

УДК 350.385

ВАРИАЦИИ $foF2$ В КОНЦЕ 90-х И НАЧАЛЕ 2000-х ГОДОВ ПО ДАННЫМ СИСТЕМЫ SPIDR

© 2012 г. А. Д. Данилов, А. В. Константинова

ФГБУ Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова Росгидромета, г. Москва
e-mail: adanilov99@mail.ru

Поступила в редакцию 27.11.2011 г.

Рассмотрены вариации критической частоты слоя $F2$ на 22-х ионосферных станциях в период 1990–2010 гг. по данным системы SPIDR. Получено подтверждение отрицательных трендов $foF2$ для семи станций, рассмотренных одним из авторов ранее на основании медианных данных. Обнаружено, что наблюдаются как отрицательные (падение $foF2$ со временем), так и положительные (рост $foF2$ со временем) тренды критической частоты. Для более поздней части рассмотренного периода (после 1997 г.) отрицательные тренды доминируют. Этот факт свидетельствует, видимо, об увеличивающейся роли падения нейтральной температуры термосферы в формировании трендов $foF2$.

1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема трендов параметров ионосферного слоя $F2$ неоднократно рассматривалась одним из авторов (см., например, работы [Данилов, 2007; Danilov, 2009]). В работе [Данилов, 2011а] подчеркивается, что большинство исследований трендов $foF2$ и $hmF2$ проводились (как в работах одного из авторов, так и в других исследованиях) в основном на материале наблюдений до середины 90-х годов.

По очевидным причинам представляет большой интерес поведение указанных параметров в более поздний период. Увеличение в атмосфере Земли количества парниковых газов продолжается, и есть все основания предполагать, что усиливается эффект охлаждения и оседания средней и верхней атмосферы (подробнее см. работы [Laštovička, 2009; Qian et al., 2011]). Следовательно, должны меняться и тренды параметров слоя $F2$, вызванные этим эффектом. Косвенным подтверждением этому явился факт, отмеченный в работе [Zhang et al., 2011] по данным некогерентного рассеяния (НР). Согласно этой работе есть указания на то, что скорость уменьшения ионной температуры (отрицательного тренда T_i) в последние годы возросла.

Проблема нахождения данных вертикального зондирования на глобальной сети станций для первого десятилетия нового века подробно рассматривалась одним из авторов [Данилов, 2011б]. В банке, содержащем результаты вертикального зондирования в формате *iwg*, и на соответствующем CD диске, выпущенном в 2000 г., данных за более поздний период, естественно, нет. В работе [Данилов, 2011б] была сделана попытка определения трендов $foF2$ по медианным данным, которые имеются для ряда станций до более поздних лет (2004–2006 гг.). Но использование медианных данных страдает одним недо-

статком — нельзя избавиться от влияния геомагнитной активности, поскольку в месячные медианы вносят вклад и возмущенные в геомагнитном отношении дни.

В последнее время появилась возможность доступа к системе SPIDR (Space Physics Interactive Data Resource). В этой системе на момент написания данной статьи для ряда станций имеются данные вплоть до 2010 г. Эти данные представляют большой интерес, так как позволяют проследить тренды параметров ионосферного слоя $F2$ в первом десятилетии нового века. В данной работе приводится анализ трендов $foF2$ для станций, для которых удалось найти пригодные для анализа трендов ряды данных (подробнее см. в следующем разделе).

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Было найдено 18 ионосферных станций, для которых имеются данные по $foF2$ до 2009–2010 гг. Как и в предыдущих публикациях (см., например, [Данилов и Ванина-Дарт, 2008]), в работе применялся метод, при котором для периода 1958–1979 гг. строится зависимость $foF2$ от индекса $F10.7$, которая используется затем для последующих лет для устранения эффекта зависимости $foF2$ от солнечной активности.

Однако (см. табл. 1), только для трех станций (Юлиусру, Слау и Москва) данные в системе SPIDR имеются за весь интересующий нас период (1958–2010 гг.). Для остальных станций ряд данных в системе SPIDR начинается в различные годы, в основном, — в середине 90-х годов. Исключение составляют станции о-в Уоллопс (1967 г.) и Пойнт Аргуэлло (1978 г.). Поэтому анализ исходных данных для устранения эффекта солнечной активности требовал индивидуального подхода для каждой станции.

