

УДК 550.388

ПОВЕДЕНИЕ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ $foF2$ В РАЗЛИЧНЫЕ МОМЕНТЫ СУТОК: 1. ЗАВИСИМОСТЬ ОТ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2011 г. А. Д. Данилов, А. В. Константинова

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

e-mail: adanilov99@mail.ru

Поступила в редакцию 06.07.2010 г.

Рассмотрено изменение с уровнем солнечной активности отношений критических частот слоя $F2$, $foF2$, для разных пар моментов местного времени $T1$ и $T2$ для двух сезонов (зимнего и летнего). Получено, что, как правило, ход $foF2(T1)/foF2(T2)$ с индексом солнечной активности $F10.7$ различен зимой и летом. Рассмотрено полученное из экспериментальных данных изменение $foF2(T1)/foF2(T2)$ с $F10.7$ с позиций современной теории образования слоя $F2$. Показано, что большинство наблюдаемых характеристик этого изменения объясняются в рамках указанной теории. Однако, обнаружены и особые случаи поведения $foF2(T1)/foF2(T2)$ с солнечной активностью, которые пока не находят своего физического объяснения.

1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие резко вырос интерес к проблеме долговременных трендов параметров верхней атмосферы. Эти тренды являются отражением общих изменений во всей толще атмосферы от тропосферы до термосферы, происходящих из-за увеличения количества парниковых газов. Уже сформулирована концепция охлаждения и оседания средней и верхней атмосферы [Laštovička, 1998; 2009], основанная на целом ряде взаимно согласующихся данных.

Исследовать долговременные изменения (тренды) параметров нейтрального газа верхней атмосферы достаточно сложно, поскольку основная информация об этих параметрах получена в результате относительно коротких (несколько лет) серий спутниковых экспериментов, которые практически невозможно сравнить из-за различия орбит, аппаратуры и прочих факторов. Как уже было неоднократно показано (см., например, [Данилов и Ванина-Дарт, 2010; Danilov, 2010]), данные вертикального зондирования на глобальной сети ионосферных станций дают богатый материал для исследования трендов ионосферных параметров и получения на их основе представлений о трендах параметров термосферы.

В частности, в серии работ одного из авторов [Danilov, 2008; 2009a, b] был проведен подробный анализ поведения отношения критических частот ионосферного слоя $F2$, $foF2$, взятых в ночные (02:00 LT) и дневные (14:00 LT) часы. Были обнаружены долговременные тренды этого отношения после примерно 1980 г. (условно названного “граничной датой”). При этом оказалось, что эти тренды отношения $foF2(02)/foF2(14)$ имеют разный

знак на разных станциях в зависимости от геомагнитного склонения D для данной станции. Это позволило сделать вывод о том, что тренды величины $foF2(02)/foF2(14)$ определяются трендами термосферных ветров (связанных с общим охлаждением и оседанием атмосферы, упомянутым выше) и, конкретно, с усилением зонального ветра к востоку.

В указанных выше работах важным шагом при выделении трендов было избавление от эффекта зависимости $foF2(02)/foF2(14)$ от солнечной активности. Для этого для периода до “граничной даты” (чтобы избежать возможного влияния тренда) строилась зависимость $foF2(02)/foF2(14)$ от индекса солнечной активности $F10.7$. Эта зависимость использовалась затем для устранения эффекта солнечной активности в данных для последующих лет, анализировавшихся для поиска трендов.

При проведении указанного анализа зависимости $foF2(02)/foF2(14)$ от солнечной активности были обнаружены интересные эффекты, которые были отмечены в работах [Danilov, 2008; 2009a, b], однако не обсуждались подробно из-за направленности указанных работ на поиск трендов величины $foF2(02)/foF2(14)$ в период после “граничной даты”.

В данной работе мы хотим вернуться к вопросу о зависимости $foF2(02)/foF2(14)$ от солнечной активности и провести аналогичный анализ для отношений критических частот, взятых для других моментов суток (будем обозначать их $T1$ и $T2$). При этом мы преследуем две цели. Во-первых, получить надежные зависимости отношений $foF2(T1)/foF2(T2)$ от солнечной активности для дальнейшего анализа возможных трендов $foF2(T1)/foF2(T2)$ после “граничной даты” и, во-вторых, уточнить картину физических процессов, контролирующих поведение

слоя $F2$ в разное время суток, и их связь с солнечной активностью.

2. ИСХОДНЫЕ ПОСЫЛКИ И ДАННЫЕ

Мы рассматриваем зависимость от солнечной активности отношений величины $foF2$ для двух моментов времени по двум причинам. Во-первых, известно, что относительные величины, как правило, более точны, чем абсолютные. Некоторые факторы, которые могут влиять на абсолютные величины (систематическая ошибка в измерении и обработке, наличие какого-то внешнего возмущения), могут исчезнуть или значительно уменьшиться при анализе относительных величин. Во-вторых, в разные моменты местного времени величина $foF2$ в различной мере контролируется различными физическими процессами (ионизация солнечным ультрафиолетовым излучением, вертикальный дрейф плазмы, потоки из плазмосферы и т.д., см ниже), поэтому мы можем сделать выводы о связи этих процессов с солнечной активностью с целью проверки и уточнения физической картины образования слоя $F2$.

Мы рассмотрим пять комбинаций моментов $T1$ и $T2$. В четырех случаях они разнесены на 12 часов с целью получения наибольшего контраста. В пятом случае одним из моментов является 14:00 LT, а второй момент привязан не к шкале местного времени, а к моменту захода Солнца: $T2 = T(\text{зах}) + 2 \text{ ч}$ (подробнее см. [Данилов и Ванина-Дарт, 2010]). В каждом случае (как будет подробно обсуждено ниже) величины $foF2$ в моменты $T1$ и $T2$ определяются разными процессами (или комбинацией процессов), поэтому и поведение $foF2(T1)/foF2(T2)$ с $F10.7$ имеет разный характер.

По аналогии с работами [Danilov, 2008; 2009a, b], а также с работами [Данилов и Ванина-Дарт, 2008a, б] по поиску трендов параметров слоя $F2$ мы в данной работе для каждого отношения $foF2(T1)/foF2(T2)$ брали среднее значение по всем дням за два периода: январь–февраль и июнь–июль. При этом вводились различные ограничения на геомагнитную активность: брались для усреднения только дни с Ap меньше 6, 16 и 30. В данной работе мы будем рассматривать только результаты, полученные для $Ap < 30$, т.е. для спокойных, или слабо возмущенных в геомагнитном отношении дней. Величины $foF2$ брались из банков ионосферных данных, приводимых в международных центрах данных в формате *iwg*. Для расчета средних величин $foF2(T1)/foF2(T2)$ для данного года, сезона и ограничения по Ap использовалась специально разработанная программа.

