

Процессы в околоземном космическом пространстве

УДК 550.388.2

А. Ф. ЯКОВЕЦ, В. В. ВОДЯННИКОВ,
К. Ж. НУРМУХАНБЕТОВА, Г. И. ГОРДИЕНКО, Ю. Г. ЛИТВИНОВ

ТЕРМОСФЕРНЫЙ ВЕТЕР И ДИНАМИКА СРЕДНЕШИРОТНОГО НОЧНОГО F2-СЛОЯ

Исследованы особенности поведения четырех параметров (электронной концентрации в максимуме, высоты максимума и основания, и полутолщины) ночного F2-слоя ионосферы над Алма-Атой в разные сезоны года. Проведено сравнение этих особенностей с параметрами нейтрального термосферного ветра на высотах F2-слоя. Показано, что поведение параметров F2-слоя в зимнее время значительно отличается от поведения в остальные сезоны. Показано, что динамика ночного F2-слоя определяется поведением термосферного ветра. Предложен физический механизм быстрого увеличения полутолщины слоя в переходные часы зимних месяцев на основе эффекта инверсии направления меридионального ветра и фазовых запаздываний момента инверсии ветра по мере уменьшения высоты.

Введение. Динамика верхней термосферы и ионосферы во многом определяется глобальным термосферным ветром. Тепловой нагрев атмосферы в дневное время приводит к ее расширению, при этом повышается давление над областями максимального нагрева, что создает горизонтальные градиенты давления, приводящие к возникновению глобальных градиентных ветров. К настоящему времени построено несколько теоретических и эмпирических моделей глобальной циркуляции термосферы. Считается, что наилучшие оценки горизонтальных движений в термосфере дает эмпирическая модель HWM90 [1], построенная на основе данных спутниковых измерений и наземных измерений радарами некогерентного рассеяния и интерферометрами Фабри-Перо. Эффекты термосферного ветра в поведении F-слоя ионосферы обобщены в обзора [2, 3], при этом там рассматривалось поведение только главных параметров слоя – электронного содержания в максимуме слоя ($N_m F2$) и высоты максимума слоя ($h_m F2$). В работе [4], где рассматривалось явление ночного повышения электронного содержания в максимуме слоя, было сделано предположение о том, что вертикальный сдвиг скорости термосферного ветра может оказывать влияние на толщину F-2 слоя. Явление ночного повышения ионизации наблюдается в

основном в зимние месяцы. В настоящей работе исследуется связь параметров F-слоя с поведением термосферного ветра в различные сезоны на основе данных вертикального зондирования ионосферы, полученных в Институте ионосферы.

Метод измерения и результаты

Ночные наблюдения ионосферы проводятся в Институте ионосферы (Алма-Ата ($76^{\circ}55' E$, $43^{\circ}15' N$)) на цифровом ионозонде, сопряженном с компьютером «Pentium-166», который предназначен для сбора, хранения и обработки ионограмм в цифровом виде. Информация считывается с ионограмм полуавтоматическим методом. Длительность сеансов наблюдения, осуществляемых в 5 – минутном режиме, в зависимости от сезона составляет 10-14 часов, 10-15 ночей каждый месяц. Первичная обработка ионограмм включает считывание значений действующих высот ($h(t)$) отражения радиосигнала на ряде фиксированных рабочих частот зондирования и значений критической частоты ($f_0 F2$). Ионозонд обеспечивает точность считывания $h'(t) \sim 2,5$ км и точность считывания $f_0 F \sim 0,05$ МГц. Дальнейшая обработка включает получение из ионограмм высотного распределения электронной концентрации ($N(h)$ -профилей), используя програм-

му пересчета POLAN [5] действующих высот в истинные высоты.

