

# НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕРМОСФЕРНО-ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ПРИ ПЕРЕХОДЕ ОТ СПОКОЙНЫХ К ВОЗМУЩЕННЫМ УСЛОВИЯМ ПО ДАННЫМ ХАРЬКОВСКОГО РАДАРА НР

Захаров И. Г.<sup>1</sup>, Мозговая О. Л.<sup>2</sup>, Таран В. И.<sup>2</sup>, Тырнов О. Ф.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина, Харьков

<sup>2</sup> Институт ионосферы НАН и МОН Украины, Харьков

С использованием данных некогерентного рассеяния (Институт ионосферы, г. Харьков) исследован отклик ионосферы на магнитные бури разной интенсивности. Установлено, что амплитуда отклика сложным образом связана с интенсивностью бури. Наиболее вероятной причиной подобного поведения ионосферы является состояние термосферы до начала возмущения. Рассмотрена также роль приливных и планетарных волн.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время активно исследуется поведение ионосферы в периоды магнитных бурь (МБ). Исторически основное внимание уделялось процессам, вызывающим отрицательные ионосферные возмущения (ИВ) [1-6], которые приводят к ухудшению условий радиосвязи. Задачи физического моделирования и прогнозирования потребовали более детального анализа всех составляющих возмущения, однако и сейчас основное внимание уделяют эффектам сильных МБ. Важность такого подхода не вызывает сомнений. Вместе с тем значительные отклонения параметров ионосферы от их типичных (медианных) значений возможны не только в периоды сильных МБ, так что концентрация усилий лишь на этом подходе может оставить за пределами внимания процессы, существенные для понимания физики ионосферы и верхней атмосферы. В частности, представляет интерес сравнить отклик ионосферы на МБ разной интенсивности, а также проследить особенности развития возмущения в зависимости от условий в ионосфере до начала МБ. Надежные данные, получаемые одновременно для нескольких ионосферных параметров с использованием радара некогерентного рассеяния (НР), хорошо подходят для решения поставленной задачи.

## 2. МЕТОДЫ И ИНСТРУМЕНТЫ

Для исследования использованы результаты измерений радара НР Института ионосферы (Харьков, Украина). Координаты радара: географические 49.6 N, 36.3 E; геомагнитные 45.4 N, 117.7 E; наклонение геомагнитного поля 66°. Рабочая частота радара 150 МГц, мощность радиопередающего устройства 2 МВт, интервал исследуемых высот — от 200 до 1500 км.

Для исследования были использованы данные об электронной концентрации  $N_e$ , температурах ионов  $T_i$ , электронов  $T_e$  и нейтралов  $T_n$ , а также данные о вертикальной составляющей скорости дрейфа плазмы  $V_d$  [8]. Расчет температуры нейтральной термо-

сферы  $T_n$  проведен в соответствии с методикой [9]. Концентрации нейтральных компонент рассчитаны с привлечением модели нейтральной атмосферы MSIS-86 [10]. Более подробные сведения о радаре и методике обработки регистраций приведены в [7].

Для анализа выбраны периоды, соответствующие переходу от очень спокойных к магнитовозмущенным условиям разной интенсивности. Основное внимание уделено периодам 9–11 и 18–19 февраля 1999 г., во время которых после спокойных условий начались качественно сходные магнитные возмущения (начались вблизи местной полночи), но существенно разной амплитуды ( $K_p \text{ max} = 4_0$  и  $K_p \text{ max} = 7.$ ), а также период 24–27 июня 1997 г.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

*Февраль 1999 г.* В обоих периодах начало МБ с запаздыванием в несколько часов привело к увеличению  $N_e$ , наиболее значительному — выше максимума области F2, что хорошо согласуется с типичными изменениями  $N_e$  после начала МБ [1, 5, 11]. На рис. 1 в качестве примера приведены высотные профили  $N_e$  11 и 19 февраля и суточные вариации  $N_e$  10–11 февраля на высоте  $h = 294$  км, соответствующей максимальному увеличению  $N_e$ . Однако количественные изменения  $N_e$  11 февраля не были типичными: несмотря на слабое магнитное возмущение, максимальные значения  $N_e$  достигли почти таких же значений, как для сильной бури 19 февраля и превышали невозмущенные значения примерно на 50 % в течение всего дня (long duration positive effects), в отдельные моменты — почти в два раза.

