

УДК 350.385

ПРИЧИНЫ РАСХОЖДЕНИЯ АБСОЛЮТНЫХ ВЕЛИЧИН ТРЕНДОВ ПАРАМЕТРОВ СЛОЯ $F2$, ПОЛУЧЕННЫХ РАЗНЫМИ АВТОРАМИ

А.В. Константинова

Поступила в редакцию 15 апреля 2015 г.

Проведено сопоставление результатов определения долговременных трендов $foF2$ и $hmF2$ в работах различных авторов. Были проанализированы причины расхождения абсолютных величин отрицательных трендов, получаемых разными исследователями. Сформулированы три основные причины: неправильный выбор длины ряда данных, используемых для нахождения трендов, отсутствие учета суточных и сезонных вариаций трендов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ТРЕНД, ИОНОСФЕРА.

1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема долговременных изменений (трендов) параметров ионосферного слоя $F2$, $foF2$ и $hmF2$, хорошо известна и неоднократно обсуждалась. Причина указанных изменений лежит в общем охлаждении и оседании средней и верхней атмосферы из-за увеличения в атмосферном газе количества парниковых газов (прежде всего — CO_2). В настоящее время существуют значительные расхождения в величинах трендов $foF2$ ($k(fo)$) и $hmF2$ ($k(hm)$), получаемых разными группами исследователей. Долговременные тренды параметров ионосферных слоев E и $F1$ получаются примерно одинаковыми у разных групп авторов и хорошо согласуются с концепцией охлаждения и оседания средней и верхней атмосферы (см. [Laštovička et al., 2008; Laštovička, 2009]). Что же касается параметров ионосферного слоя $F2$, $foF2$ и $hmF2$, то оценки их трендов значительно расходятся у разных групп исследователей. В недавних детальном исследовании трендов $foF2$ и $hmF2$ [Bremer et al., 2012; Mielich and Bremer, 2013; Cnossen and Franzke, 2014] получены относительно низкие величины отрицательных трендов обоих параметров. В то же время, в серии недавних публикаций авторов [Данилов и Константинова, 2013а, 2013б, Danilov and Konstantinova, 2013; Данилов и Константинова, 2015] были получены более высокие тренды как $foF2$ ($k(fo)$), так и $hmF2$ ($k(hm)$). В ряде публикаций для конкретных станций (см. ниже параграф 3) также были получены более высокие амплитуды отрицательных трендов параметров слоя $F2$.

Была поставлена цель проанализировать природу указанных расхождений и сформулированы три основные причины этих расхождений. Первая причина — выбор длины ряда данных, используемых для выделения трендов [Константинова и Данилов, 2015]. Две другие — отсутствие в большинстве работ учета суточных вариаций трендов и их изменения с сезоном.

2. КРАТКАЯ СВОДКА РЕЗУЛЬТАТОВ

В серии публикаций авторов [Данилов и Константинова, 2013а, 2013б, Danilov and Konstantinova, 2013] были подробно рассмотрены долговременные тренды $foF2$ и $hmF2$. Для анализа были использованы данные различных банков ионосферных данных и проведена их «очистка» от заведомо ошибочных значений. Рассматривались два момента местного времени (14:00 LT и момент SS+2 через два часа после захода Солнца) и два периода года (январь-февраль и июнь-июль). Основной результат указанных работ приведен в таблицах 1 и 2. В данной работе будут обсуждаться величины $k(fo)$ и $k(hm)$, для 14:00 LT.

Таблица 1. Тренды $foF2$ в МГц/год для 12 станций и 4-х ситуаций согласно Данилову и Константиновой [2013а]

Станция	Лето SS+2	Лето 14:00 LT,	Зима SS+2	Зима 14:00 LT
Boulder	-0.014	-0.015	-0.053	-0.046
Rom	-0.041	-0.011	-0.079	-0.072
Juliusruh	-0.014	-0.017	-0.051	-0.025
Slough	-0.020	-0.022	-0.039	-0.029
Москва	-0.023	-0.019	-0.041	-0.101
Ташкент	-0.033	-0.060	-0.053	-0.092
Wallops	-0.054	-0.007	-0.064	-0.027
Ebre	-0.014	-0.020	-0.031	-0.076
Grahamstown	-0.030	-0.025	Нет тренда	-0.011
Hobart	-0.032	Нет тренда	-0.029	-0.015
Townsville	-0.053	-0.086	-0.011	-0.006
Томск	-0.038	-0.030	-0.051	-0.025
Средний тренд и SD	-0.027 0.013	-0.021 0.014	-0.050 -0.014	-0.054 0.032

Таблица 2. Усредненные значения трендов $hmF2$ для 10 станций для дневных и послезаходных условий, лета и зимы.

Станция	- k , км/год	σ , км
Slough	2.5 (1.4)	2.00 (0.20)
Juliusruh	1.1	0.52
Москва	3.0	1.35
Томск	1.7	0.35
Wallops	2.9	1.75
Ташкент	2.4	1.13
Norfolk	0.9	0.39
Grahamstown	2.1	0.84
Hobart	1.3	0.39
Point Arguello	2.2	2.58
14:00 LT	2.5	1.73
SS+2	1.9	1.05
Зима	2.1	1.16
Лето	2.3	1.68

В недавней работе Данилова и Константиновой [2015] были подробно проанализированы вариации трендов $foF2$ ($k(fo)$) с сезоном и местным временем. Было получено, что для всех исследованных станций наблюдается одна и та же картина. В суточном ходе наибольшие величины отрицательных трендов наблюдаются в районе полудня (10:00–16:00 LT). В течение года $k(fo)$ изменяются от небольших и статистически мало значимых величин, лежащих в пределах ± 0.010 МГц в год в летний период до значений от -0.04 до -0.07 МГц в год зимой и ранней весной. Примеры зависимостей $k(fo)$ от месяца года и местного времени, взятые из работы Данилова и Константиновой [2015], приведены на рисунках 1 и 2. Как будет показано ниже, существование выраженного суточного и сезонного хода величин $k(fo)$ очень важно для объяснения различия трендов $foF2$, получаемых различными группами авторов.

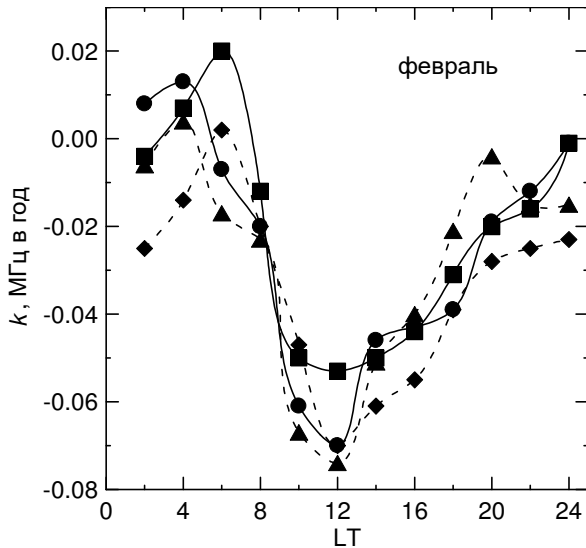


Рис. 1. Зависимость тренда k от местного времени в феврале для четырех станций согласно Данилову и Константиновой [2015]: Juliusruh (кружки), Rome (ромбы), Slough (треугольники) и Boulder (квадраты).

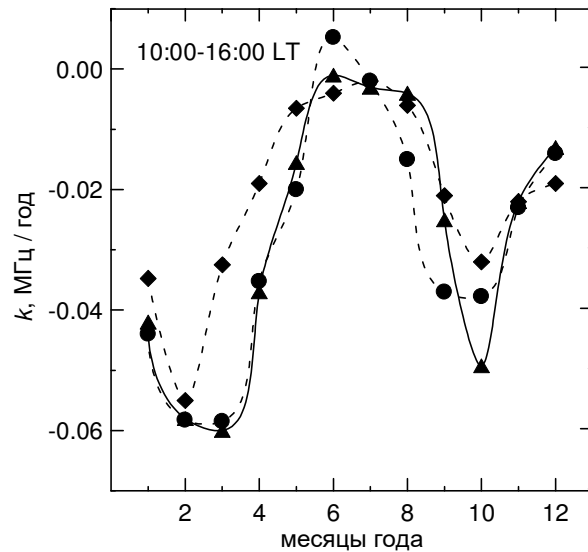


Рис. 2. Зависимость тренда k от месяца года для 10:00–16:00 LT для трех станций согласно Данилову и Константиновой [2015]: Juliusruh (кружки), Rome (ромбы) и Slough (треугольники).

