

УДК 550.385

## ПОВЕДЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРНОГО СЛОЯ $F2$ НА ГРАНИ ВЕКОВ.

### 1. КРИТИЧЕСКАЯ ЧАСТОТА

© 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.ruПоступила в редакцию 19.06.2012 г.  
После доработки 19.09.2012 г.

Рассмотрены имеющиеся массивы экспериментальных данных о критической частоте ионосферного слоя  $F2$ ,  $foF2$ , охватывающие первое десятилетие нового века. На основании изучения этих массивов сделан вывод о том, что разброс величин  $foF2$  (измеряемый величиной стандартного отклонения  $SD$ ) относительно зависимости от солнечной активности существенно вырос в последние десятилетия по сравнению с периодом 1958–1979 гг. Рассмотрены возможные причины роста  $SD$ . Показано, что величины  $foF2$  для периода 1998–2010 гг. уменьшились по сравнению с периодом 1958–1979 гг. в среднем на 0.6 МГц, что дает оценку тренда  $foF2 \sim -0.03$  МГц в год. Проанализированы линейные тренды  $foF2$  для ряда ионосферных станций. Получено, что, несмотря на разброс данных, для каждой из рассмотренных ситуаций (день и послезаходный период летом и зимой), удается получить статистически значимые тренды. При этом зимние отрицательные тренды ( $\sim -0.052$  МГц в год) оказываются примерно вдвое больше летних ( $\sim -0.024$  МГц в год). Сравнения с трендами, получавшимися для более ранних периодов, показывают, что отрицательный тренд  $foF2$  существенно вырос к первому десятилетию нашего века.

DOI: 10.7868/S0016794013030048

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема долговременных изменений (трендов) параметров ионосферы обсуждается уже около 15-ти лет. Мы не будем здесь рассматривать даже кратко десятки работ, посвященных этой проблеме, отсылая читателя к недавнему обзору одного из авторов [Данилов, 2012]. Отметим только два обстоятельства, которые, на наш взгляд делают важной попытку найти тренды параметров слоя  $F2$  – основного ионосферного слоя – именно для периода: конец прошлого – начало нынешнего века. Одно из них состоит в том, что тренды  $foF2$  и  $hmF2$  до 1990–1995 гг. исследовались несколькими группами авторов. Однако эти тренды были достаточно малы, поэтому получаемые результаты были подчас противоречивы и имели низкую статистическую значимость. Наиболее полное исследование ионосферных трендов для этого периода на глобальной сети ионосферных станций было выполнено в работе [Bremer, 2001]. Коллективный эксперимент по нахождению трендов  $foF2$  разными методами и разными группами исследователей был проведен под руководством Ластовички [Laštovička et al., 2006]. В этом эксперименте все исследовательские группы использовали один и тот же массив исходных данных – измерения на ст. Юлиусру в 1977–1997 гг. Эксперимент показал, что тренды  $foF2$  для этого периода оказались действительно

достаточно малы и с некоторым разбросом дали среднее значение тренда порядка  $-0.1$  МГц за десятилетие. Однако, охлаждение и оседание средней и верхней атмосферы [Laštovička et al., 2008; Laštovička, 2009] идет весьма интенсивно, о чем говорят получаемые по торможению спутников отрицательные тренды плотности (см. Qian et al. 2011] и ссылки там) и получаемые по данным некогерентного рассеяния отрицательные тренды термосферной температуры, получаемые на установках некогерентного рассеяния в Миллстоун Хилл [Zhang et al., 2011] и Сан-Сантин [Donaldson et al., 2010]. В этих условиях можно ожидать, что тренды параметров ионосферного слоя  $F2$  будут возрастать со временем и для конца предыдущего века и начала нынешнего могут быть значительно больше, чем в течение двух последних десятилетий XX века.

Второе обстоятельство состоит в том, что наблюдаемые в последнее десятилетие тренды плотности и температуры термосферы значительно превосходят те тренды, которые ожидаются по теоретическим моделям. Фактически наблюдаемые тренды уже сейчас (когда рост парниковых газов составляет менее 30%) сравнимы или даже превосходят те тренды, которые модели, рассчитанные для удвоения количества  $CO_2$ , предсказывают для примерно 2100 г. Подробно этот вопрос рассмотрен в работах [Qian et al., 2011; Данилов, 2012]. В этой ситуации вполне можно ожидать,

что и тренды параметров слоя  $F2$  окажутся в начале нового века выше, чем они были в последние десятилетия прошлого века и чем предсказывалось на основе теоретических расчетов Ришбета [Rishbeth, 1990].

В данной работе мы пытаемся собрать все доступные в банках ионосферных данных величины  $foF2$  и проанализировать тренды критической частоты от 1990 г. до конца имеющихся для данной станции наблюдений. Проблема отбора данных для анализа достаточно сложна, поэтому мы посвящаем ей следующий параграф.

## 2. ПРОБЛЕМА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

Одной из главных проблем при поисках долгосрочных трендов различных атмосферных и ионосферных параметров является нахождение достаточно длинных рядов однородных надежных исходных данных. Эта проблема частично уже рассматривалась в более ранних публикациях одного из авторов [Данилов, 2011; Данилов и Ванина-Дарт, 2010], однако здесь мы вынуждены к ней вернуться и рассмотреть более подробно, поскольку, как будет показано ниже, результаты (тренды  $foF2$ ) в значительной мере зависят от выбора исходного массива данных, используемых для анализа. Как уже указывалось выше, анализ трендов параметров слоя  $F2$  проводился различными группами авторов неоднократно. При этом использовались либо данные какой-нибудь одной станции, которые были в распоряжении авторов, либо данные из банка данных в формате IWG, которые были собраны в Boulder Space Data Center и выпущены в 2000 г. в виде CDRом диска. На этом диске представлены данные для нескольких десятков станций за период их работы до 1999 г., если, конечно (как это произошло с рядом станций Тихоокеанского региона), они не прекратили работу раньше – в середине 80-х годов. Подавляющее большинство исследований трендов  $foF2$  и  $hmF2$ , проведенных различными группами авторов, охватывали периоды до 2000 г., поэтому проблем с нахождением исходных данных в этих исследованиях не возникало. Например, для известного коллективного эксперимента, возглавлявшегося Я. Ластовичка [Laštovička et al., 2006] использовались данные ст. Юлиусру за период 1977–1997 гг.

Для целей данной работы требовались данные по  $foF2$ , охватывающие первое десятилетие нового века (желательно до 2010 г.). Кроме того, ряд исходных данных должен был начинаться в 1957–1958 гг. (что и имеет место для большинства станций, поскольку они открывались в период Международного Геофизического Года). Последнее требование связано с тем, что в этом исследовании, как и в предыдущих работах авторов, для исключения эффекта солнечной активности в пове-

дении  $foF2$  и  $hmF2$  строились регрессионные зависимости для периода 1957/1958–1979 гг., когда по нашим представлениям эффект долгосрочных трендов отсутствовал.

