

УДК 550.385

ПОВЕДЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРНОГО СЛОЯ F_2 НА ГРАНИ ВЕКОВ. 2. ВЫСОТА СЛОЯ

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

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

Поступила в редакцию 18.09.2012 г.

Рассмотрены тренды высоты ионосферного слоя F_2 , hmF_2 , для периода конца 90-х–начала 2010-х годов. Показано, что для большинства рассмотренных ситуаций (время дня плюс сезон) для всех станций, для которых удалось найти удовлетворяющие требованиям ряды исходных данных, получены отрицательные тренды. Они колеблются от 1.2 до 3.1 км в год. Тренды в дневное время несколько выше, чем в послезаходный период, что, видимо, говорит о влиянии оседания верхней атмосферы на изменение величин hmF_2 .

DOI: 10.7868/S0016794013040068

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] и к первой части работы [Данилов и Константинова, 2013], где кратко сформулированы причины, по которым в настоящее время исследование трендов параметров слоя F_2 ионосферы (прежде всего, для последнего десятилетия прошлого века и первого десятилетия нашего века) приобретает особый интерес.

Напомним кратко эти причины. 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 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 F_2 будут возрастать со временем и для конца предыдущего века и начала нынешнего могут быть значительно больше, чем в течение двух последних десятилетий XX века, например, чем тренды, приведенные в детальном исследовании Бремера [Bremer, 2001].

Вторая причина 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 F_2 окажутся в начале нового века выше, чем они были в последние десятилетия прошлого века и чем давали теоретические расчеты Ришбета [Rishbeth, 1990].

В данной работе описывается подход к поиску трендов высоты слоя hmF_2 и полученные результаты.

2. ВЫБОР ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

В первой части работы подробно описаны проблемы с выбором исходных данных для выявления трендов критической частоты слоя F_2 , foF_2 , и различные подходы к определению трендов этого параметра.

В частности, в предыдущей работе авторов было показано, что имеются три источника ионосферных данных, в которых в принципе можно найти величины foF_2 и hmF_2 для всего периода от 1957/1958 г. 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). В указанной работе авторов подчеркивалось, что данные по foF_2 из разных ис-

точников далеко не всегда согласуются друг с другом, и приходится выбирать для каждой ситуации наиболее надежные данные, проводить расчеты трендов с разными наборами данных и, сопоставляя результаты, делать заключения о получаемых трендах и их статистической надежности.

Все сказанное еще в большей степени справедливо для поиска трендов hmF_2 . В отличие от критической частоты слоя foF_2 величина высоты слоя hmF_2 не является параметром, непосредственно определяемым из ионограмм вертикального зондирования. Из указанных ионограмм определяется величина параметра M3000, а величина hmF_2 вычисляется на основании этого параметра. Существует несколько эмпирических формул для такого вычисления. Мы использовали, как и в предыдущих работах [Данилов, 2011; Данилов и Ванина-Дарт, 2009] хорошо известную формулу Шимазаки [Shimazaki, 1955].

К сожалению, трудности нахождения надежных исходных данных по hmF_2 не ограничиваются наличием разных подходов к вычислению этого параметра из M3000. Внимательное изучение данных в наиболее полной системе данных SPIDR показало, что там имеются заведомо ошибочные данные. Целые куски таблиц исходных данных были заполнены одними и теми же цифрами. Пример такого куска для ст. Ашхабад приведен в табл. 1. Видно, что для большого интервала местных времен показана одна и та же величина M3000, что, естественно, невозможно с физической точки зрения. В связи с этим мы проделали работу по “чистке” данных SPIDR для тех ситуаций (моментов LT и месяцев), которые используются в нашем анализе для нахождения трендов. Если в таблице исходных данных оказывались три и более одинаковые значения M3000 подряд, то сохранялись только первые два значения, а все последующие убирались и не участвовали в дальнейшем осреднении данных.

Сравнение результатов, получаемых с помощью исходной и “чищенной” системы SPIDR показали, что эти результаты в ряде случаев могут существенно различаться, причем, как правило, данные “чищенной” системы дают более выраженные тренды hmF_2 с лучшими статистическими характеристиками.

Дальнейшее сравнение показало, что даже после “чистки” системы SPIDR во многих случаях сохранялось различие между разными наборами исходных данных. Поэтому мы, как и в случае с поиском трендов foF_2 в первой части работы [Данилов и Константинова, 2013] рассчитывали тренды отдельно для наборов данных, которые представлялись нам наиболее надежными для данной ситуации и сравнивали их между собой. Соответствующие примеры будут приведены ниже.

Таблица 1. Значения M3000, взятые из банка данных SPIDR для ст. Ашхабад для 2 января 1999 г.

Дата	Время	M3000
1999-01-02	00:00	9999.00
1999-01-02	01:00	9999.00
1999-01-02	02:00	9999.00
1999-01-02	03:00	9999.00
1999-01-02	04:00	3.30
1999-01-02	05:00	3.20
1999-01-02	06:00	3.20
1999-01-02	07:00	3.10
1999-01-02	08:00	3.20
1999-01-02	09:00	3.00
1999-01-02	10:00	3.00
1999-01-02	11:00	3.10
1999-01-02	12:00	3.10
1999-01-02	13:00	3.10
1999-01-02	14:00	3.10
1999-01-02	15:00	3.10
1999-01-02	16:00	3.10
1999-01-02	17:00	3.10
1999-01-02	18:00	3.10
1999-01-02	19:00	3.10
1999-01-02	20:00	3.10
1999-01-02	21:00	3.10
1999-01-02	22:00	3.10
1999-01-02	23:00	3.10

В целом количество данных по hmF_2 (или M3000) значительно меньше, чем по foF_2 . Поскольку для полноценного анализа нам были необходимы данные за весь период с 1957/1958 гг. по (желательно) как можно более поздний год, число станций, пригодных для анализа трендов оказалось очень ограниченным. Под “как можно более поздним” годом мы имеем в виду год после 2005 г. Наиболее желательным было иметь данные (как это и было для ряда станций, см. ниже) до 2010 г. Станции, ряд значений hmF_2 (M3000) для которых заканчивался до 2005 г., мы не рассматривали.

Проблему представляли собой не только более поздние годы, но и более ранние. Для некоторых станций данные по hmF_2 или M3000 в системе SPIDR имелись до 2010 г., но начинались они поздно – в 90-х годах. В этом случае приходилось комбинировать данные в формате IWG с данными SPIDR для получения непрерывного ряда с 1958 по 2010 г. Если не было и данных в формате IWG для раннего периода, то приходилось использовать медианные данные, если они для этого периода были. Такая ситуация была, например,

для ст. о-в. Уоллопс (см. ниже), где данные в формате IWG, а также в банке Дамбольдта и системе SPIDR начинаются только с 1967 г., тогда как медианные данные имеются с 1957 г.

В результате просмотра данных более 30-ти ионосферных станций, были выбраны 10 станций, для которых оказалось возможным провести анализ трендов $hmF2$ методом, описанным в следующем параграфе.

3. МЕТОД АНАЛИЗА

Метод нахождения трендов был, в принципе, подобен методам, применявшимся авторами ранее для нахождения трендов $foF2$ и $hmF2$, однако имелись и некоторые специфические особенности.

