

# Процессы в околоземном космическом пространстве

УДК 550.388.2

Г.И. ГОРДИЕНКО, А.Ф. ЯКОВЕЦ,  
В.В. ВОДЯННИКОВ, Я.Ф. АШКАЛИЕВ, Ю.Г. ЛИТВИНОВ

## ИССЛЕДОВАНИЕ СЕЗОННЫХ ВАРИАЦИЙ СУТОЧНОГО ХОДА ИОНОСФЕРНОЙ ТОЛЩИНЫ ДЛЯ СПОКОЙНЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ УСЛОВИЙ В ФАЗАХ МИНИМУМА И МАКСИМУМА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Для Казахстанского региона исследованы сезонные вариации суточного хода ионосферной толщины  $\tau$ , определяемой как отношение полного электронного содержания (TEC) к электронной концентрации в максимуме слоя F2 (NmF2). Рассмотрены спокойные геомагнитные условия (ApJ10) и два уровня солнечной активности, высокий (1999-2000 гг., W ≈ 120) и низкий (2006-2007 гг., W ≈ 8). Оценено соответствие полученных результатов Международной модели ионосферы IRI-2007. Обсуждены физические механизмы наблюдаемых особенностей поведения среднеширотной ионосферы.

**Введение.** Для спокойных геомагнитных условий исследуются сезонные вариации суточного хода ионосферной толщины  $\tau$ , определяемой как отношение полного электронного содержания TEC (Total Electron Content) в ионосфере к максимуму электронной концентрации в слое F2 (NmF2) и представляющей собой эквивалентную толщину, имеющую одинаковую плотность, равную плотности в максимуме F2-слоя. Особенности поведения  $\tau$  изучаются с 60-х годов (см. [1-3], ссылки), однако в последнее время эти исследования активно возобновились в связи с практическими, неограниченными возможностями получать данные по полному электронному содержанию путём регистрации сигналов глобальной сети GPS-спутников. Одной из возможных задач в исследовании поведения параметра  $\tau$  является задача изучения характера крупномасштабной структуры в распределении электронной концентрации по высоте в различных условиях, в зависимости от времени суток, сезона, солнечной и геомагнитной активности. Целью настоящего исследования является изучение сезонных вариаций суточного хода ионосферной толщины  $\tau$  для двух фаз солнечного цикла, высокой активности (1999-2000 гг.) и низкой (2006-2007 гг.), используя данные трансионосферного [карты TEC, <ftp://cddisa.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/ionex/>] и наземного (ионозонд ПАРУС, ст. Алма-Ата [43.25°N, 76.92°E]) радиозондирования ионосферы. Результаты исследования будут сопоставле-

ны с соответствующими результатами других авторов и результатами, полученными из модельных расчётов (модель IRI-2007).

**Данные и методика анализа.** Значения TEC были определены для территории Казахстанского региона, используя глобальные ионосферные карты GIM (Global Ionosphere Maps) вертикального полного электронного содержания, которые рассчитываются на основе данных международной сети приемников GPS различными научными центрами IGS [4]. Эти карты представлены в Интернет для свободного использования. Карты GIM имеют пространственное разрешение 2.5° по широте и 5° по долготе, временное разрешение составляет 2 часа. Значения NmF2 получены по данным вертикального зондирования ионосферы на ст. Алма-Ата и соответствуют критическим частотам слоя F2 как:

$$\text{NmF2} = 1.24(\text{foF2})^2 \times 10^{10} \text{ эл.м}^{-3}, \text{ где foF2 в МГц.}$$

Значения полутолщины  $\tau$  (в км) рассчитывались для каждого часа по формуле

$$\tau = \text{TEC}/\text{NmF2},$$

Расчёты  $\tau$  проводились для магнитно-спокойных дней ( $A_p \leq 10$  нТ), четырёх сезонов (лето, зима, весенне и осенне равноденствия) и двух уровней солнечной активности (высокой и низкой). Летний сезон представлен данными за период июнь-июль, зимний - за декабрь-январь, весенне равноденствие - за март-апрель и осенне равноденствие - за сентябрь-октябрь месяцы.

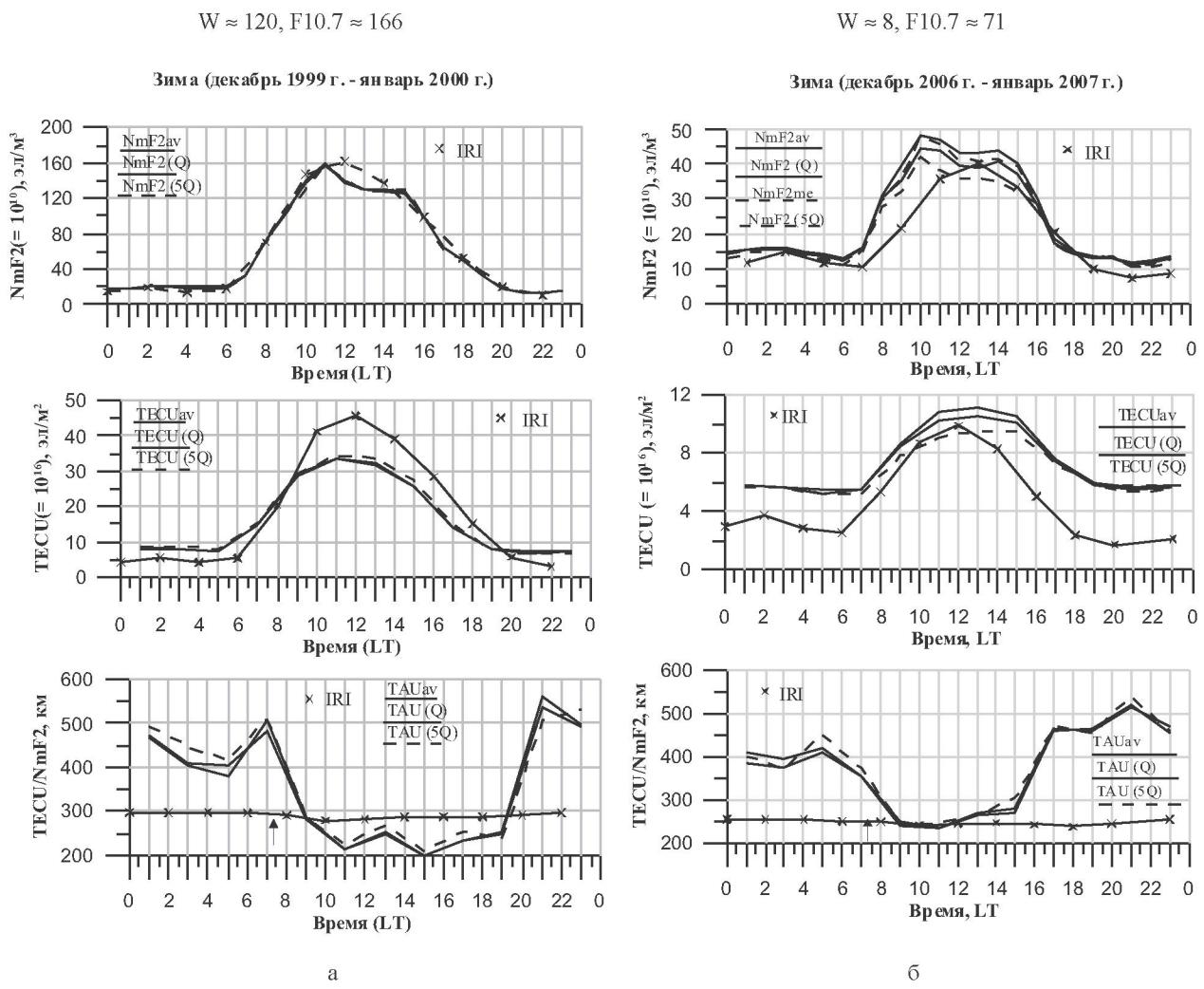


Рис. 1а. Пример средних суточных вариаций ТЕС, NmF2 и  $\tau$  для зимних условий периодов высокой (а) и низкой (б) солнечной активности. Сплошная широкая линия представляет средний суточный ход за весь рассматриваемый период (с учётом всех данных без разделения условий на спокойные и возмущенные), сплошная тонкая – за все спокойные дни, чёрная широкая штриховая – за пять наиболее спокойных дней. Тонкая штриховая линия на рис. 1а представляет медианные значения для данного периода. Символ  $\times$  — расчёты, выполненные по модели IRI. Стрелка на оси X указывает время восхода Солнца на земле

