

**ЗАВИСИМОСТЬ МЕДИАНЫ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ F2-СЛОЯ
НА СРЕДНИХ ШИРОТАХ ОТ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ****DEPENDENCE OF THE F2-LAYER CRITICAL FREQUENCY MEDIAN
AT MIDLATITUDES ON GEOMAGNETIC ACTIVITY****М.Г. Деминов***Институт земного магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,
Москва, Троицк, Россия, deminov@izmiran.ru***Г.Ф. Деминова***Институт земного магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,
Москва, Троицк, Россия, deminova@izmiran.ru***В.Х. Депуев***Институт земного магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,
Москва, Троицк, Россия, depuev@izmiran.ru***А.Х. Депуева***Институт земного магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,
Москва, Троицк, Россия, depueva@izmiran.ru***M.G. Deminov***Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere,
and Radio Wave Propagation RAS,
Moscow, Troitsk, Russia, deminov@izmiran.ru***G.F. Deminova***Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere,
and Radio Wave Propagation RAS,
Moscow, Troitsk, Russia, deminova@izmiran.ru***V.Kh. Depuev***Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere,
and Radio Wave Propagation, RAS,
Moscow, Troitsk, Russia, depuev@izmiran.ru***A.Kh. Depueva***Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere,
and Radio Wave Propagation RAS,
Moscow, Troitsk, Russia, depueva@izmiran.ru*

Аннотация. Предложена методика выделения вклада геомагнитной активности в медиану критической частоты F2-слоя $foF2_{med}$ на средних широтах. Она основана на анализе этого вклада для $\delta foF2$ — отношения $foF2_{med}/foF2_q$ в процентах, где $foF2_q$ — критическая частота F2-слоя для спокойных условий. Величины $foF2_q$ и $\delta foF2$ зависят от солнечной и геомагнитной активности соответственно. Эти зависимости учтены с помощью приближенных индексов F_{12} (среднего за 12 месяцев потока солнечного радиоизлучения на длине волны 10.7 см) и Ap_m (среднего за месяц значения Ap -индекса геомагнитной активности), что обеспечивает возможность использования данной методики для прогноза $foF2_{med}$. На основе этой методики по данным ст. Слау (51.5° N, 0.6° W) для полудня и полуночи за 1954–1995 гг. установлено, что для полуночи зависимость $\delta foF2$ от Ap_m значима (при доверительном уровне 95 %) в равноденствия и летом. Для полудня эта зависимость менее отчетлива и значима с апреля по июль. В равноденствия и летом увеличение Ap_m приводит к уменьшению $\delta foF2$. Для полуночи эта закономерность более отчетлива, чем для полудня. Данная закономерность сохраняется и для средних за год значений Ap_m и $\delta foF2$.

Ключевые слова: среднеширотная ионосфера, F2-слой, критическая частота, медиана, геомагнитная активность, закономерность.

Abstract. We put forward a method of separating the geomagnetic activity contribution to the F2-layer critical frequency median, $foF2_{med}$, at middle latitudes. It is based on the analysis of $\delta foF2$, which is the ratio $foF2_{med}/foF2_q$ in percent, where $foF2_q$ is the F2-layer critical frequency for quiet conditions. The quantities $foF2_q$ and $\delta foF2$ depend on solar and geomagnetic activity respectively. These dependences are taken into account using indices F_{12} (the average over 12 months flux of solar radiation at 10.7 cm) and Ap_m (the average over a month value of Ap -index), thus facilitating the use of this method for forecasting $foF2_{med}$. With this method, from Slough station (51.5° N, 0.6° W) data for midday and midnight for 1954 to 1995 we have found that at midnight the $\delta foF2$ dependence on Ap_m is significant at the 95 % confidence level for equinoxes and summer. For midday, this dependence is less pronounced and is significant only from April to July. At equinoxes and summer, an Ap_m increase causes a $\delta foF2$ decrease. For midnight, this feature is more pronounced than for midday. This regularity is valid also for annual average Ap_m and $\delta foF2$.

Keywords: midlatitude ionosphere, F2 layer, critical frequency, median, geomagnetic activity, regularity.

