

УДК 523.94+520.6

ОГРАНИЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПРОГНОЗА КРИТИЧЕСКИХ ЧАСТОТ СЛОЯ $F2$ ВСЛЕДСТВИЕ ВАРИАЦИЙ ПОТОКА КРАЙНЕГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА

© 2013 г. А. А. Нусинов, Т. В. Казачевская

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

e-mail: nusinov@mail.ru

Поступила в редакцию 25.07.2012 г.

После доработки 25.12.2012 г.

Рассмотрены ограничения точности прогноза критической частоты слоя $F2$ ионосферы, возникающие вследствие случайных вариаций крайнего ультрафиолетового излучения (КУФ) в течение месяца. Анализ δf – относительных значений месячных среднеквадратичных разбросов критических частот слоя $F2$ – и соответствующих им относительных значений месячных среднеквадратичных разбросов солнечного КУФ излучения – δu показал их зависимость от уровня солнечной активности. Сделан вывод, что при использовании прогностических моделей месячных медиан для диагностики или прогноза $foF2$ для конкретной даты ошибка вряд ли может быть менее $\sim 7\%$ при низкой солнечной активности и $\sim 15\%$ при высокой активности.

DOI: 10.7868/S0016794013030152

1. ВВЕДЕНИЕ

Появление систематических ежесуточных или более частых измерений ультрафиолетового излучения позволяет по-новому поставить вопрос о предельной точности прогноза при использовании моделей ионосферы. Известно, что ионизация на высотах слоя $F2$ ионосферы в основном определяется крайним ультрафиолетовым излучением (КУФ) в области 16–74 нм (см., например, [Иванов-Холодный и Никольский, 1969]). При формировании месячного прогноза ионосферы предполагается существование однозначной связи между состоянием ионосферы и уровнем солнечной активности. Обычно эта связь описывается с помощью “традиционных” индексов солнечной активности – числами пятен W или потоком радиоизлучения на волне 10.7, $F10.7$ (см, например, [Иванов-Холодный и Михайлов, 1980]).

В то же время ясно, что это предположение основано на статистических исследованиях и существование вариаций КУФ ото дня ко дню нарушает однозначность этой связи, приводя к дополнительной погрешности прогнозируемой величины. Эта погрешность особенно существенна в связи с тем, что очень часто суточные прогнозы или диагностика состояния ионосферы выполняются на основе прогнозов среднемесячных или медианных значений параметров ионосферы.

Целью данной работы является исследование погрешностей, возникающих при прогнозе околополуденных суточных значений критических

частот слоя $F2$ вследствие существования вариаций крайнего ультрафиолетового излучения ото дня ко дню.

2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Оценим эти погрешности, сопоставив относительные величины среднеквадратичных отклонений (δ) потоков ультрафиолетового излучения: δu и δf – критических частот слоя $F2$ от среднемесячных значений. Эти данные являются характеристикой разброса индивидуальных значений вариаций излучения в течение месяца. Относительные месячные величины среднеквадратичного отклонения δ вычислялись как отношение СКО (среднеквадратичного отклонения) измерений за данный месяц к среднемесячному значению потока.

Для оценок вариаций δu – КУФ излучения использовались данные измерений на ИСЗ SOHO потоков излучения в области 26–34 нм и данные измерений излучения линии HL_{α} ($\lambda = 121.6$ нм) со спутника SORCE (аппаратура SEM). Отметим, что в соответствии с различными модельными спектрами (например, [Бруевич и Нусинов, 1984; Woods et al., 2000]) поток квантов в области 26–34 нм составляет при среднем уровне солнечной активности примерно половину от потока в области 16–74 нм, ответственной за ионизацию в области F ионосферы, причем только на долю яркой линии He II $\lambda 30.4$ нм приходится $\sim 20\%$.

Исключались дни с резко выделяющимися значениями наблюдаемых потоков, выходящими

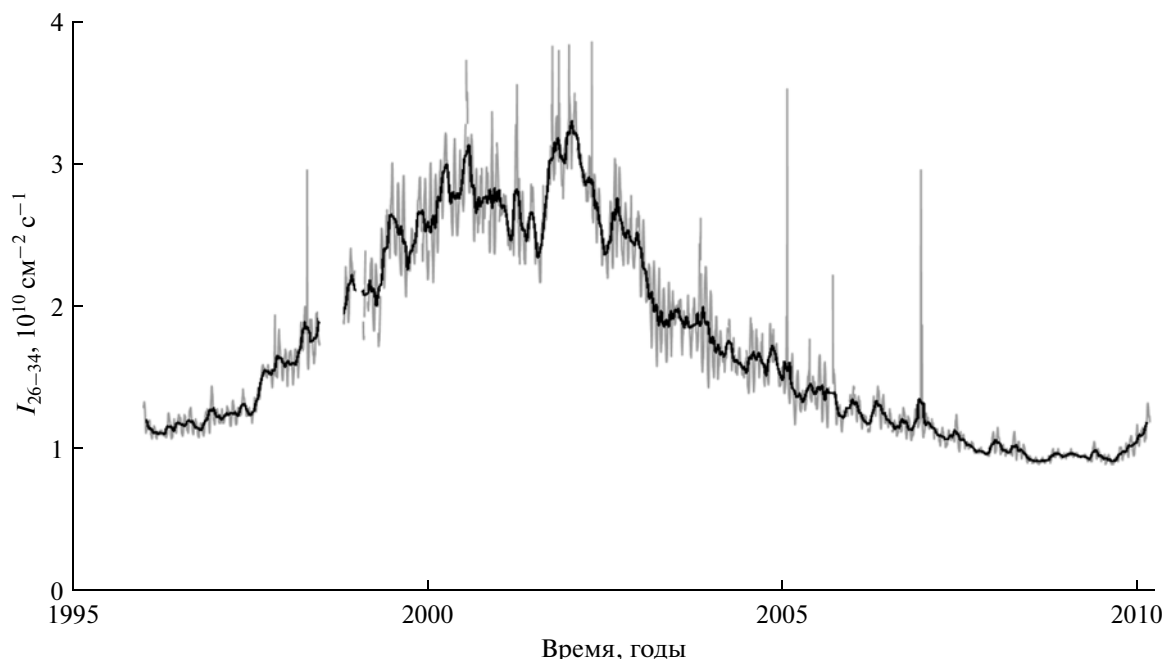


Рис. 1. Изменение КУФ излучения в цикле солнечной активности: от минимума-активности — начала 1996 г. до 2010 г. в спектральном диапазоне 26–34 нм по измерениям на спутнике SOHO. Серая линия — среднесуточные данные, черная линия — скользящее среднее с окном 31 сут.

за интервал 3 СКО (как правило, эти значения соответствовали солнечным вспышкам).

Ионосферные данные критической частоты $foF2$ и соответствующие значения δf были получены из Интернета (<http://www.ukssdc.ac.uk/>) для станций:

Чилтон (Слау) = (Chilton) за период 1996, 2001, 2003, 2005, 2007, 2008 гг.;

Рюген (Rugen) — за 2001, 2003 и 2005 гг.;

Рим (Rome) — 2001, 2003, 2005 гг.

Выбранные данные охватывают как периоды вблизи максимума 23-го цикла солнечной активности — 2001, 2003 гг., так и вблизи минимума — 1996, 2005, 2007 гг.

Исследовались только дневные значения критических частот (и δf), средние за 11, 12, 13 ч местного времени.

Критические частоты подвержены сильным сезонным вариациям, маскирующим эффекты вариаций КУФ излучения. Для устранения эффектов сезонных вариаций годового хода использована аппроксимация значений критических частот полиномом 3–6-ой степени, затем для каждого дня формировалась разность наблюдаемых значений $foF2$ и значений полинома, а затем для каждого месяца рассчитывалась относительная погрешность — δf для этих разностей.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Изменение КУФ излучения в 23-м цикле солнечной активности показано на рис. 1: от минимума — начала 1996 до 2007 г. — вблизи конца. По оси абсцисс отложено время, а по оси ординат — поток в спектральном диапазоне 26–34 нм по измерениям на спутнике SOHO.

Видно, что поток КУФ в течение цикла солнечной активности изменяется почти в 4 раза от минимума до максимума, причем на более коротких отрезках времени вариации могут достигать десятков процентов.

На рисунке 2 демонстрируется зависимость от индекса $F10.7$ (ось абсцисс) среднемесячных вариаций — $\delta(I_{26-34})$ излучения в спектральной полосе 26–34 нм по измерениям на спутнике SOHO в период 1996–2007 гг. (ось ординат).

Видно, что даже в минимуме активности (индекс $F10.7 \sim 70$ с.е.п.) наблюдаются большие вариации потока излучения.

Аналогично тому, как анализировались данные $\delta(I)$ за месяц, можно рассмотреть разброс индивидуальных значений от среднего за год потока КУФ, назовем их “среднегодовые величины δu_{γ} ”. Эти величины характеризуют вариации излучения в течение года. Среднегодовые относительные среднеквадратичные отклонения индивиду-

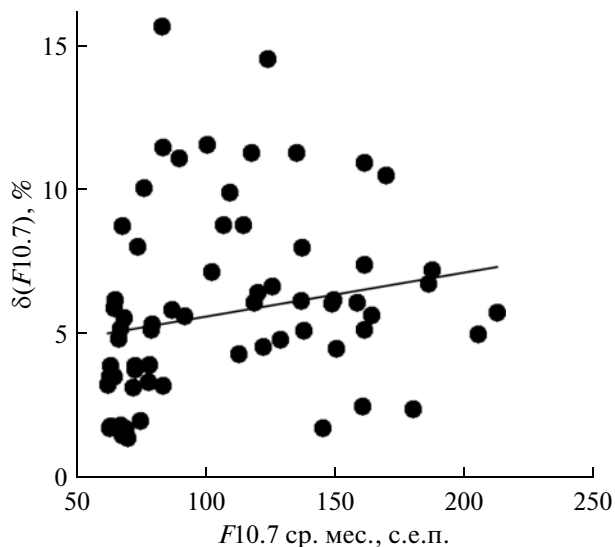


Рис. 2. Зависимость среднемесячных вариаций излучения в спектральной полосе 26–34 нм — Δi — от индекса радиоизлучения $F_{10.7}$ в 23-м цикле солнечной активности в период 1996–2007 гг. $F_{10.7}$ — в солнечных единицах потока, 1 с.е.п. = 10^{-22} Вт м $^{-2}$ Гц $^{-1}$.

альных значений от средней за год величины потока КУФ в диапазоне длин волн 26–34 нм по измерениям на SOHO величины $\delta(I_{26-34})$ для пе-

риода от максимума до минимума 23-го цикла солнечной активности приведены ниже.

Годы	Δi , %
2002	9.44
2003	11.35
2004	7.64
2005	9.79
2006	6.70
2007	6.89
2008	5.30
2009	5.08

Из этого ясно, что и в глубоком минимуме 23–24-го циклов активности 2006–2009 гг. разброс данных сравним с аналогичными месячными величинами и составляет не меньше, чем 5% измеряемой величины. Он увеличивается с ростом активности и достигает в максимуме активности значений 10–12%.

Результаты сопоставления относительного разброса $foF2 - \delta f$ за период 1996–2008 гг. и относительного разброса потоков КУФ излучения в полосе 26–34 нм — Δi приведены на рис. 3. для измерений на ионосферных станциях Чилтон, Рюген, Рим.

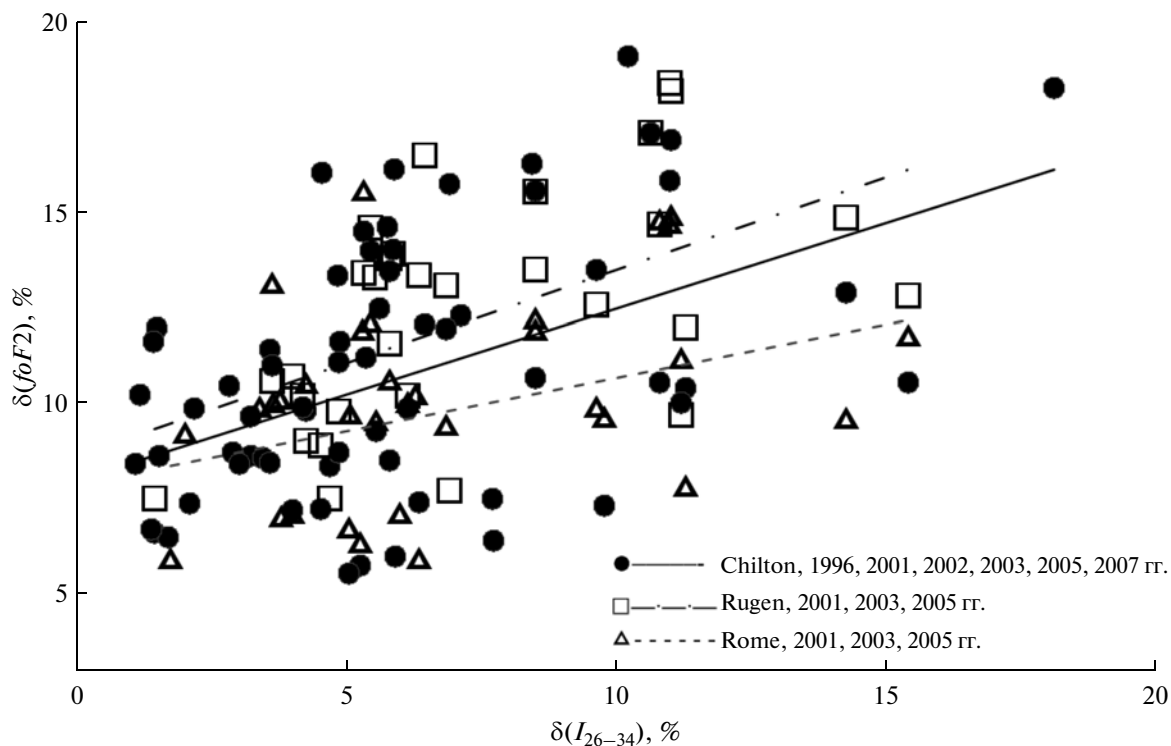


Рис. 3. Зависимость среднемесячной относительной погрешности δ критической частоты $foF2$ области F2 от относительных погрешностей измерений КУФ излучения в полосе 26–34 нм — Δi за период 1996–2008 гг. Символы для обозначения данных различных ионосферных станций указаны на рисунке.

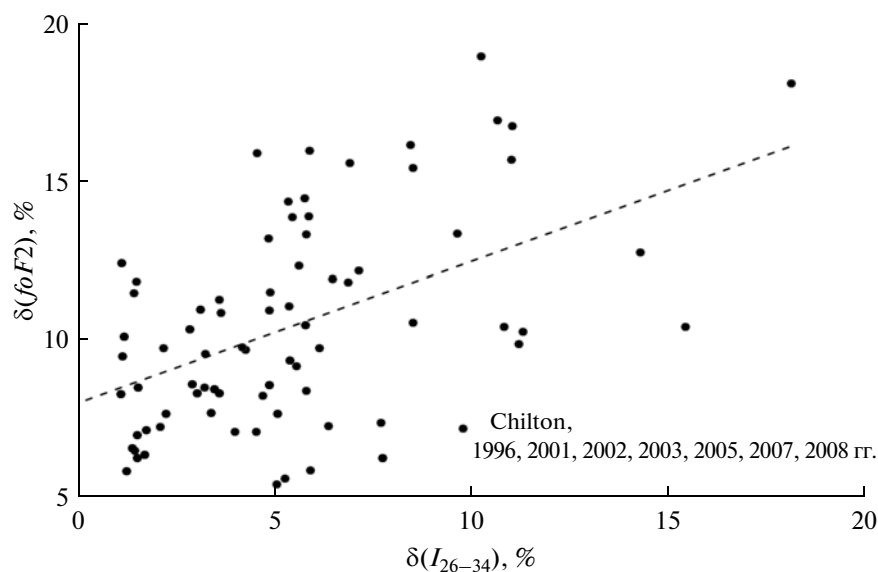


Рис. 4. Зависимость δf среднемесячных значений $foF2$ ионосферной ст. Чилтон за период 1996–2008 гг от $\delta(I_{26-34})$ – излучения в полосе 26–34 нм КУФ области по измерениям ИСЗ SOHO.

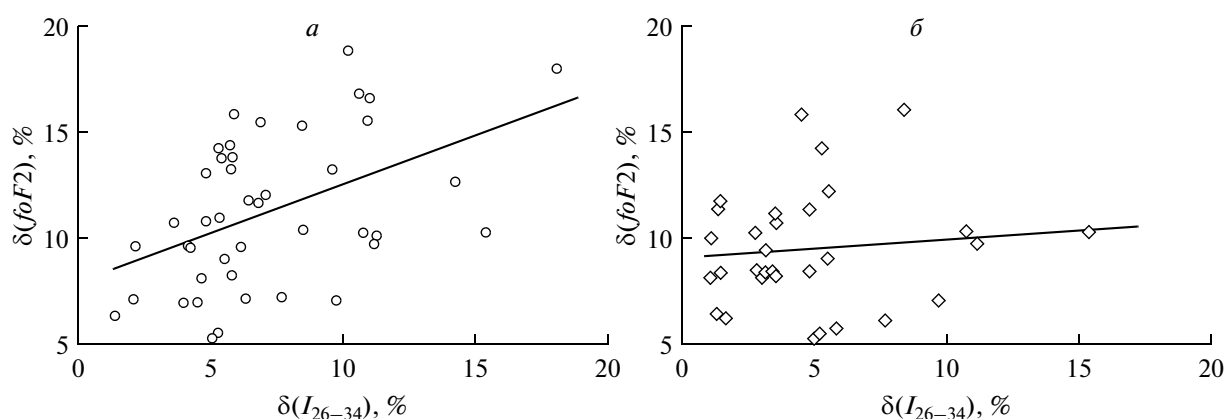


Рис. 5. Зависимость δf среднемесячных значений $foF2$ ионосферной станции Чилтон за период 1996–2008 гг. от $\delta(I_{26-34})$ – излучения в полосе 26–34 нм КУФ области по измерениям ИСЗ SOHO для максимума (а) и минимума (б) цикла солнечной активности.

Обсудим полученные результаты. Для всех станций наблюдается общая тенденция: увеличение δf величин $foF2$ с ростом δI излучения КУФ области. Большой разброс данных измерений на разных ионосферных станциях в совокупности с влиянием солнечной активности затрудняют анализ.

Рассмотрим отдельно результаты измерений на ионосферной ст. Чилтон за период 1996–2008 гг, т.е. почти за полный цикл солнечной активности. Эти данные показаны на рис. 4, где по оси абсцисс отложены значения $\delta(I_{26-34})$ излучения в полосе 26–34 нм КУФ области, а по оси ординат – δf значений $foF2$. Обозначения такие же, как и на рис. 3. Штриховой прямой на рисунке представлен результат линейного регрессионного анализа. Экстраполяция этой прямой к нулевому аргумен-

ту (т.е. отсутствию флуктуаций излучения) дает $\sim 8\%$, что, очевидно, соответствует вариациям ионосферы, не связанным с изменениями ионизирующего излучения ото дня ко дню.

На рисунке 5 демонстрируются те же данные, что и на рис. 4: отдельно для периодов максимума (а) и минимума (б) 23-го цикла солнечной активности.

Из рисунка видно, что полученная выше оценка неопределенности $foF2$, связанной с несолнечными причинами ($\sim 8\%$), верна как для низкой, так и для высокой активности, а неопределенность, связанная с флуктуациями солнечного излучения, зависит от солнечной активности.

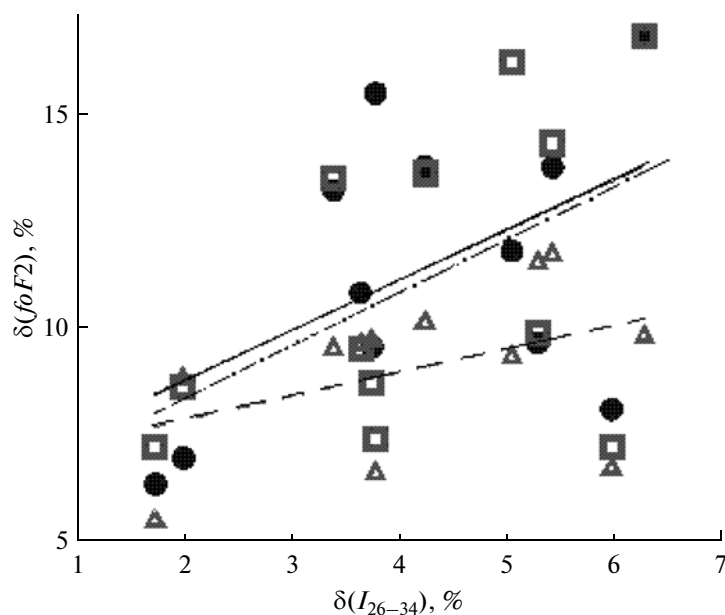


Рис. 6. Зависимость δf среднемесячных значений f_0F_2 от $\delta(I_{26-34})$ за 2001 г. вблизи максимума цикла по измерениям ионосферных станций Чилтон, Рюген и Рим. В среднем индекс $F_{10.7} = 181$ с.е.п.

Ионосферные станции: Чилтон — кружки и сплошная линия, Рюген — квадраты и штрихпунктирная линия, Рим — треугольники, штриховая линия.

Этот вывод верен и для других изученных ионосферных станций и для отдельно взятых уровней солнечной активности — высокого, среднего и низкого. Наблюдения на ионосферных станциях Рюген и Рим (рисунки 6 и 7) демонстрируют, что сохраняется та же тенденция изменения δf от δI , как и для ст. Чилтон. Из-за разброса данных и меньшего количества точек рисунок выглядит менее убедительно, но из них также можно сделать вывод, что величина погрешности, не связанная с флуктуациями солнечной активности также близка к 7–8%, а рост солнечной активности может привести к неопределенности до 15–17%.

Выше вариации ионосферы были рассмотрены в зависимости от потока в области 26–34 нм. Однако полученные результаты сохраняются и для других интервалов длин волн, например, для потока в линии 121.6 нм (L_α , линия водорода Лайман-альфа), являющаяся индикатором вариаций всего потока ультрафиолетового излучения [Nusinov and Katyushina, 1994]. Были обработаны данные спутника *SORCE*, на котором производились измерения излучения Солнца в линии HL_α . Были вычислены средние за месяц значения потока в линии и относительные средние отклонения δI . Использованы данные за период 1996–2009 г., т.е. за полный 23-й цикл солнечной активности. Результаты анализа, аналогичного проведенному выше, показывают, что вариации излучения в линии HL_α несколько меньше, чем в области 26–34 нм, однако, и для минимальных значений КУФ разброс данных δI не меньше 2–5% от измеряемой вели-

чины, и увеличивается до 10–11.5% в годы максимума активности.

4. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы работы сводятся к следующему

1. Относительный разброс (δ) ежесуточных значений f_0F_2 относительно среднемесячной величины для времени вблизи полудня зависит от уровня солнечной активности. При низком уровне он соответствует собственным шумам ионосферы и составляет ~7–8% от среднемесячного значения.

2. С повышением уровня солнечной активности к этим шумам добавляется разброс, связанный с вариациями ультрафиолетового излучения в течение месяца (еще до 8–10%).

3. В итоге при использовании прогностических моделей месячных медиан для диагностики или прогноза f_0F_2 для конкретной даты ошибка вряд ли может быть менее ~7% при низкой солнечной активности и ~15% — при высокой активности.

Указанные значения соответствуют принципиальным ограничениям на точность прогнозирования или оценок параметров ионосферы при использовании месячных моделей. Попытка увеличить точность прогнозирования привела к возникновению новых индексов активности, осно-

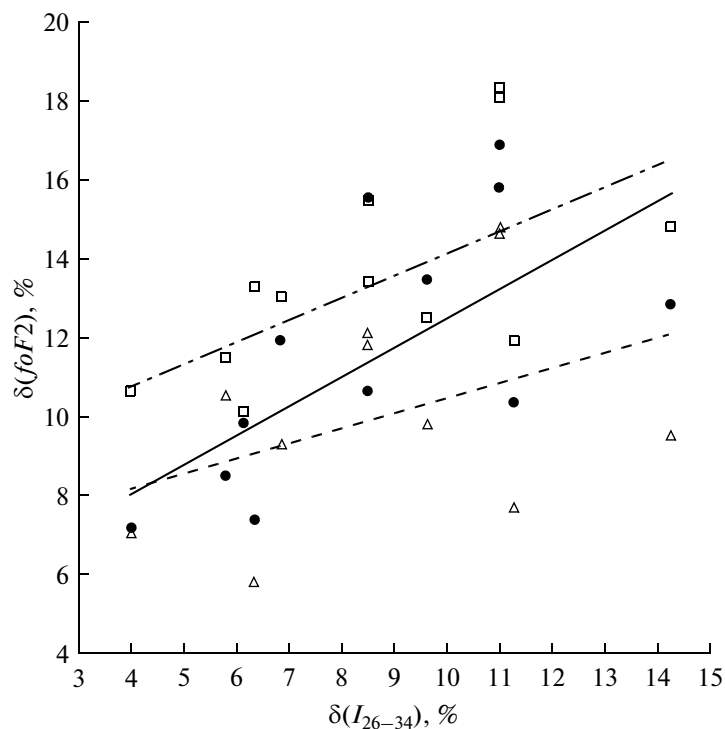


Рис. 7. Зависимость между f среднемесячными значениями $foF2$ и δI по измерениям ионосферных станций Чилтон, Рюген и Рим за 2003 год — средний уровень активности $F10.7 = 111$ с.е.п.

Ионосферные станции: Чилтон — кружки и сплошная линия; Рим — треугольники и штриховая линия; Рюген — квадраты и штрихпунктирная линия.

ванных на ионосферных измерениях (например, [Михайлов и др., 1990]).

Это направление может быть полезно, но более вероятно, что повышение точности моделей принципиально возможно только при использовании ежесуточных данных мониторинга крайнего ультрафиолетового излучения Солнца. Такое предложение высказывалось достаточно давно (например, в работе [Lakshmi et al., 1988]) в связи с появлением регулярных длительных измерений КУФ и до сих пор ожидает своей реализации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бруевич Е.А., Нусинов А.А. Спектр коротковолнового излучения для аэрономических расчетов при различных уровнях солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 24. № 4. С. 581–585. 1984.
- Иванов-Холодный Г.С., Никольский Г.М. Солнце и ионосфера (коротковолновое излучение Солнца и его воздействие на ионосферу). М.: Наука, 480 с. 1969.
- Иванов-Холодный Г.С., Михайлов А.В. Прогнозирование состояния ионосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 190 с. 1980.
- Михайлов А.В., Терехин Ю.Л., Михайлов В.В. Региональный эффективный индекс солнечной активности для прогноза месячных медианных значений $foF2$. I. Построение и апробация // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 30. № 4. С. 624–630. 1990.
- Lakshmi D.R., Reddy B.M., Dabas R.S. On the possible use of recent EUV data for ionospheric predictions // J. Atmos. Terr. Phys. V 50. № 3. P. 207–213. 1988.
- Nusinov A.A., Katyushina V.V. Lyman alpha line intensity as a Solar activity index in the far ultraviolet range // Solar Phys. V. 152. № 1. P. 201–206. 1994.
- Woods, T.N., Tobiska W.K., Rottman G.J., Worden J.R. Improved solar Lyman alpha irradiance modeling from 1947 to 1999 based on UARS observations // J. Geophys. Res. V. 105. № A12. P. 27195–27215. 2000.