

УДК 550.388

И. Г. Захаров¹, М. В. Ляшенко², О. Ф. Тырнов¹

¹Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна

²Інститут іоносфери Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України, Харків

Вариации ионосферных параметров в возмущенных условиях, зарегистрированные на Харьковском радаре НР

Досліджено варіації електронної концентрації N та інших параметрів середньоширотної іоносфери під дією приливних і планетарних хвиль. Для аналізу використано дані єдиного в Європі середньоширотного радара некогерентного розсіяння (м. Харків) і дані мережі іонозондів. Показано, що у періоди магнітних бур вклад приливних хвиль у варіації N залишається високим, незважаючи на підсилення впливу на середньоширотну іоносферу авроральних джерел. Планетарні хвилі при певних умовах здатні забезпечити значні (понад 40 %) і тривалі варіації N (не менше ніж місяць) з періодом біля 7 діб і формують стійкі утворення просторового розподілу N .

ВВЕДЕНИЕ

Волны различной природы присутствуют в ионосфере практически постоянно. Наиболее полно изучено влияние на ионосферу акустико-гравитационных волн (АГВ), генерируемых авроральными источниками в периоды магнитных бурь (МБ). В последнее время много внимания уделяют изучению приливов в термосфере и ионосфере Земли [8—10], в основном с периодами колебаний 8, 12 и 24 ч. Большая часть исследований приливов выполнена на высоких широтах.

В наших исследованиях, проведенных для выделенных геомагнитных условий с использованием данных о среднеширотной ионосфере, также выявлены устойчивые волновые структуры [4, 5]. Отмечается значительная роль приливных мод высоких порядков ($m = 4...6$). Показано, что при переходе от спокойных к возмущенным условиям волновая структура не разрушается, а модифицируется. В данной работе рассмотрены свойства и природа волновых структур в среднеширотной ионосфере для произвольных геомагнитных условий.

Для решения поставленной задачи использованы данные Харьковского радара некогерентного рассеяния (НР) Института ионосферы НАН и МОН Украины за 1996—2003 гг. [7]. Радар позволяет с высокой точностью получать электронную концен-

трацию N , электронную T_e и ионную T_i температуры, вертикальную составляющую скорости дрейфа плазмы V_d и другие ионосферные параметры. Проведен анализ 16 магнитовозмущенных периодов. Для анализа пространственной структуры планетарных и приливных волн использованы данные о критической частоте f_oF2 области F2 мировой сети ионозондов на средних широтах и данные о полном содержании N_0 электронов ионосферы, полученные на радиофизической обсерватории Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина по регистрациям сигналов спутниковых радиомаяков. Как известно, оба параметра являются удобной характеристикой электронной концентрации в области F2.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Анализ данных НР показал, что волновая структура на высотах области F2 может сохраняться даже в сложных геофизических условиях, в частности при следующих друг за другом МБ. Для примера на рис. 1 сопоставлены суточные вариации N в положительную фазу двух ионосферных бурь при существенно различающейся геомагнитной обстановке. В первом случае (а) слабая МБ (максимальные

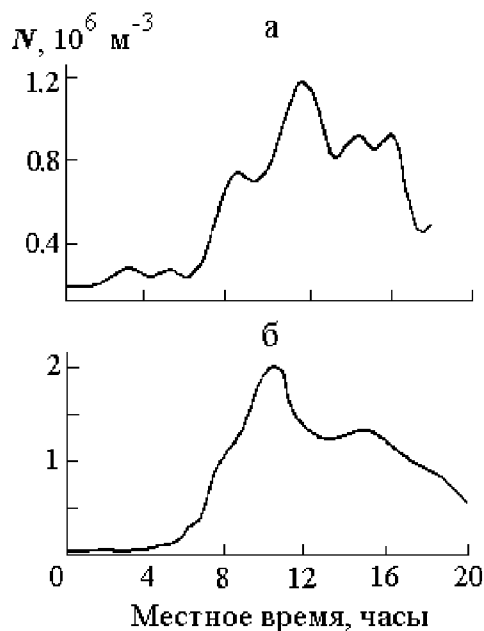


Рис. 1. Суточные вариации электронной концентрации N в положительную фазу двух ионосферных бурь при существенно различающейся геомагнитной обстановке: *a* — 11.02.1999 г.; слабая магнитная буря после спокойного периода; *б* — 8.10.2002 г.; следующие друг за другом сильные магнитные бури