ВВЕДЕНИЕ

Считается, что медиана критической частоты слоя F2 за месяц $foF2_{med}$ является оптимальной характеристикой критической частоты F2-слоя для дол-

госрочного прогноза ионосферы [Zolesi, Cander, 2014]. Например, базовый вариант международной модели ионосферы IRI дает именно $foF2_{med}$ [Bilitza et al., 2014]. Зависимость $foF2_{med}$ от солнечной актив-

ности учтена во всех известных моделях ионосферы, включая IRI, с помощью индексов солнечной активности или эффективных ионосферных индексов. Эффективный ионосферный индекс определяется по экспериментальным значениям $foF2_{med}$ так, чтобы минимизировать ошибку $foF2_{med}$ при замене обычного индекса солнечной активности на ионосферный индекс [Liu et al., 1983; Saquana, 1990; Mikhailov, Mikhailov, 1995]. Во многих случаях такая замена позволяет увеличить точность прогноза $foF2_{med}$ для конкретной станции [Liu et al., 1983; Saquana, 1990; Mikhailov, Mikhailov, 1995]. Данное преимущество эффективного ионосферного индекса объясняют тем, что изменения $foF2_{med}$ с циклом солнечной активности зависят не только от уровня этой активности, но и от ряда других факторов, включая геомагнитную активность, которые неявно учтены в ионосферном индексе.

Явная зависимость $foF2_{med}$ от геомагнитной активности анализировалась только в нескольких работах и была основана на поиске зависимости $foF2_{med}$ от Ap_m — среднего за данный месяц [Sole, 1998] или Ap_{12} — среднего за 12 месяцев [Xu et al., 2008] значения Ap -индекса геомагнитной активности. Кроме того, зависимость от геомагнитной активности учитывалась при анализе долговременных изменений $foF2_{med}$ [Bremer, 1998; Laštovička et al., 2006; Mielich, Bremer, 2013]. В указанных работах предполагались линейные или нелинейные зависимости $foF2_{med}$ от индексов солнечной и геомагнитной активности.

Возможен и другой подход к оценке вклада геомагнитной активности в $foF2_{med}$. Он основан на анализе зависимости отношения $foF2_{med}/foF2_q$ от геомагнитной активности, где $foF2_q$ — критическая частота F2-слоя для спокойных условий, которая зависит от солнечной активности и не зависит от геомагнитной. Это позволяет приближенно считать, что отношение $foF2_{med}/foF2_q$ зависит только от геомагнитной активности для фиксированных месяца года и мирового времени. Аналогичный подход использовался для анализа эффектов геомагнитных бурь в относительных изменениях критической частоты F2-слоя или концентрации максимума этого слоя [Pietrella, Perrone, 2008; Pietrella, 2012; Деминов и др., 2015].

Главной целью настоящей работы были первые оценки возможности использования такого подхода для выделения вклада геомагнитной активности в $foF2_{med}$. При этом мы стремились сохранить прогностическую направленность $foF2_{med}$ через учет индексов солнечной и геомагнитной активности, для которых возможен долгосрочный прогноз. Ниже приведены результаты, полученные путем анализа данных ионосферной станции Слау (Slough, 51.5° N, 0.6° W) для местных полудня и полуночи за 1954–1995 гг. Последовательно представлены методика выделения вклада геомагнитной активности в $foF2_{med}$, результаты анализа этого вклада, обсуждение и основные выводы.

МЕТОДИКА

На первом этапе необходимо построить эмпирическую модель критической частоты F2-слоя для

спокойных условий — модель $foF2_q$. Эта модель представлена в виде уравнения

$$foF2_q = c_0 + c_1 F_{12} + c_2 F_{12}^2 \quad (1)$$

с набором коэффициентов c_j ($j=0, 1, 2$) для каждого часа мирового времени (UT) с дискретностью час и каждого месяца года ($M=1$ — январь, $M=12$ — декабрь), где F_{12} — среднее за двенадцать месяцев (центрированное на данный месяц) значение потока солнечного радиоизлучения на длине волны 10.7 см.

Коэффициенты c_j уравнения (1) для каждого фиксированного значения UT и M определяются по массиву данных $foF2$ (в нашем случае это часовые значения $foF2$, полученные на ст. Слау в 1954–1995 гг.), из которого исключаются данные, которые не удовлетворяют условию

$$ap(\tau) < 7, \quad (2)$$

где $ap(\tau)$ — средневзвешенное значение ap -индекса геомагнитной активности с характерным временем $T=14$ ч или $\tau = \exp(-3/T) \approx 0.8$ [Wrenn, 1987]:

$$ap(\tau) = (1-\tau)(ap_0 + ap_{-1}\tau + ap_{-2}\tau^2 + \dots), \quad (3)$$

ap_0, ap_{-1} и т. д. — значения ap -индекса в данный, предыдущий и т. д. трехчасовые интервалы. Индексы ap определены с интервалом 3 ч, и величина $\tau = \exp(-3/T)$ показывает, во сколько раз уменьшается вклад в $ap(\tau)$ предыдущего значения ap -индекса по сравнению с данным значением на таком трехчасовом интервале. Тем самым учтено, что ионосфера средних широт реагирует на изменение геомагнитной активности как слабо пропускающий фильтр, сглаживая отклик параметров ионосферы с характерным временем T , и отклик в каждый момент времени зависит от предыстории изменения геомагнитной активности.

