

**ЭФФЕКТЫ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ НА ВЫСОТАХ ИОНОСФЕРНОГО СЛОЯ F1
В РЕГИОНЕ ИРКУТСКА В ПЕРИОД СПАДА И МИНИМУМА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ**

Г.П. Кушнаренко, Г.М. Кузнецова, Н.М. Полех, К.Г. Ратовский

**EFFECTS OF GEOMAGNETIC STORMS AT F1-LAYER HEIGHTS IN IRKUTSK REGION
DURING THE DECAY OF SOLAR ACTIVITY AND AT ITS MINIMUM**

G.P. Kushnarenko, G.M. Kuznetsova, N.M. Polekh, K.G. Ratovsky

Оценивается влияние геомагнитных возмущений на электронную плотность на высотах ионосферного слоя F1 в период спада и минимума солнечной активности (2003–2008 гг.) на ст. Иркутск по данным дигизонда (52° N, 104° E). Подтверждено существование весенне-осенней асимметрии для умеренных геомагнитных возмущений на высоте 190 км. Обнаружены заметные эффекты во время осенних супербурь на нижних высотах области F (150–190 км).

We estimated the effect of geomagnetic storms on the electron density at F1-layer heights during the solar activity decay and minimum (2003–2008) for the Irkutsk station using the digisonde data (52° N, 104° E). We confirmed the existence of a spring-autumn asymmetry at 190 km for moderate geomagnetic storms. Notable effects at lower F-region heights (150–190 km) were found during autumn superstorms.

Введение

Исследованию откликов ионосферной области F2 на геомагнитные возмущения посвящено большое количество работ и обстоятельных обзоров. Относительно слабо исследована область высот 160–200 км (область F1). Анализ, выполненный в работах [Buresova, Lastovicka, 2001; Buresova et al., 2002] по данным европейской сети ионозондов, обнаружил, что независимо от знака ионосферного возмущения в области F2 на высотах слоя F1 всегда наблюдается отрицательное возмущение. Кроме того, выявлена осенне-весенняя асимметрия, т. е. осенью эффект уменьшения электронной концентрации выражен гораздо сильнее, чем весной. В работе [Mikhailov, Schlegel, 2003] авторы исследовали реакцию области F1 на геомагнитные бури по данным радаров некогерентного рассеяния и предположили, что наблюдаемые вариации электронной концентрации N_e во время магнитных бурь на высотах слоя F1 в значительной мере могут быть обусловлены сезонными вариациями термосферы и изменениями ионного состава на этих уровнях. Авторы работ [Полех и др., 2011; Кушнаренко и др., 2012] провели изучение вариаций электронной концентрации во время магнитных бурь в 2005 г. по данным станций Иркутск и Якутск. Получено, что на высотах 150–200 км во время магнитных бурь наблюдается отрицательное возмущение N_e и его амплитуда возрастает с высотой. В Якутске этот эффект проявляется сильнее, чем в Иркутске.

Известно, что основной причиной изменений электронной плотности во время геомагнитных возмущений является изменение в нейтральном составе термосферы. Каждая ионосферная область имеет разный нейтральный состав и свои собственные уникальные структурные особенности, и поэтому мы можем ожидать разные отклики каждой области на вызванные бурей возмущения.

В работе [Rishbeth, Garriott, 1969] описаны фотохимические процессы в нижней ионосфере и показано, что уровень перехода между областью преобладания молекулярных ионов NO^+ и O_2^+ и областью, где доминируют атомные ионы O^+ , соответствует 160–200 км. Ниже этого уровня электронные потери

пропорциональны квадрату электронной плотности N_e^2 , выше они подчиняются линейному закону и пропорциональны N_e . Есть несколько физических процессов, которые могут давать вклад в наблюдаемый эффект геомагнитных бурь в нижней части ионосферной F-области в средних широтах. В возмущенных условиях изменения в газовом составе термосферы распространяются от высоких широт к экватору и воздействуют на баланс между процессами ионообразования и потерь. В нейтральном составе возмущенной зоны отмечается существенное увеличение плотности молекулярного азота и параллельное истощение плотности атомарного кислорода $[\text{O}]$, что было подтверждено спутниковыми измерениями [Goncharenko et al., 2006]. На высотах выше уровня перехода скорость потерь ионизации зависит от концентрации молекулярных газов N_2 и O_2 и наблюдаемое увеличение их плотности усиливает рекомбинацию ионосферной плазмы, в то время как уменьшение концентрации $[\text{O}]$ сокращает фотоионизацию. Совмещенные, эти два процесса угнетают N_e на высотах области F.

