

О.М. Пирог, Н.М. Полех, А.В. Тацилин, Е.Б. Романова

Градиенты ионизации в послеполуденных ионосферных провалах в Восточном секторе

Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск

Поступила в редакцию 29.08.2007 г.

По данным меридиональной цепочки понозондов, расположенных в Восточной Сибири и в Китае, проанализированы ионосферные бури различной интенсивности. Получено, что послеполуденные провалы ионизации могут наблюдаться во время сильных и умеренных бурь в главную фазу бури, если ее начало приходится на вечерние часы, или на фазе восстановления, если она начинается в другое время. Они наблюдаются преимущественно в равноденствие. Проведены модельные расчеты вариаций электронной концентрации во время бури 3–6 апреля 2004 г., и показано, что положение минимума и полярной стенки провала в послеполуденном секторе совпадает с полосой западного дрейфа, который присутствует в секторе от 13 до 17 MLT на геомагнитных широтах от 55 до 65°.

Введение

Резкие понижения ионизации в максимуме F_2 -слоя в дневной F -области наблюдались давно и были известны как главный ионосферный провал, среднеширотный провал и срывы суточного хода f_0F_2 . Хотя все три термина, возможно, описывали одно и то же явление, свойства их имели мало общего. В основном считалось, что дневной провал появляется спорадически, связан с высокой магнитной активностью и типичен для субавроральных широт [1, 2].

Срывы суточного хода f_0F_2 в послеполуденные часы ассоциировались с движением к экватору главного ионосферного провала во время геомагнитных бурь. Этот тип отрицательного эффекта бурь характеризуется глубоким падением ионизации, особенно впечатляющим, если следует за положительной фазой [3–5]. Повышение ионизации в вечернем секторе перед срывом суточного хода получило название «сумеречный эффект» [6]. Кроме того, наблюдалось резкое различие LT появления провала на станциях, расположенных на одной магнитной широте, но на разных магнитных долготах. Так, провал появлялся после полудня в Гренландии и утром на Аляске.

Накопленные экспериментальные данные позволили установить основные зависимости положения и структуры провала от времени суток, сезона, уровня магнитной и солнечной активностей. Провалы, наблюдаемые вблизи полудня, обычно узкие, их ширина ~4–6° независимо от сезона, но могут иметь большую протяженность по долготе [7]. С изменением геомагнитной активности положение минимума провала смещается в экваториальном направлении примерно на 2° на единицу K_p . Однако ионосферный провал является более сложным образованием, чем простое снижение электронной концентрации в определенном интервале широт. В области провала имеют место широтные и высотные аномалии в распре-

лении температуры заряженных частиц, изменении ионного состава, дрейфа плазмы и т.д. Образование провала — одно из проявлений ионосферно-магнитосферного взаимодействия, определяющего в целом режим высокоширотной ионосферы. Полагают, что в формировании провала существенную роль играют магнитосферная конвекция и высыпания энергичных электронов [6, 8, 9]. Так, в ночные и вечерние часы в области провала наблюдается сложная система конвекции с медленным восточным дрейфом на экваториальной стенке провала и быстрым западным дрейфом в минимуме провала и на полярной стенке.

В данной статье рассмотрены особенности появления послеполуденного провала в Восточной Азии. Для анализа использованы данные меридиональной цепочки дигизондов и ионозондов, расположенной в Восточной Сибири и в Китае, и данные геомагнитных индексов D_{st} , K_p и AE , а также теоретическая модель ионосферно-плазмосферного взаимодействия [10].

Анализ данных

Были рассмотрены ионосферные бури различной интенсивности за период 2000–2005 гг. на различных станциях (табл. 1).

