

Отклик ионосферы на магнитную бурю 15 декабря 2006 г. на средних широтах

Н.М. Полех¹, Е.Б. Романова¹, Н.А. Золотухина¹, А.А. Щербаков¹,
З.Ф. Думбрава², М.К. Ивельская³

¹ *Институт солнечно-земной физики СО РАН,
664033, Иркутск, Лермонтова, 126а,*

e-mails: polekh@iszf.irk.ru; ebr@iszf.irk.ru; zolot@iszf.irk.ru; scherbakov@iszf.irk.ru

² *Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
684034, Камчатская обл., Елизовский район, пос. Паратунка, Мирная, 7,
e-mail: labfiz@vzm.kht.ru*

³ *НИИПФ при ФГБОУ ВПО «Иркутский государственный университет»,
664033, Иркутск, бул. Гагарина, 20*

По данным, полученным с помощью ионосферных среднеширотных ионозондов и радара некогерентного рассеяния (Иркутск) исследовался отклик ионосферы на магнитную бурю 15 декабря 2006 г. Во время главной фазы бури на ионосферных станциях было зарегистрировано несколько положительных возмущений, во время которых критические частоты (foF2) были выше на 1–4 МГц невозмущенного уровня. Рост критических частот сопровождался значительными вариациями высоты максимума слоя F2 ионосферы. Анализ временных вариаций foF2 и hmF2 позволил сделать вывод о влиянии крупномасштабных волновых процессов на распределение ионизации на высотах F2 области. С помощью радара HP в Иркутске были зарегистрированы повышения электронной и ионной температур на 200...300 К относительно спокойных условий. Моделирование распределения ионосферных характеристик показало, что наилучшее согласие между экспериментальными и рассчитанными параметрами ионосферы достигается путем коррекции модели состава нейтральной атмосферы и скорости вертикального дрейфа.

Ключевые слова: магнитная буря, ионосферное возмущение, критическая частота, электронная температура, моделирование ионосферной плазмы.

Введение

Магнитная буря в декабре 2006 года была инициирована мощной вспышкой с баллом 4В, зарегистрированной 13 декабря в 02:40 UT, которая сопровождалась рентгеновской вспышкой балла X3.4 и выбросом корональной массы. Ионосферные эффекты этой вспышки сразу проявились в увеличении флуктуаций отраженных сигналов от нижних слоев ионосферы, изменении полного электронного содержания (ПЭС) и сбоях работы навигационных систем (Tereshchenko et al., 2007; Афраймович, 2009) и др. Спустя 35.5 часов 14 декабря в 1414 UT было зарегистрировано внезапное начало магнитной бури [<http://www.noaa.gov/stp/SOLAR/ftpSSC.html>].

Ионосферный отклик на эту бурю включает большой комплекс явлений, зафиксированных наземными обсерваториями и приборами, установленными на спутниках. Одной из самых отличительных особенностей этой бури является повышение электронной концентрации, зарегистрированное в западном полушарии на обширной территории в начальную фазу бури станциями вертикального зондирования, радаром некогерентного рассеяния в Миллстон-Хилл и сетью приемников GPS (Lei et al., 2008a), а в главную фазу бури в азиатско-тихоокеанском регионе (Lei et al., 2008b). По данным японских ионозондов, сети приемников GPS и радара superDARN (Super Dual Auroral Radar Network), установленного на Хоккайдо, наблюдались крупномасштабные перемещающиеся ионосферные возмущения (КМПИВ), которые распространялись как из высоких широт к экватору, так и из области экватора на север (Lei et al., 2008b, Hayashi et al., 2010). Положительное возмущение 15 де-

кабря 2006 г. также было зафиксировано на севере Восточной Сибири по данным сети вертикального и наклонного зондирования (Kurkin et al., 2008). Совместный анализ данных, полученных с помощью сети приемников GPS и спутников серии COSMIC, указал на существование продолжительного положительного возмущения в районе Тихого океана (Pedalella et al., 2009). Оно сопровождалось увеличением высоты максимума слоя F2 более чем на 100 км. Наиболее сильно оно было выражено в области экваториальной аномалии. По мнению авторов, причиной возникновения этого положительного возмущения могут быть нейтральные ветры и электрическое поле восточного направления.

