

И.Г. Захаров¹, О.Л. Мозговая²

О термосферно-ионосферных возмущениях в спокойных и возмущенных условиях

¹ Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина

² Институт ионосферы НАН и МОН Украины, г. Харьков

Поступила в редакцию 16.09.2002 г.

Основные механизмы ионосферных бурь (ИБ) исследованы достаточно полно. Несмотря на это, количественный прогноз ионосферного возмущения не всегда удовлетворительный. Одна из возможных причин может быть связана с недостаточным учетом фона ионосферы. В частности, с использованием данных об электронной концентрации N_e в максимуме области F2 и полного электронного содержания показано, что амплитуда положительной фазы ИБ для сходных магнитных бурь может отличаться в ~ 1,5 раза. Основной причиной отличия могут быть изменения условий в термосфере, которые не отражаются известными индексами активности. Для дальнейшего исследования параметров ионосферы использованы данные радара некогерентного рассеяния Института ионосферы (г. Харьков, Украина) в интервале высот 200–1000 км в очень спокойные периоды, заканчивающиеся геомагнитным возмущением ($K_p = 4+5$). Установлено наличие устойчивых периодических возмущений электронной концентрации N_e в спокойных условиях во всем интервале высот, которые могут быть отождествлены с приливной модой $m = 6$. Амплитуда волны составляет ~ 15 %, фаза изменяется с высотой. Начало бури приводит к росту амплитуды приблизительно в два раза без изменения фазы. Наличие возмущений в ионосфере даже в очень спокойных условиях может стать дополнительной причиной, усложняющей реакцию ионосферы на магнитную бурю.

Введение

К настоящему времени довольно полно изучены основные особенности поведения ионосферы во время магнитных бурь (МБ) [1–5]. Выявлены основные составляющие возмущений и их наиболее вероятные источники. Теоретические расчеты с использованием современных ионосферных моделей позволяют воспроизвести основные глобальные и крупномасштабные закономерности ионосферных бурь [1, 3], однако особенности конкретных ионосферных бурь в данном регионе часто воспроизводятся неудовлетворительно [6]. Соответственно неудовлетворительным оказывается ионосферный прогноз в возмущенных условиях. В последнее время для решения этих вопросов используют результаты комплексных глобальных измерений, включая измерения состава и дрейфов на спутниках, преимущественно в периоды сильных МБ.

Вместе с тем следует обратить внимание на то, что значительные отклонения ионосферных параметров от их медианных значений возможны и в других условиях. Следовательно, полезным может оказаться подход, при котором более детально анализируются спокойные условия в ионосфере, прежде всего, предшествующие ионосферным бурям. Цель данной статьи – исследование особенностей поведения среднеширотной ионосферы при переходе от очень спокойных к магнитовозмущенным условиям.

1. Методы и инструменты

Для решения поставленной задачи использованы данные радара некогерентного рассеяния (НР) Института ионосферы (Национальной академии наук и Министерства образования и науки Украины). Радар расположен вблизи г. Харькова и имеет следующие координаты [7]:

- географические: 49,6° с.ш., 36,3° в.д.;
- геомагнитные: 45,4° с.ш., 117,7° в.д.;
- наклонение геомагнитного поля 66°.

Радар НР имеет крупнейшую в мире зенитную двухзеркальную параболическую антенну диаметром 100 м и предназначен для исследования ионосферы в высотном интервале 200 – 1500 км. Рабочая частота радара 150 МГц. Импульсная мощность радиопередающего устройства около 2 МВт. Длительность импульса может меняться в широких пределах – примерно от 40 мкс до 1 мс. Шумовая температура системы около 300 К.

Параметры радиолокатора выбраны из условия получения максимального количества характеристик ионосферы в возможно более широком интервале высот. Для решения некоторых задач, возникающих при исследовании ионосферы, используется несколько режимов работы комплекса. Эти режимы отличаются друг от друга параметрами зондирующего импульса (длительностью, частотой повторения

и временной расстановкой импульсов относительно друг друга).

Из показателей, определяемых радаром, для данного исследования использованы электронная концентрация N_e , температуры ионов T_i и электронов T_e , скорость вертикального дрейфа плазмы V_d . Эти параметры определялись с шагом 10 км [8].

Анализировались два периода – с 24 по 27 июня 1997 г. и с 9 по 11 февраля 1999 г. Начало обоих периодов приходится на очень спокойные условия, которые характеризуются низким уровнем геомагнитной активности как в рассматриваемые, так и в предшествующие дни, отсутствием всплесков на Солнце и пересечений границ межпланетного магнитного поля. В конце каждого периода имели место слабые МБ: 27 июня 1997 г. геомагнитный индекс $K_p \max = 5-$, 11 февраля 1999 г. $K_p \max = 4\pm$. Более детальные сведения об анализируемых периодах представлены в таблице.