Сильные ионосферные эффекты слабой МБ 11 февраля проявились также в наличии значительных волновых возмущений во всех рассмотренных параметрах. Размах колебаний в  $N_e$  достигал  $4 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ , или 40 % от фоновых значений  $N_e$ . Колебания  $T_n$  составили 50–150 К. Колебания вертикальной составляющей скорости дрейфа  $V_d$  усилились до  $\pm 40$  м/с одновременно с усилением магнитной активности. Разность фаз в диапазоне высот 200–600 км составила примерно 0.5 часа с опережением на больших высотах, что соответствует типичной картине акустико-гравитационных волн в возмущенных условиях [12].

Волновая структура имела место и до начала возмущения, хотя и меньшей амплитуды. Так, колебания  $V_d$  днем 10 февраля составили 10–15 м/с и происходили синхронно с изменениями  $N_e$  (при увеличении  $N_e$  скорость дрейфа  $V_d$  направлена вверх); изменений фазы с высотой не было. Ночью в спокойных условиях изменения  $V_d$  были еще значительнее, однако в изменениях  $N_e$  они почти не проявлялись, так как ночью сглаживающее влияние вязкости приводит к однородному смещению области F2 вверх и вниз без заметного изменения высотного профиля  $N_e$  [12].

Переход от спокойных условий к магнитовозмущенным сопровождался заметной перестройкой волновой структуры, имевшей место в спокойные дни, но без ее полного разрушения. Так, 11 февраля амплитуда первой и третьей волн в  $N_e$ , считая от восхода

Солнца, несколько уменьшилась, а амплитуда второй волны — возросла более чем в 2 раза.

Ночные значения  $T_n$ , полученные в наших экспериментах, ниже рассчитанных по модели MSIS примерно на 200 К. Такое различие может быть связано с долготными особенностями термосферы, которые в модели MSIS остались неучтенными из-за недостаточного количества измерений в нашем регионе.

*Июнь 1997.* В течение большей части исследуемого периода и за несколько дней до него магнитное поле было очень спокойным. Небольшое возмущение произошло только днем 27 июня вслед за сменой знака межпланетного магнитного поля. Как и для зимних условий, оно привело к значительному росту  $N_e$  выше максимума области F2.

Несмотря на отсутствие внешних источников возмущения, в ионосфере имели место заметные квазиволновые процессы (см. рис. 2) с преобладающим периодом колебаний  $T \approx 4$  ч. Амплитуда колебаний увеличивалась с ростом высоты, и на высотах вблизи  $h_mF2$  и выше составляла примерно 15–20 %.

Первое квазиволновое увеличение  $N_e$  началось после восхода Солнца. Возмущение на больших высотах началось почти на 2 ч раньше, чем на более низких высотах, что можно связать со значительным изменением времени восхода Солнца с высотой летом. Несовпадение фаз по высоте наблюдается во всем рассматриваемом интервале высот и сохраняется при последующих колебаниях, что видно из рис. 2.

Квазиволновые колебания есть также в изменениях температуры  $T_n$ , хотя по величине они несколько меньше, чем зимой. Видно также (рис. 2), что и здесь ночью экспериментальные значения  $T_n$  заметно ниже рассчитанных по модели MSIS.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЯ

В целом полученные результаты согласуются с известной картиной развития ИВ после начала МБ. Вместе с тем некоторые из установленных особенностей нуждаются в дополнительных пояснениях. Прежде всего, очевидно, что не только сильные МБ могут быть источниками значительных вариаций параметров области F2, или, другими словами, изменения в ионосфере не всегда пропорциональны амплитуде воздействующего фактора. Так как качественная картина возмущения была достаточно типичной, можно считать, что, как и в большинстве случаев, увеличение  $N_e$  после начала МБ было достигнуто преимущественно за счет ветрового смещения области F2 вверх вдоль силовых линий в область меньшей скорости рекомбинации. В дальнейшем влияние аврорального источника приводит к уменьшению, а затем к повороту результирующего ветра на юг и к переходу от положительной к отрицательной фазе ИВ.

