

УДК 550.388.2

ВАРИАЦИИ $foF2$ И $hmF2$ В КОНЦЕ 90-х И НАЧАЛЕ 2000-х ГОДОВ

© 2011 г. А. Д. Данилов

ГУ Институт прикладной геофизики им. академика Е.К. Федорова, Москва

e-mail: adanilov99@mail.ru

Поступила в редакцию 26.10.2010 г.

Рассмотрены немногочисленные имеющиеся данные об изменении основных параметров ионосферного слоя $F2$ $foF2(\text{зах} + 22)$ и $hmF2(\text{зах} + 2)$ в конце 90-х и начале 2000-х годов. Показано, что монотонный ход $hmF2(\text{зах} + 2)$, полученный в более ранних работах для периода после 1980 г., нарушается. Поведение $hmF2(\text{зах} + 2)$ со временем имеет более сложный характер с тенденцией уменьшения $hmF2(\text{зах} + 2)$ к началу нового века. Обнаружена статистически значимая связь $foF2(\text{зах} + 2)$ и $hmF2(\text{зах} + 2)$, которая подтверждает утверждение Ришбета о том, что критическая частота $foF2$ в первые часы после захода Солнца контролируется динамическими процессами через изменение высоты слоя $F2$. Обнаружено, что в конце исследуемого интервала есть тенденция отклонения от указанной зависимости. Это может указывать на то, что на величину $foF2$ начинают действовать изменения аэрономических параметров, вызванные общим охлаждением и оседанием термосферы. Обнаружено, что в летние месяцы величина $foF2(\text{зах} + 2)$ демонстрирует тенденцию систематического уменьшения от “граничной даты” к началу 2000-х годов.

1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема долговременных изменений (трендов) параметров средней и верхней атмосферы привлекает внимание исследователей уже второе десятилетие. Особое место в этой проблеме занимают поиски трендов параметров ионосферы, прежде всего – двух основных параметров ионосферного слоя $F2$ – критической частоты $foF2$ и высоты максимума $hmF2$. Автор неоднократно обращался к этой проблеме в своих публикациях. Не загружая статью подробной библиографией, отсылаем читателя к недавним публикациям [Данилов и Ванина-Дарт, 2010а; Danilov, 2010], где можно найти ссылки на предыдущие работы. Отметим лишь, что основным результатом серии работ автора явилось установление того факта, что после примерно 1980 г. (названного условно “граничной датой”) в поведении целого ряда параметров слоя $F2$ (отношение ночных и дневных величин $foF2$, разброс величин $hmF2$ относительно средней зависимости от индекса солнечной активности $F10.7$, поведение величины $foF2$ после захода Солнца и др.) наблюдаются систематические изменения со временем (тренды). Эти тренды были интерпретированы (подробнее см. указанные выше публикации) как результат долговременных изменений динамического режима термосферы из-за систематического охлаждения и опускания средней и верхней атмосферы благодаря увеличению количества парниковых газов [Laštovička, 2008; 2010].

Важным моментом данной работы является проблема нахождения исходных данных по $foF2$ и $hmF2$, используемых для поисков трендов. На многих ионосферных станциях глобальной сети ионосфер-

ного вертикального зондирования систематические наблюдения были начаты в период Международного Геофизического Года в 1957–1958 гг. Поэтому начало анализируемого ряда исходных данных проблем не вызывает. Хуже обстоит дело с концом этого ряда. В конце 80-х и начале 90-х годов прошлого века наблюдения на многих станциях стали вестись не столь регулярно, как до этого. Уменьшилось внимание к обработке данных, а, следовательно, и их качество. Некоторые ионосферные станции перестали давать данные своих наблюдений в мировые центры данных. Появились провалы в данных длиной в несколько лет. На некоторых станциях наблюдения стали вестись не ежечасно, а лишь 3–4 раза в сутки, что сделало данные этих станций непригодными для анализа ряда явлений.

Как результат, конец ряда исходных данных, пригодных для анализа долговременных трендов приходится на различных станциях на разные годы от середины 80-х годов до конца 90-х годов. Наиболее полные по нашему опыту данные приводятся в банках ионосферных данных в формате *iwg*, находящихся на сайте Международного Центра Данных в Боулдере (США) и выпущенных в 2000 г. на *CD* диске. Именно эти данные и являлись исходными при анализе трендов ионосферных параметров, как в упоминавшихся работах автора, так и в других исследованиях (см., например, [Bremer, 1998; Laštovička et al., 2006; Marin et al., 2001; Mikhailov, 2006; Ulich and Turunen, 1997]).

Очевидно, что все рассмотренные тренды, основанные на описанных выше данных, заканчивались в лучшем случае во второй половине 90-х годов. Если, как это делалось автором (см. [Данилов и Вани-

на-Дарт, 2010а] и приведенные там ссылки), для уменьшения разброса данных использовалось сглаживание за 11 лет, получаемый ряд сглаженных данных заканчивался еще на 5 лет раньше.

