

## ГЕОМАГНИТНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ НА ВЫСОТАХ СЛОЯ F1 ИОНОСФЕРЫ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НАД НОРИЛЬСКОМ

### GEOMAGNETIC DISTURBANCES AT F1-LAYER HEIGHTS UNDER DIFFERENT SOLAR ACTIVITY CONDITIONS OVER NORILSK

**Г.П. Кушнаренко**

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

**О.Е. Яковлева**

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

**Г.М. Кузнецова**

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

**G.P. Kushnarenko**

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

**O.E. Yakovleva**

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

**G.M. Kuznetsova**

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

**Аннотация.** Исследовано влияние геомагнитных возмущений на электронную концентрацию  $N_e$  на ионосферной станции Норильск ( $69^\circ$  N;  $88^\circ$  E) на высотах слоя F1 (120–200 км). Анализировались 25 умеренных и слабых геомагнитных возмущений для двух сезонов — весны и осени — в период 2003–2014 гг. На основе значений  $N_e$ , полученных по измерениям с помощью дигизонда на ст. Норильск за этот период, проведен анализ изменений  $N_e$  во время геомагнитных возмущений весной и осенью за длительный промежуток времени. Выявлена весенне-осенняя асимметрия, которая присутствует во все периоды солнечной активности и проявляется в значительном понижении электронной концентрации во время главной фазы осенних штормов на всех высотах по сравнению со спокойными днями: до 2.6 раз на высоте 200 км и несколько меньше на нижних высотах. Во время весенних возмущений такого явления не наблюдается: изменения  $N_e$  гораздо слабее.

**Ключевые слова:** геомагнитные возмущения, электронная концентрация, весенне-осенняя асимметрия.

**Abstract.** We analyze the influence of geomagnetic disturbances on the electron density  $N_e$  at Norilsk ionospheric station ( $69^\circ$  N;  $88^\circ$  E) at F1-layer heights (120–200 km). For the analysis, we have selected 25 moderate and weak geomagnetic disturbances for two seasons — spring and fall — of 2003–2014. Using the  $N_e$  values obtained from measurements made with the Norilsk digisonde during this period, we analyze  $N_e$  variations during geomagnetic disturbances in spring and fall for a long period of time. We determine the effect of spring-fall asymmetry occurring in all solar activity phases and manifesting itself in a significant decrease in the electron density during the main phase of fall storms at all heights in comparison with quiet days: up to 2.6 times at a height of 200 km and slightly less at lower heights. This phenomenon is not observed during spring disturbances:  $N_e$  variations are much weaker.

**Keywords:** geomagnetic disturbances, electron density, spring-fall asymmetry.

## ВВЕДЕНИЕ

Известно, что основной причиной изменений электронной плотности во время геомагнитных возмущений является изменение нейтрального состава термосферы. Каждая область ионосферы имеет свои уникальные структурные особенности и различный нейтральный состав и поэтому отвечает на возмущения, вызванные геомагнитным штормом, по-своему.

Влияние геомагнитных штормовых эффектов на высотах F1-слоя довольно мало исследовалось до недавнего времени. Согласно работам [Кушнаренко и др., 2012, 2013; Buresova, Lastoviska, 2001; Buresova et al., 2002; Mikhailov, 2008], проявления возмущений в нижней части области F ионосферы сложны и неоднозначны, и отклики на геомагнитные возмущения на высотах 120–200 км изучены значительно меньше, чем в области F2. Обнаружено, что в условиях низкой солнечной активности эффекты возмущений слабо проявляются ниже 170 км.

В связи с регулярными измерениями цифровыми ионозондами на ионосферных станциях Иркутск и Норильск и накоплением данных по электронной концентрации появилась возможность исследовать проявления воздействия геомагнитных возмущений на  $N_e$  на высотах слоя F1 (120–200 км) в условиях разной солнечной активности в период 2003–2014 гг.

В работе [Кушнаренко и др., 2018] проведен анализ изменений  $N_e$  во время геомагнитных возмущений на высотах слоя F1 в период 2003–2014 гг. по данным цифровой ионосферной станции Иркутск ( $52^\circ$  N,  $104^\circ$  E). Обнаружена весенне-осенняя асимметрия эффектов геомагнитных бурь на указанных высотах.