Геофизические условия во время наблюдений

Показатели		1-й период (июнь 1997 г.)				2-й период (февраль 1999 г.)			
		24	25	26	27	9	10	11	
Уровень солнечной и геомагнитной активности	W	9	19	15	12	41	60	78	
	$F_{10.7}$	72	74	74	74	126	148	159	
	A_p	4	7	4	17	3	6	20	
	ΣK_p	7+	15 ₀	8+	22+	6 ₀	11+	27+	
Местное время восхода и захода	Восход	ПН	3:47	3:47	3:48	3:49	7:17	7:15	7:13
		МСТ	6:01	6:01	6:02	6:03	4:33	4:35	4:37
	Заход	ПН	20:10	20:10	20:11	20:12	17:04	17:06	17:08
		МСТ	16:00	16:00	16:01	16:02	18:06	18:04	18:02

Примечание. ПН – пункт наблюдения; МСТ – магнитосопреженная точка.

2. Результаты и обсуждения

Несмотря на отсутствие внешних источников возмущения, изменения всех показателей в течение обоих спокойных периодов во всем рассматриваемом высотном диапазоне свидетельствуют о наличии в ионосфере заметных квазиволновых процессов. Преобладающий период колебаний T около 4 ч летом и 2 – 4 ч зимой. Амплитуда их увеличивается с высотой. Амплитуда в терминах N_e на высотах больше или порядка 400 км составляет 15–20%, а в отдельных волнах до 40%. На больших высотах относительная амплитуда остается без заметных изменений, но абсолютные значения амплитуды уменьшаются. Как летом, так и зимой первое квазиволновое увеличение N_e начинается после восхода Солнца. Так как летом имеет место значительное изменение времени восхода Солнца с высотой, возмущение на больших высотах начинается почти на 2 ч раньше, чем на более низких высотах; несовпадение фаз по высоте сохраняется и при последующих колебаниях (рис. 1). Зимой изменение времени восхода Солнца в диапазоне рассматриваемых высот невелико, соответственно колебания N_e на всех высотах почти синфазны. В соседние спокойные дни структура волнового поля сохраняется почти без изменений.

Колебания скорости вертикального дрейфа V_d днем составляют 10 – 15 м/с и происходят синхронно

с изменениями N_e (при увеличении N_e дрейф направлен вверх). Ночью изменения V_d могут быть даже больше (до ± 40 м/с), однако в изменениях N_e это почти не проявляется, так как ночью сглаживающее влияние вязкости приводит к однородному смещению области $F2$ вверх и вниз без заметного изменения высотного профиля N_e . Изменения температуры T_e менее заметны (летом) или менее регулярны (зимой).

Тесная связь начала возмущения с восходом Солнца, причем с выраженными высотными особенностями, а также устойчивость волнового поля 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 источник волн летом находится в термосфере. Зимой нельзя исключить наличие источника и в нижележащих слоях атмосферы.

Обычно при проведении теоретических расчетов и при анализе данных наблюдений обращают внимание только на моды не выше второго порядка [9–11]. Если первое можно связать со сложностью аналитического описания мод высокого порядка, то второе, вероятно, можно связать с недостаточным вниманием к состоянию ионосферы в очень спокойные периоды.

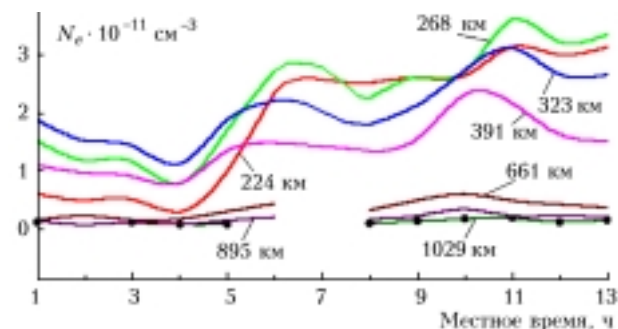


Рис. 1. Приливные волны в N_e на различных высотах в очень спокойных условиях (25 июня 1997 г.)

Очевидно, что при наличии даже небольших дополнительных источников возмущения, например связанных с суббурями, решение вопроса о природе подобных колебаний может значительно усложниться. Определенную роль играет также то, что наиболее очевидной волновой структурой становится на высотах выше максимума области $F2$. Исследование волновой

структуры с помощью наземных станций вертикального зондирования затруднено.