Таким образом, представления о долговременных трендах параметров слоя $F2$, полученные в указанных выше работах автора и других исследователей, относятся в основном к 80-м годам и первой половине 90-х годов прошлого века. Представляет несомненный интерес дальнейшее поведение основных параметров слоя $F2$ — $foF2$ и $hmF2$ хотя бы во второй половине 90-х и первой половине 2000-х годов.

Мы не будем здесь подробно останавливаться на проблеме поиска данных вертикального зондирования для указанного периода, ограничившись замечаниями, которые уже сделаны выше. Отметим лишь, что наибольшие трудности встречаются при поиске данных по высоте слоя $hmF2$. Во-первых, сами величины $hmF2$ в указанных банках не приводятся. Приводится лишь величина коэффициента $M3000$, которую приходится пересчитывать одним из методов (мы использовали метод Шимазаки [Shimazaki, 1995]) в величины $hmF2$. Во-вторых, данные по $M3000$ приводятся гораздо менее регулярно, чем данные по $foF2$. Наличие значительных пропусков в данных по $M3000$ в *iwg* формате делает невозможным работу программ, разработанных для выбора необходимых рядов непрерывных данных из *iwg* файлов, а, следовательно, и поиск трендов.

В данной работе описываются результаты анализа поведения $foF2$ и $hmF2$ на 5-ти ионосферных станциях, для которых в файлах *iwg* формата удалось найти относительно непрерывные ряды данных по $foF2$ и $M3000$ для периода с 1958(1957) по 2005—2007 гг.

2. ПОВЕДЕНИЕ ВЫСОТЫ СЛОЯ $F2$

Напомним, что в недавней работе Данилова и Ваниной-Дарт [2010б] были приведены тренды величины $hmF2$ для 14-ти станций. Анализ базировался на массивах данных, обсужденных выше, а потому заканчивался серединой 90-х годов.

Анализ трендов $hmF2$ и $foF2$ проводился в указанной работе для момента $T(\text{зах} + 2)$ — через два часа после захода Солнца. Основная предпосылка такого подхода подробно рассматривалась в предыдущих публикациях и состоит в том, что тренды параметров слоя $F2$ могут вызываться главным образом трендами термосферной динамики — горизонтального ветра на высотах области F . Горизонтальный ветер вызывает вертикальный дрейф плазмы, в результате чего меняется высота слоя $F2$ (непосредственно) и критическая частота слоя, $foF2$, (опосредованно из-за перемещения слоя в область более быстрой, или более медленной рекомбинации). Согласно Ришбету [Rishbeth, 1998] влия-

ние ветров на состояние слоя $F2$ максимально через 1—2 часа после захода Солнца. Мы вернемся к этому вопросу ниже в параграфе 3.

Один из результатов работы [Данилов и Ванина-Дарт, 2010б] состоит в том, что получены тренды $hmF2(\text{зах} + 2)$ разного знака для разных ионосферных станций. На первый взгляд, неизбежно предположение, что в разных географических областях изменения ветров могут происходить в противоположном направлении. Однако, следует помнить, что величина $hmF2(\text{зах} + 2)$ реагирует на изменение вертикального дрейфа плазмы в слое $F2$, индуцированного горизонтальными ветрами. Но изменения зонального и меридионального ветра могут происходит в результате изменений в термосферной циркуляции, вызванных охлаждением и оседанием верхней атмосферы (см. выше), по-разному в разных географических пунктах. Влияние этих изменений на скорость вертикального дрейфа также различно и зависит от магнитного склонения D и наклона I в данной географической точке. Поэтому очевидно, что эффекты дрейфа разного знака в разных пунктах (на разных станциях) могут возникать при изменении как зонального, так и вертикального ветра в одну и ту же сторону на всех станциях. Иначе говоря, разные знаки трендов $hmF2(\text{зах} + 2)$ не требуют обязательного предположения о “пятнистом” характере трендов каждой компоненты горизонтального термосферного ветра. “Пятнистая” структура трендов $hmF2(\text{зах} + 2)$ может отражать различное соотношение вклада трендов меридионального и зонального ветра в точках с разными величинами D и I .

В данной работе мы применяли тот же метод нахождения трендов $hmF2$ и $foF2$, что и в предыдущих работах. Сначала строилась зависимость анализируемого параметра от индекса солнечной активности $F10.7$, а затем анализировалась разность между наблюдаемыми и даваемыми этой зависимостью величинами $\Delta hmF2$ или $\Delta foF2$. Как и ранее, рассматривались два сезона: зима (среднее за январь и февраль) и лето (среднее за июнь и июль).