Анализ был проведен для 14-ти станций восточного полушария, которые наиболее часто используются для анализа поведения слоя $F2$. Эти станции перечислены в приводимых ниже таблицах. Станции расположены в интервале географических широт ϕ от 30 до 60°. Мы сознательно не рассматрива-

ли низкоширотные ($\phi < 30^\circ$) высокоширотные ($\phi > 60^\circ$) станции, поскольку и в высоких и в низких широтах на поведение $foF2$ могут влиять дополнительные процессы (высыпания энергичных частиц, электрические поля и др.), которые не учитываются в нашем анализе. Отметим, что рассматривались также две станции южного полушария (Канберра и Хобарт) для проверки получаемых по станциям северного полушария сезонных эффектов. Анализ для всех станций проводился (если были соответствующие данные) для интервала 1958–1979 г. Нижняя граница определяется началом регулярных наблюдений на станциях вертикального зондирования в период МГГ. Что же касается верхней границы, то, как указывалось выше, во временном ходе параметров слоя $F2$ после примерно 1980 г. наблюдаются систематические тренды. Чтобы избежать влияния этих трендов на искомую зависимость от солнечной активности, концом анализируемого временного интервала был выбран 1979 г. Ниже мы приведем и обсудим результаты, полученные для этих станций для различных комбинаций моментов $T1$ и $T2$.

Чтобы не загромождать текст многократным повторением одних и тех же ссылок, мы укажем здесь публикации, которые используются в статье при обсуждении полученного хода $foF2(T1)/foF2(T2)$ как источник представлений о физических процессах, определяющих поведение слоя $F2$ ионосферы: [Иванов-Холодный и Михайлов, 1980; Mikhailov and Perrone, 2010; Rishbeth, 1998; Rishbeth et al., 1995].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. 18:00 и 06:00 LT

Результаты анализа зависимости $foF2(18)/foF2(06)$ приведены в табл. 1. В таблице 1 (как и во всех последующих таблицах) для каждой станции для двух сезонов приводится словесное описание характера хода $foF2(T1)/foF2(T2)$ с $F10.7$ и коэффициент определенности R^2 , который позволяет оценить степень статистической значимости полученной зависимости по критерию Фишера. Станции во всех таблицах расположены в порядке убывания их географической широты, за исключением станций южного полушария, которые помещены в конце каждой таблицы. Таблица 1 показывает, что в зимний период (январь–февраль в северном полушарии) наблюдается хорошо выраженный рост $foF2(18)/foF2(06)$ с ростом $F10.7$. Величины R^2 лежат в основном в пределах 0.75–0.90, что обеспечивает статистическую значимость полученных зависимостей не менее 99%. Две станции южного полушария подтверждают эту тенденцию – для них хорошо выражен рост наблюдается для июня–июля ($R^2 = 0.85$ и 0.71). Примеры зависимости $foF2(18)/foF2(06)$ от $F10.7$ для зимнего периода для шести станций приведены на рис. 1. Точки на рис. 1 (как и на всех остальных

Таблица 1. Зависимость отношения $foF2(18)/foF2(06)$ от индекса солнечной активности $F10.7$

Станция	январь–февраль	R^2	июнь–июль	R^2
Ленинград	рост	0.45	разброс точек	0.40
Свердловск	рост	0.86	разброс точек	0.12
Томск	рост	0.86	разброс точек	0.26
Москва	рост	0.87	разброс точек	0.70
Юлиусру	рост	0.61	разброс точек	0.22
Иркутск	рост	0.89	падение	0.60
Доурбес	рост	0.76	падение	0.54
Ланнион	рост	0.46	падение	0.35
Пуатье	рост	0.78	падение	0.78
Рим	рост	0.72	падение	0.70
Ташкент	рост	0.80	падение	0.51
Ашхабад	рост	0.86	падение	0.68
Канберра	падение	0.51	рост	0.85
Хобарт	разброс точек	0.07	рост	0.71

рисунок) соответствуют экспериментальным данным, а кривые представляют собой аппроксимацию точек полиномом третьей степени.

Причины столь хорошо выраженного роста величины $foF2(18)/foF2(06)$ с ростом $F10.7$ заключаются, видимо, в следующем. В январе–феврале 18:00 LT приходится на момент через несколько часов после захода Солнца. В это время электронная концентрация в слое $F2$ представляет собой остаток дневной величины $NmF2$, который уменьшается в результате рекомбинации и может зависеть также от подъема слоя за счет вертикального дрейфа, индуцированного горизонтальными ветрами (подробнее см. ниже 3.5). Поскольку дневная ионизация, определяемая солнечным ультрафиолетовым излучением, прямо зависит от солнечной активности, а интенсивность ветров по крайней мере не ослабевает с ростом последней, мы вправе ожидать роста $foF2(18)$ с ростом $F10.7$. В то же время, момент $T2 = 06:00$ LT зимой приходится на конец ночи, когда слой $F2$ истощен и электронная концентрация достигла своего минимума (обычно порядка 10^5 см^{-3}), поддерживаемого слабыми потоками из плазмосферы. Таким образом, величина $foF2(06)$ должна слабо изменяться с солнечной активностью, а отношение $foF2(18)/foF2(06)$ должно зимой демонстрировать хорошо выраженный рост с $F10.7$, что и наблюдается в табл. 1 и на рис. 1.

Как видно из табл. 1, в летний период (июнь–июль в северном полушарии) картина не выглядит

столь же согласованной, как для зимнего периода. Для большинства станций наблюдается падение $foF2(18)/foF2(06)$ с ростом солнечной активности. На некоторых станциях это падение выражено достаточно хорошо и статистически значимо (Пуатье, $R^2 = 0.78$; Иркутск, $R^2 = 0.60$), на других станциях наблюдается разброс точек, и ход с $F10.7$ либо слабо выражен (Томск, $R^2 = 0.26$), либо отсутствует совсем (Москва, $R^2 = 0.03$).

В летний период оба момента ($T1$ и $T2$) приходятся на освещенный период суток. Обе величины электронной концентрации прямо зависят от $F10.7$. Однако зависимость в 18:00 LT несколько сильнее, поскольку еще сохраняются высокие полуденные величины $NmF2$, которые сильнее всего зависят от интенсивности солнечного ионизирующего излучения и, следовательно, от $F10.7$. В силу сказанного, в целом, в половине рассмотренных случаев летом наблюдается отсутствие зависимости $foF2(18)/foF2(06)$ от $F10.7$ (разброс точек), а в половине – слабое падение в основном с невысокими величинами R^2 .