3. ОБЗОР РЕЗУЛЬТАТОВ ДРУГИХ АВТОРОВ

Подробный обзор многочисленных публикаций по трендам параметров слоя $F2$, опубликованных за последние 20 лет, выходит за пределы данной статьи. Подробнее можно ознакомиться в обзоре [Данилов, 2012], в серии статей Я. Ластовички [Laštovička, 2009; Laštovička et al., 2012], а также в работе [Bremer et al., 2012]. В данной работе сравним результаты определений трендов $foF2$ и $hmF2$ Данилова и Константиновой с относительно недавними результатами других авторов и обсудим возможные причины различий в получаемых трендах.

Следует начать с недавних работ [Bremer et al., 2012; Mielich and Bremer, 2013], где детально исследуются тренды $foF2$ и $hmF2$ за весь период наблюдений на каждой станции. Исходными являются данные по $foF2$ и $M(3000)$, собранные в банке данных [Damboldt and Suessmann, 2012]. Величины $hmF2$ пересчитывались из величин $M(3000)$, используя известный метод Shimazaki, [1955]. Для исключения зависимости обоих параметров слоя $F2$ от солнечной и геомагнитной активности используются два метода: регрессионный и модельный. В регрессионном методе анализируемый параметр X ($foF2$ или $hmF2$) для всего имеющегося для данной станции массива данных представляется в виде:

$$X(\text{теор}) = A + BR + CAp$$

где R — число солнечных пятен, Ap — индекс геомагнитной активности, а A , B и C константы. Затем вычисляется разница $\Delta X = X(\text{экс}) - X(\text{теор})$, где $X(\text{экс})$ — наблюдаемая величина анализируемого параметра для конкретных условий.

Величина ΔX рассматривается затем как сумма:

$$\Delta X = D + E \text{ год}$$

где D константа, а E — искомый тренд в МГц/год для $foF2$ и в км/год для $hmF2$.

В модельном методе величины $X(\text{теор})$ находятся не в результате анализа массива измерений, а на основании эмпирической модели [ITU, 2009], учитывающей зависимость анализируемых параметров от солнечной и магнитной активности. Дальнейшая процедура нахождения тренда в модельном методе полностью аналогична процедуре в регрессионном методе, описанной выше.

В работе [Bremer et al., 2012] показано, что результаты анализа слабо зависят от выбора того, или другого метода. Коэффициент корреляции между трендами $foF2$, полученными двумя методами равен 0.89. Соответствующий коэффициент корреляции в случае $hmF2$ равен 0.94. Авторы признали различие между трендами, получаемыми двумя методами незначимым. Небольшое отличие, по их мнению, может быть связано с недостаточным учетом влияния магнитной активности в модели ITU, использованной в модельном методе.

Сравнивая результаты, полученные обоими методами при использовании индексов R и $F10.7$ в качестве показателей солнечной активности, авторы работы [Bremer et al., 2012] пришли к выводу, что индекс $F10.7$ дает более надежные результаты, особенно для периода после 2000 г.

Отметим, чтобы вернуться к этому вопросу ниже, что для каждой ионосферной станции анализируются совместно данные за все часы суток и все месяцы. При этом рассматриваются данные, имеющиеся на данной станции, за весь период наблюдений. Всего рассмотрены данные 37 ионосферных станций в работе [Bremer et al., 2012] и 113 станций в работе [Mielich and Bremer, 2013].

Результаты, полученные в работах [Bremer et al., 2012; Mielich and Bremer, 2013], можно просуммировать следующим образом. Глобальные тренды $hmF2$ значимы статистически и лежат в пределах от -0.12 км в год до -0.17 км в год. Средние глобальные тренды $foF2$ малы и незначительно отличаются от нуля, если используются все годы. При исключении данных за 2001 и 2009 гг. (когда, по мнению авторов, величины солнечных индексов плохо описывают изменение солнечного УФ излучения) получаются статистически значимые, но небольшие тренды от -0.0028 до -0.0002 МГц в год.

Международной группой исследователей под руководством Я. Ластовички [Laštovička et al., 2006], был проведен коллективный эксперимент по определению трендов $foF2$ разными методами на основании одного и того же массива исходных данных (станция Juliusruh, 1977–1997 гг.). Результаты этого эксперимента дали, в целом, согласующиеся величины трендов (подробнее см. в работе [Laštovička et al., 2006]). Был получен средний отрицательный тренд $foF2$, равный 0.01 – 0.02 МГц в год. Необходимо отметить, что в этом случае использовался околополуденный интервал местного времени (10:00–14:00 LT), но большинство участвовавших групп использовали совместно данные всех месяцев года.

В недавней работе [Cnossen and Franzke, 2014] для нахождения трендов параметров слоя $F2$ впервые был применен метод Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD). В методе EEMD временные серии исследуемого параметра разлагаются на несколько квазициклических компонент, которые называются «внутренние модовые функции» (Intrinsic Mode Functions), и остаток, который можно интерпретировать как долговременный тренд. В отличие от более широко используемого анализа трендов на основании линейной регрессии, метод EEMD не задает заранее формы функции тренда. Не требуется также отдельного учета влияния вариаций солнечной активности. Для сравнения проводился анализ тех же данных и широко распространенным методом линейного тренда. Результаты сравнения показали, что тренды как $foF2$, так и $hmF2$ за рассматриваемый период носят преимущественно линейный характер, но разные подходы дают разные оценки статистической значимости получаемых трендов. В целом метод EEMD как для $foF2$, так и для $hmF2$ дает более высокие отрицательные тренды.

Cnossen and Franzke [2014] использовали тот же банк ионосферных данных [Damboldt and Suessmann, 2012], который уже неоднократно упоминался выше. Величины $hmF2$, как и в работах [Bremer et al., 2012; Mielich and Bremer, 2013] и в публикациях автора и А.Д. Данилова (см. параграф 2) пересчитывались из $M(3000)$ методом Shimazaki, [1955]. Так же, как и в работах [Bremer et al., 2012; Mielich and Bremer, 2013], Cnossen and Franzke [2014] усредняли медианные значения $foF2$ и $hmF2$ по всем часам суток и месяцам года.

Результаты анализа трендов $hmF2$ в работе [Cnossen and Franzke, 2014] для 19 ионосферных станций показывают, что не для всех станций наблюдаются статистически значимые тренды. В некоторых случаях значимые тренды наблюдаются только одним методом. В тех случаях, когда оба

метода дают значимые тренды, их величины, как правило, различаются не сильно. Например, метод EEMD дает для станций Juliusruh и Rome величины -0.523 и -0.832 км/год. Соответствующие величины, полученные методом линейной регрессии, дают значения -0.345 и -0.652 км/год. В целом значимые тренды получены (хотя бы одним методом) для 14 станций и колеблются от -0.177 до -0.832 км/год (см. табл. 2 в указанной работе).

Результаты анализа трендов $foF2$ показывают, что только для 12 станций из 22-х исследованных хотя бы один метод дает статистически значимые тренды (см. табл. 2 в работе [Cnossen and Franzke, 2014]). Все статистически-значимые тренды отрицательны и их абсолютные величины лежат в пределах от 0.008 до 0.033 МГц/год. Исключение составляет станция Ашхабад, для которой получен очень высоких положительный тренд 0.044 МГц/год. Набор станций, использованных Cnossen and Franzke [2014], отличается от набора станций, проанализированного в работах автора и А.Д. Данилова, указанных выше. Сравнение трендов $foF2$ для станций, вошедших в оба набора, приведено в табл. 3. Легко видеть, что для станции Томск получены одинаковые величины около -0.026 МГц/год, тогда как для остальных четырех станций тренды, полученные в работах Данилова совместно с автором, заметно выше, чем тренды, приведенные в табл. 3 в работе [Cnossen and Franzke, 2014].

