

*Е.И. ГРИГОРЕНКО*, зав сектором, *С.А. ПАЗЮРА*, м. н. с.,  
*В.И. ТАРАН*, д-р физ.-мат. наук, Институт ионосферы,  
*Л.Ф. ЧЕРНОГОР*, д-р физ.-мат. наук, ХНУ имени В.Н. Каразина

## **ИОНОСФЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ МАГНИТОСФЕРНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА РАДАРЕ НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ В ХАРЬКОВЕ**

Проведено дослідження ефектів магнітосферних електричних полів за даними іоносферних спостережень радару некогерентного розсіяння в Харкові під час магнітних збурень. Показано, що імпульс електричного поля в іоносфері над Харковом, викликаний нестационарністю магнітосферних електричних полів та їх проникненням до середніх широт, привів до дестабілізації у поведінці області F іоносфери під час надсильної магнітної бурі 30 травня 2003 р. та став причиною аномальної іоносферної бурі 21 березня 2003 р.

Effects of magnetosphere electric fields during geomagnetic storms are studied from the results of ionosphere observations with the Kharkov incoherent scatter radar. It is shown, that electric field pulse in the ionosphere over Kharkov, associated with the non-stationary magnetosphere electric fields and its penetration in the middle latitudes resulted in destabilizing of F region behavior during the severe magnetic storm on May 30, 2003 and caused the anomalous ionosphere storm on March 21, 2003.

**Введение.** Расположение харьковского радара некогерентного рассеяния (НР) позволяет исследовать эффекты, связанные с ионосферно-магнитосферным взаимодействием глубоко во внутренней плазмосфере (геомагнитная широта  $45.7^\circ$ ,  $L \approx 2.0$ ). В спокойных условиях среднеширотная ионосфера почти полностью экранируется электрическим полем поляризации от воздействия магнитосферного электрического поля, генерируемого у магнитопаузы при взаимодействии солнечного ветра (СВ) с геомагнитным полем. Во время магнитных бурь (МБ) возмущенный солнечный ветер сжимает магнитосферу Земли, происходит усиление магнитосферных электрических полей. С ростом геомагнитной активности эффекты этих полей охватывают не только высокие широты, но и средние, а также низкие широты, дестабилизируя поведение ионосферы, технологическую деятельность человека в космосе и на поверхности Земли и воздействуя на его здоровье. Ионосферные эффекты электрических полей разнообразны [1]. Во время бури интенсивные поля передаются вдоль геомагнитных силовых линий в ионосферу высоких широт, где они вызывают нагрев заряженных и нейтральных компонент, это в конечном итоге приводит к перестройке глобальной термосферной циркуляции и состава термосферы, которая может простираться от высоких широт до экватора. Далее, усиление электрического поля в хвосте магнитосферы вызывает смещение к экватору области застоя конвекции и главного ионосферного провала (ГИП), горячей зоны вместе с плазмопаузой и других структур. В средних широтах эти явления наблюдаются редко. На

радаре НР в Харькове они были зарегистрированы, например, во время крайне сильной ( $K_p=9$ ) МБ 25 сентября 1998 г. и сверхсильной ( $K_p=8$ ) МБ 29 – 30 мая 2003 г. Такие события развиваются вблизи полуночи и могут продолжаться в течение нескольких часов. Они вызывают глубокие изменения в поведении ионосферы. Результаты наблюдений процессов, сопутствовавших указанным бурям, подробно описаны нами в [2 – 4].

Более часто в средних и низких широтах наблюдаются эффекты, связанные с быстрыми возмущениями параметров СВ во время солнечных бурь. Они приводят к нестационарным изменениям магнитосферных электрических полей и проникновению их в средние и низкие широты за счет ослабления экранирующего поля поляризации. В средних широтах напряженность электрического поля может возрасти до нескольких десятков милливольт на метр, что достаточно для возникновения значительных эффектов в F2-области. Их изучение важно для прогнозирования возмущенной ионосферы. При этом данные единственного в среднеширотной Европе харьковского радара НР удачно восполняют пробел в глобальных моделях ионосферы, которые построены, в основном, по результатам измерений радаров американского континента. Отсюда возникла актуальность исследования дестабилизирующего воздействия магнитосферных электрических полей на состояние среднеширотной ионосферы над Харьковом.