Полученное для указанных пяти станций изменение $\Delta hmF2$ со временем приведено на рис. 1 и 2. Каждая точка представляет собой результат скользящего сглаживания с окном в 11 лет. Поэтому, хотя формально точки на рисунках кончаются в 2001—2002 гг., реально использованные данные наблюдений “дотягиваются” до 2005—2007 г.

Как видно из указанных рисунков, поведение $hmF2$ после “граничной даты” носит сложный характер. Кривые изменения $\Delta hmF2$ немонотонны, несмотря на примененное усреднение. Это является, видимо, результатом, как неоднородности данных, так и сложного влияния на высоту слоя $F2$ изменений ветрового режима термосферы, о котором говорилось выше. В ряде случаев (Москва (оба сезона), Юлиусру (январь—февраль), Томск (январь—

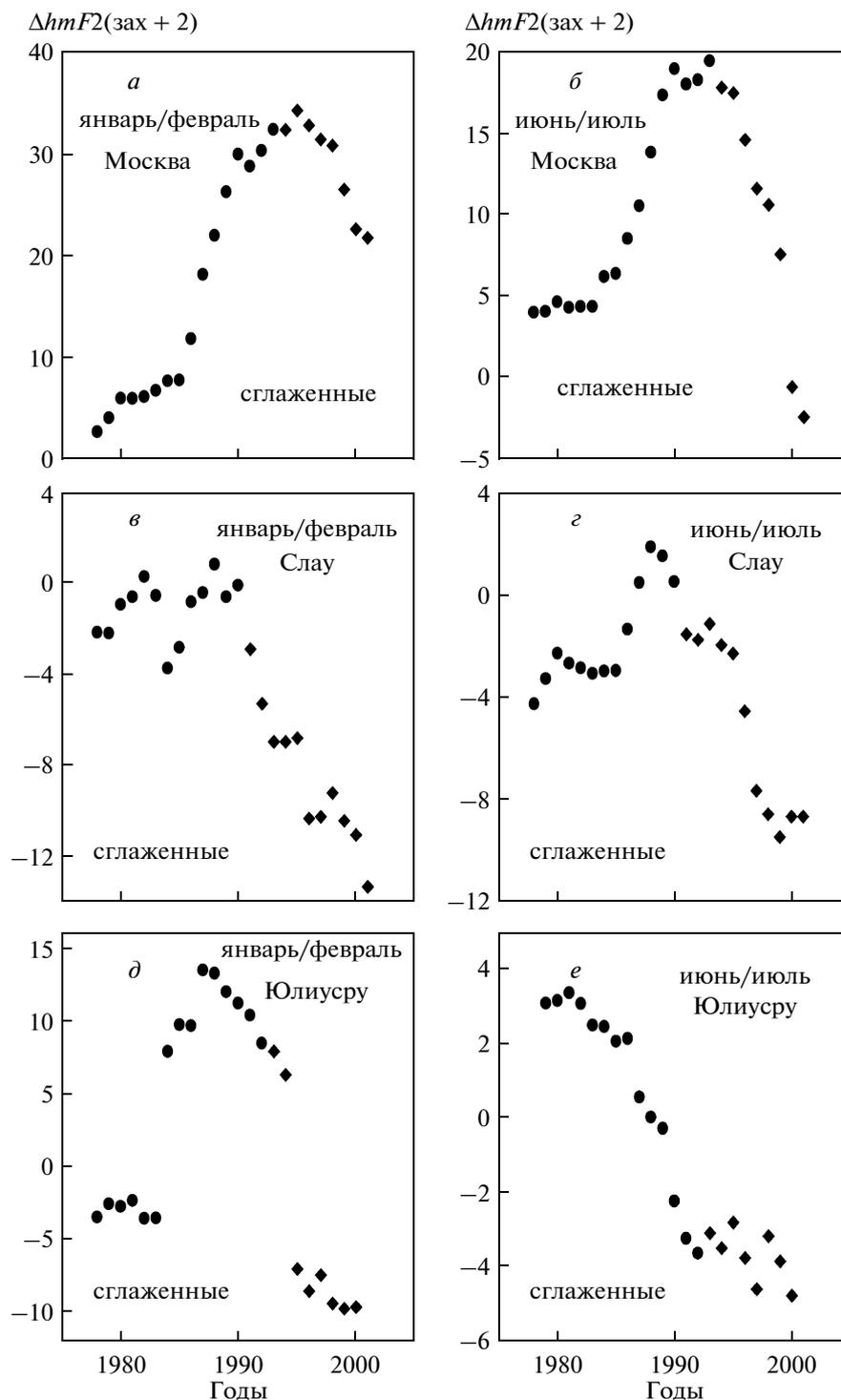


Рис. 1. Изменение со временем величины $hmF2(зах + 2)$ для трех станций.