**Результаты.** На рис. 1а, б приведены примеры сезонных вариаций суточных ходов ТЕС, NmF2 и  $\tau$ , рассчитанных (1) по всему массиву данных, включая данные за возмущенные дни, (2) для спокойных геомагнитных условий и (3) за пять наиболее спокойных дней рассматриваемого сезона. Можно отметить, что в целом все варианты представления суточных ходов рассматриваемых параметров достаточно близки между собой для всех принятых условий. Что касается электронной концентрации в максимуме слоя F2, то сезонная зависимость характеризуется полугодовой вариацией значений NmF2, заключающейся в том, что независимо от фазы солнечного

цикла значения NmF2 максимальны в периоды равноденствий (полугодовая аномалия). Для дневных часов (в интервале 9–16 LT) в фазе максимума солнечной активности наблюдается годовая аномалия, заключающаяся в том, что значения NmF2 выше зимой, чем летом. Аналогично суточному ходу NmF2 максимальные значения ТЕС достигаются в оклополуденные часы (между 10 и 14 ч), наибольшие значения ТЕС наблюдаются во время равноденственных сезонов (особенно в период весеннего равноденствия), однако годовой аномалии в значениях ТЕС не обнаруживается, т.е. независимо от времени суток и фазы солнечного цикла дневные летние

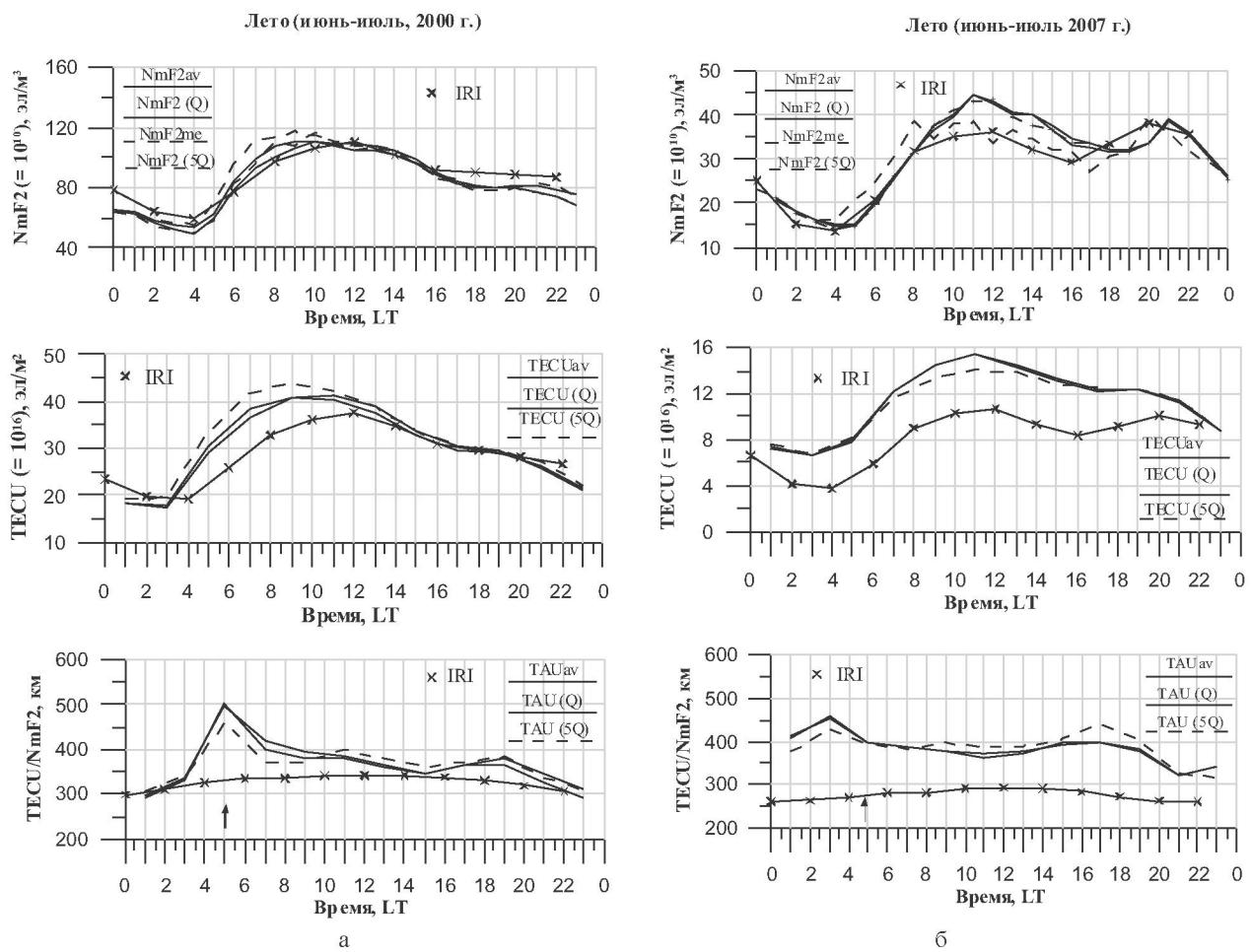


Рис. 16. Пример средних суточных вариаций ТЕС, NmF2 и  $\tau$  для летних условий периодов высокой (а) и низкой (б) солнечной активности. Обозначения те же, что и на рис. 1а

значения ТЕС преобладают над зимними значениями. Амплитуда сезонных вариаций наибольшая для околополуденных часов, наименьшая – для околополуночных часов. Для ионосферной толщины  $\tau$ , во-первых, примечательным является образование предвосходного максимума значений  $\tau$  для летних и зимних сезонов независимо от фазы солнечного цикла и равноденственных сезонов при высокой солнечной активности, а также то, что независимо от особенностей сезонных вариаций дневных значений NmF2 и ТЕС тенденция сезонных вариаций ионосферной толщины в дневное время сохраняется, минимальные значения  $\tau$  наблюдаются зимой, максимальные – летом, причем диапазон сезонных вариаций  $\tau$ , практически, не зависит от фазы солнечного цикла и лежит в пределах 250–400 км. Однако зависимость вариаций  $\tau$  от фазы солнечного цикла все же очевидна и заключается она в

изменении характера суточного хода  $\tau$ . Так, при низкой солнечной активности во время трёх сезонов, за исключением летнего, ночные значения ионосферной толщины регулярно выше дневных ( $\tau_{\text{дн}}/\tau_{\text{н}} = 1.33 \div 1.67$ ), при высокой солнечной активности эта особенность наблюдается только для зимнего сезона ( $\tau_{\text{дн}}/\tau_{\text{н}} = 2$ ). Для летних сезонов, независимо от фазы солнечной цикла, и периодов равноденствия при высокой солнечной активности характер суточного хода  $\tau$  имеет сглаженный вид с небольшим превышением дневных значений относительно ночных значений,  $\tau_{\text{дн}}/\tau_{\text{н}} = 0.85 \div 1.04$ . Отношения ночных значений  $\tau$  к дневным значениям, средние дневные (08–16 LT) и ночные (20–04 LT) значения  $\tau$ , а также сезонные вариации суточного хода рассмотренных ионосферных параметров, рассчитанных по 5-ти спокойным дням рассматриваемых сезонов, приведены в табл. 1 и 2 и на рис. 2 и 3а соответственно.

