

УДК 550.388.2

ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГЕОКОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОЙ БУРИ 5–6 АВГУСТА 2011 г.

М.В. Ляшенко

THERMAL PROCESSES IN THE GEOSPACE PLASMA DURING AUGUST 5–6, 2011 MAGNETIC STORM

M.V. Lyashenko

Представлены результаты моделирования параметров тепловых процессов в геосмосе над Украиной во время магнитной бури 5–6 августа 2011 г. Во время главной фазы магнитной бури имели место уменьшение величины энергии, подводимой к электронному газу, на 15–27 % и увеличение плотности потока тепла, переносимого электронами из плазмосферы в ионосферу, на 25–76 % в диапазоне высот 200–300 км.

The modeling results of thermal process parameters in geospace over Ukraine during August 5–6, 2011 magnetic storm are presented. During the main phase of the magnetic storm occurred decrease in the energy value transferred to the electron gas by 15–27 % and increase in the heat flux density carried by electrons from the plasmasphere into the ionosphere by 25–76 % in the altitude range 200–300 km.

Введение

Исследование эффектов магнитных бурь в вариациях параметров геосмоса является одной из актуальных задач современной геофизики. Магнитные бури, особенно сверхсильные, вызывают кардинальную перестройку тепловых и динамических режимов в подсистемах системы Земля–атмосфера–ионосфера–магнитосфера [Chernogor et al., 2008]. Сверхсильные магнитные бури могут сопровождаться сбоями и авариями на трансконтинентальных телекоммуникационных системах, протяженных линиях электропередач, газо- и нефтепроводах. Следует также отметить, что магнитные бури оказывают влияние на состояние биосферы Земли в целом и на самочувствие и здоровье людей в частности.

Для исследования эффектов, сопутствующих магнитным бурям, используется целый арсенал как наземных, так и спутниковых радиофизических средств дистанционного зондирования геосмоса.

Наиболее информативными радиофизическими средствами дистанционного зондирования ионосферы являются радары некогерентного рассеяния (НР). Харьковский радар НР в настоящее время является единственным и наиболее достоверным источником сведений о параметрах геосмической плазмы в среднеширотной Европе. Ранее авторами [Тригоренко и др., 2003, 2005а, б, 2007] выполнены исследования ионосферных эффектов ряда сильнейших геосмических бурь и проведено моделирование вариаций параметров динамических и тепловых процессов в геосмосе с помощью радара НР в Харькове.

В работе [Домнин и др., 2012] представлены результаты исследований вариаций параметров геосмоса во время магнитной бури 5–6 августа 2011 г. по данным радара НР в Харькове.

Целью данной работы является моделирование вариаций параметров тепловых процессов в геосмосе над Украиной во время магнитной бури 5–6 августа 2011 г.

Краткие сведения о магнитной буре 5–6 августа 2011 г.

Внезапное начало магнитной бури имело место 5 августа 2011 г. в 19:03 UT. Максимальное отклонение

D_{st} -индекса составляло -113 нТл, значение планетарного K_p -индекса составляло 8–, индекс авроральной активности $AE_{max}=1741$ нТл.

Основные теоретические соотношения

Энергия, подводимая к электронному газу

Хорошо известно, что в области F ионосферы частота электрон-нейтральных соударений меньше, чем частота соударений электронов с ионами. В этом случае к основным механизмам охлаждения электронного газа можно отнести потерю тепла при соударениях электронов с ионами, возбуждение тонкой структуры атомов кислорода и теплопроводность электронов [Schunk et al., 2000]. Также имеет место перенос фотоэлектронов и связанный с этим переносом нелокальный нагрев электронного газа.

На высотах $z \leq 350$ км теплопроводностью электронного газа можно пренебречь, и уравнение баланса энергии электронов в стационарном случае имеет вид [Schunk et al., 2000]

$$\begin{aligned} Q &= L_{ei} + L_e, \\ L_{ei} &= 8 \cdot 10^{-32} N^2 (T_e - T_i) T_e^{-3/2}, \\ L_e &= 6.4 \cdot 10^{-37} N N(O) (T_e - T_i) T_n^{-1}, \end{aligned}$$

где Q – энергия, передаваемая тепловым электронам при кулоновских столкновениях с фотоэлектронами; L_{ei} – энергия, теряемая при электрон-ионных столкновениях; L_e – энергия, затрачиваемая на возбуждение тонкой структуры атомов кислорода; $N(O)$ – концентрация атомов кислорода. Температура нейтралов T_n и концентрация $N(O)$ рассчитывались с привлечением эмпирической модели атмосферы NRLMSISE-00.