Для получения количественных оценок и фазовых соотношений между параметрами слоя $F2$ строились временные зависимости высоты максимума ($h_m F2$), высоты основания ($h_{bot} F2$), полутолщины слоя ($\Delta h = h_m F2 - h_{bot} F2$) и критической частоты ($f_0 F2$). На рис. 1 показано поведение этих параметров в разные сезоны года. Чтобы исключить влияние магнитной активности на рассматриваемые параметры, для анализа выбирались даты, для которых выполнялось условие $Ap \leq 10$. Жирной кривой представлена вариация критической частоты. За высоту основания слоя выбиралась высота, которой соответствовало значение электронной плотности на уровне $0,3 \times NmF2$. Коэффициент 0,3 был подобран эмпирически из соображения наибольшего приближения этой высоты к высоте, на которой на экспериментальных $N(h)$ -профилях наблю-

дался значительный высотный градиент электронной концентрации.

Поведение перечисленных параметров слоя для 12-13 ноября 2005 г. (рис. 1, а), также как и для большинства ночей, характеризующихся явлением зимнего ночных увеличения плотности ионизации в максимуме $F2$ -слоя, обнаруживает общие характерные особенности: а) быстрое падение $NmF2$, предшествующее началу продолжительного увеличения электронной концентрации; б) инверсия (изменение производной по времени соответствующей величины с отрицательной величиной на положительную) направления временного хода высот максимума, основания и полутолщины ($h_m F2$, $h_{bot} F2$ и Δh) (между 18:00 и 20:00 для представленной ночи), после которого следует быстрый рост указанных параметров; в) запаздывание по фазе момента достижения минимума $h_{bot} F2$ ($t = 19:32$) относительно момента достижения минимума $h_m F2$ ($t = 18:47$);