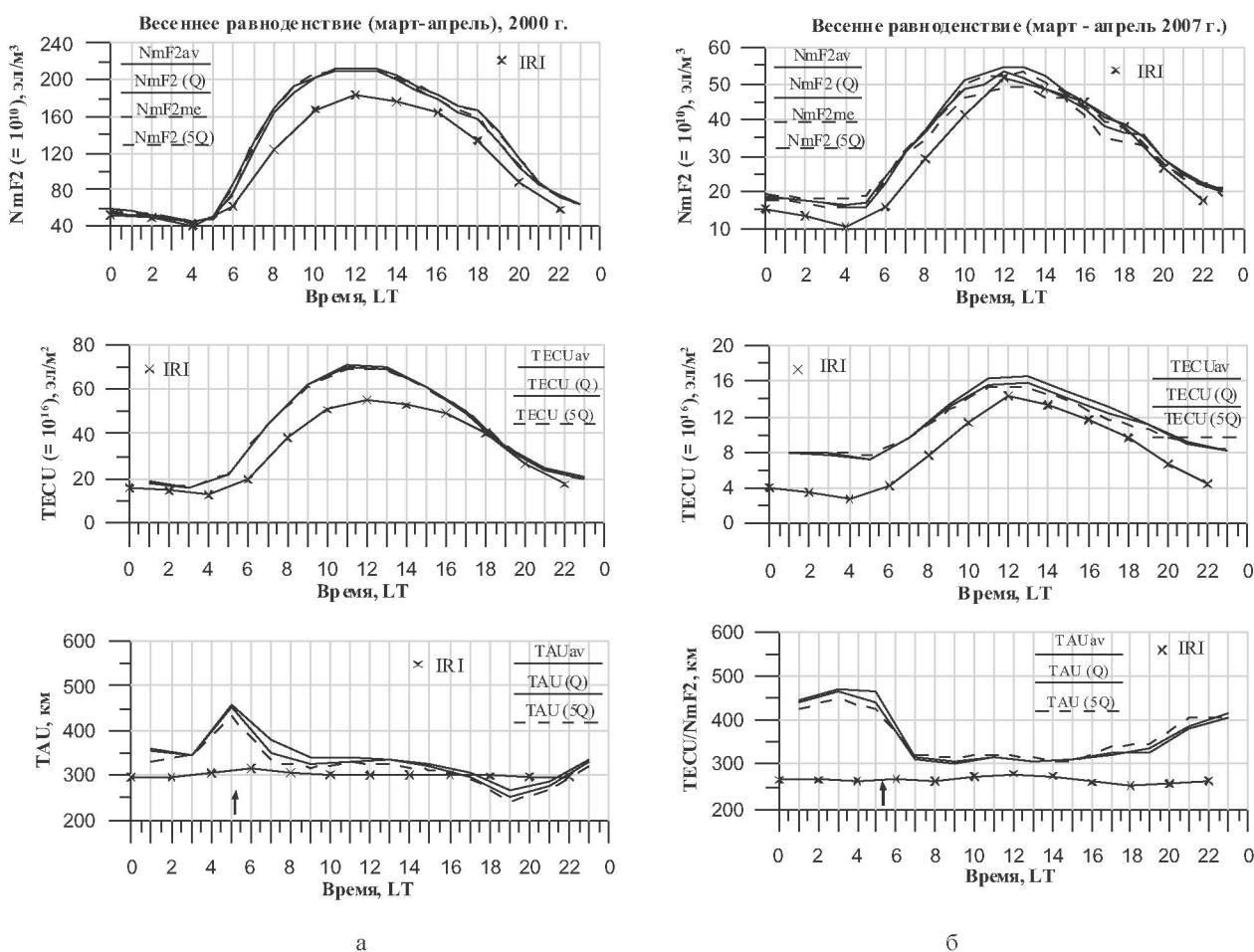


Рис. 1в. Пример средних суточных вариаций ТЕС, NmF2 и  $\tau$  для условий весеннего равноденствия периодов высокой (а) и низкой (б) солнечной активности. Обозначения те же, что и на рис. 1а

Таблица 1. Отношения ночных значений ионосферной толщины к дневным значениям (ночь/день)

	Алма-Ата		Боулдер	
	2006-2007 гг. (W ≈ 8)	2000 г. (W ≈ 120)	1985 г. (W ≈ 18)	1981 г. (W ≈ 140)
Зима	1.67	2.00	2.23	1.07
Лето	0.91	0.85	1.42	0.68
Весеннее равноденствие	1.33	0.98	1.42	0.68
Осеннее равноденствие	1.55	1.04		

Далее выполнено сопоставление суточных вариаций значений NmF2, ТЕС и  $\tau$  с вариациями соответствующих параметров, определяемых из модели IRI-2007 для рассматриваемых условий. По результатам сопоставления, приведенным на рис. 1а, б, можно сделать следующие выводы:

(1) Для условий максимума солнечной активности расхождения наблюдаемых и модельных значений NmF2, практически, для всех часов су-

ток лежат в пределах  $\pm 20\%$ . Исключение составляет период осеннего равноденствия, когда расхождения значений NmF2 испытывают разброс до  $\pm 40\%$ , рис. 4а (правая панель).

(2) Для условий минимума солнечной активности наблюдается, практически, регулярное недооценение моделью IRI-2007 ( $\Delta \text{NmF2} \approx 40\%$ ) значений NmF2 в ночное время. Для дневного времени суток расхождения наблюдаемых и мо-

