

**И.Г.ЗАХАРОВ**, канд. физ.-мат. наук, ХНУ им. В.Н.Каразина,  
**О.Л.МОЗГОВАЯ**, м. н. с.,  
**В.И.ТАРАН**, докт. физ.-мат. наук, проф., Институт ионосферы (г.Харьков)

## **ПОЛОЖИТЕЛЬНАЯ ФАЗА ИОНОСФЕРНЫХ БУРЬ И ОСОБЕННОСТИ ЕЕ ПРОЯВЛЕНИЯ НА СРЕДНИХ ШИРОТАХ ПО ДАНЫМ РАДАРА НР В ХАРЬКОВЕ**

На основі даних про електронну концентрацію та вертикальну складову дрейфу плазми, отриманих методом некогерентного розсіяння в Інституті іоносфери за 1997-2002 рр., проаналізовані магнітні збурення різної інтенсивності. Визначено вплив стану іоносфери до початку бурі на характер розвитку іоносферного збурення. Показано, що механізми, які викликають бурі, є не тільки збурення вертикалі меридіональної складової швидкості термосферного вітру, але й надходження енергії через денний полярний касп.

Magnetic disturbances different intensity are analyzed by the electron density and vertical plasma drift velocity data that received by incoherent scatter methods at the Institute of ionosphere during 1997-2002. The effects of ionospheric condition before storm commences are development to the evolution character of ionospheric disturbance. It is shown mechanisms inducing are the both the variations of meridional component thermospheric wind velocity and energy ejection through polar casp.

**Методы.** В статье рассмотрены вариации параметров ионосферы во время положительных фаз магнитных бурь (МБ). Основное внимание уделено периодам 24–26 июня 1997 г., 10–11 и 18–19 февраля 1999 г., 7–10 октября 2002 г. Исследования проведены с помощью радара некогерентного рассеяния Института ионосферы (г. Харьков). Радар работает на частоте 150 МГц и позволяет исследовать ионосферу в интервале высот ~100–1500 км. Рассмотрены возможные механизмы положительной фазы ионосферных бурь. Использованы результаты измерений электронной концентрации  $N_e$ , вертикальной составляющей скорости дрейфа плазмы  $V_d$  и данных о геомагнитной активности: индексы  $K_p$  и  $D_{st}$ . Анализ проведен с учетом постоянно присутствующих в ионосфере квазиволновых возмущений, представляющих, скорее всего, высокие моды термосферного прилива [1], проявление которых на средних широтах в настоящее время изучено недостаточно.

**Целью** статьи является выявление возможных механизмов, вызывающих продолжительные положительные возмущения в среднеширотной области F2 ионосферы.

**Обсуждение.** Наибольший интерес представляют вариации ионосферных параметров во время слабой МБ, начавшейся в ночь на 11.02.99. В ионосфере над Харьковом в течение всего освещенного периода 11 февраля наблюдались значительные вариации ионосферных параметров. Например, увеличение электронной концентрации  $N_e$  было наиболее значительным выше максимума области F2. На средних широтах возмущения такой интенсивности и продолжительности более

характерны для периодов сильных МБ. Сильные ионосферные эффекты МБ проявились также наличием значительных вариаций в других рассмотренных параметрах. Размах колебаний в  $N_e$  достигал  $\sim 4 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$  и составлял  $\sim 40\%$  от фоновых значений  $N_e$ . На рис. 1а в качестве примера приведены высотные профили  $N_e$ , а также суточные вариации  $N_e$  и  $V_d$  на высоте  $h=294 \text{ км}$ , соответствующей максимальному увеличению  $N_e$  (рис. 1б).

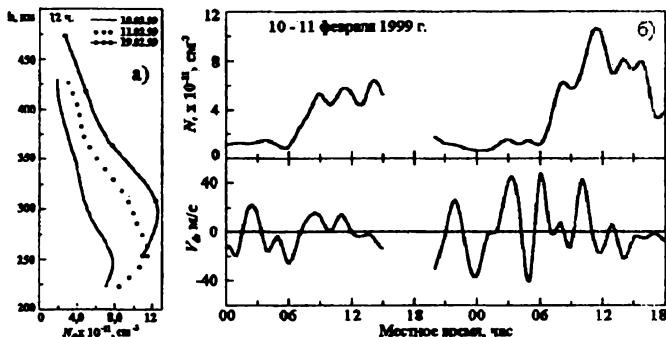


Рис. 1. а) Высотные профили  $N_e$  10-11 и 19 февраля 1999 г.  
б) Суточные вариации  $N_e$  и  $V_d$  10-11 февраля 1999 г.

Колебания вертикальной составляющей дрейфа  $V_d$  увеличились до  $\pm 40 \text{ м/с}$  одновременно с усилением магнитной активности. Разность фаз в диапазоне высот 200–600 км составила  $\sim 0,5$  часа с опережением на больших высотах, что соответствует типичной картине акустико-гравитационных волн в возмущенных условиях [2].

Из рис. 1б видно, что в течение обоих дней (10 и 11 февраля) имеет место волновая структура. При переходе от спокойных условий к магнитовозмущенным произошло ее изменение, но без 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.

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); изменения фазы по высоте отсутствовали. 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  $N_e$  [2].

На рис. 2 приведены высотные профили для 13 LT (сплошная кривая) и 15 ч LT (точки), которые соответствуют третьей волне  $N_e$  и предшествующему ей минимуму, возникших под действием квазиволновых возмущений при отсутствии МБ (из рис. 1б).

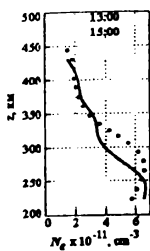


Рис. 2

Видно, что и при отсутствии МБ высотный профиль подвергается заметным и, скорее всего, закономерным изменениям, которые необходимо учитывать при выделении возмущенных вариаций в периоды магнитных бурь.