Целью работы является анализ ионосферных эффектов, связанных с нестационарными изменениями магнитосферных электрических полей с характерным временем, меньшим времени перестройки экранирующего поля поляризации.

**Результаты наблюдений.** Нами проанализированы результаты наблюдений двух геокосмических бурь, происходивших в 2003 г.

*Аномальная ионосферная буря 21 марта 2003 г.* Особенностью данной бури явился ее двухфазный характер. При этом сильнейшая отрицательная фаза бури (с уменьшением концентрации электронов  $N_m$  до 5.3 раз) была отнесена к аномальной, поскольку она протекала на фоне умеренного возмущения геомагнитного поля ( $A_p=29$ ,  $K_p=5$ ). Смена фаз бури произошла 20 марта в заходный период в интервале времени 17.00 – 18.00 (рис. 1). В это время зарегистрировано необычное уменьшение высоты  $z_mF2$  максимума области F2 ионосферы на 50 км в течение 17.00 – 18.00, за которым последовало быстрое увеличение  $z_mF2$  примерно на 200 км (рис. 1,з). Необычное поведение  $z_mF2$  сопровождало переход от положительной к отрицательной фазе бури (рис. 1,в). Скорее всего, причиной резкого перепада высоты  $z_mF2$  и смены фаз бури был импульс электрического поля над Харьковом с зональной компонентой, меняющей направление с запада на восток и имеющей значения  $E \approx -10$  и  $+(15 - 20)$  мВ/м. Импульс, вероятно, связан с проникновением магнитосферного электрического поля в средние широты во время интенсивной суббури ( $AE=1200 - 1500$  нТл) (см. рис. 1,б).

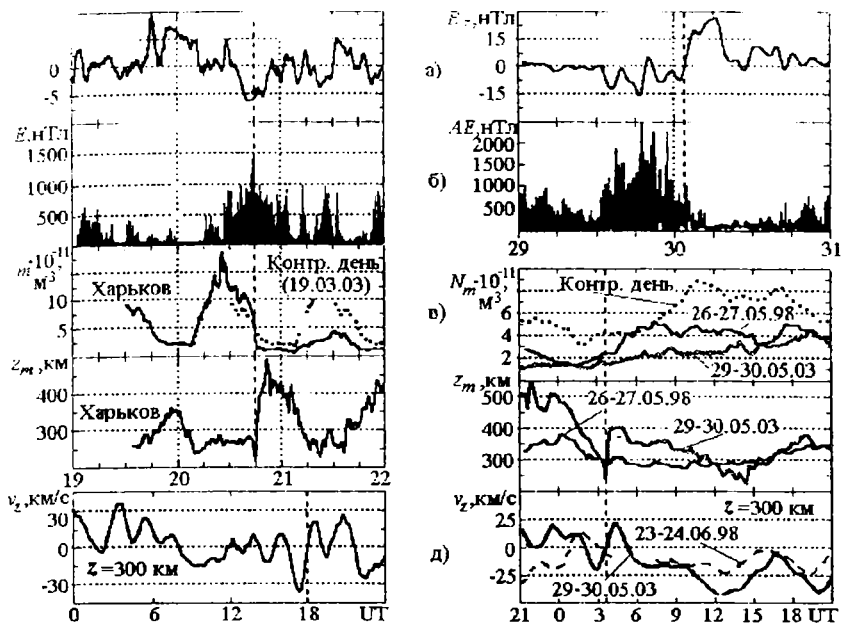


Рис. 1. Временные вариации  $B_z$ -компоненты межпланетного магнитного поля (ММП) (а),  $AE$ -индекса (б), электронной концентрации  $N_m$  в максимуме области F2 (в), высоты максимума  $z_m F2$  (г), вертикальной скорости плазмы  $v_z$  (д) во время МБ 20–21 марта 2003 г. (даты указаны вдоль оси абсцисс, пунктиром отмечено условно время прохождения импульса электрического поля и его отклика в ионосфере)

Рис. 2. То же для МБ 29–30 мая 2003 г.