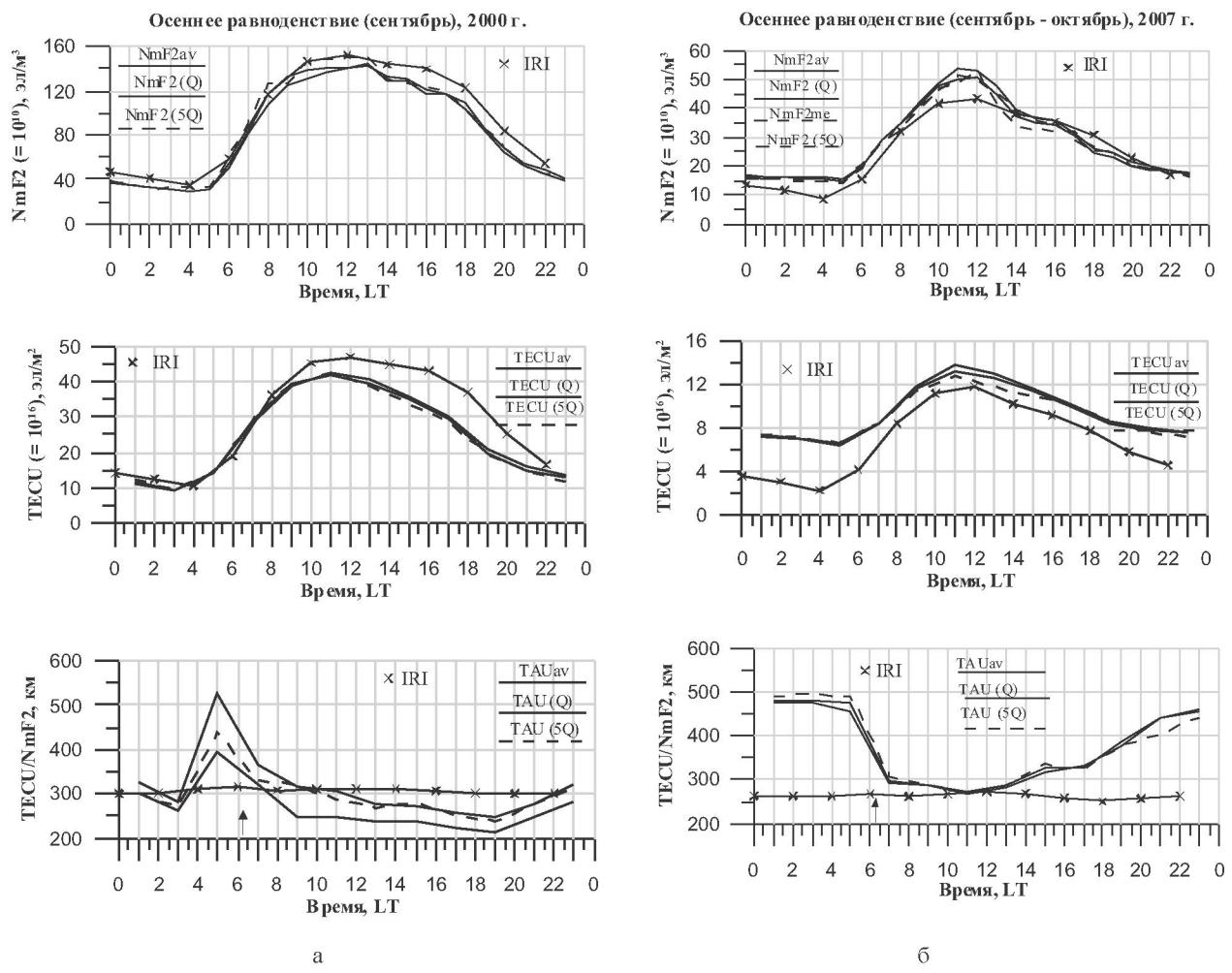


Рис. 1г. Примеры средних суточных вариаций ТЕС, NmF2 и  $\tau$  для условий осеннего равноденствия периодов высокой (а) и низкой (б) солнечной активности. Обозначения кривых те же, что и на рис. 1а

Таблица 2. Средние дневные (08?16 LT) и ночные (20?04 LT) значения ионосферной толщины (в км) для магнитно-спокойных дней, четырёх сезонов и двух уровней солнечной активности

Условия		Alma-Ata 2006-2007 гг. (W ≈ 8)	Boulder 1985 г. (W ≈ 18)	Alma-Ata 1999-2000 гг. (W ≈ 120)	Boulder 1981 г. (W ≈ 140)
Зима	День	265.98	240	246.42	253
	Ночь	443.11	535	494.71	272
Весенне равноденствие	День	315.26	278	320.68	342
	Ночь	421.19	394	316.12	232
Лето	День	394.50	394	377.63	439
	Ночь	362.17	559	322.93	297
Осенне равноденствие	День	294.70	278	288.20	342
	Ночь	458.41	394	290.93	232

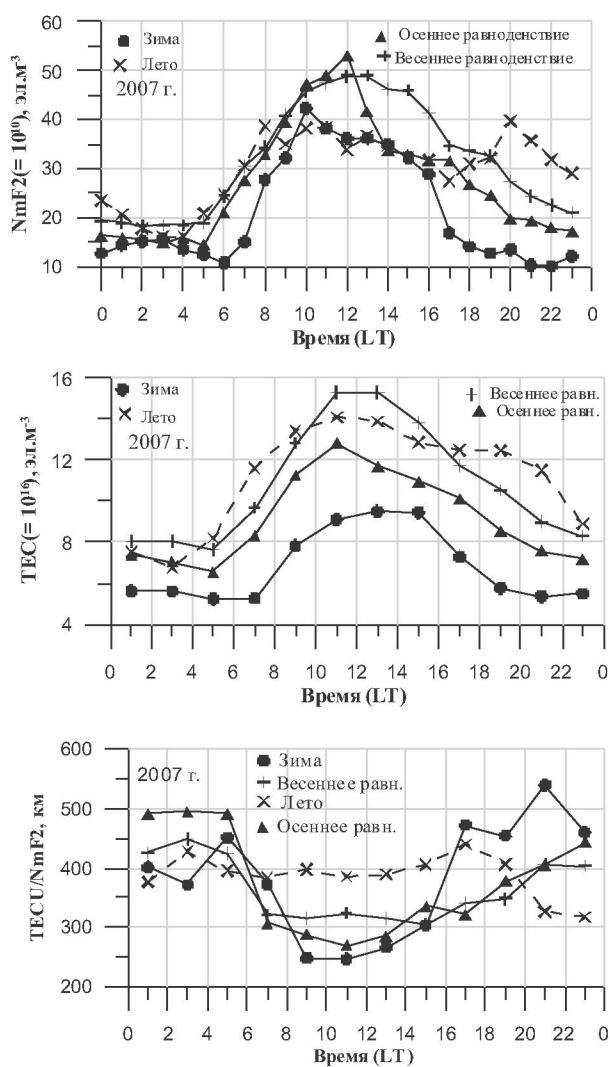


Рис. 2. Сезонная зависимость суточного хода NmF2, TEC и  $\tau$  для региона станции Alma-Ata в условиях низкой солнечной активности,  $W \approx 8$  (2006-2007 гг.)

дельных значений NmF2 лежат в пределах  $\pm 20\%$ , рис. 4б (правая панель).

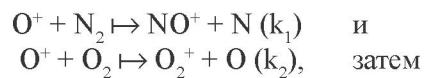
(3) Модельные значения ТЕС для условий минимума солнечной активности и ночных условий (зима – 16÷07 LT; лето – 23÷07 LT; весна – 20÷07 LT; осень – 20÷07 LT) регулярно ниже наблюдавшихся. Расхождения дневных значений ТЕС лежат в пределах 0÷30%, рис. 4б (левая панель).

(4) Для условий максимума солнечной активности значения ТЕС переоцениваются моделью IRI-2007 в зимний сезон в период 10÷19 LT (ДТЕС=30-40%) и сезон осеннего равноденствия в период 12÷22 LT (до 60%). В ночное время происходит недооценение (до 50%) значений ТЕС

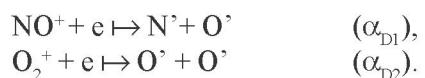
моделью IRI-2007 для зимних условий, а в интервале 4-8 LT - для весенних и летних условий, рис. 4а (левая панель).

(5) Характер суточного хода ионосферной толщины, рассчитанный по модельным значениям NmF2 и ТЕС, не согласуется с характером суточного хода ионосферной толщины, рассчитанной по наблюдаемым значениям NmF2 и ТЕС.

**Обсуждение результатов.** Обсудим коротко наблюдаемые особенности в поведении NmF2, которые в свою очередь отражают особенности вариаций полного электронного содержания ТЕС, а их комбинация – ход ионосферной толщины  $\tau$ . Хорошо известно, что производство электронной концентрации в F-области зависит от концентрации атомного кислорода [O], в то время как потери электронной плотности в основном зависят от концентрации молекулярного азота [N<sub>2</sub>] с некоторым вкладом от концентрации молекулярного кислорода [O<sub>2</sub>], [5-6]. То есть, процесс рекомбинации образовавшихся в результате фотоионизации ионов O<sup>+</sup> идет в два этапа: этап перезарядки



этап диссоциативной рекомбинации



Поскольку  $\alpha_D \gg k$ , то условия в F-области контролируются процессом перезарядки (скорость  $v$ ),

$$v = k_1[\text{N}_2] + k_2[\text{O}_2], \quad \text{причём}$$

коэффициенты  $k$  имеют температурную зависимость. Таким образом, основными параметрами, определяющими состояние F-области ионосферы, являются состав [O, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>], температура T(h), полный УФ-поток, константы ионно-молекулярных реакций, а также перенос плазмы (дрейф), который на средних широтах и во время спокойных геомагнитных условий образуется в основном за счёт термосферных ветров. Наиболее изменчивыми факторами являются нейтральный состав и температура. Какова же разница между зимней и летней термосферой, между солнцестоянием и равноденствием? Эти вопросы широко исследовались в последнее время [5-7] и результаты этих исследований привели к следующим заключениям.

