

УДК 550.385

## СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ ИЗМЕНЕНИЯМИ $foF2$ И $hmF2$ В РАЗЛИЧНЫХ ВРЕМЕННЫХ ИНТЕРВАЛАХ

© 2013 г. А. Д. Данилов, А. В. Константинова

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

Поступила в редакцию 20.11.2012 г.

Для десяти ионосферных станций рассмотрено соотношение между критической частотой  $foF2$  и высотой  $hmF2$  слоя  $F2$  в периоды до и после 1980 г. Показано, что в более ранний период связь между  $foF2$  и  $hmF2$  хорошо выражена. В более поздний период наблюдается нарушение этой связи. Ухудшаются статистические характеристики зависимости  $foF2$  от  $hmF2$ . Это указывает на то, что из-за охлаждения и оседания верхней атмосферы изменяется высотное распределение фотохимических параметров, определяющих равновесную концентрацию в максимуме слоя. Наибольший вклад в этот эффект вносит, видимо, изменение отношения концентраций атомов и молекул.

DOI: 10.7868/S0016794013050052

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема трендов параметров ионосферного слоя  $F2$  в настоящее время стоит достаточно остро. За подробностями мы отсылаем читателя к недавнему обзору одного из авторов [Данилов, 2012]. Здесь отметим лишь, что в ряде работ было найдено, что изменения в слое  $F2$  ионосферы начались где-то около 1980 г. [Данилов и Ванина-Дарт, 2009; 2010; Donaldson et al., 2010; Zhang et al., 2011]. Цель работы – попытаться понять, какие именно изменения могли происходить в слое  $F2$  после 1980 г. Для этого мы предприняли попытку сравнить соотношение между  $foF2$  и  $hmF2$  для периода 1958–1979 гг., который во многих более ранних публикациях использовался как своего рода “эталонный”, и для более поздних лет вплоть до 2010 г.

Проблему нахождения и корректировки исходных данных по  $foF2$  и  $hmF2$ , мы здесь не обсуждаем, поскольку она подробно рассмотрена в двух недавних публикациях авторов [Данилов и Константинова, 2013а; б], посвященных поискам трендов этих двух параметров до 2010 г. Для сопоставления поведения  $foF2$  и  $hmF2$  в данной работе мы использовали те же данные, что и в указанных двух публикациях.

### 2. МЕТОД

Для каждой из 10-ти станций, для которых нашлись необходимые исходные данные, как и в указанных выше работах, мы рассматривали 4 ситуации: два момента суток (14:00 LT и момент SS+2 через два часа после захода Солнца) и два

сезона (зима, январь–февраль, и лето, июнь–июль). Поскольку, как подробно описано в работах [Данилов и Константинова, 2013а; б], разные источники исходных данных могут давать отличающиеся друг от друга результаты, мы старались (если была возможность) для каждой ситуации использовать несколько источников.

Мы строили зависимости  $foF2$  от  $hmF2$  для каждой ситуации и всех доступных источников для двух периодов: 1957–1979 гг. и 1980–2010 гг. Если для данной ситуации и данного источника не было данных до 2010 г., мы использовали данные до конца имеющегося ряда, но не ранее 2005 г. Ряды данных, кончающиеся ранее 2005 г., не анализировались. Мы характеризовали получаемые зависимости  $foF2$  от  $hmF2$  двумя параметрами: коэффициентом определенности  $R^2$  (позволяющим оценить статистическую значимость полученной зависимости по критерию Фишера) и квадратом стандартного отклонения  $SD^2$ .

