

*С.В. ХАРИТОНОВА*, м.н.с., Институт ионосферы, Харьков  
*Л.Ф. ЧЕРНОГОР*, д-р физ.-мат. наук, проф., ХНУ имени В.Н. Каразина

## **ЭФФЕКТЫ СЛАБОЙ ГЕОКОСМИЧЕСКОЙ БУРИ 20 – 21 ЯНВАРЯ 2010 г.**

Наведено результати аналізу варіацій параметрів іоносферної плазми у період вельми помірної магнітної бурі 20 – 21 січня 2010 р. Магнітна буря супроводжувалася іоносферним збуренням з негативною фазою. Спостереження проведені за допомогою радару некогерентного розсіяння в Харкові. Знайдено кількісні показники збурень.

Приведены результаты анализа вариаций параметров ионосферной плазмы в период весьма умеренной магнитной бури 20 – 21 января 2010 г. Магнитная буря сопровождалась ионосферным возмущением с отрицательной фазой. Наблюдения проводились при помощи радару некогерентного рассеяния в Харькове. Найдены количественные показатели возмущений.

Analysis results of variations of ionospheric plasma parameters for the highly moderate magnetic storm on January 20 – 21, 2010 are presented. The magnetic storm was accompanied by ionosphere storm with negative phase. The observations were performed out by the Kharkiv incoherent scatter radar. Numerical indices of perturbations are received.

**Введение.** О воздействии геокосмических бурь (ГБ) на технические, природные и биологические объекты известно давно. То разнообразие глобальных процессов, которые ГБ приносит с собой на нашу планету, делает её интересной и актуальной для научного исследования. Геомагнитные возмущения сопровождаются возмущениями в верхней атмосфере, ионосфере и электрическом поле различного происхождения. В результате ГБ могут возникнуть сбои в работе систем навигации и радиосвязи, средств телекоммуникации, мощных энергосистем и др. Многообразие физических и химических процессов в периоды ГБ и сложность их взаимодействия затрудняют прогнозирование состояния возмущенной ионосферы. По существу, каждая буря является индивидуальной. Классификация бурь проводится по их интенсивности, характеру и величине относительных возмущений параметров среды [3, 4, 6, 7].

Радар в Харькове является единственной установкой некогерентного рассеяния (НР) в среднеширотной Европе и предназначен для измерения параметров ионосферы в различных условиях. Уже на протяжении трех циклов солнечной активности (СА) на этом радаре проводятся наблюдения состояния ионосферной плазмы и космической погоды [2, 3].

Как известно, умеренные ионосферные бури (ИБ) возникают значительно чаще, чем сильные, но остаются менее изученными. Сильные ИБ происходят сравнительно редко (как правило, вблизи периода максимальной

СА и вскоре после него). Их исследованию уделялось и уделяется основное внимание. Эффекты умеренных ИБ остаются малоизученными.

**Целью работы** является изложение результатов наблюдений вариаций параметров динамических процессов в ионосфере в течение весьма умеренной магнитной бури (МБ) 20 – 21 января 2010 г.

**Состояние космической погоды.** МБ 20 – 21 января 2010 г. интересна тем, что она имела место вскоре после продолжительного минимума СА. До 20 января геомагнитное поле Земли было спокойным. Скорость солнечного ветра не превышала 350 км/с, индекс  $K_p$  не превышал 2, а  $D_{st}$  флуктуировал около нуля, оставаясь преимущественно положительным. 20 января, около полудня, концентрация солнечного ветра начинает резко увеличиваться, скорость и температура постепенно повышаются, динамическое давление резко достигает 10 нПа. В это время  $B_z$ -компонента ММП резко поворачивает на юг и достигает максимального отклонения  $-8.3$  нТл в 13:30, а энергии  $\epsilon$ , передаваемая солнечным ветром магнитосфере Земли, достигает 20 ГДж/с. Результатом этих событий стало возникновение весьма умеренной МБ 20 – 21 января около 13:30 с экстремальными значениями индексов  $AE = 680$  нТл,  $K_p = 4$  и  $D_{st} = -38$  нТл. Главная фаза продолжалась до 22:30 20 января, а фаза восстановления наблюдалась до конца периода измерений.

