

**Е. И. ГРИГОРЕНКО**, зав сектором, **В.Н. ЛЫСЕНКО**, зав. отделом, **В.И. ТАРАН**, докт. физ.-мат. наук, Институт ионосферы, (г. Харьков), **Л.Ф. ЧЕРНОГОР**, докт. физ.-мат. наук, ХНУ им. В.Н. Каразина

## ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА НЕЙТРАЛЬНОЙ АТМОСФЕРЫ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОЙ БУРИ 25.09.98

Спостереження за допомогою радара некогерентного розсіяння (НР) в Харкові найсильнішої магнітної бурі 25 вересня 1998 р. показали зростання температури нейтральних компонент атмосфери  $T_n$  на  $\sim 250\text{--}720$  К у діапазоні висот 250–450 км. Зростання  $T_n$  пояснюється в термінах високоширотного та локального Джоулева нагріву термосфери.

The Kharkov incoherent scatter radar observations during the September 25, 1998 severe magnetic storm showed the enhancement of the neutral atmosphere temperature  $T_n$  by about  $\sim 250\text{--}720$  K over the 250–450 km altitude range.  $T_n$  increase is explained in terms of high latitude and local Joule heating.

**Введение.** Исследования физических процессов, сопутствующих гео-космическим бурям, проводятся в рамках крупных международных проектов. Тем не менее, остается много проблем в понимании этих процессов, а также в их моделировании в глобальных масштабах в различных областях верхней атмосферы. Особенность существующих справочных моделей состоит в том, что они построены в основном по данным сети радаров НР американского континента и требуют модификации к конкретному географическому региону. Так возникла задача исследования теплового режима термо-

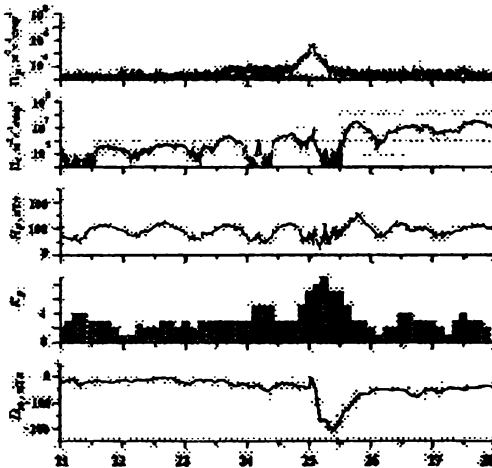


Рис. 1. Временные вариации потоков протонов и электронов,  $H_p$ -компоненты геомагнитного поля,  $K_p$  и  $D_{st}$ -индексов в период 21–28 сентября 1998 г.

сферы (определяющего параметры канала радиосвязи) в условиях геомагнитных возмущений для средних широт европейского региона и сравнения результатов с моделью термосферы MSIS-86. Постановка и решение этой задачи на базе данных радара в Харькове являются целью настоящей работы. Наблюдения эффектов сильнейшей бури проводились в период 21–25

сентября 1998 г. Магнитная буря была вызвана вспышкой на Солнце класса M6/3B, которая произошла 23 сентября в 06.44–10.09, и началась внезапно 24 сентября около 23.00 (здесь и далее время UT). Основные события, сопутствующие геокосмической буре, отражены на рис. 1. Развитие бури сопровождалось понижением индекса  $D_{st}$  на поверхности Земли до  $-207$  нТл около 10.00. Энергия и мощность бури составили около  $10^{16}$  Дж и  $10^{12}$  Вт.

**Результаты обработки данных наблюдений.** Некоторые эффекты бури описаны в [1–4]. Здесь исследуется тепловой режим термосферы в период геомагнитных возмущений. Температура нейтралов  $T_n$  вычислялась по методике [5] на основе уравнения теплового баланса ионного газа [6–7]. В расчете использовались параметры ионосферы  $N$ ,  $T_e$ ,  $T_i$ , измеренные непосредственно методом HP; для нахождения концентраций нейтральных компонент привлекалась модель MSIS-86. Полагалось, что в квазистационарных условиях на высотах 250–300 км, где теплопроводностью газа можно пренебречь, скорость нагрева ионов  $O^+$  за счет теплообмена с электронами можно приравнять скорости охлаждения за счет передачи тепла нейтральным частицам. Для этого случая уравнение теплового баланса можно записать в виде [5, 8]:

$$T_i - T_n = \frac{4,82 \cdot 10^7 N (T_e - T_i) T_e^{3/2}}{6,6 N(N_2) + 5,8 N(O_2) + 0,2 N(O) (T_i + T_n)^{3/2}}$$

Здесь  $N$ ,  $N(N_2)$ ,  $N(O)$ ,  $N(O_2)$  – концентрации электронов, молекулярного азота, атомарного и молекулярного кислорода,  $T_n$ ,  $T_e$ ,  $T_i$  – температуры нейтралов, электронов и ионов соответственно.