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

В период 1957–1979 гг. зависимость  $foF2$  от  $hmF2$  была хорошо выражена, имела примерно линейный характер и характеризовалась высокими (выше 0.70, а чаще всего – 0.90–0.99) величинами  $R^2$  (см. рисунки 1–4). Причина такой зависимости хорошо известна из физики слоя  $F2$ . Увеличение  $hmF2$  означает подъем слоя  $F2$  в область более низкой рекомбинации (более низких величин  $[N_2]/[O]$ ) и, соответственно, увеличение  $NmF2$  ( $foF2$ ) в максимуме слоя. Наиболее наглядным примером такого процесса является положи-

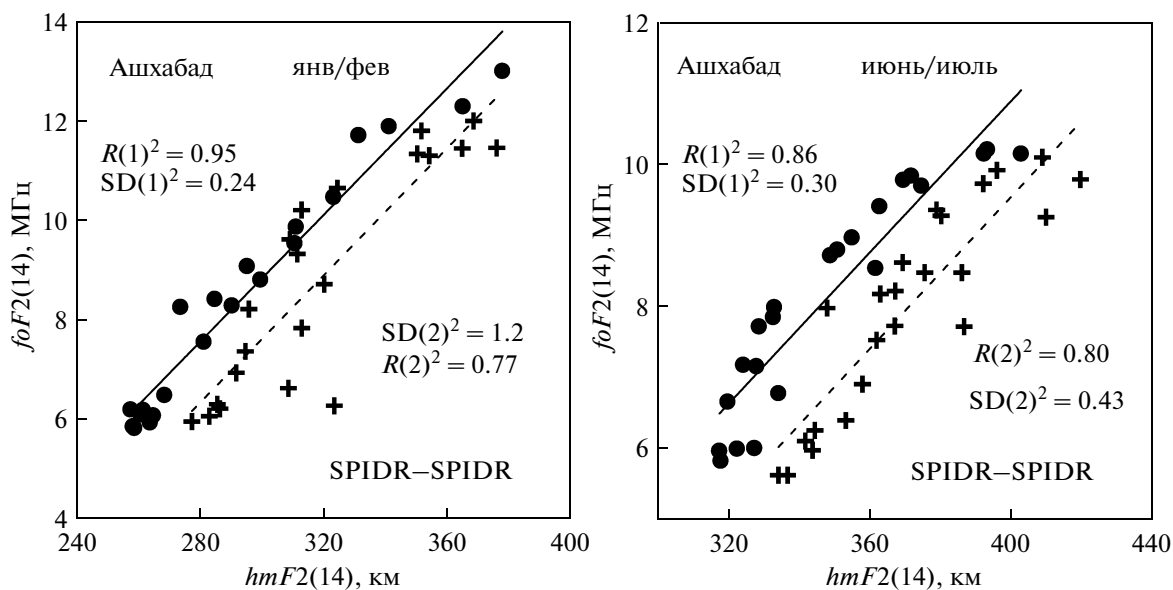


Рис. 1. Зависимость  $foF2$  от  $hmF2$  на ст. Ашхабад для двух ситуаций (14JF и 14JJ) для “эталонного” и более позднего периодов.