февраль)) имеет место хорошо выраженный максимум в 1990–1995 гг. В двух случаях (Юлиусру (июнь–июль) и Ташкент (июнь–июль)) наблюдается почти монотонное падение $hmF2$, начиная примерно с 1980 г. Общей особенностью всех 10-ти приведенных рисунков (небольшой разброс точек

на рисунке для Томска (июнь–июль) можно считать случайным) является то, что происходит хорошо выраженное падение $hmF2$ от 1990–1995 гг. к началу 2000-х годов. Этот вывод, хотя и основанный на относительно небольшом статистическом материале, представляется важным, поскольку позволяет су-

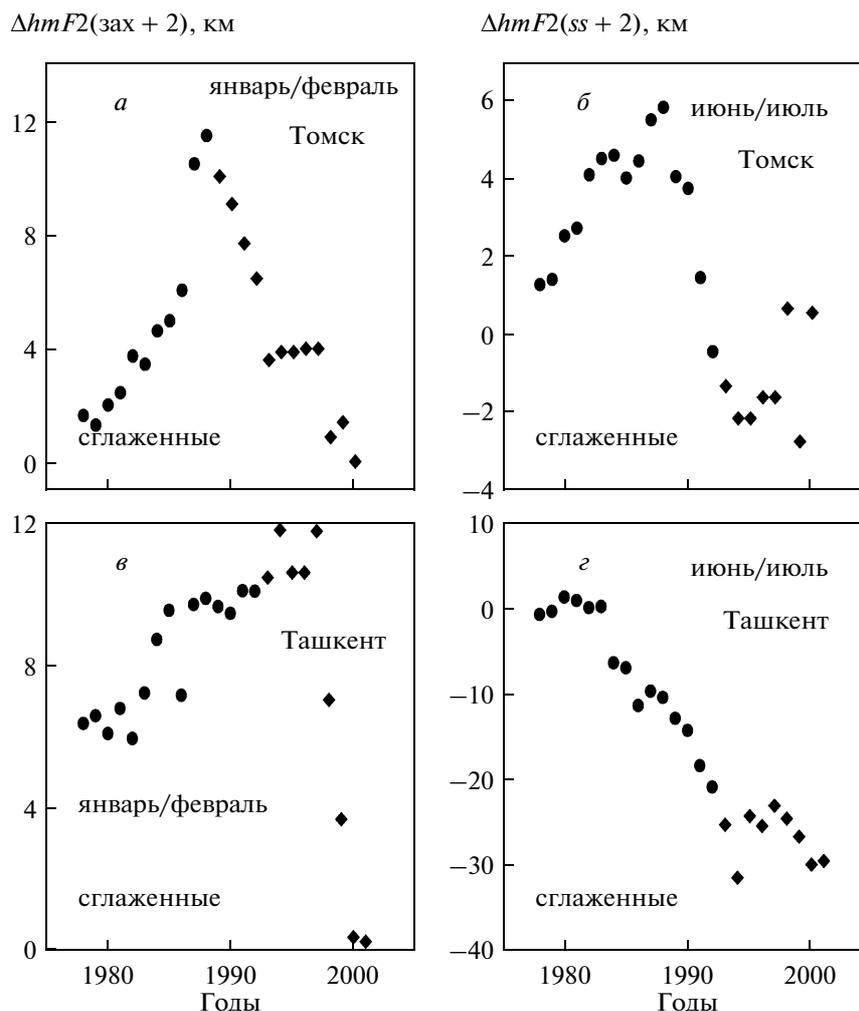


Рис. 2. Изменение со временем величины $hmF2(зах + 2)$ для двух станций.

дить о тенденции изменения $hmF2$ в последние годы прошлого и начале нынешнего века.

3. СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ $foF2$ И $hmF2$

Данилов и Ванина-Дарт [2010б] высказали предположение, что вариации двух параметров слоя $F2$, отношения критических частот $foF2(зах + 2)/foF2(14)$ и высоты $hmF2(зах + 2)$ должны коррелировать между собой. Отправной точкой этого предположения был тот факт, что величина $foF2(зах + 2)$ наиболее чувствительна к возможным изменениям горизонтальных ветров в термосфере (см. выше параграф 2). Усиление, или ослабление горизонтального ветра через индуцированный им вертикальный дрейф поднимает, или опускает максимум слоя $F2$ в область более слабой, или более сильной рекомбинации и тем самым влияет на величину $Ne(max)$, т.е. на $foF2$. Если это утверждение Ришбета [Rishbeth, 1998] верно, то между полученными трендами величин $foF2(зах + 2)/foF2(14)$ и $hmF2(зах + 2)$ должна на-

блюдаться прямая зависимость. Такая корреляция была Даниловым и Ваниной-Дарт [2010б], действительно, обнаружена.