3.2. 04:00 и 16:00 LT

Результаты анализа зависимости $foF2(04)/foF2(16)$ приведены в табл. 2. Как видно из этой таблицы, наиболее четкая картина наблюдается для января–февраля (зима в северном полушарии): на всех станциях $foF2(04)/foF2(16)$ растет с ростом солнечной активности. Соответствующие величины R^2 до-

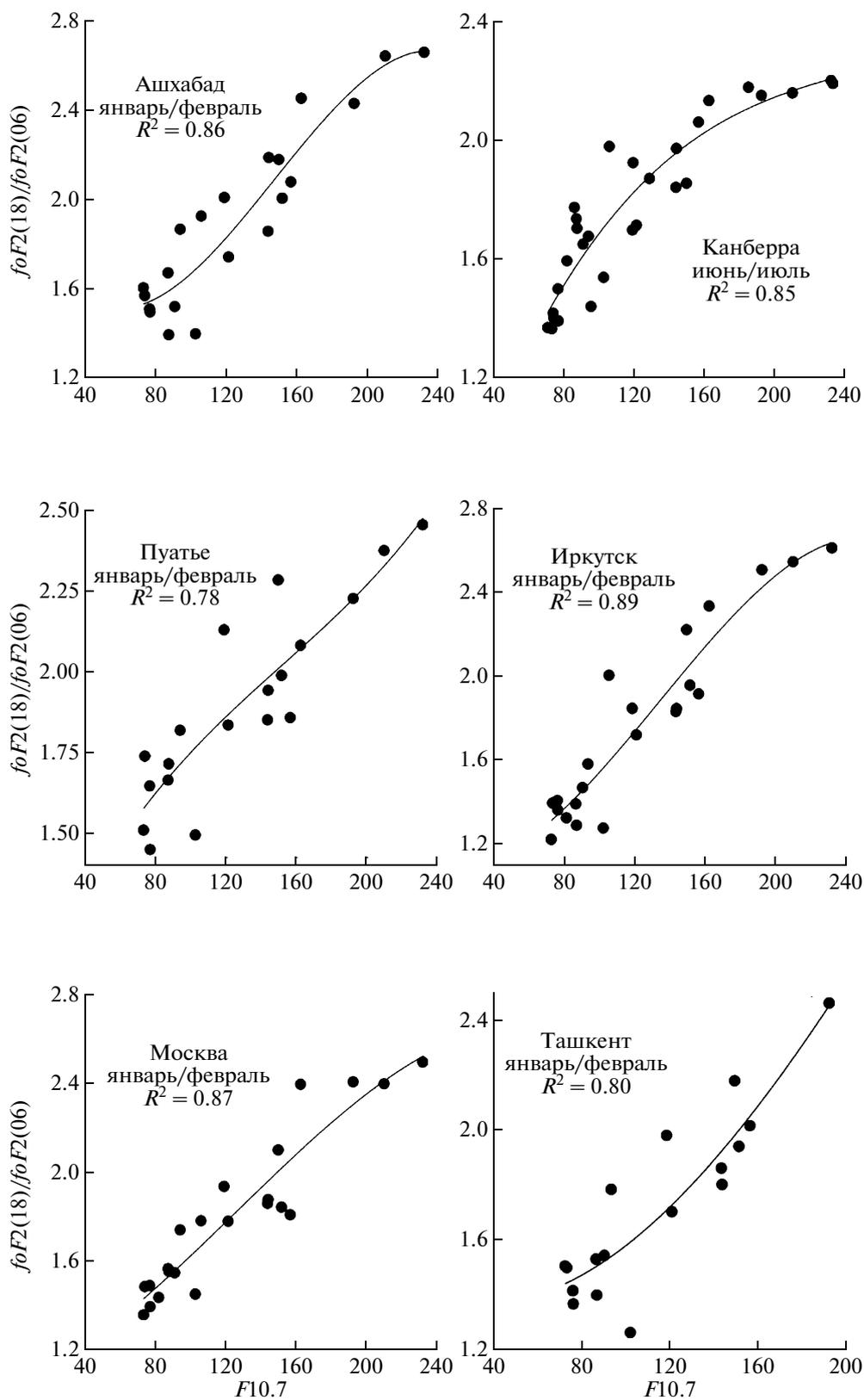


Рис. 1. Примеры зависимости $f_oF_2(18)/f_oF_2(06)$ от индекса солнечной активности $F_{10.7}$ для ряда станций для зимнего периода.

Таблица 2. Зависимость отношения $foF2(04)/foF2(16)$ от индекса солнечной активности $F10.7$

Станция	январь–февраль	R^2	июнь–июль	R^2
Ленинград	падение	0.64	рост	0.80
Свердловск	падение	0.74	рост	0.67
Томск	падение	0.89	рост	0.86
Москва	падение	0.74	рост	0.70
Юлиусру	падение	0.64	рост	0.80
Иркутск	падение	0.82	рост	0.76
Доурбес	падение	0.75	рост	0.82
Ланнион	падение	0.84	рост	0.85
Пуатье	падение	0.87	рост	0.88
Рим	падение	0.87	рост	0.96
Ташкент	падение	0.82	рост	0.89
Ашхабад	падение	0.83	рост	0.85
Канберра	рост	0.87	падение	0.85
Хобарт	рост	0.62	падение	0.74

статочны высоки (0.74–0.89) и обеспечивают высокую статистическую значимость получаемых зависимостей (>99%). Для станций южного полушария такая же картина наблюдается в местные зимние месяцы (июнь–июль). Примеры зависимостей $foF2(04)/foF2(16)$ от $F10.7$ для зимнего периода приведены на рис. 2.

Момент $T1 = 04:00$ LT приходится зимой на глубокую ночь примерно через час после максимума потоков из плазмосферы, которые поддерживают истощенную рекомбинацией ночную ионосферу зимой. Этот поток слегка усиливается с ростом солнечной активности. Электронная концентрация в 16:00 LT зимой близка к заходным условиям. Влияние ионизации солнечным ультрафиолетовым излучением (прямо зависящим от $F10.7$) все еще существует, хотя оно слабее, чем в околополуденные часы. Кроме того, на величину $NmF2$ оказывает воздействие уменьшение коэффициента рекомбинации β [Mikhailov and Perrone, 2010], которое усиливает эффект роста $NmF2$ с солнечной активностью. И, хотя $foF2$ в 04:00 LT тоже должна расти с ростом солнечной активности, рост $foF2$ в 16:00 LT оказывается сильнее, что и приводит зимой к общему падению $foF2(04)/foF2(16)$ с ростом $F10.7$. Таким образом, результаты анализа $foF2(04)/foF2(16)$ показывают, что рост потоков из плазмосферы слабее зависит от солнечной активности, чем суммарный эффект роста ультрафиолетового излучения и падения β .

Стоит обратить внимание на характерные загибы кривых на рис. 2 для ряда станций (Иркутск, Рим, Ашхабад) при высокой солнечной активности ($F10.7 > 180$). Эти загибы говорят о том, что существует своего рода эффект насыщения в росте $foF2(16)$ (такой эффект для летнего периода описан для ряда станций в работе [Mikhailov and Perrone, 2010]). Причина этого эффекта насыщения в зимний период пока неясна.