В настоящей работе мы продолжаем изучение отклика ионизации на этих высотах на геомагнитные бури в 2003–2014 гг. на высокоширотной станции Норильск при различной солнечной активности.

### ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Была исследована реакция электронной концентрации на высотах слоя F1 (120–200 км) в регионе Норильска на геомагнитные возмущения двух сезонов — весны и осени. Для этой цели использованы значения  $N_e$ , полученные по измерениям с помощью дигизонда (69° N, 88° E) на ст. Норильск в 2003–2014 гг. Были выделены и проанализированы 25 умеренных и слабых геомагнитных бурь исследуемого периода. Характеристики этих возмущений показаны в табл. 1. Из всего объема исследованных возмущений (25 событий) в качестве наглядного примера были выбраны бури для трех периодов, соответствующих разным фазам солнечной активности (табл. 2): спаду (2003), минимуму (2008) и максимуму (2014).

При обработке массива данных  $N_e$  мы столкнулись с многочисленными пропусками и отсутствием данных при наличии даже слабых геомагнитных возмущений. Воздействие сильных бурь на ионизацию на высотах слоя F1 очень сложно проследить, поскольку из-за эффектов поглощения в нижних слоях ионосферы отсутствуют данные на указанных высотах.

### ВЕСЕННЕ-ОСЕННЯЯ АСИМЕТРИЯ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

На рис. 1 показаны изменения  $N_e$  для ст. Норильск в весенний период для трех выбранных лет, соответствующих разным фазам солнечной активности: спаду (2003), минимуму (2008) и максимуму (2014). Слева — изменения  $N_e$  на высотах 150, 180, 190 и 200 км в дни максимального развития трех весенних бурь, справа — изменения  $N_e$  на тех же высотах в соответствующие каждой буре спокойные дни.

На высотах слоя F1 отсутствует заметное влияние весенних геомагнитных штормов на электронную концентрацию. Отметим, что в 12 LT концентрация  $N_e$  уменьшилась в среднем в 1.6 раза на высотах 190 и 200 км для всех трех бурь и изменилась в 1.1–1.4 раза на нижних высотах слоя F1 (150 км). Такое поведение  $N_e$  соответствует почти всем рассмотренным весенним бурям.

Вариации  $N_e$  во время осенних геомагнитных возмущений значительно отличаются от весенних. Электронная концентрация существенно понижается на всех высотах во время главной фазы шторма (рис. 2). Осенний эффект заключается в уменьшении  $N_e$  на высоте 200 км в 2–2.6 раза и в заметном понижении — в 1.4–1.8 и 1.5 раза — на высотах 180 и 150 км соответственно. Такие изменения характерны почти для всех осенних бурь.

Наблюдаемая весенне-осенняя асимметрия геомагнитных бурь, возможно, связана с сезонным изменением высоты уровня перехода области преобладания атомарных ионов над молекулярными [Viresova, Lastovicka, 2001], что приводит к изменению высоты максимума F1-слоя. Во время возмущений на электронную концентрацию на высотах слоя F1 оказывают значительное влияние изменения состава нейтральной атмосферы и скорости ионизации,