Кроме индекса солнечной активности F_{12} , в задачах долгосрочного прогноза ионосферы используется индекс R_{12} — среднее за 12 месяцев (центрированное на данный месяц) относительное число солнечных пятен [Zolesi, Cander, 2014]. Индекс F_{12} точнее индекса R_{12} для построения медианы $foF2$ [Deminov, 2016]. Заметим, что для построения эмпирической модели $foF2_q$ использовались и более точные индексы солнечной активности, включая ежедневные значения потока радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см [Deminov et al., 2009]. В данном случае выбор индекса F_{12} связан с возможностью использования эмпирической модели (1) для долгосрочного прогноза $foF2_q$ на основе прогноза F_{12} .

Индекс $ap(\tau)$ и его аналоги использовались как индикаторы вклада геомагнитной активности в параметры термосферы [Picone et al., 2002] и $foF2$ [Wrenn, Rodger, 1989; Shubin, Anakuliev 1995; Fuller-Rowell et al., 2000; Kutiev, Muhtarov, 2001, 2003; Pietrella, Perrone, 2008; Pietrella, 2012; Deminov, Deminova, 2015; Деминов и др., 2015] в периоды геомагнитных бурь, но не суббурь [Deminov et al., 2013]. В указанных выше работах значения τ изменяются в пределах от 0.7 до 0.9, и принятое нами $\tau \approx 0.8$ соответствует среднему из этих значений. Критерий (2) для спокойной ионосферы аналогичен приведенным в работах [Pietrella, Perrone, 2008; Deminov et al., 2009; Pietrella, 2012]. Этот критерий,

по-видимому, является оптимальным компромиссом между стремлением исключить из рассмотрения все магнитовозмущенные периоды и сохранить достаточно большой массив данных $foF2_q$ для получения надежных статистических оценок коэффициентов уравнения регрессии (1). В данном случае число значений $foF2_q$ для вычисления коэффициентов уравнения (1) изменялось от 215 до 395 для разных месяцев и часов UT.

Реализация первого этапа этой методики дает эмпирическую модель (1), в которой коэффициенты модели известны. Это позволяет определить значения $foF2_q$ над данной станцией для любого мирового времени и месяца по известным значениям F_{12} . На следующем этапе необходимо построить эмпирическую модель зависимости относительных отклонений медианы критической частоты F2-слоя в процентах

$$\delta foF2 = \left(\frac{foF2_{med}}{foF2_q} - 1 \right) 100 \quad (4)$$

от геомагнитной активности. Эта модель имеет вид уравнения

$$\delta foF2 = a_0 + a_1 Ap_m \quad (5)$$

с набором коэффициентов a_0 и a_1 для каждого часа UT и месяца года M , где Ap_m — среднее за месяц значение Ap -индекса геомагнитной активности. Коэффициенты a_0 и a_1 этого уравнения для каждого фиксированного значения UT и M определяются по массиву данных $foF2_{med}$ ст. Слау за 1954–1995 гг. (при известных $foF2_q$ и Ap_m), из которого исключаются данные, которые не удовлетворяют условию

$$Ap_m < 32. \quad (6)$$

Согласно массиву индексов Ap_m за 1954–1995 гг., нарушение условия (6) наблюдалось менее чем в 2 % случаев. Кроме того, медиане $foF2$ обычно соответствует относительно низкая геомагнитная активность [Deminov, Deminova, 2015]. Поэтому условие (6) позволяет получить типичные средние зависимости $\delta foF2$ от Ap_m , без сильных и редких отклонений.

Кроме модели (5), дополнительно была построена модель, которая описывается уравнением регрессии

$$\delta foF2_{12} = b_0 + b_1 Ap_{12} \quad (7)$$

для каждого часа мирового времени и месяца года, где $\delta foF2_{12}$ и Ap_{12} — скользящие средние за двенадцать месяцев значения $\delta foF2$ и Ap_m для данного часа UT, центрированные на данный месяц.