Детальное исследование показало, что имеются три источника ионосферных данных, в которых в принципе можно найти величины  $foF2$  и  $hmF2$  для всего периода от 1957/1958 до 2010 г. Одним из таких источников является система SPIDR (Space Physics Interactive Data Resource). Другим, принципиально независимым от SPIDR, источником является система месячных медиан. Третьим источником, в определенной мере связанным и с данными в IWG формате, и с медианами, и с данными SPIDR является опубликованный недавно банк Дамбольдта [Damboldt and Suessmann, 2012] ([www.ips.gov.au/IPSHosted/INAG/web-73/index.html](http://www.ips.gov.au/IPSHosted/INAG/web-73/index.html)). Мы рассмотрим сейчас эти источники данных с точки зрения получения данных по  $foF2$ . Проблема данных по  $hmF2$  еще более сложна и будет подробно рассмотрена во второй части работы.

В системе SPIDR для довольно многих станций есть данные по  $foF2$  до 2010 г. Но лишь для нескольких станций есть данные за достаточно ранние годы, которые, как указывалось выше, нужны нам для построения регрессионных зависимостей  $foF2$  от индекса солнечной активности  $F10.7$ . Этот “недостаток” системы SPIDR можно исправить, комбинируя данные этой системы с данными в IWG формате, упоминавшиеся выше. Однако, при детальном анализе выяснилось, что данные системы SPIDR обладают более существенным недостатком – там встречаются ошибочные данные – повторы, когда, например для всех часов данного дня указана одна и та же критическая частота. Пример данных из системы SPIDR для 19 июня 1981 г. на ст. Ташкент приведен в табл. 1. Очевидно, что величина  $foF2$ , равная 7.90 МГц, наблюдаться неизменной в течение 12-ти часов не может.

Природа подобных ошибок в данных SPIDR нам неизвестна, но очевидно, что такие ошибки, если они попадают на выбираемые нами для анализа месяцы и моменты времени суток, могут привести к ошибкам в получаемых результатах. Одним из авторов была разработана программа, которая позволяет в ряде случаев исключать длинные серии одинаковых величин  $foF2$ . В приведенном ниже анализе мы обозначали этот источник данных как SPIDRC (от английского слова *corrected*). Однако, поскольку автоматическая “очистка” данных SPIDR может в каких-то случаях нарушать расчеты используемых для нахождения трендов параметров, мы анализировали и исходные данные системы SPIDR для периода после 1999 г., в основном комбинируя их с данны-

ми в IWG формате или с медианами для более ранних лет.

Медианные данные для наших целей подходят меньше, чем данные в IWG формате, поскольку медианы по определению не позволяют выбирать дни с определенным ограничением по геомагнитной активности. Это означает, что в используемых нами для анализа величинах  $foF2$  могут “участвовать” и дни с повышенной геомагнитной активностью, приводя к искажению результатов. Однако, с одной стороны, опыт предыдущих исследований трендов  $foF2$  показал, что сильного влияния геомагнитно активных дней не наблюдается, а с другой — ограниченность имеющегося исходного материала заставляет нас рассматривать массив месячных медиан как еще один источник данных по  $foF2$ . Как будет видно ниже при обсуждении результатов, качественно медианные данные дают ту же картину (отрицательные тренды  $foF2$ ), что и другие источники, но статистическая надежность получаемых результатов (коэффициент определенности  $R^2$ ) оказывается несколько ниже.

Банк Дамбольдта фактически представляет собой комбинацию из данных в IWG формате, SPIDR и медиан. Он охватывает период до 2009 г., но содержит гораздо больше пропусков данных, чем три других рассмотренных источника. Для ряда станций (например, Уоллопс, Томск) использовать банк Дамбольдта для всего временного интервала нельзя.

Таким образом, для нахождения трендов  $foF2$  мы использовали все четыре источника (IWG, SPIDR, медианы и Дамбольдт), комбинируя их для покрытия по возможности всего периода с 1957/1958 по 2010 гг.

### 3. ПРОЦЕДУРА

Как уже указывалось выше, мы (как и в предыдущих работах) использовали период 1957/1958–1979 гг. (ниже для краткости мы будем писать 1958–1979 гг., имея в виду, что для станций, для которых имелись данные за 1957 г., они тоже включались в анализ) для построения регрессионной зависимости  $foF2$  от индекса солнечной активности  $F10.7$ . При этом мы исходили из двух предположений. Первое — до 1980 г. не было долговременных изменений (трендов)  $foF2$ , а потому получаемые зависимости дают нам “чистый” эффект зависимости  $foF2$  от солнечной активности. Второе — нет оснований считать, что с 1980 г. характер зависимости  $foF2$  от солнечной активности (от солнечного ультрафиолетового излучения, которое как раз и характеризует индекс  $F10.7$ ) изменился. Иначе говоря, все отклонения величин  $foF2$  в более поздние годы от найденной для периода 1958–1979 гг. зависимости  $foF2$  от

**Таблица 1.** Значения критических частот, взятые из банка данных SPIDR для станции Ташкент для 19 июня 1981 г.

Дата	LT	$foF2$ , МГц
1981-06-19	12:00	7.90
1981-06-19	13:00	7.90
1981-06-19	14:00	7.90
1981-06-19	15:00	7.90
1981-06-19	16:00	7.90
1981-06-19	17:00	7.90
1981-06-19	18:00	7.90
1981-06-19	19:00	7.90
1981-06-19	20:00	7.90
1981-06-19	21:00	7.90
1981-06-19	22:00	7.90
1981-06-19	23:00	7.90

$F10.7$  отражают долговременные изменения  $foF2$ , не связанные с солнечной активностью (тренды). Возможная природа этих трендов будет обсуждаться ниже, здесь же подчеркнем, что все сказанное выше не исключает возможности зависимости самих трендов  $foF2$  от солнечной активности из-за возможной зависимости от солнечной активности трендов термосферных параметров (температуры, плотности, состава), которые должны определять тренды  $foF2$ . Например, для отрицательных трендов плотности верхней атмосферы такая зависимость от солнечной активности получена — при низкой солнечной активности падение плотности происходит сильнее [Emmert et al., 2008].

Примеры зависимости  $foF2$  от индекса  $F10.7$  для периода 1958–1979 гг. приводились в наших более ранних публикациях неоднократно. Здесь мы приведем подобные зависимости (см. рисунки 1 и 2) в связи с новым подходом к выявлению трендов, который будет описан ниже. Сейчас подчеркнем, что почти весь анализ будет вестись в данной работе в терминах величины  $\Delta foF2$ , которая представляет собой разницу между наблюдаемой в данной ситуации величиной  $foF2$  и ее значением для соответствующего  $F10.7$ , полученного в регрессионной зависимости для 1958–1979 гг. Особо отметим важность двух лет — 1957 и 1958 гг. В эти годы среднегодовой индекс  $F10.7$  составлял  $\sim 230$ , и это позволяло построить регрессионную зависимость для широкого интервала величин  $F10.7$  от 60–70 до 230. Для двух из анализировавшихся в этой статье станций (Грехемстоун и Ташкент), однако, данные по  $foF2$  начинаются позже. В этом случае зависимость  $foF2$  от  $F10.7$  охватывала более узкий интервал величин  $F10.7$  до  $\sim 190$ .