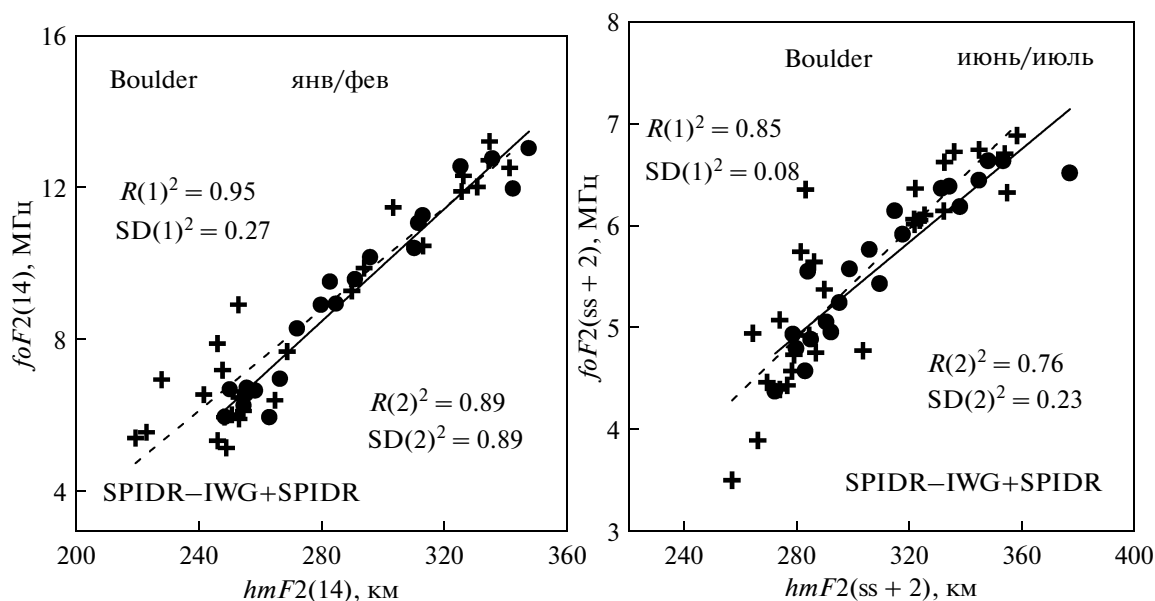


Рис. 2. Зависимость  $foF2$  от  $hmF2$  на ст. Boulder для двух ситуаций (14JF и SSJJ) для “эталонного” и более позднего периодов.

тельная фаза ионосферной бури в средних широтах. Генерируемая нагревом в высоких широтах буревая циркуляция направлена к экватору и поднимает слой  $F2$  вдоль силовых линий магнитного поля, увеличивая  $hmF2$ . При этом происходит увеличение  $foF2$ , которое и образует положительную фазу ионосферной бури.

На рисунках 1–4 приведены примеры зависимостей  $foF2$  от  $hmF2$  для двух указанных выше периодов для различных станций и ситуаций. На

всех рисунках зачерненные кружки и сплошная линия соответствуют “эталонному” периоду 1957–1979 гг., а кресты и штриховая линия – более позднему периоду (после 1980 г.). Величины  $SD(1)^2$  и  $R(1)^2$  относятся к точкам и сплошной линии, а  $SD(2)^2$  и  $R(2)^2$  характеризуют разброс крестов относительно штриховой линии.

Хорошо видно, что зависимость  $foF2(hmF2)$  для более позднего периода выражена гораздо хуже, чем для более раннего. Кресты систематиче-