В летний период, как видно из табл. 2, наблюдается рост $foF2(04)/foF2(16)$ с ростом $F10.7$, причем величины R^2 достаточно высоки, в основном превосходя 0.8. Причину такой картины следует, видимо, искать в том, что момент $T2 = 04:00$ LT попадает на предвосходный пик электронной концентрации, который оказывается сильнее зависящим от солнечной активности, чем дневные летние значения $foF2(16)$. Действительно, модельные расчеты в работе [Rishbeth et al., 1995] показывают, что в момент восхода $NmF2$ меняется от минимума к максимуму солнечной активности достаточно сильно (от $1.2 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$ до $13 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$), тогда как дневные значения меняются гораздо слабее (от $3.5 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$ до $13 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$).

3.3. 22:00 и 10:00 LT

Результаты анализа зависимости $foF2(22)/foF2(10)$ от $F10.7$ приведены в табл. 3. Как следует из этой таблицы, в зимние месяцы наблюдается сложное (хотя и хорошо выраженное) изменение $foF2(22)/foF2(10)$,

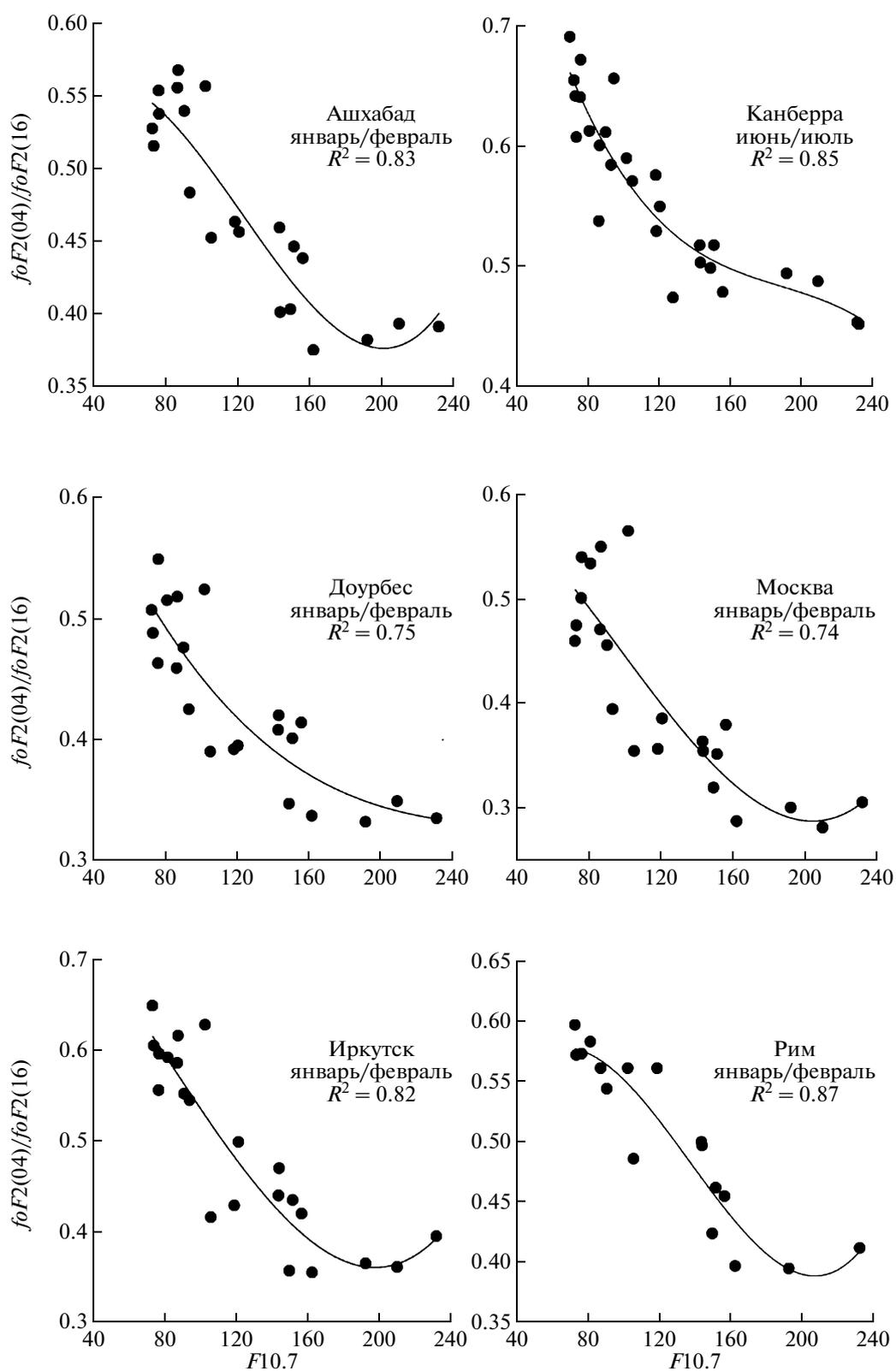


Рис. 2. То же, что на рис. 1, для $foF2(04)/foF2(16)$.

Таблица 3. Зависимость отношения $foF2(22)/foF2(10)$ от индекса солнечной активности $F10.7$

Станция	январь—февраль	R^2	июнь—июль	R^2
Ленинград	цепная линия	0.86	нет зависимости	0.42
Свердловск	цепная линия	0.76	падение	0.76
Томск	цепная линия	0.92	цепная линия	0.39
Москва	цепная линия	0.81	падение	0.65
Юлиусру	цепная линия	0.54	падение	0.30
Иркутск	цепная линия	0.72	падение	0.28
Доурбес	цепная линия	0.89	нет зависимости	0.04
Ланнион	падение	0.72	нет зависимости	0.03
Пуатье	цепная линия	0.84	нет зависимости	0.88
Рим	цепная линия	0.88	синусоида	0.52
Ташкент	цепная линия	0.79	синусоида	0.54
Ашхабад	цепная линия	0.85	падение	0.51
Канберра	рост	0.75	падение	0.92
Хобарт	рост	0.78	нет зависимости	0.51

которое носит характер цепной линии. Примеры зависимости $foF2(22)/foF2(10)$ от $F10.7$ для зимнего периода приведены на рис. 3. Как видно из рис. 3, рассматриваемое отношение при малых $F10.7$ падает с ростом солнечной активности, а после примерно $F10.7 = 120-160$ начинает расти.

Зимой момент $T1 = 22:00$ LT приходится на сугубо ночные условия, и электронная концентрация в это время определяется остатком (после рекомбинации) дневной ионизации. Момент $T2 = 10:00$ LT приходится на освещенный период суток и зависит вариациями с последней солнечной ультрафиолета. Видно, что на первом участке кривых (при малых $F10.7$) доминирует рост с солнечной активностью ультрафиолетового излучения. Величины $foF2(22)$ меняются слабо, так как рекомбинация, прошедшая за период после захода Солнца, “сглаживает” различия, которые могли быть в конце освещенного периода, приводя к относительно слабой зависимости $foF2(10)$ от $F10.7$.

