

Е.Б. Романова¹, А.В. Тацилин¹, О.М. Пирог¹, Н.М. Полех¹,
Г.А. Жеребцов¹, Дзянькуй Ши², Сао Ван²

Проявление интенсивных геомагнитных бурь в ионосфере Восточной Азии

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия

²Центр космических и прикладных исследований КАН, г. Пекин, Китай

Поступила в редакцию 29.08.2007 г.

Рассмотрены интенсивные геомагнитные бури с $D_{st} < (-200 \div -300 \text{ нТл})$, наблюдавшиеся за последние два цикла солнечной активности. Для анализа вариаций ионосферных параметров использованы данные измерений на сети ионосферных станций, расположенных вдоль долготного сектора $60\text{--}150^\circ$ в.д. Приведены результаты численного моделирования параметров ионосферы во время геомагнитной бури в апреле 2000 г., которые показывают хорошее согласие рассчитанных и измеренных значений критических частот слоя F_2 . Длительные отрицательные возмущения в ионосфере, наблюдаемые во время геомагнитных бурь, вероятно, вызваны изменением состава термосферы, что подтверждается результатами моделирования.

Введение

Исследование влияния солнечных и межпланетных явлений на околоземное пространство было и остается важнейшей проблемой солнечно-земной физики. Несмотря на то что к настоящему моменту накоплен большой объем экспериментальных и теоретических данных, существуют определенные сложности в прогнозировании эффектов солнечной активности в ионосфере.

Отклик ионосферы на геомагнитное возмущение представляет собой сложный комплекс явлений, описываемых как параметрами верхней атмосферы и ионосферы, так и характеристиками магнитосферы и солнечного ветра. Особенно сложной является ситуация во время интенсивных геомагнитных бурь.

Теоретические и экспериментальные исследования ионосферы во время магнитных бурь позволили выделить наиболее важные физические процессы, которые определяют распределение электронной концентрации в ионосфере на различных широтах, и представить общую картину проявления ионосферной бури. Одним из факторов, определяющих вариации ионосферы во время геомагнитной бури, является изменение нейтрального состава термосферы и системы циркуляции нейтральных ветров во время бури [1–4].

Несовпадение географических и магнитных координат усложняет картину ионосферных возмущений и приводит к долготной зависимости ионосферных эффектов геомагнитных бурь [5–8]. Наибольшее различие между географическими и геомагнитными координатами наблюдается в Восточной Азии. Формирование высокоширотной крупномасштабной структуры ионосферы в этом секторе происходит на фоне относительно низкой электронной концентрации. Этим определяется повышенный интерес к данному региону.

Ранее мы представили результаты морфологического анализа и численного моделирования состояния ионосферы во время умеренных бурь, наблюдаемых в разные сезоны на станциях меридиональной цепочки [9, 10]. Также были проанализированы ионосферные эффекты экстремальных событий в октябре–ноябре 2003 и ноябре 2004 г. [11, 12]. В настоящей статье мы пытаемся систематизировать проявления больших бурь в нашем регионе.

Анализ ионосферных данных

Проанализированы интенсивные геомагнитные бури с индексом $D_{st} < (-200 \div -300 \text{ нТл})$, наблюдавшиеся в последние два цикла солнечной активности (22- и 23-й). Список бурь приведен в табл. 1, из кото-

Таблица 1
Даты наблюдения геомагнитных бурь, минимального значения индекса D_{st} и времени минимума

Дата наблюдения	$D_{st \text{ min}}$, нТл	T_{min} , UT
20–21.10.1989	–203, –268	16, 12
17–18.11.1989	–288	23
10–11.04.1990	–278	19
5–6.03.1991	–219	20
9.07.1991	–190	15
8–9.11.1991	–354	02
25.09.1998	–230	10
22.10.1999	–231	07
6–7.04.2000	–321	01
15–16.07.2000	–295	01
31.03–1.04.2001	–285	22
12–13.04.2001	–256	24
3.10.2001	–182	15
1.11.2001	–277	06
29–30.10.2003	–263, –401	01, 23
19.11.2003	–429	20
8–10.11.2004	–373, –289	07, 11
25.08.2005	–216	12

рой следует, что из 18 бурь 9 наблюдались осенью (в ноябре 5, в октябре 3 и одна в сентябре), 5 – весной (конец марта–апрель) и 4 летом (июль).