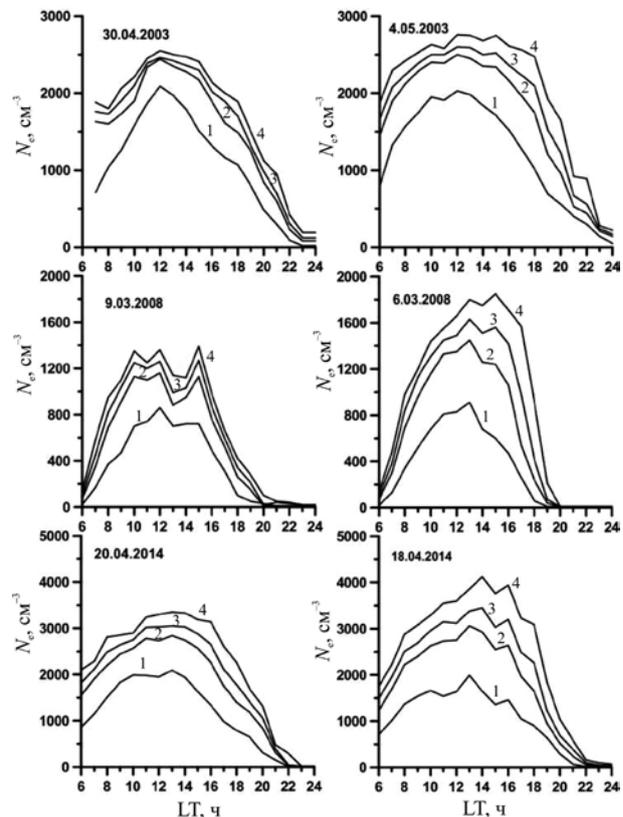


Рис. 1. Поведение  $N_e$  в дни максимального развития трех весенних бурь (левая панель) и в соответствующие буре спокойные дни (правая панель) на высотах: 1 — 150 км, 2 — 180 км, 3 — 190 км, 4 — 200 км

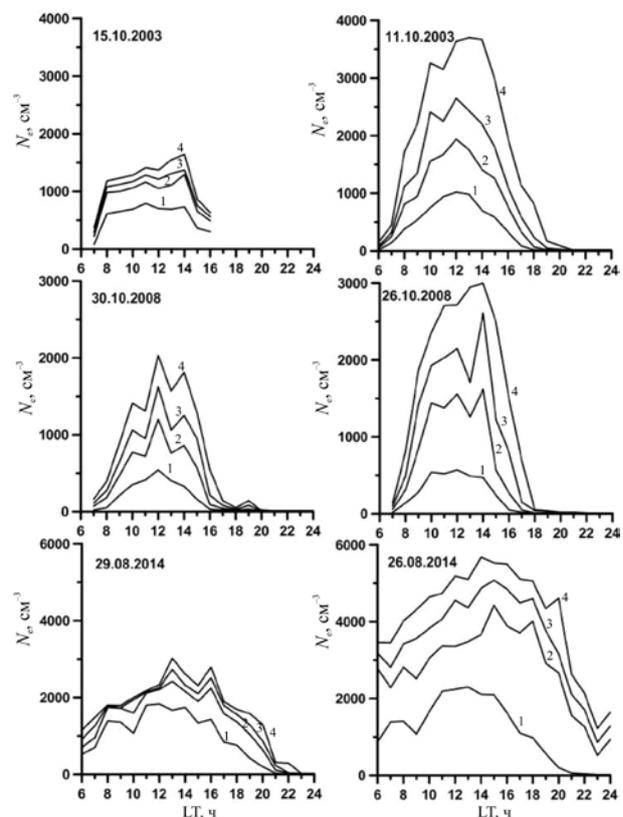


Рис. 2. То же, что на рис. 1, для осеннего периода: 1 — 150 км, 2 — 180 км, 3 — 190 км, 4 — 200 км

а также фотохимические процессы. Влияние фотохимических процессов при понижении F1-слоя становится преобладающим в более плотных слоях атмос-