Анализ полученных результатов обнаруживает следующие особенности теплового режима нейтральной атмосферы украинского региона (рис. 2):

- в спокойные дни  $T_n$  при переходе от 250 к 300 км мало изменялась, достигнув, по-видимому, значения температуры экзосферы;
- выше 300 км с ростом высоты расчетное значение  $T_n$  уменьшалось, что подтверждает некорректность принятой методики расчета для больших высот, где следует учитывать теплопроводность заряженных и нейтральных компонент атмосферы;
- в спокойные сутки (22–23 сентября)  $T_n$  на высоте 300 км изменялась от  $\sim 850$  К ночью до  $\sim 1150$  К днем. В период бури (25 сентября) температура нейтралов увеличилась до  $\sim 950$  К ночью и  $\sim 1450$  К днем;
- в возмущенный день  $T_n$ , отслеживая рост  $T_i$ , возрастала с высотой не менее чем до 450 км. Увеличение  $T_n$  по сравнению со спокойным днем составило в главную фазу бури (около 07.00)  $\sim 250, 360, 430, 520$  и  $720$  К на высотах 250, 300, 350, 400 и 450 км соответственно;
- модель MSIS-86 дает заниженные значения  $T_n$  в магнитовозмущенных условиях. Максимальные отличия  $T_n$ , рассчитанной из данных радара, по

сравнению с модельными значениями днем составляли ~190, 320, 340, 470, 670 К на высотах 250, 300, 350, 400, 450 км соответственно.

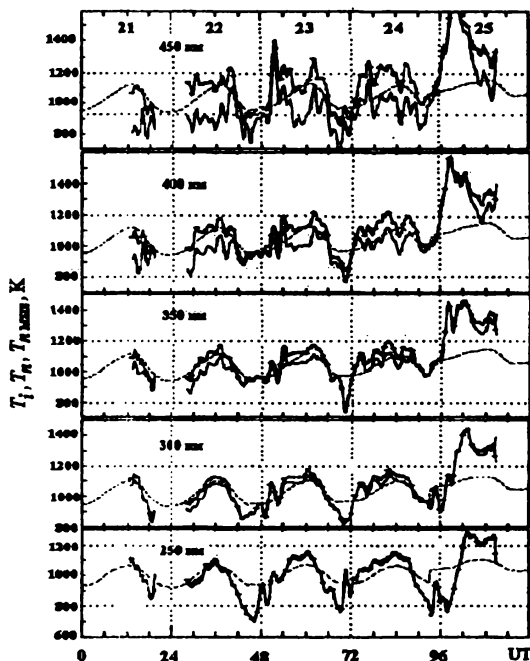


Рис. 2. Измеренные температуры ионов  $T_i$  (линии с точками) и рассчитанные температуры нейтралов  $T_n$  по данным HP (сплошные линии) и  $T_n$  MSIS по модели MSIS-86 (пунктир)

**Обсуждение результатов.** Нагрев нейтрального газа является одним из эффектов термосферных возмущений, связанных с магнитной бурей. Отметим, что исследования показали увеличение  $T_n$  в возмущенный день на ~250–720 К в диапазоне высот 250–450 км, что согласуется с теорией и дополняет результаты, полученные, например, в [9–11].

Увеличение  $T_n$  во время бури вызывают ряд процессов [12]. Среди них существенны высокоширотные источники нагрева нейтрального газа за счет джоулевой диссипации

энергии высыпающихся частиц и авроральных токов. Джоулев нагрев, который происходит на высотах 100–150 км авроральной атмосферы, приводит к выносу «горячего» газа вверх [13–15], растеканию его в стороны к более холодным областям, где он опускается вниз, и возмущению глобальной термосферной циркуляции. Оно приводит к изменениям нейтрального состава, при которых в высоких и средних широтах относительные концентрации тяжелых частиц ( $N_2$ ,  $O_2$ ) возрастают, а легких (He, O) – уменьшаются.