Таблица 3. Тренды $foF2$ в МГц/год согласно Cnossen and Franzke [2014] (EEMD) и Данилову и Константиновой [2013б] (ИПГ)

Станция	тренд EEMD	тренд ИПГ	
		лето	зима
Juliusruh	-0.017	-0.017	-0.025
Москва	-0.012	-0.019	-0.101
Rome	-0.014	-0.011	-0.072
Томск	-0.026	-0.030	-0.025
Hobart	-0.007	0	-0.015

Хотя приведенные в таблицах 2 и 3 в работе [Cnossen and Franzke, 2014] тренды, получены, как уже указывалось, с использованием двух методов, в каждом из которых предусмотрено исключение влияние солнечной и геомагнитной активности на $foF2$ и $hmF2$, авторы считают, что в полученных величинах $k(fo)$ и $k(hm)$ все еще остается эффект долговременных трендов солнечной активности. Поэтому тренды (приведенные на рис. 6 и 7 указанной статьи) после исключения этих эффектов, оказываются по абсолютной величине несколько ниже приведенных в таблицах 1 и 2, но сохраняют отрицательный знак.

В недавней работе [Roininen et al., 2014] были проанализированы величины $hmF2$, измеренные ионозондом в обсерватории Sodankyla (Финляндия) в 1957–2014 гг. В качестве показателя солнечной активности использовался индекс $F10.7$. Было получено, что за весь исследованный период среднее уменьшение величины $\Delta hmF2$ составило 50 км, что (в предположении, что уменьшение происходило равномерно в течение всего периода) дает отрицательный тренд $k(hm) \sim 1$ км в год.

В работе [Rojas Villalba and Milla, 2012] анализировались тренды $hmF2$ по данным некогерентного рассеяния на установке в Jicamarca (Перу) за 1993–2012 г. Было получено, что после 2000 г. наблюдается отрицательный тренд $hmF2$, равный 1.58 км/год при стандартном отклонении $\sigma = 0.075$ км/год. Используя измерения с помощью дигизонда в обсерватории Jicamarca, Rojas Villalba and Milla [2012] получили отрицательный тренд $hmF2$ от 1.63 до 2.35 км/год в зависимости от местного времени.

В работе [Sharma and Chandra, 2012] анализировались результаты вертикального зондирования на ст. Ahmedabad в период 1955–2004 гг. Получен отрицательный тренд $foF2$, равный 0.036 МГц/год в околополуденные часы и 0.026 МГц/год около полуночи. Для $hmF2$ получен отрицательный тренд, равный 0.24 км/год днем и 0.28 км/год ночью. Необходимо, однако, отметить, что ст. Ahmedabad относится к низкоширотным станциям, поэтому на нее могут влиять эффекты смещения магнитного экватора (см. ниже).

В работе [De Haro Barbas et al., 2014] анализировались тренды $foF2$ для двух среднеширотных станций (Slough и Kokubunji). Подробно рассматривались различные методы учета СА с помощью индексов $F10.7$ и Rz , а также моделей SUPRIM (Sheffield University Plasmasphere Ionosphere Model) и

IRI. Получено, что наиболее значимые тренды получаются при использовании индекса $F10.7$. Для выявления роли 23-го цикла СА была проделана следующая процедура. Начало анализируемого периода было зафиксировано в 1964 г., а конец менялся с шагом в один год от 1994 г. до 2008 г. Было получено, что данные 23-го цикла уменьшают получаемый отрицательный тренд (в случае ст. Kokobunji это происходит от -0.029 МГц/год для конца ряда в 1994 г. до -0.022 МГц/год для конца ряда в 2008 г.). Авторы [De Naro Barbas et al., 2014] считают, что в 23-м цикле связь между $F10.7$ и солнечным ультрафиолетом нарушается. Для периода 1964–2008 гг. для дневных (14:00 LT) летних условий получены тренды -0.022 (Kokobunji) и -0.011 (Slough) МГц/год. Последняя величина сравнима с величиной $k(f_0)$ для ст. Slough (лето, 14:00 LT), приведенной выше в табл. 1.

Khaitov et al. [2012] анализировали величины $foF2$ по наблюдениям на ст. Томск за весь период наблюдений с 1937 по 2012 г. и получили $k(f_0) = -0.01$ МГц/год. При этом рассматривались совместно данные для разных сезонов и разных моментов LT. Отрицательный тренд $foF2$, равный -0.015 МГц/год был получен в работе Gnabaho et al. [2012] для низкоширотной ст. Ouagadougou.

Как видно из приведенных в этом параграфе данных, у разных исследователей получаются принципиально разные величины трендов $foF2$ и $hmF2$ от достаточно высоких величин, полученных Даниловым и Константиновой (см. таблицы 1 и 2) до пренебрежимо низких величин, особенно для $k(f_0)$. В следующем параграфе будут сформулированы наиболее вероятные причины таких расхождений. Но прежде сделаем одно важное отступление.

В последние несколько лет все большее внимание привлекает проблема влияния вековых вариаций магнитного поля на параметры ионосферного слоя $F2$. Изменения магнитного поля могут влиять на состояние области F по двум каналам. Во-первых, изменения магнитного наклонения I и склонения D должны влиять на вертикальный дрейф плазмы, индуцированный горизонтальными ветрами в термосфере. Во-вторых, неизбежно должны происходить изменения в магнитосфере, которые скажутся на состоянии термосферы и ионосферы. Одним из таких наиболее очевидных изменений является изменение нагрева термосферы в полярных областях за счет джоулева нагрева. Это должно приводить как к изменению меридиональной циркуляции, так и к изменению состава термосферного газа. Примеры обоих изменений хорошо видны в случае ионосферных бурь, сопровождающих магнитосферные возмущения (см. обзорную работу [Danilov, 2013]).

Используя модель СМТ (Coupled Magnetosphere Ionosphere Thermosphere) в работе [Cnossen and Richmond, 2013] были проведены расчеты термосферных и ионосферных параметров для эпох 1908, 1958 и 2008 гг. Результаты этих расчетов показывают, что разница как в $foF2$, так и в $hmF2$ между 2008 и 1958 гг. при соответствующих параметрах магнитного поля мала и статистически не значима. Разница между 2008 и 1908 г. статистически значима только в области Атлантического океана, что связано, очевидно, с изменением параметров известной магнитной аномалии. Максимальное уменьшение от 1908 г. к 2008 г. в этой области составляет 50 км и 1.5 МГц для $hmF2$ и $foF2$, соответственно, причем эти величины уменьшения существуют только в очень небольшой части рассматриваемой области. В большей ее части уменьшение $hmF2$ за сто лет составляет 5–10 км, а $foF2$ — 0.5 МГц и менее. Изменения $hmF2$ существенно сильнее днем, чем ночью, тогда как изменения $foF2$ лишь немного сильнее в дневное время.

Расчеты по той же модели показывают, что за 100 лет в рассматриваемой атлантической области нейтральная и ионная температуры на высотах максимума слоя $F2$ должны были уменьшиться самое большее на 4 К и 20 К, соответственно. Для электронной температуры получен рост, который в небольшой пространственной области может достигать 750 К.

Фактически, описанные результаты работы [Cnossen and Richmond, 2013] показывают, что вклад вековых изменений магнитного поля в анализируемые в настоящее время тренды параметров термосферы и ионосферы мал даже в области Атлантики. На остальной территории земного шара он просто отсутствует. Исключение может составлять электронная температура, но также только в небольшой пространственной области в Атлантике.

Другой подход к той же проблеме [Elias et al, 2014] состоит в анализе изменения положения магнитного экватора из-за вековых изменений магнитного поля. Показано, что это изменение приводит к изменению положения экваториальной ионосферной аномалии. При этом на ионосферных станциях приэкваториальной зоны должен наблюдаться тренд $foF2$. Для двух таких станций Dakar и Ouagadougou из наблюдений получены отрицательные тренды, равные -0.0142 и -0.0229 МГц в год для периода 1965–1995 гг. Эти величины сравнимы с трендами, которые наблюдаются для среднеширотных станций, что говорит о том, что изменения положения магнитного

экватора, действительно, могут вносить существенный вклад в тренды $foF2$ на экваториальных широтах.

4. ПРИЧИНЫ РАЗЛИЧИЙ ПОЛУЧАЕМЫХ ТРЕНДОВ

Наиболее вероятные причины различия между трендами, опубликованным в работах [Данилов и Константинова, 2013а, б; 2015] и приведенными выше в табл. 1 и 2, и трендами $foF2$ и $hmF2$, полученными в работах [Bremer et al., 2012; Mielich and Bremer, 2013; Cnossen and Franzke, 2014]:

1. Неправильный выбор длины ряда данных, для которых определяется тренд. Подробнее см. публикацию [Константинова и Данилов, 2015]
2. Отсутствие учета зависимости трендов $foF2$ и $hmF2$ от времени суток.
3. Отсутствие учета зависимости трендов $foF2$ и $hmF2$ от сезона.