значения $K_{\text{pmax}} = 4$) началась в ночь с 10 на 11 февраля 1999 г. после продолжительного спокойного периода. Во втором случае (*б*) начиная с 30 сентября имели место несколько следующих друг за другом активных периодов с K_{pmax} до 7+; в рассматриваемый день (8 октября 2002 г.) $K_{\text{pmax}} = 6$. Несмотря на это, волновые структуры в обоих случаях подобны, за исключением некоторого смещения фазы по местному времени. Анализ всех рассмотренных периодов позволяет указать следующие свойства волновых структур в среднеширотной ионосфере. В спокойных условиях колебания N примерно равны по амплитуде. При переходе к возмущенным условиям (положительная фаза ионосферной бури) амплитуда второй (от восхода Солнца) волны значительно увеличивается (в 1.5—2 раза, более существенное увеличение имеет место после спокойных условий), первой и третьей — не изменяются или несколько уменьшаются. Разрушение волновой структуры происходит только в отрицательную фазу ионосферной бури.

Судя по ряду особенностей (отсутствие связи с интенсивностью МБ, связь со временем восхода и зависимость от условий до начала МБ, а также разрушение в отрицательную фазу, когда влияние процессов в авроральной области на среднеширот-

ную ионосферу максимально), даже в периоды сильных магнитных возмущений роль волн, постоянно присутствующих в атмосфере, остается существенной, а их модификация может выступать в качестве одного из механизмов ионосферных возмущений. Для проверки этого предположения рассмотрим более детально развитие ионосферной бури 11 февраля 1999 г. с использованием, кроме электронной концентрации, данных о скорости вертикального дрейфа V_d .

По изменениям N можно выделить три возмущенных периода: 3—9, 9—14 и 14—17 LT; в середине каждого интервала значение N примерно на 20 % выше, чем на краях. Эффекты МБ во время первого интервала (3—9 LT) характерны для влияния на ионосферу АГВ с источником в авроральной зоне. Прохождение волны сопровождается увеличением вертикальной составляющей скорости дрейфа V_d (вверх) и поднятием области F2 без существенного изменения формы высотного профиля. Фронт волны наклонный, разность фаз в высотном интервале 100—600 км составляет около 30 мин с опережением на больших высотах.

Для второго интервала (9—14 LT) роль АГВ аврорального происхождения также нельзя исключить, но при наличии другого источника возмущения. На это указывает более значительный рост N при меньших вариациях V_d . Дополнительным источником в этом случае может выступать выпадение мягких частиц непосредственно на высоты области F2 ионосферы через дневной полярный касп [3]. Однако и этот механизм в конечном счете должен приводить к усилению направленного на юг ветра, тогда как по данным НР в этот период продолжалось его уменьшение. Учитывая значительное усиление второй волны термосферного прилива при переходе к возмущенным условиям, можно допустить, что подобная модификация волновой структуры является одним из механизмов формирования положительной фазы ионосферной бури в дневное время. Не исключено, что рост амплитуды приливной волны осуществляется за счет передачи энергии от АГВ аврорального происхождения.

Третий период увеличения N (14—17 LT) происходит на фоне смены направления V_d (вниз). Такое поведение дрейфа не исключает наличие потоков плазмы из протоносферы, способных привести к временному увеличению N . Как известно, этот механизм приводит к появлению вечернего летнего и ночного зимнего максимума [1]. В данном случае увеличение N пришлось на более ранние часы из-за особенностей динамики термосферы в возмущенных условиях.