Гораздо сложнее обстоит дело с областью больших (>120–160) значений $F10.7$. Авторам не известны публикации, в которых бы рассматривались механизмы, которые могут приводить к изменению зависимости $foF2(22)/foF2(10)$ на обратную при таких значениях $F10.7$. Поскольку рост дневных значений $NmF2$ с солнечной активностью не вызывает сомнений даже при высоких $F10.7$ (нет эффекта “насыщения”, характерного для летнего периода, см. [Mikhailov and Perrone, 2010]), остается предположить, что с еще большей скоростью растет величина $NmF2$ в 22:00 LT. Причины такого роста могут

быть связаны либо с сильным усилением ночных потоков из плазмосферы, либо с заметным уменьшением скорости потерь электронов из-за увеличения с $F10.7$ температуры в области F . Этот вопрос еще требует подробного модельного исследования. Но сам факт существования зависимости $foF2(22)/foF2(10)$ от $F10.7$ типа показанной на рис 3 представляется несомненным.

Летом, как следует из табл. 3, нет ярко выраженной картины изменения $foF2(22)/foF2(10)$ с солнечной активностью. Для ряда станций ее просто не удается выделить, в других случаях наблюдается как падение или волнообразное изменение с малой амплитудой (Ташкент, Ашхабад), так и рост (Канберра, Хобарт). При этом величины R^2 в целом существенно ниже, чем для зимнего периода. Видимо, такая картина поведения $foF2(22)/foF2(10)$ связана, с одной стороны, с упоминавшимся выше эффектом “насыщения”, при котором, начиная с некоторых значений $F10.7$, величина $foF2(10)$ почти перестает расти, а с другой стороны – с тем фактом, что момент 22:00 LT в летнее время отстоит очень недалеко от момента захода Солнца, а потому процесс уменьшения $NmF2$ за счет рекомбинации играет относительно незначительную роль.

3.4. 02:00 и 14:00 LT

Результаты анализа зависимости $foF2(02)/foF2(14)$ от $F10.7$ приведены в табл. 4. Эти данные были получены ранее автором [Данилов, 2007; Danilov, 2008; 2009a, b] при поисках долговременных трендов этого отношения. Однако, в указанных публикациях

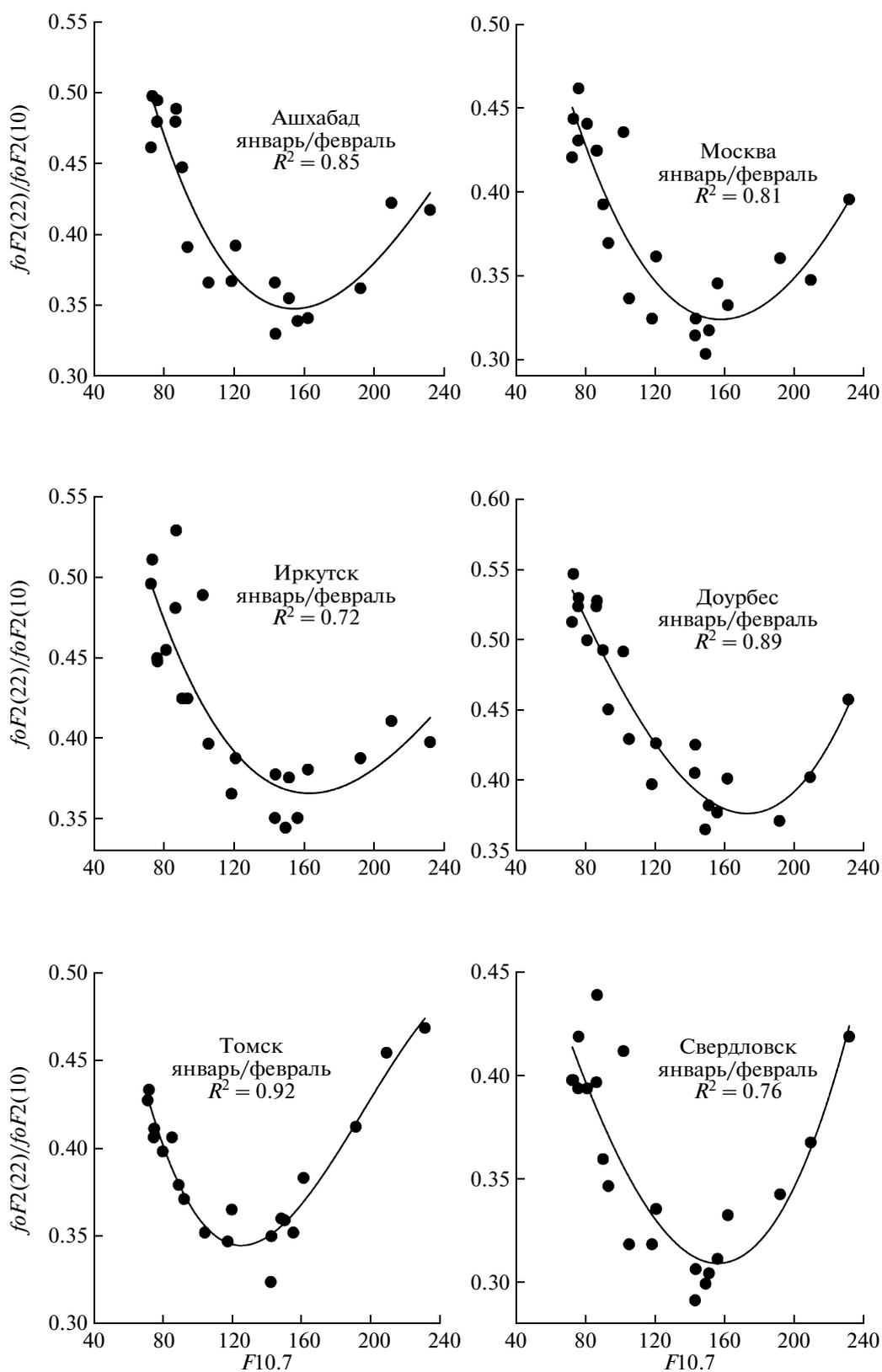


Рис. 3. То же, что на рис. 1, для $foF2(22)/foF2(10)$.

Таблица 4. Зависимость отношения $foF2(02)/foF2(14)$ от индекса солнечной активности $F10.7$

Станция	январь–февраль	R^2	июнь–июль	R^2
Ленинград	падение	0.86	рост	0.85
Свердловск	падение	0.78	рост	0.75
Томск	падение	0.87	рост	0.88
Москва	падение	0.79	рост	0.87
Юлиусру	падение	0.83	рост	0.74
Иркутск	падение	0.90	рост	0.88
Доурбес	падение	0.83	рост	0.86
Ланнион	падение	0.77	рост	0.90
Пуатье	падение	0.80	рост	0.90
Рим	падение	0.94	рост	0.87
Ташкент	падение	0.85	рост	0.85
Ашхабад	падение	0.86	рост	0.77
Канберра	рост	0.75	падение	0.91
Хобарт	рост	0.77	падение	0.76

зависимость от $F10.7$ служила лишь для избавления исходных данных от эффектов солнечной активности при анализе данных за последующие десятилетия. В этих работах отмечался лишь факт, что зависимость $foF2(02)/foF2(14)$ от $F10.7$ носит противоположный характер в зимний и летний периоды.