Как и в предыдущих работах, мы рассматриваем поведение величин  $foF2$  для двух сезонов (ян-

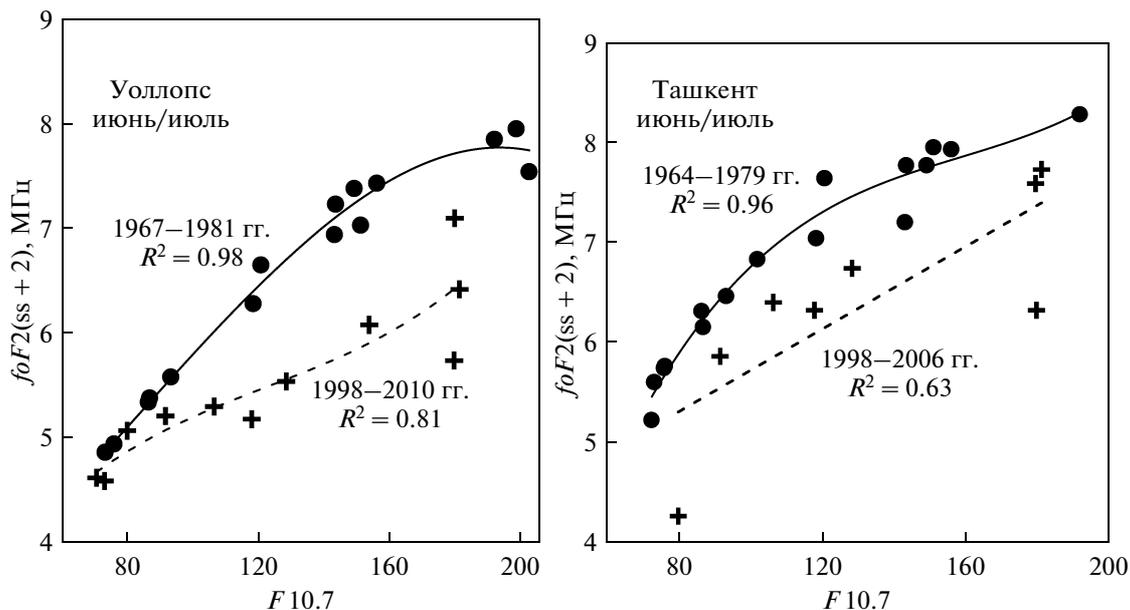


Рис. 1. Зависимость  $foF2(ss+2)$  от индекса  $F10.7$  на станциях Уоллопс и Ташкент для двух временных интервалов.

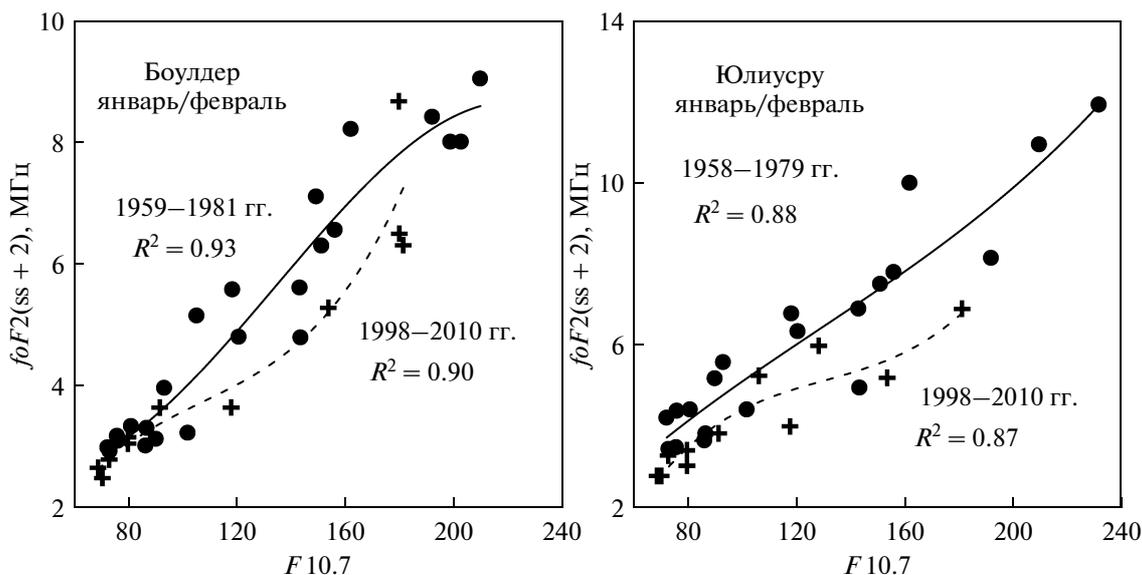


Рис. 2. Зависимость  $foF2(ss+2)$  от индекса  $F10.7$  на станциях Боулдер и Юлиусру для двух временных интервалов.

варь—февраль и июнь—июль) и двух моментов суток. Первый момент соответствует 14:00 LT, а второй ( $ss+2$ ) — моменту через два часа после захода Солнца. Причины выбора именно этих моментов неоднократно обсуждались ранее и кратко состоят в том, что в дневное время мы ожидаем более сильного влияния аэрономических параметров на возможные тренды  $foF2$ , а через 1–2 ч. после захода Солнца должно быть наиболее сильно влияние на  $foF2$  динамических процессов.

В силу описанных в предыдущем параграфе трудностей с нахождением исходных данных, мы для каждой из четырех ситуаций (14:00 LT, зима; 14:00 LT, лето;  $ss+2$ , зима; и  $ss+2$ , лето; для краткости мы будем обозначать их 14JF, 14JJ, SSJF и SSJJ) независимо проводили процедуру поиска трендов, используя несколько источников. Это могли быть “чистый” SPIDR, “чистый” Дамбольдт, “чистые” медианы, или комбинации этих банков с данными в IWG формате для периода до

**Таблица 2.** Стандартные отклонения  $SD$  и величина  $\Delta$  (см. текст) для 4-х станций

Станция	Ситуация	Источник	$\Delta$ , МГц	$SD(1)$ , МГц	$SD(2)$ , МГц
Ташкент	SSJJ	IWG+Медианы	-0.73	0.18	0.82
Ташкент	SSJJ	IWG	-0.82	0.18	0.93
Ташкент	SSJJ	IWG+SPIDR	-0.86	0.18	0.99
Ташкент	SSJJ	IWG+Дамбольдт	-0.71	0.18	0.8
Ташкент	SSJJ	SPIDRC	-0.89	0.18	1.02
Москва	14JJ	IWG+SPIDR	-0.17	0.12	0.25
Москва	14JJ	IWG+Дамбольдт	-0.15	0.12	0.22
Москва	14JJ	Медианы	-0.17	0.16	0.24
Москва	14JJ	SPIDRC	-0.16	0.13	0.25
Слау	SSJJ	IWG+SPIDR	-0.36	0.17	0.46
Слау	SSJJ	IWG+Медианы	-0.32	0.17	0.53
Слау	SSJJ	IWG+Дамбольдт	-0.12	0.17	0.33
Слау	SSJJ	Медианы	-0.2	0.16	0.45
Слау	SSJJ	SPIDRC	-0.36	0.17	0.47
Ташкент	SSJF	IWG+Медианы	0.36	0.41	0.8
Ташкент	SSJF	IWG	0.31	0.41	0.77
Ташкент	SSJF	IWG+SPIDR	0.39	0.41	0.8
Ташкент	SSJF	IWG+Дамбольдт	0.41	0.41	0.82
Ташкент	SSJF	SPIDRC	0.14	0.43	1.06

1999 г. Каждую комбинацию ситуации и источника мы для краткости будем называть позицией.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА РАЗБРОСА ДАННЫХ

После просмотра данных большого числа станций в четырех описанных выше источниках нами были отобраны 12 станций, для которых можно было провести поиск трендов  $foF_2$  для периода после 1990 г., для всех четырех ситуаций и, как минимум, для двух (а желательно — для 3–4-х) источников. В результате было рассмотрено 179 позиций. Анализ трендов, найденных для этих позиций, будет подробно рассмотрен в следующем параграфе.