Для первых трех указанных станций ситуация была простой – для построения “калибровочных” кривых мы взяли данные SPIDR для 1958–1979 г. и, таким образом, работали с однородными массивами данных. В тех случаях, когда имелись данные в формате *iwg* с 1958 г. или ранее, мы их использовали сначала для построения “калибровочных” кривых (пример для ст. Хобарт приведен на рис. 1), а потом – для анализа трендов в период 1990–2010 гг. При этом “на стыке” лет, для которых имелись данные обоих типов, проводилась проверка соответствия данных для определенного года (скажем, 1995), взятых из разных источников. Как правило, согласие было вполне удовлетворительным, и различие лежало во втором знаке после запятой.

Случаи, когда данные в *iwg* формате начинались после примерно 1970 г., требовали особенно тщательного рассмотрения. Приходилось применять различные приемы. Например, для ст. о-в Уоллопс мы ограничились имевшимся интервалом лет 1967–1979 гг. (см. рис. 2). Количество точек при этом уменьшилось по сравнению с обычным, но статистическая надежность получаемой зависимости f_oF2 от $F10.7$ (коэффициент определенности R^2) оставалась достаточно высокой, обеспечивая высокую статистическую значимость аппроксимирующей кривой. Для ст. Пойнт Аргуэлло, для которой вообще нет данных до 1978 г. ни в одном из использованных банков данных, пришлось также ограничиться построением “калибровочной” кривой для одного солнечного цикла (1978–1989 гг.), “захватывая” при этом часть лет после “граничной даты” (подробнее см. в работе [Данилов, 2011б]), когда возможно уже влияние трендов.

Наконец, для станций Дайес и Афины, для которых нет ранних данных, пригодных для построения “калибровочных” кривых, мы брали “калибровочные кривые”, полученные на близких в географическом отношении станциях о-в Уоллопс и София, соответственно. Несомненно, все описанные выше отклонения от обычной процедуры избавления от эффектов солнечной активности, вызванные нехваткой данных для более ранних лет, могли вносить элемент неопределенности (или даже ошибки) в получаемые результаты (см. также ниже). Но другого способа проанализировать данные по f_oF2 вплоть до 2010 г. мы не нашли.

Выделение трендов f_oF2 из исходных данных оказалось гораздо более сложной процедурой, чем выделение трендов параметров слоя $F2$ в предыдущих работах, упоминавшихся выше. Прежде всего, для ряда станций имеются “дыры” в рядах данных длиной от 2–3 до 7–8 лет, что затрудняет построение непрерывного временного хода и делает невозможным 11-летнее усреднение, применявшееся в большинстве недавних работ по трендам слоя $F2$. Наличие отно-

Таблица 1. Поведение $f_oF2(\text{зах} + 2)$ и $f_oF2(14)$ для периода 1990–1997 гг. (лето)

Станция	Данилов [2011б]	SPIDR	Данилов [2011б]	SPIDR
	$f_oF2(\text{зах} + 2)$		$f_oF2(14)$	
Ташкент	падение		падение	
Томск	падение		падение	
Ростов	падение			
Новосибирск	падение		падение	
Москва	падение	падение	падение	падение
Слау	падение	падение	падение	падение
Юлиусру	падение	падение	падение	падение
Боулдер	падение	падение	падение	падение
Рим	падение	падение	падение	падение
О-в Уоллопс	падение	падение	рост	падение
Пойнт Аргуэлло	рост	рост	рост	рост
Грехемстаун		падение		падение
Дарвин		рост		рост
Ашхабад		рост		рост
София		рост		рост
Хобарт		рост		рост
Таунсвилл				падение
Гузбэй		рост		рост
Афины		рост		рост
Эбре		рост		рост

сительно коротких (7–8 лет) периодов, на которых резко менялся характер тренда, также затрудняло использование 11-летнего усреднения данных. Кроме того, для многих станций разброс точек (даже при отсутствии “дыр” и наличии непрерывных рядов данных) оказался гораздо сильнее, чем для данных периода до примерно 1995 г., анализировавшихся раньше. Это может быть вызвано частично качеством исходных данных и частично увеличением изменчивости f_oF2 в результате процессов, происходящих при охлаждении и оседании верхней атмосферы.