Исследованию эффектов этой бури в ионосфере высоких и субавроральных широт Якутии посвящен анализ данных наземных и спутниковых наблюдений, приведенный в статье (Золотухина и др., 2011; Zolotukhina et al., 2012). Ионосферными станциями Якутии были зарегистрированы интенсивные спорадические слои и высокие значения критических частот (foF2) в ночные часы 14 декабря и аномально высокие значения foF2 в послеполуночном секторе 15 декабря. Авторы пришли к заключению, что появление аномально высоких значений foF2 объясняется высокой плотностью частиц плазменного слоя, сформировавшегося в условиях длительного взаимодействия магнитосферы Земли с плотным солнечным ветром. Высокоширотные спорадические слои и высокий уровень ионизации в вечерние часы обусловлен усилением активности авроральных высыпаний и смещением границы зоны высыпаний. В данной работе продолжено исследование ионосферных эффектов этой бури на средних широтах Азиатского региона, и для объяснения наиболее заметных эффектов проведено моделирование распределения основных ионосферных параметров для выбранных пунктов.

Анализ экспериментальных данных

Для анализа были использованы данные вертикального зондирования, полученные на станциях субавроральных и средних широт. Названия станций, их географические и геомагнитные координаты приведены в таблице. Данные вертикального зондирования станции Магадан взяты на сайте http://www.wdcb.ru/stp/online_data.ru.html, а станции Вакканаи — <http://wdc.nict.go.jp/cgi-bin/ionog/>. Информация о параметрах межпланетного магнитного поля (ММП) и геофизических индексах магнитной активности была получена на сайтах [<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>; <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>] Кроме того, для анализа были привлечены результаты измерений электронной и ионной температур на Иркутском радаре некогерентного рассеяния.

Название и координаты станций

Название	Географические		Геомагнитные	
	широта	долгота	широта	долгота
Якутск	62,0° N	129,9° E	51,2° N	194,8° E
Магадан	60,0° N	151,0° E	50,9° N	211,6° E
Иркутск	52,5° N	104,0° E	41,2° N	175,5° E
Хабаровск	48,5° N	135,1° E	38,1° N	201,3° E
Вакканаи	45,4° N	141,7° E	35,5° N	207,3° E

На рис. 1 приведены временные изменения основных геофизических индексов и вертикальной компоненты ММП-Vz, зарегистрированных во время этой бури. Как следует из рисунка, Vz-компонента ММП повернула на север после 18:00 UT 14 декабря, затем ее направление сменилось на южное около 23:00 UT, которое определило начало главной фазы

бури. AE-индекс начал резко возрастать после 13:00 UT, минимальное значение Dst-индекса достигло величины -146 нТ 15 декабря в 08:00 UT. Наибольшего значения планетарный Kp-индекс достиг в начале суток 15 декабря.

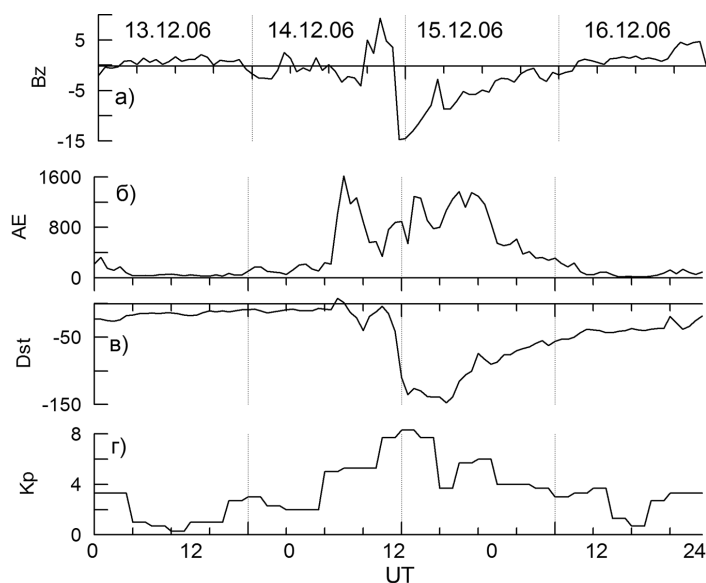


Рис. 1. Временной ход вертикальной компоненты межпланетного магнитного поля B_z (а) аврорального индекса AE (б), Dst (в) и планетарного индекса геомагнитной активности Kp (г) за 13–16 декабря 2006 г.