Таблица 1
Список станций, данные которых использованы при анализе, и их координаты

Станция	Географические		Геомагнитные	
	широта, град	долгота, град	широта, град	долгота, град
Норильск	69,20	88,26	58,71	165,7
Жиганск	66,3	123,4	55,2	190,0
Якутск	62,0	129,6	50,99	194,1
Магадан	60,12	151,0	50,75	210,8
Иркутск	52,5	104,0	41,1	174,8
Хабаровск	48,5	135,1	37,91	200,4
Манжоули	44,0	117,0	32,0	189,0
Пекин	40,0	116	28,7	188

Таблица 2

Дата, число случаев и фазы бурь, во время которых наблюдались срывы суточного хода f_0F2

Дата	N	Фаза бури
06–08.04.2000	1	восстановления
17–20.09.2000	1	восстановления
17–21.04.2002	4	главная, восстановления (3)
01–06.10.2002	3	начальная, восстановления (3)
17–19.08.2003	1	главная
13–16.10.2003	1	восстановления
22–22.10.2003	2	восстановления (2)
9–14.03.2004	1	восстановления
03–07.04.2004	3	восстановления (3)
12–16.10.2004	1	главная
07–10.05.2005	2	начальная, главная
15–19.05.2005	3	восстановления (3)
28–31.05.2005	3	начальная, восстановления, главная
23–26.08.2005	2	начальная, главная
31.08–04.09.2005	4	начальная, восстановления (3)
22–28.09.2005	2	восстановления (2)

Примечание. Цифры в скобках – число случаев появления послеполуденных провалов в данную фазу бури.

Из табл. 2 следует, что геомагнитные бури наблюдаются преимущественно в периоды равноденствия и в начале и конце лета на фазе восстановления. Анализ данных совместно с геомагнитными индексами показал, что на фазе восстановления послеполуденные провалы наблюдаются на высоких и авроральных широтах с $L > 3$ во время суббурь, когда $500 < AE < 1000$ нТ и $K_p > 3$. Они подобны отрицательным возмущениям на субавроральных широтах, описанным в работе [3], и связаны с движением главного ионосферного провала (ГИП). Во время фазы роста или в максимуме бури данные высокоширотных станций часто отсутствуют из-за поглощения или экранирования E -слоем и главный ионосферный провал сдвигается на средние широты.

На рис. 1, а показаны вариации D_{st} и f_0F2 на меридиональной цепочке станций во время умеренной бури в равноденствие 13–16 октября 2003 г. Пунктирные линии показывают вариации f_0F2 в спокойный день, сплошные – текущие значения. На фазе развития геомагнитной бури при D_{st} , равном -60 нТ, на высоких широтах (Норильск и Якутск) в вечерние часы появился срыв суточного хода f_0F2 . Следует отметить, что $LT = UT + \Delta t$, где $\Delta t = 6 \div 8$ ч в зависимости от долготы станции (см. табл. 1).

На рис. 1, б показаны вариации изолиний критической частоты слоя $F2$ в системе координат «местное время – геомагнитная широта» для двух последовательных дней: 13 октября (спокойный день) и 14 октября, когда наблюдался срыв суточного хода. На карте изолиний f_0F2 отчетливо видно, что 13 октября область главного ионосферного провала ($f_0F2 < 3$ МГц) расположена на геомагнитных широтах $47-55^\circ$ в период времени 01–05 LT. А 14 октября при $K_p > 4$ изолинии искажены в дневное время и после срыва суточного хода в 18 LT область низких значений расширяется к экватору до 35° и по времени с 20 до 06 LT. Полярная граница остается примерно на том же уровне. Значения AE -индекса по-

вышаются до 1000 нТ в момент появления срыва суточного хода f_0F2 .

Срыв суточного хода в вечерние часы 31 августа (рис. 2, а) совпадает с резким увеличением K_p и AE (до 500 нТ). Во время главной фазы, которая совпадает с местной полночью, отражения от $F2$ -слоя отсутствуют. Анализ ионограмм показал, что E_s -слои с предельными частотами 6–7 МГц экранируют $F2$ -слой в это время. Интенсивные отрицательные возмущения (до 50%) наблюдались в дневные часы во время фазы восстановления 1 сентября. Значения f_0F2 начали восстанавливаться к спокойному уровню 2 сентября. Однако повышение K_p и AE -индексов привело к новому падению f_0F2 .

Изолинии f_0F2 , представленные на рис. 2, б для возмущенного дня 2 сентября, показывают, как крутая экваториальная стенка глубокого и широкого провала формируется в вечернем секторе и протягивается до Манжоули (геомагнитная широта 32°).

Представленные примеры послеполуденных провалов иллюстрируют стабильность этого явления относительно Солнца, зависимость от геомагнитной активности и расширение области аномально низкой ночной ионизации на средние широты.