Согласно теориям геомагнитных возмущений, отклик F-области сильно зависит от типа термосферной циркуляции. Летний или зимний тип определяется, если регулярные (вызванные Солнцем) и вызванные бурей меридиональные ветры соответственно совпадают или имеют противоположные направления. При зимнем типе циркуляция в дневное время направлена к полюсу и препятствует вызванному геомагнитным возмущением и направленному к экватору ветру в средних широтах, который ослабляется и появляется дополнительная компонента восходящего вертикального ветра. В F2-области это часто ведет к увеличению N_e (положительная фаза) благодаря перемещению высоты максимума на большие высоты с меньшей скоростью потерь электронов. Повышение высот F1-области должно приводить к уменьшению отношения O/N_2 и, следовательно, к уменьшению ионизации. Для летнего типа циркуляции эти два направления движения совпадают и газы с уменьшенным отношением O/N_2 перемещаются из верхних широт в средние. Изменения в нейтральном составе приводят к уменьше-

нию N_e на фиксированных высотах в F1-области, что согласуется с наблюдениями.

Другой фактор – связанное с возмущением увеличение потока энергетических частиц, однако это увеличение должно привести к возрастанию N_e , что противоречит дневным наблюдениям в средних широтах. Поэтому увеличение скорости ионизации за счет энергочастиц не является доминирующим механизмом в поведении дневной ионосферы на высотах F1 во время геомагнитных бурь.

В данной работе продолжено исследование особенностей отклика электронной концентрации на высотах слоя F1 на геомагнитные бури различной интенсивности в годы спада и минимума солнечной активности в Азиатском регионе России.

Весенне-осенняя асимметрия в геомагнитных возмущениях

Были выбраны геомагнитные события для двух сезонов (весны и осени) для исследования реакции на них электронной концентрации на высотах ниже максимума слоя F1 в регионе Иркутска (табл. 1). Использовались значения N_e , полученные по измерениям Иркутского дигизонда (52° N, 104° E) в годы спада и минимума солнечной активности (2003–2008 гг.). Изменение среднегодового индекса $F10.7$ в этот период от 128 до 70 (в единицах 10^{-22} Вт·м⁻²·Гц⁻¹). Индексы геомагнитной активности A_p – среднесуточные. Индексы D_{st} – для времени максимального развития возмущения были взяты по данным Киото [<http://wdc.kugi.kyotou.ac.jp/>].

На рис. 1 для ст. Иркутск показаны изменения N_e на высоте 190 км, на которой они наиболее заметны в слое F1 во время геомагнитных событий для двух сезонов (весны и осени) 2003–2005 и 2006–2008 гг. Результаты показывают существенно разные отклики. Весной вариации N_e в течение всех дней максимального развития бури довольно схожи и следуют за вариациями N_e в дневных невозмущенных условиях. Уменьшение абсолютных значений N_e в околополуденные часы происходит в пределах 20–35 % на высоте 190 км, около 20 % на 170 км и <10 % на 150 км. Осенью вариации N_e существенно различаются для отдельных бурь и имеют довольно нерегулярный временной ход. Осенний эффект заключается в заметном понижении N_e во время главной фазы бури до 30–50 % на высоте 190 км, до 25 % на 170 км и до 15 % на 150 км. Кроме того, на фиксированных высотах наблюдаются сильные внутрисуточные флуктуации N_e , незначительные для весенних бурь (рис. 2).

Для иллюстрации этого явления использованы 15- и 5-минутные ионограммы для максимальных фаз бурь в апреле и сентябре 2005 г. (рис. 2). Электронная концентрация на высотах слоя F1 во время сильных геомагнитных возмущений в сентябре 2005 г. ($D_{st}=-147$) отвечает на происходящее событие намного активнее, чем во время бури 5 апреля ($D_{st}=-85$). Изменения абсолютных значений N_e происходят в течение пяти минут в 1.5–4 раза. Самые большие вариации соответствуют высоте 190 км, но и ниже электронная концентрация активно реагирует на возмущения, хотя амплитуда N_e уменьшается с понижением высоты.