Таблица 1

## Анализируемые геомагнитные возмущения

Спокойные дни	День начала бури	Индексы ( $A_p$ , $Dst$ )	Максимум бури (дата и UT)
10–12.10.2003	14.10.2003	$A_p=66$ , $Dst=-85$	14.10 в 23:00
18–20.04.2003	30.04.2003	$A_p=45$ , $Dst=-67$	30.04 в 03:00
04.05.2003	23.04.2003	$A_p=27$ , $Dst=-39$	23.04 в 06:00
06–08.03.2004	10.03.2004	$A_p=94$ , $Dst=-105$	10.03 в 08:00
12.09.2004	14.09.2004	$A_p=56$ , $Dst=-50$	14.09 в 19:00
28.04.2005	01.05.2005	$A_p=39$ , $Dst=-47$	01.05 в 04:00
02.04.2005	04.04.2005	$A_p=80$ , $Dst=-55$	04.04 в 23:00
30.08.2005	01.09.2005	$A_p=67$ , $Dst=-80$	01.09 в 24:00
12.04.2006	14.04.2006	$A_p=80$ , $Dst=-111$	14.04 в 10:00
05.03.2006	10.03.2006	$A_p=39$ , $Dst=-37$	10.03 в 23:00
12.10.2006	13.10.2006	$A_p=56$ , $Dst=-49$	13.10 в 23:00
06.03.2008	09.03.2008	$A_p=67$ , $Dst=-72$	09.03 в 05:00
26.10.2008	29.10.2008	$A_p=32$ , $Dst=-24$	29.10 в 08:00
10.04.2010	06.04.2010	$A_p=56$ , $Dst=-59$	06.04 в 11:00
01.10.2010	24.09.2010	$A_p=27$ , $Dst=-30$	24.09 в 17:00
29.10.2010	23.10.2010	$A_p=48$ , $Dst=-35$	23.10 в 14:00
01.10.2010	24.09.2010	$A_p=27$ , $Dst=-26$	24.09 в 17:00
04.04.2012	05.04.2012	$A_p=27$ , $Dst=-54$	05.04 в 10:00
10.09.2012	04.09.2012	$A_p=32$ , $Dst=-63$	04.09 в 08:00
15.09.2013	13.09.2013	$A_p=22$ , $Dst=-7$	13.09 в 17:00
29.09.2013	24.09.2013	$A_p=32$ , $Dst=-24$	24.09 в 14:00
06.03.2013	02.03.2013	$A_p=27$ , $Dst=-16$	02.03 в 02:00
18.04.2014	20.04.2014	$A_p=48$ , $Dst=-28$	20.04 в 14:00
11.03.2014	13.03.2014	$A_p=27$ , $Dst=-29$	13.03 в 02:00
26.08.2014	29.08.2014	$A_p=27$ , $Dst=-33$	29.08 в 11:00

Индексы  $A_p$ ,  $F10.7$  и  $Dst$  получены из базы данных WDC-C2 в Киото [<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>].

Таблица 2

Среднегодовые  $F10.7$  в период 2003–2014 гг.

Год	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
$F10.7$	128	106	98	80	74	69	71	80	113	120	123	146

феры из-за более короткого срока жизни свободных электронов.

Еще одной возможной причиной наблюдаемой асимметрии является более глубокое проникновение в осенние сезоны возмущений из авроральных областей на более низкие широты. В возмущенной области, по данным спутниковых измерений [Goncharenko et al., 2006], наблюдается увеличение доли нейтрального компонента термосферы, что влечет за собой изменения ионного состава на высотах слоя F1 и приводит к уменьшению электронной концентрации на рассматриваемых высотах.

## ВЫВОДЫ

В регионе Норильска в эффектах геомагнитных бурь, влияющих на электронную концентрацию, присутствует весенне-осенняя асимметрия на высотах слоя F1, которая проявляется во все периоды солнечной активности 2003–2014 гг.

Во время осенних геомагнитных возмущений наблюдается значительное уменьшение электронной концентрации (до 2.6 раз) на верхних высотах слоя F1 — 190 и 200 км — и меньший эффект на нижних высотах. Напротив, для весенних бурь характерно

слабое уменьшение  $N_e$  на высотах 150–200 км в сравнении со спокойными условиями.

Электронная концентрация во все рассмотренные периоды возмущений на высотах слоя F1 всегды уменьшается.

Работа выполнена в рамках базового финансирования проекта П.16.1.1 «Исследование влияния солнечной активности и процессов в нижней атмосфере на изменения термодинамических характеристик атмосферы, Мирового океана и климат». Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» [<http://ckp-rf.ru/ckp/3056>].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Кушнаренко Г.П., Кузнецова Г.М., Ратовский К.Г., Колпакова О.Е. Отклик некоторых параметров ионосферы на геомагнитные возмущения на высотах ниже максимума слоя F2 в сентябре и апреле 2005 г. // Геомагнетизм и аэронавигация. 2012. Т. 52, № 3. С. 378–385.
- Кушнаренко Г.П., Кузнецова Г.М., Полев Н.М., Ратовский К.Г. Эффекты геомагнитных бурь на высотах ионосферного слоя F1 в регионе Иркутска в период спада и минимума солнечной активности // Солнечно-земная физика. 2013. Вып. 22. С. 31–34.

Кушнаренко Г.П., Кузнецова Г.М., Яковлева О.Е. Эффекты геомагнитных бурь на высотах слоя F1 в разные периоды солнечной активности (ст. Иркутск) // Геомагнетизм и аэронаука. 2018. Т. 58, № 2. С. 211–216. DOI: [10.7868/S0016794018020062](https://doi.org/10.7868/S0016794018020062).