В свете сказанного, нам приходилось анализировать одновременно как несглаженные данные по f_oF2 , освобожденные от эффекта солнечной активности (Δf_oF2), так и результаты 11-летнего сглаживания. Следует подчеркнуть, что сглаживание (если временной интервал достаточно велик) позволяет определить основной параметр, который нас интересует в данной работе – направление (т.е. рост или падение) изменения f_oF2 на данном временном интервале. Мы нигде здесь не претендуем на даже приближенные количественные оценки величины тренда и ищем лишь направление изменения для каждой станции. Совокупность этих данных может позволить нам представить (см. ниже), как развиваются процессы в области F при развитии охлаждения и оседания верхней атмосферы. При этом мы должны все время иметь в виду, что для какой-то конкретной станции для данного временного интервала и сезона даже полученный

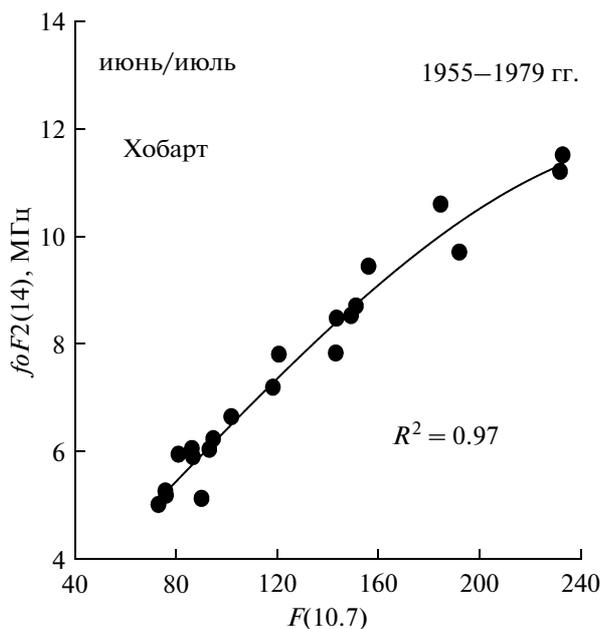


Рис. 1. Зависимость величины $foF2(14)$ от индекса солнечной активности $F10.7$ для ст. Хобарт. Точки – исходные данные, кривая – аппроксимация полиномом 3-й степени, используемая для избавления от эффекта солнечной активности в более поздние годы.

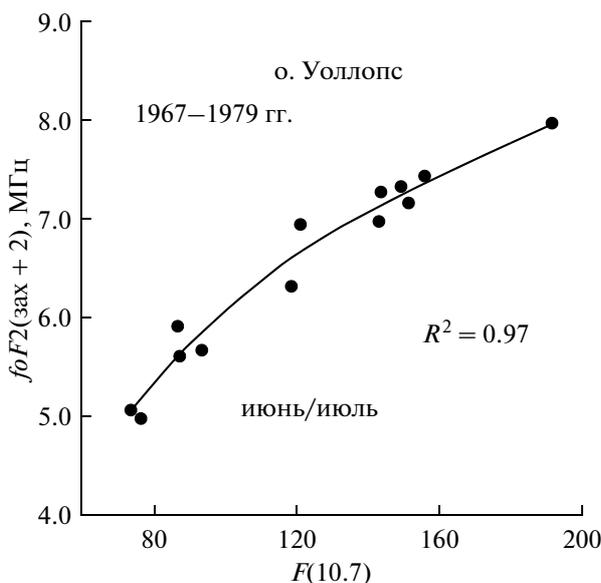


Рис. 2. То же, что на рис. 1, для $foF2(зах + 2)$ для ст. о-в Уоллопс.

качественный вывод может быть ошибочен, и только совокупная статистика количества случаев падения и роста $foF2$ позволяет сделать выводы, подробно обсуждаемые ниже.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Мы рассматриваем в данной работе характер изменения критической частоты слоя $F2$ за период 1990–2010 гг. Нижняя граница указанного ин-