Важной проблемой при поиске долговременных трендов $foF2$ или $hmF2$ является устранение эффекта зависимости этих параметров от солнечной активности. Для этого строились зависимости исходных данных (в данном случае – $hmF2$) от среднегодового индекса солнечной активности $F10.7$ для периода 1958 (1957)–1979 гг. Этот интервал был выбран потому, что в многочисленных исследованиях одного из авторов (подробнее см. в обзорной работе [Данилов, 2012]) было показано, что после 1980 г. в поведении целого ряда параметров слоя $F2$ начинают проследиваться долговременные изменения (тренды).

Как правило, зависимости $hmF2$ от $F10.7$ были хорошо выражены и имели высокий коэффициент R^2 порядка 0.85–0.99. Здесь и далее для оценки статистической значимости результатов мы будем использовать коэффициент определенности R^2 , который позволяет оценить статистическую достоверность получаемых зависимостей по известному критерию Фишера. В отдельных случаях величина R^2 была ниже и составляла 0.7–0.8, однако при имевшемся количестве точек статистическая значимость оставалась на уровне выше 0.95.

Примеры зависимостей $hmF2$ от $F10.7$ для ряда станций и различных ситуаций (местное время + сезон) приведены на рис. 1. Пока следует обратить внимание только на точки, которые соответствуют периоду до 1979 г., и сплошную кривую, которая соответствует аппроксимации этих точек полиномом третьей степени. Кресты и штриховая кривая будут обсуждаться ниже.

Аналитическое описание сплошной кривой на рисунках типа рис. 1 использовалось как модель зависимости $hmF2$ от $F10.7$ для данной ситуации. Эта модель вычиталась из экспериментальных величин $hmF2$ для более позднего периода, и полученные величины $\Delta hmF2 = hmF2(\text{набл}) - hmF2(\text{мод})$ использовались для дальнейшего анализа.

Рассматривались два времени суток – 14:00 LT и момент (ss+2) через два часа после захода Солнца. Выбор этих моментов неоднократно обсуждался

в предыдущих публикациях авторов, поэтому здесь мы отметим просто, что первый момент соответствует дневным условиям, а второй – максимальному ожидаемому влиянию динамических процессов на слой $F2$. Для выявления возможного сезонного эффекта рассматривались два периода – январь–февраль (JF) и июнь–июль (JJ). Ниже мы будем для краткости называть комбинацию момента времени и сезона ситуацией. Таким образом, для каждой станции рассматривались четыре ситуации: 14JF, 14JJ, SSJF и SSJJ.

Анализ трендов $hmF2$ (как в случае трендов $foF2$, описанных в первой части работы) проводился двумя принципиально разными методами. В первом методе величины $\Delta hmF2$, полученные для периода с 1985 г. до конца имеющихся данных, сглаживались с помощью 11-летнего скользящего среднего, и строилась зависимость полученных сглаженных величин от лет. Полученные графики начинались, естественно, в 1990 г. и заканчивались на 5 лет раньше, чем ряд исходных данных (т.е. в 2005 г., если имелись данные до 2010 г.). Точки на этих графиках были аппроксимированы прямой, наклон которой и давал искомый тренд $hmF2$ в год.

Второй метод состоял в следующем. Вычислялось среднее арифметическое величин $\Delta hmF2$ (без усреднения) за период 11 лет с 2000 по 2010 г. Если исходный ряд данных кончался раньше, то усреднение проводилось с 2000 г. до конца ряда. Полученная величина характеризовала среднее изменение $hmF2$ с периода до 1980 г. по период после 2000 г. Будучи поделенной на интервал в 30 лет (условно: 1975–2005 гг.) она давала величину тренда $hmF2$ в год, среднюю за период после 1980 г. Существенно, что в этом случае не требовалось проводить сглаживание (которое в принципе может повлиять на окончательный результат), как в первом методе, и можно было оценить среднюю величину тренда даже не строя картину зависимости $\Delta hmF2$ от времени для периода после 2000 г.

Очевидно, что, если происходит увеличение тренда $hmF2$ со временем, первый метод должен давать более высокие величины тренда, чем второй, поскольку в первом случае мы получаем тренд для периода после 2000 г., тогда как во втором оцениваем некий средний тренд за период между двумя интервалами времени: 1958–1979 и 2000–2010 гг.

В результате рассмотрения данных более чем 20-ти ионосферных станций, были найдены 10 станций, для которых оказалось возможным провести оценки трендов $hmF2$ двумя описанными выше методами.