На рис. 2а приведены вариации критических частот, зарегистрированные 13–16 декабря. Видно, что в Якутске после SSC (sudden storm commencement) 14 декабря наблюдалось возрастание электронной концентрации в ночные часы, значения foF2 достигли 5,3...5,7 МГц в 17:45–18:00 UT (цифра 1 на рис. 2а). Это указывает на то, что станция находилась в зоне высыпания мягких электронов, которые вызвали ионизацию в F2 слое и появление спорадической ионизации на высоте 100...120 км. В Магадане регистрировались очень низкие значения foF2, после 16:00 UT — рассеянные сигналы, и только после 22:30 UT критические частоты стали расти. В Иркутске после 18:00 UT и в Хабаровске в ночные часы также наблюдалось незначительное повышение ионизации относительно спокойных условий. В Вакканаи вариации foF2 в максимуме слоя 14 декабря были незначительными. Самые резкие изменения foF2 отмечались 15 декабря. В утренние часы в Якутске отражения от F2 слоя до 03:00 UT часто отсутствовали из-за поглощения, иногда регистрировались foF2, значения которых были меньше 3 МГц. В 05:15–05:30 UT было зафиксировано резкое увеличение foF2, во время которого они увеличились в 1,7 раза относительно фоновых значений (цифра 2 на рис. 2а). В Магадане с 23:45 до 00:00 UT был зарегистрирован первый скачок foF2 до 6 МГц, затем критическая частота резко снизилась до 4,1...4,2 МГц. С 04:15–04:45 UT наблюдалось второе резкое увеличение foF2 до 10,5 МГц. Природа появления такого увеличения foF2 обсуждалась в работе (Золотухина и др., 2011). На среднеширотных станциях Иркутск, Хабаровск и Вакканаи также наблюдался рост электронной концентрации в отдельные часы суток. В Иркутске наблюдалось три ярко выраженных максимума foF2: в 01:45 UT, 06:45–07:30 UT и 14:15–14:30. В Хабаровске было зарегистрировано также три максимума foF2: в 02:45–03:00 UT, 07:00–07:15 UT (foF2 достигло 10,1 МГц, цифра 3 на рис. 2а), и в 11:45–12:00 UT. В Вакканаи наибольшее возрастание foF2 до 13,6 МГц было зарегистрировано с 03:00 до 05:00 UT. Второй максимум наблюдался в 11:45–12:00 UT. В ночные часы Магадан находился в зоне главного ионосферного провала, уровень ионизации был низкий, и критические частоты не превышали 1,5...2,0 МГц. На остальных станциях ночные значения foF2 также составляли 2...2,5 МГц. Следует отметить одну интересную

особенность поведения ионосферы 16 декабря: в Якутске и Магадане суточные вариации f_oF_2 были ниже или близки к фоновым значениям, в то время как в Иркутске, Хабаровске и Вакканаи они были выше их.