4.1. ВЫБОР ДЛИНЫ РЯДА ДАННЫХ ДЛЯ АНАЛИЗИРУЕМОГО ПЕРИОДА

Вертикальное зондирование на разных ионосферных станциях глобальной сети началось в разное время. Подавляющее большинство станций начали регулярное зондирование в период Международного Геофизического Года (МГГ) в 1957–1958 гг. Соответственно, анализируемые при поиске трендов ряды данных по $foF2$ и $hmF2$ начинаются на большинстве станций именно с 1957–1958 гг. Эти два года важны для анализа трендов, поскольку им соответствуют самые высокие величины годового индекса солнечной активности $F10.7$ — 231 и 232 sfu, соответственно. Но данные для 1957 г. присутствуют не для всех станций. Поэтому ниже для краткости будет указано начало интервала используемых данных 1958 г., помня, однако, что в ряде случаев привлекаются и данные 1957 г.

Однако есть станции, где зондирование велось и до этого. Так, банки данных содержат данные вертикального зондирования на ст. Slough (позднее она была переименована в Chilton и часто обозначается как Slough/Chilton, однако, поскольку большая часть наблюдений приходится на период, когда она называлась Slough, для краткости будет ниже использоваться это название) начиная с 1941 г. На старейшей в России ионосферной станции в г. Томске вертикальное зондирование началось в 1937 г. Отметим, что на некоторых ионосферных станциях (особенно в Тихоокеанском регионе) регулярное зондирование было прекращено в конце 80-х годов и для более позднего периода данные для этих станций отсутствуют в ионосферных банках, поэтому эти станции не могут использоваться для вычисления долговременных трендов в течение последних десятилетий.

Строго говоря, при вертикальном зондировании не получают непосредственно высоту слоя $F2$, $hmF2$. В банках данных приводится величина коэффициента $M(3000)$, получаемая из ионограмм. Величины $hmF2$ получаются авторами упоминаемых здесь работ путем пересчета величины $M(3000)$ в величину $hmF2$, используя одну из имеющихся формул. В подавляющем большинстве случаев (в частности, в подробно рассматриваемых здесь работах [Bremer et al., 2012; Mielich and Bremer, 2013; Cnossen and Franzke, 2014; Данилов и Константинова, 2013б]) используется известная формула Shimazaki [1955]. Для краткости изложения будем ниже говорить об измерениях $foF2$ и $hmF2$, помня, что реально измеряется параметр $M(3000)$, а анализируемые величины $hmF2$ получаются из этого параметра путем пересчета.

В подавляющем числе работ по нахождению $k(fo)$ и $k(hm)$ авторы стараются использовать весь имеющийся период наблюдений. В основном строятся кривые регрессии анализируемого параметра ($foF2$ или $hmF2$) в зависимости от солнечной и геомагнитной активности. Выбор наиболее правильного индекса солнечной активности (поток радиоизлучения $F10.7$, число солнечных пятен Rz , характеристика солнечного ультрафиолета $E10.7$ и др.) часто является предметом обсуждения, выходящего за рамки данной статьи. Отметим, что чаще всего как индикатор солнечной активности используется индекс $F10.7$.

Несколько слов о конце анализируемого интервала. Как правило, авторы используют для анализа данные до конца периода, который охватывает используемый банк данных. Во многих недавних работах [Bremer et al., 2012; Mielich and Bremer, 2013; Cnossen and Franzke, 2014; Данилов и Константинова, 2015] используется банк медианных значений $foF2$ и $hmF2$, опубликованный в работе [Damboldt and Suessmann, 2012]. Данные в этом банке заканчиваются 2009 г. Соответственно, в указанных выше работах исходные ряды данных, используемые для анализа трендов, заканчиваются этим годом. Однако при анализе данных вертикального зондирования на ст. Sodankyla в работе

[Roininen et al., 2014] используется весь ряд измерений $hmF2$ с 1957 по 2014 г. В некоторых случаях авторы убирают из исходного ряда данные за 2008 и 2009 гг. (глубокий минимум солнечной активности). В работе [de Naro Barbas et al., 2014] использован «скользящий» конец интервала исходных данных. Тренды вычисляются сначала для периода 1964–1994 гг., а затем к анализируемому ряду добавляется по одному году и вычисляется тренд для 1994–1995 гг., 1994–1996 гг. и так далее до 2008 г. Целью такого подхода является показать, что в 23-м цикле солнечной активности (1996–2008 гг.) отрицательные тренды $foF2$ выше, чем в предыдущий период. В работах [Bremer et al., 2012; Mielich and Bremer, 2013] подробно анализируется зависимость получаемых трендов $foF2$ и $hmF2$ от длины ряда исходных данных, однако рассматриваются ряды, начинающиеся в год начала наблюдений на данной станции.

Выбор начала анализируемого периода является очень важным шагом при поиске трендов $foF2$ и $hmF2$. В работах А.Д. Данилова было показано, что систематическое изменение параметров слоя $F2$ начинается около 1980 г. (плюс-минус 2–3 года). Подробно анализировались различные характеристики слоя $F2$: степень изменчивости $hmF2$ [Данилов и Ванина-Дарт, 2009, 2010а; Danilov, 2009], отношение критических частот $foF2$ в дневное (14:00 LT) и ночное (02:00 LT) время [Данилов и Ванина-Дарт, 2010б], коэффициент корреляции $R(foF2)$ между дневными и ночными величинами $foF2$ [Данилов и Ванина-Дарт 2008; Danilov, 2008]. Поведение всех указанных параметров указывает на начало систематических изменений в области $F2$ около 1980 г.

Вывод о начале изменений параметров слоя $F2$ около 1980 г. был подтвержден данными наблюдений методом некогерентного рассеяния (НР) на установке Saint Santin, опубликованными в работе [Donaldson et al., 2010]. Одним из наиболее интересных результатов этой работы является констатация факта, что тренд в ионной температуре T_i начал проявляться примерно с 1980 г. Если брать весь интервал наблюдений с 1968 г. по 2006 г., величина тренда T_i оказывается существенно ниже (минус 3–4 К в год), чем если брать интервал с 1980 г. (минус 4–5 К в год). Очевидно, что этот результат хорошо согласуется (о чем говорится и в работе [Donaldson et al., 2010]) с результатами, полученными ранее и описанными выше, о том, что многие тренды параметров ионосферного слоя $F2$ начинаются около «граничной даты» — 1980 г. В работе [Zhang et al., 2011] также на основании данных НР в Millstone Hill подчеркивается, что три группы данных (включая и измерения [Donaldson et al., 2010]) дают начало изменений в слое $F2$ около 1980 г. На рисунке 3, взятом из этой работы, приведено изменение T_i со временем. Рисунок удивительно напоминает рисунки для изменения различных параметров, полученных методом вертикального зондирования (см. выше), на которых изменение параметров слоя $F2$ начинается около 1980 г.

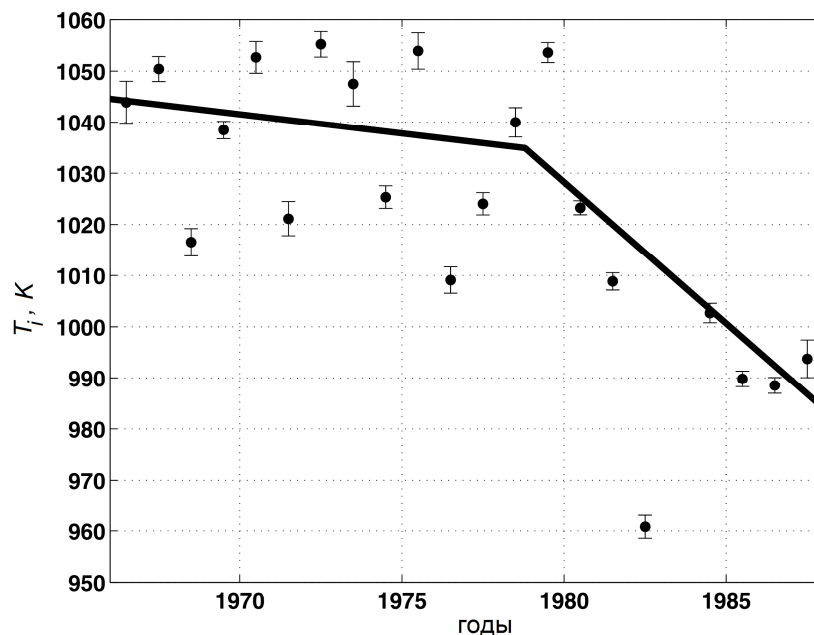


Рис. 3. Изменение со временем температуры ионов по измерениям методом НР согласно работе [Donaldson et al., 2010].