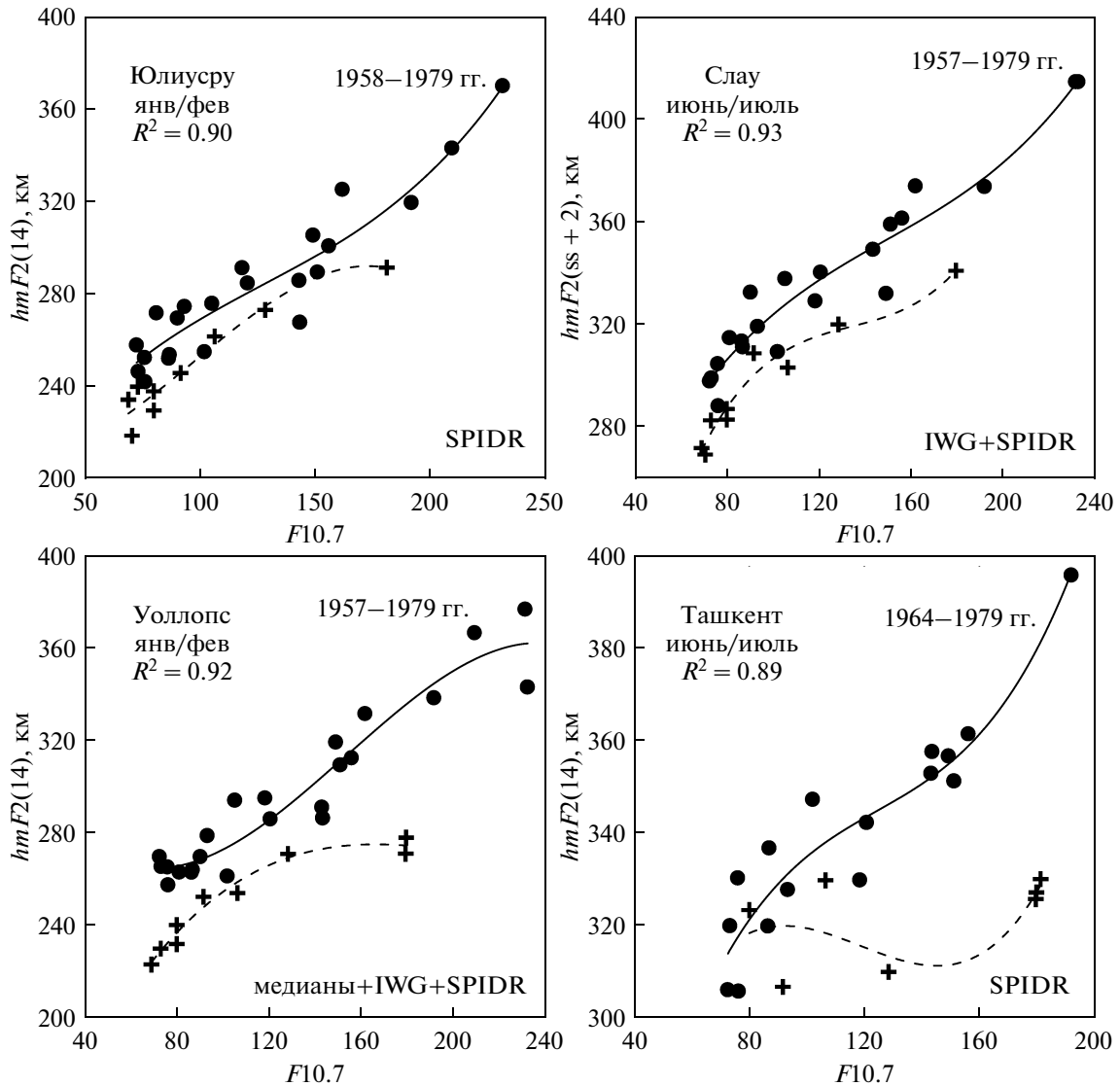


Рис. 1. Зависимость $hmF2$ от индекса $F10.7$ на станциях Юлиусру, Слау, Уоллопс и Ташкент для различных ситуаций.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сводка результатов оценок трендов с помощью первого (основного) метода для 10-ти упомянутых выше станций приведена в табл. 2. Как уже указывалось выше, из-за довольно частого расхождения в данных, приводимых для одной и той же станции в разных системах данных, мы проводили оценки трендов для одной и той же ситуации, используя независимо данные разных банков данных, или комбинации таких данных (например, данные в IWG формате до 1999 г. и данные из системы SPIDR для 2000–2010 гг.). Степень согласия получаемых результатов (трендов $hmF2$) позволяла судить о надежности получаемых трендов.

Как видно из табл. 2, для некоторых станций (Ашхабад, Грехемстоун, Хобарт, Пойнт Аргуэлло)

пригодные для применения описанных выше методов данные имелись только в системе SPIDR. Для других станций имелась возможность для каждой ситуации использовать разные наборы исходных данных.

В таблице 2 приводятся: название станции, источник исходных данных, период, для которого получен тренд, коэффициент определенности R^2 и непосредственно величина тренда k в км/год (наклон аппроксимирующей линии на рисунках типа рис. 2–5, см. ниже).

Основной результат анализа первым методом состоит в том, что из приведенных в табл. 1 72-х ситуаций только в трех ситуациях тренд не был выражен, или был четко положительным. В остальных случаях тренд был отрицательным и статистически значимым по критерию Фишера.

Таблица 2. Тренды $hmF2$ для 10-ти станций для разных ситуаций и разных источников данных

Станция и ситуация	Источник	Начало, год	Конец, год	R^2	k , км/год
Слау					
14JF	SPIDR	1990	2005	0.91	-1.3
14JF	IWG + SPIDR	1990	2005	0.93	-1.7
14JJ	SPIDR	1995	2005	0.91	-5.8
14JJ	IWG + SPIDR	1995	2005	0.92	-5.6
SSJF	SPIDR	1990	2005	0.97	-1.6
SSJF	IWG + SPIDR	1990	2005	0.91	-1.3
SSJJ	SPIDR	1990	2005	0.87	-1.2
SSJJ	IWG + SPIDR	1990	2005	0.89	-1.3
Юлиусру					
14JF	SPIDR	1995	2005	0.95	-1.3
14JF	IWG + SPIDR	1994	2005	0.96	-1.4
14JJ	SPIDR	1990	2005	0.68	-1.7
14JJ	IWG + SPIDR	1990	2005	0.72	-1.8
SSJF	SPIDR	1990	2005	0.77	-0.4
SSJF	IWG + SPIDR	1990	2005	0.83	-0.6
SSJJ	SPIDR	1990	2005	0.73	-0.8
SSJJ	IWG + SPIDR	1990	2005	0.62	-0.8
Москва					
14JF	SPIDR	1995	2001	0.99	-4.5
14JF	IWG + SPIDR	1995	2001	0.98	-4.4
14JJ	SPIDR	1994	2005	0.5	-1.1
14JJ	IWG + SPIDR	1990	2005	0.5	-0.7
SSJF	SPIDR	1995	2001	0.97	-4.2
SSJF	IWG + SPIDR	1995	2001	0.97	-4.0
SSJF	IWG	1995	2001	0.94	-2.3
SSJJ	SPIDR	1994	2005	0.96	-2.8
SSJJ	IWG + SPIDR	1994	2005	0.96	-2.5
SSJJ	IWG	1994	2005	0.93	-3.2
Томск					
14JF	SPIDR	1990	2001	0.83	-2.2
14JF	Дамбольдт	1990	2001	0.74	-1.7
14JF	IWG	1990	2001	0.91	-1.1
14JJ	SPIDR	1990	2001		Положительный
14JJ	Дамбольдт				Положительный
SSJF	SPIDR	1990	2001	0.84	-2.1
SSJF	Дамбольдт	1990	2001	0.73	-1.4
SSJF	IWG + SPIDR	1990	2001	0.72	-1.7
SSJF	IWG2006	1990	2001	0.89	-1.4
SSJJ	SPIDR	1990	2001	0.83	-1.9
SSJJ	Дамбольдт	1990	2001	0.89	-1.8
SSJJ	IWG + SPIDR	1990	2001	0.74	-1.4

Таблица 2. Окончание

Станция и ситуация	Источник	Начало, год	Конец, год	R^2	k , км/год	
о-в Уоллопс						
14JF	SPIDR	1990	2005	0.94	-1.2	
14JF	медианы + IWG + SPIDR	1990	2005	0.96	-2.6	
14JF	медианы + SPIDR	1990	2005	0.97	-2.8	
14JJ	SPIDR	1990	2005	0.44	-0.8	
14JJ	медианы + IWG + SPIDR	1993	2005	0.89	-3.5	
14JJ	медианы + SPIDR	1990	2005	0.99	-7.1	
SSJF	SPIDR	1990	2005	0.90	-1.9	
SSJF	медианы + IWG + SPIDR	1990	2002	0.90	-4.7	
SSJF	медианы + SPIDR	1990	2005	0.90	-1.4	
SSJJ	SPIDR	1990	2003	0.94	-2.8	
SSJJ	медианы + IWG + SPIDR	1990	2003	0.95	-1.9	
SSJJ	медианы + SPIDR	1990	2003	0.91	-3.7	
Ташкент						
14JF	SPIDR	1995	2001	0.86	-4.1	
14JJ	SPIDR	1992	2001	0.90	-1.9	
SSJF	SPIDR	1993	2001	0.88	-2.1	
SSJF	IWG	1994	2001	0.86	-1.9	
SSJJ	SPIDR	1990	2001	0.95	-3.4	
SSJJ	IWG2006	1990	2001	0.53	-1.0	
Норфолк						
14JF	Дамбольдт	1994	2004	0.85	-0.7	
14JJ	Дамбольдт	1994	2004	0.97	-0.8	
SSJF	Дамбольдт	1994	2004	0.69	-0.7	
SSJJ	Дамбольдт	1994	2004	0.92	-1.5	
Грехемстоун						
14JF	SPIDR	1992	2001	0.81	-2.0	
14JJ	SPIDR	1994	2001	0.96	-3.2	
SSJF	SPIDR	1994	2001	0.94	-1.2	
SSJJ	SPIDR	1993	2001	0.93	-1.8	
Хобарт						
14JF	SPIDR	1990	2005	0.87	-1.9	
14JJ	SPIDR	1990	2002	0.95	-1.1	
SSJF	SPIDR	1990	2003	0.87	-1.2	
SSJJ	SPIDR	1991	2003	0.93	-1.1	
Пойнт Аргуэлло						
14JF	SPIDR	1990	2003	0.55	-1.0	
14JJ	SPIDR	1990	2003	0.97	-5.2	
SSJF	SPIDR	Нет тренда				
SSJJ	SPIDR	1990	2003	0.20	-0.5	