Моделирование

Для изучения отклика ионосферы на исследуемую геомагнитную бурю была использована разработанная в ИСЗФ СО РАН теоретическая модель ионосферно-плазмозферного взаимодействия [10]. 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 [11]. Электрическое поле магнитосферной конвекции определялось в соответствии с эмпирической моделью распределения потенциала [12].

Реакция ионосферы на рассматриваемые магнитные бури 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. 1. 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).

Изменения состава термосферы (отношение $[O]/[N_2]$), полученные по модели MSIS-86, не воспроизводят наблюдаемое поведение ионосферы во время магнитных бурь, поэтому они корректировались, как было показано в работе [13].

13–16 октября 2003 г.

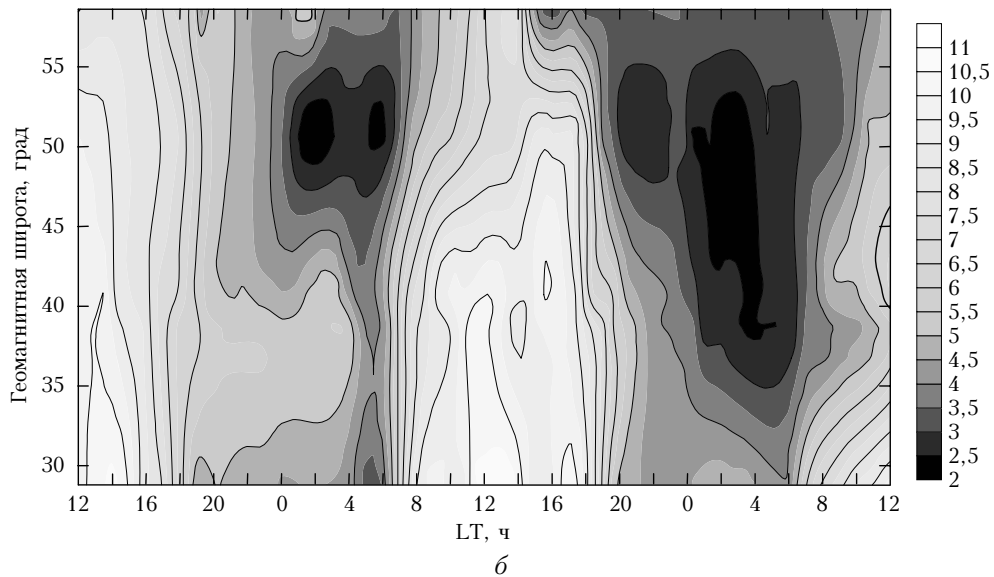
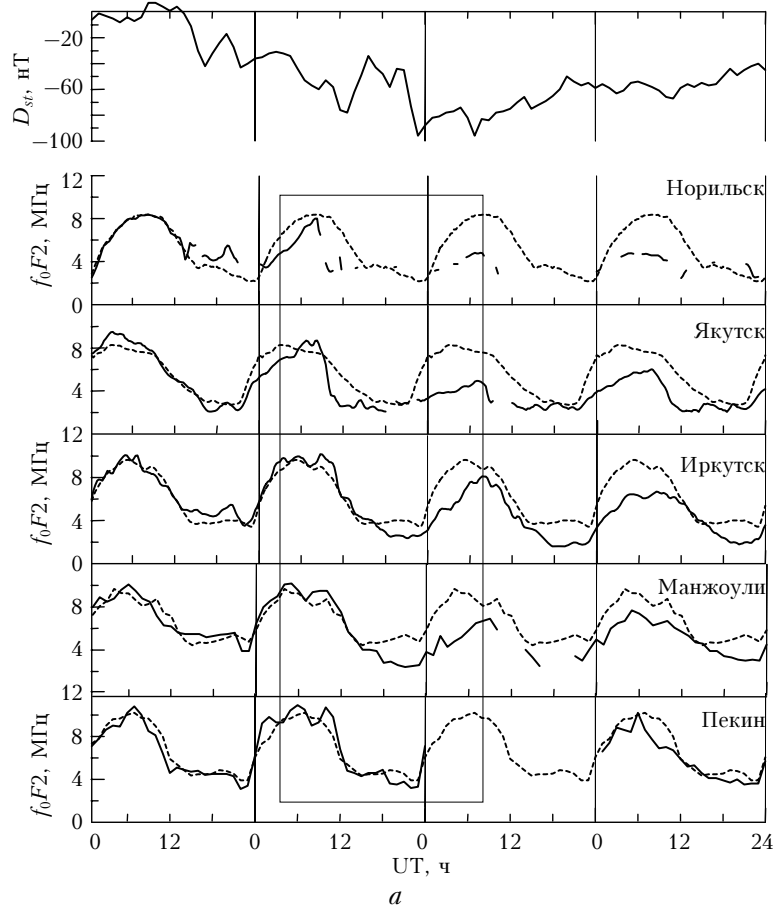