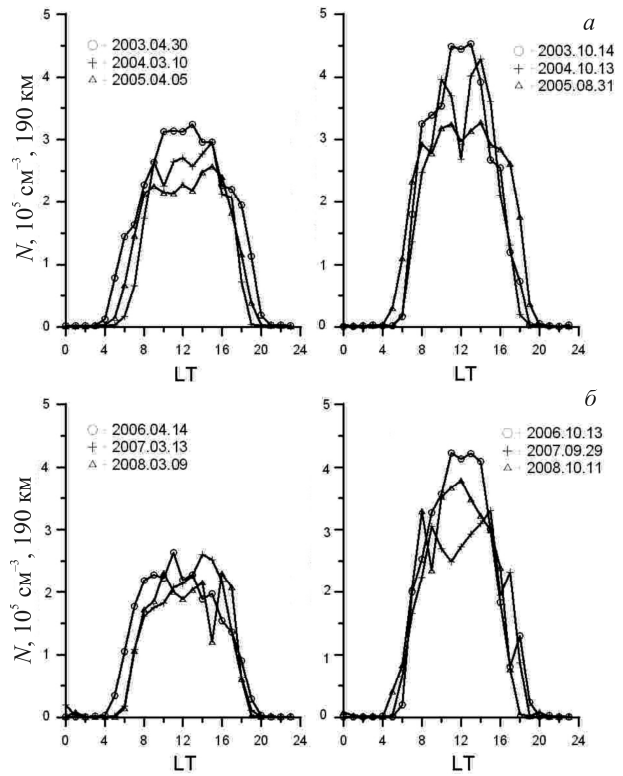


Рис. 1. Дневное поведение N_e на 190 км в дни максимального развития бури для всех анализируемых событий сезонов 2003–2005(а) и 2006–2008 гг. (б) весной (слева) и осенью (справа).

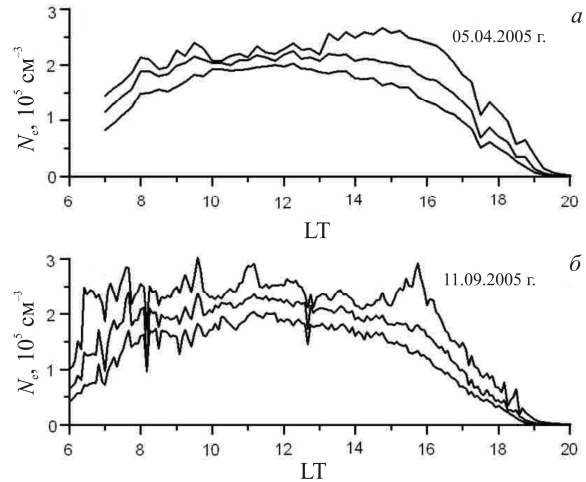


Рис. 2. Изменения N_e в дни максимального развития бури 05.04.2005 г. и бури 11.09.2005 г. на высотах 150, 170 и 190 км (15- и 5-минутные измерения).

Возможным объяснением наблюдаемой весенне-осенней асимметрии геомагнитных бурь является связанное с сезоном изменение высоты уровня перехода области преобладания атомарных ионов над молекулярными [Buresova et al., 2002; Кушнаренко и др., 2011], что влечет за собой изменение высоты максимума F1-слоя. Возможно, играет роль более глубокое проникновение возмущений из авроральных областей в средние широты в осенний период. Как показали данные спутниковых измерений [Goncharenko et al., 2006], возмущенная область характеризуется увеличением нейтральной плотности, что сопровождается изменениями в ионном составе на высотах слоя F1. Результатом является уменьшение N_e .

Таблица 1

Анализируемые геомагнитные бури

Спокойные дни	День начала бури	Индексы A_p , D_{st}	Макс. фаза бури, день, UT
(18–20).04.2003	30.04.2003	45, –67	30.04.2003, 03:00
(10–12).10.2003	14.10.2003	66, –85	14.10.2003, 23:00
(06–08).03.2004	10.03.2004	45, –78	10.03.2004, 06:00
(11–12).10.2004	13.10.2004	33, –63	13.10.2004, 13:00
(1–3).04.2005	04.04.2005	50, –85	05.04.2005, 07:00
30.08.2005	31.08.2005	49, –122	31.08.2005, 20:00
13.04.2006	14.04.2006	65, –98	14.04.2006, 10:00
(10–12).10.2006	13.10.2006	30, –55	13.10.2006, 23:00
(10–12).03.2007	13.03.2007	24, –40	13.03.2007, 05:00
(25–27).09.2007	29.09.2007	30, –40	29.09.2007, 05:00
(07–08).03.2008	09.03.2008	30, –86	09.03.2008, 06:00
(08–10).10.2008	11.10.2008	34, –54	11.10.2008, 12:00