Интересно отметить, что трижды большие бури наблюдались в октябре и ноябре одного года. Все большие бури наблюдались в максимуме или на спаде и подъеме солнечной активности. Сезонная зависимость появления больших бурь, вероятно, определяется секторной структурой межпланетного магнитного поля.

Исследовались вариации критических частот слоев F_2 во время бурь, включая предварительную фазу и фазу восстановления. В качестве спокойного уровня использовались часовые значения f_0F_2 , усредненные по нескольким спокойным дням месяца. Географические и геомагнитные координаты ионосферных станций приведены в табл. 2.

Таблица 2

Список использованных ионосферных станций и их географические и геомагнитные координаты

Станция	Географические		Геомагнитные	
	широта, град	долгота, град	широта, град	долгота, град
Диксон	73,5	80,4	63,1	162,2
Норильск	69,20	88,26	58,71	165,7
Салехард	66,5	66,6	57,4	149,7
Якутск	62,0	129,6	50,99	194,1
Магадан	60,12	151,0	50,75	210,8
Томск	56,5	84,9	46,0	160,6
Свердловск	56,4	58,6	48,5	139,6
Петропавловск	53,0	158,7	44,9	219,9
Иркутск	52,5	104,0	41,1	174,8
Манжоули	49,6	117,5	38,4	186,5
Хабаровск	48,5	135,1	37,91	200,4
Ташкент	41,3	69,6	32,3	145,2
Ашхабад	37,9	58,3	30,4	134,5
Пекин	40,0	116,3	28,7	174,1
Кокубунжи	35,7	139,5	35,7	206,8
Манила	14,6	121,1	3,6	191,1
Ванимо	-2,75	141,3	12,3	212,6

Анализ ионосферных данных показал, что реакция ионосферы на бурю зависит от времени ее начала и формы вариаций индекса D_{st} . Если буря в индексе D_{st} имеет хорошо выраженное начало, один минимум и непродолжительна по времени, то на высоких широтах ночью наблюдаются поглощение и экранизация F_2 -слоя E_s -слоем, на средних широтах возможны отрицательные возмущения. Днем наблюдаются мощные отрицательные возмущения (> 50%) как на высоких, так и на средних широтах. После окончания бури происходит быстрое восстановление ионосферы до невозмущенного уровня уже на следующие сутки. Если буря имеет не один минимум и продолжительна по времени, то восстановление невозмущенного уровня происходит постепенно и заканчивается на 3–4-й день после бури.

Сложные бури наблюдаются достаточно редко (три за весь исследуемый период – октябрь 1989-го и 2003-го и ноябрь 2004 г.). К сожалению, во время бурь такого типа ионосферные данные часто отсут-

ствуют, особенно на высоких широтах. Буря с двумя главными фазами в октябре 1989 г. наиболее обеспечена данными. Анализ этой бури проведен в работе [13], но основное внимание уделено экваториальной аномалии. Мы рассматриваем средние и высокие широты. На рис. 1 (вверху) показаны вариации f_0F_2 во время этой бури в двух долготных секторах 60–105 и 120–160° в.д.

Начало бури приходится на вечерние часы местного времени и приводит к срыву суточного хода и исчезновению отражений от F_2 -слоя в ночные часы во время первой главной фазы на высоких широтах и понижению f_0F_2 на средних широтах в обоих секторах. Днем на фазе восстановления критические частоты меньше невозмущенного уровня в 1,5–2,5 раза в зависимости от широты станции.

Вторая главная фаза также соответствует ночным часам и приводит к тем же эффектам, что и первая. Различия в вариациях f_0F_2 в разных секторах наблюдались на фазе восстановления. В секторе 60–105° в.д. дневные критические частоты F_2 -слоя 22 октября восстанавливаются к невозмущенному уровню, но 23 октября снова понижаются. Окончательное восстановление происходит только на третий день, 24 октября. В секторе 120–160° в.д. дневные f_0F_2 имеют более низкие значения. Так, 22 и 23 октября происходит постепенное восстановление ионизации в F_2 -слое и только 24 октября, т.е. на третий день, критические частоты близки к спокойному уровню. Ночные значения f_0F_2 остаются низкими весь период фазы восстановления в обоих секторах. На низкоширотных станциях возмущения положительны. Различия проявлений геомагнитной бури на фазе восстановления на разных долготах были отмечены нами в работах [7, 8].