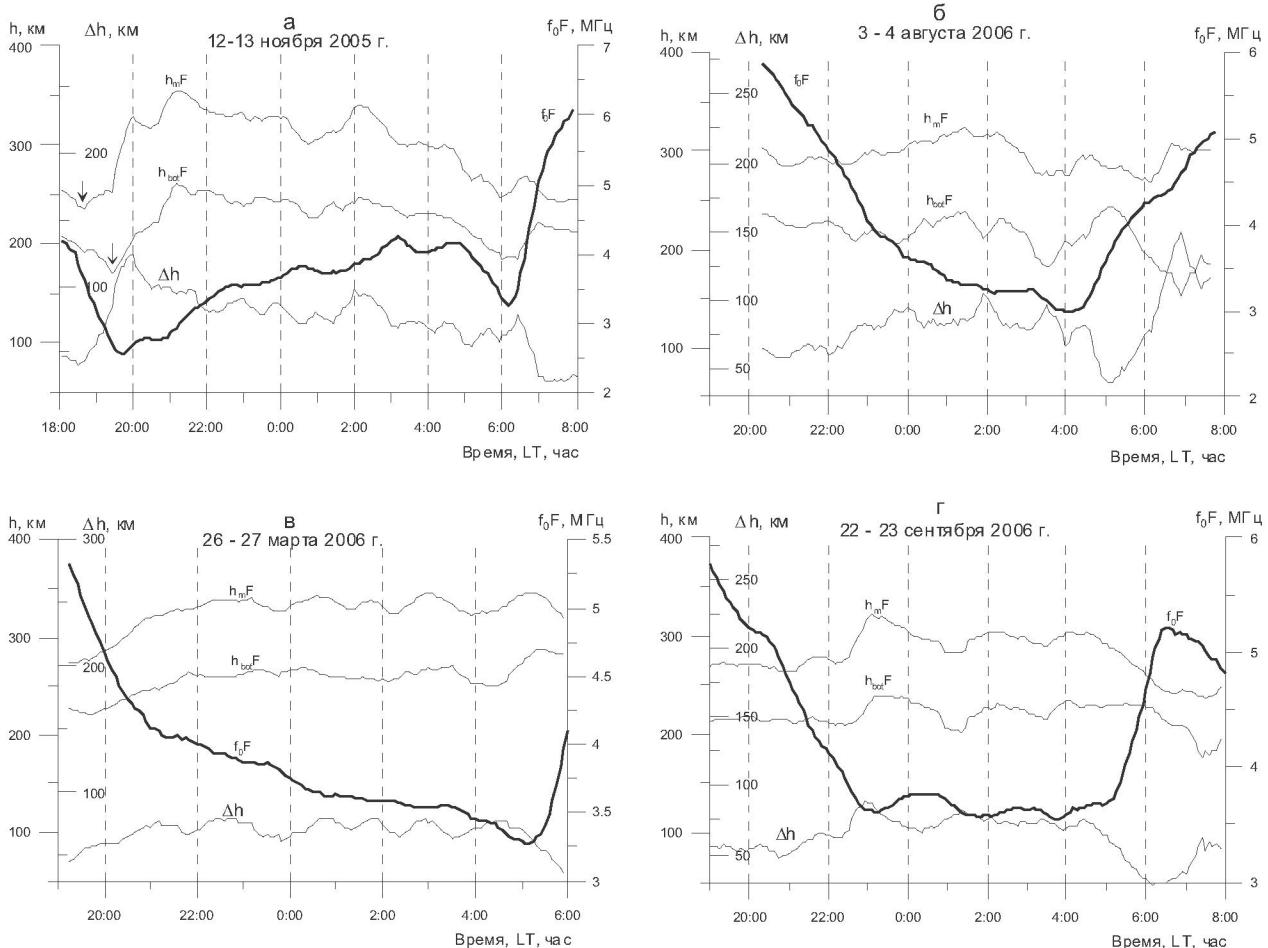


Рис. 1. Временной ход высоты максимума ($h_m F2$), высоты основания ($h_{bot} F2$), полутолщины слоя (Δh) и критической частоты ($f_0 F2$) для зимы (а), лета (б), весны (в) и осени

ε) совпадение по времени моментов начала быстрого увеличения $h_m F2$ и Δh . Величина $f_o F2$ связана $NmF2$ через соотношение $f_o F2 = 8,07 \cdot 10^7 NmF2$.

Поведение рассматриваемых параметров в другие сезоны заметно отличается от зимнего поведения. Электронная плотность в максимуме слоя падает на продолжении всей ночи и ее увеличение начинается только на восходе Солнца. В начале ночи не наблюдается резкого увеличения $h_m F2$, $h_{bot} F2$ и Δh , хотя и сохраняется тенденция их незначительного роста.

Рассмотрим возможные причины наблюдающихся сезонных различий поведения параметров слоя. Электронную плотность в максимуме ночного слоя $F2$ можно представить в виде суммы двух членов [6]:

$$NmF2 \approx NmF2^{(1)} + NmF2^{(2)}, \quad (1)$$

где $NmF2^{(1)} \approx NmF2(t_0) \exp[-(t-t_0)/\phi]$ описывает роль убывающей дневной электронной концентрации в поддержании ночной ионосферы. Здесь $NmF2(t_0)$ – плотность электронов в момент t_0 , когда выключается источник фотоионизации, и ϕ – характеристическое время плазменных потерь в максимуме слоя. Характеристическое время потерь вблизи максимума слоя оказывается порядка времени рекомбинации, которая в интервале местного времени 16:00–20:00 ч составляет $\phi \approx 2$ ч для $h_m = 250$ км и $\phi \approx 10$ ч для $h_m = 300$ км. $NmF2^{(2)}$ пропорционально потоку ионов из плазмосферы в ионосферу, направленному вдоль магнитных силовых линий. Относительный вклад первого и второго членов в $NmF2$ (1) изменяется в течение ночи. Величина $NmF2^{(1)}$ убывает со временем и относительная роль $NmF2^{(2)}$ возрастает. Для зимнего сезона среднее, измеренное нами характеристическое время на участке быстрого падения $NmF2$ заметно меньше, чем $\phi \approx 2$ ч. Из этого следует два вывода. Во-первых, на этом участке роль второго члена ($NmF2^{(2)}$) в создании дополнительной электронной концентрации пренебрежимо мала. И, во-вторых, малые величины измеренных характеристических времен говорят о том, что кроме рекомбинации, имеется некоторый дополнительный механизм, ответственный за ускоренные потери электронов в максимуме слоя $F2$. Если обратиться к рис. 1, а, то можно заключить, что таким механизмом может служить уменьшение электронной концентрации в максимуме слоя за