Ниже представлены результаты анализа свойств уравнений (5) и (7) по данным ст. Слау за 1954–1995 гг. для полудня и полуночи. Долгосрочный прогноз геомагнитной активности связан с определенными сложностями [Joselyn, 1995]. Можно указать только общие тенденции ее изменения. Одна из этих тенденций заключается в существовании полугодовых изменений геомагнитной активности с максимумами в равноденствия [Cliver et al., 2002], и эту тенденцию можно учесть с помощью индекса Ap_m . Другая тенденция связана с изменениями геомагнитной активности с циклом солнечной активности,

и эти изменения можно учесть с помощью индекса Ap_{12} [Echer et al., 2004]. Выбор индексов Ap_m и Ap_{12} в уравнениях (5) и (7) основан на таких оценках.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

На рис. 1 показаны годовые изменения средних (в интервале 1954–1995 гг.) значений индекса геомагнитной активности Ap_{ave} для каждого месяца, коэффициента a_1 уравнения (5) и коэффициента корреляции K между вычисленными по этому уравнению и измеренными значениями $\delta foF2$ для полудня и полуночи. Ниже для краткости изложения коэффициент K назван коэффициентом корреляции уравнения (5). При вычислении Ap_{ave} учтено условие (6), т.е. исключены данные Ap_m , которые не удовлетворяют этому условию. Коэффициенты a_1 и K получены по данным ст. Слау за 1954–1995 гг. по приведенной выше методике.

На рис. 1 видны полугодовые вариации Ap_{ave} с максимумами в равноденствия с преобладающим максимумом весной. Весной относительно высокие значения наблюдались в течение наиболее продолжительного времени. Например, условие $Ap_{ave} > 15$ было выполнено в течение четырех месяцев в первую половину года (с февраля по май) и двух месяцев во вторую половину года (сентябрь и октябрь).

В полдень зимой коэффициент $a_1 > 0$, т.е. увеличение индекса геомагнитной активности приводит к увеличению $\delta foF2$ и, следовательно, $foF2_{med}$, поскольку $foF2_q$ не зависит от геомагнитной активности (см. рис. 1 и уравнения (4) и (5)). Такое изменение $\delta foF2$ — положительное возмущение $foF2_{med}$, связан-

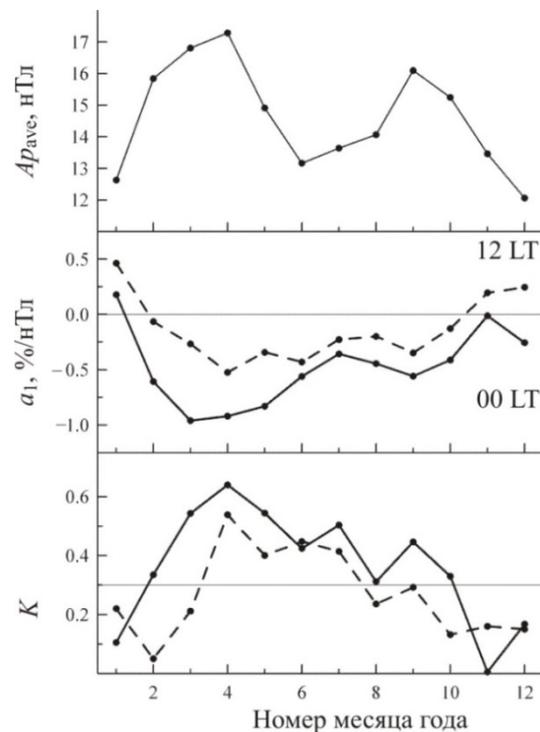


Рис. 1. Годовые изменения средних значений индекса геомагнитной активности Ap_{ave} , коэффициента a_1 и коэффициента корреляции K уравнения (5) для полуночи (00 LT, штриховые линии) и полудня (12 LT, сплошные линии)

ное с ростом геомагнитной активности. Для всех остальных месяцев в полдень и полночь характерно отрицательное возмущение $foF2_{med}$ (коэффициент $a_1 < 0$) с более высоким значением $|a_1|$ в полночь. В течение зимы в полночь величина a_1 может менять знак: $a_1 \approx 0$ в ноябре, $a_1 < 0$ в декабре и $a_1 > 0$ в январе.