Таблица 3. Усредненные значения трендов $hmF2$ для 10-ти станций для дневных и послезаходных условий, лета и зимы

Станция	$-k$, км/год	SD, км/год
Слау	2.5(1.4)	2.00(0.20)
Юлиусру	1.1	0.52
Москва	3.0	1.35
Томск	1.7	0.35
о-в Уоллопс	2.9	1.75
Ташкент	2.4	1.13
Норфолк	0.9	0.39
Грехемстоун	2.1	0.84
Хобарт	1.3	0.39
Пойнт Аргуэлло	2.2	2.58
1400 LT ss + 2	2.5 1.9	1.73 1.05
Зима	2.1	1.16
Лето	2.3	1.68

Этот результат позволяет сделать главный вывод: для рассматриваемого периода характерен отрицательный тренд $hmF2$. Три отклонения от общей картины могут носить случайный характер и быть результатом ошибок, связанных с измерением M3000, с неточностями в банках данных, или с пересчетом этого параметра в $hmF2$, о чем говорилось в параграфе 2. Абсолютная величина полученных отрицательных величин k меняется в табл. 2 существенно — от 0.5 (Пойнт Аргуэлло, SSJJ) до 7.1 (о-в Уоллопс, 14JJ). Если формально усреднить все 69 величин, приведенных в табл. 2, то получится величина $k = -2.14$ км/год со стандартным отклонением $SD = 1.42$ км/год, которую можно рассматривать как средний глобальный тренд $hmF2$ в период после 1990 г. Однако такое усреднение предполагает одинаковое изменение (одинаковый тренд) $hmF2$ на всех станциях. Из самых общих соображений ясно, что изменение динамического режима термосферы, происходящее из-за охлаждения и оседания верхней и средней атмосферы и влияющее на изменения высоты слоя $F2$, может и должно происходить по-разному в разных областях земного шара. Об этом говорят и модельные расчеты [Qian et al., 2011], согласно которым в разных географических областях могут наблюдаться тренды $hmF2$ разной абсолютной величины и даже разного знака. Прежде, чем переходить к величинам k , полученным для разных станций, рассмотрим примеры различных зависимостей $\Delta hmF2$ от времени, которые и служили основой определения величин k . Эти примеры приведены на рисунках 2–5.

На рисунке 2 представлен пример наиболее “благоприятных” случаев, когда имелись исходные данные до 2010 г. (а, следовательно, сглаженные данные до 2005 г.) и достаточно хорошо выраженное уменьшение $\Delta hmF2$ начиналось непосредственно с 1990 г. Видно, что на всех четырех рисунках отрицательный тренд хорошо выражен и статистически значим (высокие величины $R^2 \sim 0.8–0.97$). В трех случаях (рис. 2а, 2б и 2г) наблюдается хорошее согласие между двумя использованными наборами данных. На рисунке 2в есть расхождение между данными только SPIDR и комбинациями данных SPIDR с данными IWG и медианами, причем временной ход $\Delta hmF2$ по двум последним группам данных практически одинаков. Скорее всего, отличие временного хода по данным SPIDR связано с тем, что для станции о-в. Уоллопс данные SPIDR начинаются только с 1967 г., поэтому надежность построения зависимости $hmF2(F10.7)$ для периода до 1980 г. (см. выше параграф 2) ниже, чем в случае использования медиан для периода 1957–1967 гг.

На рисунке 3 приведен пример случаев, когда исходные данные кончались до 2010 г. (в основном — в 2006 г.) и поэтому сглаженные точки на рисунке кончаются в 2001 г. Видно, что на рисунках 3в и 3г наблюдается вполне удовлетворительное согласие между разными наборами данных, дающих близкие значения величин k (см. табл. 2). На рисунке 3б видна существенная разница между поведением $\Delta hmF2$ по данным IWG и по данным SPIDR. Причина этого расхождения нам не известна, но предпочтение, видимо, следует отдавать данным SPIDR.

Не во всех случаях выраженное уменьшение $\Delta hmF2$ начиналось непосредственно с 1990 г. Примерно в половине случаев, падение $\Delta hmF2$ началось в 1992–1995 гг. (см. рисунки 4 и 5). При этом до этого наблюдались либо отсутствие изменения $\Delta hmF2$, либо даже его небольшой рост (рис. 4в и 4г). Характерно, что, как хорошо видно на рис. 4б, различные наборы исходных данных дают одинаковую картину — отсутствие изменения до 1993 г. и хорошо выраженное и статистически значимое падение с почти одинаковым наклоном k . Аналогичная картина наблюдается и на рисунках 4а, 5а и 5г. В ситуации 14JJ на ст. Слау (рис. 5в) временной ход $\Delta hmF2$ для данных SPIDR отличается от хода для IWG данных. Причина различия нам не ясна.

Как видно из рисунков 2–5, для большинства анализируемых временных зависимостей $\Delta hmF2$ величина коэффициента определенности R^2 выше 0.80 и во многих случаях превышает 0.9, что обеспечивает высокую статистическую значимость получаемого наклона k по критерию Фишера. Такая же картина наблюдается и практически для всех остальных зависимостей $\Delta hmF2$ от времени, не показанных на рисунках 2–5. На ри-