Рис. 1. Вариации D_{st} и f_0F2 на меридиональной цепочке станций 13–16 октября 2003 г. (а); изолинии f_0F2 в системе координат «местное время – геомагнитная широта» (б)

Результаты моделирования, полученные после такой корректировки (вариант 1), представлены на рис. 3. Тонкой линией (вариант 1) показаны рассчитанные вариации f_0F2 для ст. Норильск, Жиганск и Якутск; кружки изображают измеренные величины f_0F2 ; пунктир – спокойный уровень, вычисленный

по измерениям f_0F2 в спокойные дни. Отметим хорошее согласие рассчитанных и измеренных вариаций критической частоты в спокойные и умеренно возмущенные периоды. Срыв суточного хода f_0F2 , наблюдаемый 6 апреля 2004 г. около 12 UT, не воспроизводится модельными расчетами по варианту 1.

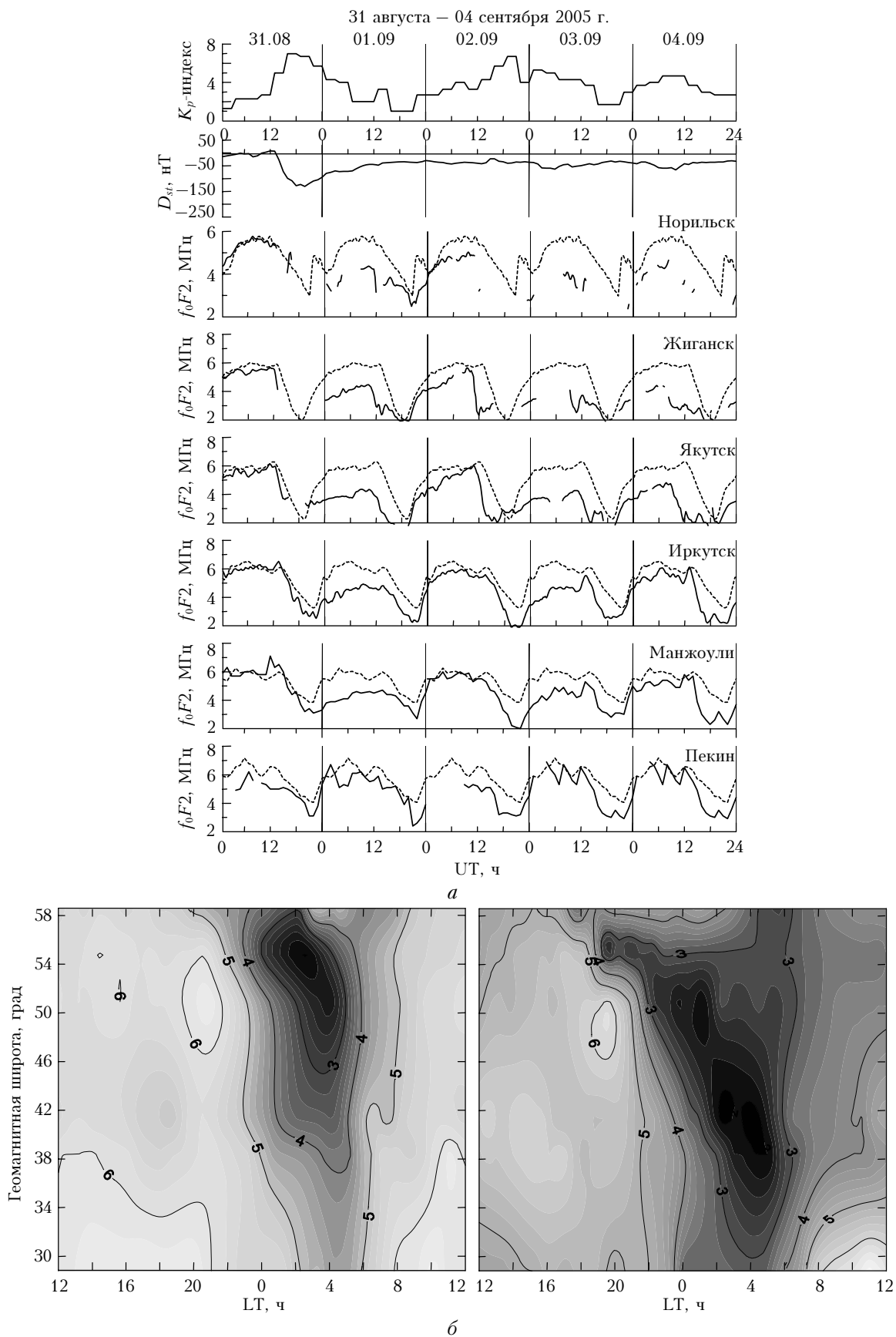


Рис. 2. Вариации K_p , D_{st} и f_oF2 для периода 31 августа – 4 сентября 2005 г. (а); изолинии f_oF2 для спокойных условий (слева) и 2 сентября (справа) (б)

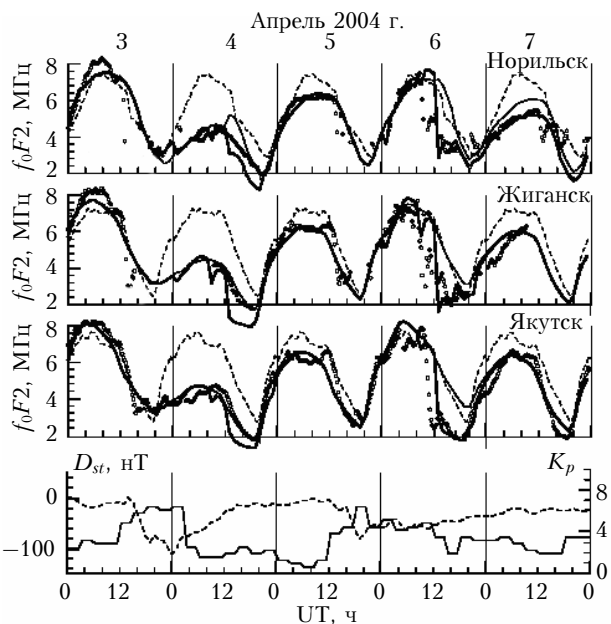


Рис. 3. Результаты моделирования f_0F2 , полученные для трех высокоширотных станций. Вариации D_{st} и K_p приведены в нижней части рисунка

Для воспроизведения ситуации прохождения провала над ст. Норильск, Жиганск и Якутск необходимо проведение коррекции эмпирических моделей магнитосферных источников к условиям рас-

сматриваемой геомагнитной бури. С этой целью выполнены расчеты суточного хода f_0F2 по варианту 2 (жирная линия на рис. 3) со следующими поправками, внесенными в эмпирическую модель [12]: зона магнитосферной конвекции расширена на 10° к экватору, падение электрического потенциала через полярную шапку задано согласно [14]. Корректность подобных поправок обсуждалась в работе [15]. Как видно из рис. 3, в модельных расчетах по варианту 2 (жирная линия) срыв суточного хода f_0F2 воспроизводится на всех указанных станциях.

Для анализа полученных результатов были выполнены расчеты глобальных распределений электронной концентрации и скоростей электромагнитного дрейфа с учетом коротации для спокойного дня 2 апреля 2004 г. по варианту 1 и для возмущенного дня 6 апреля 2004 г. по варианту 2 для 13 и 17 UT. На рис. 4 приведены значения $\lg N_e$ на высоте 300 км в координатах «геомагнитная широта – MLT» для 1 и 2 вариантов соответственно. Рассчитанные скорости электромагнитного дрейфа W показаны стрелками.