После исключения влияния квазиволновых возмущений на рассматриваемые параметры путем скользящего усреднения получено, что непосредственно после начала МБ в ночь на 11.02.99 последовало увеличение фонового (усредненного) вертикального

дрейфа вверх. Значения  $V_d$  оставались повышенными на уровне  $\sim 15$  м/с до 9 LT, после чего начали быстро уменьшаться. После 13 LT скорость дрейфа была, в основном, направлена вниз. Полагая, что основным источником дрейфа был нейтральный ветер, получаем, что по сравнению со спокойными условиями начало магнитной бури привело к усилению меридионального ветра на юг.

Электронная концентрация оставалась практически без изменения примерно до 8 часов местного времени, после чего начался рост  $N_e$ , который продолжался вплоть до 14 LT. Уменьшение  $N_e$  происходило медленно, так что и в конце дня значения  $N_e$  были выше, чем в предшествующий день.

Сопоставив изменения  $N_e$  и  $V_d$ , легко заметить, что периоды максимального увеличения дрейфа вверх и увеличения электронной концентрации не совпадают, а максимальные значения  $N_e$  и вовсе приходится на отрицательные значения  $V_d$ . Следовательно, наиболее распространенный механизм положительной фазы ионосферных бурь – увеличение  $N_e$  за счет подъема области F2 в область более низкой скорости рекомбинации – не мог обеспечить продолжительное сохранение положительной фазы.

По не сглаженным значениям  $N_e$  можно выделить три временных интервала увеличения электронной концентрации: 3-9, 9-14 и 14-17 LT. В середине каждого из них  $N_e$  было примерно на 20% выше, чем на краях. Несмотря на то, что амплитуда флуктуаций  $N_e$  сравнима со значениями, наблюдаемыми в спокойных условиях (см. рис. 2), можно допустить, что они связаны с эффектами МБ. На это указывает и привязка начала первого из них к началу МБ и значительное увеличение периода колебаний по сравнению со спокойными условиями (см. рис. 3). Эффекты МБ во время первого интервала являются типичными для влияния на ионосферу атмосферных гравитационных волн (АГВ): прохождение волны сопровождается появлением вертикальной составляющей скорости дрейфа, направленного вверх, и поднятием области F2 вверх без существенного изменения формы профиля. При этом, фронт волны наклонный: разность фаз в диапазоне высот 200–600 км составила  $\sim 0,5$  часа с опережением на больших высотах.

Вариации ионосферных параметров во время второго интервала также указывают на возможное влияние АГВ при наличии другого источника возмущения. На это, в частности, указывает более значительное увеличение  $N_e$  при меньших вариациях дрейфа.

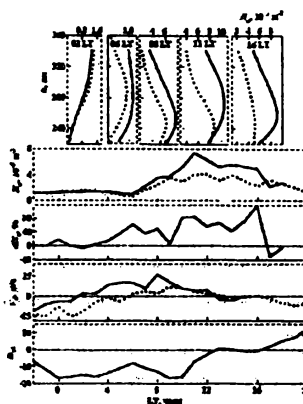


Рис. 3

В качестве вспомогательного механизма может выступать ионизация за счёт выпадания мягких электронов на высоты области F2 через дневной полярный касп [3, 4]. Последнее увеличение  $N_p$  произошло после смены знака фонового дрейфа (вниз). Не исключено, что увеличение  $N_p$  вызвано потоками плазмы из протоносферы. Подобный механизм приводит к появлению вечернего летнего и ночного зимнего максимума [2], однако в данном случае максимальное увеличение пришлось на более ранние часы из-за особенностей динамики термосферы в

возмущенных условиях.

Сопоставление ионосферных возмущений в периоды разных МБ показало, что положение локальных максимумов  $N_p$  приходится примерно на одни и те же моменты местного времени. Так, наиболее значительный рост  $N_p$  отмечен 8 октября 2002 г., как и 11 февраля 1999 г. (см. рис. 3), приходится на ~11–12 LT, несмотря на существенно различный характер развития магнитных возмущений. Данный результат подтверждает сделанный ранее вывод [5] о существенной роли постоянно присутствующих в ионосфере квазиволновых возмущений в развитии ионосферного возмущения в периоды МБ.

**Выводы.** Продолжительное сохранение положительной фазы поддерживается не одним механизмом, а последовательной сменой одного физического механизма другим. На развитие возмущения в периоды МБ влияет также состояние ионосферы до начала бури. Следовательно, детальный анализ отклика ионосферы на магнитные бури с использованием нескольких параметров, определяемых методом некогерентного рассеяния, позволяет выделять доминирующие механизмы, вызывающие продолжительные ионосферные возмущения.

И. Г. Захаров благодарит НТЦУ за поддержку, грант № 1772.

**Список литературы:** 1. Госсард Э.Э., Хук У.Х. Волны в атмосфере. М., 1978. 532 с. 2. Бронелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М., 1988. 528 с. 3. Данилов А.Д., Морозова Л.Д. Ионосферные бури в области F2. Морфология и физика. (Обзор) // Геомагнетизм и аэрономия. 1985. Т. 25. № 5. С. 705–721. 4. Данилов А. Д., Морозова Л. Д. Ионосферные бури. Морфология, физика, прогноз // Ионосферно-магнитная служба. Л., 1987. С.178–215. 5. Захаров И.Г., Мозговая О.Л. О термосферно-ионосферных возмущениях в спокойных и возмущенных условиях // Оптика атмосферы и океана. 2002. Т.15. № 12. С. 1137–1141.

Поступила в редколлегию 08.04.03