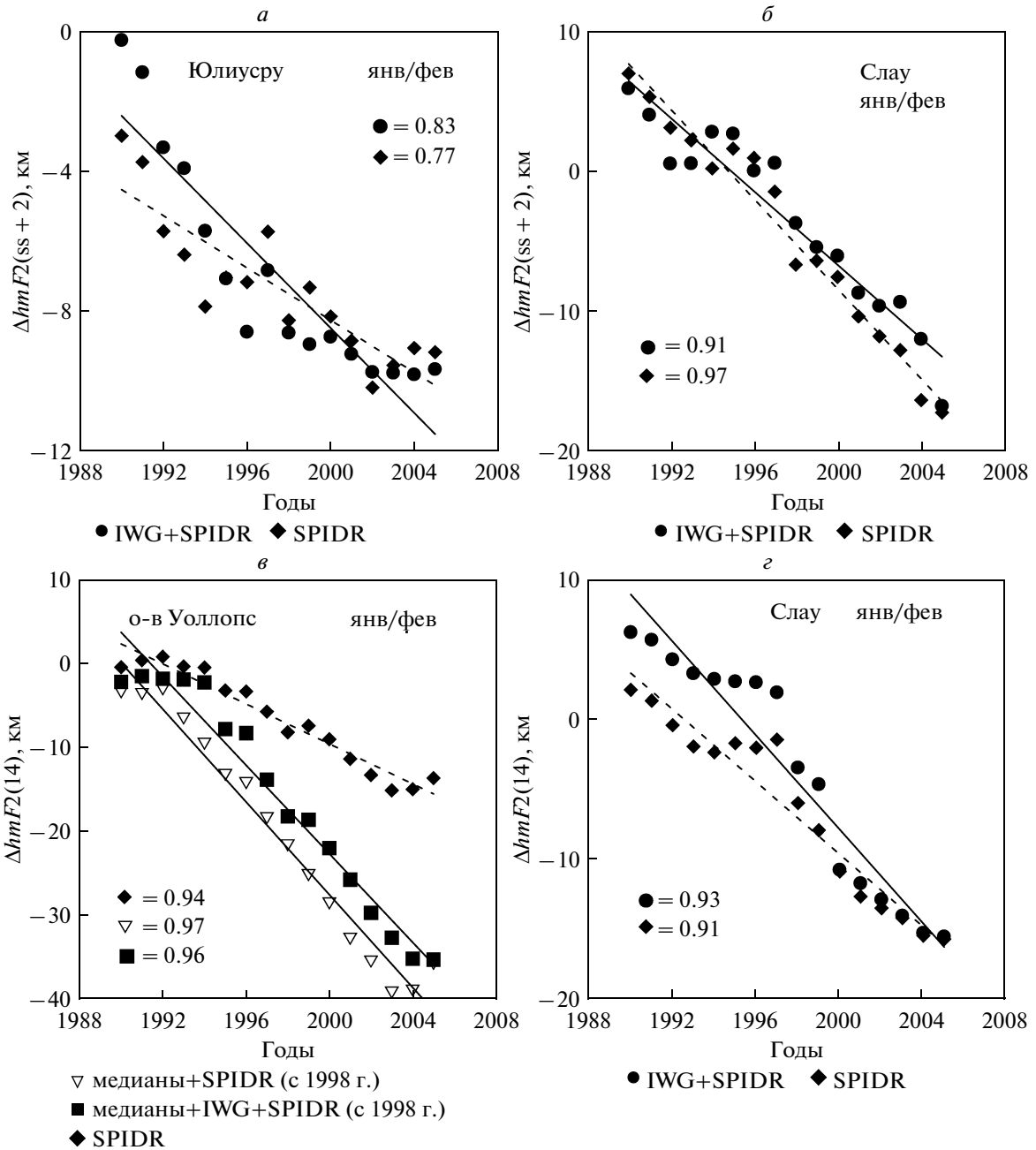


Рис. 2. Изменения сглаженных величин $\Delta hmF2$ от времени для различных станций и ситуаций.

сунке 6 мы приводим случай сильного разброса величин $\Delta hmF2$ от аппроксимирующей прямой (ст. Пойнт Аргуэлло, 14JF). Как видно из рис. 6, величина R^2 равна всего 0.55. Тем не менее, общее падение $\Delta hmF2$ ясно видно, и статистическая значимость при имеющемся числе точек (13) равна 0.95.

Отметим еще одно важное обстоятельство, связанное с рисунками 2–5. Анализируемые величины $\Delta hmF2$ (см. оси ординат на рисунках) либо лежат в области отрицательных значений (ри-

сунке 2а, 2в, 3а, 3б, 4а, 4г, 5в), либо начинаются в первые годы в области положительных значений, а потом переходят в область отрицательных (рисунках 2б, 2г, 3в, 3г, 4в), либо целиком лежат в области положительных значений (рисунках 4б, 5а, 5б и 5г).

Ясно, что указанная разница обусловлена разной предысторией изменения $hmF2$ до 1990 г. В первом случае после “опорного” периода 1957–1980 гг. уже существовал отрицательный тренд $hmF2$, который привел к отрицательным величи-

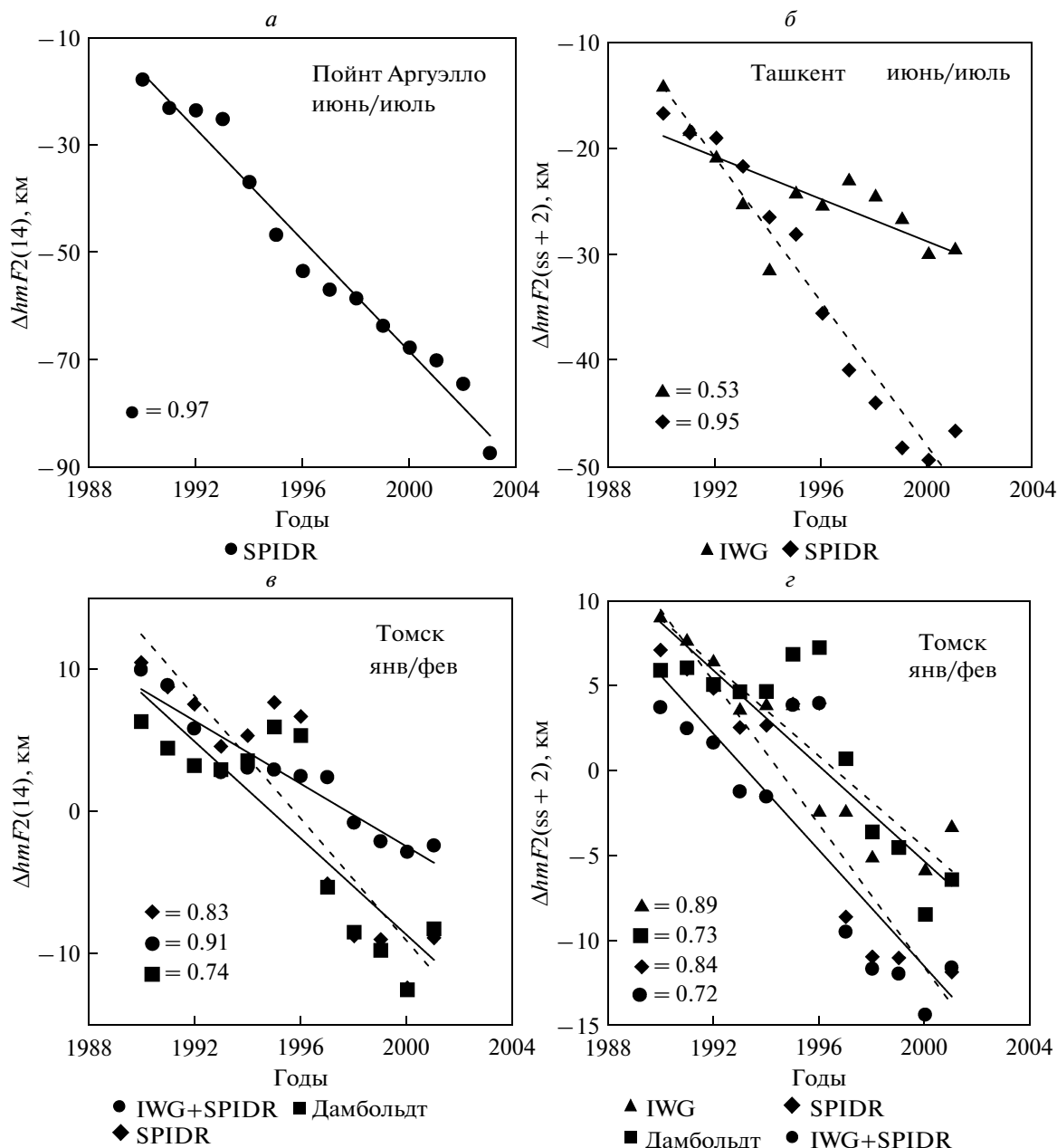


Рис. 3. То же, что на рис. 2.

нам $\Delta hmF2$ в 1990 г. В двух других случаях тренды $hmF2$ до 1990 г. были положительными, что привело положительным величинам $\Delta hmF2$ в 1990 г. Важным, однако является тот факт, что независимо от того, лежат ли анализируемые величины $\Delta hmF2$ в области отрицательных или положительных значений, они в подавляющем большинстве случаев (69 из 72) дают отрицательный тренд в рассматриваемый период. Этот факт свидетельствует о том, что в районе 1990 г. произошло какое-то существенное изменение в процессах, которые определяют изменение высоты $hmF2$. На

наш взгляд, к изменениям в режиме термосферных горизонтальных ветров (а они через вертикальный дрейф существенно влияют на величину $hmF2$) добавился эффект общего “оседания” термосферы, т.е. уменьшения высоты уровней постоянной плотности, в том числе – и уровня, где формируется максимум слоя $F2$. Это и привело в ряде случаев к смене положительного тренда на отрицательный и, таким образом к доминированию отрицательных трендов в период после 1990 г.