счет перераспределения плазмы по скачкообразно увеличившейся толщине слоя. Причина увеличения толщины также очевидна из рассмотрения рисунка. Запаздывание минимума в ходе $h_{bot} F2$ относительно минимума $h_m F2$ приводит к тому, что в то время, когда $h_m F2$ начинает возрастать, $h_{bot} F2$ еще продолжает падать в течение некоторого времени. Если полагать, что инверсия направления движения высоты максимума слоя $h_m F2$ вызывается инверсией направления меридионального ветра с дневного, направленного к полюсу, на ночное, направленное к экватору, то из этого следует, что поворот меридионального ветра происходит не одновременно по всей толще слоя $F2$ – с уменьшением высоты он наступает позднее.

Здесь следует обсудить существующую связь между направлением меридионального термосферного ветра и вертикальным движением ионосферной плазмы. Термосферный ветер за счет соударений нейтральных частиц с положительными ионами вовлекает в движение ионы и электроны. В F-области ионосферы, где плазма является замагниченной, ионы и электроны могут двигаться только вдоль направления геомагнитного поля. На средних широтах линии поля наклонены относительно горизонтали, поэтому движение ионов имеет вертикальную компоненту, которая приводит к изменению высоты F2-слоя. Воздействие ветра зависит от его ориентации относительно магнитного поля: направленный в дневное время к полюсу ветер вызывает дрейф плазмы, направленный вниз, в то время как ветер, направленный к экватору в ночное время, вызывает дрейф, направленный вверх. Эти эффекты, зависящие от геометрии магнитного поля, изменяются с широтой и магнитным наклонением (I). Магнитное наклонение Алматы составляет 62° . Из рис. 1, а следует, что инверсия направления движения слоя $F2$, вызванное инверсией направления меридионального ветра с дневного, направленного к полюсу, на ночное, направленное к экватору, происходит не одновременно по всей толще слоя – с уменьшением высоты оно наступает позднее. Поскольку заключение о моментах инверсии термосферного ветра на разных высотах делается на основании момента изменения знака направления движения $h_m F2$ и $h_{bot} F2$, возникает вопрос о том, насколько быстро ионосферная плазма реагирует на изменение

величины нейтрального термосферного ветра. В работе [3] на рис. 14 приведен рассчитанный на модели отклик $h_m F2$ ионосфера на изменения нейтрального ветра, из которого следует, что отклик следует практически немедленно. Поэтому с большой точностью по временным вариациям заряженной компоненты можно судить о вариациях ветра.

Для проверки высказанного предположения, объясняющего механизм быстрого увеличения полутолщины слоя в зимнее переходное время, на модели HWM90 (<http://128.183.114.83/models/atmospheric/hwm93/>) было рассчитано суточное поведение меридиональной компоненты ветра для ряда высот для всех сезонов (рис. 2). Положительные значения скорости (заштрихованные участки) соответствуют ветру, направленному на север, отрицательные значения соответствуют экваториальному направлению ветра. На рис. 2,

a, отображающем зимнее поведение ветра, стрелки указывают моменты инверсии направления ветра с полярного на экваториальное. Из рисунка можно заключить, что, во-первых, существует эффект инверсии меридионального ветра на временном отрезке перехода от дня к ночи и, во-вторых, наблюдаются фазовые запаздывания момента инверсии ветра по мере уменьшения высоты.

Суточный ход меридионального ветра летом, весной и осенью заметно отличается от зимнего поведения. Летом, хотя форма суточной зависимости ветра мало отличается от зимней формы, однако вся кривая лежит ниже нулевой отметки, т.е. на протяжении суток ветер дует к экватору, поддерживая максимум F2-слоя на высоте ~ 300 км (рис. 1, б), где из-за малой плотности атмосферы время рекомбинации составляет ~ 10 час. Малый коэффициент потерь обеспечивает мед-