Исследованы причины, вызвавшие быстрый рост высоты  $z_m F2$  на 200 км вслед за ее снижением в заходный период. Показано, что рост  $z_m F2$  мог быть результатом регулярного обращения меридионального ветра  $v_{\text{мк}}$  к экватору при заходе Солнца (оно дало увеличение  $z_m F2$  на  $\sim 50$  км), дополнительного усиления  $v_{\text{мк}}$  за счет высокоширотного джоулева нагрева термосферы во время МБ (рост еще на 50 км), а также дестабилизирующего воздействия импульса электрического поля в ионосфере над Харьковом (увеличение  $z_m F2$  на  $\sim 100$  км). Модельные расчеты показали, что уменьшение электронной концентрации  $N_m$  в 1.9 раза (рис. 1, в) явилось результатом снижения  $z_m F2$  (рис. 1, г) и увеличения нисходящей скорости плазмы  $v_z$  (рис. 1, д) при смене фаз бури, что положило начало аномальной отрицательной ионосферной бури.

*Сверхсильная ( $A_p=89$ ,  $K_p=8$ ) магнитная буря 29 – 30 мая 2003 г.* Ей предшествовали интенсивные рентгеновские вспышки на Солнце класса X1.3 и X3.6, произошедшие в ночь 27 – 28 мая 2003 г. Буре сопутствовали значительные изменения структуры, динамики и теплового режима ионосферной плазмы. В течение главной фазы МБ, в ночь 29 – 30 мая, были заре-

гистрированы глубокое падение  $\lambda$  (до 4 раз), нагрев плазмы до значений дневных температур (2400 – 3200 К). Уменьшение относительной концентрации ионов водорода во внешней ионосфере более чем на порядок величины. Эти изменения были связаны со смещением ГИП и горячей зоны вместе с плазмопаузой на широту харьковского радара. Наряду с этим обнаружены эффекты проникновения нестационарных магнитосферных электрических полей. Зарегистрировано необычное квазипериодическое возмущение скорости  $v_z$  (рис. 2, д) в восходный период на фоне нарушения утреннего нарастания  $N_m$  (рис. 2, в), резкого перепада  $z_m F2$  вниз – вверх (рис. 2, з) и деформации слоя. Эти события, вероятно, стали результатом наложения эффектов от различных источников в условиях геомагнитных возмущений. Одним из них, по-видимому, было проникновение в средние широты импульса электрического поля с компонентой  $E_y \approx 20$  мВ/м, направленной на восток. Его источником в магнитосфере мог стать наблюдавшийся резкий поворот компоненты  $B_z$  ММП (рис. 2, а) с юга на север и изменение динамического давления СВ.

**Обсуждение результатов и выводы.** Исследованы динамические процессы в ионосфере, связанные с нестационарностью магнитосферных электрических полей и их проникновением в средние широты, во время МБ 21 марта и 30 мая 2003 г. Сравнение результатов показало, что эффекты дестабилизирующего воздействия на ионосферу импульса электрического поля (с зональной компонентой  $|E_y| = 10 - 20$  мВ/м) были идентичны и значительны. К ним относятся уменьшение электронной концентрации  $N_m$  в 1.2 – 1.9 раза, резкий перепад высоты  $z_m F2$  вниз – вверх на 100 – 200 км, квазипериодические возмущения скорости плазмы  $v_z$ , изменяющие направление  $v_z$ . Показано, что дестабилизирующие эффекты электрических полей, вызванные магнитной бурей даже умеренной интенсивности, могут стать причиной аномальной ионосферной бури (21 марта), сопровождаемой значительными изменениями состояния ионосферы. Анализ свидетельствует, что смена фаз и развитие аномальной бури были возможны при определенных геофизических условиях. Такие условия были реализованы в заходный период (при прохождении солнечного терминатора на высотах области F) вблизи равноденствия, когда обращение меридионального ветра к экватору совпадает со временем захода Солнца. Полученные результаты представляют интерес для разработки модели возмущенной ионосферы региона Центральной Европы.

**Список литературы:** 1. Buonsanto M. J. // Space Science Reviews, 1999, v. 88, pp. 563 – 601. 2. Григоренко Е.И., Лысенко В.Н., Таран В.И., Черногор Л.Ф. // Успехи современной радиоэлектроники. 2003, № 9, С. 57 – 94. 3. Григоренко Е.И., Пазюра С.А., Пуляев В.А., Таран В.И., Черногор Л.Ф. // Космічна наука і технологія, 2004, т. 10, № 1. 4. Григоренко Е.И., Лысенко В.Н., Пазюра С.А., Таран В.И., Черногор Л.Ф. // Космічна наука і технологія, 2004, т. 10, № 1.

Поступила в редакцию 30.04.04