Неизбежен вопрос о том, почему систематические изменения всех проанализированных параметров начинаются около 1980 г. Ответа на этот вопрос пока нет. Однако следует отметить, что в различных публикациях встречаются указания на изменения параметров ионосферы и термосферы, начиная с 70-х годов. Эммерт и др. [Emmert et al., 2001] обнаружили систематические изменения параметров термосферных ветров в течение предыдущих десятилетий на основе измерений прибором WINDII. Портнягин и др. [Portnyagin et al., 2006] нашли изменения в преобладающем ветре в 80-е годы. В работе [Mikhailov, 2006] было найдено, что после примерно 1972 г. (в отличие от 40–60-х годов) изменение со временем величин $hmF2$ нельзя описать долговременными вариациями геомагнитной активности. Михайлов [Mikhailov, 2006] объяснил изменение в поведении со временем величины $hmF2$ ростом количества парниковых газов в атмосфере. В работе [Bremer, 2006] были обнаружены изменения трендов ионосферных слоев $F1$ и E около 1979 г. Стоит напомнить также, что заметное уменьшение количества стратосферного озона (включая весеннее понижение в Антарктике) началось в начале 80-х годов.

Все определения трендов $foF2$ и $hmF2$, опубликованные в недавних работах [Данилов и Константинова, 2013а, 2013б, 2015; Danilov and Konstantinova, 2013], были сделаны в предположении, что до 1980 г. нет значимых трендов параметров слоя $F2$. Период с 1958 г. использовался как «эталонный». Для него строилась зависимость $foF2$ (или $hmF2$) от индекса $F10.7$. Как правило, эта зависимость хорошо выражена и имеет высокий коэффициент определенности R^2 по F -критерию Фишера порядка 0.85–0.95. Многочисленные примеры «эталонных» зависимостей $foF2$ и $hmF2$ можно найти в указанных выше публикациях, в частности, в работах Данилова и Константиновой [2013а, 2013б, 2015]. В качестве иллюстрации на рис. 4 приведена «эталонная» зависимость $foF2$ для ст. Slough из работы Данилова и Константиновой [2015].

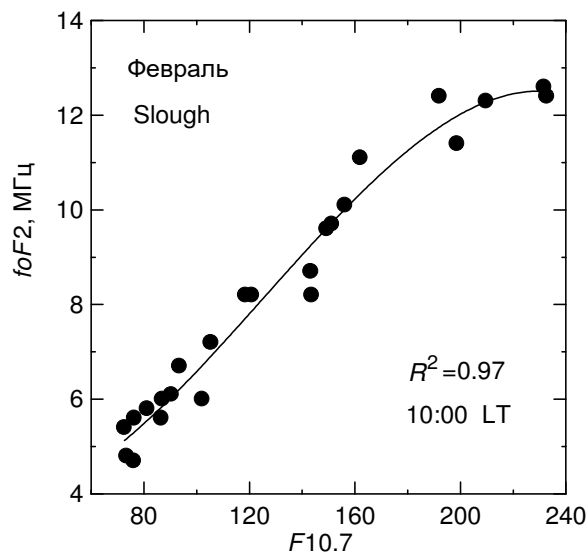


Рис. 4. Пример зависимости критической частоты $foF2$ от индекса солнечной активности $F10.7$ (точки) и аппроксимация этой зависимости полиномом 3-й степени для «эталонного» периода (кривая).

В работах других авторов по выявлению трендов $foF2$ и $hmF2$ анализируется (чаще всего, методом линейной регрессии, см. выше) весь интервал имеющихся данных. Как уже упоминалось выше, он чаще всего начинается с 1958 г., однако для ряда станций (Slough, Томск) начинается еще раньше. Таким образом, в анализ включается (наряду с периодом после 1980 г., где мы ожидаем наличие трендов $foF2$ и $hmF2$) также и достаточно большой период (несколько десятилетий), в течение которого трендов либо нет совсем, либо они малы, статистически малозначимы и могут иметь как положительный, так и отрицательный знак. Из самых общих соображений очевидно, что в этом случае получаемые величины $k(fo)$ и $k(hm)$ будут много меньше по абсолютной величине, чем реальные тренды, существующие после 1980 г.

Это утверждение может быть проиллюстрировано на примере материалов, взятых из двух недавних работ [Bremer et al., 2012; Mielich and Bremer, 2013]. В этих работах приводятся временные ряды величин $\Delta foF2$ и $\Delta hmF2$. Эти величины представляют собой разницу между наблюдаемой для

конкретного года величиной данного параметра и моделью (либо регрессионной, т.е. линейной зависимостью от $F10.7$ или Rz и A_p , либо взятой из модели Международного Союза Телекоммуникаций [ITU, 2009]). Именно наклон изменения этих величин со временем и дает $k(fo)$ и $k(hm)$. Точки и кресты на рисунках 5–9 представляют собой величины $\Delta foF2$ и $\Delta hmF2$. Сплошная линия представляет их линейную аппроксимацию за весь период наблюдений. Наклон этой линии и дает тренд соответствующего параметра.

На рисунках 5–9 кружки соответствуют использованию регрессионной модели, а кресты – модели [ITU, 2009]. Была произведена оцифровка точек на указанных рисунках и проведена линейная аппроксимация точек, начиная с 1980 г. Было сделано допущение отступления от этой даты на 2–3 года для получения более выраженного эффекта, поскольку период начала систематических изменений в слое $F2$ (см. выше) не может быть фиксирован с точностью до года. Результаты аппроксимации показаны штриховой линией.

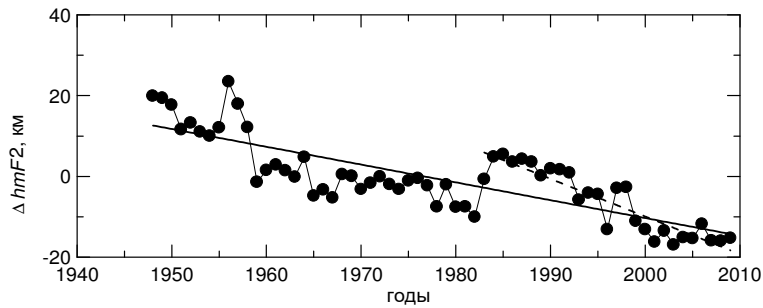


Рис. 5. (адаптированный из рис. 13 в работе [Bremer et al., 2012]) для $hmF2$ на ст. Slough (см. текст).

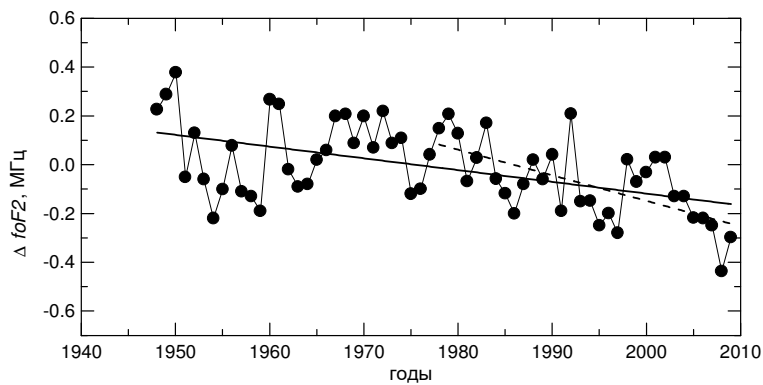


Рис. 6. (адаптированный из рис. 13 в работе [Bremer et al., 2012]) для $foF2$ на ст. Slough (см. текст).

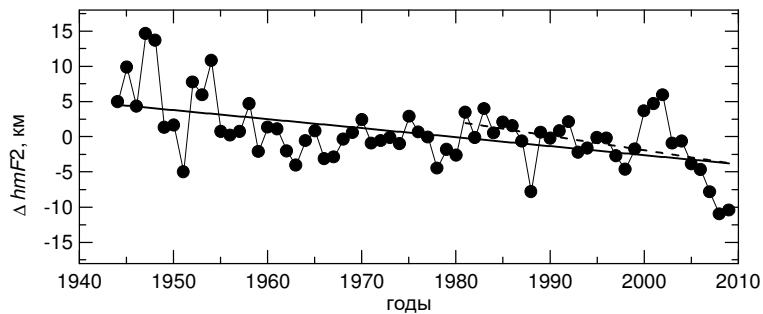


Рис. 7. (адаптированный из рис. 5 в работе [Bremer et al., 2012]) для $hmF2$, усредненной по 37-ми станциям (см. текст).