Buresova D., Lastovicka J. Changes in the F1 region electron density during geomagnetic storms at low solar activity // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2001. V. 63, iss. 5. P. 537–544. DOI: [10.1016/S1364-6826\(00\)00167-X](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(00)00167-X).

Buresova D., Lastovicka J., Altadill D., Miro G. Daytime electron density at the F1-region in Europe during geomagnetic storms // *Ann. Geophys.* 2002. V. 20. P. 1007–1021. DOI: [10.5194/angeo-20-1007-2002](https://doi.org/10.5194/angeo-20-1007-2002).

Goncharenko L., Salah J., Crowley G., et al. Large variations in the thermosphere and ionosphere during minor geomagnetic disturbances in April 2002 and their association with IMF  $B_y$  // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. A03303. DOI: [10.1029/2004JA010683](https://doi.org/10.1029/2004JA010683).

Mikhailov A.V. Ionospheric F1 layer long-term trends and the geomagnetic control concept // *Ann. Geophys.* 2008. V. 26. P. 3793–3803. DOI: [10.5194/angeo-26-3793-2008](https://doi.org/10.5194/angeo-26-3793-2008).

URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp> (дата обращения 1 октября 2018 г.).

URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/3056> (дата обращения 1 октября 2018 г.).

## REFERENCES

Buresova D., Lastovicka J. Changes in the F1 region electron density during geomagnetic storms at low solar activity. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2001, vol. 63, iss. 5, pp. 537–544. DOI: [10.1016/S1364-6826\(00\)00167-X](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(00)00167-X).

Buresova D., Lastovicka J., Altadill D., Miro G. Daytime electron density at the F1-region in Europe during geomagnetic storms. *Ann. Geophys.* 2002, vol. 20, pp. 1007–1021. DOI: [10.5194/angeo-20-1007-2002](https://doi.org/10.5194/angeo-20-1007-2002).

Goncharenko L., Salah J., Crowley G., Paxton L.J., Zhang Y., Coster A., Rideout W., Huang C., Zhang S., Reinisch B., Taran V. Large variations in the thermosphere and ionosphere during minor geomagnetic disturbances in April 2002 and their association with IMF  $B_y$ . *J. Geophys. Res.* 2006, vol. 111, A03303. DOI: [10.1029/2004JA010683](https://doi.org/10.1029/2004JA010683).

Kushnarenko G.P., Kuznetsova G.M., Ratovsky K.G., Kolpakova O.E. Some ionospheric parameters response on geomagnetic disturbances at the heights lower layer F1 maximum during September and April 2005. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2012, vol. 52, no. 3, pp. 378–385. (In Russian).

Kushnarenko G.P., Kuznetsova G.M., Polekh N.M., Ratovsky K.G. The geomagnetic storms effects at ionospheric layer F1 heights in Irkutsk during decrease and minimum of solar activity. *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terrestrial Physics]. 2013, no. 22, pp. 31–34. (In Russian).

Kushnarenko G.P., Kuznetsova G.M., Yakovleva O.E. The geomagnetic storms effects at ionospheric layer F1 heights during the different periods of solar activity (st. Irkutsk). *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2018, vol. 58, no. 2, pp. 211–216. (In Russian). DOI: [10.7868/S0016794018020062](https://doi.org/10.7868/S0016794018020062).

Mikhailov A.V. Ionospheric F1 layer long-term trends and the geomagnetic control concept. *Ann. Geophys.* 2008, vol. 26, pp. 3793–3803. DOI: [10.5194/angeo-26-3793-2008](https://doi.org/10.5194/angeo-26-3793-2008).

URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp> (accessed October 1, 2018).

URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/3056> (accessed October 1, 2018).

### Как цитировать эту статью:

Кушнаренко Г.П., Яковлева О.Е., Кузнецова Г.М. Геомагнитные возмущения на высотах слоя F1 ионосферы в различных условиях солнечной активности над Норильском. *Солнечно-земная физика*. 2019. Т. 5, № 2. С. 129–132. DOI: [10.12737/szf-52201916](https://doi.org/10.12737/szf-52201916).