Таблица 4 подтверждает последнее утверждение: на всех рассмотренных станциях наблюдается падение $foF2(02)/foF2(14)$ с ростом $F10.7$ зимой и рост — летом. Картина, как и в других рассматриваемых случаях, остается справедливой и для двух станций южного полушария при учете соответствующего изменения зимних и летних месяцев по сравнению с северным полушарием.

Картина, наблюдаемая зимой, представляется вполне понятной. Сильный рост ультрафиолетового излучения и концентрации атомного кислорода с ростом солнечной активности приводит к сильному (и без эффекта “насыщения”, см. выше) росту дневных значений $NmF2$. Этот рост превалирует над ростом $NmF2$ в 02:00 LT и приводит к хорошо выраженному падению $foF2(02)/foF2(14)$ при увеличении $F10.7$ (величины R^2 лежат в пределах 0.74–0.90, см. табл. 4).

Картину, наблюдаемую летом, понять сложнее. Величина $NmF2$ днем по-прежнему растет с ростом солнечной активности, хотя амплитуда этого роста от максимума к минимуму существенно меньше, чем зимой и, как мы уже отмечали, наблюдается эффект “насыщения” при достаточно высоких $F10.7$.

Однако экспериментальные данные дружно указывают на рост отношения $foF2(02)/foF2(14)$ с ростом $F10.7$, причем величины R^2 также очень высоки (0.76–0.91), что обеспечивает статистическую значимость получаемых зависимостей на уровне, превосходящем 99%.

Единственное объяснение наблюдаемому факту может лежать в том, что величина $NmF2$ в 02:00 LT растет с солнечной активностью быстрее, чем дневная электронная концентрация, которая увеличивается за счет увеличения потока ультрафиолета и [O].

Полученный результат для $foF2(02)/foF2(14)$ можно сравнить с анализом изменений $NmF2$ в работе [Rishbeth et al., 1995], основанном на моделях SUPIM и MSIS, а также модели термосферных ветров HWM90. Согласно расчетам, приведенным в работе [Rishbeth et al., 1995] с учетом нейтральных ветров, летом, при переходе от низкой активности к высокой, величина $NmF2(02)/NmF2(12)$ (в работе нет данных для 14:00 LT, однако они должны быть близки к данным для 12:00 LT), действительно, растет от 0.37 до 1.1. Учитывая, что $NmF2$ пропорциональна $(foF2)^2$, мы получаем, что согласно работе [Rishbeth et al., 1995] величина $foF2(02)$ должна возрасти от минимума активности к максимуму в 1.7 раза. Как видно из рис. 4, это несколько больше, чем реальное изменение $foF2(02)/foF2(14)$ в 1.1–1.3 раза от $F10.7 = 70$ до $F10.7 = 230$. Приведенные в той же работе [Rishbeth et al., 1995] расчеты без учета нейтральных ветров дают изменение $foF2(02)/foF2(12)$ от

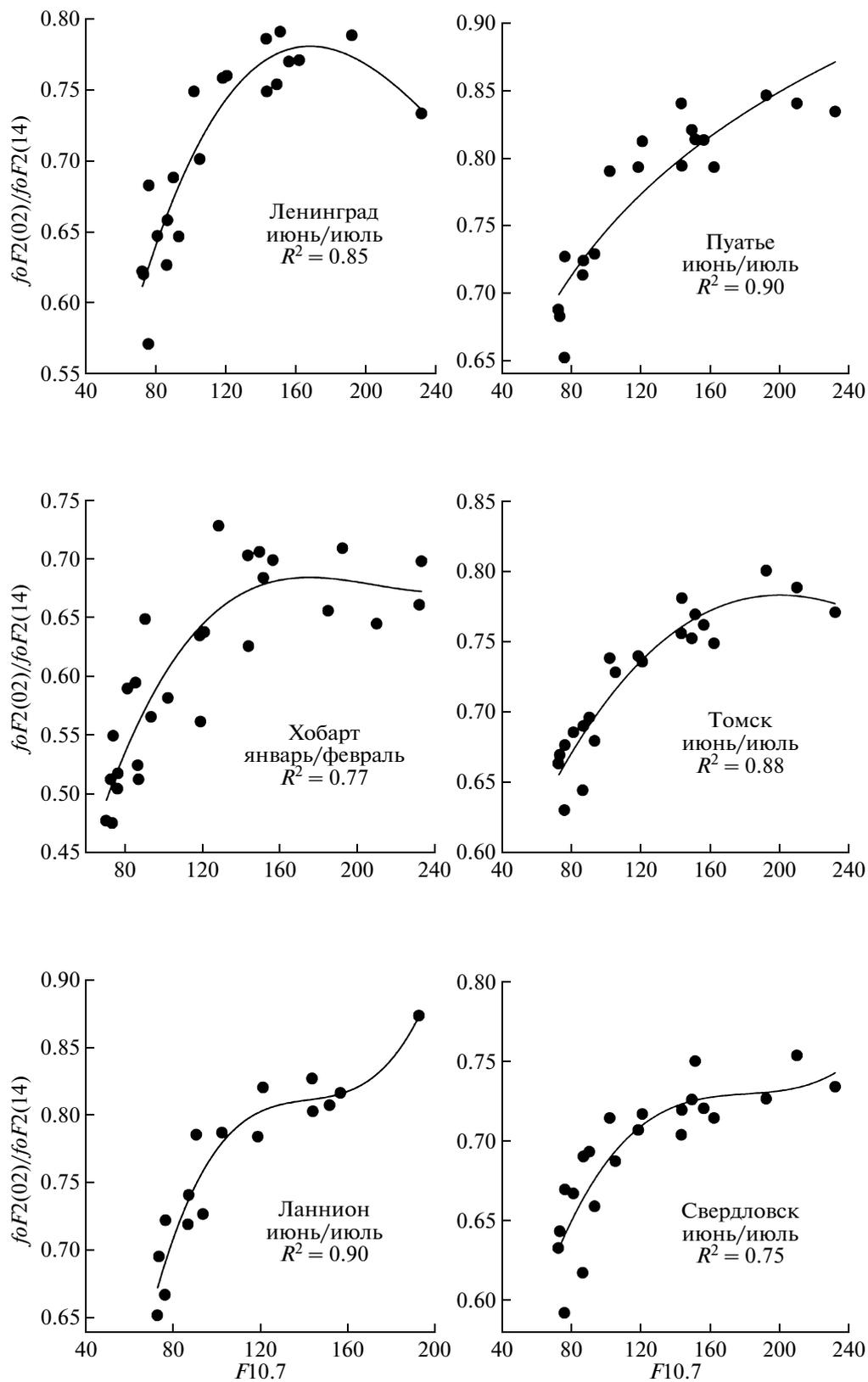


Рис. 4. То же, что на рис. 1, для $foF2(02)/foF2(14)$ для летнего периода.