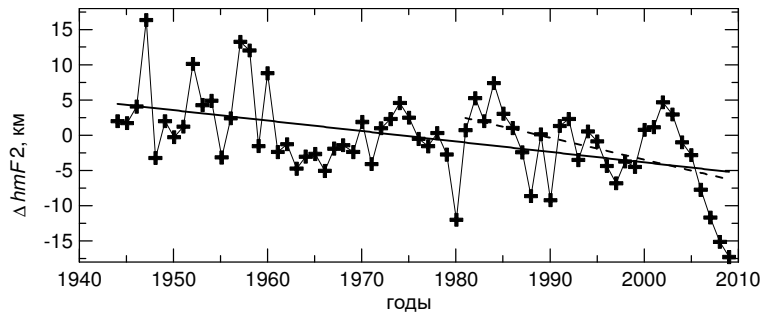


Рис. 8. (адаптированный из рис. 5 в работе [Bremer et al., 2012]). То же, что на рис. 5, но для величин $\Delta hmF2$, полученных с помощью модели (ITU, 2009) (см. текст).

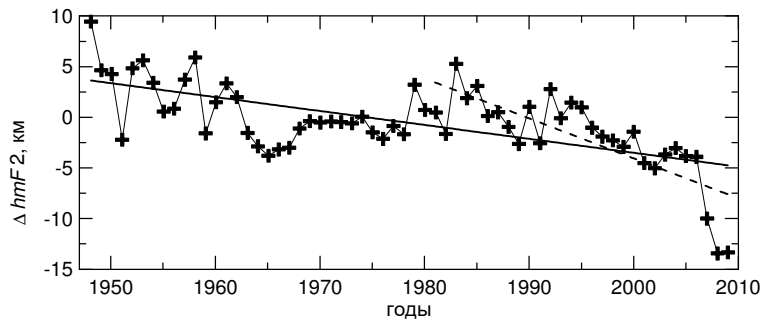


Рис. 9. (адаптированный из рис. 5 в работе [Mielich and Bremer, 2013]) для $hmF2$, усредненной по 113-ти станциям (см. текст).

Рисунок 5 (адаптированный из рис. 13 в работе [Bremer et al., 2012]) относится к величинам $hmF2$, измеренным на ст. Slough. Как уже указывалось, наблюдения на этой станции начались еще в 40-х годах, поэтому анализируемый ряд $\Delta hmF2$ является самым длинным из всех. Линейный тренд, даваемый сплошной линией, составляет -0.44 км/год. Штриховая линия, проведенная с 1983 г., дает $k(hm) = -0.93$ км/год. Разница, таким образом, составляет более двух раз.

На рисунке 6 приведены данные по $\Delta foF2$ для той же ст. Slough (рис. 13 в работе [Bremer et al., 2012]). Тренд $k(fo)$, полученный авторами при линейной аппроксимации всех данных (сплошная линия), составляет -0.0049 МГц/год. Линейная аппроксимация, проведенная с 1979 г. (штриховая линия), дает $k(fo) = -0.010$ МГц/год. Разница и в этом случае превышает два раза.

На рисунке 7 (адаптированном из рис. 5 в работе [Bremer et al., 2012]) представлены данные по $\Delta hmF2$, но усредненные по всем рассмотренным 37 станциям. Видно, что переход от линейной аппроксимации всего временного ряда (сплошная прямая, $k(hm) = -0.13$ км/год) к периоду после 1980 г. (штриховая прямая, $k(hm) = -0.20$ км/год) также дает увеличение абсолютной величины отрицательного тренда, однако это увеличение меньше, чем в случае двух предыдущих рисунков. Последнее обстоятельство связано с тем, что усреднение по всем ионосферным станциям сглаживает картину, так как на некоторых станциях отрицательный тренд $hmF2$ может быть мал или даже положителен.

На рисунке 8 (адаптированном из рис. 5 в работе [Bremer et al., 2012]) представлены данные также по $\Delta hmF2$, усредненные по всем рассмотренным 37 станциям, но полученные с использованием модели [ITU, 2009]. Видно, что и в этом случае при переходе от всего ряда данных к периоду после 1981 г. отрицательная величина тренда $k(hm)$ увеличивается вдвое.

Наиболее сильный эффект увеличения абсолютной величины отрицательного тренда $hmF2$ с -0.138 км/год до -0.395 км/год наблюдается на рис. 9 (адаптированном из рис. 5 в работе [Mielich and Bremer, 2013]). Во всех рассмотренных случаях получаемые абсолютные величины отрицательных трендов $foF2$ и $hmF2$ увеличиваются и приближаются к величинам $k(fo)$ и $k(hm)$, полученным [Даниловым и Константиновой [2013а, б]]. Однако они все же остаются меньше, чем получено в указанных работах. Это, предположительно, связано со второй причиной существующих различий в определении трендов параметров слоя $F2$ — не учете их суточной и сезонной зависимости.

Однако, хорошо выраженный эффект наблюдается не для всех рисунков с $\Delta foF2$ и $\Delta hmF2$, приведенных в работах [Bremer et al., 2012; Mielich and Bremer, 2013]. В некоторых случаях эффект мал (-0.0049 МГц/год с 1980 г. вместо -0.0038 МГц/год для всего ряда с 1948 г. на рис. 7 в работе [Mielich and Bremer, 2013]) или отсутствует вовсе. Последнее обстоятельство может быть связано с осреднением по всем станциям, по всем моментам LT и по всем месяцам (это будет предметом подробного обсуждения ниже).

Таким образом, если взять данные по $\Delta foF2$ и $\Delta hmF2$, полученные в работах [Bremer et al., 2012; Mielich and Bremer, 2013] в результате устранения эффектов солнечной и геомагнитной активности двумя методами (с помощью линейной регрессии и модели I TU [2009], и провести их линейную аппроксимацию не с начала имеющегося ряда исходных данных, а с 1980 г. (плюс-минус 2–3 года), то и для $foF2$ и для $hmF2$, в ряде случаев получаются более сильные отрицательные тренды, чем получено в указанных работах.

Была проведена аналогичная процедура с данными, использованными в работе Данилова и Константиновой [2015]. Для ряда станций были взяты отклонения $foF2$ от «эталонной» кривой за весь период с 1958 г. и провели линейную аппроксимацию получившихся величин $\Delta foF2$ и $\Delta hmF2$ (которые имеют абсолютно тот же смысл, что и аналогичные величины в работах [Bremer et al., 2012; Mielich and Bremer, 2013]) за весь период. Результаты приведены в таблице 4. Для полноты картины рассматривались все три станции Европейского региона, подробно проанализированные в недавней работе Данилова и автора, а также станции Boulder и Canberra из западного и южного полушарий. Естественно, были получены тренды (наклон указанной линии), много меньшие, чем при аппроксимации тех же величин, начиная с 1985 г., которая была проведена при получении величин $k(fo)$, опубликованных в работе Данилова и Константиновой [2015]. Хотя в указанной работе не рассматриваются тренды $hmF2$, для полноты картины был проведен аналогичный анализ и для данных по $hmF2$ для ст. Juliusruh (март, 12:00 LT). Результат оказался тем же самым – отрицательный тренд с 1985 г. получился более высоким, чем с 1957 г. (см. табл.).