Таблица 2

Анализируемые геомагнитные очень сильные и экстремальные бури

Спокойные дни	День начала бури	Индексы A_p , D_{st}	Макс. фаза бури, день, UT
20.05.2003	29.05.2003	107, –135	30.05.2003, 03:00
02.11.2003	29.10.2003	191, –383	30.10.2003, 23:00
05.11.2004	07.11.2004	202, –374	08.11.2004, 07:00
06.11.2004	07.11.2004	205, –236	10.11.2004, 11:00
07.05.2005	15.05.2005	236, –263	15.05.2005, 09:00
27.05.2005	30.05.2005	154, –138	30.05.2005, 14:00

на этих фиксированных высотах, что подтверждается наблюдениями.

Эффекты очень сильных бурь на высотах слоя F1

Были выбраны несколько очень сильных и экстремальных геомагнитных событий, чтобы проверить, зависит ли в регионе Иркутска амплитуда изменения N_e на высотах F1-области от интенсивности геомагнитных бурь (табл. 2).

Были рассмотрены три осенних геомагнитных бури: две супербури 30.10.2003 и 08.11.2004 г. (D_{st} = –383 и –374 соответственно) и одна очень сильная буря 10.11.2004 г. (D_{st} = –236). Остальные три сильных бури (D_{st} = –263, –135 и –138) приходятся на весенний период, поэтому имеется возможность сравнить эффекты их воздействия на высотах слоя F1 в разные сезоны.

На рис. 3, 4 представлены дневные вариации N_e на высотах 150, 170 и 190 км в дни максимального развития этих бурь в сравнении со спокойными днями для двух разных сезонов. Все три экстремальных события осеннего периода показывают очень сильный эффект: на высоте 190 км значения N_e вблизи полудня LT уменьшаются в сравнении со спокойными величинами в 2–4 раза, на 170 км – в 1.6–2.3 раза, на 150 км также заметно уменьшение примерно в 1.6 раза.

Весной на широте Иркутска не удалось проследить зависимость амплитуды изменения N_e на высотах области F1 от интенсивности геомагнитных возмущений.

Очень сильная буря 15.05.2005 г. (D_{st} = –263) по своему воздействию на слой F1 аналогична более

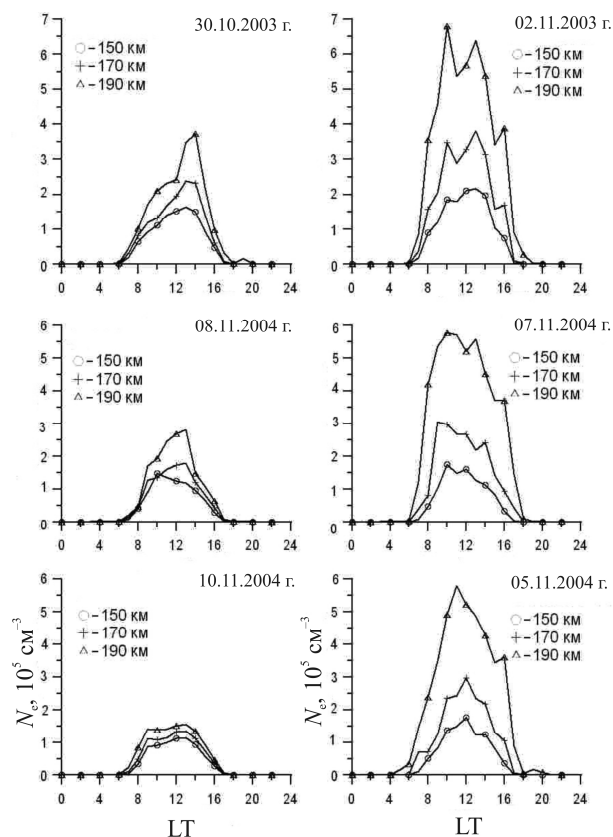


Рис. 3. Дневное поведение N_e на трех высотах в дни максимума двух экстремальных (D_{st} = –383 и –374) и одной очень сильной (D_{st} = –263) осенних геомагнитных бурь (слева) в сравнении со спокойными днями (справа).