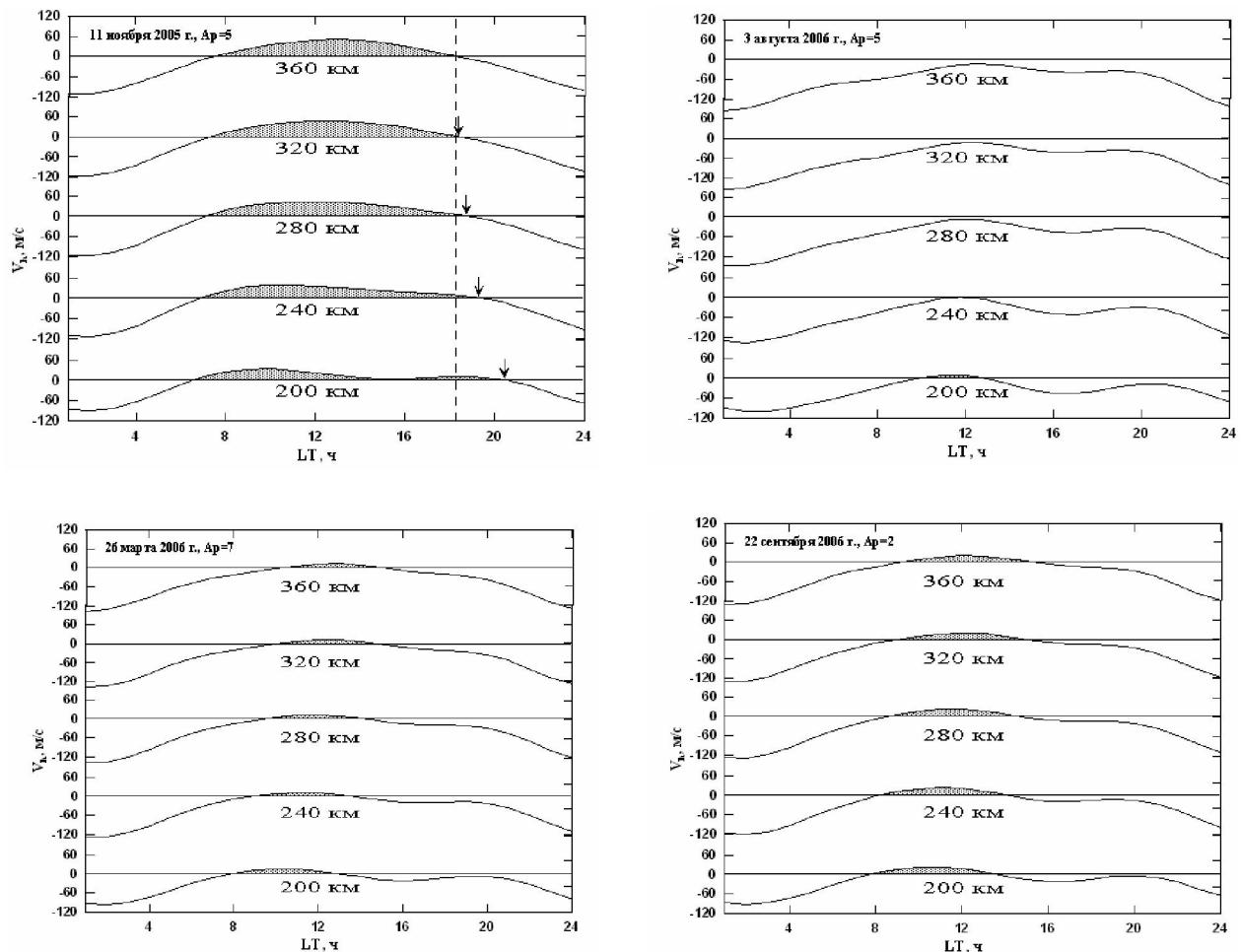


Рис. 2. Суточное поведение термосферного ветра на ряде высот, рассчитанное из модели HWM87 для сезонов: зимы (*а*), лета (*б*), весны (*в*) и осени (*г*)

ленное уменьшение плотности дневной плазмы в течение ночи. Из-за отсутствия высотного сдвига фазы меридионального ветра не происходит резкого увеличения Δh , и вследствие этого ускоренного падения плотности плазмы в максимуме слоя, которое наблюдается в зимнее время.