Продолжительное сохранение положительной фазы ИВ в нашем случае указывает на то, что до вечерних часов результирующий ветер по-прежнему был направлен на север или по крайней мере был близок к нулю, что препятствовало движению разогретого газа на средние широты. Во всяком случае температура нейтралов в течение всего дня оставалась близкой к значениям, предсказанным по модели MSIS.

Чтобы не произошло поворота термосферного ветра на юг, необходимо допустить, что продолжительное сохранение очень спокойных условий до начала МБ, когда преобладает ультрафиолетовый источник нагрева, способствуют установлению такого динамического режима термосферы, при котором скорость направленного на север ветра больше обычного. По-видимому, такому результату будет способствовать любое усиление вклада УФ–излучения в нагрев среднеширотной термосферы по сравнению с вкладом аврорального источника. В частности, в работе [13] показано, что при более высоком уровне солнечной активности (соответственно, УФ–излучения Солнца), но при одном и том же уровне геомагнитной активности увеличение  $N_e$  в первый день МБ было примерно на 30 % больше, чем при более низком уровне солнечной активности.

Как известно, свойства волновых возмущений в ионосфере определяются в основном свойствами среды и на больших расстояниях слабо зависят от свойств источника [12, 14]. Полученные результаты позволяют допустить, что при длительном сохранении спокойных условий не только волновая (масштабы сотни километров), но и крупномасштабная структура термосферы приходит в относительно устойчивое состояние, которое в значительной мере "диктует" условия отклика на возникшее внешнее воздействие.

По-видимому, даже сильные, но редкие возмущения не способны разрушить такую устойчивую структуру. Примером этому могут быть результаты, представленные на рис. 3. Данные для рисунка взяты из работы [15]. Видно, что характер значительных изменений критической частоты в максимуме области F2  $f_0F2$  остается практически без изменения в течение нескольких недель, несмотря на сильную изолированную МБ 19–20 декабря. Вероятнее всего, эти периодические изменения представляют собой планетарные волны с периодом порядка 7 суток. Напротив, как следует из анализа других периодов, частые МБ, в том числе слабые, препятствуют формированию устойчивых структур в термосфере.

Если наличие волновых возмущений после начала МБ и их свойства (амплитуда, периоды, наклон волнового фронта) в целом соответствуют известным проявлениям акустико-гравитационных волн, то волновые возмущения в спокойных геомагнитных условиях требуют специального рассмотрения.

Обращает на себя внимание тесная связь начала волновых колебаний с восходом Солнца, особенно выраженная летом благодаря значительному изменению времени восхода с высотой, а также их достаточно высокая устойчивость. Указанные свойства позволяют допустить, что наблюдаемые волны представляют собой стоячие приливные термосферные моды высокого порядка  $m = 6$ . Заметное смещение времени начала возмущения по высоте (с опережением на больших высотах) позволяет также допустить, что летом источник волн находится в термосфере, а зимой — в нижележащих слоях атмосферы.

Переход к возмущенным условиям, несмотря на появление аврорального источника энергии, не приводит к автоматическому разрушению сложившейся волновой

структуры. В частности, увеличение  $N_e$  происходит в те же моменты местного времени, что и до начала возмущения, хотя амплитуда соседних пиков может заметно различаться.