Более наглядно картина возмущений видна на карте изолиний f_0F_2 в координатах UT – геомагнитная широта для сектора 120–160° в.д. на нижней панели рис. 1.

Буря с одним минимумом D_{st} представлена на рис. 2, на котором показаны вариации и карта изолиний f_0F_2 в ноябре 1989 г. ($D_{st} = -266$ нТл в 23 UT 17 ноября). Начало бури также приходится на вечерний сектор местного времени. При увеличении индекса геомагнитной активности K_p до 4–7 наблюдается срыв суточного хода f_0F_2 , более выраженный в долготном секторе 60–105° в.д., так как в нем возмущение начинается после полудня. Во время главной фазы бури на высоких широтах ночью появились поглощение и аномальная ионизации в E - и F_2 -слоях, на средних широтах – отрицательные возмущения. На фазе восстановления днем наблюдались мощные отрицательные возмущения, когда на широтах больше 45° f_0F_2 ниже спокойного уровня более чем в 2 раза. Амплитуда возмущения уменьшалась при уменьшении широты станции. На следующие сутки уровень ионизации почти полностью восстановился. Следует отметить, что сопоставление вариации критических частот на станциях в секторах 60–105 и 120–160° в.д. показало, что они подобны, но более четко выражены во втором секторе.

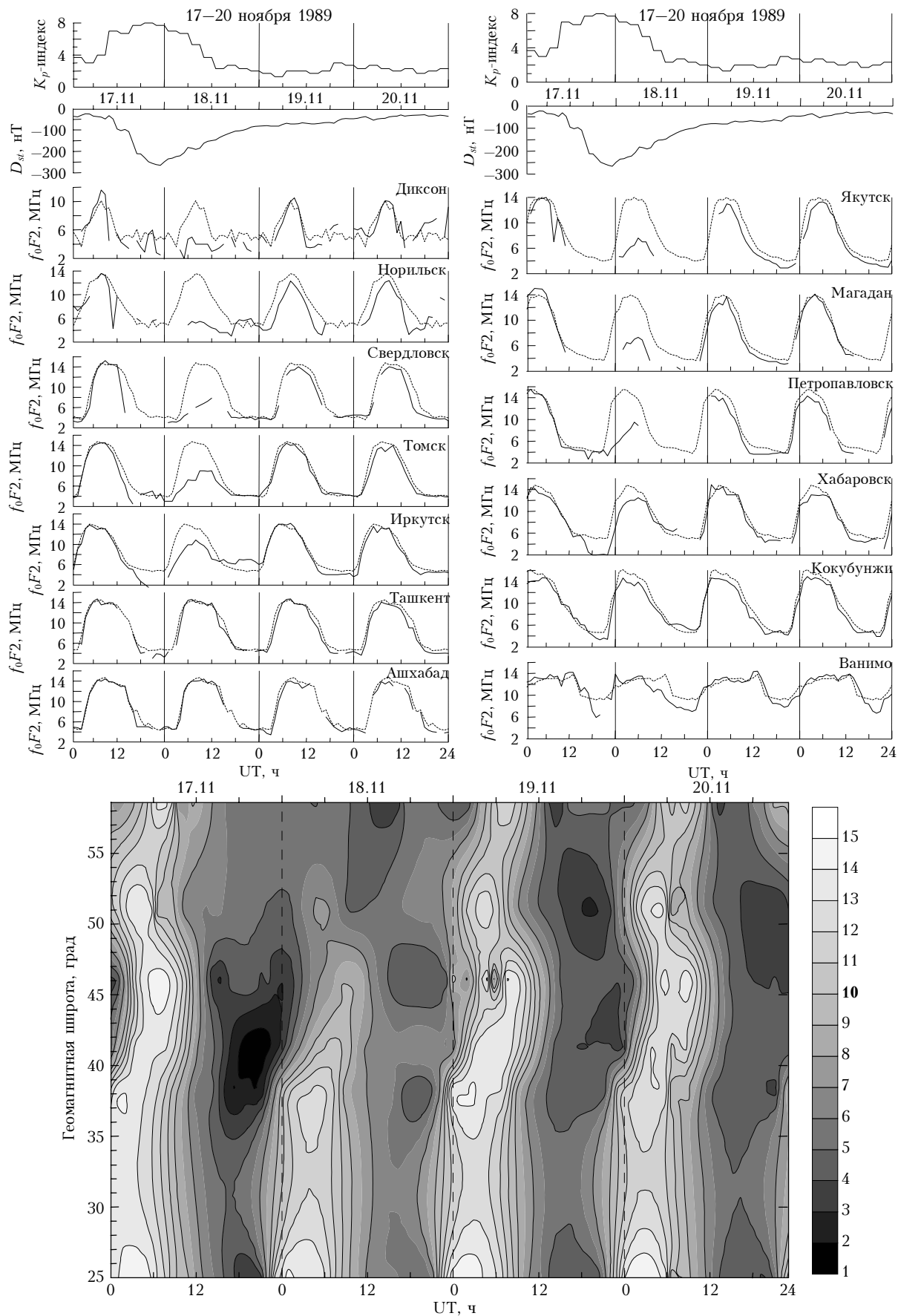


Рис. 2. Вариации D_{st} и f_0F_2 (вверху) и изолинии f_0F_2 (внизу) для бури с одним минимумом D_{st}

Проявление интенсивных геомагнитных бурь в ионосфере Восточной Азии

На карте изолиний f_0F2 хорошо видно, как область низкой ионизации расширяется по времени и сдвигается к экватору во время главной фазы и в начале фазы восстановления и как ионосфера восстанавливается к спокойному уровню уже 19 ноября.

Моделирование

Были проведены некоторые предварительные расчеты вариаций электронной концентрации во время бури 6–7 апреля 2000 г., и сделаны оценки вклада различных процессов. Магнитная буря 6–7 апреля 2000 г. является одним из сильнейших геомагнитных возмущений за последние 20 лет ($D_{st} = -320$ нТл около 02 UT 7 апреля). Максимальное значение K_p достигало 9⁻. Эта буря по уровню освещенности близка к равноденствию и наблюдалась в максимуме солнечной активности. Выбор этой бури определяется тем, что, несмотря на ее интенсивность, ни поглощения, ни спорадические слои в E -области не привели к длительному исчезновению отражений от $F2$ -слоя даже на высокоширотных станциях, что редко для бурь такой интенсивности.