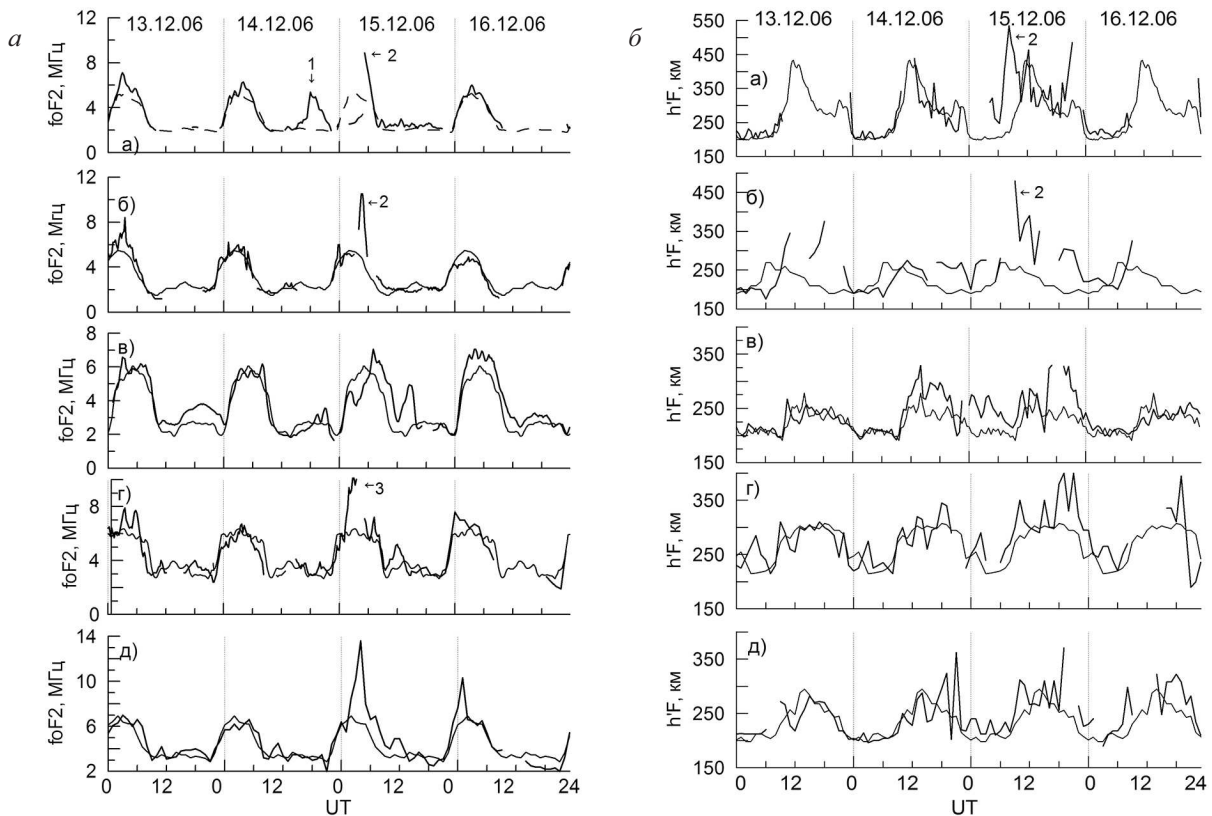


Рис. 2а. Вариации критической частоты за 13–16 декабря 2006 г. на станциях: а — Якутск; б — Магадан; в — Иркутск; г — Хабаровск; д — Вакканаи. Звездочками указаны предельные частоты спорадического слоя. Пунктиром обозначен фоновый уровень

Рис. 2б. Вариации $h'F$ за 13–14 декабря. Обозначения те же

Как следует из работы (Lei et al., 2008b), волнообразные изменения ионизации на средних широтах могут быть обусловлены перемещением КМПВ. На рис. 2б представлены вариации минимальной высоты слоя F ($h'F$). В Якутске и Магадане самое большое увеличение $h'F$ наблюдалось 08:15–09:00 UT (цифра 2). Это может говорить о том, что станции находились в это время в области главного ионосферного провала, критические частоты были очень низкими. В Иркутске также отмечается возрастание высоты слоя в дневные часы. Как следует из профилей электронной концентрации, рассчитанных из ионограмм (Huang, Reinisch, 1996), для дневных (06:30 UT) и ночных (19:30 UT) часов 14 и 15 декабря, высота максимума слоя в дневных и ночных условиях во время бури была на 30...50 км больше высоты слоя, рассчитанных для тех же моментов времени в предыдущий день (рис. 3). В целом можно отметить, что для всех рассматриваемых станций слой F2 располагался выше, чем в предыдущий день, и самые большие отклонения $h'F$ от фонового уровня наблюдались на двух среднеширотных станциях — Иркутск и Хабаровск. Об интенсивных перемещениях ионизации в F-слое свидетельствует регистрация слоя F1 с 01:75 до 07:30 UT с критическими частотами, равными 2,7...3,2 МГц, даже в 03:15 UT было зарегистрировано появление условия G.

Согласно измерениям, выполненным на Иркутском радаре ИР, 15 декабря было зарегистрировано увеличение электронной и ионной температур на 200...300 К относительно спокойных условий.

Таким образом, проведенный анализ экспериментальных данных, полученный на сети среднеширотных станций во время магнитной бури, позволил сделать следующие выводы.

На среднеширотной станции Магадан 15 декабря наблюдались изменения критической частоты слоя F2, подобные вариациям foF2, зарегистрированным в Якутске: крайне низкие значения или их отсутствие ночью и в утренние часы. В послеполуденном секторе был зарегистрированы отражения от F2 слоя с частотами, превышающими в 1,7 раза фоновый уровень. На станциях Иркутск, Хабаровск и Вакканаи наблюдались также положительные возмущения в вариациях критических частот, особенно во вторую половину суток. В Хабаровске и в Вакканаи днем критические частоты увеличились в 1,5 и 2 раза соответственно. На фоне положительных возмущений электронной концентрации регистрировалось увеличение высоты слоя F2 и рост электронной и ионной температур.