**Экспериментальные результаты.** В данной работе были подробно исследованы вариации основных параметров нейтральной атмосферы  $N, T_e, T_i$ .

На рис. 1 изображены сглаженные временные вариации критической частоты  $f_oF2$  и электронной концентрации  $N_mF2$  в максимуме слоя  $F2$  в течение 20 – 21 января 2010 г. Видно, что с 20 на 21 января над Харьковом наблюдалось отрицательное ионосферное возмущение, во время которого значения концентрации электронов  $N_mF2$  уменьшились примерно на 34 %. При этом, максимальное относительное отклонение критической частоты составило около 17 %. 20 января, когда началась МБ, зафиксировано уменьшение  $N_mF2$  до 30 %. 21 января уже наблюдается восстановление.

В свою очередь, измерения радаром НР в диапазоне высот  $h = 200 - 600$  км, показали, что в ночь с 20 на 21 января на высотах 200 – 250 км (где в это время находился максимум слоя  $F2$ ) уменьшение концентрации электронов составило 32 – 37 %. Однако, выше максимума слоя  $F2$  вариации концентрации были выражены слабее из-за возрастающего влияния процессов диффузии на этих высотах.

Уменьшение концентрации электронов во время отрицательного ионосферного возмущения сопровождалось незначительным нагревом плазмы. На рис. 2 представлены временные вариации температур электронов и ионов. Ночью с 20 на 21 января на высоте 200 км изменение температуры электронов находилось в пределах погрешности. Максимальное увеличение на 200 К составило на высоте 750 км. Видно, что отрицательное ионосферное

возмущение отразилось и на поведении температуры ионов, но ее изменение находилось в пределах погрешности.

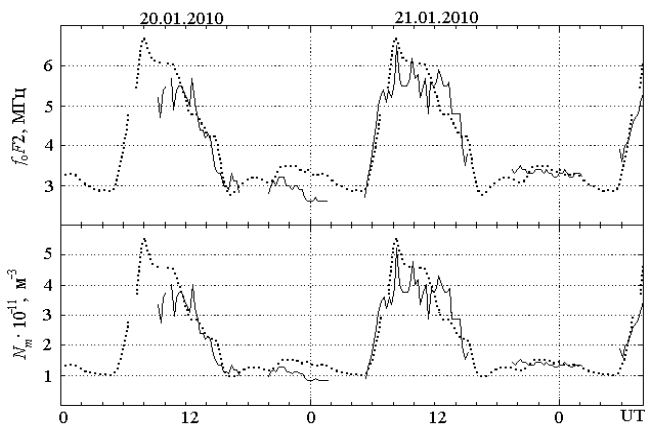


Рис. 1. Вариации критической частоты  $f_oF2$  и концентрации электронов  $N_mF2$  в максимуме слоя  $F2$  в течение 20 – 21 января 2010 г. (линия) и в контрольный день (точки), полученные при усреднении данных за 13 – 14 декабря 2009 г.

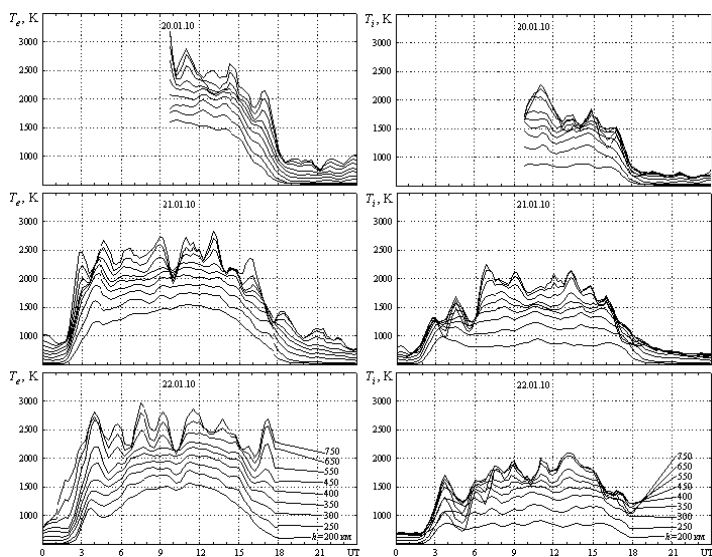


Рис. 2. Сравнение поведения температур электронов  $T_e$  (слева) и ионов  $T_i$  (справа) в период с 20 по 22 января 2010 г. (скользящее усреднение на интервале 75 мин с шагом 15 мин)

**Моделирование процессов.** На основании  $N_e$ ,  $T_e$ ,  $T_i$ , используемых для расчетов, нами проведено моделирование процессов, сопутствовавших МБ.

Уравнение баланса энергии электронов в стационарном случае для диапазона высот 200 – 350 км в системе СИ имеет вид [8]:

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

$$L_{ei} = 8 \cdot 10^{-32} N_e^2 (T_e - T_i) T_e^{-3/2}, \quad L_e = 6.4 \cdot 10^{-37} N_e N(O) (T_e - T_i) T_n^{-1},$$

где  $Q$  – энергия, передаваемая тепловым электронам при кулоновских столкновениях со сверхтепловыми электронами,  $L_{ei}$  – энергия, теряемая при столкновении электронов с ионами,  $L_e$  – энергия, затрачиваемая на возбуждение тонкой структуры атомов кислорода,  $N(O)$  – концентрация этих атомов.

Результаты расчетов энергии  $Q/N_e$ , подводимой к электрону в единицу времени, и составляющих потерь энергии электронного газа в процессе теплообмена с ионами  $L_{ei}/N_e$  и нейтралами  $L_e/N_e$  представлены на рис. 3. При расчетах использовались значения температур электронов  $T_e$  и ионов  $T_i$ , концентрации электронов  $N_e$ , полученные методом НР. Температура нейтралов  $T_n$  и  $N_e N(O)$  были взяты из модели NRLMSISE-00 [9].

Вклад составляющих  $L_{ei}/N_e$  и  $L_e/N_e$  в процесс охлаждения электронного газа был разным для каждого дня. 21 января, когда уже закончилась главная фаза МБ и началась фаза восстановления, вблизи местного полудня наблюдалось небольшое уменьшение (до 1.2 раз)  $L_e/N_e$ . В результате чего подвод энергии к электронному газу  $Q/N_e$  тоже немного уменьшился, что характерно для всего диапазона высот в этот день. Тогда же, в дневное время, на высоте  $h = 250$  км превышение составляющей  $L_e/N_e$  над  $L_{ei}/N_e$  уменьшилось по сравнению с предыдущим и последующим днями. Вообще такое преобладание происходит за счет высокой разности температур  $(T_e - T_i)$  при малых значениях  $N_e$ , что характерно для условий невысокой СА. В это же время на высоте  $h = 300$  км  $L_{ei}/N_e$  стали преобладать над  $L_e/N_e$ , хотя 20 и 22 января вклад этих двух механизмов был практически равен за счет падения с высотой концентрации атомов кислорода  $N(O)$  и увеличения  $L_{ei}/N_e$ . На высоте  $h = 350$  км составляющая  $L_{ei}/N_e$  явно преобладает над составляющей  $L_e/N_e$ , только для 21 января все параметры немного меньше, чем в остальные дни.

Нейтральная атмосфера оказывает влияние на поведение ионосферной плазмы, как в спокойных, так и в возмущенных условиях. Процессы, которые происходят в ионосфере (перенос плазмы, фотоионизация, изменение концентрации электронов  $N_e$ ), зависят и определяются именно составом нейтральной атмосферы. На рис. 4 приведены вариации концентрации основных компонент нейтральной атмосферы: молекулярного азота  $N(N_2)$ , атомарного  $N(O)$  и молекулярного кислорода  $N(O_2)$  и параметра  $p = N(O)/(N(N_2)+N(O_2))$ , который характеризует соотношение процессов образования и потерь ионов  $O^+$  и пропорционален  $N_e$  в области  $F$  ионосферы.

20 января, когда началась ИБ, изменение концентрации  $N(O_2)$ ,  $N(N_2)$  и  $N(O)$  не наблюдалось. Но во время отрицательного возмущения (в минимуме провала) отмечалось падение  $N(N_2)$  и  $N(O_2)$  всего лишь на 13 % и 11 % соответственно. Результатом этих событий стало увеличение параметр  $p$  на 7 % в это же время. Концентрация  $N(O)$  на протяжении этого периода изменилась очень слабо.