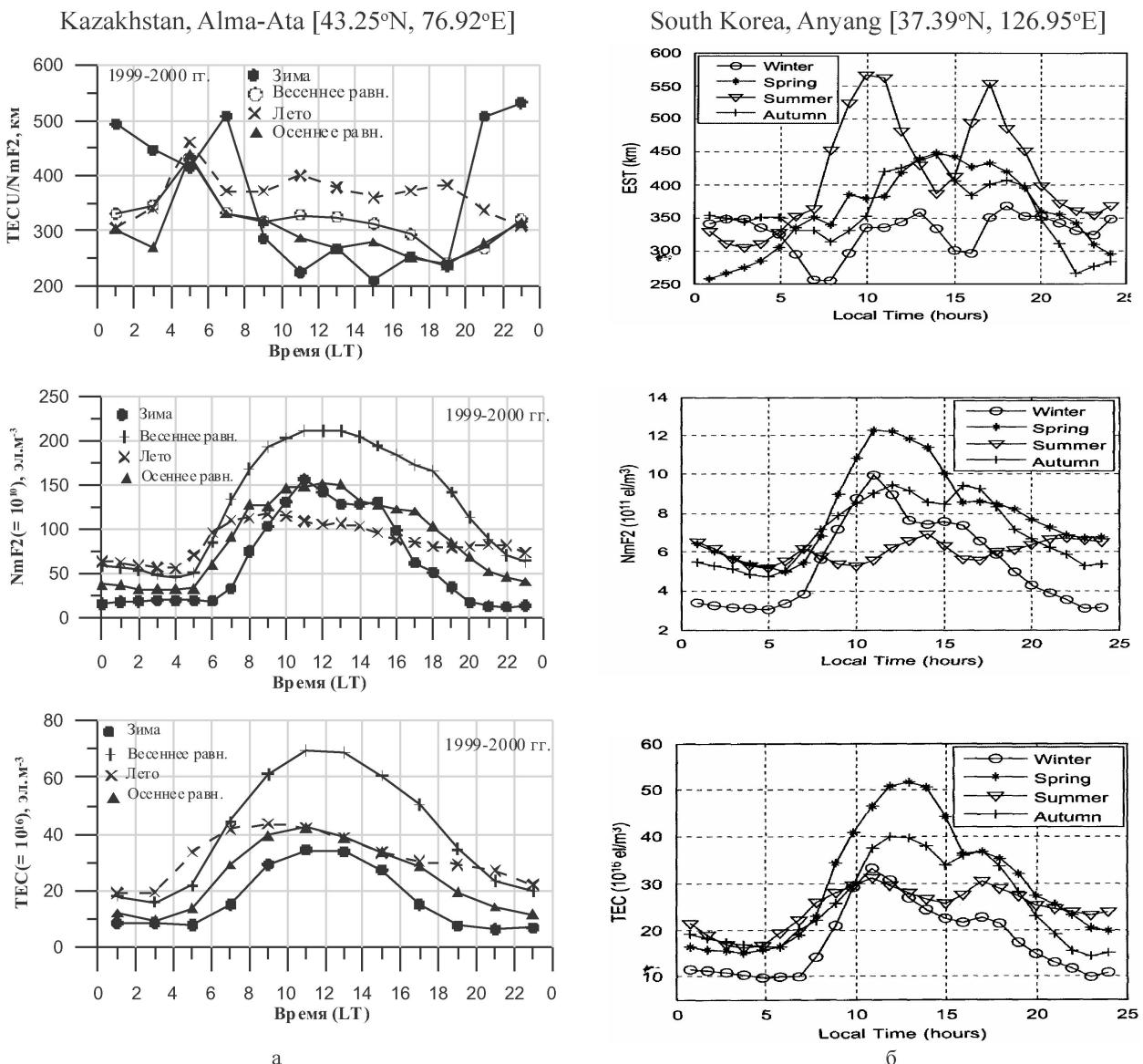


Рис. 3. Сезонные вариации суточного хода  $\tau$ , ТЕС и NmF2 для регионов ионосферных станций Alma-Ata (а) и Anyang (б) для периодов повышенной солнечной активности,  $W \approx 120$  (1999-2000 гг.) и  $W \approx 70$  (1999-2000 гг.)

Известно, что основная разница между зимней и летней термосферой в том, что летом за счёт повышения нейтральной температуры термосфера расширяется, что вызывает в летней F2-области понижение концентрации атомного кислорода и перенос вверх газов, богатых молекулярным азотом и кислородом [7], то есть происходит общее уменьшение отношения  $[O]/[N_2]$ . Низкая концентрация  $[O]$  приводит к пониженному уровню ионообразования, а повышенные значения  $[N_2]$ ,  $[O_2]$  и температуры приводят к повышенным значениям коэффициента линейной

рекомбинации  $v$ . Реверс, сжатие термосферы и увеличение  $[O]/[N_2]$ , происходит в зимние месяцы. Это поведение модифицируется на высоких широтах, где нагрев в авроральной зоне за счёт высыпания энергичных частиц и конвективных электрических полей вызывает подъём газов также и в зимние месяцы, таким образом понижая отношение  $O/N_2$  зимой также, как и летом. Летом, когда приток тепла приходится на обширную площадь в течении длительного времени, создаётся общая циркуляция с господствующим меридиональным ветром из летнего полушария