Годовые изменения коэффициента корреляции K уравнения (5) для полудня и полуночи во многом подобны годовым изменениям Ap_{ave} : они максимальны в апреле и в среднем минимальны зимой, но летом наблюдается дополнительный максимум K , который отсутствует для Ap_{ave} (см. рис. 1). Статистический анализ по критерию Фишера показал, что зависимость (5) значима для $K > 0.3$ при доверительном уровне 95 % [Ramachandran, Tsokos, 2009]. Можно видеть (рис. 1), что для полуночи зависимость $\delta foF2$ от Ap_m не значима зимой (ноябрь, декабрь и январь) и значима во все остальные месяцы года. Для полудня зависимость $\delta foF2$ от Ap_m значима в более узком интервале — с апреля по июль, поскольку в среднем коэффициент корреляции K для полудня меньше, чем для полуночи. На рис. 1 можно видеть также, что в полночь и полдень для значимых зависимостей выполнено условие $a_1 < -0.3$ %/нТл, т.е. значимыми являются только достаточно отчетливые отрицательные возмущения $foF2_{med}$, связанные с ростом геомагнитной активности.

Рисунок 2 позволяет более наглядно судить о характере зависимости $\delta foF2$ от Ap_m в январе, апреле и июле для полудня и полуночи. Здесь σ — стандартное отклонение измеренных значений $\delta foF2$ от вычисленных по уравнению (5).

Из данных на рис. 1 и рис. 2 можно видеть, что в январе значения Ap_m были меньше 20 нТл при среднем значении $Ap_{ave} = 12.6$ нТл. Эти значения Ap_m были слишком низкими, чтобы привести к систематическим отклонениям $\delta foF2$ от спокойного уровня, поэтому в январе зависимость $\delta foF2$ от Ap_m не значима для полудня и полуночи. В апреле значения Ap_m достигали 30 нТл при среднем значении $Ap_{ave} = 17.3$ нТл, что обеспечивало относительно высокий средний уровень геомагнитной активности и широкий диапазон ее изменения. Поэтому в апреле зависимость $\delta foF2$ от Ap_m значима для полудня и полуночи. Для полуночи эта зависимость наиболее отчетлива, обеспечивая самое высокое значение коэффициента $K = 0.64$ в течение года (см. рис. 1). В июле значения Ap_m могли даже превышать 30 нТл, но среднее значение было относительно низким ($Ap_{ave} = 13.6$ нТл) и повышенные значения Ap_m наблюдались реже, чем в апреле. Возможно, что по этой причине в июле зависимость $\delta foF2$ от Ap_m значима, но менее отчетлива, чем в апреле.

Для полуночи зависимость $\delta foF2$ от Ap_m значима почти в течение всего года. Исключение составляют только зимние месяцы. Поэтому можно ожидать, что для полуночи будет также значима линейная зависимость $\delta foF2_{12}$ от Ap_{12} (см. уравнение (7)), где $\delta foF2_{12}$ и Ap_{12} — скользящие средние за 12 месяцев значения $\delta foF2$ и Ap_m , центрированные на данный месяц. Явный вид уравнения регрессии (7), полученный по данным ст. Слау для полуночи за все месяцы года в интервале 1954–1995 гг.:

$$\delta foF2_{12} = 2.3 - 0.51 Ap_{12} \pm 2.3, K = 0.65, \quad (8)$$

где K — коэффициент корреляции между вычисленными по этому уравнению и измеренными значениями $\delta foF2_{12}$. Аналогичное уравнение регрессии для полудня:

$$\delta foF2_{12} = 1.5 - 0.24 Ap_{12} \pm 1.7, K = 0.49. \quad (9)$$

Из значений коэффициента корреляции K следует, что зависимость $\delta foF2_{12}$ от Ap_{12} значима для полуночи и полудня и для полуночи эта зависимость более отчетлива, чем для полудня. Это следует и из более высокого абсолютного значения коэффициента b_1 для полуночи в этих уравнениях: $b_1 = -0.51$, тогда как для полудня $b_1 = -0.24$. Можно видеть также, что для $\delta foF2_{12}$ характерно отрицательное возмущение (коэффициент $b_1 < 0$) в полдень и полночь. Это связано с выполнением условия $a_1 < 0$ в уравнении (5) в полдень и полночь в течение почти всего года, за исключением, возможно, зимних месяцев (см. рис. 1).