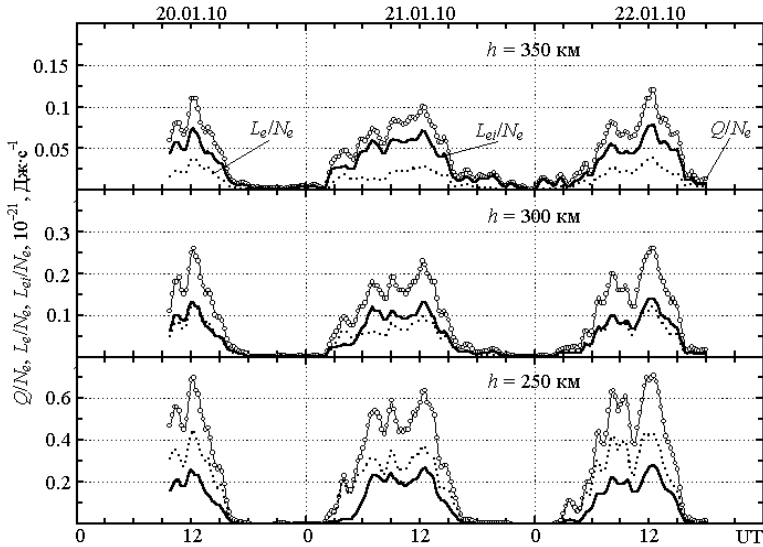


Рис. 3. Временные вариации скоростей нагрева электронного газа  $Q/N_e$  и теплообмена электронов с ионами  $L_{ei}/N_e$  и атомами кислорода  $L_e/N_e$  в период 20 – 22 января 2010 г. (скользящее усреднение на интервале 45 мин с шагом 15 мин)

Нагрев нейтрального газа является одним из эффектов термосферных возмущений, сопровождающий МБ. В процессе исследований было выявлено, что, как и во время отрицательной фазы возмущения, так и после нее, значения дневных и ночных температур нейтралов  $T_n$  оставались практически одинаковыми. Поэтому можно утверждать, что слабое отрицательное возмущение не повлияло на поведение  $T_n$ .

**Обсуждение.** Исследование сильных ГБ показало существование тесной взаимосвязи МБ с явлениями на Солнце, в ближнем космосе, ионосфере и термосфере [1, 2, 5, 8]. Они вызывают существенные возмущения в среднеширотной ионосфере и атмосфере и ряд необычных для средних широт явлений. МБ по категории классификации могут быть одинаковыми, но при этом отличаться друг от друга своей интенсивностью [1, 2, 5, 8].

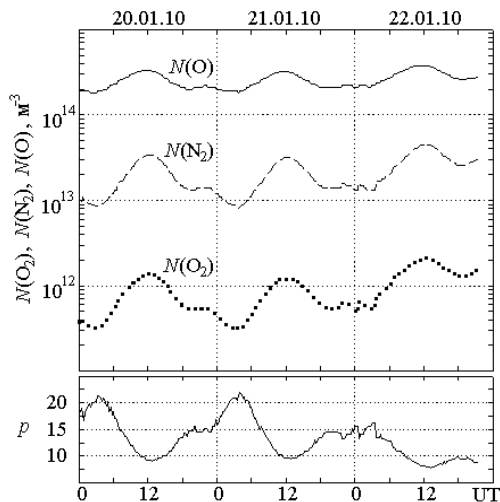


Рис. 4. Временные вариации концентрации основных компонент нейтральной атмосферы и параметра  $p = N(O)/(N(N_2)+N(O_2))$  на высоте 300 км в период 20 – 22 января 2010 г. (из расчета по модели NRLMSISE-00)

Параметры, описывающие космическую погоду в течение весьма умеренной МБ 20 – 21 января 2010 г. и сильнейших ГБ значительно отличаются. Во время весьма умеренной МБ максимальное значение  $K_p$ -индекса достигало 4,  $D_{st}$  отклонилось только до  $-38$  нТл, а  $B_z$  – до  $-8.3$  нТл. Уменьшение концентрации электронов в максимуме области F2 было незначительно (всего лишь в 1.6 – 1.7 раза) по сравнению с сильнейшими бурями (уменьшение в 3 – 7 раз). Изменения  $T_e$  и  $T_i$  были зафиксированы в пределах погрешности, тогда как при сильных МБ оно составляло до 1000 К (и более) и 900 К соответственно, т. е. умеренная МБ повлияла на поведение температур, но эти изменения были не значительны, как при сильных МБ, которые, в свою очередь, вызвали ряд интересных эффектов в ионосфере.

**Выводы.** В ходе работы получены следующие результаты:

1. Обнаружено, что 20 – 21 января 2010 г. над Харьковом наблюдалось слабое отрицательное ионосферное возмущение с максимальным отклонением критической частоты до 17 %.

2. Зарегистрировано уменьшение концентрации электронов  $N_mF2$  до 34 % в период отрицательного возмущения. В начале МБ уменьшение  $N_mF2$  составило около 30 %, а уже 22 января началась фаза восстановления.

3. Изменение температуры электронов  $T_e$  и ионов  $T_i$  находилось в пределах погрешности. Максимальное увеличение  $T_e$  на 200 К обнаружено на высоте 750 км.

4. Установлено, что слабое отрицательное ионосферное возмущение не повлияло на поведение температуры нейтрального газа  $T_n$ .

5. Моделирование показало, что во время слабого отрицательного возмущения концентрации молекулярного азота  $N(N_2)$  и кислорода  $N(O_2)$  немного уменьшились (примерно на 13 % и 11 % соответственно), а параметр  $p$  увеличился приблизительно на 7 %.

6. Расчеты теплового режима ионосферы показали, что днем 21 января на высоте  $h = 300$  км преобладают потери энергии электронов в кулоновских соударениях с ионами над потерями, связанными со столкновениями электронов с нейтралами. 22 января (после бури) вклад двух механизмов охлаждения электронов сравнялся. 21 января скорости нагрева электронного газа и теплообмена электронов с ионами и атомами кислорода уменьшились.

**Список литературы:** 1. Григоренко Е.И., Емельянов Л.Я., Пазюра С.А., Черногор Л.Ф. Ионосферные процессы в течение сильнейшей геокосмической бури 7 – 10 ноября 2004 г. 1. Результаты наблюдений // Космічна наука і технологія. – 2007. – Т. 13, № 4. – С. 62 – 76. 2. Григоренко Е.И., Пазюра С.А., Черногор Л.Ф. Ионосферные процессы в течение сильнейшей геокосмической бури 7 – 10 ноября 2004 г. 2. Результаты расчетов и обсуждений // Космічна наука і технологія. – 2007. – Т. 13, № 4. – С. 77 – 90. 3. Григоренко Е.И., Лысенко В.Н., Таран В.И., Черногор Л.Ф. Анализ и классификация ионосферных бурь в средних широтах Европы. 1 // Космічна наука і технологія. – 2007. – Т. 13, № 5. – С. 58 – 76. 4. Григоренко Е.И., Лысенко В.Н., Таран В.И., Черногор Л.Ф. Анализ и классификация ионосферных бурь в средних широтах Европы. 2 // Космічна наука і технологія. – 2007. – Т. 13, № 5. – С. 77 – 96. 5. Григоренко Е.И., Пазюра С.А., Таран В.И., Черногор Л.Ф. Сильнейшая геокосмическая буря 30 – 31 мая 2003 г.: результаты измерений и моделирования // Космічна наука і технологія. – 2005. – Т. 11, № 3/4. – С. 56 – 67. 6. Черногор Л.Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия. – 2003. – Т. 8, № 1. – С. 59 – 106. 7. Черногор Л.Ф. Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 2 // Нелинейный мир. – 2007. – Т. 5, № 4. – С. 198 – 231. 8. Chernogor L.F., Grigorenko Ye.I., Lazorenko S.V., Taran V.I. Wave Disturbances in the Ionosphere Accompanying the Solar Flare and the Strongest Magnetic Storm of September 25, 1998 // Geomagnetism and Aeronomy. – 2003. – V. 43, № 6. – P. 718 – 735. 9. 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, № 12. – P. 1468 – 1483.

*Поступила в редколлегию 01.07.2011*