Значительные отклонения N от медианных зна-

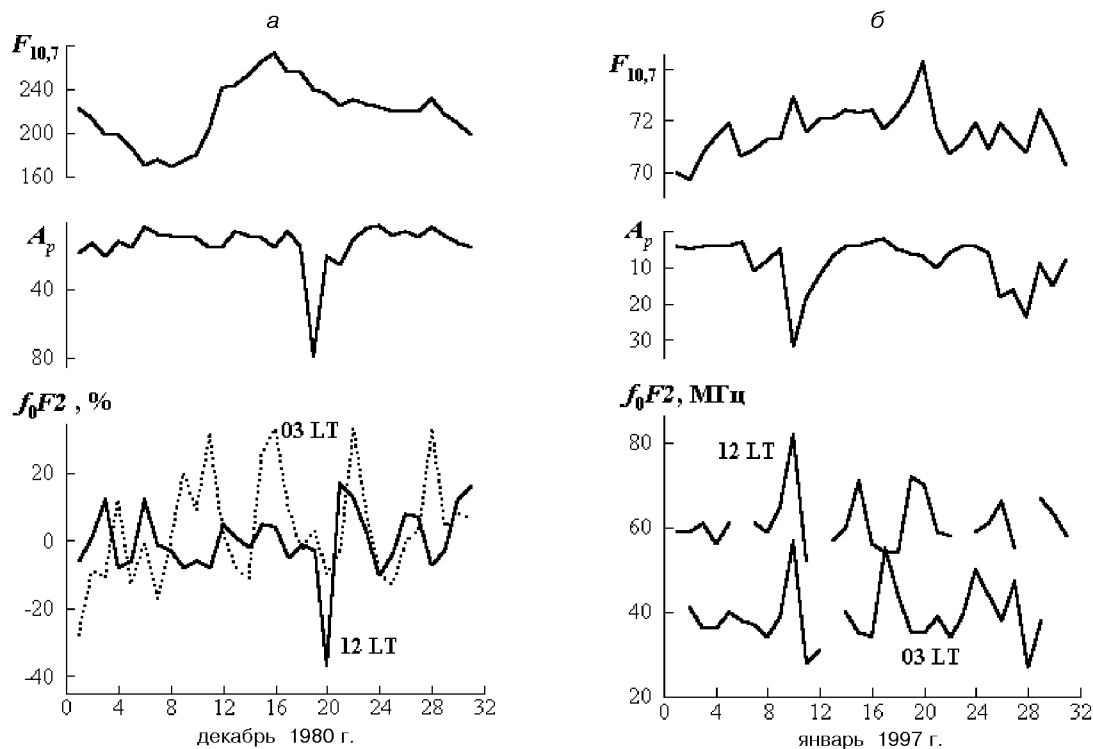


Рис. 2. Вариации критической частоты области F2 ионосферы, солнечной активности F10.7 и геомагнитной активности A_p : *a* — над станцией Москва (январь 1980 г., восточное полушарие), *б* — над станцией Eglin (январь 1997 г., западное полушарие) для 03 и 12 часов местного времени

чений возможны не только в периоды МБ [4]. Представляет интерес рассмотреть возможный вклад волновых процессов в вариации N ото дня ко дню. Анализ данных среднеширотных ионозондов показал, что в ионосфере возможно продолжительное существование волн с временными масштабами порядка 7 сут и относительной амплитудой в f_0F2 до 40 %, поведение которых не отражается в полной мере изменениями солнечной и геомагнитной активностей (рис. 2). Условием их продолжительного существования является отсутствие частых МБ (несколько МБ на период), тогда как редкие МБ любой интенсивности не нарушают установившиеся колебания f_0F2 . Во всех рассмотренных случаях фаза волн была тесно связана с секторной структурой межпланетного магнитного поля (ММП); максимальные значения f_0F2 наблюдались перед сменой знака ММП [4].

Для выявления пространственной структуры исследуемых волн рассмотрены вариации электронной концентрации в области F2 на средних широтах западного полушария, где в настоящее время работает наибольшее число ионозондов. На рис. 3 представлен пример широтных вариаций f_0F2 в

западном полушарии (рис. 3, *a*), в сравнении с широтными вариациями N_0 в восточном полушарии (рис. 3, *б*) (как уже отмечалось, оба параметра характеризуют вариации электронной концентрации в области F2). Несмотря на значительную роль магнитного поля в формировании структуры ионосферы, видно, что широтные вариации N для западного и восточного полушарий подобны в географической и различаются в геомагнитной системе координат. Данная закономерность является устойчивой и указывает на значительную роль атмосферных волн, порождаемых термическим нагревом, в формировании структуры ионосферы. В частности, «горб» в широтных вариациях N на географической широте около 50° соответствует максимуму функции Хафа волн Россби с зональным волновым числом $m = 2$ и меридиональным волновым числом $n = 4$ [2, 6].