Для моделирования была использована теоретическая модель, разработанная в Институте солнечно-земной физики [10, 14]. Эта модель основана на численном решении системы нестационарных уравнений баланса частиц и энергии тепловой плазмы в замкнутых геомагнитных силовых трубках, основания которых расположены на высоте 100 км.

Для описания пространственно-временных вариаций температуры и концентраций нейтральных компонентов использовалась глобальная эмпирическая модель термосферы MSIS-86. Скорости горизонтального термосферного ветра определялись по модели HWM-90. Значения интегрального потока и средней энергии высыпавшихся электронов, необходимые для расчета скоростей авроральной ионизации, взяты из глобальной модели электронных высыпаний [15]. Электрическое поле магнитосферной конвекции определялось в соответствии с эмпирической моделью распределения потенциала [16].

Реакция ионосферы на геомагнитную бурю воспроизводилась путем расчета вариаций параметров плазмы во всей геомагнитной трубке, основание которой в северном полушарии располагалось в точках с географическими координатами ионосферных станций из табл. 2. Изменения электрических полей со временем учитывались через реальные вариации часовых значений индексов геомагнитной активности (K_p , A_p) и параметров межпланетного магнитного поля (B_z , B_y).

На рис. 3 представлены вариации f_0F2 и индексов K_p и D_{st} для этой бури. Толстые сплошные линии показывают измеренные критические частоты $F2$ -слоя, пунктирные — значения f_0F2 в спокойный день и тонкие линии — рассчитанные по модели значения f_0F2 .

Отрицательное возмущение, наблюдаемое 7 апреля 2000 г. на всех станциях, представленных на рис. 3, имеет форму возмущения, классифицированного в работе [17] как «отрицательный эффект бури, вызванный