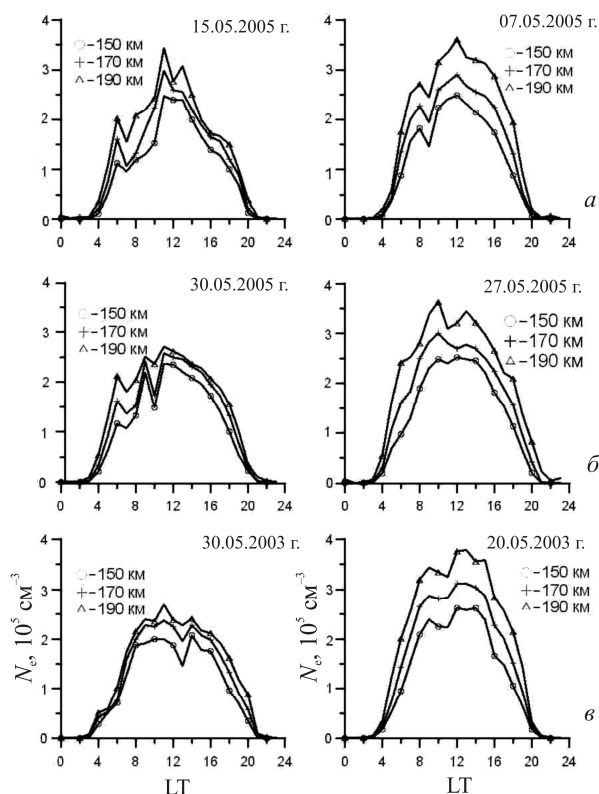


Рис. 4. Дневное поведение N_e на трех высотах в дни максимума бури 15.05.2005 г. ($D_{st}=-263$) (а), 30.05.2005 г. ($D_{st}=-138$) (б) и 30.05.2003 г. ($D_{st}=-135$) (в) в сравнении со спокойными днями (справа).

Все три сильных весенних бури оказывают почти одинаковое воздействие на N_e на высотах слоя F1: на 190 км N_e в полдень уменьшается в 1.3–1.6 раза в сравнении со спокойными величинами, на 170 км – в 1.1–1.4 раза, и на 150 км изменения слабо заметны (рис. 4).

В нашем случае наблюдается значительный эффект проникновения осенних супербурь на нижние высоты слоя F1. Возможно, это проявление весенне-осенней асимметрии для сильных бурь. Процесс, который, вероятно, способствует более сильному воздействию супервозмущений на нижние высоты слоя F1, – это несущий большие изменения в нейтральном составе и направленный к экватору сдвиг авроральной зоны, который значительно больше для супербурь [Buresova et al., 2002]. Возможно, свою роль играет и термосферная циркуляция, поскольку от ее типа (летняя или зимняя) и от направления вызванных возмущением меридиональных ветров сильно зависит отклик F-области.

Выводы

1. По данным Иркутского дигизонда для всех рассмотренных геомагнитных возмущений отклик ионосферы на высотах слоя F1 всегда отрицателен.

2. Весенне-осенняя асимметрия в геомагнитных бурях на высотах слоя F1 в регионе Иркутска проявляется следующим образом. Во время умеренных весенних бурь не отмечается значительного уменьшения N_e на высотах 150–190 км в сравнении со спокойными условиями, в то время как осенние бури показывают существенное уменьшение N_e на 190 км и меньший эффект на более низких высотах.

3. На широте Иркутска существует зависимость амплитуды изменения N_e на высотах области F1 для осенних супербурь от их интенсивности. Весной этот эффект проследить не удалось.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Кушнаренко Г.П., Кузнецова Г.М., Колпакова О.Е. Оценки отношений основных газовых составляющих во время сильных и умеренных геомагнитных возмущений в период спада и минимума солнечной активности // Солнечно-земная физика. 2011. Вып. 19. С. 134–139.

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. // Геомагн. и аэрон. 2012. Т. 52, № 3. С. 1–9.

Полех Н.М., Кушнаренко Г.П., Пирог О.М. и др. Вариации электронной концентрации в области F1 во время геомагнитных бурь при низкой солнечной активности // Солнечно-земная физика. 2011. Вып. 17. С. 142–148.

Buresova D., Lastovicka J. Changes in the F1 region electron density during geomagnetic storms at low solar activity // J. Atm. Solar-Terr. Phys. 2001. V. 63. P. 537–544.

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.

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.

Mikhailov A.V., Schlegel K. Geomagnetic storm effects at F1-layer heights from incoherent scatter observations // Ann. Geophys. 2003. V. 21. P. 583–596.

Rishbeth H., Garriott, O.K. Introduction to Ionospheric Physics. Academic Press, New York and London. 1969. 331 p. <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия