

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, СОПУТСТВОВАВШИХ ГЕОМАГНИТНЫМ БУРЯМ В 1998–2012 гг.

С. В. Кацко, Л.Ф. Черногор

COMPARATIVE ANALYSIS OF PARAMETERS OF DYNAMIC PROCESSES ASSOCIATED WITH 1998–2012 GEOMAGNETIC STORMS

S. V. Katsko, L.F. Chernogor

Проведен сравнительный анализ вариаций вторичных параметров ионосферной плазмы, которые непосредственно не измеряются, во время ионосферных бурь в 1998–2012 гг. С использованием численного моделирования, экспериментальных данных радара некогерентного рассеяния, расположенного в обсерватории Института ионосферы (Харьков, Украина), и эмпирической модели NRLMSISE-00 изучены вариации параметров динамических и тепловых процессов. Установлено, что простая пропорциональная зависимость между изменениями первичных и вторичных параметров ионосферной плазмы отсутствует.

Comparative analysis of variations of secondary parameters of ionosphere plasma, which are not measured direct, during ionospheric storms in 1998–2012, is carried out. The variations in parameters dynamic and heat processes are studied with using of numerical simulation, experimental data of the incoherent scatter radar located in the observatory of Institute of Ionosphere (Kharkiv, Ukraine), and empirical model NRLMSISE-00. It is determined, that a simple proportionate dependence between variations in primary and secondary parameters of ionospheric plasma is absent.

Введение

В настоящее время одной из проблем теории и моделирования состояния околоземной космической плазмы является создание таких моделей, которые достоверно отображали бы поведение среды не только в магнитоспокойном, но и в возмущенном состояниях. Ионосферная буря (ИБ) может сопровождаться увеличением концентрации электронов или ее уменьшением. В первом случае возникает положительная фаза ионосферной бури, а во втором – отрицательная фаза. Наступление положительной и отрицательной фаз может происходить также несколько раз на протяжении бури. Вопрос о механизмах, вызывающих смену фаз ионосферной бури, все еще остается мало изученным [Черногор, Домнин, 2014].

Эффекты умеренных ИБ в настоящее время меньше, чем эффекты сильных бурь, освещены в литературе из-за недостатка данных наблюдений. Умеренные бури являются более многочисленными по сравнению с сильными бурями. Должны быть проверены гипотезы, которые лежат в основе теоретических представлений о глобальных процессах в атмосфере во время умеренных магнитных бурь (МБ) и их зависимости от параметров солнечного ветра, величины и направления V_z - и V_y -компонент межпланетного магнитного поля, уровня геомагнитной активности и других параметров.

Цель настоящей работы – представление результатов численного моделирования и сравнительного анализа вариаций параметров динамических и тепловых процессов во время ИБ с использованием экспериментальных данных радара некогерентного рассеяния (НР) и эмпирической модели NRLMSISE-00 [Picone et al., 2002].

Результаты сравнительного анализа параметров динамических процессов

Моделирование физико-химических процессов в ионосфере осуществляется в двух направлениях. Первое – это теоретическое моделирование высотно-временных профилей концентрации электронов

N_e , температур электронов T_e , ионов T_i и других параметров среды, которые сравниваются с результатами наблюдений. И второе – это теоретическое моделирование, направленное на расчет параметров нейтральной атмосферы и плазмы, которые непосредственно не измеряются методом НР. К таким параметрам относятся количество энергии, которая подводится к электронному газу Q/N_e , плотность потока тепла P_T , переносимого электронами, температура нейтрального газа T_n и др. [Домнин и др., 2011, 2012, 2014а, б, в; Черногор, Кацко, 2013; Черногор, Домнин, 2014].

Сравним вариации значений вторичных параметров ИБ, полученных из результатов расчетов и моделирования (таблица). Здесь ОФ – отрицательная фаза, ПФ – положительная фаза, символ «–» означает, что параметр не оценивался, а знаком «*» показаны вариации на уровне погрешности определения данного параметра.

Ионосферная буря 25 сентября 1998 г.

Выявленный рост T_n в 1.5 раза объясняется как высокоширотным нагревом термосферы и переносом тепла из высоких широт в средние широты за счет усиления направленного к экватору меридионального ветра, так и локальным джоулевым нагревом в результате проникновения магнитосферных электрических полей в средние широты. В период возмущений локальный подвод энергии к электронному газу уменьшился в 1.9 раза, а поток тепла, переносимого электронами между ионосферой и плазмосферой, возрос в 1.5 раза.

Ионосферная буря 20–21 марта 2003 г.

Расчеты показали, что T_n во время ИБ увеличилась примерно на 50 и на 100 К в течение положительной и отрицательной фаз соответственно. Около полудня во время отрицательной фазы ИБ значения Q/N_e превышали значения Q/N_e в течение ее положительной фазы в 2.5–4 раза, а в слабо возмущенные сутки 22 марта значения Q/N_e увеличились в 2 раза [Черногор, Домнин, 2014].

Ионосферная буря 29–30 мая 2003 г.

Во время главной фазы МБ, в ночь 29–30 мая, когда наблюдался необычный нагрев плазмы на фоне

Вторичные параметры, характеризующие ионосферные бури

| Буря | Параметры | | | | | |
|-------------------------|--------------|-----------------------|---------------------|---|--------------|---|
| | T_n/T_{n0} | $\Delta T_n, K$ | $(Q/N_e)_0/(Q/N_e)$ | $\frac{\Delta Q_{\max}}{10^{-21} \text{ Дж/с}}$ | P_T/P_{T0} | $\frac{\Delta P_{T\max}}{10^{-5} \text{ Вт/м}^2}$ |
| ИБ 25 сентября 1998 г. | 1.5 | 510 | 1.9 | -0.35 | 1.5 | 0.7 |
| ИБ 20–21 марта 2003 г. | – | 50* (ПФ), 100 (ОФ) | 2.5–4 | -(0.5–0.6) | – | – |
| ИБ 29–30 мая 2003 г. | 1.4 | 330 | 1.6 | -0.5 | 1.6 | 1.5 |
| ИБ 7–10 ноября 2004 г. | 2 | 680 | 1.3–2 | -0.8 | 2.5–3 | -1 |
| ИБ 4–6 апреля 2006 г. | 1.05* | 50* | 1 | -0.05* | 1.2* | 0.08* |
| ИБ 20–21 января 2010 г. | 1.05* | 50* | 1.2* | -0.1* | – | – |
| ИБ 5–6 августа 2011 г. | 2 | 680 | 1.7 | -0.05* | 3 | 0.6 |
| ИБ 13–14 ноября 2012 г. | 1.3 | 310 | 2 | -0.18 | 2.6 | 0.8 |

глубокой депрессии N_e в области F2, температура T_n увеличилась в 1.4 раза. Нагрев термосферы привел к ее расширению во время главной фазы МБ. В возмущенные сутки вблизи полудня скорость нагрева Q/N_e уменьшилась по сравнению со спокойными сутками в 1.6 раза [Черногор, Домнин, 2014]. Это, в свою очередь, привело к росту P_T в 1.2 раза. Особенностью теплового режима ионосферы во время главной фазы МБ (в ночь 29–30 мая) стал рост значений Q/N_e и P_T . В спокойных условиях эти значения в ночное время были близки к нулю. Такое явление на широте Харькова наблюдалось крайне редко. Оно связано с необычным нагревом плазмы в ночное время, когда во время главной фазы МБ температуры T_e и T_i достигли практически дневных значений.

Ионосферная буря 7–10 ноября 2004 г.

Во время сильнейшей ИБ 7–10 ноября 2004 г. температура нейтралов T_n увеличилась в 2 раза. Подвод энергии к электронам уменьшился в 1.3–2 раза. Плотность потока тепла увеличилась в 2.5–3 раза.

Ионосферная буря 4–6 апреля 2006 г.

Эффекты умеренной МБ 4–6 апреля 2006 г. в атмосфере были незначительными. Так, температура T_n в дневное время увеличивалась примерно на 50 K в отрицательную фазу бури по сравнению с контрольным днем. Значительное уменьшение потерь энергии электронного газа в процессе теплообмена с нейтралами и рост потерь энергии электронов в кулоновских соударениях с ионами мало повлияли на суточные вариации подвода энергии к электронному газу. При этом наибольшее увеличение абсолютного значения потока тепла P_T составляло 1.2 раза.

Ионосферная буря 20–21 января 2010 г.

Слабое отрицательное ионосферное возмущение во время весьма умеренной МБ не повлияло на поведение T_n . Что касается теплового режима ионосферы, то максимальное уменьшение Q/N_e составляло 1.2 раза.

Ионосферная буря 5–6 августа 2011 г.

Увеличение T_n в 2 раза во время ИБ объясняется высокоширотным нагревом термосферы, переносимым теплом 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. Энергия Q/N_e уменьшилась в 1.7 раза. Уменьшение локального нагрева электронного газа привело к увеличению потока энергии фотоэлектронов, покидающих область F-ионосферы. Избыточная энергия, переносимая фотоэлектронами, вызвала дополнительный нагрев плазмосферы, чем объясняется увеличение P_T в 3 раза во время ИБ.

Ионосферная буря 13–15 ноября 2012 г.

Первая положительная фаза ИБ имела место во время главной фазы МБ, а именно ночью, тогда как меридиональный ветер усилился по направлению к полюсу. Следовательно, первый механизм (подъем слоя F2 ионосферы в область более медленной комбинации за счет усиления меридионального ветра к экватору в дневных условиях) отсутствовал. Такое поведение ветра указывает на то, что эффекты бури хорошо проявились в вариациях параметров глобальной термосферной циркуляции. Что же касается второго механизма, преобладающего в ночные часы, то ответственным за него является нагрев нейтрального газа. После начала МБ (с 18:00 UT 13 ноября), температура нейтралов T_n была выше по сравнению с невозмущенными условиями. 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 в 1.1–3 раза выше, чем в магнитоспокойный день. Во время ИБ Q/N_e уменьшился до 2 раз, P_T увеличилась в 2.6 раза. Из табл. 1 видно, что наибольшие изменения T_n и P_T имели место во время бурь 7–10 ноября 2004 г. и 5–6 августа 2011 г.

Во время умеренных бурь 4–6 апреля 2006 г. и 20–21 января 2010 г., как и следовало ожидать, вариации всех вторичных параметров плазмы были незначительными. Наибольшие изменения Q/N_e имели место во время бурь 20–21 марта 2003 г. и 7–10 ноября 2007 г.

Таким образом, простая пропорциональная зависимость между изменениями первичных и вторичных параметров не отмечалась.

Выводы

1. Проведен сравнительный анализ результатов численного моделирования вторичных параметров атмосферы и ионосферы для восьми ионосферных

бурь разной интенсивности, имевших место в течение 1998–2012 гг. Показано, что величины вариаций вторичных параметров заметно отличались для различных бурь.

2. Сравнительный анализ вариаций вторичных параметров атмосферы и ионосферы подтвердил, что каждая буря уникальна. Схема ее развития достаточно сложна, что существенно затрудняет прогнозирование процессов, которыми она сопровождается.

3. Установлено, что отсутствует простая пропорциональная зависимость между изменениями первичных (N_e , T_e , T_i) и вторичных (T_n , Q/N_e , P_T) параметров ионосферы и атмосферы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Домнин И.Ф., Харитонова С.В., Черногор Л.Ф. и др. Динамические процессы в ионосфере в течение весьма умеренной магнитной бури 20–21 января 2010 г. // *Космічна наука і технологія*. 2011. Т. 17, № 4. С. 26–40.

Домнин И.Ф., Харитонова С.В., Черногор Л.Ф. и др. Ионосферные процессы, сопровождавшие геокосмическую бурю 5–6 августа 2011 г. // *Радиофизика и радиоастрономия*. 2012. Т. 17, № 4. С. 320–332.

Домнин И.Ф., Кацко С.В., Черногор Л.Ф. и др. Ионосферная буря 5–6 августа 2011 г.: результаты расчетов основных эффектов // *Радиофизика и радиоастрономия*. 2014а. Т. 19, № 1. С. 26–39.

Домнин И.Ф., Кацко С.В., Черногор Л.Ф. и др. Ионосферные эффекты геокосмической бури 13–14 ноября 2012 г. // *Радиофизика и радиоастрономия*. 2014б. Т. 19, № 2. С. 170–180.

Домнин И.Ф., Кацко С.В., Черногор Л.Ф. и др. Ионосферная буря 13–14 ноября 2012 г.: результаты расчетов тепловых и динамических эффектов // *Радиофизика и радиоастрономия*. 2014в. Т. 19, № 4. С. 336–347.

Черногор Л.Ф., Домнин И.Ф. *Физика геокосмических бурь*. Харьков: ХНУ им. В.Н. Каразина, 2014. 407 с.

Черногор Л.Ф., Кацко С.В. Возмущение параметров ионосферного канала распространения радиоволн в течение геокосмических бурь // *Вестник Поволжского государственного технологического университета «Радиотехнические и инфокоммуникационные системы»*. 2013. Т. 3, № 19. С. 5–17.

Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., et al. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: statistical comparisons and scientific issues // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107, N 12. P. 1468–1483.

Институт ионосферы НАН и МОН Украины, Харьков, Украина