Таким образом, на интервалах времени от нескольких часов до нескольких недель изменения параметров области F2 не всегда укладываются в простую схему "внешнее воздействие  $\rightarrow$  ионосферный отклик". По-видимому, определяющим здесь является роль термосферы. Существенным может быть также вклад волновых процессов разных временных и пространственных масштабов.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эффекты магнитных бурь не могут объяснить все наблюдаемые особенности вариаций параметров области F2 на временных интервалах от нескольких часов до многих суток. Эти особенности проявляются в виде значительных и сравнимых по величине возмущений в периоды сильных и слабых МБ (или разных ионосферных эффектов для сходных по интенсивности МБ), в виде значительных планетарных волн, амплитуда которых слабо реагирует на изолированные (в том числе сильные) МБ. Термосферные приливы с модами  $m = 2-6$  могут стать причиной дополнительной изменчивости параметров области F2, в том числе в очень спокойных условиях, а их источник может находиться как в самой термосфере, так и в нижележащих слоях атмосферы.

Основной причиной сложных изменений ионосферных параметров могут быть особенности динамики и инерционных свойств термосферы. В частности, отклик ионосферы на начало МБ в значительной мере зависит от фоновых значений меридиональной составляющей скорости термосферного ветра. Наличие существенных особенностей в поведении ионосферы как в спокойных, так и в возмущенных условиях указывает на условность деления условий в ионосфере на спокойные и возмущенные. Развитие подходов к исследованию, учитывающих данное обстоятельство, позволит более полно исследовать физические процессы в верхней атмосфере.

Отметим также, что наличие систематических различий между модельными и экспериментальными значениями ионосферных параметров (в частности, температуры нейтралов) указывает на возможные долготные особенности термосферы, для изучения которых необходимо активизировать измерения в Украинском регионе.

Авторы (1) благодарят НТЦУ за поддержку, грант № 1772.

1. Buonsanto M. J., et al. Recent Results of the CEDAR Storm Study//*Adv. Space Res.*, vol. **20**, 1997, pp. 1655–1664..
2. Fuller-Rowell T. J., Codrescu M. V. et. al. On the Seasonal Response of the Thermosphere and Ionosphere to Geomagnetic Storms//*J. Geophys. Res.*, vol. **101**, 1996, pp. 2343–2353.
3. Prölss G. W. Storm-induced changes in the thermospheric composition at middle latitudes//*Planet. Space Sci.*, vol. **35**, 1987, pp. 807–811.
4. Schunk R. W., Sojka J. J. Ionosphere-Thermosphere Space Weather Issues//*J. Atmos. Terr. Phys.*, vol. **58**, 1996, pp. 1527–1574.

5. Данилов А. Д, Морозова Л. Ионосферные бури. Морфология, физика, прогноз//Ионосферно-магнитная служба. Л., 1987.
6. Codrescu M. V., Fuller-Rowell T. J., Kutiev I. S. Modeling the F Layer During Specific Geomagnetic Storms//*J. Geophys. Res.*, vol. **102**, 1997, pp. 14315–14329.
7. Таран В. И. Исследования ионосферы с помощью радаров некогерентного рассеяния в Харькове//*Вестник Харьковского государственного политехнического университета*, вып. **31**, 1999, с. 3–9.
8. Пуляев В. А. Обработка и представление данных некогерентного рассеяния//*Вестник Харьковского государственного политехнического университета*, вып. **31**, 1999, с. 84–86.
9. Salah J. E., Evans J. V. et al. Comparison of exospheric temperatures at Millstone Hill and St-Santin//*Ann. Geophys.*, vol. **32**, 1976, pp. 257–266.
10. Hedin A. E. MSIS-86 thermospheric model//*J. Geophys. Res.*, vol. **92**, 1987, pp. 4649–4657.
11. Mendillo M., Klobuchar J. A. Investigations of the Ionospheric F Region Using Multistation Total Electron Content Observations//*J. Geophys. Res.*, vol. **80**, 1975, pp. 643–650.
12. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы.—М.: Наука, 1988, 528 с.
13. Zakharov I. G., Tyrnov O. F. On the Causes of Day-To-Day Variations in the Mid-Latitude Ionospheric F2 Region Electron Density. *XXVIIth General Assembly of the URSI*, Maastricht, the Netherlands, 17–24 Aug. 2002, Commission G, Abstracts GP2 P.1.
14. Госсард Э. Э., Хук У. Х. Волны в атмосфере.—М.: Мир, 1978, 532 с.
15. Космические данные. Бюллетень. 1980.