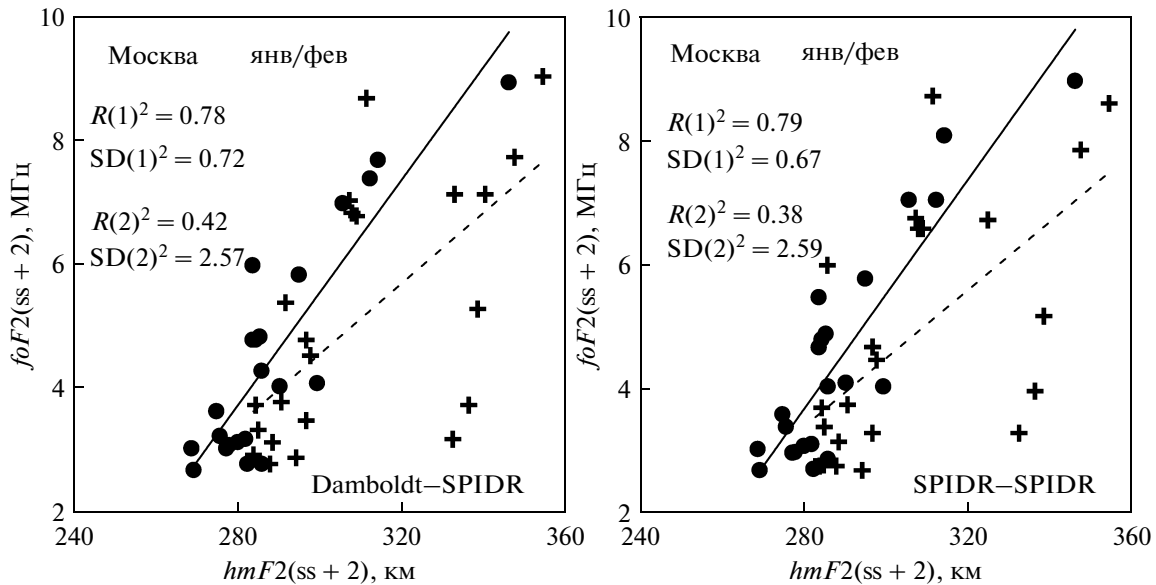


Рис. 3 Зависимость  $foF2$  от  $hmF2$  на ст. Москва для двух источников и ситуации SSJF для “эталонного” и более позднего периодов.

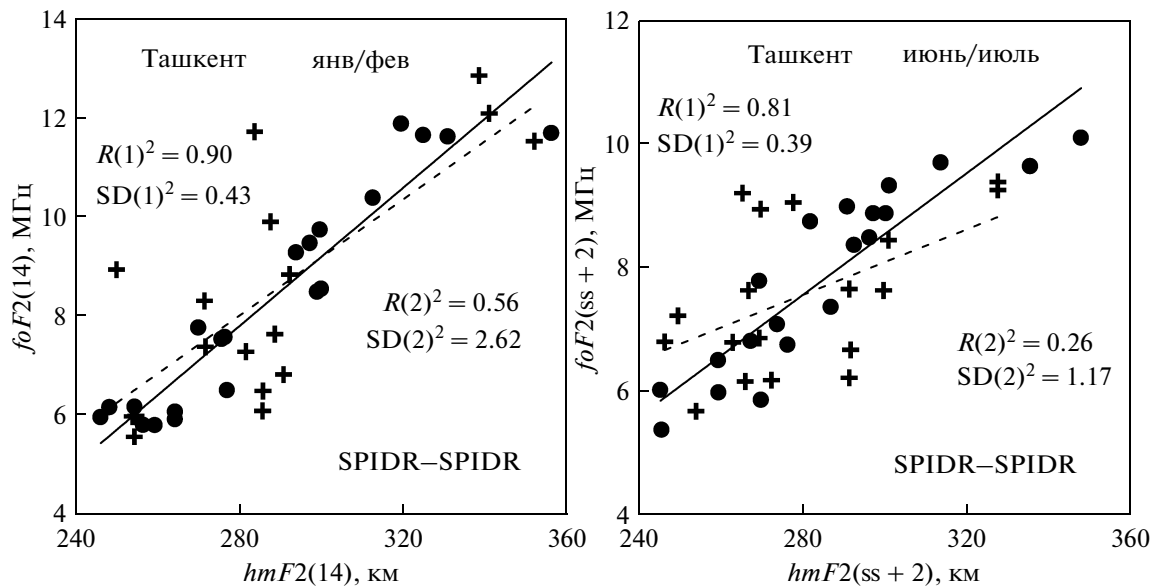


Рис. 4. Зависимость  $foF2$  от  $hmF2$  на ст. Ташкент для двух ситуаций (14JF и 14JJ) для “эталонного” и более позднего периодов.

ски дают гораздо больший разброс относительно “эталонной” зависимости  $foF2(hmF2)$  (сплошная линия), что выражается в гораздо более высоких величинах стандартного отклонения  $SD(3)$  (см. ниже таблицы 1–3). Даже если мы проведем свою собственную аппроксимацию через кресты (что и сделано в виде штриховой линии на рисунках 1–4), то и тогда разброс величин  $foF2$  относительно этой линии (величина  $SD(2)$ ) будет значителен. А систематическое смещение крестов от-

носительно кружков (см., например, рис. 1 для ст. Ашхабад) еще больше увеличивает величину  $SD$ .

Для разных станций характер изменения зависимости  $foF2$  от  $hmF2$  меняется от более раннего периода к более позднему несколько по-разному. В случае ст. Ашхабад (рис. 1) это – систематический сдвиг зависимости для более позднего периода. В случае ст. Boulder (рис. 2) – это сохранение характера зависимости, но значительное (см. соответствующие величины  $SD$ ) увеличение раз-

**Таблица 1.** Примеры полученных величин  $R^2$  и  $SD^2$  для станций Ташкент и Москва

Источник ( $foF2-hmF2$ )	$R(1)^2$	$SD(1)^2$	$SD(2)^2$	$SD(3)^2$	$SD(3)^2/SD(1)^2$
<b>Ташкент</b>					
		1962–1979 гг.	1980–2006 гг.		
14JJ SPIDR-SPIDR	0.81	0.39	1.17	1.21	3.10
14JJ IWG+Damboldt-SPIDR	0.80	0.38	1.36	1.42	3.74
14JJ SPIDR-Damboldt	0.81	0.40	1.08	1.40	3.50
14JJ IWG+Damboldt-Damboldt	0.81	0.41	1.24	1.56	3.78
<b>Москва</b>					
		1958–1979 гг.	1980–2006 гг.		
14JJ SPIDR-SPIDR	0.95	0.38	1.64	3.30	8.68
14JF SPIDR-SPIDR	0.71	0.24	0.39	0.70	2.92
SSJF SPIDR-SPIDR	0.79	0.67	2.59	4.58	6.84
SSJJ SPIDR-SPIDR	0.87	0.10	0.33	0.54	5.4

**Таблица 2.** Пример полученных величин для ст. Slough и Томск для 14JF

Источник ( $foF2-hmF2$ )	$R(1)^2$	$SD(1)^2$	$SD(2)^2$	$SD(3)^2$	$SD(3)^2/SD(1)^2$
<b>Slough</b>					
		1957–1979 гг.	1980–2010 гг.		
14JF SPIDR-SPIDR	0.93	0.42	0.76	0.99	2.36
14JF IWG+медианы-SPIDR	0.91	0.47	0.89	1.04	2.21
14JF SPIDR-IWG+SPIDR	0.91	0.58	0.89	1.20	2.07
14JF IWG+медианы-IWG+SPIDR	0.90	0.58	0.86	1.29	2.22
14JF IWG+ Damboldt-SPIDR	0.92	0.48	0.90	0.98	2.04
14JF IWG+Damboldt-IWG+SPIDR	0.90	0.58	0.87	1.20	2.07
<b>Томск</b>					
		1957–1979 гг.	1980–2006 гг.		
14JF SPIDR-SPIDR	0.93	0.51	1.11	1.26	2.47
14JF IWG+Damboldt-SPIDR	0.93	0.47	1.18	1.37	2.91
14JF SPIDR-Damboldt	0.93	0.47	1.15	1.22	2.60
14JF IWG+Damboldt- Damboldt	0.93	0.46	1.16	1.39	3.02

броса. Для ст. Москва (рис. 3) это – очень сильное увеличение разброса и существенное изменение наклона новой зависимости  $foF2$  от  $hmF2$  по сравнению с “эталонной”. Общим для всех приведенных примеров является значительное увеличение стандартного отклонения и уменьшение коэффициента определенности в более поздний период.

Мы проанализировали 128 случаев (станция плюс ситуация плюс источник). Мы рассматривали отношение  $SD(3)^2/SD(1)^2$ , где  $SD(3)$  и  $SD(1)$  – стандартные отклонения относительно “эталонной” зависимости для более позднего и более раннего периодов, соответственно. Только в 4-х из этих случаев (ст. Hobart, лето)  $SD(3)^2/SD(1)^2$  было меньше

единицы. В остальных случаях разброс данных в более поздний период был сильнее, чем в более ранний. По понятным причинам мы не можем привести в статье таблицу всех рассмотренных случаев, а потому даем в табл. 1 примеры для станции Ташкент (одна ситуация, но разные источники) и Москва (один источник, но разные ситуации). В таблице 2 приведен пример для станций Slough и Томск для ситуации 14JF и разных источников. Эти примеры показывают, что хотя для конкретных ситуаций и источников величины  $SD(3)^2/SD(1)^2$  несколько различаются, все они имеют один порядок величины и указы-

вают на усиление разброса  $foF2$  в более поздний период.

В таблице 3 для всех 10-ти станций приведены средние величины  $SD(3)^2/SD(1)^2$  для двух сезонов, усредненные по ситуациям и источникам. Видно, что для всех 10-ти станций и обоих сезонов  $SD(3)^2/SD(1)^2 > 1$ . В таблице 3 хорошо видно, что зимой эффект усиления разброса  $foF2$  относительно  $hmF2$  сильнее, чем летом.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ

В целом статистика проведенных исследований выглядит следующим образом.

Использованы данные 10-ти ионосферных станций.

Проанализировано случаев  $N = 128$ .

Из них 4 случая с  $SD(3)^2/SD(1)^2 < 1$ .

Усредненная по всем 128-ми случаям величина  $SD(3)^2/SD(1)^2 = 3.2 \pm 2.1$ .

Усредненная величина  $SD(3)^2/SD(1)^2$  для зимы составляет  $3.9 \pm 2.5$  ( $N = 64$ ).

Усредненная величина  $SD(3)^2/SD(1)^2$  для лета составляет  $2.6 \pm 1.4$  ( $N = 64$ ).

Усредненная величина  $SD(3)^2/SD(1)^2$  для 14:00 LT равна  $4.2 \pm 2.8$  ( $N = 34$ ) для зимы и  $2.6 \pm 1.2$  ( $N = 30$ ) для лета.

Для момента SS+2 сезонные различия несколько меньше:  $3.5 \pm 1.9$  и  $2.7 \pm 1.6$ , соответственно.

Хотя, как видно из приведенных выше таблиц, наблюдается некий разброс величин SD для разных станций и разных ситуаций, средние значения  $SD(3)^2/SD(1)^2$  статистически значимы и позволяют сделать ряд выводов.

Основной вывод данной работы состоит в том, что зависимость критической частоты  $foF2$  слоя F2 от его высоты  $hmF2$ , которая хорошо (с высокими значениями  $R^2$  и небольшими SD) выражена для “эталонного” периода 1957–1979 г., существенно нарушается в период после 1980 г. На наш взгляд, это является прямым доказательством того, что происходит изменение фотохимических параметров термосферы, ответственных за формирование слоя F2: температуры, эффективного коэффициента рекомбинации, состава. Если бы такого изменения не происходило и высотное распределение этих параметров при фиксированном уровне солнечной активности оставалось неизменным, то сдвиг слоя F2 вверх, или вниз под влиянием вертикального дрейфа приводил бы к переносу максимума слоя в те же аэрономические условия, что и раньше. А это значит, что одним и тем же величинам  $hmF2$  соответствовали бы одни и те же величины  $foF2$ . Проведенный в этой работе анализ показывает, что это заведомо не так. Достаточно строгая связь между  $hmF2$  и  $foF2$ , наблю-

**Таблица 3.** Средние величины  $SD(3)^2/SD(1)^2$  для двух сезонов

Станция	Зима	Лето
Ашхабад	8.42	5.60
Boulder	2.63	2.41
Grahamstown	8.48	3.25
Hobart	2.05	0.59
Juliusruh	2.10	1.72
Москва	8.11	4.05
Slough	2.73	2.04
Ташкент	5.64	4.71
Томск	2.58	2.20
Wallops	4.83	2.40

давшаяся в “эталонный” период, в более поздний период либо нарушается совсем, либо обладает гораздо худшими статистическими характеристиками. Это может быть лишь в том случае, если изменилось распределение с высотой фотохимических параметров термосферы. Такое изменение должно неизбежно происходить при наблюдаемом другими методами (торможение спутников, некогерентное рассеяние, [Lastovicka, 2009, Lastovicka et al., 2012; Qian et al., 2011]) усилении охлаждения и оседания верхней атмосферы.