тервала определяется тем фактом, что первое десятилетие после “граничной даты” (1980–1990 гг.) было подробно рассмотрено в предыдущих публикациях Данилова и Ваниной на основании данных в формате *iwg*. Предварительный анализ показал, что в большинстве случаев невозможно охарактеризовать изменение $foF2$ за весь рассматриваемый в этой работе период одним термином “падение” или “рост”. Для многих станций в районе 1997–1998 гг. наблюдается явно выраженная смена знака тренда. Пример такого изменения представлен на рис. 3 для ст. Дарвин. Поэтому мы рассматривали отдельно тренд $foF2$ для периодов 1990–1997 гг. и 1998–2010 гг. Как и в предыдущих работах, рассматривались величины $foF2$ для дневных условий ($LT = 14:00$) и для момента $T(зах + 2 ч)$ через два часа после захода Солнца. Причины выбора этих моментов времени обсуждались в наших работах неоднократно. Отметим просто, что днем мы считаем критическую частоту зависящей в основном от цикла фотохимических процессов, тогда как второй момент характеризуется наиболее сильным влиянием на $foF2$ динамических процессов [Rishbeth, 1998]. Как и в предыдущих публикациях, рассматривались летний (июнь–июль) и зимний (январь–февраль) периоды.

Мы свели результаты анализа в две таблицы. В таблице 1 рассматриваются только летние данные для периода 1990–1997 гг. и сравниваются поведение $foF2$, полученное в данной работе на основании данных системы SPIDR, и поведение критической частоты в работе [Данилов, 2011б], полученное на основании рассмотрения медианных значений $foF2$ для того же периода. Такое сравнение весьма важно, поскольку (как отмечалось в работе [Данилов, 2011б]) медианные данные дают среднемесячную характеристику и не позволяют избавиться от влияния дней с повышенной геомагнитной активностью (что всегда делается при работе с данными в формате *iwg* и системы SPIDR), а значит, и с возможными ионосферными возмущениями.

Станции в табл. 1 разбиты на три группы. Первые четыре станции рассматривались в работе [Данилов, 2011б], но для них не найдено данных в системе SPIDR. Следующие семь станций – это станции, для которых удалось провести анализ и на основании медианных данных в работе [Данилов, 2011б], и на основании данных из системы SPIDR. Наконец, для последних девяти станций не было медианных данных, и анализ удалось провести только по данным SPIDR.

Прежде всего, обратимся к станциям второй группы. Как видно из табл. 1, из 14-ти ситуаций (7 станций и два момента времени) только в одном случае (о-в Уоллопс, $foF2(14)$) данные SPIDR дали иной результат (падение вместо роста), чем медианные данные. В остальных 13-ти случаях результаты исследования на основании

двух банков данных полностью совпадают. Это служит подтверждением правильности полученных знаков трендов для периода 1990–1997 гг., поскольку принципиально различные данные взаимно подтверждают друг друга.

Рассмотрение соответствующих столбцов табл. 1 совместно показывает, что на разных станциях в рассматриваемый период наблюдается как рост, так и падение $foF2$ (зах + 2). То же можно сказать и о поведении в этот период величины $foF2$ (14). Мы вернемся к проблеме разных знаков тренда в следующем параграфе, а пока отметим лишь, что чисто статистически для периода 1990–1997 гг. (лето) преобладают отрицательные тренды $foF2$ для обоих рассмотренных моментов времени суток.

Поскольку в работе [Данилов, 2011б] по медианным данным не было найдено систематической зависимости $foF2$ (зах + 2) или $foF2$ (14) от времени для зимнего периода, табл. 2 построена иначе, чем табл. 1. В таблице 2 приводится характер измерения $foF2$ (зах + 2) и $foF2$ (14) после 1997 г. для летнего и зимнего периодов. В таблице 2 обращает на себя внимание тот факт, что летом в поведении $foF2$ (зах + 2) доминирует отрицательный тренд (падение). Лишь в четырех случаях из 18-ти наблюдается рост $foF2$ (зах + 2) со временем после 1997 г. Преобладание падения над ростом наблюдается и для $foF2$ (14), хотя соотношение здесь в пользу отрицательного тренда несколько иное: для 5-ти станций из 17-ти наблюдается положительный тренд.

Наконец, рассмотрим зимние условия. Привлечение данных SPIDR позволило для большинства рассмотренных станций получить характер трендов $foF2$ для периода 1990–1997 гг., однако общая картина остается неопределенной. Для ряда станций переход от падения к росту $foF2$ происходит не в районе 1997–1998 гг., а в другие временные моменты. Количество станций, для которых найден рост или падение $foF2$ (это справедливо и для 14:00 LT, и для $T = \text{зах} + 2$ ч) примерно одинаково, поэтому трудно судить о преобладающем характере тренда.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Данилов и Ванина-Дарт [2010] рассмотрели тренды высоты слоя $F2$, $hmF2$, для станций, для которых были найдены соответствующие данные в формате *iwg*.