Таблица 5. Зависимость отношения $foF2(\text{зах} + 2)/foF2(14)$ от индекса солнечной активности $F10.7$

Станция	январь–февраль	R^2	июнь–июль	R^2
Свердловск	рост	0.89	падение	0.81
Томск	рост	0.91	падение (разброс)	0.43
Москва	рост	0.84	падение (разброс)	0.39
Юлиусру	рост	0.47	падение	0.63
Иркутск	рост	0.90	падение	0.74
Доурбес	разброс точек	0.20	падение (разброс)	0.21
Пуатье	нет зависимости	0.21	падение	0.77
Рим	рост	0.56	падение	0.78
Ташкент	рост	0.72	падение	0.77
Ашхабад	рост	0.92	падение	0.91
Канберра	горб	0.24	рост	0.83
Хобарт	рост	0.45	падение	0.89

минимума к максимуму солнечной активности в 1.3 раза, что практически совпадает с экспериментальными данными на рис. 4. Это позволяет предположить, что эффект ветров, рассчитанный в работе [Rishbeth et al., 1995] на основании модели HWM90, значительно завышен.

Возвращаясь к вопросу о том, почему отношение $foF2(02)/foF2(14)$ зимой растет с ростом солнечной активности, мы отметим, что согласно работе [Rishbeth et al, 1995] увеличение $NmF2$ в 02:00 LT от низкой активности к высокой происходит за счет роста высоты слоя $F2$, $hmF2$. Даже без учета ветров эта высота составляет 271 км и 368 км в минимуме и максимуме активности, соответственно. Рост высоты связан с увеличением температуры с ростом солнечной активности. Увеличение $NmF2$ при этом происходит из-за того, что с ростом $hmF2$ слой $F2$ оказывается в области гораздо более медленной рекомбинации.

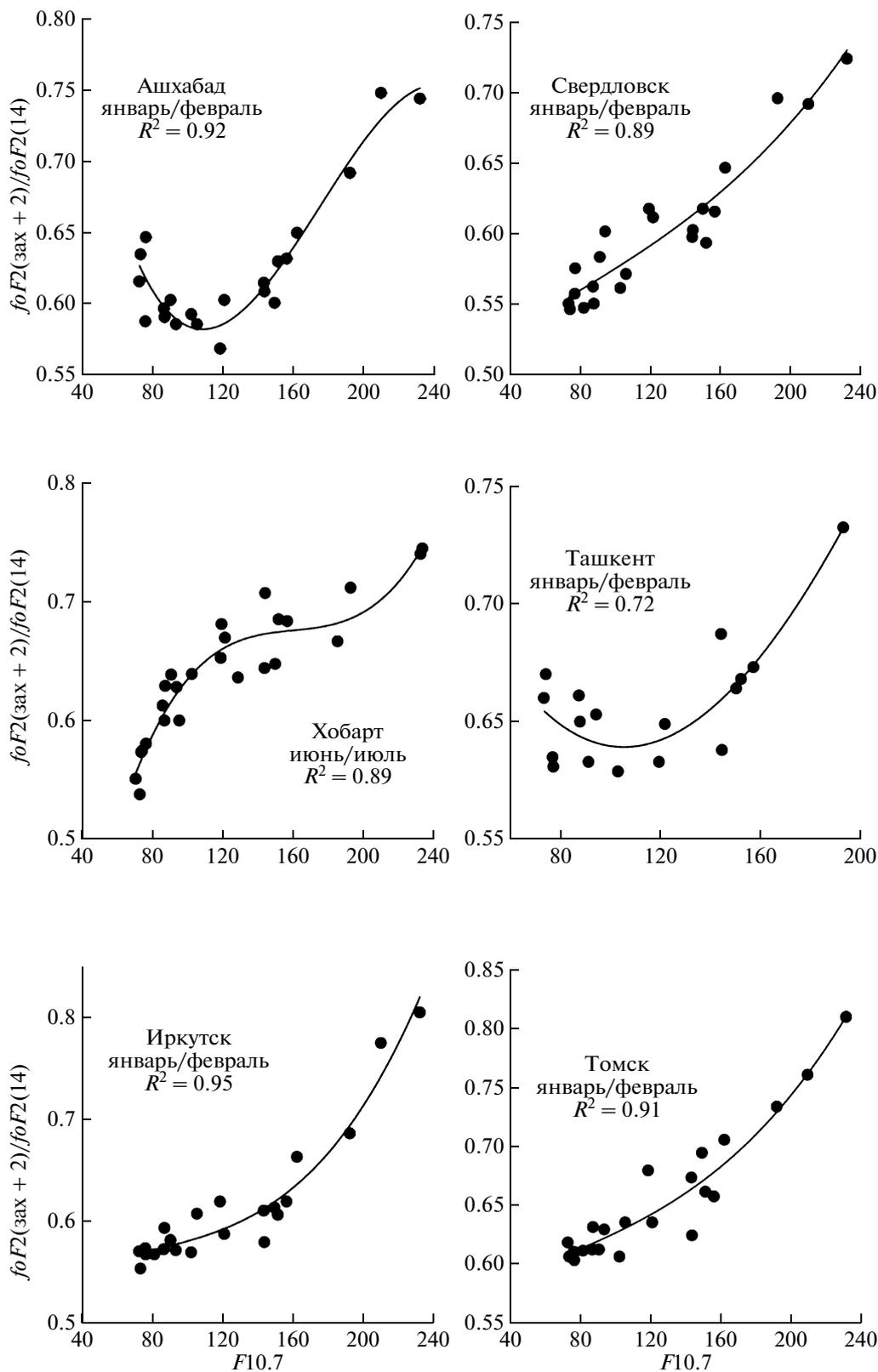
3.5. Послезакходный период и 14:00 LT

В работах [Данилов и Ванина-Дарт, 2008б; 2010] было рассмотрено отношение величин $foF2$ для двух моментов времени. Момент $T2$ был таким же, как и в предыдущем случае, и характеризовал дневные условия, а момент $T1$ отсчитывался от момента захода Солнца в данный день в данном пункте ($T1 = T(\text{зах}) + 2$ ч). Причины такого выбора момента $T1$ выходят за рамки данной статьи и подробно обсуждаются в указанных выше публикациях. Здесь мы, следуя логике предыдущих подразделов, приводим табл. 5, полностью аналогичную предыдущим таблицам, за исключением того, что в ней нет станций

Ленинград и Ланнион, не рассматривавшихся в работах [Данилов и Ванина-Дарт, 2008б; 2010].