Устойчивые волновые структуры установлены и на меньших временных и пространственных масштабах. Из долготных зависимостей видно (верхняя часть рис. 4), что на одних долготах изменения критической частоты f_0F2 значительные (для приведенного примера $65^\circ W$ и $120^\circ W$), на других —

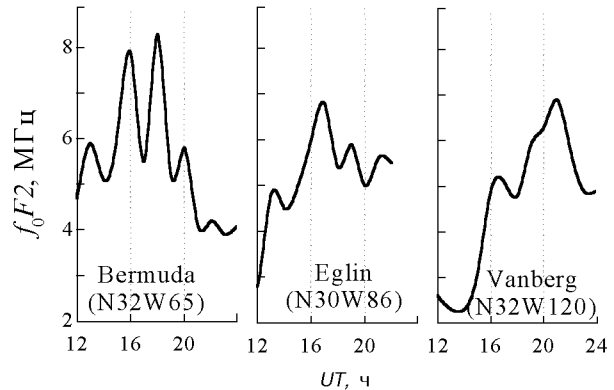
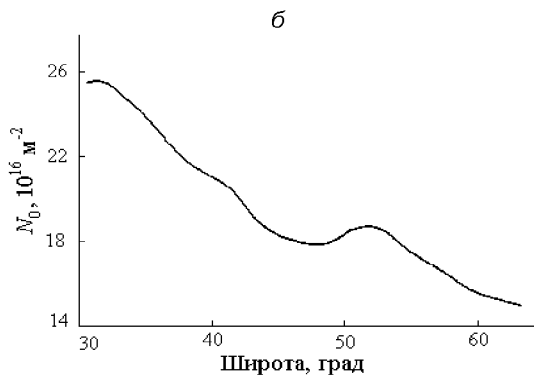
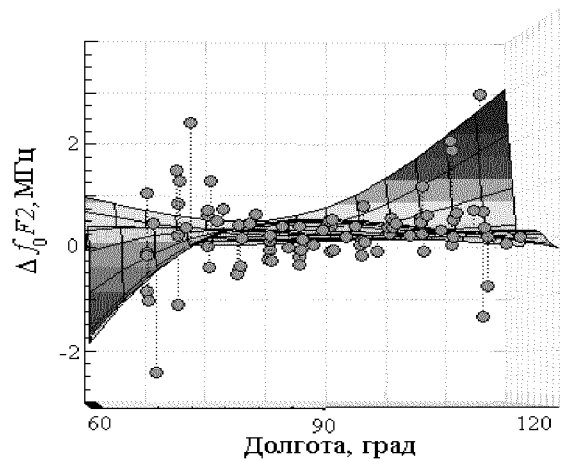
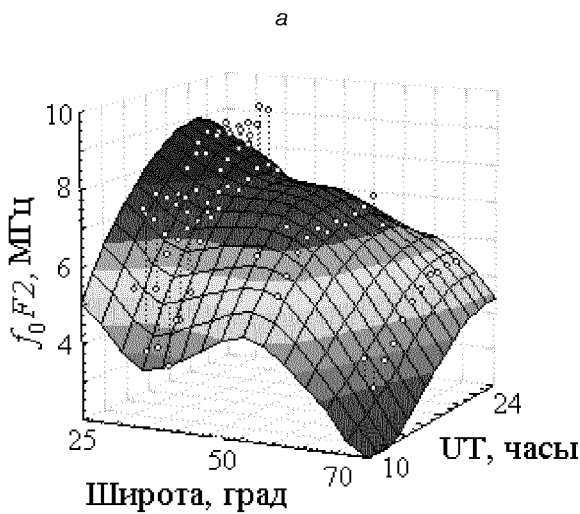


Рис. 3. Широтные вариации электронной концентрации N в области F2: *a* — вариации в западном полушарии; *б* — вариации N_0 восточном полушарии

Рис. 4. Флюктуации критической частоты области F2 ионосферы на разных долготах западного полушария (вверху) и соответствующие временные изменения f_0F_2 над некоторыми из рассмотренных станций (внизу)

почти не отклоняются от медианы (86 W). Такое поведение f_0F_2 можно объяснить наличием в ионосфере стоячих волн, в узлах которых электронная концентрация почти постоянна, а в пучностях флюктуирует от минимальных до максимальных значений. При регистрации на одной станции (нижняя часть рис. 4) они будут проявляться в виде волн электронной концентрации разной амплитуды с временными масштабами 2–6 ч (15° по долготе соответствует 1 ч времени).