Вернемся к проблеме усреднения полученных величин k . Как уже указывалось выше, усредне-

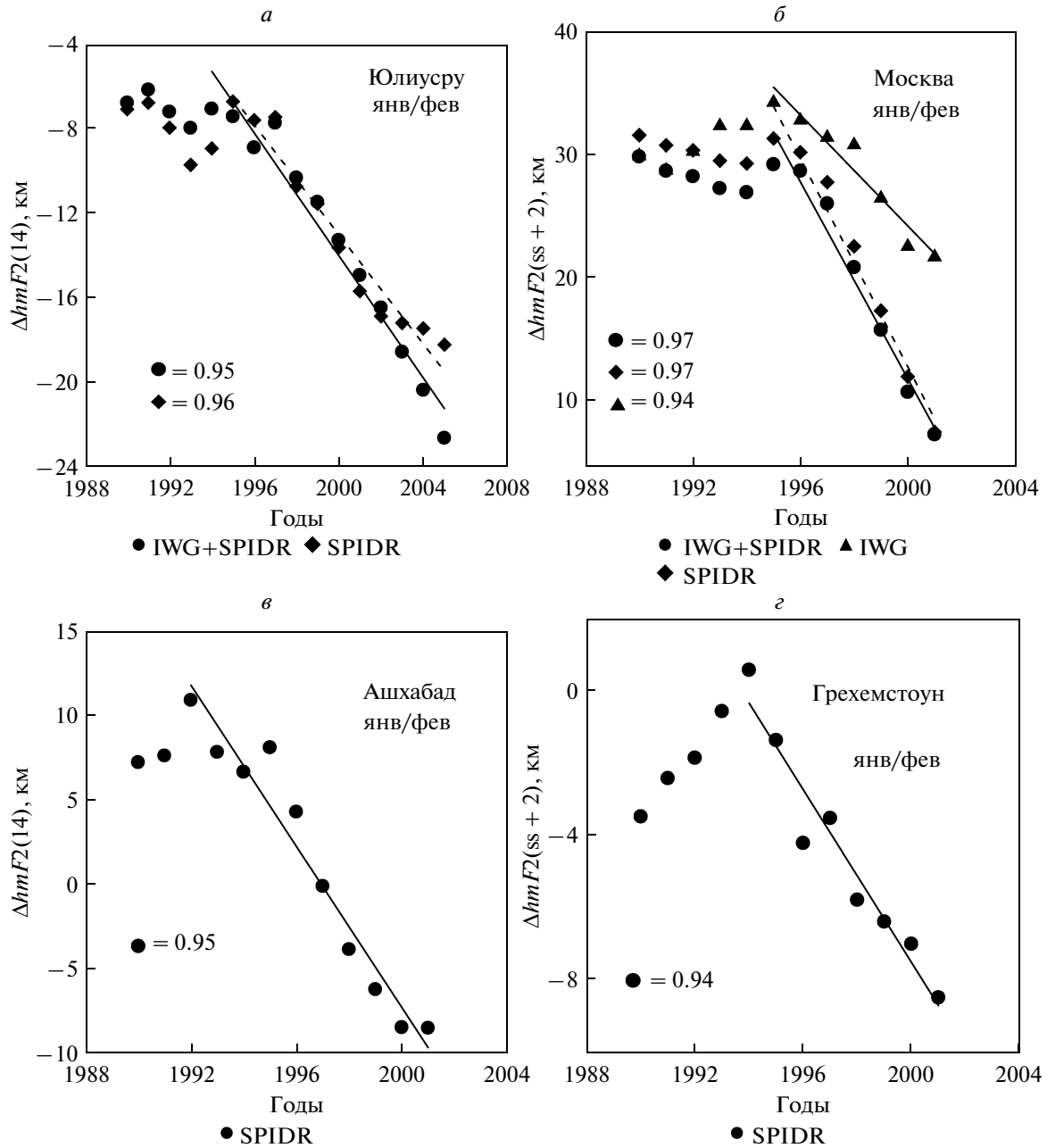


Рис. 4. То же, что на рис. 2.

ние всех величин, приведенных в табл. 1, дает $k = -2.14 \pm 1.42$ км/год. Величина SD оказывается достаточно большой (1.42 км/год), но необходимо помнить, что приведенная величина k получена усреднением большого числа точек (69), поэтому статистическая значимость ее достаточно велика.

Уже при рассмотрении табл. 2 видно, что в плане статистики ситуация различна для разных станций. Например, для ст. Пойнт Аргуэлло имеется всего три оценки k , которые сильно отличаются друг от друга. В то же время, для ст. Томск

есть 10 значений k , которые отличаются между собой значительно меньше, чем для многих других станций.

Мы провели ряд формальных усреднений величин k , приведенных в табл. 2. Прежде всего, мы усреднили величины k для каждой станции по всем четырем ситуациям и наборам исходных данных. Результаты приведены в 10-ти верхних строках табл. 3. Там же приведены величины SD. Данные табл. 3 подтверждают сказанное выше о том, надежность трендов $hmF2$, получаемых для разных станций, различна. Наиболее статистиче-