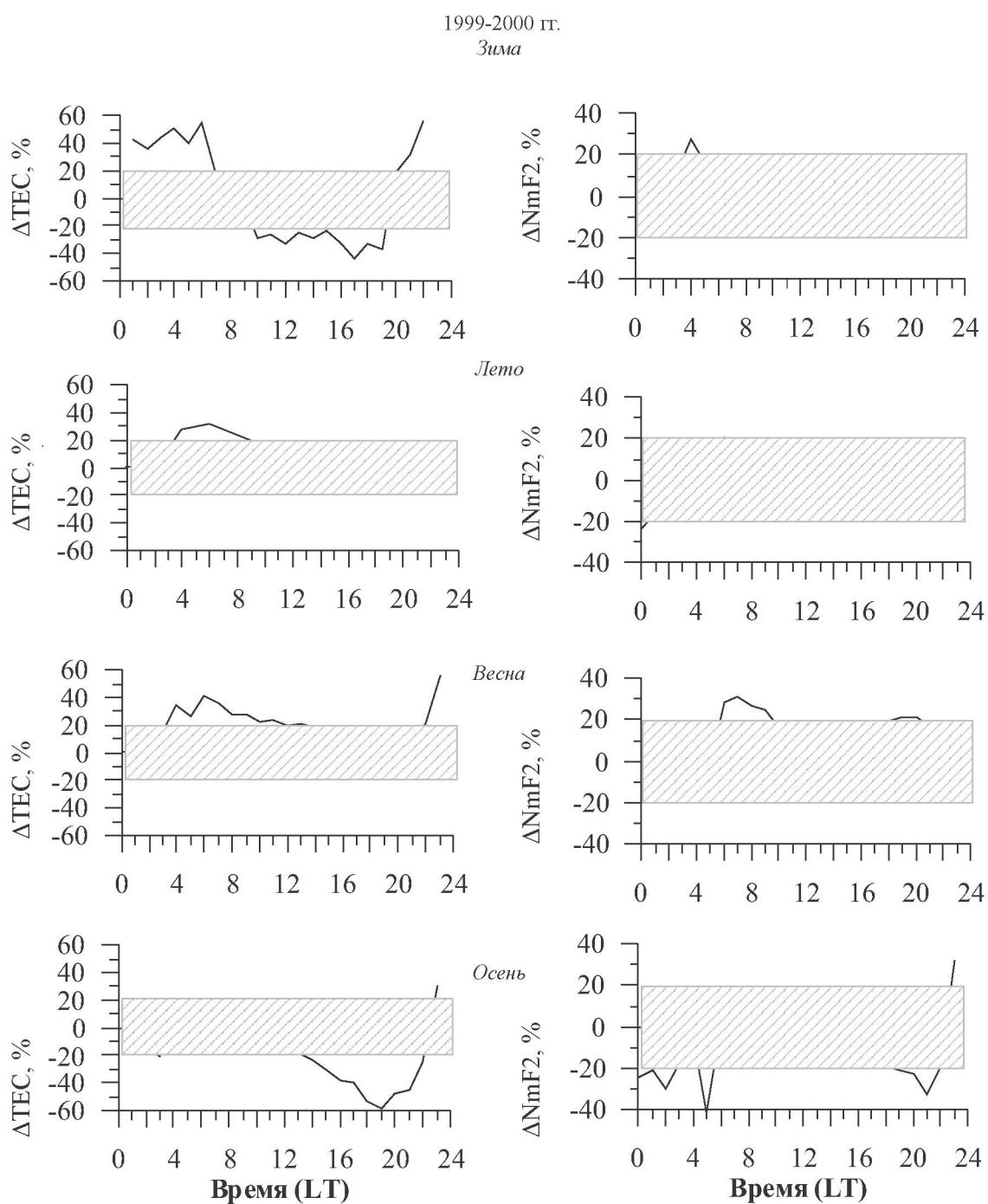


Рис. 4а. Суточные вариации степени расхождения наблюдаемых и модельных (IRI-2007) значений NmF2 и ТЕС для спокойных геомагнитных условий и четырёх сезонов 1999-2000 гг.

в зимнее со среднесуточной скоростью на высоте выше 200 км порядка 25 м/сек ( $\sim 20^\circ$  широты в день) на средних и низких широтах. Эти ветры, обогащённые азотом в результате подъёма воздуха на более высоких широтах в летнем полушарии, несут воздух на более низкие широты

летнего полушария, таким образом понижая отношение O/N<sub>2</sub> на своем пути. Зона опускания потока воздуха лежит в зимней полусфере несколько южнее зимнего аврорального овала. По мере перемещения процесс молекулярной диффузии восстанавливает распределение O и N<sub>2</sub> к своему

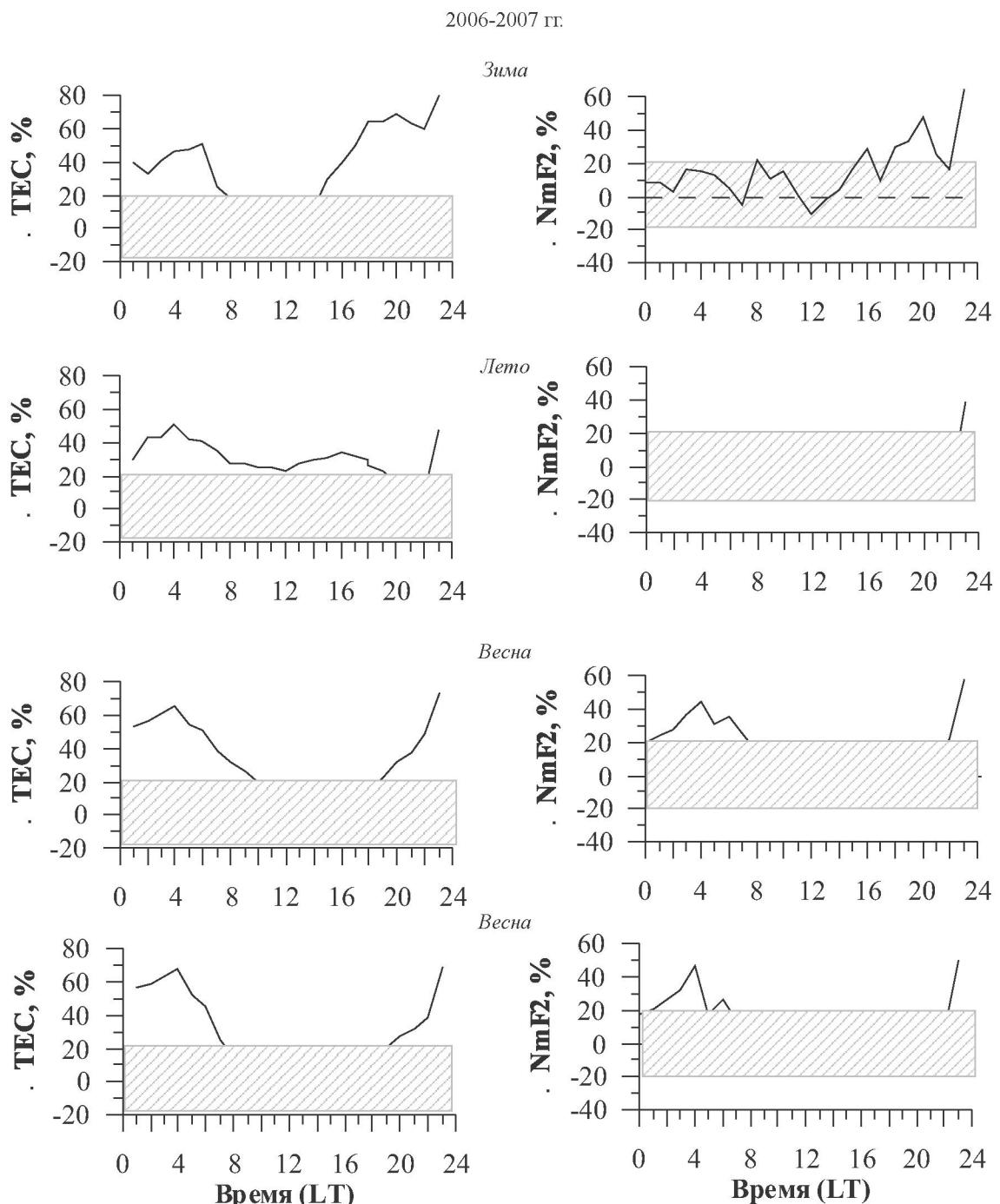


Рис. 46. Суточные вариации степени расхождения наблюдаемых и модельных (IRI-2007) значений NmF2 и ТЕС для спокойных геомагнитных условий и четырёх сезонов 2006-2007 гг.

нормальному состоянию, т. о. увеличивая отношение  $O/N_2$  в соответствии с условием гравитационного разделения. Этот процесс начинается на высоких уровнях и работает с постоянной времени  $t$  сначала быстро потом медленнее ( $h=227$  км,  $t=0.4$  час;  $h=127$  км,  $t=22$  час; [5]). После 1-5 дней «путешествия» от лета к зиме в потоке восстанавливается полное диффузионное разделение

ние. То есть, фактически, в зимнюю полусферу переносится [O]. Всё это приводит к более низким дневным значениям NmF2 летом по сравнению с зимой, то есть к известной сезонной аномалии F2-слоя в дневное время. Для ночного времени сезонной аномалии не наблюдается, что объясняется разницей в суточных вариациях термосферного ветра зимой и летом [7].