Таблица 4. Тренды $foF2$ (МГц/год) и $hmF2$ (км/год), получаемые при различной аппроксимации данных

Станция	Месяц	LT	Параметр	Тренд с 1985 г.	Тренд с 1958 г.
Juliusruh	февраль	12.00	$foF2$	-0.071	-0.006
Juliusruh	январь	16.00	$foF2$	-0.020	-0.011
Juliusruh	март	14.00	$foF2$	-0.046	-0.019
Rome	январь	14.00	$foF2$	-0.057	-0.006
Slough	январь	14.00	$foF2$	-0.049	-0.010
Boulder	февраль	10.00	$foF2$	-0.050	-0.004
Canberra	апрель	12.00	$foF2$	-0.047	-0.004
Juliusruh	март	12.00	$hmF2$	-0.32	-1.51

В качестве иллюстрации сказанного выше приводится рис. 10. Он показывает временной ход сглаженной величины $\Delta foF2$ для марта и 14:00 LT за весь период, для которого имеются данные на ст. Juliusruh. Длинная сплошная линия соответствует линейной аппроксимации всех точек. Ее наклон дает $k(fo) = -0.019$ МГц/год. Залитые ромбы соответствуют периоду 1985–2009 гг., анализировавшемуся в работе Данилова и Константиновой [2015]. Аппроксимирующая их короткая сплошная линия дает $k(fo) = -0.046$ МГц/год. Штриховая линия показывает изменение $\Delta foF2$ до 1980 г. Ее наклон пренебрежимо мал (нет тренда). Та же картина наблюдается на рис. 11, приведенном для иллюстрации поведения $\Delta hmF2$. При переходе от всего ряда данных к периоду после 1985 г. отрицательная величина $k(hm)$ растет от -0.32 км/год до -1.51 км/год. До 1980 г. (штриховая линия) тренда практически нет.

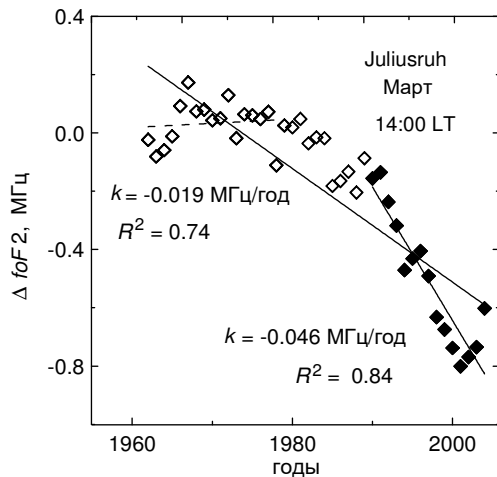


Рис. 10. Временной ход сглаженной величины $\Delta foF2$ для марта и 14:00 LT за весь период, для которого имеются данные на ст. Juliusruh (см. текст).

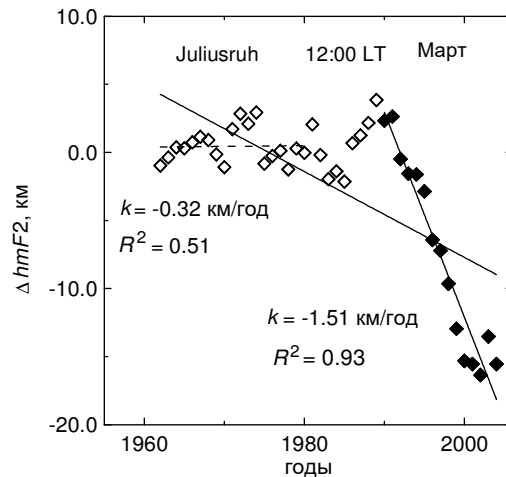


Рис. 11. Временной ход сглаженной величины $\Delta hmF2$ для марта и 12:00 LT за весь период, для которого имеются данные на ст. Juliusruh (см. текст).

4.2 УЧЕТ ЗАВИСИМОСТИ ТРЕНДОВ $foF2$ И $hmF2$ ОТ ВРЕМЕНИ СУТОК И ВРЕМЕНИ ГОДА

Второй важной причиной различия трендов, получаемых разными группами авторов, является отсутствие учета зависимости трендов $foF2$ и $hmF2$ от времени суток. Данилов и Константинова [2015] на примере нескольких станций и различных месяцев года показали, что величины $k(fo)$ демонстрируют хорошо выраженный суточный ход с наибольшими отрицательными трендами в околополуденный период (10:00–16:00 LT) и небольшими трендами обоих знаков, близкими к нулю, в ночное время. Характерный пример приведен выше на рис. 1.

Очевидно из самых общих соображений, что в таком случае совместное использование для поиска трендов данных для всех LT (как это делается в работах [Bremer et al., 2012; Mielich and Bremer, 2013; Cnossen and Franzke, 2014]) будет давать низкие величины трендов по сравнению с относительно высокими трендами, существующими в околополуденное время. Были проанализированы для примера ряд ситуаций из работы Данилова и Константиновой [2015] следующим образом. Бралась величины $\Delta foF2$, использованные в указанной работе для вычисления трендов для конкретных LT, и усреднили их за сутки. После чего построили зависимость от времени этих усредненных величин $\Delta foF2$ и получили величину $k(fo)$, соответствующую указанному усреднению за сутки. В таблице 5 приведены величины $k(fo)$ для случая усреднения, а также максимальные величины $k(fo)$ для данного месяца и момент LT, которому они соответствуют. Легко видеть, что при указанном выше усреднении получаются величины тренда $foF2$, много (в несколько раз) меньшие, чем максимальные тренды, наблюдаемые в околополуденный период.

Поскольку фактически именно такое усреднение проводилось в работах [Bremer et al., 2012; Mielich and Bremer, 2013; Cnossen and Franzke, 2014], именно оно, является причиной более низких трендов $foF2$, чем в работах Данилова и Константиновой, полученных указанными авторами.

Третьей причиной различия трендов, получаемых различными группами авторов, является отсутствие учета сезонных вариаций трендов. Даниловым и Константиновой [2015] было показано на примере ряда станций Европейского региона (а также станции Boulder из западного полушария), что тренды $foF2$ зависят от сезона. Абсолютная величина отрицательных трендов $foF2$ максимальна в зимние месяцы и в начале весны (январь–март) и очень мала в летние месяцы. Пример изменения $k(fo)$, усредненного за четыре околополуденных часа (10:00–16:00 LT), в течение года представлен на рис. 2 (см. выше). Как следует из рис. 2, величина $k(fo)$ в период, близкий к полудню, сильно меняется в течение года от наибольших отрицательных величин порядка -0.060 МГц/год в феврале–марте до малых отрицательных величин в летний сезон.

Как и в случае с суточными вариациями $k(fo)$, очевидно, что использование исходных данных, усредненных за год, должно давать меньшие отрицательные тренды $foF2$, чем тренды, наблюдаемые в зимне-весенние месяцы.

Даниловым и автором был проведен эксперимент, аналогичный описанному выше для разных моментов LT. Для фиксированного LT усреднялись величины $\Delta foF2$, использованные Даниловым и Константиновой [2015] при получении трендов для каждого месяца, за весь год и определили тренд, соответствующий такому усреднению. По одному примеру для каждой станции приведены в табл. 5.

Таблица 5. Сравнение трендов, получаемых при усреднении $\Delta foF2$ за год и для конкретного месяца

Станция	LT	$k(fo)$, МГц/год при усреднении за год	Максимальный $k(fo)$, МГц/год для данного LT	Месяц
Juliusruh	12:00	-0.027	-0.071	февраль
Slough	12:00	-0.028	-0.074	февраль
Rome	12:00	-0.030	-0.070	февраль

Видно, что при усреднении $\Delta foF2$ абсолютная величина получаемых отрицательных трендов уменьшается по сравнению с наибольшими отрицательными трендами, наблюдаемыми зимой и в начале весны, причем уменьшение происходит в 2–2.5 раза. Эффект уменьшения в случае сезонного осреднения меньше, чем эффект при усреднении по LT. Это легко понять, сравнивая рисунки 1 и 2: суточный ход $k(fo)$ лучше выражен и контраст между околополуденными ночными часами сильнее, тогда как сезонный ход $k(fo)$ более сложен.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулировано три главных причины, по которым отрицательные тренды $foF2$ и $hmF2$, полученные в недавних детальных исследованиях [Bremer et al., 2012; Mielich and Bremer, 2013; Sponssen and Franzke, 2014], а также в ряде других публикаций, меньше по абсолютной величине, чем получено в недавних работах Данилова и Константиновой [2013а, б; 2015]. Этими причинами является включение в анализ периода до примерно 1980 г., когда еще не было систематических трендов (т.е. не связанных с циклическими изменениями солнечной и геомагнитной активности), отсутствие учета суточных вариаций трендов и отсутствие учета сезонных вариаций трендов.