Полученный более сильный эффект зимой, чем летом (см. табл. 3 и суммарную статистику в начале этого параграфа), указывает на то, что температура вряд ли играет главенствующую роль в происходящем процессе. Характер зависимости от температуры основной ионно-молекулярной реакции  $O^+ + N_2$ , определяющей эффективный коэффициент рекомбинации в слое F2, таков что изменение температуры должно было бы сильнее сказаться в летнее время, чем в зимнее. На роль “главного кандидата”, вызывающего рассматриваемые в этой работе изменения, претендует нейтральный состав термосферного газа. С усилением охлаждения и оседания верхней атмосферы отношение концентрации атомов кислорода к концентрации молекулярных составляющих должно уменьшаться, приводя к уменьшению  $NmF2$  ( $foF2$ ). К такому же выводу приводит и анализ трендов  $foF2$ , выполненный в недавней работе авторов [Данилов и Константинова, 2013а]

#### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предлагается объяснение того факта (неоднократно отмечавшегося в литературе, см. выше), что после примерно 1980 г. в ионосфере и термосфере стали происходить долговременные изменения различных параметров. Объяснение основывается на анализе связи между основными

параметрами слоя  $F2$ ,  $foF2$  и  $hmF2$ , в “эталонный” период до 1980 г. и анализируемый период после 1980 г. Результаты анализа показывают, что связь между  $foF2$  и  $hmF2$ , которая была четко выражена в “эталонный” период (что хорошо понятно с точки зрения физики слоя  $F2$ ), нарушается (становится хуже выраженной и менее статистически обеспеченной) в более поздний период.

Указанное явление может наблюдаться только если происходит изменение вертикального распределения фотохимических параметров, определяющих величины  $NmF2$  ( $foF2$ ) в максимуме слоя  $F2$ . Такое изменение неизбежно должно происходить при охлаждении и оседании верхней атмосферы.

Таким образом, полученные в данной работе результаты, могут рассматриваться как еще одно подтверждение правильности концепции охлаждения и оседания верхней атмосферы [Lastovička et al., 2008; 2012; Lastovička, 2009].

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 11-05-00102-а.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Данилов А.Д. Долговременные тренды в верхней атмосфере и ионосфере (обзор) // Геомагнетизм и аэрoномия. Т. 52. № 3. С. 291–312. 2012.
- Данилов А.Д., Ванина-Дарт Л.Б. Разброс величин  $hmF2$  как индикатор трендов термосферной динамики // Геомагнетизм и аэрoномия. Т. 49. № 1. С. 58–62. 2009.
- Данилов А.Д., Ванина-Дарт Л.Б. Поведение  $foF2$  и  $hmF2$  после захода Солнца // Геомагнетизм и аэрoномия. Т. 50. № 6. С. 825–832. 2010.
- Данилов А.Д., Константинова А.В. Поведение параметров ионосферного слоя  $F2$  на грани веков. 1. Критическая частота // Геомагнетизм и аэрoномия. Т. 53. № 3. С. 361–372. 2013а.
- Данилов А.Д., Константинова А.В. Поведение параметров ионосферного слоя  $F2$  на грани веков. 2. Высота слоя // Геомагнетизм и аэрoномия. Т. 53. № 4. С. 468–499. 2013б.
- Donaldson J.K., Wellman T.J., Oliver W.L. Long-term change in thermospheric temperature above Saint Santin // J. Geophys. Res. V. 115. № A11305. 2010.
- Lastovička J. Global pattern of trends in the upper atmosphere and ionosphere: Recent progress // J. Atmos. Solar. Terr. Phys. V. 71. № 3–4. P. 1514–1528. 2009.
- Lastovička 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.
- Lastovička J., Solomon S.C., Qian L. Trends in the neutral and ionized upper atmosphere // Space Sci. Rev. V. 168. № 1–4. P. 113–145. 2012.
- Qian L., Lastovička J., Roble R., Solomon S. Progress in observations and simulations of global change in the upper atmosphere // J. Geophys. Res. V. 116. № A00H03. 2011.
- 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.