Из рис. 2, в, г следует, что ветры в равноденствие занимают промежуточные значения между зимними и летними величинами. Вблизи полудня они имеют небольшую компоненту, направленную к полюсу. Поведение ионосферных параметров также обнаруживает промежуточные черты. В переходные часы суток (18-20 ч) максимум слоя находится на высоте ~ 275 км и уменьшение $N_m F2$ происходит с несколько большей скоростью по сравнению с летним периодом. Однако и в эти сезоны отсутствуют особенности поведения параметров слоя, характерные для зимнего периода.

Заключение. Таким образом, в работе на основе данных вертикального зондирования ионосферы и модельных расчетов проведено сравнение особенностей суточного поведения параметров $F2$ -слоя ионосферы в разные сезоны года с параметрами меридионального термосферного ветра на высотах $F2$ -слоя. Показано, что поведение параметров $F2$ -слоя в зимнее время значительно отличается от поведения в остальные сезоны, при этом особенности поведения $F2$ -слоя можно объяснить на основе суточной зависимости значения термосферного ветра. Объяснен механизм быстрого увеличения полутолщины слоя в зимние месяцы, основанный на эффекте инверсии направления меридионального ветра в переходное ото дня к ночи время и фазовых запаздываний момента инверсии ветра по мере уменьшения высоты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hedin A.E., Biondi M.A., Burnside R.G., Hernandez G., Johnston R.M., Killeen N.L., Mazaquier C., Meriwether J.W., Salah J.E., Sica R.J., Smith R.W., Spencer N.W., Wickwar V.B.,

Virdi T.S. Revised global model of thermospheric winds using satellite and ground-based observations // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. N A5. P. 7657-7688.

2. Rishbeth H. Thermospheric winds and F-region: A review // J. Atmos. Terr. Phys. 1972. V. 34. N 1. P. 1-47.

3. Titheridge J.E. Winds in the ionosphere-A review // J. Atmos. Terr. Phys. 1995. V. 57. N 14. P. 1681-1714.

4. Яковец А.Ф., Водянников В.В., Гордиенко Г.И., Литвинов Ю.Г. Вертикальная структура среднеширотного зимнего слоя F2 ионосферы во время послеполночных увеличений $N_m F2$ // Геомагнетизм и аэрономия. 2009. Т. 49. N 4. С. 514-521.

5. Titheridge J.E. Ionogram analysis with the generalised program Polan // National Geophysical Data Center. Boulder. CO USA. 1985. P. 189.

6. Кринберг И.А., Тацкин А.В. Ионосфера и плазмосфера. М.: Наука, 1984. 190 с.

Резюме

Жылдың әртүрлі маусымындағы Алматы үсті ионосферасының тұнгі F2-қабатының төрт параметрлерінің (максимумдағы электрондық концентрация, максимум мен негіздің біліктіктері, әрі жартылай қалындықтар) әрекет ету ерекшеліктері зерттелген. Осы ерекшеліктердің F2-қабаты біліктіктеріндегі бейтарап термосфералық желдің параметрлерімен салыстырулары жүргізілген. Қысқы уақыттағы F2-қабаты параметрлерінің әрекет етуі басқа маусымдардағы әрекеттерден біраз өзгеше екендігі көрсетілген. Тұнгі F2-қабатының динамикасының термосфералық жел әрекетімен анықталатындығы айтылған. Меридиональді жел бағытының инверсиясы әсерінің және біліктікің кемуіне қарай жел инверсиясы моментінің фазалық кешігүлерінің негізінде қыс айларының өтпелі сағаттарындағы қабаттың жартылай қалындығының тез артуының физикалық механизмі ұсынылған.

Summary

Comparison of behavior of the night $F2$ layer parameters with behavior of the thermospheric wind for various seasons is carried out. It is shown that this behavior for the winter is significantly different from that in the other seasons, dynamic of the layer being defined with behavior of the thermospheric wind. Fast expanding of $F2$ layer thickness is explained on the basis of meridional wind inversion and height progressive phase delays of the moment of inversion.

ДТОО «Институт ионосферы»,
г. Алматы

Поступила 22.07.10 г.