Переход к возмущенным условиям сопровождается заметной перестройкой волновой структуры, имевшей место в спокойных условиях. Однако полного разрушения ее не происходит. Так, 11 февраля амплитуда 1-й и 3-й волн в N_e , считая от восхода Солнца, несколько уменьшилась, тогда как амплитуда 2-й волны возросла более чем в два раза. Можно допустить (для более уверенных предположений необходимы более длительные периоды наблюдений), что с переходом к возмущенным условиям происходит перестройка волнового поля возмущения с преобладанием более низких приливных мод. По-видимому, в возмущенных условиях преобладает вторая мода термосферного прилива $m = 2$.

Наибольшее увеличение N_e произошло на высотах выше максимума области $F2$, что хорошо согласуется с типичными особенностями изменения электронной концентрации после начала МБ. В то же время количественные изменения N_e нельзя назвать типичными. На рис. 2, *a* приведены суточные вариации N_e 10 и 11 февраля на высоте $h = 294$ км, соответствующей максимальному увеличению N_e . Обращает на себя внимание продолжительное сохранение высоких значений N_e . Значения N_e превышали возмущенные значения практически в течение всего освещенного периода примерно на 50%, максимальное увеличение – почти в два раза. Такой значительный рост N_e редко наблюдается даже в периоды сильных МБ и потому заслуживает более детального анализа.

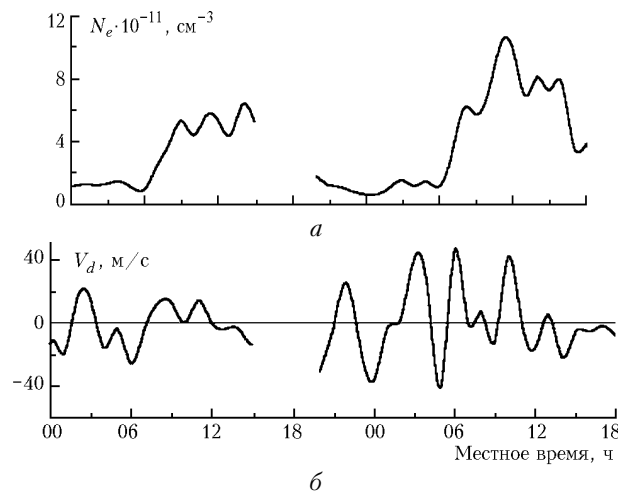


Рис. 2. Суточный ход N_e и V_d на высоте $h = 294$ км при переходе от очень спокойных к возмущенным условиям (10 – 11 февраля 1999 г.)

Как известно, положительная фаза ионосферных бурь формируется за счет меридиональной составляющей скорости нейтрального ветра в южном направлении, вызванного джоулевым нагревом авроральной атмосферы при диссипации высокоширотных электрических токов [1–5, 9]. Посредством механизма ветрового увлечения происходит передача импульса от движущихся горизонтально нейтральных частиц

к ионам, что приводит к смещению последних вверх вдоль силовых линий магнитного поля. Днем вынос плазмы вверх сопровождается заметной деформацией высотного профиля и с заметным увеличением N_e на больших высотах. Поддержанию N_e способствует также уменьшение скорости потерь с высотой. Последующее обогащение высокоширотной и среднеширотной термосферы более тяжелыми компонентами, прежде всего N_2 и O_2 , ведет к уменьшению N_e пропорционально уменьшению отношения $[O]/([N_2]+[O_2])$. В результате положительная фаза ионосферной бури через несколько часов после начала МБ сменяется отрицательной.

Положительная фаза ионосферного возмущения наиболее выражена над Северной Америкой (см., например, [12]). Это, по-видимому, связано с максимальным смещением на юг аврорального овала из-за несовпадения магнитного и географического полюсов. Известно также, что положительная фаза чаще регистрируется в том случае, когда начало МБ приходится на дневные часы [12]. Если же МБ начинается ночью, то, как правило, положительная фаза отсутствует и ионосферная буря начинается с отрицательной фазы.

В последние годы продолжительно существующую положительную фазу ионосферных бурь стали выделять в самостоятельное явление. Обсуждаются два основных ее механизма: изменения нейтрального состава [2, 13], при этом некоторые авторы основным в изменении отношения $[O]/[N_2]$ считают изменения концентрации атомарного кислорода [14], и эффекты термосферных ветров, аналогичные тем, что вызывают появление положительной фазы в вечерние часы, но более крупномасштабные [3].