Один из результатов работы [Данилов и Ванина-Дарт, 2010] состоит в том, что получены тренды $hmF2$ (зах + 2) разного знака для разных ионосферных станций. Возможные причины этого подробно обсуждается в указанной работе. Не повторяя этого обсуждения, приведем лишь окончательный вывод. Эффекты дрейфа разного знака в разных пунктах (на разных станциях) могут возникать при изменении как зонального, так и меридионального

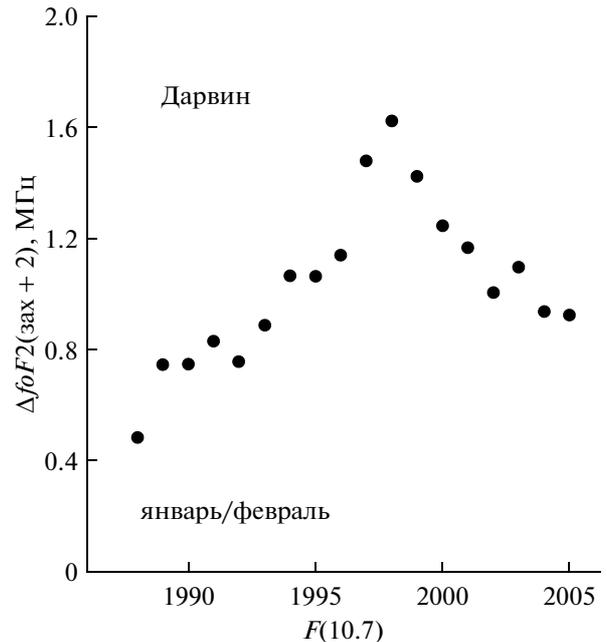


Рис. 3. Изменение сглаженных величин $\Delta foF2$ со временем для ст. Дарвин.

ветра в одну и ту же сторону на всех станциях. Иначе говоря, разные знаки трендов $hmF2$ (зах + 2) не требуют обязательного предположения о “пятнистом” характере трендов каждой компоненты горизонтального термосферного ветра. “Пятнистая” структура трендов $hmF2$ (зах + 2) может отражать различное соотношение вклада трендов меридионального и зонального ветра в точках с разными величинами D (магнитное склонение) и I (магнитное наклонение). Однако, как мы увидим ниже, пятнистая структура характерна для глобального распределения всех рассматриваемых здесь параметров.

Поскольку мы ожидаем существенный вклад динамических процессов через изменение высоты слоя $F2$ в величину $foF2$ (зах + 2), естественно считать, что полученные в этой работе разные знаки тренда $foF2$ (зах + 2), по крайней мере для периода 1990–1997 гг., связаны как раз с разным поведением $hmF2$.

С другой стороны, в работе [Данилов, 2011б] было высказано предположение, что на тренды $foF2$ в последние 10–15 лет начинает влиять уменьшение температуры термосферы, неизбежное при охлаждении и оседании верхней атмосферы. Данные измерений температуры методом некогерентного рассеяния [Zhang et al., 2011; Donaldson, 2010] подтверждают наличие такого уменьшения. Согласно работе [Zhang et al., 2011] уменьшение температуры T_n на высотах максимума слоя $F2$ составляет 2–4 К в год.

Высказывалось также предположение [Данилов, 2011б], что уменьшение температуры должно сильнее влиять на величины $foF2$ летом в силу

Таблица 2. Поведение $foF2(\text{зах} + 2)$ и $foF2(14)$ для периода после 1997 г.