Более наглядно о характере зависимости $\delta foF2_{12}$ от Ap_{12} можно судить по данным на рис. 3. Видно (рис. 3), что значения $\delta foF2_{12}$ в основном лежат в диапазоне $-10-0$ % в полночь и $-5-0$ % в полдень и уравнения регрессии (8) и (9) отражают эту закономерность. Следовательно, в полдень и полночь типичные отклонения $\delta foF2_{12}$ от фонового значения, связанные с ростом индекса геомагнитной активности Ap_{12} , не превышают 5 и 10 %. Такие слабые отклонения во многих случаях можно не учитывать. Их целесообразно учитывать лишь при анализе эффектов в ионосфере с относительно низкой амплитудой, включая долговременные изменения и эффекты землетрясений.

Итак, результаты анализа медиан критической частоты F2-слоя $foF2_{med}$ на примере данных ст. Слау за 1954–1995 гг. для полудня и полуночи позволили установить, что зависимость $foF2_{med}$ от геомагнитной активности выделяется достаточно отчетливо, если использовать $\delta foF2$ — относительные отклонения этих медиан от спокойного уровня. Для равенств и лета увеличение среднего за месяц индекса геомагнитной активности Ap_m приводит к уменьшению $\delta foF2$. Для полуночи эта закономерность более отчетлива, чем для полудня. Данная закономерность сохраняется и для средних за год значений Ap_m и $\delta foF2$.

ОБСУЖДЕНИЕ

В приведенной методике выделения зависимости медианы критической частоты F2-слоя за месяц $foF2_{med}$ от геомагнитной активности использованы приближенные индексы солнечной и геомагнитной активности F_{12} , Ap_m и Ap_{12} (см. уравнения (1), (5) и (7)), для которых возможен долгосрочный прогноз. Эти индексы, по-видимому, являются оптимальными для долгосрочного прогноза $foF2_{med}$. Данный вывод основан на результатах сопоставления точных индексов P и $ap(\tau)$ с приближенными индексами F_{12} и Ap_m , где $P = F_1 + F_{81}$, F_1 и F_{81} — поток солнечного радиоизлучения на длине волны 10.7 см в данный день и среднее за 81 день значение этого потока, центрированное на данный день, индекс $ap(\tau)$ определен

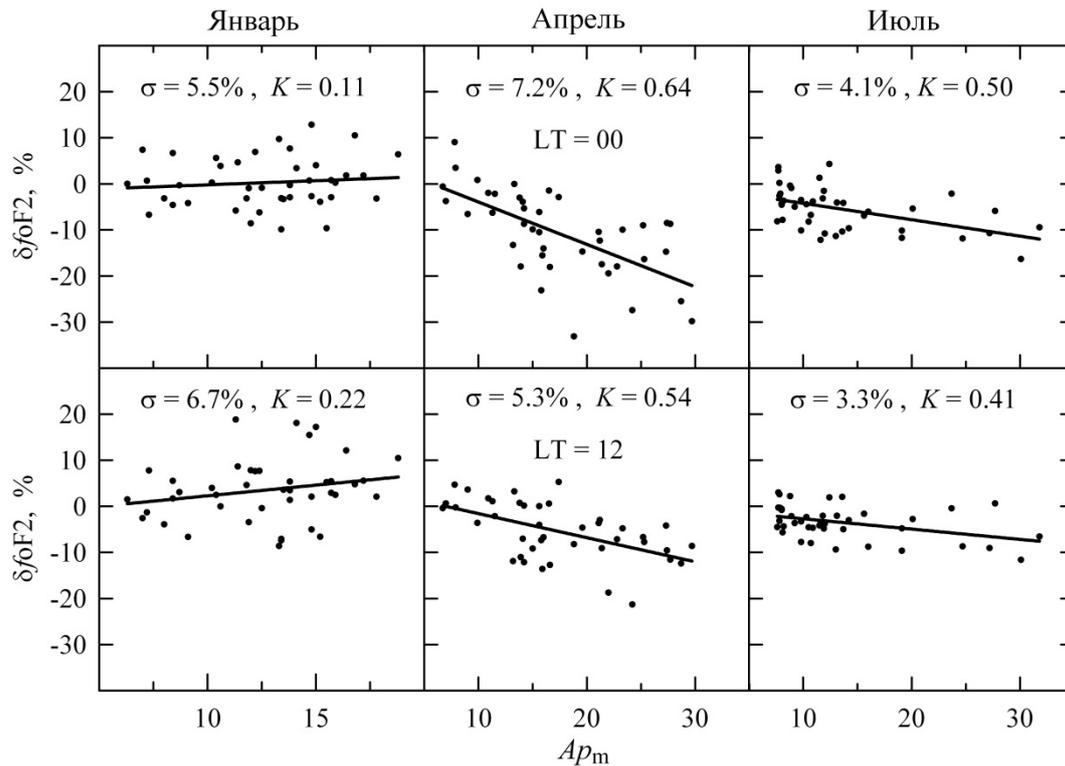


Рис. 2. Зависимости относительных значений медианы критической частоты F2-слоя $\delta foF2$ от Ap_m для трех месяцев года в полночь (верхняя панель) и полдень (нижняя панель): точки — по данным ст. Слау за 1954–1995 гг.; сплошные линии — по уравнению регрессии (5)