Мы проверили указанное утверждение Ришбета для всего массива данных от начала до конца имеющихся для каждой из 5-ти станций данных, сравнивая непосредственно величины $foF2(зах + 2)$ и $hmF2(зах + 2)$. Результаты такого сравнения для 4-х из 10-ти ситуаций (станция + сезон) приведены на рис. 3. Как следует из этого рисунка, во всех рассмотренных случаях наблюдается хорошо выраженная линейная зависимость между $foF2(зах + 2)$ и $hmF2(зах + 2)$ с высоким коэффициентом определенности R^2 по критерию Фишера. О результатах сравнения для остальных 6-ти ситуаций можно судить по величинам R^2 , приведенным в таблице.

Величины R^2 , приведенные в таблице, говорят о том, что связь между $foF2(зах + 2)$ и $hmF2(зах + 2)$ существует со статистической значимостью не ниже 95% для всех рассмотренных случаев. Это явля-

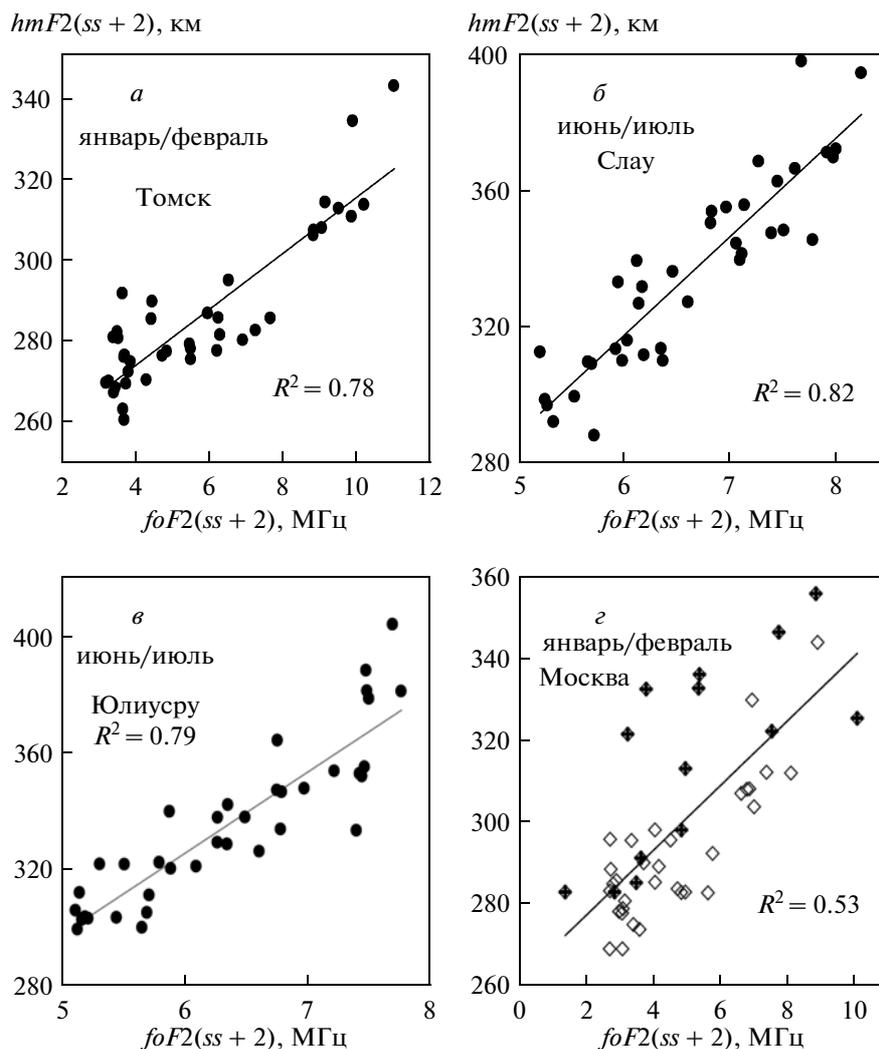


Рис. 3. Связь между $foF2(зах + 2)$ и $hmF2(зах + 2)$ для четырех станций.

ется экспериментальным подтверждением гипотезы Ришбета, основанной на физике области F_2 , о том, что в послезаходный период величина $foF2$ определяется, главным образом, динамическими процессами через изменение высоты максимума слоя F_2 . Этот вывод важен сам по себе, поскольку анализ поведения $foF2(зах + 2)/foF2(14)$ и $hmF2(зах + 2)$ в предыдущих работах был основан именно на указанной гипотезе.

Однако детальный анализ рис. 3 приводит к еще одному важному заключению. Линейная связь между $foF2(зах + 2)$ и $hmF2(зах + 2)$ лучше выражена в основной период рассматриваемого интервала (1958–1990 гг.) и ухудшается после примерно 1990 г. Для иллюстрации этого явления для одного случая (Москва, январь-февраль) на рис. 3г крестами помечены точки, соответствующие периоду после 1990 г. Легко видеть, что именно эти точки приводят на рис. 3г к относительно низкой величине $R^2 =$

$= 0.53$. Без них эта величина была бы равна 0.68. Разницу в поведении точек с крестами и без крестов на рис. 3г можно количественно выразить еще более наглядно. Среднеквадратичное отклонение σ точек от приведенной на рисунке зависимости после 1990 г. составляет 18 км, а до 1990 г. – 9.8 км. Аналогичный эффект наблюдается и для других станций и сезонов.

