часто соответствовали периодам магнитосферных суббурь, реже – периодам низкой геомагнитной активности и очень редко – периодам бурь. При низкой геомагнитной активности они чаще соответствовали низкой солнечной активности. В периоды магнитных бурь такие увеличения N_m наблюдались только при высокой солнечной активности. Относительная частота возникновения очень сильных увеличений N_m при определенном уровне геомагнитной активности в значительной степени определяется вероятностью наблюдения этой активности, но не является единственной причиной наблюдаемых свойств этой частоты.

2. Наиболее ярким примером очень сильного увеличения N_m является событие 19.12.2008 г., когда ночной максимум N_m достиг значения, характерного для дневного максимума N_m . Такое экстремальное увеличение N_m могло быть следствием наложения нескольких причин: изменения состава термосферы, увеличения западной составляющей электрического поля на средних широтах из-за поворота B_z ММП с севера на юг, увеличения концентрации электронов в сопряженной (летней) ионосфере. Эта интерпретация экстремального увеличения N_m даже на качественном уровне является предварительной.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (гранты № 11-05-00200-а и № 11-05-00908-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Данилов А.Д., Морозова Л.Д., Мирмович Э.Г. О возможной природе положительной фазы ионосферных бурь // Геомагнетизм и аэрономия. 1985. Т. 25, № 5. С. 768–772.

Деминов М.Г. Ионосфера Земли // Плазменная гелио-геофизика. М.: Физматлит, 2008. Т. 2. С. 92–163.

Деминов М.Г., Жеребцов Г.А., Пирог О.М., Шубин В.Н. Регулярные изменения критической частоты F2-слоя спокойной ионосферы средних широт // Геомагнетизм и аэрономия. 2009. Т. 49, № 3. С. 393–399.

Кринберг И.А., Ташилин А.В. Ионосфера и плазмосфера. М.: Наука, 1984. 189 с.

Ляцкий В.Б., Мальцев Ю.П. Магнитосферно-ионосферные взаимодействия. М.: Наука, 1983. 190 с.

Akasofu S.-I. Energy coupling between the solar wind and magnetosphere // Space Sci. Rev. 1981. V. 28, N 2. P. 121–129.

Belehaki A., Tsagouri I. On the occurrence of storm-induced nighttime ionization enhancements at ionospheric middle latitudes // J. Geophys. Res. 2002. V. 107, N A8. P. 1209. doi:10.1029/2001JA005029.

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. 1998. V. 60, N 2. P. 227–245.

Farelo A.F., Herraiz M., Mikhailov A.V. Global morphology of night-time N_mF2 enhancements // Ann. Geophys. 2002. V. 20. P. 1795–1806.

Hocke K., Schlegel K. A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982–1995 // Ann. Geophys. 1996. V. 14, N 9. P. 917–940.

Mikhailov A.V., Förster M. Some F2-layer effects during the 6–11 January 1997 CEDAR storm period as observed with the Millstone Hill incoherent scatter facility // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 1999. V. 61, N 3–4. P. 249–261.

Park C.G. Westward electric fields as the cause of night-time enhancements in electron concentrations in midlatitude F region // J. Geophys. Res. 1971. V. 76, N 19. P. 4560–4568.

Richards P.G., Buonsanto M.Y., Reinisch B.W., et al. On the relative importance of convection and temperature to the behavior of the ionosphere in North America during January 6–12, 1997 // J. Geophys. Res. 2000. V. 105, N A6. P. 12763–12776.

Tsagouri I., Belehaki A. On the nature of nighttime ionization enhancements observed with the Athens Digisonde // Ann. Geophys. 2002. V. 20. P. 1225–1238.

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкина РАН, Троицк

²Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск