

УДК 550.388.2

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

© 2011 г. А. Д. Данилов

Институт прикладной геофизики им. акад. Е. К. Федорова, Москва

e-mail: adanilov99@mail.ru

Поступила в редакцию 09.03.2011 г.

Рассмотрено изменение величин критической частоты слоя $F2$ с 1990 по 2005–2007 гг. по медианным данным. В международных банках найдено 11 станций, для которых имеются необходимые данные. Получено подтверждение вывода предыдущей работы автора [Данилов, 2011] о том, что в конце 90-х и начале 2000-х годов наблюдается отрицательный тренд $foF2$ как в послезаходные часы суток, так и днем.

1. ВВЕДЕНИЕ

Автор неоднократно обращался в своих публикациях к проблеме долговременных изменений (трендов) параметров средней и верхней атмосферы, прежде всего — двух основных параметров ионосферного слоя $F2$ — критической частоты $foF2$ и высоты максимума $hmF2$. Не загружая статью подробной библиографией, отсылаем читателя к недавним публикациям [Данилов и Ванина-Дарт, 2010; Danilov, 2011], где можно найти ссылки на предыдущие работы. Отметим лишь, что большинство указанных работ было посвящено поискам трендов 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.) в период 60-х–90-х годов прошлого века. Основным результатом этих работ было установление того факта, что наблюдаются систематические изменения поведения этих параметров со временем (тренды). Эти тренды были интерпретированы (подробнее см. указанные выше публикации) как результат долговременных изменений динамического режима термосферы из-за систематического охлаждения и оседания средней и верхней атмосферы благодаря увеличению количества парниковых газов [Laštovička et al., 2008; Laštovička, 2011].

В предыдущей работе автора [Данилов, 2011] был поднят вопрос о возможности проследить долговременное поведение параметров слоя $F2$ в более поздний период — конец 90-х и начало 2000-х годов.

Как было подробно описано в указанной работе, основной здесь является проблема нахождения исходных данных по $foF2$ и $hmF2$, используемых для поисков трендов. На многих ионосферных станциях глобальной сети ионосферного

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 проводиться 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 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]).

Данилов [2011] использовал данные по $foF2$ и $hmF2$ для 5-ти ионосферных станций за период с 1990 до 2005–2007 гг., найденные в международных банках данных в формате *iwg*, для того, чтобы получить первые представления о характере долговременных изменений параметров слоя $F2$ на грани века.

Поведение $foF2(\text{зах} + 2)/foF2(14)$ для станций, для которых были найдены медианные данные по $foF2$

Станция	$foF2(\text{зах} + 2)$	R^2	$foF2(14)$	R^2
Москва	падение	0.51	падение	0.64
Слау	падение	0.90	падение	0.87
Ташкент	падение	0.85	падение	0.96
Томск	падение	0.94	падение	0.94
Юлиусру	падение	(см. текст)	падение	0.82
Ростов	падение	0.35	(см. текст)	
Боулдер	падение	0.69	падение	0.85
Новосибирск	падение	0.83	падение	0.90
Рим	падение	0.36	падение	0.52
о-в Уоллопс	падение	0.63	рост	
Пойнт Аргуэлло	рост		рост	

Мы не будем здесь подробно останавливаться на проблеме поиска данных вертикального зондирования для указанного периода, ограничившись замечаниями, которые уже сделаны выше. Отметим лишь, что, как подробно описано в работе [Данилов, 2011], наибольшие трудности встречаются при поиске данных по высоте слоя $hmF2$. Именно поэтому в данной работе мы ограничимся дальнейшим рассмотрением поведения величин $foF2$.

2. ПОВЕДЕНИЕ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ СЛОЯ $F2$

Основная идея данной работы состоит в том, чтобы использовать медианные значения $foF2$, которые удается найти в банках данных. При этом требования к рядам данных для анализируемых станций (неоднократно описанные ранее) остаются теми же – необходимо, чтобы данные заканчивались не ранее 2002–2003 гг. и начинались в 1957–1959 гг. (начало наблюдений на большинстве станций). Период 1958–1979 гг. используется в работах автора для выявления зависимости $foF2$ от индекса солнечной активности $F10.7$ с тем, чтобы потом избавиться от этой зависимости в той серии данных, для которой ищутся тренды.

Нам удалось найти данные по месячным медианам $foF2$, удовлетворяющие указанным требованиям, для 11-ти станций северного полушария, приведенным в таблице. Первые пять из них представляют собой те станции, для которых были данные в *iwg* формате и которые использовались в работе [Данилов, 2011].

Следует подчеркнуть, что использование медианных данных обедняет результаты. При работе с данными в *iwg* формате есть возможности вводить ограничения на уровень магнитной активности анализируемых дней (что и делалось в серии предыдущих работ автора по поиску трен-

дов различных комбинаций параметров слоя $F2$) и, таким образом, избежать влияния дней с высоким уровнем геомагнитной (а следовательно, и ионосферной) возмущенности. При работе с медианами такая возможность, естественно, отсутствует. Однако, как мы увидим ниже, по крайней мере, на качественном уровне результаты анализа трендов по медианным данным близки к результатам анализа трендов по данным в *iwg* формате.

Одним из двух основных результатов работы [Данилов, 2011] было то, что величина $foF2$, измеренная через 2 часа после захода Солнца ($foF2(\text{зах} + 2)$), дала устойчивый отрицательный тренд (падение со временем) для периода после 1990 г. Величина $foF2(\text{зах} + 2)$ рассматривалась в серии работ автора потому, что именно в это время согласно Ришбету [Rishbeth, 1998] должно быть наиболее сильно влияние на критическую частоту слоя $F2$ горизонтальных ветров в термосфере, вызывающих вертикальный дрейф слоя и соответствующее изменение его высоты $hmF2$.

В работе [Данилов, 2011] был получен еще один важный результат, касающийся поведения величины $foF2(\text{зах} + 2)$. Оказалось, что до ~1990 г. величины $foF2(\text{зах} + 2)$ и $hmF2(\text{зах} + 2)$ хорошо коррелируют между собой, подтверждая утверждение Ришбета о том, что в этот период величина $foF2(\text{зах} + 2)$ в значительной мере контролируется изменениями вертикального дрейфа, вызванного горизонтальными ветрами в термосфере. Однако, после 1990 г. эта связь начинает нарушаться. Одной из причин этого (см. Данилов [2011]) может быть тот факт, что помимо трендов в термосферной циркуляции, которые определяли тренды $foF2(\text{зах} + 2)$ до некоторого момента времени, на долговременные изменения $foF2(\text{зах} + 2)$ стали влиять изменения фотохимических параметров слоя $F2$, вызванные тем же оседанием и охлаждением средней и верхней атмосферы [Laštovička

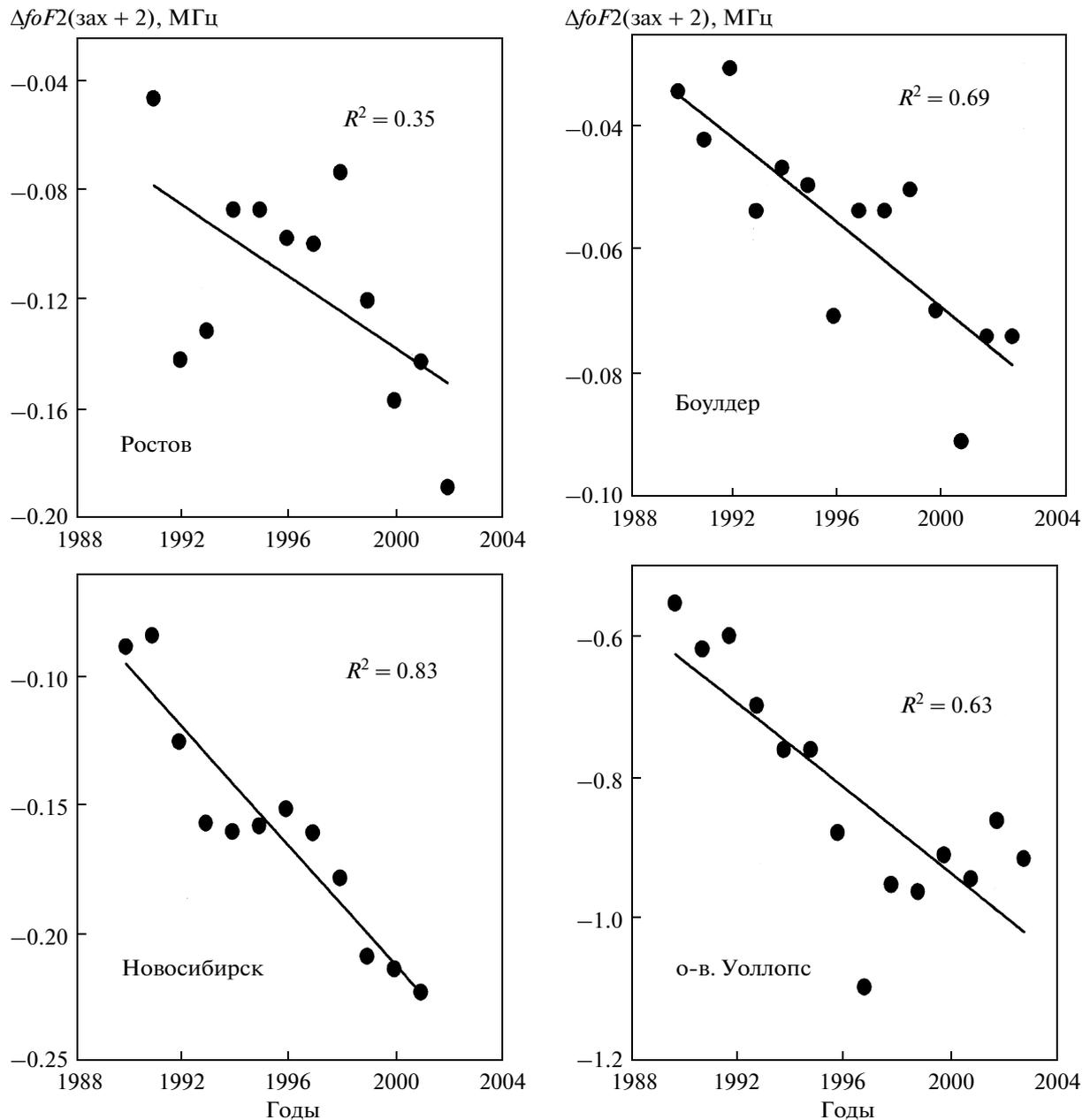


Рис. 1. Изменение со временем величины $f_oF2(\text{зах} + 2)$ для четырех станций в июне–июле по медианным данным.

et al., 2008; Laštovička, 2011], что и изменения в динамическом режиме термосферы.

В предыдущей работе автора было проанализировано изменение величины $f_oF2(\text{зах} + 2)$ на границе веков для пяти станций (Москва, Слау, Томск, Ташкент и Юлиусру) в июне–июле. Для четырех станций получено систематическое падение величины $f_oF2(\text{зах} + 2)$ от 1980 г. до конца интервала имеющихся данных. Аналогичное поведение $f_oF2(\text{зах} + 2)$ со временем наблюдалось в целом и для ст. Ташкент, хотя после 1996 г. разброс точек нарушает стройную картину падения $f_oF2(\text{зах} + 2)$.

На рисунке 1 приведено изменение величины $f_oF2(\text{зах} + 2)$ по медианным данным для 4-х станций, для которых нет соответствующих данных в формате *iwg*. Как следует из рис. 1, для всех четырех станций наблюдается хорошо выраженное падение $f_oF2(\text{зах} + 2)$ со временем. Приведенная на рисунках величина коэффициента определенности R^2 , позволяющая определять статистическую достоверность получаемых зависимостей по критерию Фишера, показывает, что эта достоверность составляет более 99% для ст. Новосибирск,

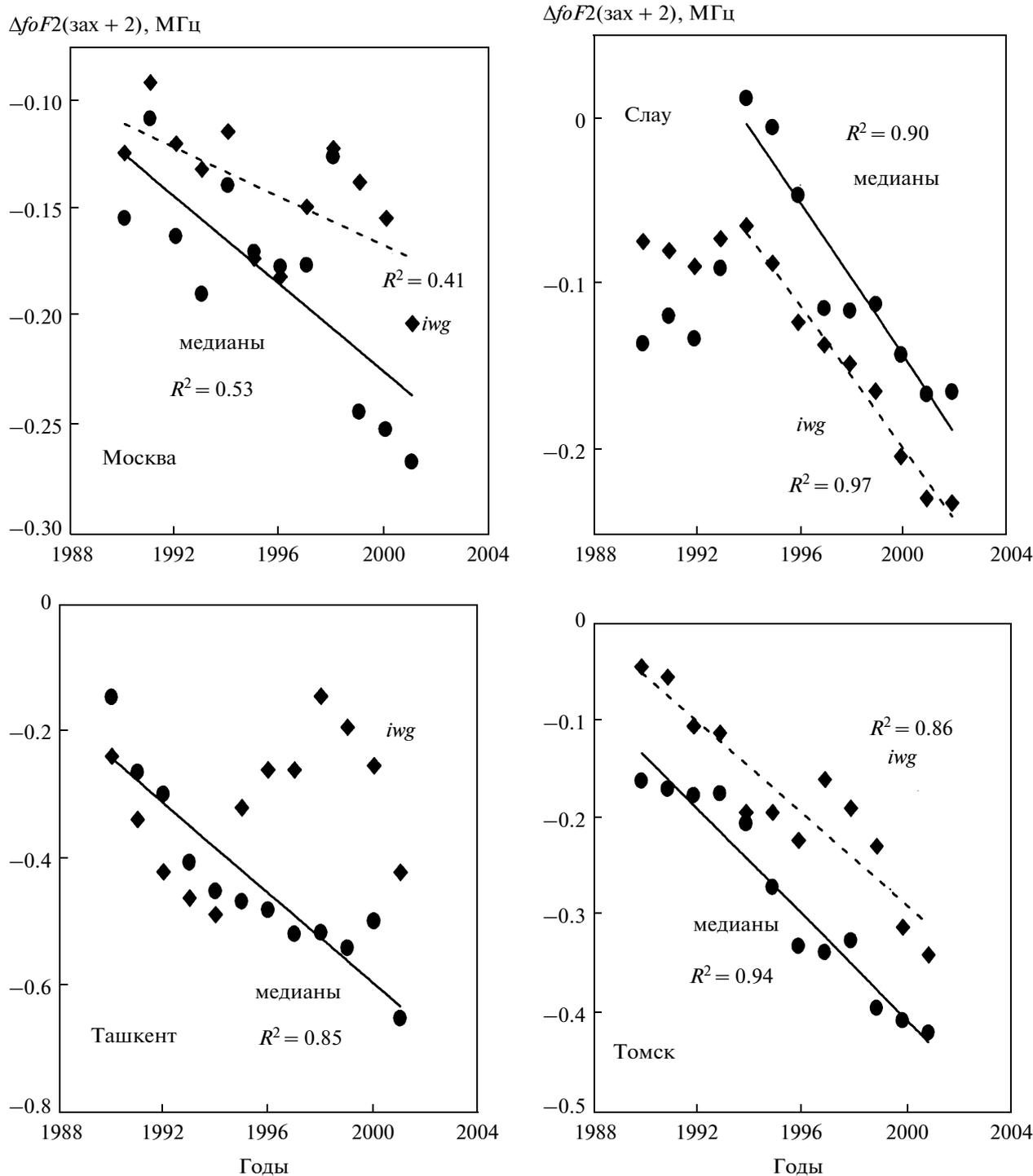


Рис. 2. Изменение со временем величины $foF2(\text{зах} + 2)$ для четырех станций в июне–июле по медианным данным (точки) и по данным в формате *iwg* (ромбы).

~95% для станций Боулдер и о-в. Уоллопс и ~90% для ст. Ростов.

На рисунке 2 приведено аналогичное изменение величины $foF2(\text{зах} + 2)$ для четырех из пяти станций, рассматривавшихся в предыдущей ра-

боте. Все данные на рис. 1 и 2 относятся к летнему периоду (июнь–июль). Видно, что медианные данные для всех четырех станций с большой статистической надежностью (высокие величины R^2) дают падение $foF2(\text{зах} + 2)$ со временем. На рисунке 2 для соответствующих станций приведено также

изменение $foF2(\text{зах} + 2)$, полученное в работе [Данилов, 2011] на основании анализа данных в *iwg* формате. Видно, что качественно результаты анализа двух совершенно разных массивов данных дают одинаковые результаты — уменьшение $foF2(\text{зах} + 2)$ со временем. Для станций Слау и Томск даже градиенты этого уменьшения (наклоны аппроксимирующих прямых) одинаковы. Для ст. Ташкент падение $foF2(\text{зах} + 2)$ по медианным данным с высокой величиной R^2 показывает, что разброс точек по данным в *iwg* формате (см. выше) является случайным.

Результаты анализа поведения $foF2(\text{зах} + 2)$, просуммированные в таблице, показывают, что для 10-ти станций из 11-ти, для которых удалось найти данные по месячным медианам, поведение $foF2(\text{зах} + 2)$ в рассматриваемый период оказывается одинаковым — наблюдается уменьшение $foF2(\text{зах} + 2)$ со временем. Исключение составляет ст. Пойнт Аргуэлло, для которой получен $foF2(\text{зах} + 2)$. Для ст. Юлиусу медианные данные дают падение $foF2(\text{зах} + 2)$, но с малым временным градиентом и низкой статистической значимостью ($R^2 = 0.25$, см. таблицу). Однако ст. Юлиусу входит в число пяти станций, для которых есть данные в формате *iwg*, и эти данные дают хорошо выраженное и статистически значимое ($R^2 = 0.87$) уменьшение $foF2(\text{зах} + 2)$ со временем.

Следует напомнить, что на всех рассмотренных рисунках приводятся сглаженные с окном в 11 лет величины $\Delta foF2(\text{зах} + 2)$. Это означает, что, во-первых, устранен эффект солнечной активности (подробнее см. [Данилов и Ванина-Дарт, 2010; Danilov, 2011]), и мы рассматриваем “чистое” изменение критической частоты со временем, вызванное внутренними изменениями в термосфере. Во-вторых, хотя точки на рисунках кончаются в 2001–2002 гг., на самом деле на эти точки влияют данные до конца имеющегося ряда данных (2005–2007 гг.), поэтому рисунки отражают поведение критической частоты в конце последнего десятилетия прошлого века и в начале первого десятилетия этого века.

Систематическое уменьшение $foF2(\text{зах} + 2)$ полученное в данной работе по данным 10-ти станций и не связанное, как показано в работе [Данилов, 2011], с трендами высоты слоя $F2$, указывает на систематическое изменение аэрономической ситуации в слое $F2$ ионосферы. Мы рассмотрим этот вопрос подробнее в следующем параграфе, а пока лишь отметим, что аналогичный анализ тех же медианных данных по $foF2(\text{зах} + 2)$ для зимних данных (январь–февраль) не позволил получить какой-либо систематической картины трендов $foF2(\text{зах} + 2)$. Пример изменения $foF2(\text{зах} + 2)$ со временем для трех станций в зимний период приведен на рис. 3.

$\Delta foF2$, МГц

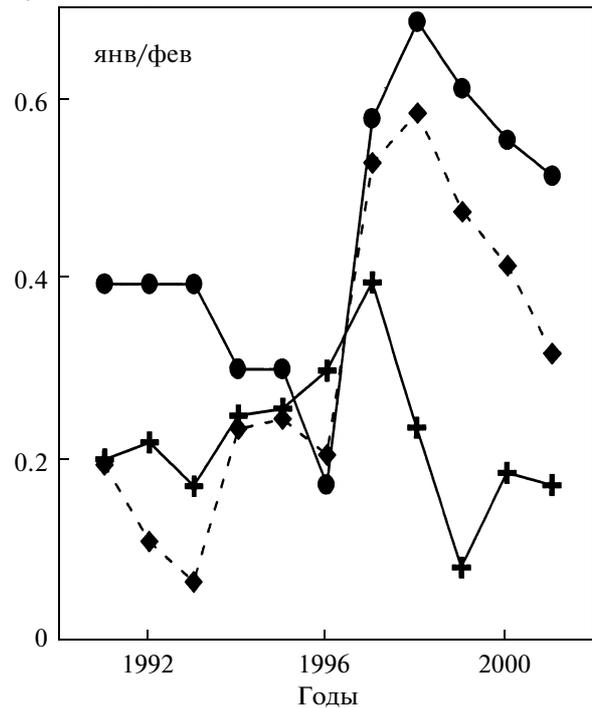


Рис. 3. Изменение со временем величины $foF2(\text{зах} + 2)$ для трех станций по медианным данным в январе–феврале (точки — Ростов, ромбы — Новосибирск, кресты — Москва).

Если изменение аэрономической ситуации приводит к отрицательному тренду $foF2(\text{зах} + 2)$ в рассматриваемый период после 1990 г., то можно ожидать, что будет наблюдаться и эффект систематического уменьшения критической частоты в дневное время.

Используя медианные данные для тех же станций и тот же метод, мы построили изменение со временем величины $foF2$ для 14:00 LT. Результаты приведены в таблице. Примеры уменьшения $foF2(14)$ приведены на рис. 4. На рисунке 5 для двух станций приведены примеры изменения $foF2(14)$, при котором, если брать все точки с 1990 г., получается либо плохо выраженный ход со временем (Ташкент), либо отсутствие такого хода (Новосибирск). Однако если брать точки только с 1995 г., получается хорошо выраженное падение $foF2(14)$ с высокой статистической достоверностью (высокие величины R^2). Возможно, по не известным пока причинам эффект уменьшения $foF2(14)$ начал на этих двух станциях проявляться позже, чем на других.

Как видно из таблицы, этот эффект проявляется не так четко, как эффект в поведении $foF2(\text{зах} + 2)$. Для $foF2(14)$ мы имеем две станции с противоположным временным ходом (Уоллопс

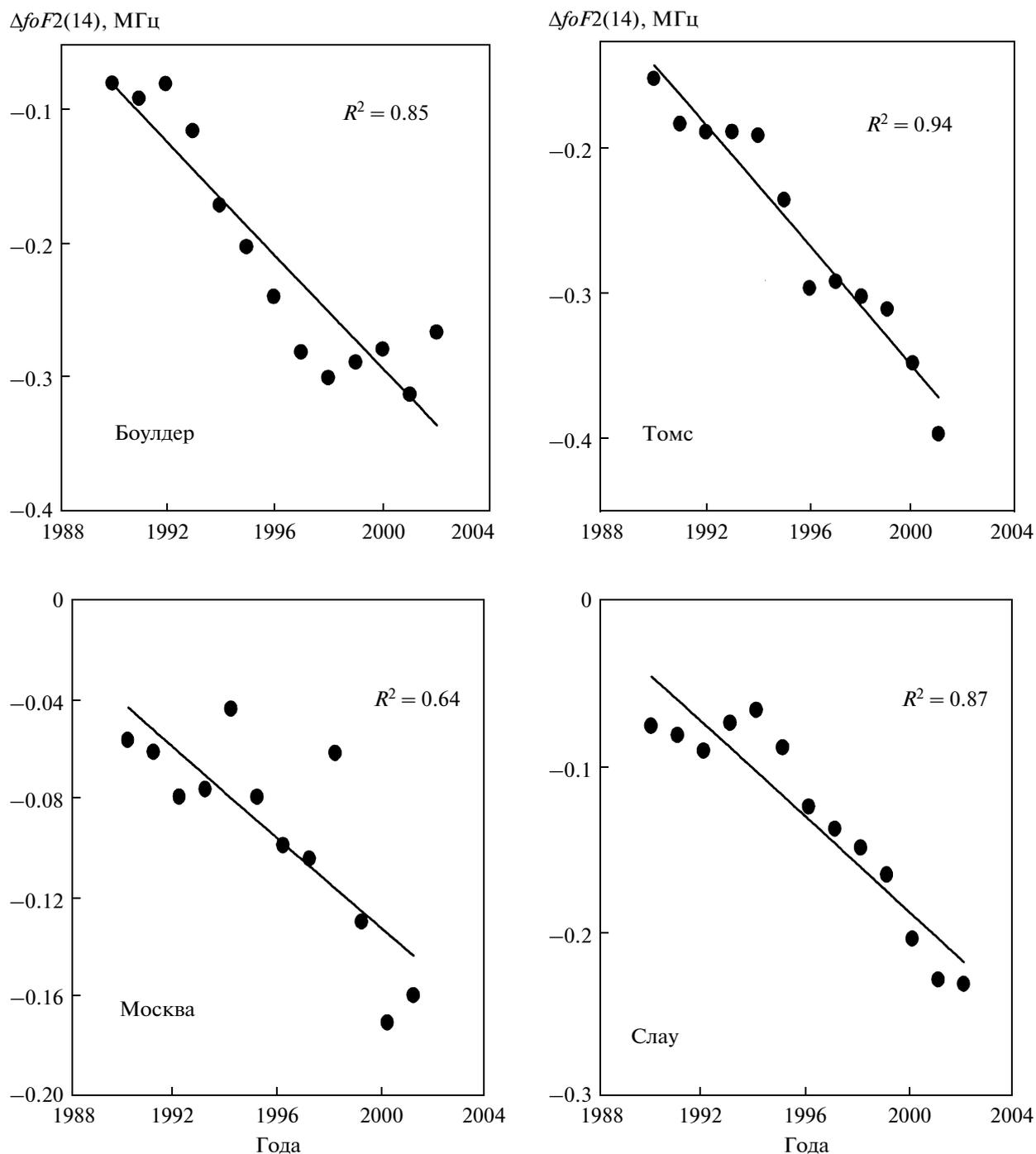


Рис. 4. Изменение со временем величины $foF2(14)$ для четырех станций в июне–июле по медианным данным.

и тот же Пойнт Аргуэлло) и одну станцию (Ростов), где силен разброс точек и эффект статистически не значим. Таким образом, мы имеем статистически значимый эффект падения $foF2(14)$ для 8-ми станций из 11-ти рассмотренных. Причины отклонения поведения $foF2(14)$ на указанных трех станциях пока не известны.

Попытки построить зависимости $foF(14)$ от времени для зимних месяцев (январь–февраль), так же как и в случае с $foF2(\text{зах} + 2)$ не дали результата. Не видно систематического изменения $foF2(14)$ со временем, и картина в большинстве случаев напоминает примеры, приведенные для $foF2(\text{зах} + 2)$ на рис. 3.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Выше мы уже говорили о том, что ухудшение корреляции между $foF2(\text{зах} + 2)$ и $hmF2(\text{зах} + 2)$ после 1990–1995 гг. (см. [Данилов, 2011]) может свидетельствовать о том, что не только изменения в динамическом режиме термосферы могут влиять на долговременные тренды критической частоты слоя $F2$ после захода Солнца. В серии предыдущих работ (см. соответствующую библиографию в работе Данилова и Ваниной-Дарт [2010]) 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 изменениям, является, видимо, температура нейтрального газа T . Охлаждение термосферы означает как раз падение T . Температура влияет на ионизационно-рекомбинационный цикл в слое $F2$ через линейный коэффициент рекомбинации β , который зависит от нее через температурную зависимость констант хорошо известных ионно-молекулярных реакций. Этот вопрос подробно рассмотрен в предыдущей работе [Данилов, 2011], и мы не будем здесь к нему возвращаться. Отметим только, что температурный эффект влияния на критическую частоту должен быть хорошо выражен в летний период и плохо – в зимний [Mikhailov and Perrone, 2011].

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”) $NmF2(\text{зах} + 2)$ 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 .

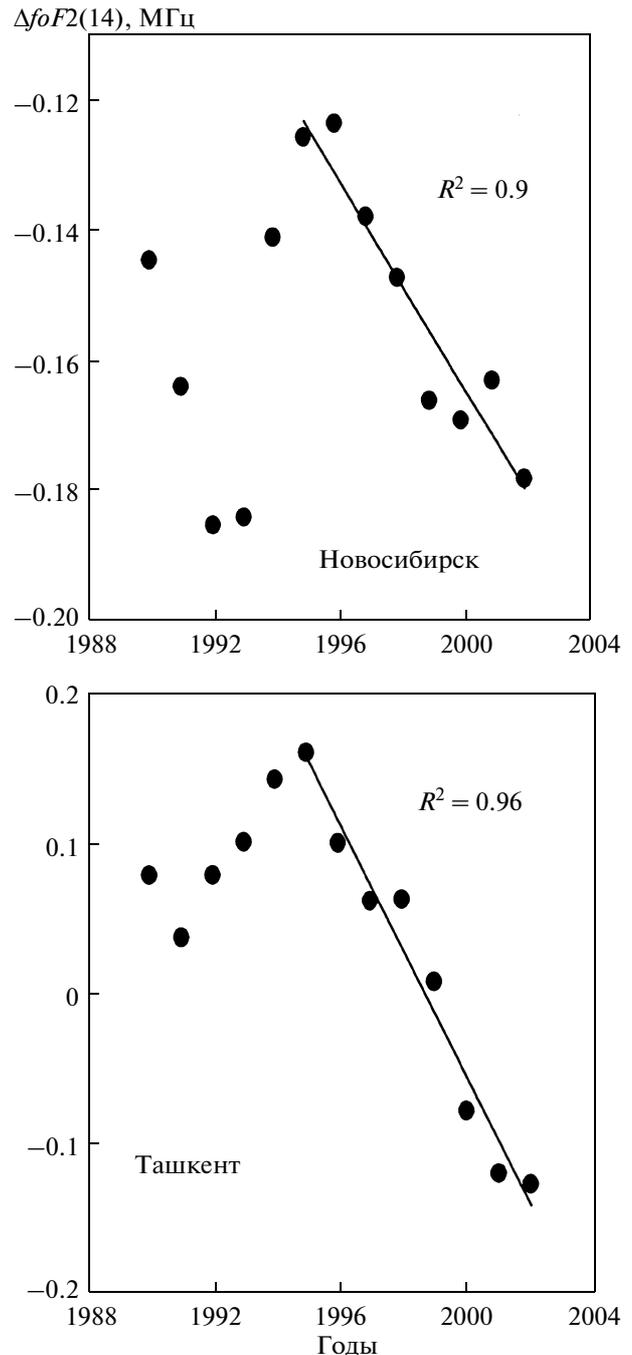


Рис. 5. Изменение со временем величины $foF2(14)$ для двух станций в июне–июле по медианным данным.

Эффект уменьшения $foF2$ 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.

Таким образом, полученное в данной работе наличие летом отрицательных трендов величин $foF2(14)$ и $foF3(\text{зах} + 2)$ в рассматриваемый период

после 1990 г. говорит в пользу того, что уменьшение температуры в процессе “оседания и охлаждения” верхней атмосферы начинает влиять на ионизационно-рекомбинационный баланс в слое F_2 и приводит к отрицательным трендам критической частоты слоя. Тот факт, что эффект хорошо виден в летние месяцы и не проявляется пока зимой, косвенно подтверждает такое предположение, поскольку при относительно низких зимних температурах влияние T на константы ионно-молекулярных реакций, а через них на коэффициент рекомбинации β и foF_2 , должно быть мало (см. Mikhailov and Perrone [2011]).

Коллективный эксперимент, проведенный под руководством Я. Ластовички в 2005 г. [Laštovička et al., 2006], показал, что большинство исследовательских групп, использовавших разные методы определения трендов foF_2 , получили на одном и том же материале (ст. Юлиусру, 1976–1996 гг.) небольшие отрицательные тренды. Автор данной работы также принимал участие в указанном эксперименте, используя метод нахождения “негеомагнитных” трендов, разработанный им ранее [Данилов, 2002]. Анализ с помощью этого метода дал величину тренда foF_2 , равную 0.008 МГц в год. Это оказалось примерно вдвое меньше, чем средний тренд порядка 0.015 МГц в год, полученный по всем результатам эксперимента [Laštovička et al., 2006].

Анализ рисунков 1–2 и 4–5 показывает, что полученный в данной работе интервал изменения ΔfoF_2 за рассматриваемый период 1990–2001 гг. различается для разных станций и лежит в пределах от 0.12 до 0.6 МГц. С чем связан такой разброс, определенно сказать трудно. В случае $foF_2(\text{зах} + 2)$, вероятно, существенная часть разброса связана с разным вкладом динамических процессов в величину тренда. Как было показано в предыдущей работе [Данилов, 2011], поведение hmF_2 со временем в рассматриваемый период различно для разных станций, а следовательно, должно быть различно и влияние трендов динамических процессов на $foF_2(\text{зах} + 2)$. В случае $foF_2(14)$ пока не удается объяснить разброс полученных трендов. Интересно, что средние величины изменения за 10 лет близки: 0.23 МГц для $foF(\text{зах} + 2)$ и 0.21 МГц для $foF_2(14)$. Таким образом, основной вывод проделанного анализа состоит в том, что для большинства станций получается уменьшение $foF_2(\text{зах} + 2)$ $foF_2(14)$, в среднем составляющее около 0.22 МГц и ряде случаев достигающее 0.4–0.6 МГц за рассматриваемый период. Средняя величина соответствует тренду ~ 0.022 МГц в год, а максимальные значения – тренду ~ 0.04 – 0.06 МГц в год.

Легко видеть, что отрицательные тренды критической частоты слоя F_2 , полученные для периода 90-х–2000-х годов, заметно больше, чем те же

тренды, полученные для периода 1976–1996 гг. Как уже указывалось выше, наиболее вероятная причина увеличения отрицательных трендов – систематическое падение температуры термосферы. Это согласуется с гипотезой оседания и охлаждения верхней и средней атмосферы, о которой уже говорилось выше, и подтверждается наблюдениями методом некогерентного рассеяния.

В последнее время появляются возможности анализировать тренды параметров термосферы и ионосферы на основании измерений на установках некогерентного рассеяния (НР), поскольку ряды непрерывных наблюдений на таких установках становятся достаточно длинными для выявления трендов. Были проанализированы данные наблюдений ионной температуры T_i методом НР на станциях Милстоун Хилл [Zhang and Holt, 2008; 2011] и Сайнт Сантин [Donaldson et al., 2010] за период с 70-х годов прошлого века и был обнаружен отрицательный тренд этой величины (0.6–3.9 К в год) на высотах области F . Поскольку в термосфере ионную температуру можно считать равной температуре нейтральных частиц, полученный результат подтверждает концепцию охлаждения верхней атмосферы. Очень важно, что в работе [Zhang and Holt, 2011] получено, что амплитуда отрицательного тренда растет со временем. До 1980 г. тренда T_i не наблюдалось вообще, а данные самых последних лет указывают на более высокую скорость охлаждения термосферы.