Станция	Лето	Лето	Зима	Зима
	$foF2(\text{зах} + 2)$	$foF2(14)$	$foF2(\text{зах} + 2)$	$foF2(14)$
Москва	падение	падение		падение
Слау	падение	падение	рост	рост
Юлиусру	падение	падение	падение	падение
Боулдер	падение	рост	рост	рост
Рим	падение	падение	рост	падение
О-в Уоллопс	рост	падение	рост	падение
Пойнт Аргуэлло	падение	рост	падение	рост
Грехемстаун	падение	падение	рост	падение
Дарвин	падение	падение	рост	рост
Ашхабад	падение	рост	рост	рост ?
София	падение	рост	рост	рост
Хобарт	рост	рост	падение	рост
Таунсвилл	падение	падение	падение	падение
Гузбэй	рост	падение	падение	падение
Дайес	падение	падение	рост	рост
Брисбен	рост	падение	рост	рост
Афины	падение	падение		
Эбре	падение		падение	падение

специфики зависимости констант ионно-молекулярных реакций от температуры в разных интервалах T . Таким образом, на каждой станции на характер тренда $foF2$ влияют два принципиальных процесса – изменение динамических процессов (приводящее к изменению высоты $hmF2$) и уменьшение температуры.

Рассмотрим недавние расчеты по одной из наиболее совершенных моделей глобальной циркуляции (NCAR TIME-GCM) [Qian et al., 2011]. Согласно этим расчетам глобальная карта трендов зонального ветра (для случая удвоения количества CO_2) носит весьма пятнистый характер с характерными размерами “пятен” от 5 до 20° и с изменением трендов от -20 до $+20$ м/с.

Естественно, расчеты по той же модели и для тех же условий дают изменение высоты максимума слоя $F2$ от -10 до -40 км днем (12:00 LT) и от $+10$ до -40 км ночью (03:00 LT), причем это распределение трендов $hmF2$ по земному шару также носит существенно пятнистый характер.

Менее пятнистый, но все же неравномерный по земному шару характер носит рассчитанное в той же работе при тех же условиях изменение нейтральной температуры верхней атмосферы. На высотах слоя $F2$ рассчитанные тренды Tn меняются от -50 до -70° [Qian et al., 2011].

Поскольку оба процесса, влияющие на электронную концентрацию в максимуме слоя $F2$, $NmF2$, (тренды высоты слоя и температуры нейтралов), существенно неравномерно распределены по земному шару, невозможно ожидать и равномерного распределения трендов $foF2$. Это наглядно подтверждает рис. 3 в работе [Qian

et al., 2011], на котором тренды $NmF2$ в разных областях земного шара изменяются от 0 до -40% .

Таким образом, полученная в данной работе картина разного направления трендов $foF2$ на разных станциях вполне соответствует тому, что ожидается на основании современного моделирования. Разные знаки трендов $foF2$ отражают разный вклад в эти тренды на каждой конкретной станции изменений двух основных параметров – динамики термосферы (через высоту слоя $hmF2$) и температуру нейтрального газа (через константы фотохимических реакций). При этом следует иметь в виду, что, поскольку модельные расчеты сделаны для случая удвоения количества CO_2 (которое еще не произошло), а мы рассматриваем тренды в год на конкретных временных интервалах, никакое количественное сравнение результатов этих двух подходов невозможно.

Вернемся теперь к данным таблиц 1 и 2. Как мы уже отмечали выше, для летнего периода 1990–1997 гг. более характерным является падение (отрицательный тренд) $foF2$ как для момента $T(\text{зах} + 2)$, так и для 14:00 LT. В работе [Данилов, 2011б] высказано предположение, что отрицательные тренды $foF2$ в этот временной интервал связаны с уменьшением температуры Tn . Наличие станций, где в этот период наблюдается рост $foF2$ указывает, видимо, на то, что для ряда станций эффект динамических процессов оказывается сильнее эффекта уменьшения $foF2$ за счет падения Tn .

Поскольку падение температуры продолжается непрерывно, а картина динамических процессов сильно меняется, и горизонтальные ветры меняют знак (подробнее см. рис. 2 в работе [Qian et al., 2011]) следует ожидать, что с течени-

ем времени эффект падения f_oF2 должен доминировать все более и более. Согласно табл. 2 именно это и наблюдается для летних условий после 1997 г. Тот факт, что для этого периода зимой падение f_oF2 наблюдается существенно реже, чем летом, подтверждает наше предположение о том, что отрицательные тренды f_oF2 вызваны в основном падением нейтральной температуры. Как уже указывалось выше (подробнее см. в работе [Данилов, 2011б]), в силу характера зависимости констант ионно-молекулярных реакций (а следовательно и эффективного коэффициента рекомбинации β) от температуры температурный эффект должен гораздо сильнее сказываться летом, чем зимой.