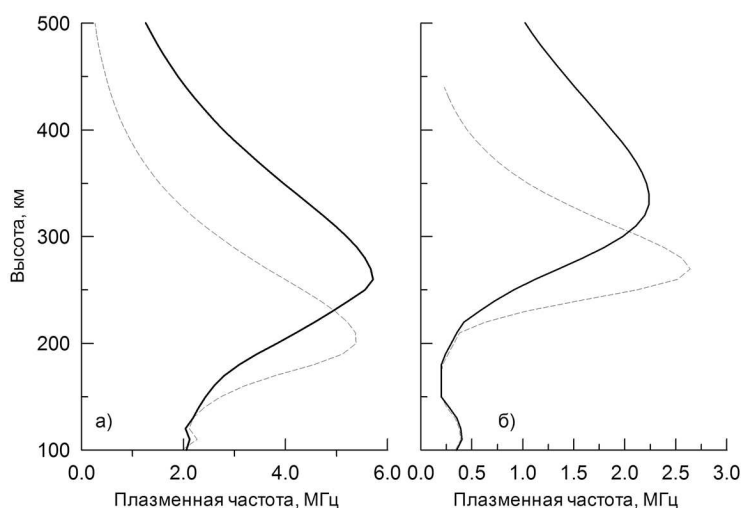


Рис. 3. Профили электронной концентрации, рассчитанных для Иркутска в спокойных (пунктирная линия) и возмущенных условиях (сплошная линия): а — день; б — ночь

Моделирование распределения ионосферных характеристик

Для интерпретации наблюдаемых вариаций параметров ионосферы во время магнитной бури 15 декабря 2006 г. была использована модель ионосферно-плазмозферного взаимодействия, описание которой приведено в [Tashchilin, Romanova, 2002; Romanova et al., 2008]. 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 распределений параметров термосферы использовалась модель нейтральной атмосферы NRLM-SISE00 (Picone et al., 2002). Для расчета скорости нейтрального ветра использовалась модель HWM07 (Drob et al., 2008). В модели также учитывается поле магнитосферной конвекции (Sojka et al., 1986) и ионизация потоками высыпавшихся частиц (Hardy et al., 1987). Так как используемая модель нейтральной атмосферы описывает среднестатистическую картину распределения атмосферных составляющих, которая может значительно отличаться от условий конкретного дня, в модели ионосферы предусмотрена коррекция концентраций атомного кислорода и молекулярного азота (отношения $[O]/[N_2]$).

С помощью этой модели были рассчитаны вариации критических частот для двух последовательных дат 14 и 15 декабря, распределение электронных и ионных температур, скорости вертикального дрейфа, обусловленные нейтральным ветром. На рис. 4 приведены вариации экспериментальных и рассчитанных критических частот. Можно видеть, что для станций Иркутск и Хабаровск модель описывает дневные условия с хорошей точностью. Изменение ионизации ночью в Вакканаи и ее увеличение после 12:00 UT трудно воспроизвести моделью без учета модели ПИВ. В Якутске удалось воспроизвести увеличение ночной

ионизации 14 декабря и поведение ночного слоя 15 декабря, но дневной резкий рост критических частот описывается недостаточно хорошо. Это свидетельствует о том, что в модели не учтены нестационарные процессы взаимодействия с магнитосферой.

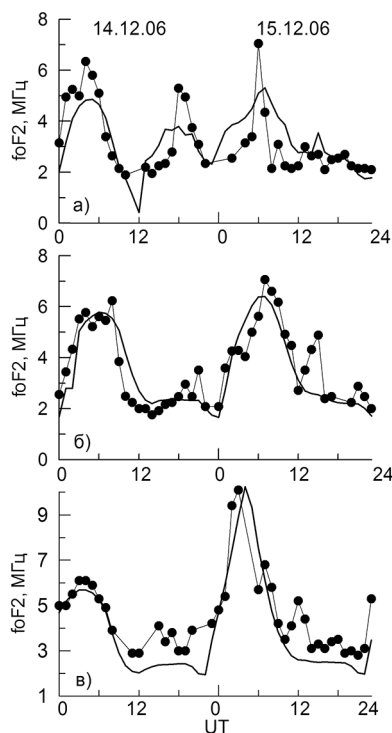


Рис. 4. Вариации измеренных (кружки) и рассчитанных (сплошная линия) $foF2$:
а — Якутск; б — Иркутск; в — Хабаровск

На рис. 5 приведено распределение электронной температуры на высоте 270 км, измеренное радаром HP (верхняя панель) и рассчитанное по модели (Romanova et al., 2008). Можно отметить очень хорошее качественное и количественное совпадение измеренных и рассчитанных значений. Аналогичная картина получена для распределения ионных температур.