Сейчас мы рассмотрим результаты статистического анализа разброса исходных данных. В работах одного из авторов [Danilov, 2009; Данилов и Ванина-Дарт, 2010], было показано, после примерно 1980 г. наблюдается увеличение разброса исходных данных (вычислялось стандартное отклонение  $SD$ ) по  $hmF_2$  и отношению  $foF_2(ss+2)/foF_2(14)$ . Предполагается, что это увеличение разброса данных вызвано увеличением нестабильности системы горизонтальных ветров в термосфере (которые влияют и на  $hmF_2$  и на  $foF_2(ss+2)$ ) из-за охлаждения и оседания верхней атмосферы (см. выше).

Для сравнения степени разброса исходных данных по  $foF_2$  в начальный и анализируемый пе-

риоды мы также использовали стандартное отклонение ( $SD$ ) наблюдаемых величин  $foF_2$  от регрессионной зависимости  $foF_2$  от  $F_{10.7}$  для двух периодов: 1958–1979 и 1998–2010 гг. Последний период взят просто как примерно одиннадцатилетний цикл, примыкающий к концу анализируемого периода (2010 г). Поскольку таблица для всех позиций была бы слишком громоздкой, мы в качестве примера приводим в табл. 2 величины  $SD$  для 4-х станций с различными ситуациями и различными источниками (всего 19 позиций). Подчеркнем, что в этой части работы никаких сглаживаний  $foF_2$  не проводилось и брались “чистые” величины  $foF_2$  для каждого момента суток, усредненные за два соответствующих месяца (январь–февраль, или июнь–июль).

Как видно из табл. 2, во всех приведенных случаях разброс ( $SD$ ) исходных данных для первоначального периода существенно меньше, чем для периода 1998–2010 гг. Подобная картина наблюдается для всех 127-ми рассмотренных позиций за исключением семи, причем все семь приходятся на станцию Рим.

Рассмотрим подробнее величины  $SD$  для двух периодов. Для первого периода ситуация проста — малые величины  $SD$  показывают, что разброс данных невелик и экспериментальные точки хорошо ложатся на регрессионную кривую. Сложнее обстоит дело с величинами  $SD$  для второго периода. Увеличение  $SD$  по сравнению с первым периодом

**Таблица 3.** Отношения  $SD(2)/SD(1)$  для разных станций и ситуаций

Ситуация	Станция							
	Рим	Ташкент	Москва	Уоллопс	Боулдер	Слау	Юлиусру	Томск
14JF	0.96	1.55	1.91	1.47	1.37	1.54	1.34	1.42
14JJ	1.00	2.41	1.83	2.23	1.82	2.49	2.05	2.60
SSJF	1.24	2.05	2.72	3.10	1.45	1.44	1.61	2.02
SSJJ	2.84	5.07	3.05	4.18	1.49	2.67	1.77	2.73
Среднее	1.51	2.77	2.38	2.74	1.53	2.03	1.69	2.19

в данном случае связано с двумя эффектами. Во-первых, с увеличением реального разброса  $foF2$  из-за, вероятно, тех же причин, что и увеличение разброса величин  $hmF2$  и  $foF2(ss+2)/foF2(14)$ , анализировавшегося в более ранних работах. Иначе говоря, если бы мы провели кривую зависимости  $foF2$  от  $F10.7$  для точек 1998–2010 гг., мы бы получили больший разброс точек относительно этой кривой, чем разброс точек относительно регрессионной линии для 1958–1979 г. Во-вторых, большая величина  $SD$  для второго интервала включает в себя и тренд  $foF2$ , так как при наличии тренда точки более позднего интервала будут все больше удаляться от регрессионной кривой, даже если нет разброса этих точек относительно их собственной зависимости от  $F10.7$ .

Все сказанное хорошо иллюстрирует рис. 1. На рисунке 1а приведена картина для ст. Уоллопс. Поскольку для этой станции нет данных для 1957–1958 гг., регрессионная кривая заканчивается на величине  $F10.7 = 200$ . Видно, что разброс точек относительно сплошной кривой невелик ( $SD = 0.19$ ). Крестиками показаны значения  $foF2$  для соответствующих величин  $F10.7$ , но для периода 1998–2010 гг. Четко видно, что, во-первых, крестики лежат существенно ниже регрессионной кривой, что говорит о наличии систематического сдвига вниз, т.е. отрицательного тренда. Во-вторых, разброс ( $SD$ ) величин  $foF2$  относительно кривой, проведенной через крестики (штриховая линия), составляет 0.33, что значительно больше, чем разброс точек относительно сплошной кривой. Суммарный же эффект тренда и увеличения разброса дает для крестиков значение  $SD = 1.02$  относительно регрессионной кривой. Совершенно такая же картина наблюдается и для Ташкента (рис. 1б): систематический сдвиг крестиков (1998–2010 гг.) относительно регрессионной кривой (т.е. отрицательный тренд) и их более сильный разброс.

Рисунок 1а наводит еще на одну мысль. Создается впечатление, что величина систематического сдвига (отрицательного тренда) велика при  $F10.7 = 140–180$  и сходит на нет при низкой активности ( $F10.7 \sim 70–80$ ). Это предположение подтверждается аналогичным анализом для других станций. На

рисунке 2 приведены еще два примера, аналогичных рис. 1. Видно, что в обоих случаях наблюдается тенденция сближения крестиков с точками при величинах  $F10.7 \sim 70–80$ . Это говорит о том, что отрицательный тренд  $foF2$  может зависеть от солнечной активности и быть минимальным или близким к нулю в ее минимуме. Такое предположение может быть существенным при анализе поведения  $\Delta foF2$  со временем (см. следующий параграф).

Таблица 3 дает величины отношения  $SD(2)/SD(1)$ , усредненные по всем источникам для каждой ситуации на 8-ми рассмотренных станциях. Видно, что отмеченная выше закономерность, что величины  $SD(2)$  для более позднего периода существенно выше, чем величины  $SD(1)$  для начального периода, выполняется для всех станций и всех ситуаций за исключением двух моментов в Риме. Однако при усреднении по всем моментам величина  $SD(2)/SD(1)$  получается больше единицы для всех станций. Как видно из нижней строки табл. 3, разброс усредненных по каждой станции величин  $SD(2)/SD(1)$  невелик. При усреднении этих величин по всем станциям мы получаем  $SD(2)/SD(1) = 2.11 \pm 0.51$ . Иначе говоря, в среднем по всем станциям разброс величин  $foF2$  в период 1998–2010 гг. примерно вдвое больше, чем в исходный период.

Обращает на себя еще один факт в табл. 3. Видна тенденция, что для одного и того же сезона величина  $SD(2)/SD(1)$  выше для моментов SS чем для 14:00 LT. Это справедливо для всех пар, кроме 3-х из имеющихся 16-ти. Наиболее вероятное объяснение этого факта состоит в том, что величины  $foF2$  в послезаходный период более чувствительны к динамическим процессам (об этом мы уже неоднократно говорили и в этой статье, и ранее), а потому и демонстрируют более сильную изменчивость, чем величины  $foF2$  в дневное время.