Рост β , который может происходить летом, если систематически падает 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 (“рассасыванию”) $NmF2(\text{зах} + 2)$ относительно с $NmF2(\text{зах})$. Таким образом, два фактора, работая в одну сторону, могут приводить к наблюдаемому систематическому уменьшению $f_oF2(\text{зах} + 2)$, если происходит увеличение β из-за систематического уменьшения T .

Эффект уменьшения f_oF2 днем может быть слабее, чем в момент $T(\text{зах} + 2)$, поскольку днем величина β влияет только на фотохимическое равновесие, и нет эффекта “рассасывания” ионизации после захода, о котором говорилось выше. В нашем случае это проявляется в том, что летом для момента 14:00 LT в период после 1997 г. число станций, для которых наблюдается рост f_oF2 , чуть больше, чем для момента $T(\text{зах} + 2)$.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из проведенного анализа данных системы SPIDR следует несколько выводов. Во-первых (см. табл. 1) подтвердились результаты оценки трендов критической частоты слоя $F2$, полученные на основании медианных данных в работе [Данилов, 2011б] для периода 1990–1997 гг., для которого не было достаточно данных в формате iwg , анализировавшихся в более ранних работах одного из авторов.

Во-вторых, получено, что в период 1990–1997 гг. наблюдается как падение $f_oF2(\text{зах} + 2)$ и $f_oF2(14)$, так и рост этих параметров со временем. На наш взгляд, это свидетельствует о том, что два принципиальных процесса — тренды нейтральной температуры термосферы и тренды горизонтальных ветров — участвуют в формировании трендов f_oF2 .

В-третьих, в период после 1997 г. (см. табл. 2) летом доминируют отрицательные тренды. Это говорит о том, что продолжающееся падение нейтральной температуры термосферы становится все более определяющим фактором развития отрицательных трендов f_oF2 . Сравнение поведения $f_oF2(\text{зах} + 2)$ и $f_oF2(14)$ летом между собой и с аналогичным поведением зимой подтверждает предыдущее положение, так как эффект падения температуры должен наиболее сильно проявляться именно в трендах $f_oF2(\text{зах} + 2)$ и именно летом (см. выше).

Подчеркнем, что все описанные выше выводы носят качественный характер и основываются на статистике знаков трендов, получаемых на разных станциях, поскольку авторам пока не удалось найти надежных данных для количественного анализа трендов f_oF2 за период 1990–2010 гг.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект 11-05-00102-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Данилов А. Д. Временные и пространственные вариации отношения ночных и дневных величин критических частот слоя $F2$ // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 47. № 6. С. 751–760. 2007.
- Данилов А. Д. Вариации f_oF2 и $hmF2$ в конце 90-х и начале 2000-х годов // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 51. № 3. С. 325–332. 2011а.
- Данилов А. Д. Вариации f_oF2 в конце 90-х и начале 2000-х годов по медианным данным // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 51. № 6. С. 769–777. 2011б.
- Данилов А. Д., Ванина-Дарт Л. Б. Критические частоты f_oF2 как индикатор трендов термосферной динамики // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 48. № 6. С. 810–822. 2008.
- Данилов А. Д., Ванина-Дарт Л. Б. Поведение f_oF2 и $hmF2$ после захода Солнца // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 50. № 6. С. 825–832. 2010.
- Danilov A. D. Scatter of $hmF2$ values as an indicator of trends in thermospheric dynamics // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 71. № 14–15. P. 1586–1591. 2009.
- Donaldson J. K., Wellman T. J., Oliver W. L. Long term change in thermospheric temperature above Saint Santin // J. Geophys. Res. V. 115. A11305. doi:10.1029/2010JA015346. 2010.
- Laštovička J. Global pattern of trends in the upper atmosphere and ionosphere: Recent progress // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 71. № 14–15. P. 1514–1528. 2009.
- Qian L., Laštovička J., Roble R., Solomon S. Progress in observations and simulations of global change in the upper atmosphere // J. Geophys. Res. V. 116. A00H03. doi:10.1029/2010JA016317. 2011.
- Rishbeth H. How the thermospheric circulation affects the ionospheric $F2$ -layer // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 60. № 14. P. 1385–1402. 1998.
- Zhang S. R., Holt J. M., Kurdzo J. Millstone Hill ISR observations of upper atmospheric long-term changes: height dependency // J. Geophys. Res. V. 116. A00H05. doi:10.1029/2010JA016414. 2011.