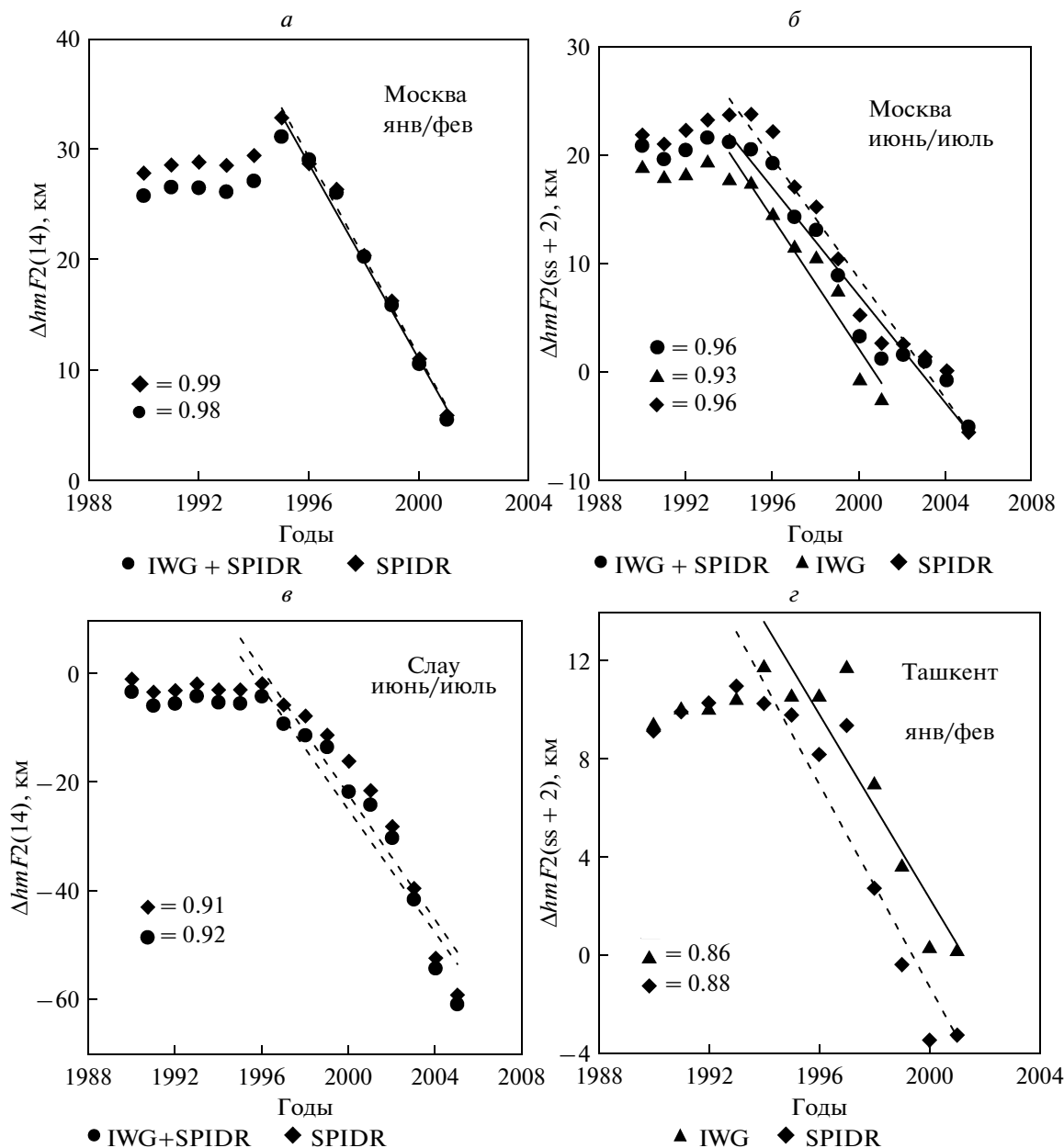


Рис. 5. То же, что на рис. 2.

ски надежный тренд получился для Томска и Хобарта, наименее надежный — для Пойнт Аргуэлло. Для ст. Слау, если принять ошибочными два значения -5.8 и -5.6 км/год, полученные для ситуации 14JJ и сильно отличающиеся от k для других ситуаций, получается статистически значимая величина тренда, равная -1.4 км/год при малой величине $SD = 0.2$ км/год.

Используя все данные по k , приведенные в табл. 2, мы предприняли попытку найти разницу между трендами для дневных и ночных условий (1400 LT и $ss+2$) и для лета и зимы. Результаты соответствующего формального усреднения приве-

дены в четырех нижних строчках табл. 3. Видно, что в среднем тренды в дневное время несколько выше, чем после захода Солнца и летом несколько выше, чем зимой. Однако величины SD достаточно велики, поэтому указанный вывод следует считать условным. Если в порядке дискуссии принять, что тренд $hmF2$ днем действительно несколько выше, чем через два часа после захода Солнца, когда влияние динамических процессов на $hmF2$ максимально, то мы придем к неизбежному выводу, уже упоминавшемуся выше, что в рассматриваемый период долговременные изменения высоты слоя $F2$ вызываются не только из-

Таблица 4. Средние значения $\Delta hmF2$ для разных станций для первого десятилетия XXI века

Станция	Источник	Период	$\Delta hmF2$, км			
			14JF	14JJ	SSJF	SSJJ
Слау	SPIDR	2000–2010	–15.7	–59.1	–17.2	–21.0
	IWG + SPIDR	2000–2010	–15.6	–60.8	–16.8	–21.3
Юлиусру	SPIDR	2000–2010	–22.6	–59.0	–9.7	–17.3
	IWG + SPIDR	2000–2010	–18.2	–40.5	–9.2	–14.3
Москва	SPIDR	2000–2006	+7.7	+10.6	+9.2	–5.6
	IWG + SPIDR	2000–2006	+7.7	+22.4	+9.2	–5.0
Томск	SPIDR	2000–2006	–8.4	+51.3	–15.9	–13.1
	Дамбольдт	2000–2006	–10.6	+32.3	–10.6	–12.1
	IWG	2000–2006	–	–	–2.3	–12.3
о-в Уоллопс	SPIDR	2000–2010	–13.7	–39.0	–23.1	–35.1
	медианы + IWG + SPIDR	2000–2010	–35.3	–74.1	–52.8	–24.9
	медианы + SPIDR	2000–2010	–35.8	–111.6	–17.1	–39.6
Ташкент	SPIDR	2000–2006	–14.0	–31.8	–6.4	–61.3
	IWG	2000–2006	–	–	–1.7	–31.3
Норфолк	Дамбольдт	2000–2009	–1.5	–5.0	–3.0	–6.9
Грехемстоун	SPIDR	2000–2006	–16.0	–15.6	–14.9	–8.8
Хобарт	SPIDR	2000–2010	–18.4	+9.1	+5.6	+3.9
Поинт Аргуэлло	IWG + SPIDR	2000–2008	–29.8	–84.7	+10.7	–10.3

менением системы горизонтальных ветров, но и изменением фотохимических параметров, вызванных охлаждением и оседанием термосферы. В противном случае величины k для момента ss+2 должны были быть заметно больше по абсолютной величине, чем тренды для дневного времени. Вывод об изменении фотохимических параметров был получен и в первой части работы [Данилов и Константинова, 2013] на основании анализа трендов $foF2$.

Что же касается сезонного различия в величинах k , то следует отметить, что все четыре аномально высоких величины k ($k < -5$ км/год) в табл. 2 приходится на летний период. Это и определяет полученную разницу в k для зимы и лета в табл. 3. Насколько эта разница отражает реальное сезонное различие, сказать трудно.

Переходим теперь ко второму методу оценки трендов $hmF2$. Прежде всего, вернемся к рис. 1. Напомним, что точки и аппроксимирующая их кривая относятся к периоду до 1979 г. Мы считаем, что в то время еще не было заметных ионосферных трендов и поэтому полученную зависимость можно считать своего рода эталоном.

Крестами на рис. 1 показаны величины для тех же ситуаций и тех же величин $F10.7$ но для 11-летнего периода с 2000 по 2010 г. (если данные кончатся раньше, показаны точки с 2000 г. до конца имеющихся данных). Видно, что во всех приме-

рах, приведенных на рис. 1, кресты лежат систематически ниже аппроксимирующей кривой. Это как раз и является иллюстрацией наличия отрицательного тренда согласно методу два.

Подчеркнем, что при таком сравнении не делается никаких предположений, кроме одного – зависимость ионизирующей радиации Солнца от индекса солнечной активности $F10.7$ осталась неизменной. Предполагать обратное нет никаких оснований. Разница между кривыми на рис. 1 и каждым из крестов дает ту самую величину $\Delta hmF2$, которую мы усредняем и наносим на рисунки 2–5 как функцию времени.