ВЫВОДЫ

1. Планетарные и приливные атмосферные волны оказывают существенное и практически непрерывное влияние на поведение среднеширотной ионосферы, в том числе в периоды сильных геомагнит-

ных возмущений. В последнем случае амплитуда приливных волн может возрасти.

2. Преобладающим периодом планетарных волн являются волны с периодом около 7 сут, а их продолжительное существование (более месяца) возможно при нечастых магнитных бурях. Фаза планетарных волн связана с секторной структурой межпланетного магнитного поля. Планетарные волны, а именно волны Россби с зональным волновым числом $m = 2$ и меридиональным волновым числом $n = 4$, формируют «горб» в широтном распределении электронной концентрации N около географической широты 50° .

3. Для вариаций N с временными масштабами порядка нескольких часов существенными являются приливные волны с волновыми числами $m = 4...6$. Первое увеличение N под влиянием приливных волн начинается после восхода Солнца на

данной высоте. Амплитуда колебаний в спокойных условиях составляет 10—20 %. При переходе к возмущенным условиям амплитуда второй волны (11—12 LT) может возрасти в 1.5-2 раза. Продолжительное сохранение положительной фазы ионосферных бурь поддерживается за счет нескольких сменяющих друг друга механизмов, одним из которых может быть модификация волновой структуры.

Захаров И. Г., Тырнов О. Ф. благодарят Украинский научно-технологический центр за поддержку, контракт № 1772.

1. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. — М., 1988.—528 с.
2. Госсард Э. Э., Хук У. Х. Волны в атмосфере. — М., 1978.—532 с.
3. Данилов А. Д., Морозова Л. Д. Ионосферные бури в области F2. Морфология и физика. (Обзор) // Геомагнетизм и аэрономия.—1985.—25, № 5.—С. 705—721.
4. Захаров И. Г., Ляшенко М. В. Сравнение экспериментальных и модельных значений полного электронного содержания в ионосфере над Восточной Европой // Радиофизика и радиоастрономия.—2003.—8, № 3.—С. 256—265.
5. Захаров И. Г., Мозговая О. Л. О термосферно-ионосферных возмущениях в спокойных и возмущенных условиях // Оптика атмосферы и океана.—2002.—15, № 12.—С. 1137—1141.
6. Мак-Кормак Б., Селига Т. Солнечно-земные связи, погода и климат. — М., 1982.—384 с.
7. Таран В. И. Исследования ионосферы с помощью радаров

некогерентного рассеяния в Харькове // Вестник Харьковского государственного политехнического ун-та.—1999.—Вып. 31.—С. 3—9.

8. Buonsanto M. J. et al. Recent Results of the CEDAR Storm Study // Adv. Space Res.—1997.—20, N 9.—P. 1655—1664.
9. Younger P. T., Pancheva D., Middleton H. R., et al. The 8-hour tide in the Arctic mesosphere and lower thermosphere // J. Geophys. Res.—2002.—107, N A12.—P. 1420—1431.
10. Zhang S. P., Goncharenko L. P., Salah J. E. Climatology of neutral winds in the lower thermosphere over Millstone Hill (42.6 N) observed from ground and from space // J. Geophys. Res.—2003.—108, N A1.—P. 1051—1061.

VARIATIONS OF IONOSPHERIC PARAMETERS IN DISTURBANCE CONDITIONS WHICH WERE DETECTED WITH KHARKIV NONCOHERENT SCATTERING RADAR

I. G. Zakharov, M. V. Liashenko, and O. F. Tyrnov

Variations of electron density N and of other parameters in midlatitude ionosphere under the influence of tidal and planetary waves are investigated. Data of the midlatitude noncoherent scattering radar (Kharkiv, Ukraine) and worldwide ionosonde net data were used for our analysis. It is shown that the contribution of the tidal waves to variations of N remains high during magnetic storms in spite of enhanced influence of auroral sources upon midlatitude ionosphere. Planetary waves are capable of providing significant (> 40 %) and long-term variations in N (of no less than one month) with a period of about seven days and form the stable features of the spatial distribution of N .