**В равноденствие** поток солнечного ультрафиолета наибольший на низких широтах. Это вызывает устойчивый подъём воздуха днём, сопровождаемый направленным от экватора к полюсу термосферным ветром, который уравновешивается (сбалансируется) подобным устойчивым опусканием (нисходящим движением) воздуха ночью, сопровождаемым направленным от полюса к экватору термосферным ветром. Из-за большой постоянной времени для термосферного состава, в конечном итоге постоянного возмущения термосферного состава на низких и средних широтах нет, а преобладает режим диффузационного равновесия. Как результат, термосфера в целом более молекулярна в солнцестояние, чем в равноденствие. Принимая во внимание хорошо известный факт связи электронной плотности F2 слоя с отношением  $[O]/[N_2]$  – специй нейтрального газа, это объясняет полугодовой эффект в NmF2, который превалирует на низких и средних широтах.

Что касается *предвосходных пиков в суточных вариациях ионосферной толщины*, то об этом сообщалось во многих работах (см. [1] и ссылки). Эти явления наблюдались как на низких, так и на средних широтах, как в условиях минимума, так и максимума солнечной активности, преимущественно во время зимнего сезона [10], во время всех трёх сезонов от низких до высоких широт преимущественно в условиях минимума солнечной активности [1, 2]. Существуют теории, объясняющие это широко наблюдаемое явление, полагающие, что предвосходный пик в значениях  $\tau$  образуется за счёт: опускания ионосферы в результате ослабления или обращения (реверса) нейтральных ветров, поддерживающих ночную ионосферу [11]; более раннего восхода Солнца в области выше F2 слоя, что вызывает более ранний процесс фотоионизации и, соответственно, рост содержания электронов в этой области в то время, как NmF2 всё ещё убывает [1, ссылки]; значительного вниз направленного потока  $H^+$  в предвосходные часы зимой, который может понизить переходный уровень  $[O^+] = [H^+]$ , эквивалентный максимуму F2-слоя, тем самым увеличивая значения  $\tau$  [12; 1, ссылки]. В нашем случае, как показано выше, образование предвосходного максимума значений  $\tau$  обнаруживается для летних и зимних сезонов независимо от фазы солнечного цикла и равноден-

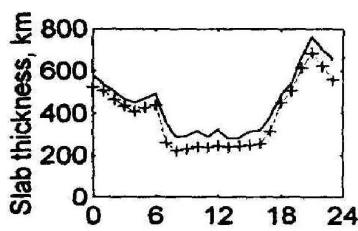
ственного сезона в фазе максимума солнечной активности, что в большой мере подтверждает результаты исследований [1, 2] и лишь в некоторой степени – результаты [10]. Из всего этого можно заключить, что появление пика  $\tau$  в предвосходные часы суток это результат комплекса сложных процессов, контролирующих распределение электронной концентрации в ионосфере, зависящих, в свою очередь, от времени суток, сезона, солнечной активности, географических координат и определяющих динамику ионосферы.

В связи с этим *сопоставим полученные нами результаты* об особенностях сезонных 5 приведено сопоставление полученных нами (рис. 5а) вариаций  $\tau$  для трёх сезонов (зима, лето, равноденствие) и двух уровней солнечной активности с вариациями  $\tau$  для среднеширотной станции Боулдер (рис. 5б), удалённой от станции Алма-Ата на  $\sim 180^\circ$  по долготе. Обнаруживается: 1) достаточно хорошее в количественном и качественно отношении соответствие суточных вариаций для зимних и равноденственных условий в период минимума солнечной активности; 2) достаточно близкое соответствие для равноденственных и летних условий в фазе максимума солнечной активности за исключением того факта, что на ст. Алма-Ата наблюдается выраженный предвосходный максимум  $\tau$ , а на ст. Боулдер нет; 3) полное несоответствие характера суточного хода  $\tau$  летом при низкой солнечной активности и зимой при высокой солнечной активности (несоответствиеочных значений  $\tau$ ). Для справки соответствующие значения  $\tau$  для ст. Боулдер приведены в таблицах 1 и 2.

Далее, проведено сопоставление полученных нами сезонных вариаций TEC, NmF2 и  $\tau$  с аналогичными результатами для среднеширотной станции Anyang (Корея, [3]), удалённой от ст. Алма-Ата на  $\sim 51^\circ$  по долготе (рис. 3, правая панель). Здесь можно сделать следующее заключение: 1) по данным обеих станций наблюдается выраженная годовая (или сезонная) аномалия в вариациях NmF2, заключающаяся, как уже обсуждалось, в превышении зимних дневных ( $\sim 9 \div 17$  LT) значений NmF2 относительно летних значений; 2) отсутствие годовой аномалии в значениях полного электронного содержания для региона ст. Алма-Ата и некий намёк на годовую аномалию в значениях TEC для региона ст. Anyang, где превышение зимних значений TEC, составляющее

Сезон  
Год

1985  
Боулдер

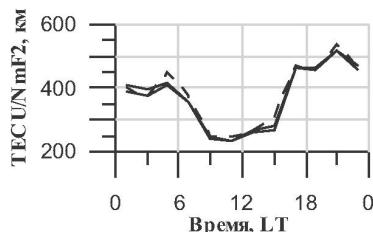


Зима

Равноденствие

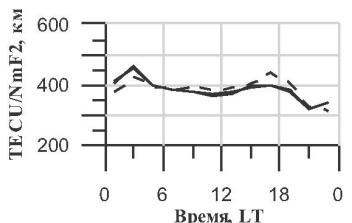
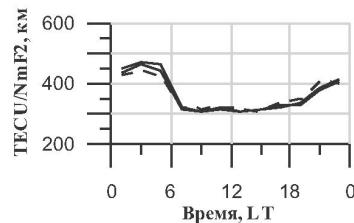
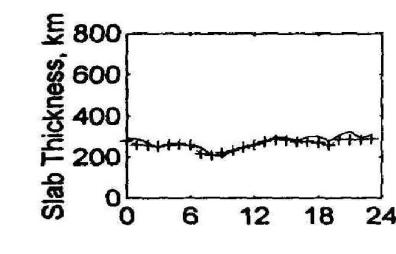
Лето

2006-2007  
Алма-Ата

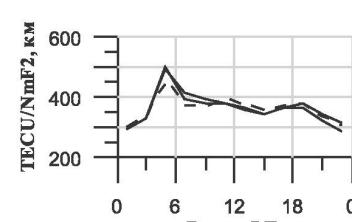
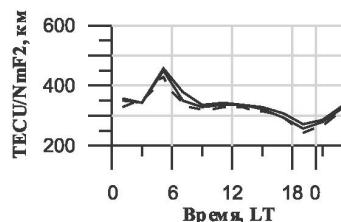
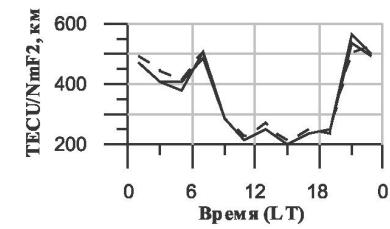


а

1981  
Боулдер



1999-2000  
Алма-Ата



б

Рис. 4. Пример сопоставления сезонной зависимости суточных вариаций ионосферной толщины по данным станций Алма-Ата и Боулдер для периодов низкой (а) и высокой (б) солнечной активности

порядка 5-16%, наблюдается в интервале 10-12LT; 3) тенденции в вариациях  $\tau$  на обеих станциях в общем плане согласуются для дневных (~9÷18LT) условий, в частности наименьшие значения  $\tau$  наблюдаются зимой, наибольшие – летом, хотя в значениях  $\tau$  есть существенные различия; в ночное время уровень значений  $\tau$  для ст. Алма-Ата гораздо выше.