Поток тепла

Тепловой баланс электронного газа зависит от величины потока тепла, переносимого электронами из плазмосферы в ионосферу. Тепло в плазмосфере накапливается за счет сверхтепловых электронов, убегающих из места своего образования во внешнюю ионосферу. Часть электронов теряет свою энергию в кулоновских соударениях с тепловыми электронами и ионами. Другая часть электронов попадает в магнитную силовую трубку. В силовой магнитной трубке захваченные электроны термализуются.

зуются в процессе многократных отражений от концов трубки. Таким образом, в плазмосфере имеет место накопление тепла, которое поступает обратно в ионосферу посредством теплопроводности электронного газа [Брюнелли и др., 1988; Schunk et al., 2000].

Тепловой поток можно определить из кинетического уравнения с учетом переноса сверхтепловых электронов. Выражение для расчета величины плотности потока тепла, поступающего из плазмосферы в вертикальном направлении, имеет вид [Schunk et al., 2000]

$$\Pi_T = -\kappa_e \sin^2 I (\partial T_e / \partial z),$$

где $\kappa_e = 2.08 \cdot kNT_e / (mv_{ei})$ – продольная составляющая тензора теплопроводности электронного газа, k – постоянная Больцмана, m – масса электрона, $v_{ei} \approx 5.5 \cdot 10^{-6} NT_e^{-3/2} \ln(2 / 2 \cdot 10^4 T_e N^{-1/3})$ – частота соударений электронов с ионами O^+ .

Результаты моделирования и обсуждение

На рисунке приведены результаты моделирования величины энергии, подводимой к электронам (а), и плотности потока тепла, переносимого электронами из плазмосферы в ионосферу (б), во время магнитной бури 5–6 августа 2011 г. и в спокойных условиях.

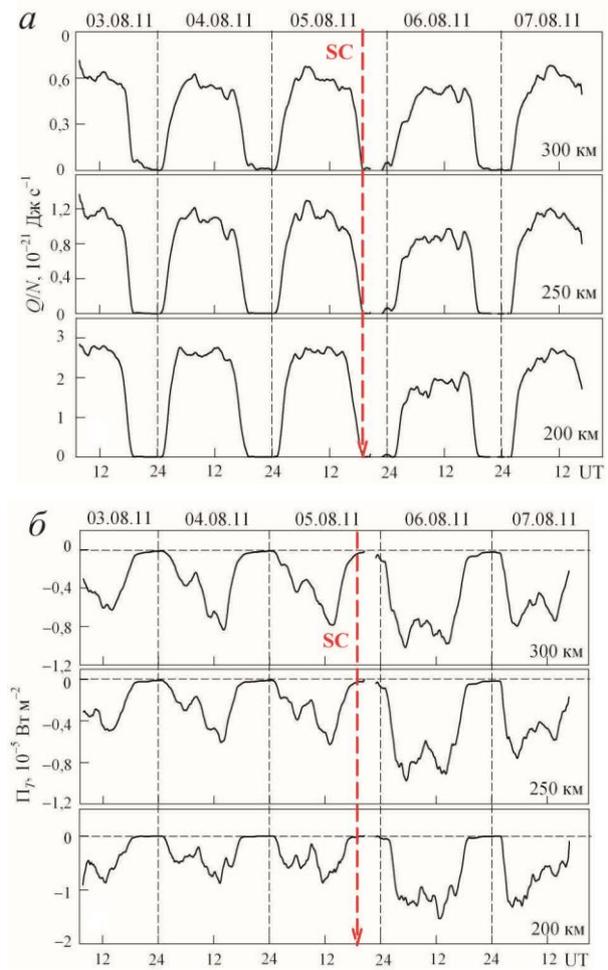
Подвод энергии к электронам

Как показало моделирование, в спокойных геологофизических условиях величина энергии, подводимой к электронному газу, в дневные часы на высотах 200, 250 и 300 км составляла примерно $2.8 \cdot 10^{21}$, $1.4 \cdot 10^{21}$ и $0.65 \cdot 10^{21}$ Дж/с соответственно (см. рисунок а).