Рисунок 1 дает лишь примеры с хорошо выраженным эффектом более низких значений $hmF2$ в более поздний период. Величины $\Delta hmF2$, усредненные за период после 2000 г. для каждой станции и каждой ситуации, приведена в табл. 4. Видно, что в подавляющем большинстве случаев (60 ситуаций из 72) средние величины $\Delta hmF2$ отрицательны. Это означает, что между периодом 1958–1979 гг. и первым десятилетием нашего века величина $hmF2$ уменьшалась. Остальные 12 случаев соответствуют положительному тренду $hmF2$ до начала анализируемого периода. Однако, как мы уже говорили выше, положительные по абсолютной величине значения $\Delta hmF2$ еще не означают отсутствие отрицательного тренда в рассматриваемый период. Для ряда ситуаций, например, для ст. Москва (см. рисунки 5а и 5б) сглаженные

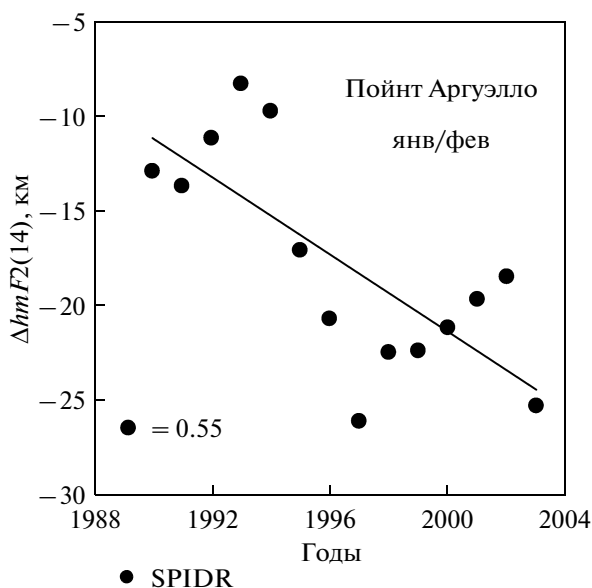


Рис. 6. Изменения сглаженных величин $\Delta hmF2$ от времени для ст. Пойнт Аргуэлло для 14JF.

значения $\Delta hmF2$ лежат в области положительных величин (что говорит о том, что между периодом до 1980 г. и анализируемым периодом величина $hmF2$ возрастала), однако после 1993–1995 гг. наблюдается хорошо выраженный отрицательный тренд.

Разброс величин $\Delta hmF2$ в табл. 4 достаточно велик — от -118.6 км до $+26.8$ км. Однако, эти величины представляют собой экстремальные значения. Формальное усреднение указанных величин дает -27.8 ± 24.9 км (56 случаев) для отрицательных изменений и $+15.6 \pm 12.7$ км (16 случаев) — для положительных изменений. Видно, что отрицательные величины $\Delta hmF2$ преобладают, что показывает, что после 1980 г. чаще происходило уменьшение высоты слоя $F2$, т.е. существовали отрицательные тренды $hmF2$. Получить оценки самих трендов из приведенных данных нельзя по двум причинам. Во-первых, статистическая значимость полученных усредненных величин $\Delta hmF2$ мала из-за большого разброса данных для разных станций и разных ситуаций. Во-вторых, не определен точно интервал лет, которому соответствуют указанные величины $\Delta hmF2$. Можно лишь говорить о том, что между периодом 1957–1979 гг. и периодом после 2000 г. величина $\Delta hmF2$ в среднем изменилась на столько-то. Если очень условно принять, что интервал Δt в среднем составил 30 лет, то указанная выше величина $\Delta hmF2$ дает отрицательный тренд порядка одного км в год и положительный тренд порядка 0.5 км в год. Полученная величина отрицательного тренда не противоречит величинам трендов, полученных для различных станций первым методом и приведенных в табл. 3.

Подчеркнем еще раз, что второй метод не призван дать сколь-нибудь точные оценки трендов $hmF2$. Он направлен на выяснение вопроса о том, как менялась величина $hmF2$ между контрольным интервалом 1958–1979 гг. и анализируемым интервалом после 2000 г. При этом его преимуществами являются наглядность (см. рис. 1) и отсутствие каких-либо промежуточных процедур — наблюдаемые при одних и тех же значениях $F10.7$ величины $hmF2$ непосредственно сравниваются между собой.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При определении трендов высоты ионосферного слоя $F2$, $hmF2$, возникают еще большие сложности с нахождением надежных данных измерений, чем трудности при определении трендов $foF2$, описанные в первой части работы. Тем не менее, для 10-ти станций удалось найти ряды данных, которые позволили определить тренды $hmF2$ для конца предыдущего и начала текущего века.

Средние (усредненные по 4-м ситуациям и имеющимся для каждой ситуации набором данных) величины трендов, приведенные в табл. 3, хотя и не обладают высокой статистической значимостью, тем не менее, позволяют сделать ряд заключений. Прежде всего, средние тренды для всех станций получены отрицательными. Это позволяет с уверенностью утверждать, что в рассматриваемый период происходило систематическое уменьшение высоты слоя $F2$, вызванное общим охлаждением и оседанием верхней атмосферы. Сами средние величины трендов для различных станций не сильно различаются между собой, что позволяет говорить о глобальном характере полученного уменьшения $hmF2$ на грани столетий.

Не удастся найти статистически значимой разницы между трендами для зимнего и летнего сезона. Что касается двух моментов местного времени, рассмотренных в работе, то здесь разница выражена более четко и статистически значима — средний отрицательный тренд в дневное время (1400 LT) выше, чем в момент через два часа после захода Солнца. Последнее обстоятельство говорит о том, что отрицательные тренды $hmF2$ в рассматриваемый период вызваны не только изменениями в термосферной динамике (горизонтальных ветрах), что должно было бы сказаться прежде всего на трендах $hmF2$ в период ss+2, но и оседанием термосферы, т.е. смещением вниз уровней плотности, на которых формируется максимум слоя $F2$, что должно сильнее чувствоваться именно в дневное время.

Важным выводом работы является то, что до начала анализируемого периода на некоторых станциях происходил рост $hmF2$ по сравнению с “контрольным” периодом 1957–1980 гг. Этот вы-

вод совпадает с результатами работ [Данилов и Ванина-Дарт, 2010] и Бремера [Bremer, 1998], согласно которым на разных станциях были получены как положительные, так и отрицательные тренды $hmF2$. Однако, как показывают результаты данной работы, с середины 90-х годов на всех проанализированных станциях доминирует отрицательный тренд $hmF2$. Авторам не известны работы по определению трендов параметров слоя F2 для конца прошлого — начала текущего века, поэтому невозможно провести сравнение полученных в данной работе результатов с результатами других авторов.

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 аэрономия. Т. 51. № 3. С. 325–332. 2011.
- Данилов А.Д. Долговременные тренды в верхней атмосфере и ионосфере (обзор) // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 52. № 3. С. 291–312. 2012.
- Данилов А.Д., Ванина-Дарт Л.Б. Разброс величин $hmF2$ как индикатор трендов термосферной динамики // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 49. № 1. С. 58–62. 2009.
- Данилов А.Д., Ванина-Дарт Л.Б. Поведение $foF2$ и $hmF2$ после захода Солнца // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 50. № 6. С. 825–832. 2010.
- Данилов А.Д., Константинова А.В. Поведение параметров ионосферного слоя F2 на грани веков. 1. Критическая частота // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 53. № 3. С. 2013.
- 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.
- 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.
- Donaldson J.K., Wellman T.J., Oliver W.L. Long-term change in thermospheric temperature above Saint Santin // J. Geophys. Res. V. 115. A11305. doi:10.1029/2010JA015346. 2010.
- Laštovička J. Global pattern of trends in the upper atmosphere and ionosphere: Recent progress // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 71. № 14–15. P. 1514–1528. 2009.
- 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.
- 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. P. 945–948. 1990.
- 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.
- 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.