В случае двух последних причин в работах других авторов получают, фактически, тренды, усредненные за весь год и за все сутки. Именно поэтому эти тренды меньше, чем максимальные тренды, наблюдаемые в околополуденные часы в зимне-весенние месяцы. Вопрос о том, что более правильно — получать очень маленькие усредненные по LT и месяцам тренды, или выделять периоды местного времени и сезона, когда тренды могут быть значительны, может быть предметом обсуждения. Автору представляется правильным второй подход, поскольку он позволяет рассмотреть возможные механизмы уменьшения $foF2$ и $hmF2$. В частности, Данилов и Константинова [2014; 2015] показали, что наиболее вероятной причиной отрицательных трендов $foF2$ является уменьшение количества атомного кислорода в термосфере.

В случае первой причины, по мнению автора, допускается ошибка. Тренды, получаемые при анализе $\Delta foF2$ и $\Delta hmF2$ за период времени, включающий годы до примерно 1980 г., когда систематических трендов еще не было, являются фиктивными и не отражают уменьшения $foF2$ и $hmF2$, которые происходят в последние десятилетия.

Необходимо подчеркнуть, что во всех своих построениях исходим из того, что тренды параметров ионосферного слоя $F2$, имеют антропогенную природу и являются одним из проявлений охлаждения и оседания верхней атмосферы, которое происходит из-за увеличения количества CO_2 в атмосфере (подробнее см., например, Данилов [2012], Laštovička et al. [2012]). Это является одной из причин, почему автор считает, что при поисках трендов надо анализировать данные после примерно 1980 г. — до этого времени заметных антропогенных эффектов не регистрировалось. О чисто ионосферных доказательствах начала систематических изменений параметров слоя $F2$ уже говорилось выше.

Вопрос о сопоставлении экспериментальных трендов $foF2$ и $hmF2$ с трендами, которые дают наиболее совершенные теоретические модели, требует отдельной публикации. Здесь отметим только,

что модельные тренды (например, тренды, даваемые моделью NCAR TIME-GCM [Qian et al., 2014]) в несколько раз меньше экспериментальных.

THE CAUSES OF DISCREPANCY BETWEEN THE ABSOLUTE VALUE OF THE NEGATIVE TRENDS IN FOF2 AND HMF2 DERIVED BY DIFFERENT RESEARCHERS

Konstantinova A.V.

The comparison of results of determining of long-term trends foF2 and hmF2 by various authors is performed. The causes of discrepancy between the absolute value of the negative trends derived by different researchers are analyzed. Three main causes: the wrong choice of the length of data series used to find trends and lack of consideration of diurnal and seasonal variations in trends were identified.

KEY WORDS: TREND, IONOSPHERE.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Данилов А. Д. Долговременные тренды в верхней атмосфере и ионосфере (обзор) // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 52. N. 3. С. 291–312. 2012.
- Данилов А. Д., Константинова А. В. Поведение параметров ионосферного слоя F2 на грани веков. 1. Критическая частота // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 53. N. 3. С. 361–372. 2013а.
- Данилов А. Д., Константинова А. В. Поведение параметров ионосферного слоя F2 на грани веков. 2. Высота слоя // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 53. N. 4. С. 486–499. 2013б.
- Данилов А. Д., Константинова А. В. Уменьшение количества атомного кислорода в верхней атмосфере // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 54. N. 2. С. 239–245. 2014.
- Данилов А. Д., Константинова А. В. Вариации трендов foF2 сезоном и временем суток // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 55. N 1. С. – . 2015.
- Константинова А. В., Данилов А. Д. Выбор рядов исходных данных при определении трендов параметров слоя F2. Геомагнетизм и аэрономия. Т. 55. N. С. – . 2015.
- Bremer J., Damboldt T., Mielich J., Suessmann P. Comparing long-term trends in the ionospheric F2 region with two different methods // J. Atm. Sol.-Terr. Phys. V. 77. P. 174–185. 2012.
- Cnossen I., Franzke C. The role of the Sun in long-term change in the F2 peak ionosphere: new insights from Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD) and numerical modeling // J. Geophys. Res. 2014. doi: 10.1002/2014JA020048.
- Cnossen I., Richmond A. D. Changes in the Earth's magnetic field over the past century: Effects on the ionosphere-thermosphere system and solar quiet (Sq) magnetic variations // J. Geophys. Res. V. 118. P. 849–858. 2013. doi:10.1029/2012JA018447.
- Damboldt T., Suessmann P. Consolidated database of worldwide measured monthly medians of ionospheric characteristics foF2 and M(3000)F2 / INAG Bulletin on the Web, INAG-73. 2012.
- Danilov A. D. Ionospheric F-region response to geomagnetic disturbances // Adv. Space Res. V. 52. P. 343–366. 2013.
- Danilov A. D., Konstantinova A. V. Trends in the F2 layer parameters at the end of the 1990s and the beginning of the 2000s. // J. Geophys. Res. V. 118. 2013. doi:10.1002/jgrd.50501.
- De Haro Barbas F, Elias A. G., Shibasaki K., Sousa J.R. foF2 long-term trends for periods including solar cycle 23 // Abstr. 8th IAGA/ICMA/CAWSES Workshop on Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere, 27–31 July 2014, Cambridge, England. P. 24. 2014.
- Elias A., Gnabahou D. A., Ouattara F. The effect of the dip equator secular displacement on low-latitude foF2 long-term variations // Abstr. 8th IAGA/ICMA/CAWSES Workshop on Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere, 27–31 July 2014, Cambridge, England. P. 26. 2014.
- Gnabahou D. A., Elias A. G. Long-term trend of foF2 at a west African equatorial station // Abstr. 7th IAGA/ICMA/CAWSES Workshop on Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere, 11–14 September, 2012, Buenos-Aires, Argentina. P. 53. 2012.

- ITU. Recommendations ITU-R P. 1239-2. ITU-R Reference Ionosphere Characteristics. Geneva. 2009.
- *Khaitov R., Kolesnik S., Sarychev V.* Seasonal, diurnal variations in critical frequency in the *F2*-layer over middle latitudes, Abstr. 7th IAGA/ICMA/CAWSE Workshop on Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere, 11–14 September, 2012, Buenos-Aires, Argentina. P. 50. 2012.
- Laštovička, J.* Global pattern of trends in the upper atmosphere and ionosphere: Recent progress, *J. Atmos. Solar Terr. Phys.* V. 71. N. 14–15. P. 1514–1528. 2009.
- Lastovicka J.* Trends in the upper atmosphere-ionosphere system – Progress over 2012–2014 // Abstr. 8th IAGA/ICMA/CAWSES Workshop on Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere, 27–31 July 2014, Cambridge, England. P. 16. 2014.
- 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. N. 17. P. 1854–1870. 2006.
- *Laštovička J., Akmaev R. A., Beig G., Bremer J., Emmert J. T., Jacobi C., Jarvis M. J., Nedoluha G., Portnyagin Y. I., Ulich T.* Emerging pattern of global change in the upper atmosphere and ionosphere // *Ann. Geophysicae.* V. 26. P. 1255–1268. 2008.
- *Laštovička J., Solomon S. C., Qian L.* Trends in the neutral and ionized upper Atmosphere // *Space Sci. Rev.* V. 168. P. 113–145. 2012.
- *Mielich J., Bremer J.* Long-term trends in the ionospheric *F2* region with two different solar activity indices // *Ann. Geophysicae.* V. 31. P. 291–303. 2013.
- *Qian L., Solomon S.C., Roble R.G.* Secular changes in the thermosphere and ionosphere between two quiet Sun periods // *J. Geoph. Res.* V. 119. P. 2255–2262. 2013. doi: 10.1002/2013JA019438.
- *Rojas Villaba E., Milla M.* A long-term trend study of the F-region peak height above Jicamarca // Abstr. 7th IAGA/ICMA/CAWSES Workshop on Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere, 11-14 September, 2012, Buenos-Aires, Argentina. P. 34. 2012.
- *Roinen L., Ulich T., Laine M., Rey N., Rousset H.I.* Time-varying ionosonde trend: Case study of Sodankula Observatory hmF2// Abstr. 8th IAGA/ICMA/CAWSES Workshop on Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere, 27–31 July 2014, Cambridge, England. P. 40. 2014.
- *Shimazaki T.* World wide daily variations in the height of the maximum electron density in the ionospheric *F2* layer. // *J. Radio Res. Labs. (Japan)*, V. 2. P. 85–97. 1955.
- *Sharma K., Chandra S.* Long-term changes in the ionosphere at low latitudes: impact of greenhouse gases// Abstr. 7th IAGA/ICMA/CAWSES Workshop on Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere, 11–14 September, 2012, Buenos-Aires, Argentina. P. 31. 2012.