Во время главной фазы магнитной бури имело место уменьшение величины Q/N примерно на 27, 25 и 15 % на высотах 200, 250 и 300 км соответственно. Уменьшение величины энергии, подводимой к электронному газу в рассматриваемом диапазоне высот, можно объяснить нагревом и расширением термосферы во время главной фазы магнитной бури и уменьшением концентрации электронов (см., например, [Григоренко и др., 2005а]).

Поток тепла из плазмосферы в ионосферу

В спокойных условиях в вариациях Π_T имели место два максимума, приходящиеся на утренние и послеполуденные часы. Причем амплитуда послеполуденного максимума для всех рассмотренных спокойных суток была больше амплитуды утреннего (см. рис. б). Величина $|\Pi_T|$ в невозмущенных условиях не превышала значений 0.1, 0.06 и 0.08 мВт/м² на высотах 200, 250 и 300 км соответственно. Как показали расчеты, эффекты магнитной бури 5–6 августа 2011 г. хорошо проявились в вариациях плотности потока тепла Π_T . Так, во время главной фазы магнитной бури имело место усиление направленного вниз в ионосферу потока тепла Π_T . Амплитуда утреннего максимума стала сравнима по величине с амплитудой послеполуденного максимума в суточных вариациях Π_T . Плотность потока тепла Π_T по модулю увеличилась примерно на 76, 69 и 25 % на высотах 200, 250 и 300 км соответственно. Следует отметить, что полученные результаты хорошо соотно-



Временные вариации энергии, подводимой к электронному газу Q/N (а), и плотности потока тепла Π_T (б) в период с 3 по 7 августа 2011 г. на фиксированных высотах.

ются с результатами моделирования для ряда магнитных бурь, имевших место в 1998–2010 гг.

Такое поведение плотности потока тепла во время главной фазы магнитной бури можно объяснить нагревом плазмы в ночные часы на фоне уменьшения концентрации электронов. Аномальное увеличение температуры электронов и ионов, по-видимому, вызвано деформацией магнитосферы Земли во время магнитной бури и смещением главного ионосферного провала к экватору, а также горячей зоны вместе с плазмопаузой на L -оболочки, соответствующие внутренней плазмосфере (для Харькова $L \approx 1.9$) [Григоренко и др., 2005а].

Выводы

Магнитная буря 5–6 августа 2011 г. привела к заметной перестройке теплового режима ионосферной плазмы над Харьковом. Результаты теоретического моделирования сводятся к следующему.

Магнитная буря 5–6 августа 2011 г. сопровождалась уменьшением величины энергии, передаваемой электронному газу, на 27, 25 и 15 % на высотах 200, 250 и 300 км соответственно.

Плотность потока тепла, переносимого электронами из плазмосферы в ионосферу, во время главной фазы магнитной бури увеличилась на 76, 69 и 25 % на высотах 200, 250 и 300 км соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 528 с.

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.

Григоренко Е.И., Емельянов Л.Я., Пазюра С.А. и др. Возмущения ионосферной плазмы во время сверхсильной магнитной бури 29–31 мая 2003 года: результаты наблюдений на радаре некогерентного рассеяния // Успехи современной радиоэлектроники. 2005а. № 4. С. 21–39.

Григоренко Е.И., Пазюра С.А., Таран В.И., Черногор Л.Ф. Аномальная ионосферная буря 20–23 марта 2003 года: результаты измерений и моделирования // Космічна наука і технологія. 2005б. Т. 11, № 3/4. С. 4–19.

Григоренко Е.И., Пазюра С.А., Черногор Л.Ф. Ионосферные процессы в течение сильнейшей геокоsmической бури 7–10 ноября 2004 г. 2. Результаты расчетов и обсуждений // Космічна наука і технологія. 2007. Т. 13, № 4. С. 77–90.

Домнин И.Ф., Емельянов Л.Я., Ляшенко М.В. и др. Ионосферные процессы, сопровождавшие геокоsmическую бурю 5–6 августа 2011 г. // Радиофизика и радиоастрономия. 2012. Т. 17, № 10. С. 320–332.

Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues // J. Geophys. Res. 2002. V. 107, N A12. P. 1468–1483.

Schunk R.W., Nagy A.F. Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry. 2000. 555 p. (Cambridge Atmospheric and Space Science Series).

Институт ионосферы НАН и МОН Украины, Харьков, Украина