Вернемся к табл. 2. Там имеется еще один столбец, обозначенный как  $\Delta$ . Он показывает, насколько в среднем величины  $foF2$  для периода 1998–2010 гг. отличаются от соответствующих (т.е. взятых для тех же  $F10.7$ ) величин для периода 1958–1979 гг. Фактически, это – эквивалент тренда, который мы ищем в данной работе, но вычис-

ленный не в расчете на один год, как это будет сделано в следующем параграфе, а как разница между двумя разнесенными во времени периодами. Как видно из указанного столбца, в трех случаях из четырех приведенных в таблице величина  $\Delta$  отрицательна. Эти случаи показывают, что с периода 1958–1979 гг. по период 1998–2010 гг. величина  $foF_2$  уменьшалась, хотя и по-разному на разных станциях. Четвертый случай приведен в табл. 2 специально как иллюстрация исключения и правила. Из общего числа 127-ми рассмотренных позиций только в 19-ти из них получена положительная величина  $\Delta$ . И только в одном случае, приведенном в табл. 2, эта величина положительна для всех источников данной ситуации (SSJF). Остальные 4 случая разбросаны по разным станциям и ситуациям. Причина наличия такой положительной величины  $\Delta$ , символизирующей положительный тренд, нам пока неясна. Возможно, это – флуктуация, связанная с ошибкой в данных. Во всяком случае, подавляющее количество вычисленных величин  $\Delta$  указывают на отрицательный тренд  $foF_2$  после 1979 г.

Это обстоятельство важно для нашего анализа в двух отношениях. Во-первых, при сильном разбросе  $foF_2$  (высоких величинах  $SD(2)$ ) не всегда удается построить статистически значимую зависимость  $\Delta foF_2$  от времени, чтобы получить значимый линейный тренд (этот вопрос будет рассмотрен в следующем параграфе). При использовании величины  $\Delta$  мы можем судить, по крайней мере, о знаке тренда между двумя периодами (1958–1979 и 1998–2010 гг.) даже если разброс конкретных величин  $foF_2$  не позволяет вычислить линейный тренд.

Вторая причина, по которой важно иметь оценку изменения  $foF_2$  указанным выше образом, состоит в том, что из-за высоких значений  $SD(2)$  для получения детальной картины изменения  $\Delta foF_2$  со временем приходится применять 11-летнее сглаживание, как это сделано в следующем параграфе. В описанном же выше методе никакого сглаживания не производится, и знак и амплитуда изменения  $foF_2$  выводятся прямо из исходных данных.

## 5. ЛИНЕЙНЫЕ ТРЕНДЫ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ

Как уже указывалось выше, сильный разброс величин  $foF_2$  в последние годы рассматриваемого интервала затрудняет получение выраженной картины изменения  $\Delta foF_2$  со временем для вычисления линейного тренда. Как и в большинстве предыдущих публикаций авторов, мы использовали скользящее сглаживание с 11-летним окном. Как обычно, полученное сглаженное значение относилось к середине рассматриваемого интервала. Мы брали величины  $\Delta foF_2$  с 1985 г. до конца имеющегося для данной ситуации ряда данных

(ряды, кончающиеся ранее 2006 г. нами не рассматривались). При этом мы получали ход сглаженных величин  $\Delta foF_2$  с 1990 г. до, в лучшем случае, 2005 г. В худшем случае сглаженные точки кончались в 2001 г. Таким образом, при рассмотрении рисунков в данном параграфе следует иметь в виду, что хотя точки кончаются в первой половине первого десятилетия нового века, реально они отражают поведение критической частоты до последних лет этого десятилетия.

Мы анализировали несколько доступных источников (не менее 2-х, а желательно 4–5) для каждой ситуации на каждой рассмотренной станции. Мы выбрали 12 станций с несколькими источниками, удовлетворяющими нашим требованиям, и в сумме получили 179 позиций. Из этих 179-ти позиций только в 22-х случаях не удалось найти статистически значимого отрицательного тренда – тренд отсутствовал, или даже имел положительный знак.

Представить в статье таблицу со всеми 179-ю позициями по понятным причинам невозможно. В таблице 4 приведены результаты расчетов для 3-х станций с разными ситуациями (13 источников). Как следует из этой таблицы, в двух случаях (Боулдер и Уоллопс) тренды, получаемые для разных источников относительно близки между собой и позволяют получить для данной ситуации средний тренд с относительно небольшим  $SD$ . В случае Рима ситуация иная. Получаемые для разных источников тренды варьируют от  $-0.019$  до  $-0.057$ , что позволяет формальным осреднением получить среднюю величину тренда  $-0.041$ , но с большим  $SD$ .

В данных для Рима обращают на себя внимание два обстоятельства. Во-первых, наиболее низкое, далеко отстоящее от остальных значение тренда получается для источника “медианы”. Это является иллюстрацией того, о чем мы говорили выше при описании источников: медианы в ряде случаев могут давать отличающиеся от других источников результаты. Во-вторых, хорошо видно, что три источника, для которых коэффициент определенности  $R^2$  высок ( $0.93$ – $0.94$ ), дают очень близкие между собой величины тренда от  $-0.052$  до  $-0.057$ , которые отличаются от трендов для двух источников (включая и медианы) с более низким  $R^2$ .

Наконец, наиболее важное отличие данных для Рима от данных для Боулдера и Уоллопса состоит в том, что на двух последних станциях в приведенных в табл. 4 ситуациях отрицательный тренд начинается прямо с 1990 г., тогда как для Рима он для всех источников начинается лишь с 1994 г. Примеры двух этих разных ситуаций приведены на рисунках 3 (начало тренда в 1990 г.) и 4 (начало тренда в 1994 г.).

Таблица 4. Примеры трендов  $foF2$  в МГц/год для разных ситуаций на трех станциях

Источник	Начало	Конец	$R^2$	$\Delta foF2$	Тренд	Среднее
<b>Рим, SSJJ</b>						
IWG+SPIDR	1994	2005	0.93	-0.63	-0.057	-0.041
IWG+Дамболът	1994	2002	0.89	-0.2	-0.025	
Медианы+SPIDR	1994	2005	0.94	-0.58	-0.053	
Медианы	1994	2002	0.67	-0.15	-0.019	
SPIDRC	1994	2005	0.93	-0.57	-0.052	
<b>Боулдер, 14JF</b>						
IWG+SPIDR	1990	2003	0.76	-0.59	-0.045	-0.046
Дамболът	1990	2003	0.76	-0.54	-0.042	
Медианы	1990	2002	0.7	-0.53	-0.044	
SPIDRC	1990	2003	0.89	-0.68	-0.052	
<b>Уоллопс, SSJF</b>						
IWG+SPIDR	1990	2004	0.91	-0.77	-0.055	-0.064
IWG+медианы	1990	2002	0.92	-0.63	-0.053	
Медианы	1990	2002	0.91	-0.68	-0.057	
SPIDRC	1990	2003	0.95	-1.2	-0.092	

В приведенных примерах на рис. 3 наклоны аппроксимирующих линий близки, а потому все источники дают близкие величины отрицательного тренда  $foF2$ . Однако, так бывает не для всех станций и ситуаций, примером чего служит ст. Рим в табл. 4, которую мы уже обсуждали выше. Несмотря на сглаживание, разброс то-

чек остается иногда достаточно велик (например, для источника IWG+SPIDR для ст. Боулдер), но коэффициент определенности  $R^2 = 0.76$  при числе точек  $N = 14$  позволяет согласно критерию Фишера считать получаемый тренд достоверным со статистической значимостью выше 95%.