Коэффициенты надежности R^2 для связи между $foF2(зах + 2)$ и $hmF2(зах + 2)$

Станция	янв/фев	июнь/июль
Москва	0.51	0.58
Слау	0.32	0.82
Ташкент	0.52	0.58
Томск	0.78	0.66
Юлиусру	0.79	0.79

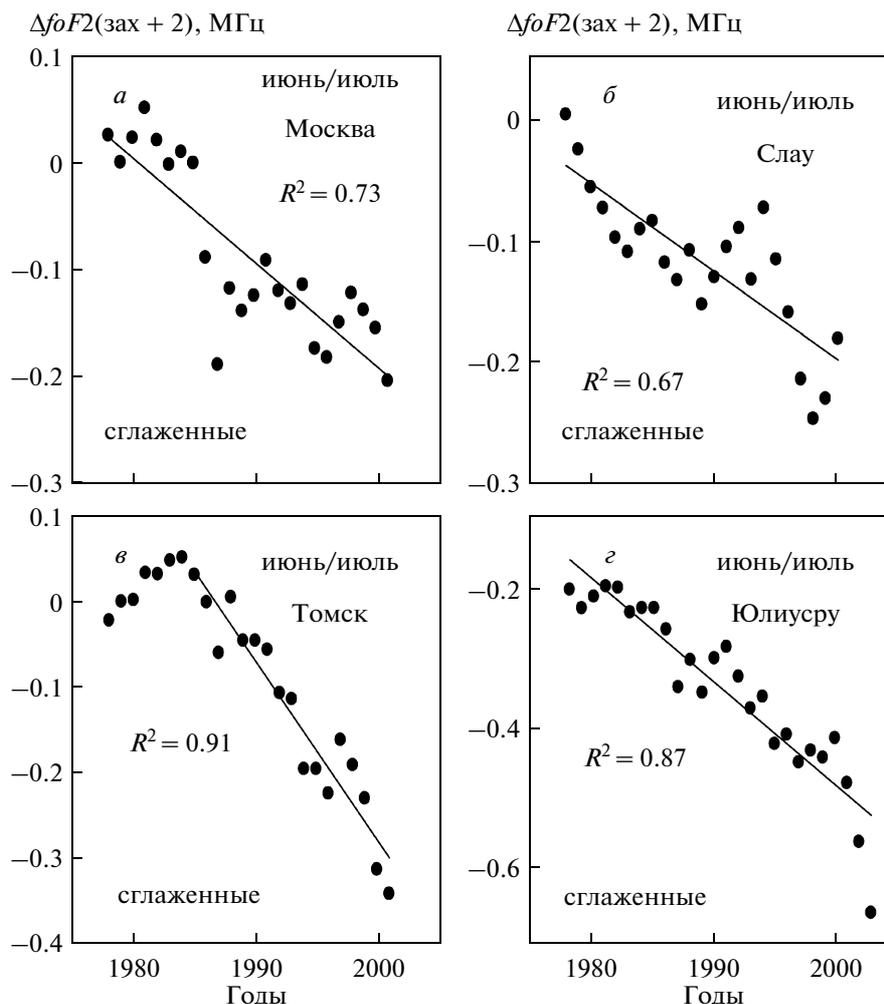


Рис. 4. Изменение $foF2(\text{зах} + 2)$ со временем в летний (июнь–июль) период.

нов. Например, для Ташкента соответствующие величины составляют 16 и 5.3 км для июня–июля и 19 и 10.5 км для января–февраля.

Полученный результат говорит, видимо, о том, что связь между $foF2(\text{зах} + 2)$ и $hmF2(\text{зах} + 2)$ начинает нарушаться около 1990 г. До этого времени, как показывают результаты, представленные на рис. 3 и полученные ранее Даниловым и Ваниной-Дарт [2010б], эта связь была достаточно хорошо выражена и отражала тот факт, что величина $foF2(\text{зах} + 2)$, действительно, определяется динамическими процессами, влияющими на нее через высоту $hmF2(\text{зах} + 2)$. Нарушение (или пока что – ухудшение) корреляционной связи может означать, что наряду с изменениями динамического режима термосферы из-за охлаждения и оседания последней происходят и какие-то изменения в фотохимических условиях формирования слоя $F2$.

Вопрос о том, как меняются (если они, действительно, меняются) фотохимические условия в области F в последние десятилетия, весьма сложен и тре-

бует анализа на гораздо большем статистическом материале, чем имелся в распоряжении автора. Однако, в следующем параграфе мы рассмотрим один факт, полученный на основании анализа тех же данных по $foF2(\text{зах} + 2)$ для указанных пяти станций.