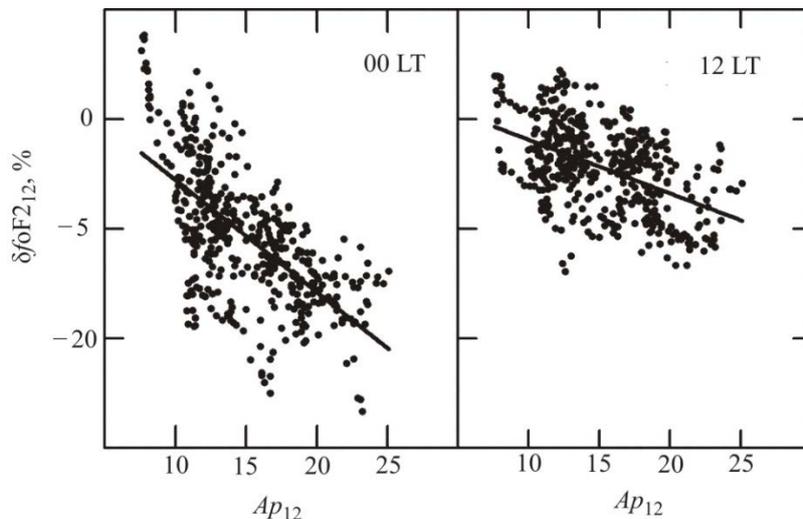


Рис. 3. Зависимость скользящих средних за год значений $\delta foF2_{12}$ от Ap_{12} в полночь (00 LT) и полдень (12 LT): точки — по данным ст. Слау за 1954–1995 гг.; сплошные линии — по уравнениям регрессии (8) и (9)

уравнением (3) для $\tau \approx 0.8$ [Deminov, Deminova, 2015]. Медиана $foF2$ для конкретного месяца при фиксированном мировом времени соответствует конкретному дню этого месяца (при нечетном числе измерений $foF2$ в течение этого месяца), для которого $foF2 = foF2_{med}$, и точные индексы активности определены для этого конкретного дня месяца. На основе анализа данных ст. Слау за 1954–1995 гг. было получено, что нет систематической разницы между точным и приближенным индексами солнечной активности и, например, для полудня $P \approx 1.0 F_{12} \pm 15$ с коэффициентом корреляции $K = 0.96$ [Deminov, Deminova, 2015]. Поэтому индекс F_{12} является достаточно

адекватным индикатором солнечной активности в задачах долгосрочного прогноза $foF2_{med}$. На основе приведенных в работе [Deminov, Deminova, 2015] результатов можно заключить, что существует систематическое различие между $ap(\tau)$ и Ap_m и в среднем $ap(\tau) \approx 0.8 Ap_m$ во все месяцы года. Следовательно, существует определенная зависимость $ap(\tau)$ от Ap_m , что позволяет использовать индекс Ap_m в качестве индикатора геомагнитной активности для долгосрочного прогноза $foF2_{med}$.

Для выделения спокойных условий здесь принято неравенство $ap(\tau) < 7$, которое совпадает с принятым в работах [Pietrella, Perrone, 2008; Deminov et

al., 2009; Pietrella, 2012]. Во многих случаях считается, что спокойным условиям соответствуют случаи $ap(\tau) < 9$ [Fuller-Rowell et al., 2000; Деминов и др., 2015]. Дополнительный анализ показал, что оба эти условия приводят к почти совпадающим результатам для ст. Слау.

Отклонения $foF2$ (в процентах) от спокойного уровня, связанные с геомагнитными бурями, обладают рядом закономерностей: на средних широтах во все часы суток они более положительны местной зимой, чем местным летом; для равноденствий и лета эти отклонения в основном отрицательны и в полночь они больше, чем в полдень [Buonsanto, 1999]. Отрицательные отклонения $foF2$ от спокойного уровня в период геомагнитной бури называют также отрицательной фазой ионосферной бури. Эту фазу ионосферной бури объясняют соответствующими изменениями температуры и состава термосферы [Buonsanto, 1999]. Полученные по данным ст. Слау отклонения медианы $foF2$ от спокойного уровня обладают аналогичными свойствами: они отрицательны во все сезоны, за исключением зимы, и при прочих равных условиях такие отрицательные отклонения в полночь больше, чем в полдень (см. рис. 1 и 2).

