

УДК 550.385.4,
550.358:550.388И. Ф. ДОМНИН¹, С. В. КАЦКО¹, М. В. ЛЯШЕНКО¹,
Л. Ф. ЧЕРНОГОР^{1,2}¹ Институт ионосферы НАН и МОН Украины,
ул. Краснознаменная, 16, г. Харьков, 61002, Украина
E-mail: sophiaharytonova@gmail.com² Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,
пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61022, Украина
E-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua

ИОНОСФЕРНАЯ БУРЯ 13–14 НОЯБРЯ 2012 г.: РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ТЕПЛОВЫХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ

Приведены результаты расчетов эффектов возмущений теплового и динамического режимов верхней атмосферы Земли во время сильной магнитной бури 13–14 ноября 2012 г. Магнитная буря вызвала целый комплекс процессов, сопутствовавших возмущениям плазмы, электрических и магнитных полей в различных областях околоземного пространства. Подтверждено наличие в геомагнитных бурях как индивидуальных особенностей, так и общих закономерностей.

Ключевые слова: геокосмическая буря, ионосферное возмущение, некогерентное рассеяние, динамические и тепловые процессы

1. Введение

Геокосмические бури (ГБ) представляют собой наиболее существенные проявления возмущений космической погоды, оказывающие неблагоприятное воздействие на деятельность человека в космосе и на Земле. Эти возмущения связаны с нестационарными процессами на Солнце, резкими изменениями параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, а также с магнитосферными возмущениями. Они имеют характерные временные масштабы от десятков минут до нескольких суток и простираются на расстояния в тысячи и десятки тысяч километров. Изменчивость этих процессов и сложный характер их взаимодействия затрудняют моделирование и прогнозирование отклика верхней атмосферы Земли на ГБ, несмотря на значительный прогресс в области развития современных глобальных моделей ионосферы и термосферы.

Задача моделирования физико-химических процессов в ионосфере, как известно, является многоплановой. В одном случае теоретическому моделированию подлежат высотно-временные профили концентрации электронов, температуры электронов, температуры ионов и других параметров среды. В другом случае теоретическое моделирование направлено на расчет параметров нейтральной атмосферы и плазмы, которые

непосредственно не измеряются методом некогерентного рассеяния (НР). К таким параметрам относятся количество энергии, которая подводится к электронному газу, плотность потока тепла, переносимого электронами, температура нейтрального газа и др.

Целью настоящей работы является представление результатов расчетов и численного моделирования суточных вариаций параметров динамических и тепловых процессов в ионосфере, которые сопутствовали сильной магнитной буре (МБ) 13–14 ноября 2012 г. Буря вызвала значительные изменения структуры, динамики, теплового режима ионосферной плазмы и процессов ионосферно-магнитосферного взаимодействия [1].

2. Общие сведения о ГБ

Известно, что МБ протекала на фоне умеренной солнечной активности, а причиной ее послужили выбросы корональной массы 9 и 10 ноября 2012 г., направленные в сторону Земли [1]. Экстремальные значения индексов геомагнитной активности во время сильной бури 13–14 ноября 2012 г. были следующими: $AE_{\max} = 1009$ нТл, $K_p \max = 6+$ и $D_{st \min} = -108$ нТл. Энергия МБ при этом составляла $E_{ms} \approx 5 \cdot 10^{15}$ Дж. Такая буря по классификации [2, 3] относится к сильным. МБ вызвала интенсивную ионосферную бурю (ИБ) 13–15 ноября 2012 г. со знакопеременными фазами с наличием двух положительных фаз.

Наблюдения эффектов в ионосферной плазме во время МБ проведены в Ионосферной observa-

тории (г. Харьков) Института ионосферы НАН и МОН Украины с помощью радара HP [1, 2].

3. Результаты расчетов

3.1. Вариации температуры нейтралов

Нагрев нейтрального газа является одним из эффектов термосферных возмущений, сопровождающий МБ. Температура нейтралов T_n вычислялась на основе уравнения теплового баланса ионного газа [4, 5]:

$$T_i - T_n = \frac{4.82 \cdot 10^7 N(T_e + T_i) T_e^{-3/2}}{6.6 N(N_2) + 5.8 N(O_2) + 0.2 N(O)(T_i + T_n)^{1/2}}$$

Как видно из формулы, для расчета T_n использовались ионосферные параметры, измеренные непосредственно методом HP: концентрация электронов N , температуры электронов T_e и ионов T_i .

Концентрации нейтральных компонент (молекулярного азота $N(N_2)$, атомарного кислорода $N(O)$ и молекулярного кислорода $N(O_2)$) рассчитывались по модели NRLMSISE-00 [6]. На высотах 250–400 км, где теплопроводность газа можно пренебречь, за счет теплообмена с электронами скорость нагрева ионов O^+ приравнивалась скорости их охлаждения в результате передачи тепла нейтральным частицам.

Рассчитанные значения T_n и их временные вариации в период 13–15 ноября 2012 г. на высотах 250, 300, 350 и 400 км иллюстрирует рис. 1. Здесь же для сравнения приведены данные для T_n в магнитоспокойный день 22 ноября 2012 г. и T_{nMSIS} , рассчитанные по модели NRLMSISE-00.

Анализ полученных результатов расчета T_n с использованием данных радара HP и T_{nMSIS} , рассчитанной по модели NRLMSISE-00, обнаружил следующие особенности.

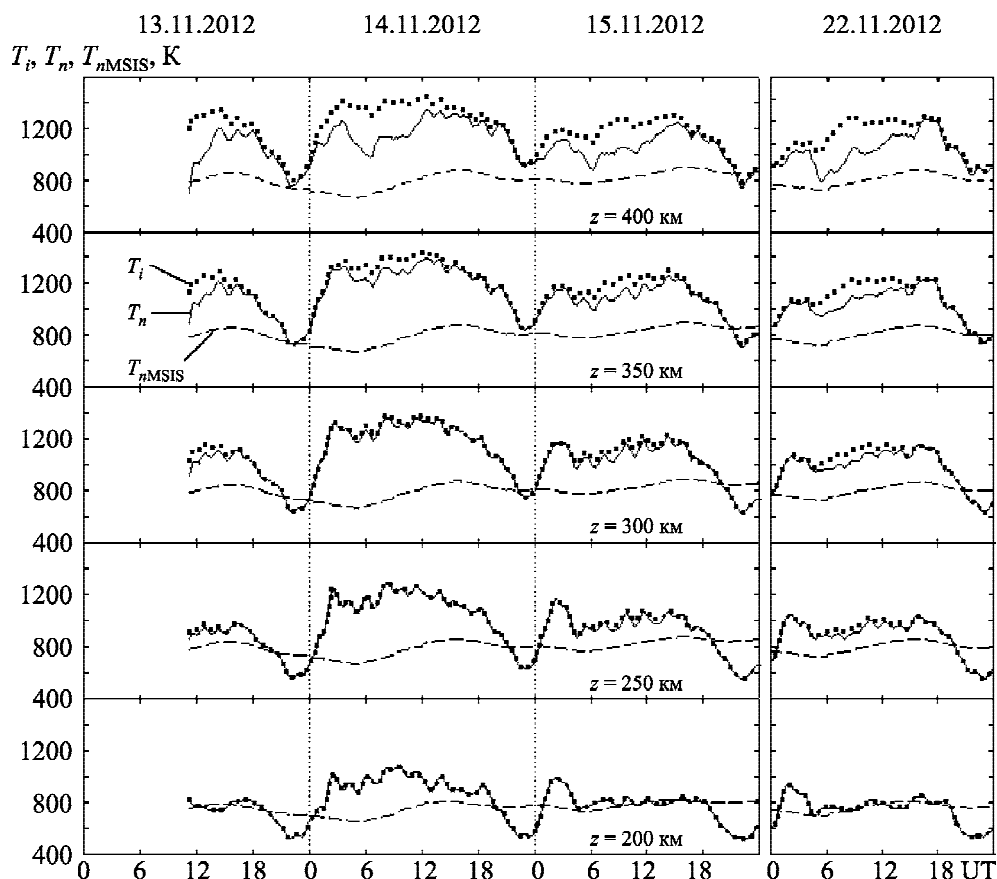


Рис. 1. Временные вариации измеренных температур ионов T_i и рассчитанных температур нейтралов T_n по данным радара HP и по модели NRLMSIS-00 в период 13–15 ноября 2012 г. и в невозмущенные сутки 22 ноября 2012 г. на высотах 200, 250, 300, 350 и 400 км

– В течение главной фазы бури, в ночь с 13 на 14 ноября 2012 г., температура нейтрального газа T_n увеличилась во всем диапазоне исследуемых высот относительно значений T_n 22 ноября. Это свидетельствует о нагреве и расширении нейтральной атмосферы.

– Во время отрицательной фазы ионосферного возмущения, когда наблюдался необычный нагрев плазмы на фоне глубокой депрессии N в области F2 (около 07:30 UT 14 ноября), значения температуры T_n уменьшались и составляли около 1000, 1170, 1300, 1280, 1070 К на высотах 200, 250, 300, 350 и 400 км соответственно. В магнитоспокойный день значения T_n в это же время на данных высотах были следующими: 790, 900, 990, 1000, 900 К. Для сравнения отметим, что в это же время 15 ноября в течение фазы восстановления МБ температура T_n была выше, чем 22 ноября, примерно на 200 ÷ 250 К на этих же высотах.

– Расчеты T_n по данным радара HP и модели NRLMSISE-00 показали, что высота термпаузы z_T во время главной фазы МБ, где температура атмосферы достигает своего максимального значения, поднялась до 250 км (в невозмущенных условиях она составляла 200 км). Из анализа полученных данных видно также, что модель NRLMSISE-00 дает заниженные значения T_n .

3.2. Подвод энергии к электронам

Нагрев тепловых электронов осуществляется в процессе термализации сверхтепловых электронов, который в нижней части ионосферы ($z \leq 300 \div 350$ км) из-за малости длин их свободного пробега носит локальный характер. На этих высотах основными механизмами охлаждения электронного газа являются кулоновские соударения с ионами и возбуждение уровней тонкой структуры атомов кислорода [7, 8]. Энергия, подводимая к электронному газу, определяется из уравнения теплового баланса для электронов. Для стационарных условий уравнение баланса энергии электронов в системе СИ можно записать в виде [9, 10]:

$$Q = L_{ei} + L_e,$$

$$L_{ei} = 8 \cdot 10^{-32} N^2 (T_e - T_i) T_e^{-3/2},$$

$$L_e = 6.4 \cdot 10^{-37} NN(O)(T_e - T_i) T_n^{-1},$$

где Q – энергия, передаваемая тепловым электронам при кулоновских столкновениях со сверх-

тепловыми электронами; L_{ei} – энергия, теряемая при столкновении электронов с ионами; L_e – энергия, затрачиваемая на возбуждение тонкой структуры атомов кислорода. (Q , L_{ei} и L_e – соответствующие значения энергии в единицу времени, отнесенные к единичному объему.)

На рис. 2 приведены результаты расчета энергии Q/N , подводимой к электрону в единицу времени, а также составляющих потерь энергии электронного газа в процессе теплообмена с ионами L_{ei}/N и нейтралами L_e/N . Из рисунка видно, что в разные дни вклады составляющих L_{ei}/N и L_e/N в процесс охлаждения электронного газа были различными. 14 и 15 ноября на высотах 200 и 250 км преобладали потери в процессе неупругого теплообмена электронов с нейтралами L_e/N за счет большой разности температур $T_e - T_i$. Лишь 14 ноября на высоте 300 км вклады двух механизмов охлаждения электронов сравнялись. С ростом высоты начали преобладать потери энергии электронов L_{ei}/N в кулоновских соударениях с ионами.

В возмущенный день 14 ноября 2012 г. в условиях отрицательной фазы ионосферной бури и депрессии N (критическая частота слоя F2 $f_oF2 \approx 4.0$ МГц около 07:30 UT) наблюдался провал в вариациях подвода энергии к электронному газу Q/N до значений $0.17 \cdot 10^{-21}$, $0.15 \cdot 10^{-21}$, $0.06 \cdot 10^{-21}$, $0.02 \cdot 10^{-21}$ Дж/с на высотах 200, 250, 300 и 350 км соответственно. 22 ноября в это же время значения Q/N на этих же высотах были следующими: $0.34 \cdot 10^{-21}$, $0.18 \cdot 10^{-21}$, $0.08 \cdot 10^{-21}$, $0.045 \cdot 10^{-21}$ Дж/с. Вблизи полудня 14 ноября значения Q/N составляли $0.23 \cdot 10^{-21}$, $0.24 \cdot 10^{-21}$, $0.9 \cdot 10^{-21}$, $0.03 \cdot 10^{-21}$ Дж/с. 15 ноября во время фазы восстановления подвод энергии значительно увеличился, и вблизи полудня значения Q/N достигали $0.4 \cdot 10^{-21}$, $0.4 \cdot 10^{-21}$, $0.16 \cdot 10^{-21}$, $0.04 \cdot 10^{-21}$ Дж/с на приведенных высотах соответственно.

3.3. Потоки тепла, переносимого электронами

Эти потоки характеризуют приток энергии к электронному газу из плазмосферы за счет теплопроводности электронного газа. Вертикальная компонента плотности потока тепла

$$\Pi_T = -\kappa_e \sin^2 I \frac{\partial T_e}{\partial z},$$

где $\kappa_e = 2.08 k^2 N T_e / m v_{ei}$ – коэффициент теплопроводности электронного газа, k – постоянная

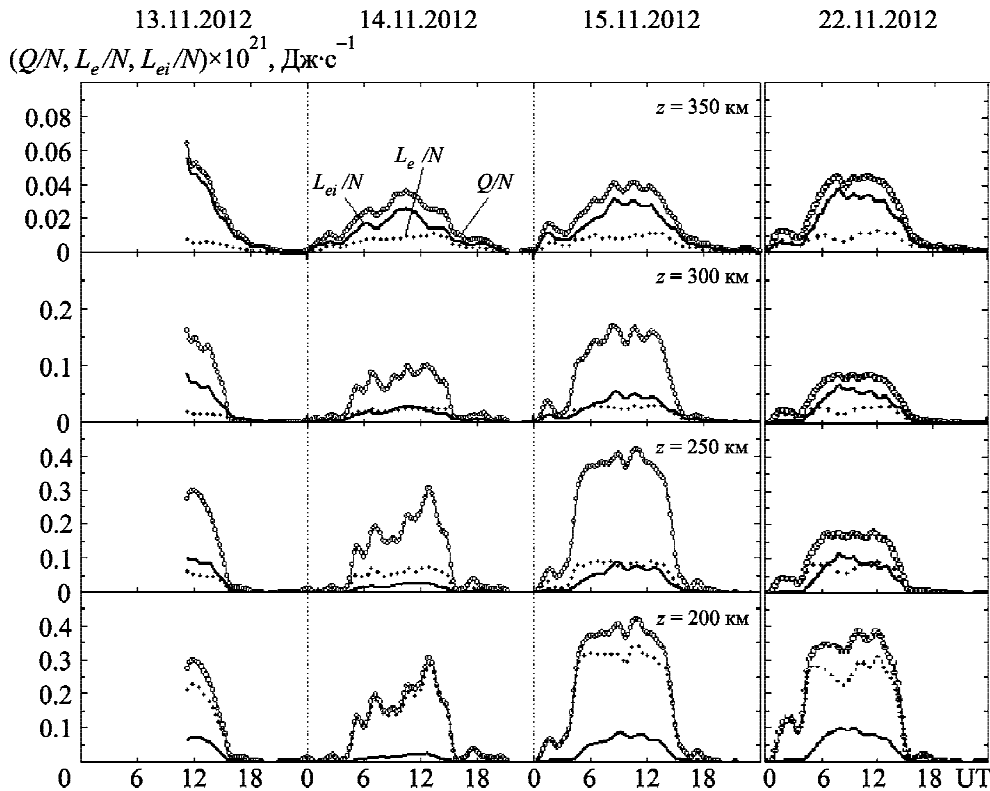


Рис. 2. Временные вариации скоростей нагрева электронного газа Q/N и теплообмена электронов с ионами L_{ei}/N и атомами кислорода L_e/N 13–15 ноября 2012 г. и в магнитоспокойные сутки 22 ноября 2012 г. на высотах 200, 250, 300 и 350 км в период 13–15 ноября 2012 г.

Больцмана, m – масса электрона, ν_{ei} – частота столкновений электронов с ионами; $I = 66.4^\circ$ – наклонение геомагнитного поля. В системе СИ

$$\nu_{ei} \approx 5.5 \cdot 10^{-6} N T_e^{-3/2} \ln(2.2 \cdot 10^4 T_e N^{-1/3}).$$

Расчеты плотности потока Π_T по данным радара НР в Харькове в период 13–15 ноября 2012 г. приведены на рис. 3 (непрерывные линии). Здесь же представлены вариации Π_T в контрольные дни с 21 по 23 ноября 2012 г. (точки).

Как показали расчеты, 14 ноября 2012 г. абсолютные значения плотности потока тепла $|\Pi_T|$ увеличились относительно значений в невозмущенных условиях. Это явление связано с необычным нагревом плазмы в ночное время, когда температуры T_e и T_i практически достигали дневных значений. Нагрев плазмы сопутствовал МБ и протекал на фоне глубокой депрессии концентрации N в области F ионосферы (N уменьшилась более чем в 5 раз). Итак, во время наибольшего уменьшения концентрации электронов плотность потока Π_T составляла $-(1.3 \div 1.2) \cdot 10^{-5}$ Вт/м² в диапазоне высот 200 ÷ 350 км. Минимальное значение Π_T в

течение 14 ноября наблюдалось на высоте 200 км около 11:00 UT и составило около $-1.3 \cdot 10^{-5}$ Вт/м², тогда как 22 ноября $\Pi_T \approx -0.5 \cdot 10^{-5}$ Вт/м².

15 ноября абсолютные значения $|\Pi_T|$ также были больше, чем в контрольный день 23 ноября. На высоте 200 км минимальное значение Π_T составило около $-1.3 \cdot 10^{-5}$ Вт/м², а в спокойный день в это же время $-0.8 \cdot 10^{-5}$ Вт/м². После полудня наблюдалось восстановление значений потоков тепла.

3.4. Потоки плазмы

Вариации потока плазмы в верхней части области F2 ионосферы характеризуют процессы ионосферно-протоносферного обмена плазмой и контролируют высотное распределение заряженных частиц. Обмен осуществляется за счет переноса плазмы вдоль магнитных силовых линий. Тем самым вариации потока в верхней части слоя F2 влияют на высотное распределение заряженных частиц. В дневное время поток плазмы направлен вверх под действием повышенного давления плазмы в области F. Ночью, когда прекращается действие солнечного источника ионизации и давление плазмы

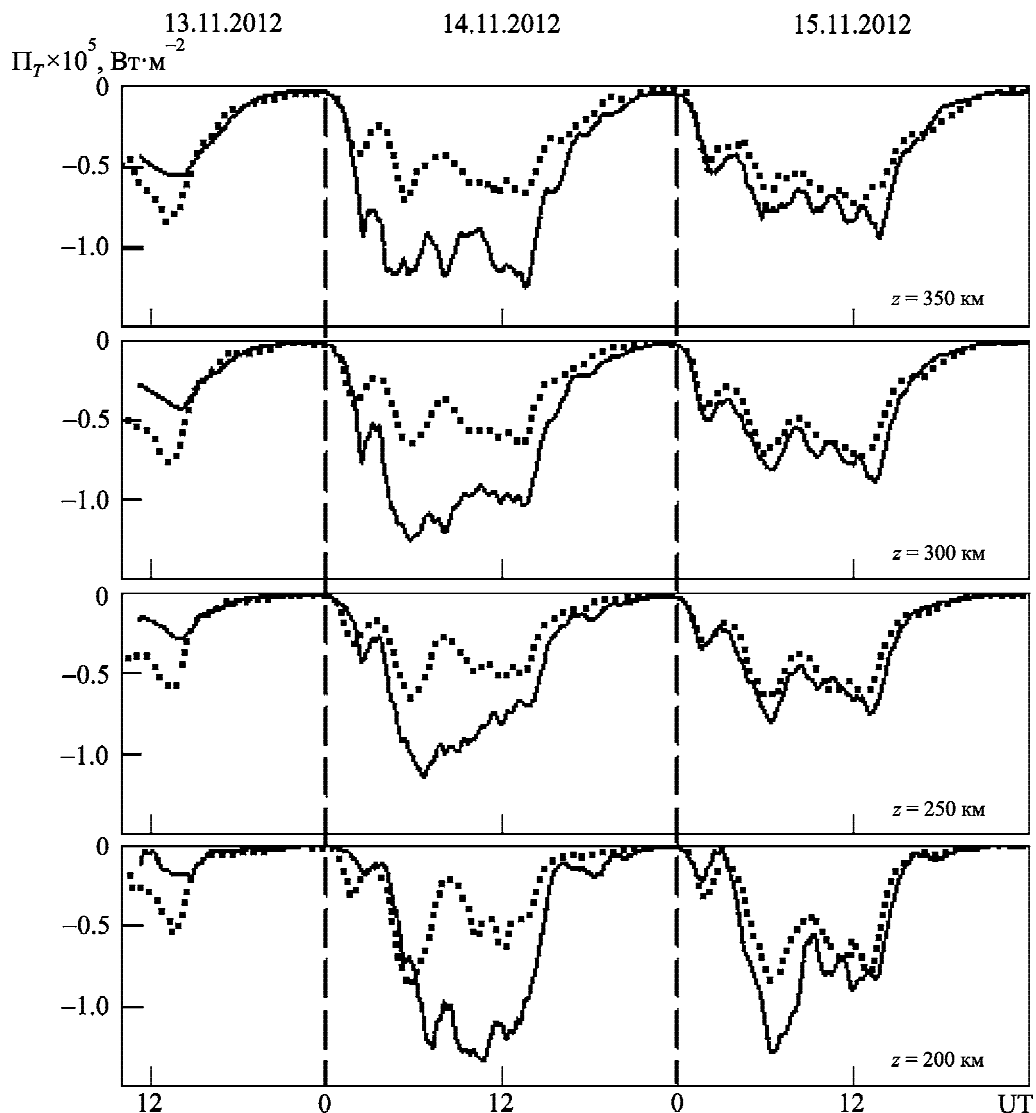


Рис. 3. Временные вариации плотности потока тепла Π_T , переносимого электронами из плазмосферы в ионосферу, на высотах 200, 250, 300, 350 км в период 13–15 ноября 2012 г. (сплошные кривые) и в магнитоспокойный период 21–23 ноября 2012 г. (точки)

падает, поток направлен вниз и подпитывает истощенный за счет рекомбинации слой F2.

Плотность вертикального потока плазмы $\Pi_{pl} = Nv_z$ вычисляется по измеренным методом НР значениям концентрации электронов N и вертикальной скорости переноса плазмы v_z .

На рис. 4 приведены временные вариации плотности потока плазмы в диапазоне высот 250 ÷ 400 км с 13 по 15 ноября 2012 г. и в магнитоспокойные дни 21–23 ноября 2012 г. Временные вариации Π_{pl} 22 ноября сохранили свои основные черты суточного поведения: восходящий поток во время восхода и нисходящий во время захода Солнца. Из рисунка видно, что во время МБ значе-

ния потока Π_{pl} существенно отличались от значений при магнитоспокойных условиях, однако вариации Π_{pl} 14 ноября сохраняли основные черты суточного поведения (восходящий поток после восхода Солнца и нисходящий после захода). На высотах 250 и 300 км абсолютные значения плотности потока $|\Pi_{pl}|$ значительно уменьшились. Это связано с уменьшением концентрации N . Так, 14 ноября во время наибольшей депрессии N значения потока Π_{pl} составляли $-10 \cdot 10^{12}$, $-10 \cdot 10^{12}$, $-8 \cdot 10^{12}$, $-6 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ на высотах 250, 300, 350 и 400 км соответственно. В околополуденные часы на высотах 350 и 400 км наблюдалось уменьше-

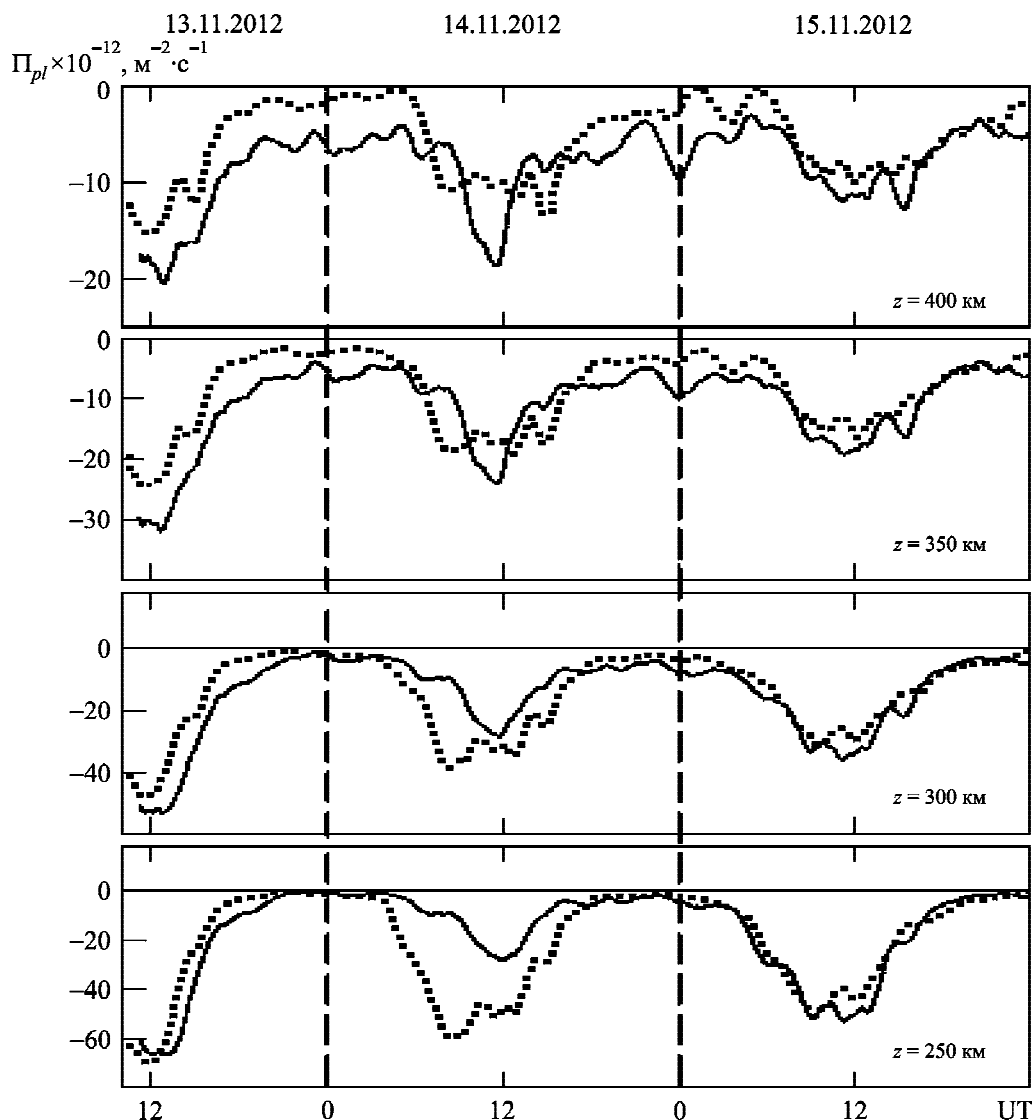


Рис. 4. Временные вариации плотности потока плазмы Π_{pl} по данным радара НР в Харькове на высотах 250, 300, 350, 400 км в период 13–15 ноября 2012 г. (сплошные кривые) и в магнитоспокойный период 21–23 ноября 2012 г. (точки)

ние Π_{pl} до значений $-25 \cdot 10^{12}$ и $-19 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, тогда как в контрольный день 22 ноября околополуденные значения Π_{pl} на этих высотах составляли $-19 \cdot 10^{12}$ и $-10 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ соответственно.

15 ноября после полудня суточный ход плотности потока плазмы начал восстанавливаться.

3.5. Зональное электрическое поле и перенос плазмы за счет электромагнитного дрейфа

Как известно, в отсутствие возмущений в геокосмосе влиянием электрических полей в средних широтах можно пренебречь. Однако во время сильных ГБ имеет место усиление электрических полей вследствие магнитосферной конвекции,

что существенно влияет на динамику среднеширотной ионосферы. В возмущенных условиях в средних широтах и в пренебрежении эффектом склонения геомагнитного поля основной вклад в вертикальный перенос плазмы вносит зональное электрическое поле. Электрическое поле, направленное на восток, вызывает дрейф плазмы вверх, а поле, направленное на запад, – перенос ионосферной плазмы вниз. Оценим значения зональной компоненты напряженности электрического поля, а также вклад вертикальной составляющей движения плазмы за счет электромагнитного дрейфа в динамический режим ионосферы во время МБ 13–14 ноября 2012 г. Для оценки зональной компо-

ненты напряженности электрического поля воспользуемся выражением, приведенным в [11]:

$$E_y = (0.55 - 0.01AE) \cdot 10^{-3},$$

где AE – индекс авроральной активности, нТл; E_y – зональная компонента напряженности электрического поля, В/м.

Как показали расчеты, в главную фазу МБ компонента E_y достигала значения -9.5 мВ/м, тогда как в спокойных условиях значения зональной компоненты электрического поля варьировались около нуля. Рассчитанные временные вариации E_y приведены на верхней панели рис. 5. Существенные изменения E_y наблюдались также во время отрицательной фазы ионосферного возмущения. Около полудня 14 ноября E_y достигала значения -7 мВ/м, а в магнитоспокойных условиях – значения -2 мВ/м.

Выражение для расчета скорости переноса плазмы за счет электромагнитного дрейфа v_{EB} в пренебрежении эффектом склонения имеет вид [12]

$$v_{EB} \approx \frac{E_y}{B} \cos I,$$

где $B = 4.4 \cdot 10^{-5}$ нТл – модуль индукции геомагнитного поля.

На средней панели рис. 5 представлены результаты расчета скорости электромагнитного дрейфа во время МБ и в спокойных условиях. Оказалось, что в главную фазу бури v_{EB} достигала значений около -85 м/с, тогда как в магнитоспокойных условиях перенос плазмы за счет электромагнитного дрейфа практически отсутствовал.

3.6. Нейтральные ветры в ионосфере

В средних широтах вертикальная составляющая скорости ветрового увлечения ионов обусловлена меридиональной составляющей скорости горизонтального движения нейтрального газа. Нейтральный ветер, направленный к экватору, вызывает движение плазмы вверх по магнитным силовым линиям, а ветер, имеющий направление к полюсу, – движение плазмы вниз вдоль геомагнитных силовых линий [12].

Выражение для расчета меридиональной составляющей скорости нейтрального ветра v_{nx}

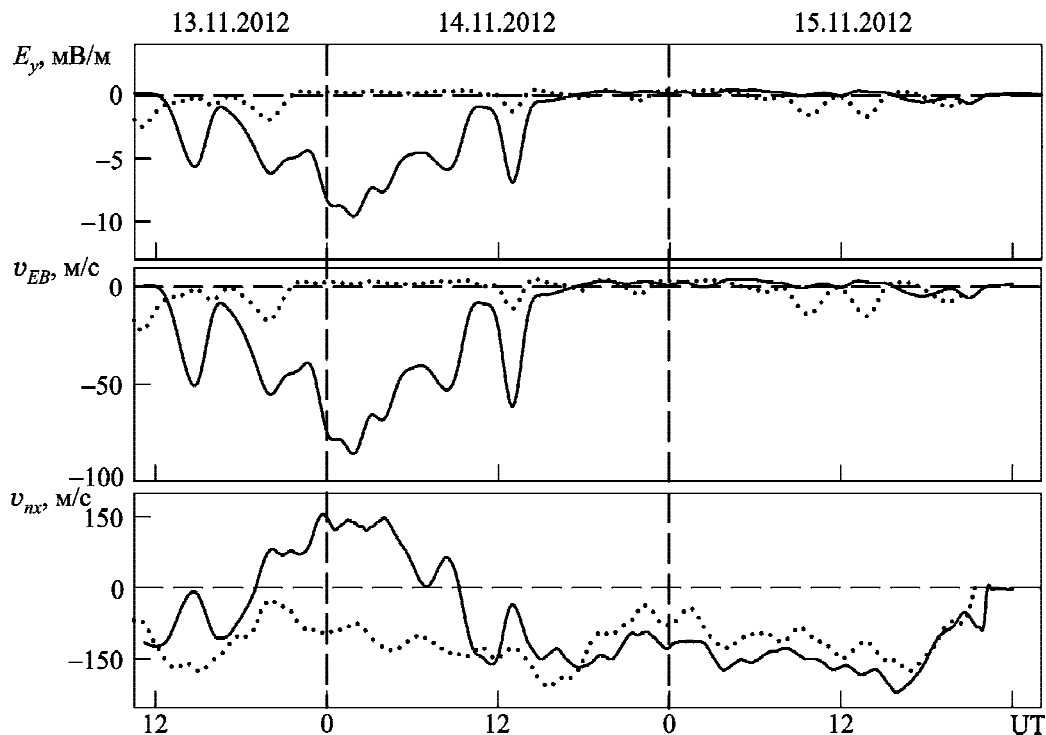


Рис. 5. Временные вариации зонального электрического поля E_y (верхняя панель) скорости переноса частиц за счет электромагнитного дрейфа v_{EB} (средняя панель) и меридиональной компоненты скорости нейтрального ветра v_{nx} (нижняя панель) на высоте 300 км 13–15 ноября 2012 г. (сплошные кривые) и в магнитоспокойный период 21–23 ноября 2012 г. (точки)

в пренебрежении эффектом склонения геомагнитного поля имеет вид [12]:

$$v_{nx} = \frac{v_z - v_{dz} - v_{EB}}{\sin I \cos I}.$$

Здесь v_z – вертикальная составляющая скорости движения плазмы, определяемая по данным харьковского радара НР [1]; v_{dz} – вертикальная составляющая скорости переноса плазмы за счет амбиполярной диффузии; v_{EB} – вертикальная составляющая скорости переноса плазмы за счет электромагнитного дрейфа.

На нижней панели рис. 5 приведены рассчитанные временные вариации меридиональной скорости нейтрального ветра v_{nx} во время МБ и спокойные дни на высоте 300 км. Видно, что в спокойных условиях скорость v_{nx} имеет направление к полюсу и варьируется в пределах от 0 до –150 м/с. После начала МБ и во время главной фазы имело место изменение направления нейтрального ветра к экватору и, как показали расчеты, наибольшее значение скорости v_{nx} составляло 150 м/с.

3.7. Скорость переноса плазмы за счет амбиполярной диффузии

Известно, что амбиполярная диффузия является одним из основных механизмов, определяющих скорость переноса плазмы в средних широтах. Суточные вариации вертикальной составляющей скорости амбиполярной диффузии для ионов O^+ отражают особенности процессов переноса и обмена плазмой между ионосферой и плазмосферой и их роль в высотном распределении концентрации ионов. На высотах 200 ÷ 500 км, где ионы O^+ являются доминирующими, вертикальная составляющая скорости амбиполярной диффузии v_{dz} описывается формулой [12]:

$$v_{dz} = -D_a \sin^2 I \left(\frac{1}{H_p} + \frac{1}{N(O^+)} \frac{\partial N(O^+)}{\partial z} + \frac{1}{T_p} \frac{\partial T_p}{\partial z} \right),$$

где $D_a = \frac{kT_p}{m_i \sum v_{in}}$ – коэффициент амбиполярной диффузии, k – постоянная Больцмана, $T_p = T_e + T_i$ – плазменная температура, m_i – масса иона кислорода, v_{in} – частота соударений ионов с основными компонентами нейтрального газа; $H_p = kT_p / m_i g$ – приведенная высота плазмы, g – уско-

рение свободного падения; $N(O^+) = N$ – концентрация ионов кислорода; z – высота.

Рассчитанные временные вариации скорости диффузии ионов O^+ на высотах 250 ÷ 400 км с 13 по 15 ноября представлены на рис. 6. Из рисунка видно, что в магнитоспокойных условиях (22 ноября 2012 г.) скорость v_{dz} в ночное время была отрицательной. Нисходящая скорость v_{dz} составляла около –7, –15, –25 и –50 м/с на высотах 250, 300, 350 и 400 км соответственно. В дневное время скорость переноса плазмы за счет амбиполярной диффузии была незначительной на высотах 250 и 300 км (не более 2 ÷ 3 м/с), а на высотах 350 и 400 км составляла 15 ÷ 25 м/с.

После начала МБ (около 18:00 UT 13 ноября) поведение v_{dz} заметно изменилось. В ночь с 13 на 14 ноября на высотах 250, 300, 350 и 400 км v_{dz} достигала –15, –25, –40 и –70 м/с соответственно. 14 ноября в дневные часы скорость v_{dz} также отличалась от вариаций в невозмущенных условиях. А 15 ноября уже наблюдалось восстановление скорости диффузии ионов O^+ к невозмущенным значениям.

4. Обсуждение

Подробное описание ионосферных параметров, полученных непосредственно с помощью радара НР и ионозонда, и механизмов, формирующих развитие положительных и отрицательных фаз бури, приведено в работе [1]. Далее проанализируем особенности развития ионосферной бури 13–15 ноября 2012 г. со знакопеременными фазами по результатам расчетов и моделирования.

В работе [1] предполагалось, что проявлению положительных возмущений N могли поспособствовать следующие два механизма. Первый механизм – это подъем слоя F2 вверх в область более низкой рекомбинации за счет усиления меридионального ветра, направленного к экватору. Этот механизм является более эффективным в дневное время, когда преобладают процессы ионообразования [12]. Второй механизм – изменение состава нейтральной атмосферы за счет оседания легких компонент газа в низких и средних широтах. Этот механизм преобладает в ночное время. Причиной таких крупномасштабных возмущений термосферной циркуляции и нейтрального состава является высокоширотный нагрев термосферы во время ГБ [2, 4, 12, 13].

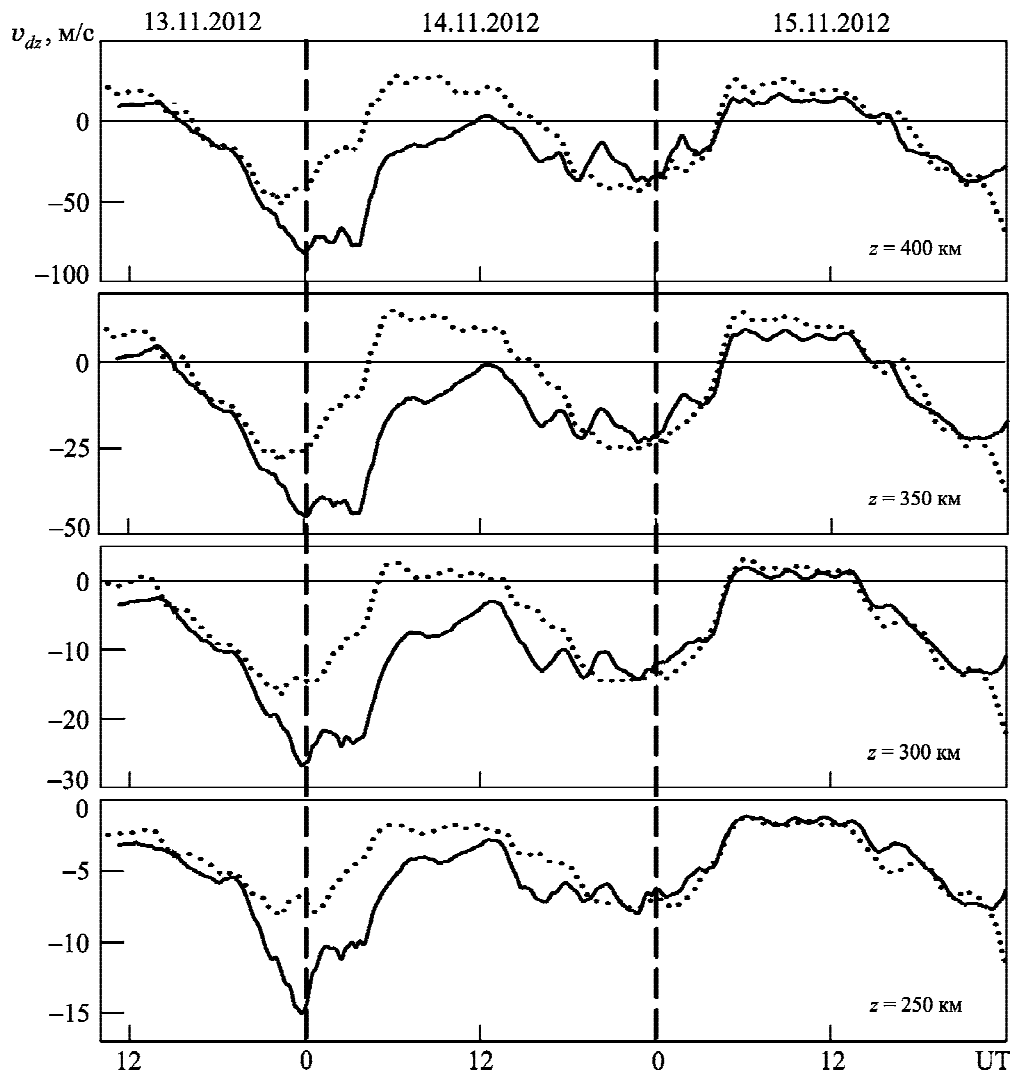


Рис. 6. Временные вариации вертикальной компоненты скорости амбиполярной диффузии v_{dz} на высотах 250, 300, 350, 400 км 13–15 ноября 2012 г. (сплошные кривые) и в магнитоспокойный период 21–23 ноября 2012 г. (точки)

Первая положительная фаза ИБ имела место во время главной фазы МБ, а именно ночью, при этом меридиональный ветер усилился по направлению к полюсу. Следовательно, первый механизм не мог иметь место. Однако такое поведение ветра указывает на то, что эффекты бури хорошо проявились в вариациях параметров глобальной термосферной циркуляции. Подобное поведение скорости нейтрального ветра отмечалось также при наблюдении МБ 25 сентября 1998 г. [14, 15] и 5–6 августа 2011 г. [13, 16].

Что же касается второго механизма, преобладающего в ночные часы, то ответственным за него является нагрев нейтрального газа. По результатам расчетов, представленных на рис. 1,

видно, что с началом МБ (после 18:00 UT 13 ноября) температура нейтралов T_n была выше, чем в невозмущенных условиях 22 ноября. Поэтому второй механизм мог быть причиной проявления положительного ионосферного возмущения во время главной фазы МБ.

Во время второй положительной фазы в ночь с 14 на 15 ноября температура T_n также была выше, чем в магнитоспокойный день, и вариации меридиональной компоненты скорости нейтрального ветра v_{nx} отличалась существенно (примерно на $50 \div 70$ м/с) от вариаций при невозмущенных условиях.

Увеличение температуры T_n относительно ее значений 22 ноября наблюдалось на протяжении всего эксперимента 13–15 ноября 2012 г. Рост

T_n объясняется высокоширотным нагревом термосферы, переносом тепла из высоких широт в средние за счет усиления меридионального ветра к экватору и локальным джоулевым нагревом, связанным с проникновением магнитосферных электрических полей в средние широты. Нагрев нейтрального газа неоднократно наблюдался в измерительных кампаниях на харьковском радаре НР [2, 4, 13, 14]. Так, для сравнения укажем, что на высоте 300 км в период главной фазы сверхсильной МБ 25 сентября 1998 г. в ночное время T_n увеличилась относительно значений в спокойных условиях в 1.3 раза (до ~1460 К), во время сверхсильной МБ 5–6 августа 2011 г. – в 1.7 раза (до 1250 К), а в период сильной МБ 13–14 ноября 2012 г. – в 1.2 раза (до 1310 К).

Рассмотрим механизм формирования отрицательной фазы. Как известно, причиной уменьшения концентрации электронов $N_m F2$ в максимуме слоя F2 во время ионосферных бурь является уменьшение отношения $N(O)/(N(N_2) + N(O_2))$ за счет увеличения средней массы молекул, формирующих зону возмущенного состава. Эта гипотеза подтвердилась данными спутниковых наблюдений и результатами теоретических моделей (см., например, [17]). Изменения нейтрального состава во время бури по данным спутниковых наблюдений включены в термосферную модель NRLMSISE-00. Однако, как показали многочисленные исследования, эта модель требует корректировки.

По данным прибора GUVI, размещенного на борту спутника TIMED, уменьшение концентрации электронов в максимуме слоя F2 13 ноября сопровождалось также уменьшением отношения $N(O)/(N(N_2) + N(O_2))$ примерно в 4.6 раза относительно значений, наблюдавшихся 22 ноября 2012 г. [1].

ИБ со знакопеременными фазами уже наблюдалась на харьковском радаре НР. Так, 4–6 апреля 2006 г. была зарегистрирована умеренная МБ ($K_p \max = 5$) с наличием двух положительных фаз [2, 18]. Первая положительная фаза имела место в дневное и вечернее время 4 апреля, отрицательная фаза началась 4 апреля около 23:00 UT и развивалась в течение 5 апреля, вторая положительная фаза наблюдалась в ночное и утреннее время 6 апреля.

Было установлено, что формированию положительных ионосферных возмущений также могли способствовать два механизма [17, 19]. Как показали результаты эксперимента [1], первый механизм, связанный с дрейфом слоя F2 вверх за счет усиления меридионального ветра к экватору, имел место в дневных условиях 4 и 6 апреля. Что касается второго механизма, то он мог быть причиной второй положительной фазы, о чем свидетельствовали изменения состава нейтральной атмосферы по данным спутника TIMED [20]. Известно, что описанные механизмы могут действовать одновременно и тем самым способствовать формированию разнообразия ионосферных бурь.

Причиной возникновения отрицательной фазы умеренной МБ 4–6 апреля 2006 г., также как и при сильной МБ 13–14 ноября 2012 г., могли послужить возмущения нейтрального состава, а именно уменьшение концентрации атомов кислорода и увеличение концентрации молекулярного азота и кислорода [17–19, 21]. Однако уменьшение отношения $N(O)/(N(N_2) + N(O_2))$ 5 апреля 2006 г. (примерно в 1.6 раза) было не столь существенным, как 14 ноября 2012 г.

Уменьшение локального нагрева электронного газа приводит к увеличению потока энергии фотоэлектронов, покидающих область F ионосферы. Избыточная энергия, переносимая фотоэлектронами, вызывает дополнительный нагрев плазмосферы и позволяет объяснить увеличение плотности теплового потока в возмущенные дни 14 и 15 ноября (см. рис. 3). Результаты расчетов плотностей потоков тепла соответствуют существующим представлениям и характеризуют взаимодействие основных процессов, контролирующих тепловой баланс ионосферы и плазмосферы во время бури.

Из полученных значений вариаций зональной компоненты электрического поля (рис. 5, верхняя панель) видно, что ГБ 13–14 ноября 2012 г. существенно проявилась и в вариациях электрического поля над Харьковом. Увеличение напряженности электрического поля во время ГБ привело к интенсификации движения плазмы, обусловленного электромагнитным дрейфом [2]. Как показало численное моделирование, в спокойных условиях скорость переноса частиц близка к нулю, а во время главной фазы МБ скорость v_{EB} дос-

тигала значения -85 м/с. Результаты расчетов, выполненных в настоящей работе, хорошо согласуются с представленными в [18].

Таким образом, ГБ 13–14 ноября 2012 г. существенно повлияла на высотное распределение параметров геокосмоса выше максимума области F ионосферы и тем самым привела к заметной перестройке динамического режима ионосферной плазмы. Расчеты показали, что во время МБ имело место увеличение нисходящей скорости переноса частиц за счет амбиполярной диффузии. Увеличение v_{dz} свидетельствует об отклонении распределения концентрации ионов от диффузионно-равновесного в период возмущения.

Полученные новые результаты исследований эффектов в ионосферной плазме во время ГБ и результаты многочисленных предыдущих работ демонстрируют уникальность каждой бури даже при одинаковых интенсивностях ГБ.

5. Выводы

1. Расчеты показали, что в течение отрицательной фазы ионосферной бури, когда наблюдался необычный нагрев плазмы на фоне глубокой депрессии концентрации электронов N (около 06:00 UT 14 ноября) в области F, температура нейтралов в среднем увеличилась на 200 К на высотах 250 ÷ 400 км. Нагрев термосферы привел к ее расширению и росту высоты термопаузы не менее чем до 250 км во время ионосферной бури 14 ноября, в спокойный день ее высота составляла около 200 км.

2. В условиях депрессии концентрации электронов 14 ноября 2012 г. скорость нагрева электронного газа Q/N была приблизительно в 2 раз меньше, чем 15 ноября. Это привело к росту плотности потока тепла, обусловленного увеличением температуры электронов.

3. В результате уменьшения концентрации электронов поток плазмы 14 ноября был в целом меньше, чем при невозмущенных условиях. Лишь на высотах 350 ÷ 400 км в околополуденные часы наблюдался всплеск значений Π_{pl} , который превышал значения, наблюдавшиеся 22 ноября.

4. Сильная ГБ 13–14 ноября 2012 г. вызвала целый комплекс процессов, сопутствовавших возмущениям плазмы, электрических и магнит-

ных полей в различных областях околоземного пространства. Эффекты ИБ хорошо проявились в вариациях динамических и тепловых процессов в ионосфере. Временные вариации абсолютных значений вертикальной составляющей скорости амбиполярной диффузии и переноса плазмы за счет электромагнитного дрейфа во время ионосферного возмущения заметно усилились. Имело место увеличение v_{dz} в 2 раза на высоте 250 км и v_{EB} от 0 до -85 м/с на высоте 300 км. В свою очередь, меридиональная компонента скорости ветра сменила направление на противоположное и была направлена к экватору. Наибольшее значение v_{nx} составило примерно 150 м/с.

5. Полученные результаты подтвердили наличие в ГБ, с одной стороны, индивидуальных особенностей, а с другой стороны, общих закономерностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Домнин И. Ф., Емельянов Л. Я., Кацко С. В., Черногор Л. Ф. Ионосферные эффекты геокосмической бури 13–14 ноября 2012 г. // Радиофизика и радиоастрономия. – 2014. – Т. 19, № 2. – С. 170–180.
2. Черногор Л. Ф., Домнин И. Ф. Физика геокосмических бурь. – Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2014. – 408 с.
3. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия. – 2003. – Т. 8, № 1. – С. 59–106.
4. Григоренко Е. И., Пазюра С. А., Таран В. И., Черногор Л. Ф., Черняев С. В. Динамические процессы в ионосфере во время сильнейшей магнитной бури 30–31 мая 2003 г. // Геомагнетизм и аэрономия. – 2005. – Т. 45, № 6. – С. 803–823.
5. Salah J. E. and Evans J. V. Measurements of thermospheric temperature by incoherent scatter radar. In: Space Research XIII. – Berlin: Akademie – Verlag, 1973. – P. 268–286.
6. Picone J. M., Hedin A. E., Drob D. P., and Aikin A. C. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues // J. Geophys. Res. Space Phys. – 2002. – Vol. 107, Is. A12. – P. SIA15-1–SIA15-16.
7. Бэнкс П. М. Тепловая структура ионосферы // ТИИЭР. – 1969. – Т. 57, № 3. – С. 6–30.
8. Schunk R. W. and Nagy A. F. Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry. – Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004. – 554 p.
9. Banks P. M. Charged particle temperatures and electron thermal conductivity in the upper atmosphere // Ann. Geophys. – 1966. – Vol. 22. – P. 577–584.
10. Dalgarno A. and Degges T. C. Electron cooling in the upper atmosphere // Planet. Space Sci. – 1968. – Vol. 16, Is. 1. – P. 125–127.

11. *Сергеенко Н. П.* Оценки электрических полей во время ионосферных возмущений. В кн.: Ионосферное прогнозирование. – М.: Наука, 1982. – С. 91–96.
12. *Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А.* Физика ионосферы. – М.: Наука, 1987. – 528 с.
13. *Домнин И. Ф., Емельянов Л. Я., Ляшенко М. В., Харитонов С. В., Черногор Л. Ф.* Ионосферные процессы, сопровождавшие геокосмическую бурю 5–6 августа 2011 г. // Радиофизика и радиоастрономия. – 2012. – Т. 17, № 4. – С. 320–332.
14. *Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Таран В. И., Черногор Л. Ф.* Результаты радиофизических исследований процессов в ионосфере, сопровождавших сильнейшую геомагнитную бурю 25 сентября 1998 г. // Успехи современной радиоэлектроники. – 2003. – № 9. – С. 57–94.
15. *Григоренко Е. И., Лазоренко С. В., Таран В. И., Черногор Л. Ф.* Волновые возмущения в ионосфере, сопровождающие вспышку на Солнце и сильнейшую магнитную бурю 25 сентября 1998 г. // Геомагнетизм и аэрономия. – 2003. – Т. 43, № 6. – С. 770–787.
16. *Кацко С. В., Домнин И. Ф., Емельянов Л. Я., Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф.* Ионосферная буря 5–6 августа 2011 г.: результаты расчетов основных эффектов // Радиофизика и радиоастрономия. – 2014. – Т. 19, № 1. – С. 26–39.
17. *Данилов А. Д.* Реакция области F на геомагнитные возмущения (обзор) // Гелиогеофизические исследования. – 2013. – № 5. – С. 1–33.
18. *Пазюра С. А., Таран В. И., Черногор Л. Ф.* Особенности ионосферной бури 4–6 апреля 2006 г. // Космична наука і технологія. – 2008. – Т. 14, № 1. – С. 65–76.
19. *Mansilla G. A.* Mid-latitude effects of a great geomagnetic storm // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. – 2004. – Vol. 66, No. 12. – P. 1085–1091.
20. *Mansilla G. A.* Some effects in the upper atmosphere during geomagnetic storms // Adv. Space Res. – 2010. – Vol. 47, No. 6. – P. 930–937.
21. *Sojka J. J., David M., Schunk R. W., and Heelis R. A.* A modeling study of the longitudinal dependence of storm time midlatitude dayside total electron content enhancements // J. Geophys. Res. Space. Phys. – 2012. – Vol. 117, Is. A2. – id. A017000.
- И. Ф. Домнин¹, С. В. Кацко¹, М. В. Ляшенко¹, Л. Ф. Черногор^{1,2}*
¹ Інститут іоносфери НАН і МОН України, вул. Червонопрапорна, 16, м. Харків, 61002, Україна
² Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, м. Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

ИОНОСФЕРНА БУРЯ 13–14 ЛИСТОПАДА 2012 Р.: РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ ТЕПЛОВИХ І ДИНАМІЧНИХ ЕФЕКТІВ

Наведені результати розрахунків ефектів збурень теплового та динамічного режимів верхньої атмосфери Землі під час сильної магнітної бури 13–14 листопада 2012 р. Магнітна буря викликала цілий комплекс процесів, що супроводжували збурення плазми, електричних і магнітних полів у різних областях навколоземного простору. Підтверджено наявність у геомагнітних бурях як індивідуальних особливостей, так і загальних закономірностей.

I. F. Domnin¹, S. V. Katsko¹, M. V. Lyashenko¹, and L. F. Chernogor^{1,2}

¹ Institute of Ionosphere, National Academy of Sciences of Ukraine and Ministry of Education and Science of Ukraine, 16, Chervonopraporna St., Kharkiv, 61002, Ukraine

² V. Kazarin National University of Kharkiv, 4, Svoboda Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

IONOSPHERIC STORM OF NOVEMBER 13–14, 2012: SIMULATION RESULTS OF THERMAL AND DYNAMIC EFFECTS

The simulation results of the effects of the Earth upper atmosphere thermal and dynamic conditions disturbances during the strong magnetic storm of November 13–14, 2012 are presented. The magnetic storm has caused a whole package of processes which accompanied plasma, electric and magnetic fields disturbances in different regions of near-Earth space. The occurrence of individual characteristics and general regularities in geomagnetic storms is confirmed.

Статья поступила в редакцию 01.10.2014