4. ПОВЕДЕНИЕ СО ВРЕМЕНЕМ $foF2(\text{зах} + 2)$ В ИЮНЕ–ИЮЛЕ

Рисунок 4 показывает изменение величины $foF2(\text{зах} + 2)$ после “граничной даты” для четырех станций в июне–июле. Как видно из рисунка, для всех четырех станций наблюдается систематическое падение величины $foF2(\text{зах} + 2)$ от “граничной даты” до конца интервала имеющихся данных. Аналогичное поведение $foF2(\text{зах} + 2)$ со временем наблюдается в целом и для ст. Ташкент, хотя после 1996 г. разброс точек нарушает стройную картину падения $foF2(\text{зах} + 2)$ после 1980 г.

Для зимних данных (январь–февраль) такой стройной картины, как на рис. 4 не наблюдается.

Картина изменения $foF2(\text{зах} + 2)$ со временем оказывается более сложна и нерегулярна, за исключением первых 6–8 точек после “граничной даты”, которые и дали основание Данилову и Ваниной-Дарт [2010б] сделать выводы о трендах $foF2(\text{зах} + 2)/foF2(14)$. Природу и характер вариаций $foF2(\text{зах} + 2)$ в зимний период еще предстоит детально исследовать, однако, отсутствие выраженного хода $foF2(\text{зах} + 2)$ после 1985–1990 гг. в январе–феврале, на наш взгляд, имеет ту же природу, что и наличием такого хода в июне–июле. Рассмотрим этот вопрос подробнее.

Выше, в параграфе 2 мы уже говорили о том, что ухудшение корреляции между $foF2(\text{зах} + 2)$ и $hmF2(\text{зах} + 2)$ после 1990–1995 гг. (см. рис. 3) может свидетельствовать о том, что не только изменения в динамическом режиме термосферы могут влиять на тренды критической частоты слоя $F2$ после захода Солнца. В серии предыдущих работ (см. соответствующую библиографию в работе Данилова и Ваниной-Дарт [2010а]) наблюдаемые долговременные вариации параметров слоя $F2$ в период от “граничной даты” до середины 90-х годов находили свое объяснение в рамках предположения о том, что изменение вертикального дрейфа плазмы из-за изменения термосферной циркуляции является основной причиной этих вариаций. Не возникало необходимости вводить предположения об изменении аэрономических характеристик слоя $F2$. Однако, указанное выше нарушение корреляции между $foF2(\text{зах} + 2)$ и $hmF2(\text{зах} + 2)$ дает серьезные основания полагать, что такие изменения происходят в более поздней части рассмотренного периода (в конце 90-х–начале 2000-х годов).

Наиболее вероятным кандидатом на роль аэрономического параметра, приводящего к указанным нарушениям является, видимо, температура нейтрального газа T . Охлаждение термосферы означает как раз падение T . Температура влияет на ионизационно-рекомбинационный цикл в области $F2$ через линейный коэффициент рекомбинации β , который от нее зависит через температурную зависимость констант хорошо известных ионно-молекулярных реакций $O^+ + N_2(\gamma_1)$ и $O^+ + O_2(\gamma_2)$. Зависимость констант γ_1 и γ_2 от температуры далеко не проста. Еще более сложен суммарный эффект влияния T через γ_1, γ_2 и концентрации молекул на β . Не отвлекаясь на подробное обсуждение этой проблемы, мы отметим, что согласно недавней работе [Mikhailov and Perrone, 2011], где вопрос о роли различных аэрономических факторов, влияющих на изменение $NmF2$ рассмотрен подробно, при относительно низких зимних температурах термосферного газа на высотах области F влияние T на γ_1 должно быть мало. При высоких летних значениях T даже относительно небольшие изменения температуры могут приводить к суммарным заметным изменениям β . Например (см. табл. 3 в работе [Mikhailov and Perrone,

2011]), при падении T от 1141 до 909 К величина β растет с 2.9×10^{-4} до 4.7×10^{-4} . Нас, конечно, интересуют гораздо меньшие изменения температуры и β , но принципиальная возможность роста β с уменьшением T ясна.

Рост β , который может происходить летом, если систематически растет температура термосферы, будет влиять на величину $NmF2(\text{зах} + 2)$ из-за двух факторов. Во-первых, значения $NmF2(\text{зах})$ в момент захода (или в последний момент, когда еще выполняется условие фотохимического равновесия) должны становиться меньше по мере увеличения β . Во-вторых, поскольку мы рассматриваем момент через два часа после захода, увеличение β должно приводить к более сильному уменьшению $NmF2(\text{зах} + 2)$ по сравнению с $NmF2(\text{зах})$. Таким образом, два фактора, работая в одну сторону, могут приводить к наблюдаемому систематическому уменьшению $foF2(\text{зах} + 2)$, если действительно (как это следует из неоднократно упоминавшейся выше концепции) происходит увеличение β из-за систематического уменьшения T .