Электромагнитный дрейф восточного направления с незначительным отклонением в полярной шапке преобладает в спокойный день (на рис. 4 соответствует направлению против часовой стрелки). Скорость его ~ 200 м/с. Главный ионосферный провал (ГИП) формируется на ночной стороне вследствие медленного дрейфа плазмы в отсутствие источников ионизации, что приводит к рекомбинации плазмы

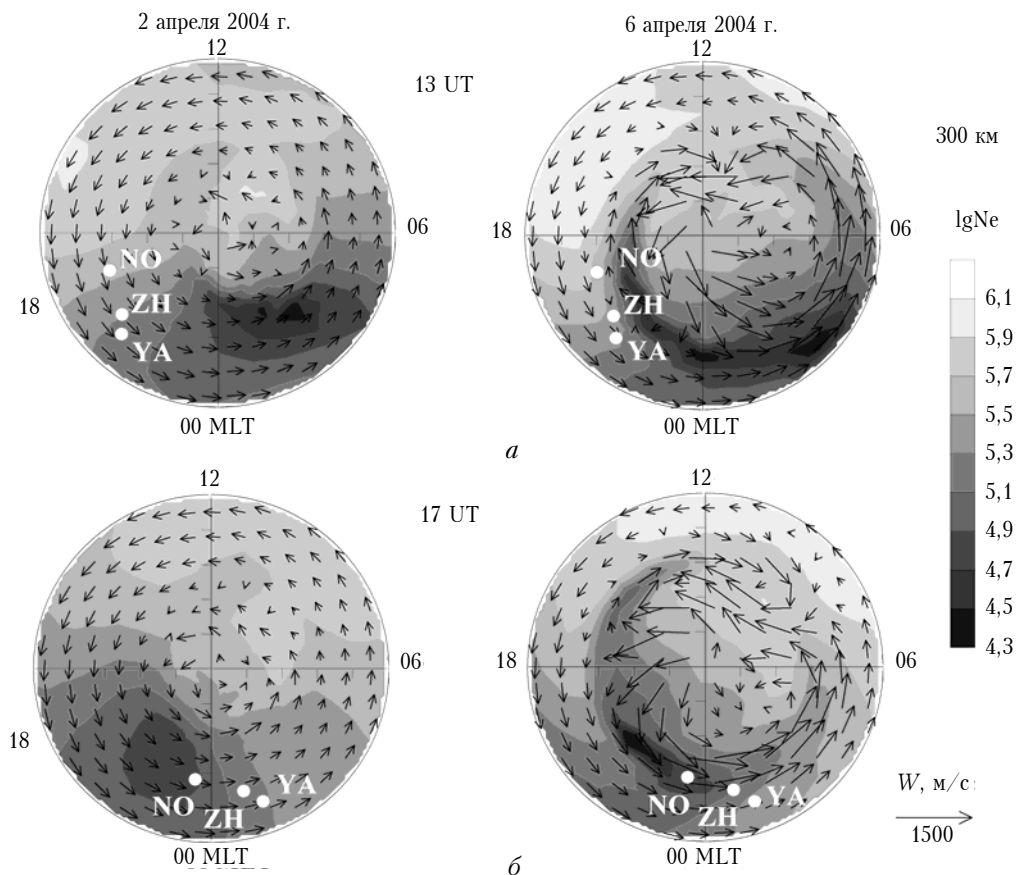


Рис. 4. Вариации $\lg N_e$ на высоте 300 км в координатах «геомагнитная широта – MLT» для 1 (а) и 2 (б) вариантов. Внешняя окружность представляет собой геомагнитную широту, равную 40°

до очень низких значений. Различия в положении и форме ГИП в 13 и 17 UT, вероятно, есть следствие UT-вариаций [10].

Во время бури 6 апреля 2004 г. в 13 UT ГИП сужается и протягивается по долготе от 17 до ~07 MLT. Очевидно, провал на вечерней стороне формируется за счет выноса плазмы низкой концентрации с ночной стороны на вечернюю западным дрейфом. Дрейф достигает скорости ~700 м/с в секторе от 17 до 20 MLT и на геомагнитных широтах от 65 до 72°. В секторе от 00 до 07 MLT положение ГИП совпадает с восточным дрейфом, скорости которого также велики (~1000–1200 м/с). Этот дрейф выносит плазму низкой концентрации с ночной стороны в утренний сектор, формируя провал на утренней стороне. В 17 UT на ночной стороне также появляется струя восточного дрейфа (скорости ~1000–1300 м/с), совпадающая с положением ГИП на ночной стороне. Положение ГИП в послеполуденном секторе совпадает с полосой западного дрейфа (скорости ~700 м/с), который присутствует в секторе от 13 до 17 MLT и от 55 до 65° геомагнитной широты.