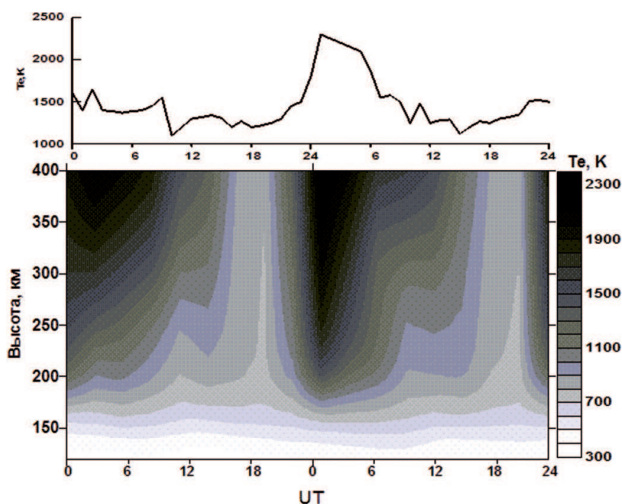


Рис. 5. Распределение электронной температуры за 14–15 декабря.
Верхняя панель — измерения HP на высоте 270 км, внизу — модельные расчеты

На рис. 6 представлены рассчитанные скорости вертикального дрейфа, обусловленные вариациями нейтрального ветра (сплошная линия). Можно видеть, что 14 декабря рассчитанные величины вертикального дрейфа описывают стандартную картину распределе-

ния дрейфов: они положительны (направлены вверх) ночью и отрицательны днем. Во время возмущения их величины резко меняются. Для того, чтобы добиться наилучшего описания дневного роста ионизации, скорость вертикального дрейфа в дневные часы была увеличена.

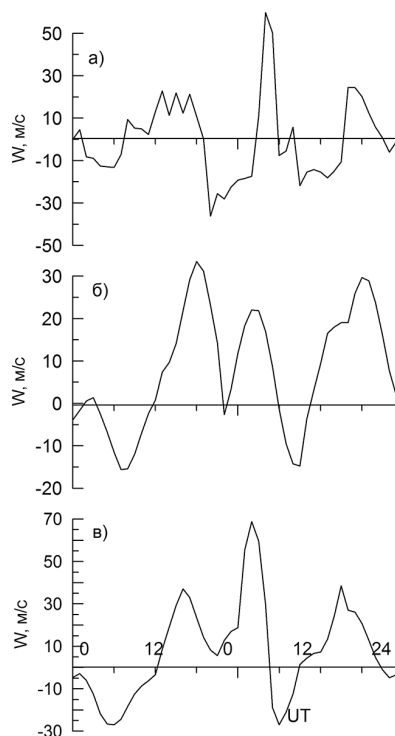


Рис. 6. Рассчитанные скорости вертикального дрейфа на станциях:
а — Якутск; б — Иркутск; в — Хабаровск

Обсуждение результатов и выводы

Анализ экспериментальных данных и результаты моделирования показали, что на поведение электронной концентрации на средних широтах во время магнитной бури 14–15 декабря 2006 г. большую роль оказали различные динамические процессы, усиливающиеся во время возмущений. Увеличение скорости меридиональных ветров во время бури привело к росту высоты максимума слоя, а появление волнообразных возмущений foF2 и h'F указывает на распространение крупномасштабных ионосферных возмущений, которые перемещаются со скоростью нейтрального ветра. Если сопоставить время появления максимумов ионизации в местном времени в Магадане и в Иркутске (рис. 7а), то можно отметить близкие интервалы увеличения ионизации около 09 LT (цифра 1) и в послеполуденные часы (13–16 LT). Вечерний максимум повышения foF2 около 22 LT отчетливо виден в Иркутске, в Хабаровске и Вакканаи (рис. 7б). Кроме того, в Вакканаи и в Хабаровске наблюдался рост ионизации около 17 LT, который в Иркутске проявляется в виде перегиба. Наибольший рост критических частот в Хабаровске наблюдался в более ранние часы, чем в Магадане и по времени близок к распределению в Вакканаи. Таким образом, можно предположить, что волновые возмущения, наблюдаемые в Иркутске и Хабаровске, являются суммарным эффектом перемещающихся возмущений, распространяющихся как с севера, так и юга. Ранее к этому выводу пришли авторы (Lei et al., 2008b), анализируя вариации ионосферных параметров на японских станциях. Следовательно, в возмущенных условиях при низкой солнечной активности КМПИБы, возникающие в приэкваториальных широтах, могут достигать широты 50°.