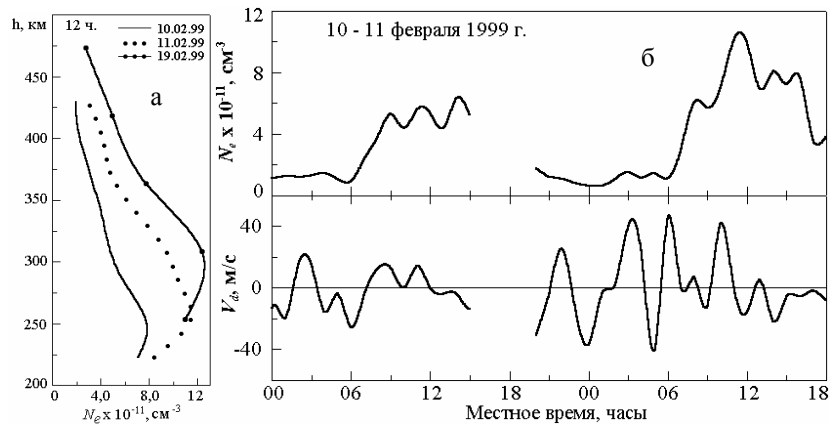


Рис. 1. а) вертикальные профили  $N_e$  в полдень 11 и 19 февраля 1999 г.; б) суточный ход  $N_e$  и  $V_d$  на высоте  $h = 294$  км 10–11 февраля 1999 г.

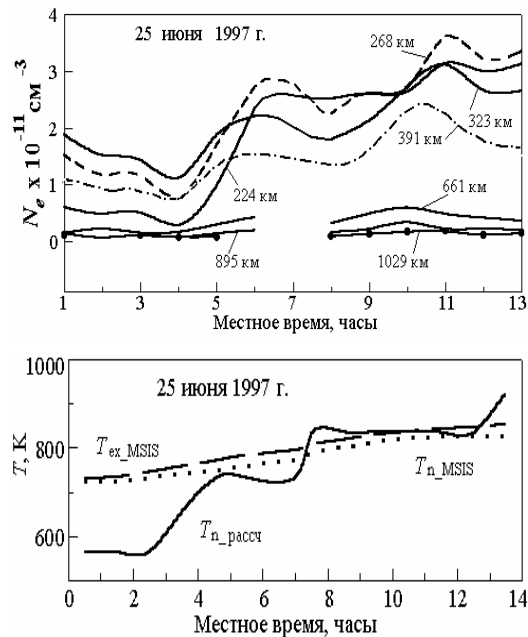


Рис. 2. Суточное поведение  $N_e$  и  $T_n$  25 июня 1997 г.

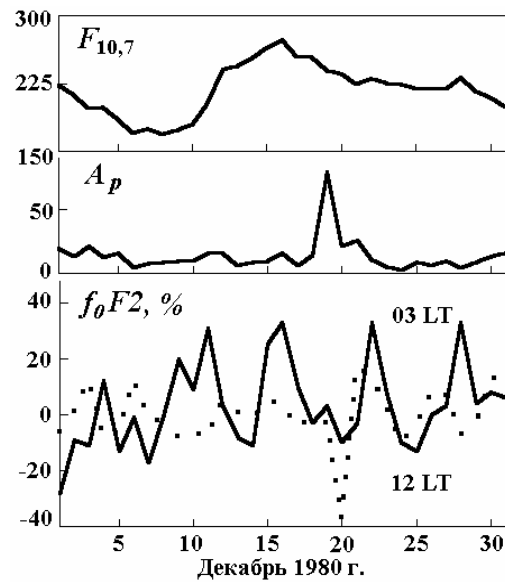


Рис. 3. Пример планетарных волн в ионосфере над ст. Москва