Подтверждают данные некогерентного рассеяния и полученное в данной работе уменьшение электронной концентрации (foF_2) в области F . Согласно работе [Zhang and Holt, 2011] отрицательный тренд Ne в области F составляет 0.3% за десятилетие, что соответствует (поскольку $Ne \sim (foF_2)^2$) отрицательному тренду 0.15% за десятилетие в foF_2 . Это существенно меньше, чем получено в описанном выше коллективном эксперименте [Laštovička et al., 2006] и в данной работе. Однако, учитывая полученное в работе [Zhang and Holt, 2011] увеличение отрицательного тренда температуры в последнее десятилетие, можно предположить, что больший отрицательный тренд foF_2 , полученный в данной работе, связан с использованием для анализа более позднего интервала данных (1990–2005 гг.). Еще одной причиной различия может быть тот факт, что Zhang and Holt, [2011] дают среднегодовые величины тренда, тогда как в данной работе приводятся тренды для середины лета, когда из-за характера зависимости коэффициента рекомбинации от T тренд должен быть максимален (см. выше). Как бы то ни было, сам факт подтверждения данными некогерентного рассеяния наличия отрицательных трендов температуры и электронной концентрации в области F очень важен для развиваемой в работе [Данилов, 2011] и в данной работе кон-

цепции о том, что происходит систематическое уменьшение $NmF2$, вызванное охлаждением термосферы, причем для момента $T(\text{зах} + 2)$ температурный эффект становится сильнее, чем эффект трендов динамических процессов.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе продолжена попытка анализа трендов критической частоты слоя $F2$ на грани нового века, начатая в предыдущей работе автора [Данилов, 2011]. Поскольку автор исчерпал “резервы” банка, содержащего данные в формате iwg , были привлечены медианные данные по $foF2$ для станций, для которых эти данные имеются за период до 2005–2007 гг. Медианные данные подтвердили выводы, полученные в предыдущей работе для пяти ионосферных станций, и в целом для массива в 11-ти ионосферных станций позволили сделать вывод, что в конце 90-х и начале 2000-х годов отрицательный тренд $foF2$ усилился. Этот вывод согласуется с концепцией оседания и охлаждения средней и верхней атмосферы [Laštovička et al., 2008; Laštovička, 2011] и с результатами многолетних измерений ионной температуры и электронной концентрации методом некогерентного рассеяния [Zhang and Holt, 2008; 2011; Donaldson et al., 2010]. Насколько правильны полученные здесь выводы о характере изменений $foF2$ и как они будут развиваться далее, можно будет утверждать только получив более полные массивы экспериментальных данных, удовлетворяющие всем требованиям.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Данилов А.Д. Вариации $foF2$ и $hmF2$ в конце 90-х и начале 2000-х годов // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 51. № 3. С. 325–332. 2011.
- Данилов А.Д., Ванина-Дарт Л.Б. Параметры ионосферного слоя $F2$ как источник информации о трендах динамики термосферы // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 50. № 2. С. 195–208. 2010.
- Bremer J. Trends in the ionospheric E and F regions over Europe // Ann. Geophysicae. V. 16. № 6. P. 986–996. 1998.
- Danilov A.D. The method of determination of the long-term trends in the $F2$ region independent of geomagnetic activity // Ann. Geophysicae. V. 20. № 4. P. 511–521. 2002.
- Danilov A.D. Parameters of the ionospheric $F2$ layer as a source of information on trends in thermospheric dynamics / Aeronomy of the Earth’s Atmosphere and Ionosphere – IAGA Special Sopron Book Series. Ed. M.A. Abdu, D. Pancheva and A. Bhattacharyya. Dordrecht–Heidelberg–London–New York: Springer. V. 2. Part 4. P. 407–416. 2011.
- 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., Mikhailov A.V., Ulich T., et al. Long-term trends in $foF2$: 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. Long-term trends in the upper atmosphere – recent progress / Aeronomy of the Earth’s Atmosphere and Ionosphere – IAGA Special Sopron Book Series. Ed. M.A. Abdu, D. Pancheva and A. Bhattacharyya. Dordrecht–Heidelberg–London–New York: Springer V. 2. Part 4. P. 395–406. 2011.
- Marin D., Mikhailov A.V., de la Moreno B.A., Herraiz M. Long-term $hmF2$ trends in the Eurasian longitudinal sector from the ground-based ionosonde observations // Ann. Geophysicae. V. 19. № 7. P. 761–772. 2001.
- Mikhailov A.V. Ionospheric long-term trends: can the geomagnetic control and the greenhouse hypotheses be reconciled? // Ann. Geophysicae. V. 24. № 10. P. 2533–2541. 2006.
- Mikhailov A.V., Perrone L. On the mechanism of seasonal and solar cycle $NmF2$ variations: A quantitative estimate of the main parameters contribution using incoherent scatter radar observations // J. Geophys. Res. V. 116, A03319. doi:10.1029/2010JA016122. 2011.
- Rishbeth H. How the thermospheric circulation affects the ionospheric $F2$ layer // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 60. № 14. P. 1385–1402. 1998.
- Ulich T., Turunen E. Evidence for long-term cooling of the upper atmosphere in ionosonde data // Geophys. Res. Lett. V. 24. № 9. P. 1103–1106. 1997.
- Zhang S.-R., Holt J.M. Ionospheric climatology and variability from long-term and multiple incoherent scatter radar observations: variability // Ann. Geophysicae. V. 26. № 6. P. 1525–1537. 2008.
- Zhang S.-R., Holt J.M. Millstone Hill ISR observations of upper atmosphere long-term changes: height dependency // J. Geophys. Res. V. 116. doi: 10.1029/2010JA016414. 2011.