В нашем случае начало МБ приходится на предполуденные часы 10 февраля. Главная фаза МБ началась после полуночи. Таким образом, следовало бы ожидать не увеличения, а уменьшения N_e . Чтобы объяснить значительное отклонение в поведении N_e от ожидаемого, необходимо учесть, что типы ионосферного отклика исследовались для достаточно сильных МБ. Так, в [12] для анализа отбирались МБ с $A_p > 30$. Кроме этого, в нашем случае МБ началась после продолжительного периода очень спокойных условий в магнитном поле Земли. При отсутствии аврорального источника нагрева система термосферных ветров формируется за счет нагрева солнечным излучением, что способствует усилению скорости направленного на север термосферного ветра в дневные часы.

Так, рассматриваемая магнитная буря была слабой, авроральный источник нагрева мог только уменьшить фоновый ветер, не изменяя его направления. Уменьшения фонового ветра оказались достаточными для того, чтобы область $F2$ поднялась вверх, что обеспечило начало положительной фазы. В то же время для эффективной диффузии тяжелых частиц на средние широты необходима смена направления ветра. Так как для рассмотренной МБ такой поворот в дневные часы маловероятен (согласно

расчетам [15], при $K_p = 4_0$ результирующая скорость ветра в дневные часы еще направлена на север), не наблюдалось смены положительной фазы ионосферной бури на отрицательную.

Определенный вклад в увеличение амплитуды положительной фазы предшествующие очень спокойные условия могли внести также путем более выраженной стратификации основных ионосферных составляющих по высоте, так что эффект смещения области F2 вверх после начала МБ мог оказаться более выраженным. Возможно также, что зимняя ионосфера в спокойных условиях более насыщена атомами кислорода (за счет трансэкваториального переноса из легкого полушария в зимнее), так как при отсутствии аврорального нагрева, который проявляется одновременно в обоих полушариях, градиент температуры между полушариями должен усиливаться.

Таким образом, особенности состояния ионосферы и термосферы до начала возмущения могут заметно повлиять на развитие ионосферного возмущения. В частности, могут внести значительный вклад в формирование условий, благоприятных для продолжительной положительной фазы. Создание таких условий может привести даже в периоды слабых и умеренных МБ к значительным ионосферным возмущениям, сравнимым по амплитуде с эффектами очень сильных МБ.

Фоновые термосферные ветра и устойчивая волновая структура, которая сформировалась в спокойных условиях, могли оказать определенное воздействие на характер развития ионосферного возмущения.

К заметным эффектам начавшейся МБ следует также отнести значительное усиление флуктуаций скорости вертикального дрейфа V_d . На рис. 2,б приведены изменения V_d на той же высоте, что и N_e . Но максимальным эффект усиления V_d был на высотах ниже максимума области F2. Здесь начало МБ сопровождалось усилением флуктуаций до ± 60 м/с, т.е. по крайней мере, в полтора раза по сравнению с амплитудой флуктуаций в предшествующую ночь. Начало главной фазы МБ привело еще к некоторому их усилению. Разность фаз V_d в интервале высот 223–341 км составила $\sim 0,5$ ч с опережением на больших высотах, период колебаний ~ 2 ч.

Таким образом, эти колебания можно считать проявлением акустико-гравитационных волн, генерируемых авроральным источником [1, 2, 9]. Существенным представляется их выраженный характер, несмотря на слабую МБ, а также быстрое начало – еще до начала главной фазы, во время которой и происходит выделение основной части энергии. Учитывая буревые условия, необходимо определить особенности вариаций амплитуды вертикальной составляющей скорости дрейфа плазмы V_d .

Заключение

Проведенный анализ условий в ионосфере, характеризующихся переходом от очень спокойных

к возмущенным условиям, позволяет констатировать, что при определенных условиях даже слабые и умеренные МБ могут привести к таким изменениям в ионосфере, которые обычно регистрируются в периоды сильных возмущений. Одним из таких условий могут быть продолжительные периоды очень спокойных дней, формирующих, по-видимому, особенности системы термосферных ветров, включая трансэкваториальный перенос, а также устойчивую квазиволновую структуру с приливными модами высоких порядков. Соответственно, подход, при котором анализируются условия и особенности перехода от спокойных к возмущенным условиям, может оказаться плодотворным не только с точки зрения исследования ионосферных возмущений (при таком подходе многие возмущения проявляются как бы в «чистом виде» и не искажены взаимным наложением нескольких возмущений), но и с точки зрения поиска причин значительных вариаций ионосферных параметров, многие из которых остаются вне поля зрения исследователей из-за предпочтительного анализа узкого класса событий.