Как видно из табл. 5, в зимний период в основном наблюдается рост величины $foF2(\text{зах} + 2)/foF2(14)$ с солнечной активностью, хотя картина и не так однородна, как в случае $foF2(02)/foF2(14)$. Для станции Дурбес разброс точек не позволяет прийти к определенным выводам, на станции Ташкент аппроксимирующая кривая носит характер цепной линии, аналогичный загиб при низких величинах $F10.7$ есть и у кривой на рисунке для Ашхабада. Все это говорит о достаточно сложном характере поведения $foF2(\text{зах} + 2)/foF2(14)$. Поскольку никаких особенностей в поведении $foF2(14)$ мы не ожидаем (это подтверждают и результаты, приведенные в 3.4), остается связать указанные эффекты с поведением $foF2(\text{зах} + 2)$. Согласно работе [Rishbeth, 1998] наиболее сильно вертикальный дрейф, вызванный горизонтальными ветрами, влияет на $hmF2$ (а следовательно, и на $NmF2$) в период через 1–2 ч после захода Солнца. Поэтому некоторую нестабильность в поведении $foF2(02)/foF2(14)$ следует, видимо, приписать нестабильности ветрового режима.

Поскольку картина поведения с солнечной активностью величины $foF2(\text{зах} + 2)/foF2(14)$ качественно противоположна картине поведения $foF2(02)/foF2(14)$ (см. выше 3.4), следует думать, что величина $foF2(\text{зах} + 2)$ зимой растет с ростом $F10.7$. Объяснить этот эффект каким-либо одним процессом, видимо, невозможно. Здесь действуют несколько факторов. Горизонтальные ветра, которые вызывают дрейф слоя $F2$ вверх (в область более медленной рекомбинации), растут с ростом солнечной активности. Растет и температура нейтрального газа Tn , которая зимой при $Tn < 1200$ К должна приво-

Рис. 5. То же, что на рис. 1, для $foF2(\text{зах} + 2)/foF2(14)$.

доть к слабому падению констант реакций, определяющих коэффициент рекомбинации β . В совокупности с падением концентраций нейтральных молекул это должно приводить к уменьшению β (согласно работе [Mikhailov and Perrone, 2010] величина β зимой падает от минимума к максимуму активности в 2.23 раза) и, следовательно, к росту $NmF2(\text{зах} + 2)$. Таким образом, в целом рост $foF2(\text{зах} + 2)/foF2(14)$ с солнечной активностью зимой можно понять.

Летом в основном наблюдается падение $foF2(\text{зах} + 2)/foF2(14)$ с ростом солнечной активности. Это падение, видимо, объясняется ростом $foF2(14)$, тогда как высокие летние температуры при высокой активности совместно с увеличением $[N_2]$ должны приводить к слабому изменению β (в 1.07 раз согласно [Mikhailov and Perrone, 2010]). В этом случае величина $foF2(\text{зах} + 2)$ летом будет слабо зависеть от солнечной активности. Как и в случае зимних условий, картина вариаций $foF2(\text{зах} + 2)/foF2(14)$ с солнечной активностью далеко не так однородна, как соответствующие картины для других моментов $T1$ и $T2$, рассмотренные в 3.1–3.4.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ зависимости критических частот слоя $F2$, $foF2$, для разных моментов времени от солнечной активности показал, что как правило эта зависимость противоположна для летнего и зимнего сезонов. Справедливость этого утверждения подтверждается добавлением к анализируемому массиву среднеширотных станций северного полушария двух станций южного полушария. Во всех случаях картина, получаемая на двух указанных станциях, соответствует картине поведения $foF2(T1)/foF2(T2)$, наблюдаемой для северного полушария с соответствующей сменой зимних и летних месяцев.

Полученные зависимости $foF2(T1)/foF2(T2)$ от $F10.7$ обсуждаются в рамках существующей физической теории образования слоя $F2$. В большинстве случаев эти зависимости хорошо согласуются с теоретическими воззрениями, однако ряд наблюдаемых эффектов (“загибы” на кривых $foF2(04)/foF2(16)$ при высокой солнечной активности, расхождение хода наблюдаемых величин $foF2(02)/foF2(14)$ с моделью [Rishbeth et al., 1995] при учете в ней ветров) пока непонятны.

Наиболее интересным из полученных результатов следует, видимо, считать существование зависимости типа цепной линии для $foF2(22)/foF2(10)$. Авторам не известны публикации, в которых бы упоминалось существование такой зависимости. Нет пока и надежного объяснения полученного резуль-

тата с точки зрения физических процессов формирования слоя $F2$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Данилов А.Д. Временные и пространственные вариации отношения ночных и дневных величин критических частот слоя $F2$ // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 47. № 6. С. 751–760. 2007.
- Данилов А.Д., Ванина-Дарт Л.Б. Пространственные и временные вариации отношения $foF2(\text{ночь})/foF2(\text{день})$: уточнение ряда эффектов // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 48. № 2. С. 228–240. 2008а.
- Данилов А.Д., Ванина-Дарт Л.Б. Критические частоты $foF2$ как индикатор трендов термосферной динамики // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 48. № 6. С. 810–822. 2008б.
- Данилов А.Д., Ванина-Дарт Л.Б. Параметры ионосферного слоя $F2$ как источник информации о трендах динамики термосферы // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 50. № 2. С. 1–14. 2010.
- Иванов-Холодный Г.С., Михайлов А.В. Прогнозирование состояния ионосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1980.
- Danilov A.D. Time and spatial variations in the ratio of nighttime and daytime critical frequencies of the $F2$ layer // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 70. № 8–9. P. 1201–1212. 2008.
- Danilov A.D. Critical frequencies $foF2$ as an indicator of trends in thermospheric dynamics // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 71. № 13. P. 1430–1440. 2009а.
- Danilov A.D. Time and spatial variations of the $foF2(\text{night})/foF2(\text{day})$ values // Adv. Space Res. V. 43. № 11. P. 1786–1793. 2009б.
- Danilov A.D. Parameters of the ionospheric $F2$ layer as a source of information on trends in thermospheric dynamics // IAGA_Springer Book, 2010 (принята к публикации)
- Laštovička J., Akmaev R.A., Beig G. et al. Emerging pattern of global change in the upper atmosphere and ionosphere. // Ann. Geophysical. V. 26. № 5. P. 1255–1268. 2008.
- Laštovička J. Long-term trends in the upper atmosphere – recent progress, Paper presented at the 11th Assembly of the International Association of Geomagnetism and Aeronomy (Sopron, Hungary, 23–30 August 2009).
- Mikhailov A.V., Perrone L. Prestorm $NmF2$ enhancements at middle latitudes: delusion or reality? // Ann. Geophysical. V. 27. № 3. P. 1321–1330. 2009.
- Rishbeth H. How the thermospheric circulation affects the ionospheric $F2$ layer. // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 60. P. 1385–1402. 1998.
- Rishbeth H., Jenkins B, Moffett R.J. The F -layer at sunrise // Ann. Geophysical. V. 13. P. 367–374. 1995.