Глобальные возмущения нейтрального состава, температуры и термосферной циркуляции, вызванные высокоширотным нагревом во время геомагнитных бурь, сопровождаются генерацией внутренних гравитационных волн и более длиннопериодных приливных гармоник с горизонтальными масштабами порядка нескольких тысяч километров и переносятся из высоких широт в средние. Перенос тепла из высоких широт является нелокальным источником нагрева среднеширотной термосферы. С другой стороны, проникновение магнитосферных электрических полей в средние широты и высыпание энергичных частиц из магнитосферы являются источниками ло-

кального нагрева нейтральной атмосферы и выноса газа вверх (механизм аналогичен высокоширотному нагреву). При этом может стать существенным также фрикционный нагрев нейтрального газа за счет ион-нейтрального трения [10]. Последний обусловлен разностью скоростей нейтрального ветра и  $E \times B$ -дрейфа ионов и может привести к увеличению  $T_n$  во время бури на несколько сотен К [10–11].

Совместное действие этих факторов (ветра из высоких широт, усиления электрического поля и эффекта высыпаний в средних широтах), по-видимому, наблюдалось в нашем случае и подтверждалось необычной положительной волной скорости  $w$  [3–4, 9] в главную фазу бури 25 сентября.

Следует отметить, что во время бури зарегистрировано возрастание  $T_n$ , по крайней мере, до высоты 450 км, где  $T_n \approx 1770$  К. Отсюда вытекает, что высота термпаузы, выше которой атмосфера становится изотермичной, возросла от  $\sim 300$  км в спокойный день не менее чем до 450 км во время бури, при этом температура экзосферы увеличилась не менее чем до 1770 К.

### Основные выводы.

1. Проведенные исследования показали, что модель MSIS не всегда отражает адекватно состояние термосферы средних широт европейского региона.
2. Данные, полученные с помощью радара в Харькове, единственной установки некогерентного рассеяния в средних широтах Европы, могут быть использованы для дополнения и развития современных моделей термосферы и околоземного канала связи в условиях геомагнитных возмущений.

Эффекты геокосмической бури 25.09.98 более подробно описаны нами в работах [16, 17].

Список литературы: 1. Таран В. И. // Геомагнетизм и аэронавтика. 2001. Т. 41. № 5. С. 659–666. 2. Taran, V. I., Grigorenko, Ye. I. et al. // Космічна наука і технологія, Space Plasma physics (додаток до журналу). 2001. Т. 7. № 2. С. 42–46. 3. Chernogor, L. F., Grigorenko, Ye. I., Taran, V. I., et al. // Programme Poster Presentations URSI XXVII<sup>th</sup> General Assembly. 2002. GP1a.P.13. P. 65. 4. Григоренко Е. И., Емельянов Л. Я., Таран В. И., Черногор Л. Ф. // Труды XX Всероссийской конференции по распространению радиоволн. Нижний Новгород. 2002. С. 56–57. 5. Salah, J. E., Evans, et al. // Ann. Geophys. 1976. T. 32. Fasc.3. P. 257–266. 6. Shunk, R. W., and Nagy, A. F. // Rev. Geophys. Space Physics. 1978. V. 16. No. 3. P. 355–399. 7. Бэнкс П. М. // ТИИЭР. 1969. Т. 57. № 3. С. 6–30. 8. Salah, J. E., and Evans, J. V. // Space Res. 1973. V. 13. P. 2678–2686. 9. Richards, P. G., Torr, D. G., et al. // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. No. A12. P. 23,359–23,365. 10. Buonsanto, M. J., // J. Geophys. Res. 1995. V. 100. No. A4. P. 5743–5755. 11. Buonsanto, M. J., and Pohlman, L. M. // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. No. A10. P. 23,381–23,392. 12. Бэнкс П.М. // В кн.: Полярная верхняя атмосфера. – М.: Мир, 1983. С. 121–133. 13. Mikhailov, A. V., and Foster, J. C. // J. Geophys. Res. 1997. V. 10. P. 17,275–17,282. 14. Данилов А. Д., Морозова Л. Д. и др. // Геомагнетизм и аэронавтика. 1985. Т. 25. № 5. С. 768–772. 15. Серебряков Б. Е. // Геомагнетизм и аэронавтика. 1982. Т. 22. № 5. С. 776–781. 16. Григоренко Е.И., Лысенко В.Н., Таран В.И., Черногор Л.Ф. // ЗР. Успехи современной радиоселектроники. 2003 (в печати). 17. Григоренко Е.И., Дюбанов Д.А., Лысенко В.Н., Таран В.И., Черногор Л.Ф. // Космічна наука і технологія. 2003 (в печати).

Поступила в редколлегию 08.04.03