На основе проведенного анализа экспериментальных ионосферных данных, полученных на среднеширотных станциях, можно сделать следующие выводы.

В условиях низкой солнечной активности и слабой освещенности (декабрь) поведение ионосферы вблизи субавроральных широт во время магнитных бурь может контролироваться процессами магнитосферно-ионосферного взаимодействия, включающими усиление магнитосферной конвекции, высыпания авроральных частиц и взаимодействие с частицами плазменного слоя.

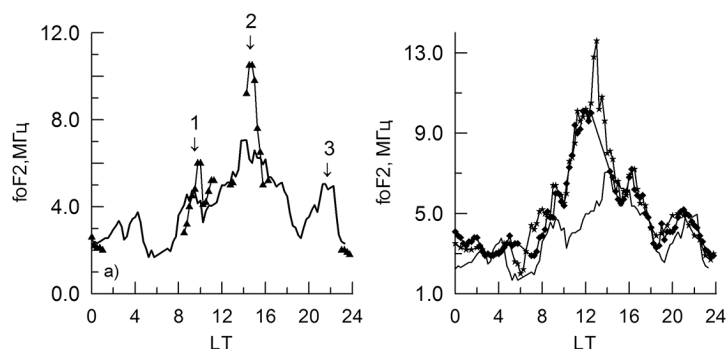


Рис. 7. Вариации $foF2$ в зависимости от местного времени 15 декабря 2006 г.: сплошная линия — Иркутск, треугольники — Магадан, звездочки — Вакканан, квадратики — Хабаровск

Возникающие во время магнитных возмущений перемещающиеся ионосферные возмущения могут распространяться на большие расстояния, как из области высоких широт, так и из приэкваториальных, и оказывать существенное влияние на распределение ионизации на средних широтах.

Проведенные модельные расчеты удовлетворительно описывают распределение электронной концентрации и электронной и ионной температур в возмущенных условиях в средних широтах. Для улучшения точности расчетов необходимо привлекать дополнительные модели, учитывающие воздействие перемещающихся ионосферных возмущений на распределение электронной концентрации.

Статья подготовлена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (ГК № 16.518.11.7097) и при частичной поддержке РФФИ (проект № 11-05-00908).

Литература

1. Афраймович Э.Л., Гаврилюк Н.С., Демьянов В.В., Смольков Г.Я., Ишин А.Б. Сбои функционирования спутниковых навигационных систем GPS — ГЛОНАСС, обусловленные мощным радиоизлучением Солнца во время солнечных вспышек 6, 13 декабря 2006 г. и 28 октября 2003 г. // Космические исследования. 2009. Т. 47. № 2. С. 146–157.
2. Золотухина Н.А., Пирог О.М., Полех Н.М. Геосферные эффекты солнечной вспышки 13 декабря 2006 г. // Геомагнетизм и аэронавигация. 2011. Т. 51. № 5. С. 579–591.
3. Drob D.P., Emmert J.T., Crowley G., Picone J.M., Shepherd G.G., Skinner W., Hayes P., Nijewski R.J., Larsen M., She C.Y., Meriwether J.W., Hernandez G., Jarvis M.J., Sipler D.P., Tepley C.A., O'Brien M.S., Bowman J.R., Wu Q., Murayama Y., Kawamura S., Reid I.M., Vincent R.A. An Empirical Model of the Earth's Horizontal Wind Fields: HWM07 // J. Geophysical Research. 2008. doi:10.1029/2008JA013668.
4. Hardy D.A., Gussenhoven M.S., Raistrick R. Statistical and functional representation of the pattern of auroral energy flux, number flux, and conductivity // J. Geophysical Research. 1987. V. 92. P. 12-275–12-2294.
5. Hayashi H., Nishitani N., Ogawa T., Otsuka Y., Tsugawa T., Hosokawa K., Saito A. Large-scale traveling ionospheric disturbance observed by superDARN Hokkaido HF radar and GPS networks on 15 December 2006 // J. Geophysical Research. 2010. V. 115. A06309. doi:10.1029/2009JA014297.
6. Huang X., Reinisch B.W. Vertical electron density profiles from the digisonde network // Advances in Space Research. 1996. V. 18. N. 6. P. 121–129.