Дискуссия

Наиболее вероятным объяснением резких понижений критических частот слоя F_2 после полудня является эффект влияния быстрой конвекции плазмы в западном направлении под действием интенсивных электрических полей [16, 17]. Спутниковые измерения показали, что во время магнитных бурь на экваториальной границе авроральной зоны наблюдаются интенсивные (до 250 мВ/м) меридиональные электрические поля, направленные к полюсу [18]. Такие поля вызывают западный дрейф с большими скоростями. По данным некогерентного рассеяния в главном провале ионизации наблюдается западный дрейф со скоростями выше 1000 м/с. Одновременные спутниковые и наземные измерения эффектов быстрых субавроральных дрейфов показывают, что развитие узкой полосы западного дрейфа с большими скоростями (по терминологии авторов, поляризационной струи) за 15–20 мин приводит к интенсивному опустошению ионизации в F -области [19]. Это соответствует быстрому формированию или углублению провала в существующей фоновой ионизации.

Модельные расчеты вариаций электронной плотности во время наблюдений вечерних градиентов ионизации, представленные в данной статье, подтверждают предположение, что узкий провал в послеполуденном секторе формируется полосой западного дрейфа с высокими скоростями.

Одновременные измерения электронной концентрации, электронной и ионной температур и дрейфа ионов методом некогерентного рассеяния [8, 20] показали большие значения T_e и T_i и скоростей дрейфа в провале, что позволило предположить, что кроме влияния быстрого дрейфа большую роль может играть увеличение коэффициента реакции $O^+ + N_2 = NO^+ + N$ в присутствии больших электрических полей. При этом наблюдаются провал с резким экваториальным краем и сдвиг его на дневную сторону.

Следовательно, резкое уменьшение критических частот F_2 -слоя после полудня и в вечерние часы может быть следствием быстрой конвекции плазмы в западном направлении под действием интенсивных электрических полей.

Заключение

Проведенные нами исследования в Восточно-Азиатском регионе позволили сделать следующие выводы.

Резкие градиенты ионизации в послеполуденном секторе определяются формированием крутой экваториальной стенки главного ионосферного провала.

Послеполуденный провал наблюдается на субавроральных широтах Восточно-Азиатского региона преимущественно в равноденствие и в переходный период между равноденствием и летом на фазе восстановления геомагнитной бури. Если индексы K_p и AE возрастают, область провала расширяется во времени и пространстве к низким широтам.

Результаты моделирования показывают, что ГИП в вечернем секторе формируется полосой западного дрейфа со скоростями ~700 м/с, который переносит плазму с низкой концентрацией с ночной стороны на вечернюю. В утреннем секторе восточный дрейф с большими скоростями ~1000–1200 м/с выносит плазму низкой концентрации с ночной стороны в утренний сектор, формируя провал на утренней стороне.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 07-05-00950-а) и частично INTAS-06-1000013-8823.

1. Бенькова Н.П., Козлов Е.Ф., Можжев А.М., Осипов Н.К., Саморокин Н.И. Главный ионосферный провал в дневном секторе по данным вертикального зондирования // Геомагнетизм и аэрон. 1980. Т. 20. № 5. С. 817–821.
2. Беспозванная А.С., Пирог О.М., Шука Т.И. Широтно-временные особенности послеполуденной ионизации слоя F_2 по данным меридиональной цепочки ионосферных станций // Геомагнетизм и аэрон. 1986. Т. 20. № 2. С. 320–322.
3. Prolss G.W., Brace L.H., Mayer H.G., Carignan G.R., Killen T.L., Klobuchar J.A. Ionospheric storm effects at subauroral latitudes: a case study // J. Geophys. Res. A. 1991. V. 96. N 2. P. 1275–1288.
4. Buonsanto M.J., Foster J.C., Sipler D.P. Observations from Millstone Hill during the geomagnetic disturbances of March and April 1990 // J. Geophys. Res. A. 1992. V. 97. N 2. P. 1225–1243.
5. Mendillo M., Klobuchar A. Total electron content: Synthesis of past storm studies and needed future work // Radio Sci. 2006. V. 41 RS5S02, doi: 10.1029/2005RS003394.
6. Buonsanto M.J. Ionospheric storms — a review // Space Sci. Rev. 1999. V. 88. N 3. P. 563–601.
7. Whalen J.A. The daytime F layer trough and its relation to ionospheric-magnetospheric convection // J. Geophys. Res. A. 1989. V. 94. N 12. P. 17169–17184.
8. Holt J.M., Wand R.H., Evans J.V. Millstone Hill measurements 26.02.79 during the solar eclipse and formation of a midday F -region trough // J. Atmos. and Terr. Phys. 1984. V. 46. N 3. P. 251–254.
9. Foster J.C. Storm-Time Plasma Transport at Middle and High Latitudes // J. Geophys. Res. A. 1993. V. 98. N 3. P. 1675–1689.