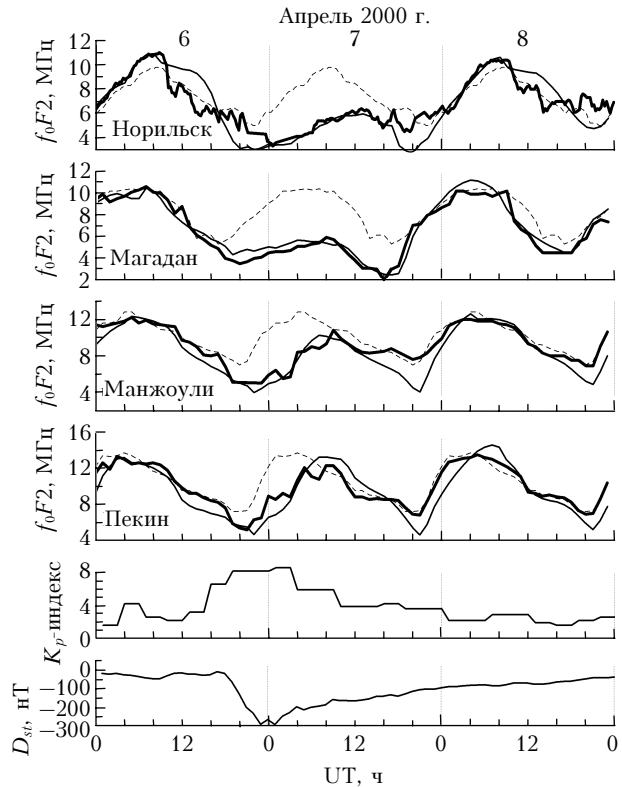


Рис. 3. Результаты моделирования параметров ионосферы для бури 6–7 апреля 2000 г. Жирные кривые — измеренные значения f_0F2 ; пунктирные — вариации f_0F2 в спокойный день; тонкие линии — расчеты по модели

возмущением состава термосферы». Для этого эффекта характерна anomalously низкая электронная концентрация после восхода Солнца, которая может наблюдаться от нескольких часов до нескольких дней, пока продолжается магнитная активность. Разогрев термосферы во время возмущений приводит к понижению отношения $[O]/[N_2]$ на высоте максимума $F2$ -слоя. Это термосферное возмущение распространяется от авроральных до низких широт.

В теоретической модели [10, 14] параметры термосферы задаются согласно эмпирической модели MSIS-86. Хорошо известно, что модель MSIS-86 не предсказывает точное отношение $[O]/[N_2]$ во время возмущений. Она дает завышенное значение для отрицательных возмущений [18], поэтому расчеты выполнялись с коррекцией этого отношения, как было показано нами в работе [10]. Полученные таким образом расчеты хорошо согласуются с измеренными значениями f_0F2 .

Заключение

Из ионосферных данных следует, что отклик ионосферы на интенсивную бурю определяется временем внезапного начала бури и временным ходом вариаций D_{st} . Если буря имеет хорошо выраженное начало, один максимум и непродолжительна по времени, ночью наблюдаются полное поглощение и экранирование $F2$ -слоя спорадическим слоем E_s на высоких широтах и отрицательные возмущения на

средних широтах. Днем мощные отрицательные возмущения ($> 50\%$) наблюдались как на высоких, так и на средних широтах. После окончания бури ионосфера восстанавливается до невозмущенного состояния на следующий день. Если во время бури D_{st} -вариация имеет сложный характер с двумя или более минимумами, ионосфера восстанавливается медленно и возвращается в невозмущенное состояние на 3–4-й день после окончания бури.

Измеренные и рассчитанные значения f_0F_2 согласуются между собой как на высоких, так и на средних широтах. Длительные отрицательные возмущения, наблюдаемые во время геомагнитных бурь, вероятно, вызваны изменением состава термосферы.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 05-05-64634) и частично INTAS-06-1000013-8823.