7. Kurkin V.I., Pirog O.M., Polekh N.M., Mikhalev A.V., Poddelsky I.N., Stepanov A.E. Ionospheric response to geomagnetic disturbances in the north eastern region of Asia during the minimum of 23-th cycle of solar activity // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2008. V. 70. P. 2346–2357.
8. Lei J., Wang W., Burns A.G., Solomon S.C., Richmond A.D., Wiltberger M., Goncharenko L.P., Coster A., Reinisch B.W. (2008a) Observations and simulations of the ionospheric and thermospheric response to the December 2006 geomagnetic storm: Initial phase // *J. Geophysical Research*. 2008. V. 113. A01314. doi:10.1029/2007JA012807.
9. Lei J., Burns A.G., Tsugawa T., Wang W., Solomon S.C., Wiltberger M. (2008b) Observations and simulations of quasiperiodic ionospheric oscillations and large-scale traveling ionospheric disturbances during the December 2006 geomagnetic storm // *J. Geophysical Research*. 2008. V. 113. A06310. doi:10.1029/2008JA013090.
10. Pedatella N.M., Lei J., Larson K.M., Forbes J.M. Observations of the ionospheric response to the 15 December 2006 geomagnetic storm: Long-duration positive storm effect // *J. Geophysical Research*. 2009. V. 114. A12313. doi:10.1029/2009JA014568.
11. Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues // *J. Geophysical Research*. 2002. V. 107. A12. doi:10.1029/2002JA009430.
12. Romanova E.B., Pirog O.M., Polekh N.M., Tashchilin A.V., Zhrebtsov G.A., Pirog O.M., Shi, Wang J.K. Modeling of ionospheric parameter variations in East Asia during geomagnetic disturbances // *Advances in Space Research*. 2008. V. 41. N. 8. P. 569–578.
13. Sojka J.J., Rasmussen C.E., Schunk R.W. An interplanetary magnetic field dependent model of the ionospheric convection electric field // *J. Geophysical Research*. 1986. V. 91. P. 11-281–11-290.
14. Tashchilin A.V., Romanova E.B. Numerical modeling the high-latitude ionosphere // *Proc. COSPAR Colloquia Series*. 2002. V. 14. P 315–325.
15. Tereshchenko V.D., Vasiljev E.B., Ogloblina O.F., Tereshchenko V.A., Chernyakov S.M. The response of the polar lower ionosphere to powerful solar flares on December, 5–14, 2006 // *Physics of Auroral Phenomena: Pros. 30 Annual Seminar. Apatity*. 2007. P. 196–198.
16. Zolotukhina N., Polekha N., Kurkin V., Pirog O., Samsonov S., Moiseyev A. Magnetospheric disturbances associated with the 13 December 2006 solar flare and their ionospheric effects over North-East Asia // *Advances in Space Research*. 2012. V. 49. P. 883–897.

Ionospheric Response to the 15 December 2006 Magnetic Storm at Middle Latitudes

¹ N.M. Polekh, ¹ E.B. Romanova, ¹ N.A. Zolotukhina, ¹ A.A. Shcherbakov,
² Z.F. Dumbrava, ³ M.K. Ivelskaya

¹ *Institute of Solar-Terrestrial Physics.*
664033, Irkutsk, Lermontov, 126a

² *Institute of Cosmophysical Researches and Radio Wave Propagation,*
684034, Kamchatka region, Elizovskiy district, Paratunka, Mirnaya str., 7.

³ *Research Institute of Applied Physics "Irkutsk State University "*
664033, Irkutsk, b.Gagarina, 20

Based on data obtained by ionospheric midlatitude ionosondes and incoherent scatter radar (Irkutsk), we have studied the ionospheric response to the 15 December 2006 magnetic storm. During the main storm phase, ionospheric stations registered several positive disturbances during which critical frequencies (foF2) were higher by 1-4 MHz of a quiet level. The increase in the critical frequencies was accompanied by significant variations in a peak height of the F2 layer. The analysis of the temporal variations in foF2 and hmF2 led to the conclusion on the impact of large-scale wave processes on the ionization distribution at the F2 region heights. The increase in electron and ion temperatures of 200 - 300 °K to relatively quiet conditions was registered by the HP radar at Irkutsk. Modeling the distribution of ionospheric characteristics showed that the best agreement between the experimental and calculated parameters of the ionosphere can be reached by adjusting the model of the neutral atmosphere and the rate of vertical drift.

Keywords: magnetic storm, ionospheric disturbance, critical frequency, electron temperature, ionospheric plasma simulation.