Если этот эффект будет доминировать над эффектом изменения $hmF2(\text{зах} + 2)$, то мы получим именно ту картину, которую наблюдаем на рис. 4 – в целом падение $foF2(\text{зах} + 2)$ с нарушениями гладкой картины из-за влияния трендов $hmF2(\text{зах} + 2)$. В зимних условиях эффект уменьшения температуры в $NmF2(\text{зах} + 2)$ должен быть мал. В этом случае мы будем видеть в поведении $foF2(\text{зах} + 2)$ отражение поведения $hmF2(\text{зах} + 2)$, которое, как показывает рис. 1, носит нерегулярный характер. Следовательно, нерегулярным должен быть и временной ход $foF2(\text{зах} + 2)$ после 1990–1995 гг. в зимний период, что и получено в данной работе.

Как видно из рис. 4, уменьшение величины $foF2(\text{зах} + 2)$ невелико – 02–04 МГц за 20 лет. К сожалению, пока невозможно сравнить эту величину с тем, что должно наблюдаться из-за охлаждения термосферы, поскольку эффект охлаждения известен только качественно. Можно лишь говорить о том, что полученный в данной работе результат является еще одним косвенным подтверждением указанной концепции оседания и охлаждения средней и верхней атмосферы.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе сделана попытка “заглянуть” в плане изучения трендов параметров ионосферного слоя $F2$ за грань нового века. В силу ограниченности массивов данных вертикального зондирования в международных банках данных, большинство предыдущих исследований позволяло судить лишь о поведении $foF2$ и $hmF2$ в лучшем случае до середины 90-х годов. Данные по $foF2$ и $hmF2$, которые удалось найти до 2005–2007 гг. для пяти ионосферных станций, позволяют считать, что в конце 90-х и на-

чале 2000-х годов характер долговременных вариаций обоих параметров изменяется. Насколько правильны полученные здесь выводы о характере этих изменений и как они будут развиваться далее, можно будет утверждать только получив более полные массивы экспериментальных данных, удовлетворяющие всем требованиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Данилов А.Д., Ванина-Дарт Л.Б. Тренды параметров ионосферного слоя $F2$ как индикатор трендов термосферной динамики // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 50. № 2. С. 195–208. 2010а.
- Данилов А.Д., Ванина-Дарт Л.Б. Поведение $foF2$ и $hmF2$ после захода Солнца. Геомагнетизм и аэрномия, Т. 50. № 6. С. 825–832. 2010.
- Bremer J. Trends over the ionospheric E and F regions over Europe // Ann. Geophysicae. V. 16. P. 986–996. 1998.
- Danilov A.D. Trends of parameters of the ionospheric $F2$ layer as an indicator of trends in thermospheric winds / Aeronomy of the Earth's Atmosphere and Ionosphere – IAGA Springer Book, (accepted). 2010.
- Laštovička J. et al. Long-term trends in $foF2$: a comparison of various methods. // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 68. P. 1854–1870. 2006.
- Laštovička J., Akmaev R.A., Beig G. et al. Emerging pattern of global change in the upper atmosphere and ionosphere. // Ann. Geophysicae. V. 26. № 5. P. 1255–1268. 2008.
- Laštovička J. Long-term trends in the upper atmosphere – recent progress / Aeronomy of the Earth's Atmosphere and Ionosphere – IAGA Springer Book, (accepted). 2010.
- Mikhailov A.V. Ionospheric long-term trends: If the geomagnetic control and the greenhouse hypotheses can be reconciled? // Ann. Geophysicae. V. 24. P. 2533–2541. 2006.
- Mikhailov A.V., Perrone L. On the mechanism of seasonal/solar cycle $NmF2$ variations: A quantitative estimate of the main parameters contribution using ISR observations // J. Geophys. Res. V. 116. 2011. doi: 10.1029/2010JA016122.
- Marin D., Mikhailov A.V., de la Morena B.A., Herraiz M. Long-term $hmF2$ trends in the Eurasian longitudinal sector on the ground-based ionospheric observations // Ann. Geophysicae. V. 19. P. 761–772. 2001.
- Rishbeth H. How the thermospheric circulation affects the ionospheric $F2$ layer // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 60. P. 1385–1402. 1998.
- Shimazaki T. World wide daily variations in the height of the maximum electron density in the ionospheric $F2$ layer // J. Radio Res. Labs. (Japan). V. 2. P. 85–97. 1995.
- Ulich T., Turunen E., Evidence for long-term cooling of the upper atmosphere in ionospheric data // Geophys. Res. Lett. V. 24. № 9. P. 1103–1106. 1997.