И.Г. Захаров благодарит Научно-технологический центр Украины за поддержку (контракт № 1772).

1. *Buonsanto M.J.* Ionospheric Storms – A Review // *Space Sci. Review.* 1999. V. 88. P. 563–601.
2. *Fuller-Rowell T.J., Codrescu M.V., Rishbeth H., Moffett R.J., and Quegan S.* On the Seasonal Response of the Thermosphere and Ionosphere to Geomagnetic Storms // *J. Geophys. Res. A.* 1996. V. 101. P. 2343–2353.
3. *Pröls G.W.* Storm-induced changes in the thermospheric composition at middle latitudes // *Planet. Space Sci.* 1987. V. 35. P. 807–811.
4. *Schunk R.W. and Sojka J.J.* Ionosphere-Thermosphere Space Weather Issues // *J. Atmos. and Terr. Phys.* 1996. V. 58. P. 1527–1574.
5. *Данилов А.Д., Морозова Л.Д.* Ионосферные бури. Морфология, физика, прогноз // *Ионосферно-магнитная служба.* Л.: Гидрометеоздат, 1987. С. 178–215.
6. *Codrescu M.V., Fuller-Rowell T.J., and Kutiev I.S.* Modeling the F Layer During Specific Geomagnetic Storms // *J. Geophys. Res. A.* 1997. V. 102. P. 14315–14329.
7. *Таран В.И.* Исследования ионосферы с помощью радаров некогерентного рассеяния в Харькове // *Вестн. Харьков. гос. политехн. ун-та.* 1999. Вып. 31. С. 3–9.
8. *Пуляев В.А.* Обработка и представление данных некогерентного рассеяния // *Вестн. Харьков. гос. политехн. ун-та.* 1999. Вып. 31. С. 84–86.
9. *Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А.* Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 528 с.
10. *Forbes J.M.* Atmospheric tides. 1. Model description and results for the solar diurnal component. 2. The solar and lunar semidiurnal components // *J. Geophys. Res. A.* 1982. V. 87. N 7. P. 5222–5252.
11. *Forbes J.M., Garrett H.B.* Solar diurnal tide in the thermosphere // *J. Atmos. Sci.* 1976. V. 33. N 11. P. 2226–2241.
12. *Mendillo M. and Klobuchar J.A.* Investigations of the Ionospheric F Region Using Multistation Total Electron Content Observations // *J. Geophys. Res. A.* 1975. V. 80. P. 643–650.

13. *Rishbeth H.* F-region Storms and Thermospheric Circulation // Electromagnetic Coupling in the Polar Clefts and Caps / Ed. by P.E. Sandholt and A. Egeland. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands. 1989. P. 393–406.
14. *Mikhailov A.V., Skoblin M.G., and Förster M.* Daytime F2-layer Positive Storm Effect at Middle and Lower Latitudes // Ann. Geophys. 1995. V. 13. P. 532–540.
15. *Намгаладзе А.А., Захаров Л.П.* Влияние возмущений состава нейтральной термосферы и термосферных ветров на F-область ионосферы // Исследование ионосферной динамики. М.: ИЗМИР АН СССР, 1979. С. 85–95.

I.G. Zakharov, O.L. Mozgovaya. **On thermospheric-ionospheric perturbations under quiet and distorted conditions.**

The main mechanisms of ionospheric storms are studied rather thoroughly, but ionospheric disturbances often are not satisfactorily predicted, maybe because of insufficient allowance for ionospheric background. In particular, using the data on the electron concentration N_e in the maximum of the F2 region and the total electron content, it was shown that the amplitude of the positive phase for similar atmospheric storms may differ about 1.5 times. Such a difference may be caused by changes of thermospheric conditions that are not reflected by known indices of activity. For further investigation of ionospheric parameters, we used the data of incoherent scattering radar of the Institute of Ionosphere (Kharkiv, Ukraine) for the altitude range from 200 to 1000 km in very quiet periods ending by geomagnetic distortion ($K_p = 4-5$). Stable periodic perturbations of the electron concentration N_e were found in the entire altitude range. These perturbations can be associated with the tidal mode $m = 6$. The wave amplitude is $\sim 15\%$, and the phase varies with altitude. Beginning of a storm leads to amplitude doubling with the phase unchanged. The presence of perturbations in the ionosphere under very quiet conditions may be an extra cause complicating the ionospheric reaction to a magnetic storm.