Что касается результатов исследования соответствия наблюдаемых и модельных (IRI-200) суточных вариаций рассматриваемых параметров, то уместно упомянуть аналогичные исследования, предпринятые авторами работы [3], где по-

лучено, что для региона ст. Anyang модель IRI (версия 2001 г) значительно недооценивает значения NmF2 для ночного времени суток (00÷07, 21÷24LT) во все сезоны и переоценивает значения NmF2 для дневного времени (08÷20LT), подтверждая в некоторой степени наши результаты.

В результате такого обсуждения, можно сказать, что, во-первых, полученные нами результаты о сезонных вариациях NmF2, TEC и  $\tau$  во многом, по крайней мере по общим тенденциям, согласуются с аналогичными результатами, полученными другими авторами для схожих условий, что говорит о надёжности полученных результа-

тов и о глобальной стройности процессов, контролирующих состояние ионосферы. Однако наблюдаются и некоторые расхождения характера суточных ходов исследуемых параметров, что, возможно, обусловлено долготными эффектами и спецификой, в частности, данных по полному электронному содержанию ТЕС: Boulder – данные GOES-3, Alma-Ata – глобальные карты ТЕС, Anyang – локальная GPS- сеть. Во-вторых, что модель IRI недостаточно корректно отражает вариации NmF2 в области долгот 76-127°E, что, возможно, обусловлено малой плотностью станций ионосферного радиозондирования, данные которых лежат в основе алгоритма модели IRI.

**Заключение.** Таким образом, изучение сезонных вариаций суточного хода ионосферной толщины  $\tau$  показало следующее:

1. Для спокойных геомагнитных условий во время трёх сезонов (за исключением летнего) в фазе минимума солнечной активности и зимнего сезона в фазе максимума солнечной активности суточные вариации ионосферной толщины ( $\tau$ ) характеризуются более высокими значениями в ночное время по сравнению с дневными условиями.

2. Обнаруживается образование предвосходного максимума значений  $\tau$  для летних и зимних сезонов независимо от фазы солнечного цикла и равноденственных сезонов в фазе максимума солнечной активности.

3. Сопоставление суточных вариаций  $\tau$ , рассчитанных для ст. Алма-Ата, с соответствующими вариациями  $\tau$ , полученными для других среднеширотных станций, наряду с подобием, показывает некоторые различия в суточных вариациях  $\tau$ , что, возможно, объясняется различием в методиках получения данных о полном электронном содержании и долготной зависимостью факторов, определяющих характер глобального распределения электронной концентрации и, соответственно, характер вариаций ионосферной толщины.

4. Сопоставление суточных вариаций значений NmF2, ТЕС и  $\tau$  с вариациями соответствующих параметров, определяемых из модели IRI-2007 для рассматриваемых условий, показало, в основном, недостаточно корректное представление моделью IRI-2007 суточных вариаций как электронного содержания в максимуме F2-слоя, так и полного электронного содержания (особен-

но в ночное время суток, что, возможно, происходит за счёт некорректного представления профиля электронной концентрации во внешней ионосфере для ночных условий), что, видимо, и определяет несоответствие суточных вариаций ионосферной толщины, определяемой из модельных представлений, реальным.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Jayachandran B., Krishnankutty T.N., and Gulyaeva T.L.: Climatology of ionospheric slab thickness, *Ann. Geophysicae*, 22, 25-33, 2004.
2. Pusit Suvannasang, Noraset Wichaipanich, Nipa Leelaruji, Mamoru Ishii, and Pornchai Supnithi. The Variation of Ionospheric Slab Thickness at Thailand Equatorial Latitude Station. The 23<sup>rd</sup> International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC 2008).
3. Shuanggen Jin, Jung-Ho Cho, Jung-Uk Park. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 69 (2007) 1864-1870.
4. Mannucci, A.J., Wilson, B.D., Yuan, D.N., Ho, C.M., Lindqwister, U.J., Runge, T.F. A global mapping technique for GPS-derived ionospheric TEC measurements, *Radio Sci.*, 33(3), 565-582, 1998.
5. Rishbeth H., I.C.F. Muller-Wodard, L. Zou, T.J. Fuller-Rowell, G.H. Millward, R.J. Moffett, D.W. Idenden, A.D. Aylward. Annual and semiannual variations in the ionospheric F2-layer: II. Physical discussion. *Ann. Geophysicae* 18, 945-956 (2000).
6. Richards P.G. Seasonal and solar cycle variations of the ionospheric peak electron density: Comparison of measurements and models. *Journal of Geophysical Research*, vol. 106, No.A7, pp. 12,803-12,919; July 1, 2001.
7. Ivanov-Kholodny G.S. and A.V. Mikhailov. The prediction of ionospheric conditions. D. Reidel Publ. Co., Dordrecht, Holland, 1986.
8. Mikhailov A.V. and K. Schlegel. Equinoctial transitions in the ionosphere and thermosphere. *Annales Geophysicae* (2001) 19: 783-796.
9. Fuller-Rowell T.J. The “thermospheric spoon”: a mechanism for the semi-annual density variation. *J. Geophys. Res.*, 103, 3951-3956, 1998.
10. Minakoshi H. and I. Nishimuta. Ionospheric electron content and equivalent slab thickness at lower mid-latitudes in the Japanese zone. Proc. IBSS, University of Wales, U.K., 144, 1994.
11. Titheridge, J.E.: The slab thickness of the mid-latitude ionosphere, *Planet. Space Sci.*, 21, 1775, 1973.
12. Davies K., R.B. Fritz, and T.B. Gray. Measurement of columnar electron content of the ionosphere and plasmasphere. *J. Geophys. Res.*, 81, 2825, 1976.
13. Mitra A.P., B.C. Narasinga Rao and K.K. Mahajan. Determination of loss coefficient and vertical transport velocity in the ionospheric F-region. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physic*, 1967, v. 29, #1, pp. 43-59.
14. Ruster R. Solution of the coupled ionospheric continuity equations and the equation of motion for the ions, electrons and neutral particles. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physic*, 1976, v. 33, pp. 137-147.

15. Rastogi R.G.: Collapse of the equatorial ionosphere during the sunrise period, Ann. Geophysicae, 6, 205, 1988.
16. Minakoshi H. and Nishimuta I.: Ionospheric electron content and equivalent slab thickness at lower mid-latitudes in the Japanese zone, Proc. IBSS, University of Wales, U.K., 144, 1994.

### Резюме

Қазақстан аймағы үшін толық электрондық құрамын (TEC) максимум қабаттағы F2 (NmF2) электрондық концентрацияға қатынасы ретінде анықталатын ионосфералық т қабаттың тәуліктік өрекетінің маусымдық түрленімдері зерттелген.

Геомагниттік тынық жағдайлар (Ap 10) және күн белсенділігінің екі деңгейі қарастырылған, биік (1999-2000 жж., W » 120) және аласа (2006-2007 жж., W » 8).

IRI-2007 ионосферасының Халықаралық моделінің алынған нәтижелерінің сәйкестігіне баға берілген. Бақылаудағы ортаендеңдікті ионосфера өрекеті ерекшеліктерінің физикалық механизмдері талданған.

### Summary

The seasonal variability of the ionospheric slab thickness  $t$  defined as a ratio of the total electron content (TEC) to the maximum electron density of the F2-layer (NmF2) is studied for the Kazakhstan region. The diurnal variations of TEC, NmF2 and  $t$  are analyzed for a quite level of the geomagnetic field, two levels of solar activity ( $W \gg 8$  and  $W \gg 120$ ) and with respect to the IRI-2007 model.

Департамент «Институт ионосферы»,  
г. Алматы

Поступила 22.07.2009 г.