10. *Tashchilin A.V., Romanova E.B.* Numerical modeling the high-latitude ionosphere // Proc. of COSPAR Colloquia Series. 2002. V. 1. N 2. P. 315–325.
11. *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. A. 1987. V. 92. N 1. P. 12275–12294.
12. *Sojka J.J., Rasmussen C.E., Schunk R.W.* An interplanetary magnetic field dependent model of the ionospheric convection electric field // J. Geophys. Res. A. 1986. V. 91. N 10. P. 11281–11290.
13. *Romanova E.B., Tashchilin A.V., Zherebtsov G.A., Pirog O.V., Polekh N.M., Smirnov V.F., Stepanov A.E., Shi J., Wang X.* Modeling of the seasonal effects of geomagnetic storms in the Eastern Asia ionosphere // Int. J. Geomagn. Aeron. 2006. V. 6. G13003, doi:10.1029/2005G1000119.
14. *Oliver W.L., Holt J.M., Wand R.H., Evans J.V.* Millston Hill incoherent scatter observations of auroral convection over $60^\circ < \Lambda < 75^\circ$. 3. Average patterns versus K_p // J. Geophys. Res. A. 1983. V. 88. N 7. P. 5505–5524.
15. *Fuller-Rower T.J., Codrescu M.V., Moffett R.J., Quegan S.* Response of the thermosphere and ionosphere to geomagnetic storms // J. Geophys. Res. A. 1994. V. 99. N 3. P. 3893–4011.
16. *Anderson P.C., Hanson W.B., Heelis R.A., Craven J.D., Baker D.N., Frank L.A.* A proposed production model of rapid subauroral ion drifts and their relationship to substorm evolution // J. Geophys. Res. A. 1993. V. 98. N 4. P. 6069–6078.
17. *Galperin Y.I., Khalipov V.I., Filipov V.M.* Signature of rapid subauroral ion drifts in high-latitude ionosphere structure // Ann. Geophys. 1986. V. 4. N 1. P. 145–154.
18. *Rich F.J., Burke W.J., Kelly M.C., Smiddy M.* Observations of field-aligned currents in association with strong convection electric field at subauroral latitudes // J. Geophys. Res. 1980. V. 85. N 5. P. 2335–2342.
19. *Халипов В.И., Гальперин Ю.И., Лисаков Ю.В., Крапчеве Ж., Николаенко Л.М., Симицын В.М., Собо Ж.* Диффузная авроральная зона II // Косм. исслед. 1977. Т. 15. № 4. С. 708–733.
20. *Lockwood M., Farmer A.D., Opgencorth H.J., Clothiers S.R.* EISCAT observations of plasma convection and the high-latitude winter *F*-region during substorm activity // J. Atmos. and Terr. Phys. 1984. V. 46. N 6–7. P. 489–499.

O.M. Pirog, N.M. Polekh, A.V. Tashchilin, E.B. Romanova. **Density gradients at afternoon ionospheric troughs in the Eastern sector.**

Ionospheric storms different intensities are examined based on the data of the meridional chain of ionospheric stations located in Eastern Siberia and China. It has been determined that afternoon troughs can be observed either during the main phases of strong and moderate storms if their commencements fall on evening hours or during the recovery phase if they begin at some other time. They are mainly observed in the equinox. Model calculations of electron density variations during the storm on April 3–6, 2004 are carried out. It is shown, that the location of the minimum and the polar wall of the afternoon trough coincide with the belt of the westward drift in the time sector 13÷17 MLT at geomagnetic latitudes 55÷65°.