1. Danilov A.D., Lastovicka J. Effects of geomagnetic storms on the ionosphere and atmosphere // Int. J. Geomagn. Aeron. 2001. V. 2. N 3. P. 1–24.
2. Prolss G.W., Ocko M. Propagation of upper atmospheric storm effects towards lower latitudes // Adv. Space Res. 2000. V. 26. N 1. P. 131–135.
3. Reddy G.A., Mayer H.G. Storm-time penetration to low latitudes of magnetic-ionospheric convection and convection-driven thermospheric winds // Geophys. Res. Lett. 1998. V. 25. N 6. P. 3075–3081.
4. Rishbeth H. How the thermospheric circulation affects the ionospheric F2-layer // J. Atmos. and Sol.-Terr. Phys. 1998. V. 60. N 14. P. 1385–1402.
5. Афраймович Э.Л., Косоголов Е.А., Леонович Л.А., Пирог О.М. Глобальная модель крупномасштабных ионосферных возмущений во время магнитной бури 25 сентября 1998, полученная по данным сети GPS // Геомагнетизм и аэрон. 2002. Т. 42. № 4. С. 491–498.
6. Blagoveshchensky D.V., Pirog O.M., Polekh N.M., Chistyakova L.V. Mid-latitude effects of the May 15, 1997 magnetic storm // J. Atmos. and Sol.-Terr. Phys. 2003. V. 65. N 2. P. 203–210.
7. Pirog O.M., Polekh N.M., Tashchilin A.V., Romanova E.B. Response of ionosphere to strong geomagnetic storm: observation and modeling // Adv. Space Res. 2006. V. 37. N 2. P. 1081–1087.
8. Zhrebtsov G.A., Pirog O.M., Polekh N.M. Ionospheric effects of geomagnetic storms in different longitude sectors // Chin. J. Space Res. 2005. V. 25. N 5. P. 468–473.
9. Pirog O.M., Polekh N.M., Zhrebtsov G.A. et al. Season variation of ionospheric effects of geomagnetic storm at different latitudes of East Asia // Adv. Space Res. 2006. V. 37. N 5. P. 1075–1080.
10. Romanova E.B., Tashchilin A.V., Zhrebtsov G. A., Pirog O.M., Polekh N.M. et al. Modeling of the seasonal effects of geomagnetic storms in the Eastern Asia ionosphere // Int. J. Geomagn. Aeron. 2006. V. 6. N 3. G13003, doi:10.1029/2005G1000119.
11. Жеребцов Г.А., Пирог О.М., Полех Н.М., Ратовский К.Г., Смирнов В.Ф., Степанов Л.Е., Дзэнькуй Ши, Cao Ван. Ионосферная обстановка в Восточно-Азиатском долготном секторе во время геоактивного периода октябрь – ноябрь 2003 // Геомагнетизм и аэрон. 2005. Т. 45. № 1. С. 101–108.
12. Pirog O.M., Polekh N.M., Voeykov S.V. et al. Ionospheric Disturbances in the East-Asian Region during Geomagnetic Storm in November, 2004 // Adv. Space Res. 2007. V. 39. N 8. P. 1335–1341.
13. Yeh C., Ma S.Y., Lin K.H. et al. Global ionospheric effects of the October 1989 geomagnetic storm // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. N 4. P. 6201–6218.
14. Tashchilin A.V., Romanova E.B. Numerical modeling the high-latitude ionosphere // Proc. of COSPAR Colloquia Series. 2002. V. 1. P. 315–325.
15. Hardy D.A., Gussenhoven M.S., Raistrick R., McNeil W.J. Statistical and functional representation of the pattern of auroral energy flux, number flux, and conductivity // J. Geophys. Res. 1987. V. 92. N 11. P. 12275–12294.
16. Sojka J.J., Rasmussen C.E., Schunk R.W. An interplanetary magnetic field dependent model of the ionospheric convection electric field // J. Geophys. Res. 1986. V. 91. N 10. P. 11281–11290.
17. Prolss G.W., Brace L.H., Mayr H.G., Carignan G.R. Ionospheric storm effects at subauroral latitudes: a case study // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. N 12. P. 1275–1288.
18. Buonsanto M.J., Gonzalez S.A., Lu G., Reinisch B.W., Thayer J.P. Coordinated incoherent scatter radar study of the January, 1997 storm // J. Geophys. Res. 1999. V. 104. N 12. P. 24625–24637.

E.B. Romanova, A.V. Tashchilin, O.M. Pirog, N.M. Polekh, G.A. Zhrebtsov, Jiankui Shi, Xiao Wang.
Manifestation of large geomagnetic storms in the ionosphere of East Asia.

We present the results derived from investigation of the ionospheric response to large geomagnetic storms with $D_{st} < (-200 \div -300 \text{ nT})$ observed during the period of two last cycles of solar activity. The analysis of the behavior of ionosphere is based on the measurements by a network of ionospheric stations located at different latitudes in the longitudinal sector of $60\text{--}150^\circ\text{E}$. Also there are presented the results of numerical modeling of ionospheric parameters during the geomagnetic storm in April, 2000, which show a good agreement between calculations and measurements. As the modeling results illustrates, prolonged negative ionospheric disturbances observed during geomagnetic storms may be produced by the change of thermosphere composition.