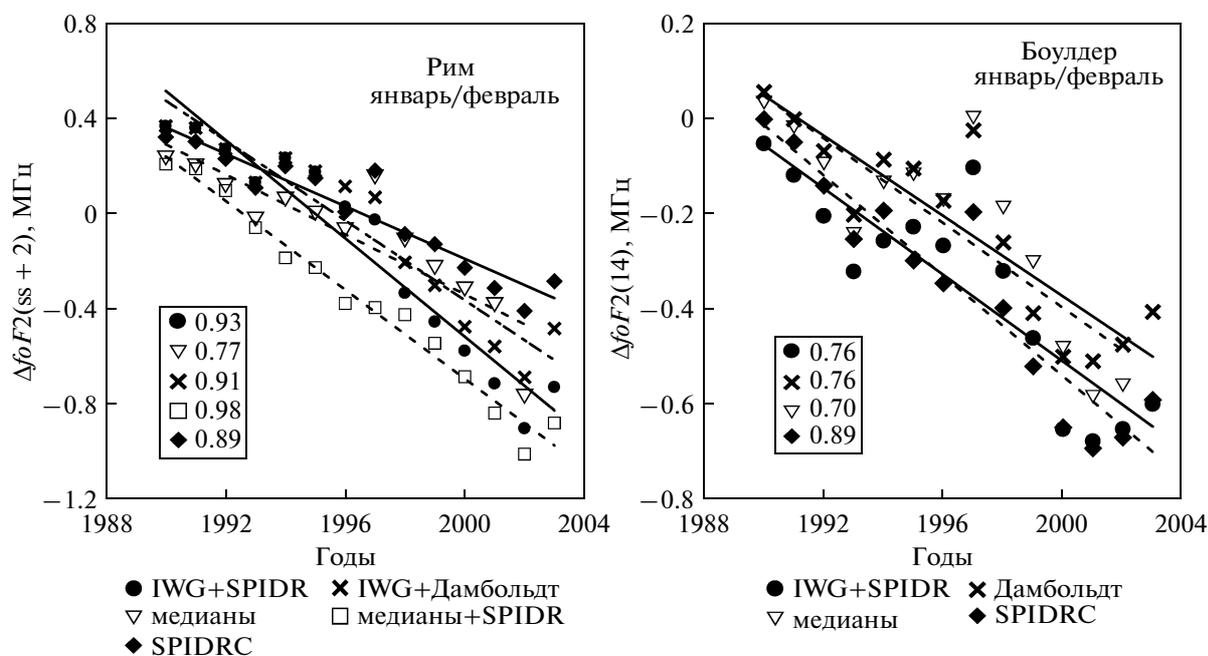


Рис. 3. Тренды для различных источников для станций Рим (ситуация SSJJ) и Боулдер (ситуация 14JF). Цифры при значках означают коэффициент определенности  $R^2$ .

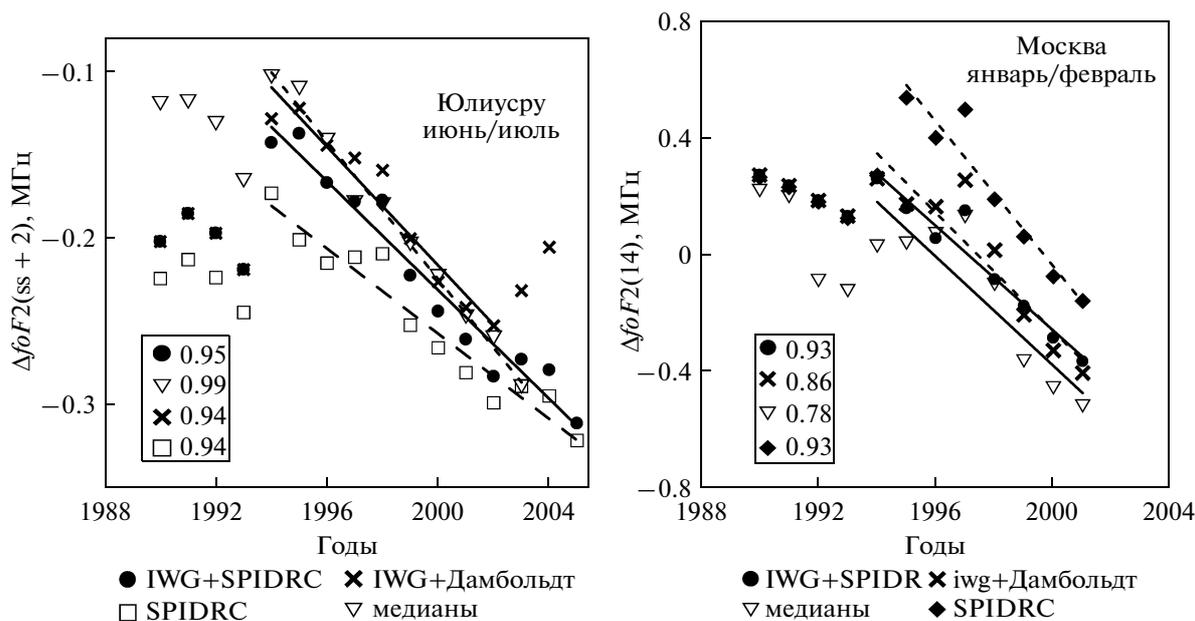


Рис. 4. Тренды для различных источников для станций Юлиусру (ситуация 14JF) и Москва (ситуация 14JF).

На рисунках типа рис. 4 выраженный тренд начинается, как правило, в 1994 г. (в некоторых случаях – в 1995 г.). Этой дате обычно предшествует небольшой подъем (скачок)  $\Delta foF2$  в 0.1–0.3 МГц. Мы ничего не можем сказать о возможных причинах этого скачка. Точка начала тренда может находиться в области небольших как отрицательных (рис. 4а), так и положительных (рис. 4б) величин  $\Delta foF2$ . В первом случае начальные значения  $foF2$  чуть ниже соответствующих величин  $foF2$  в период 1958–1979 гг. Это выглядит естественным, так как небольшой отрицательный тренд (например, порядка 0.01 в год, найденный в коллективном эксперименте [Laštovička et al., 2006]) должен был привести к небольшим отрицательным значениям  $\Delta foF2$  в районе 1990 г. Наличие небольших положительных величин  $\Delta foF2$  в 1990–1994 гг. не вполне понятно. На наш взгляд оно может быть (также, как и положительные величины  $\Delta$  в табл. 4) вызвано аппаратными эффектами. Легко предположить, что за несколько десятилетий на ионосферной станции могли произойти изменения в аппаратуре или методах обработки данных, которые не были вполне компенсированы и привели к более высоким величинам  $foF2$ , чем измерялись ранее.

Как бы то ни было, все четыре графика на рисунках 3 и 4 дают отрицательный тренд для периода после 2004 г. Окончательная сводка полученных линейных трендов  $foF2$  приведена в табл. 5. Приведены величины тренда, усредненные по всем имевшимся источникам для каждой ситуации. Соответствующие столбцы показывают начало и конец линейного тренда. Видно, что, хотя

разброс величин тренда для разных станций велик, удастся получить средние величины для каждой ситуации с допустимым SD (предпоследняя строка).

Обращает на себя внимание, однако, странный факт. Величины трендов для станций южного полушария (Хобарт, Грехемстоун и Таунсвилл) помещены в таблице в соответствии с реальным сезоном (т.е. данные для января–февраля помещены в лето, а для июня–июля – в зиму). При этом эти данные “выбиваются” из своих столбцов. Например, величины –0.011 и –0.006 для ст. Таунсвилл выглядят неуместными в зимних столбцах, где большинство остальных станций дает более высокие отрицательные тренды, и “просятся” в летние столбцы, где отрицательные тренды по другим станциям меньше.

Если мы “забудем” про зиму и лето и поместим тренды, полученные для станций Хобарт, Грехемстоун и Таунсвилл в соответствии с месяцами, а не сезонами, то картина суммарной статистики становится еще более благоприятной (нижние строки таблицы). Точная причина обнаруженного эффекта нам не известна, но можно предположить, что изменения в системе термосферных ветров привязаны к сезонам северного полушария и поэтому одинаковые эффекты в обоих полушариях могут наблюдаться в одинаковые месяцы, а не одинаковые сезоны.

В обоих случаях в табл. 5 хорошо виден сезонный эффект (в двух нижних строках он просто лучше обеспечен статистически) – и для 14:00 LT, и для момента ss+2 отрицательные тренды зимой выше, чем летом.

Таблица 5. Тренды  $foF2$  в МГц/год для 12 станций и 4-х ситуаций

Станция	Ситуация											
	SS_лето			14_лето			SS_зима			14_зима		
	начало, год	конец, год	тренд									
Боулдер	1990	2005	<b>-0.014</b>	1990	2002	<b>-0.015</b>	1990	2003	<b>-0.053</b>	1990	2003	<b>-0.046</b>
Рим	1994	2005	<b>-0.041</b>	1994	2005	<b>-0.011</b>	1990	2003	<b>-0.079</b>	1994	2005	<b>-0.072</b>
Юлиусру	1990	2005	<b>-0.014</b>	1994	2005	<b>-0.017</b>	1995	2003	<b>-0.051</b>	1990	2005	<b>-0.025</b>
Слау	1990	2005	<b>-0.020</b>	1990	2002	<b>-0.022</b>	1990	2003	<b>-0.039</b>	1990	2003	<b>-0.029</b>
Москва	1994	2001	<b>-0.023</b>	1994	2001	<b>-0.019</b>	1994	2001	<b>-0.041</b>	1994	2001	<b>-0.101</b>
Ташкент	1990	2001	<b>-0.033</b>	1995	2002	<b>-0.060</b>	1995	2001	<b>-0.053</b>	1995	2003	<b>-0.092</b>
Уоллопс	1990	2003	<b>-0.054</b>	1990	2005	<b>-0.007</b>	1990	2004	<b>-0.064</b>	1990	2003	<b>-0.027</b>
Эбре	1997	2005	<b>-0.014</b>	1994	2001	<b>-0.020</b>	1993	2004	<b>-0.031</b>	1993	2005	<b>-0.076</b>
Грэхэмстоун	1990	2005	<b>-0.030</b>	1990	2005	<b>-0.025</b>		нет тренда		1995	2005	<b>-0.011</b>
Хобарт	1995	2004	<b>-0.032</b>		нет тренда		1995	2004	<b>-0.029</b>	1994	2004	<b>-0.015</b>
Таунсвиль	1990	2003	<b>-0.053</b>	1995	2006	<b>-0.086</b>	1993	2005	<b>-0.011</b>	1994	2005	<b>-0.006</b>
Томск	1990	2001	<b>-0.038</b>	1995	2001	<b>-0.030</b>	1995	2001	<b>-0.051</b>	1990	2001	<b>-0.025</b>
Средний тренд и SD, МГц			<b>-0.031</b> <b>0.014</b>			<b>-0.028</b> <b>0.023</b>			<b>-0.046</b> <b>0.018</b>			<b>-0.044</b> <b>0.033</b>
Средний тренд и SD, МГц			<b>-0.026</b> <b>0.014</b>			<b>-0.019</b> <b>0.014</b>			<b>-0.048</b> <b>0.014</b>			<b>-0.055</b> <b>0.029</b>

## 6. ОБСУЖДЕНИЕ

Одним из основных выводов данной работы является заключение о том, что степень разброса величин  $foF2$  (определяемая с помощью стандартного отклонения SD) в период 1998–2010 гг. оказалась значительно (в 1.5–2.5 раза, см. табл. 3) выше, чем в начальный период 1958–1979 гг. Поскольку нет оснований думать, что на ионосферных станциях стали менее аккуратно проводить измерения, полученный вывод говорит, что усилилась изменчивость критической частоты при одних и тех же условиях солнечной активности. В принципе такое усиление изменчивости может происходить по двум причинам. Одна из них – усиление изменчивости аэрономических параметров, определяющих электронную концентрацию в максимуме слоя  $F2$  в условиях фотохимического равновесия. Это прежде всего – температура и состав термосферного газа. Вторая причина – усиление изменчивости системы горизонтальных ветров в термосфере, которые через вертикальный дрейф и изменение высоты максимума слоя  $hmF2$  влияют на  $NmF2$ . Оба процесса могут (и должны) иметь место в результате происходящего охлаждения и оседания средней и верхней атмосферы. Сказать определенно, какой из них больше влияет на рост  $SD(2)/SD(1)$  (см. табл. 3) в настоящее время трудно. Однако, отмеченный при описании табл. 3 факт более сильного увеличения

$SD(2)/SD(1)$  для момента через два часа после захода ( $ss+2$ ), когда влияние динамических процессов должно быть наиболее сильно, позволяет предположить, что главную роль в увеличении разброса  $foF2$  играет именно нестабильность термосферной динамики, неизбежно изменяющейся в процессе охлаждения и оседания верхней атмосферы.

Анализ общего изменения  $foF2$  от периода 1958–1979 гг. к периоду 1998–2010 гг. (величина  $\Delta$  в табл. 2) дает все основания утверждать, что за время, прошедшее между двумя указанными периодами, произошло уменьшение критической частоты, причем величина этого уменьшения может составлять 0.5–1.0 МГц. На основании этих цифр нельзя получить линейный тренд уменьшения  $foF2$  в год, поскольку они относятся к интервалу между двумя периодами, но подтверждение самого факта отрицательного тренда критической частоты очень важно. Можно условно попытаться оценить тренд, считая, что в среднем величина  $\Delta$  составляет  $-0.60$  МГц и относится к периоду в 20 лет. В этом случае отрицательный тренд  $foF2$  будет равен  $-0.03$  МГц в год. Эта величина находится как раз посередине между усредненными по всем станциям линейными трендами для лета ( $0.024$  МГц в год) и зимы ( $0.052$  МГц в год), приведенными в табл. 5.

Результаты вычисления линейных трендов  $foF2$  мы уже фактически обсудили, описывая табл. 5 в предыдущем параграфе. Разброс получаемых величин от станции к станции достаточно велик, однако не настолько, чтобы нельзя было вычислить среднее значение по всем станциям для каждой ситуации с разумными величинами SD (см. нижние строки табл. 5).

Первый результат, касающийся полученных трендов, который следует обсудить, это – полученная сезонная зависимость трендов. Для обоих рассмотренных моментов (14:00 LT и ss+2) величина отрицательного тренда примерно вдвое больше зимой, чем летом. В предыдущей публикации [Данилов и Константинова, 2012] мы на основании качественного анализа небольшого количества станций, для которых удалось найти данные в системе SPIDR (без исправлений, описанных в параграфе 2), пришли к выводу, что отрицательные тренды летом более вероятны. Мы объяснили это влиянием уменьшения температуры, поскольку при более высоких температурах летом коэффициент рекомбинации должен сильнее реагировать на падение  $T$ , чем зимой.

Данные табл. 5, однако, дают более высокие отрицательные тренды зимой, чем летом, и не дают заметного различия между трендами для моментов 14:00 LT и ss+2. Детальный анализ этих двух фактов еще предстоит сделать, но предварительно можно утверждать, что обнаруженные тренды  $foF2$  вызваны не только (и не столько) уменьшением температуры, но изменениями других параметров (состава и плотности термосферного газа, системы горизонтальных термосферных ветров), которые претерпевают изменения в процессе охлаждения и оседания верхней атмосферы.

Рассмотрим теперь абсолютные величины полученных трендов. Выше уже упоминалось, что в коллективном эксперименте [Laštovička et al., 2006] для ст. Юлиусру был получен для периода 1977–1997 гг. отрицательный тренд порядка 0.01 МГц в год. Как видно из табл. 5, полученный в данной работе тренд для этой станции (осредненный по всем четырем ситуациям) составляет  $-0.027$  МГц в год, что почти в три раза выше величины, полученной к коллективному эксперименту. В работе [Bremer, 1998] были получены как отрицательные, так и положительные тренды  $foF2$ . Если сравнивать данные табл. 5 с результатами Бремера для двух станций (Слау и Юлиусру), для которых в работе [Bremer, 1998] были получены отрицательные тренды, то результат окажется следующим. Для Слау полученный здесь отрицательный тренд примерно в 20 раз выше, полученного Бремером, а для Юлиусру – в 10 раз. В более поздней работе [Bremer, 2001] приведен тренд  $foF2$ , полученный усреднением трендов всех рассмотрен-

ных станций и равный  $-0.0014$  МГц в год. Все эти сравнения указывают на то, что отрицательные тренды  $foF2$  действительно усиливаются со временем в последние десятилетия, скорее всего как результат усиления охлаждения и оседания верхней атмосферы.

Отметим еще одно интересное обстоятельство, касающееся рисунков типа 3 и 4. Для некоторых станций и некоторых ситуаций (но далеко не для всех) наблюдается своего рода “загиб” в распределении точек (см. источники IWG+SPIDR и SPIDRC на рис. 3) в самом конце рассматриваемого интервала (точки 2003–2005 гг.). Каждая точка – результат сглаживания, и указанные точки захватывают годы очень низкой солнечной активности 2006–2010 гг., когда индекс  $F10.7$  не превосходил 80 и даже опускался ниже 70. Поэтому полученный результат наводит на мысль о том, что сам тренд критической частоты может зависеть от солнечной активности, уменьшаясь при малых  $F10.7$ . Хотя пример зависимости тренда от солнечной активности (уменьшения плотности термосферы по спутниковым данным [Emmert et al., 2008]) уже имеется, наш вывод о возможной зависимости тренда  $foF2$  следует рассматривать как сугубо предварительный. Подтверждение или опровержение этого тренда станет возможно через 5–6 лет, когда можно будет существенно продолжить ряды точек на рисунках типа рис. 3 и 4.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе получено, что в период 1990–2010 гг. величины критической частоты в основном существенно ниже, чем в период 1958–1979 гг., используемый для сравнения. Подчеркнем, что этот результат получен двумя независимыми способами. В первом методе сравнивается среднее отклонение  $\Delta foF2$  для более позднего периода от значений  $foF2$  при той же солнечной активности для более раннего периода (величины  $\Delta$  в табл. 2 и примеры на рисунках 1 и 2). Оказывается, что величина  $\Delta foF2$  отрицательна для подавляющего большинства станций, указывая на отрицательный тренд  $foF2$ , который можно условно оценить как  $-0.03$  МГц в год.

Анализ линейных трендов  $foF2$ , который из-за сильного разброса индивидуальных значений  $foF2$  приходится проводить, используя сглаженные величины, дает для подавляющего большинства позиций (источник + ситуация) отрицательные тренды  $foF2$ . Хотя имеется заметный разброс получаемых величин, удается получить для каждой ситуации средние значения с приемлемой ошибкой. Для летних ситуаций (14JJ и SSJJ) средние величины близки между собой и дают летнее значение тренда  $-0.024$  МГц в год. То же справедливо и для зимних ситуаций (14JF и SSJF) со средней величиной зимнего тренда  $-0.052$  МГц в

год. Усреднять летние значения с зимними вряд ли имеет смысл, поскольку тренды в разные сезоны могут быть обусловлены разными процессами.

Основной завершающий вывод работы состоит в том, что полученные для конца 90-х и начала 2000-х годов отрицательные тренды критической частоты слоя  $F_2$  существенно выше, чем получалось различными авторами (в том числе и одним из авторов этой работы) для более ранних периодов.

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Данилов А.Д. Вариации  $foF_2$  в конце 90-х и начале 2000-х годов по медианным данным // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 51. № 6. С. 769–777. 2011.
- Данилов А.Д. Долговременные тренды в верхней атмосфере и ионосфере (обзор) // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 52. № 3. С. 291–312. 2012.
- Данилов А.Д., Ванина-Дарт Л.Б. Параметры ионосферного слоя  $F_2$  как источник информации о трендах динамики термосферы // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 50. № 2. С. 195–208. 2010.
- Данилов А.Д., Константинова А.В. Вариации  $foF_2$  в конце 90-х и начале 2000-х годов по данным банка SPIDR // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 52. № 3. С. 372–377. 2012.
- Bremer J. Trends in the ionospheric E and F regions over Europe // Ann. Geophysicae. V. 16. P. 986–996. 1998.
- Bremer J. Trends in the thermosphere derived from global ionosonde observations // Adv. Space Res. V. 28. № 7. P. 997–1006. 2001.
- Danilov A.D. Scatter of  $hmF_2$  values as an indicator of trends in thermospheric dynamics // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 71. № 14–15. P. 1586–1591. 2009.
- Damboldt T., Suessmann P. Consolidated database of worldwide measured monthly medians of ionospheric characteristics  $foF_2$  and  $M(3000)F_2$ . INAG Bulletin on the Web, INAG-73. 2012.
- 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.
- Emmert J.T., Picone J.M., Meier R.R. Thermospheric global average density trends 1967–2007, derived from orbits of 5000 near-Earth objects // Geophys. Res. Lett. V. 35, L05101. doi:10.1029/2007GL032809. 2008.
- Laštovička J., Mikhailov A.V., Ulich T. et al. Long-term trends in  $foF_2$ : a comparison of various methods // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 68. № 17. 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. 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. A greenhouse effect in the ionosphere? // Planet. Space Sci. V. 38. № 7. P. 945–948. 1990.
- 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.