Разница между свойствами ионосферной бури и отклонений медианы $foF2$ от спокойного уровня скорее количественная и обусловлена тем, что для медианы $foF2$ по данным ст. Слау в основном выполнено условие $Ap < 32$, а к ионосферной буре обычно относят возмущения, для которых $Ap > 48$. В результате эффекты геомагнитных возмущений для медианы $foF2$ не превышают 35 % (см. рис. 2), для ионосферных бурь они могут быть на порядок больше [Buonsanto, 1999]. Уравнение регрессии (5), которое отражает линейную зависимость $\delta foF2$ от Ap_m для медианы $foF2$, получено с учетом относительно низких амплитуд изменений $\delta foF2$. Для эффектов ионосферных бурь эти зависимости представляются в виде [Wrenn, Rodger, 1989; Pietrella, 2012]

$$\ln(foF2/foF2_q) = \exp(c_0 + c_1 ap(\tau)).$$

В линейном случае данное уравнение имеет вид (5) при заменах $foF2$ на $foF2_{med}$ и $ap(\tau)$ на Ap_m , косвенно показывая, что зависимости медианы $foF2$ от геомагнитной активности и эффекты ионосферных бурь обусловлены одними и теми же причинами.

Диапазон изменений индекса Ap_m в значительной степени определяет свойства зависимостей $\delta foF2$ от Ap_m для медианы $foF2$. В зимние месяцы (декабрь, январь, февраль) средние значения Ap_{ave} и диапазон изменений Ap_m минимальны. Точные значения индексов геомагнитной активности $ap(\tau)$ для медианы $foF2$ еще меньше, например, для декабря $Ap_{ave} = 12.1$ и $ap(\tau) = 0.8 Ap_{ave} = 9.7$. Условие $ap(\tau) < 9$ часто относят к спокойным геомагнитным условиям [Fuller-Rowell et al., 2000; Деминов и др., 2015]. Слабое отклонение геомагнитной активности для медианы $foF2$ зимой от спокойных условий, по-видимому, является основной причиной отсутствия значимой зависимости $\delta foF2$ от Ap_m для этого сезона. Тем не менее даже для таких низких значений геомагнитной активности сохраняется общая тенденция к возникновению

положительных возмущений в дневные часы зимой (см. рис. 1).

Для остальных месяцев характерно отрицательное возмущение медианы $foF2$, когда увеличение Ap_m приводит к уменьшению $\delta foF2$, значимое, по крайней мере, в полночь. Оно наиболее отчетливо для равноденственных условий, поскольку для этих условий средние значения и диапазон изменений Ap_m максимальны (см. рис. 1 и 2). Отрицательное возмущение медианы $foF2$, по-видимому, обусловлено изменением температуры и состава термосферы из-за увеличения геомагнитной активности по аналогии с отрицательной фазой ионосферной бури. При прочих равных условиях такие изменения параметров термосферы летом и в равноденствия распространяются на более низкие, чем зимой, широты, обеспечивая преобладание отрицательной фазы ионосферной бури в эти периоды [Prolss, 1977; Buonsanto, 1999].

Преобладание отрицательного возмущения медианы $foF2$ во все месяцы года, за исключением зимы, приводит к тому, что и для средних за год значений $\delta foF2$ характерно значимое отрицательное возмущение, которое в полночь более отчетливо, чем в полдень. Амплитуда $\delta foF2_{12}$ по абсолютной величине не превышает 5–7 % в полдень и 10–13 % в полночь для анализируемых условий по данным ст. Слау (см. рис. 3). Такие слабые отклонения $\delta foF2_{12}$ от фона, связанные с ростом геомагнитной активности Ap_{12} , по-видимому, целесообразно учитывать только при анализе эффектов в ионосфере с относительно низкой амплитудой, включая долговременные изменения или эффекты землетрясений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена методика выделения вклада геомагнитной активности в медиану критической частоты F2-слоя $foF2_{med}$. Она основана на анализе этого вклада для $\delta foF2$ — отношения $foF2_{med}/foF2_q$ в процентах, где $foF2_q$ — критическая частота F2-слоя для спокойных условий. Величины $foF2_q$ и $\delta foF2$ зависят от солнечной и геомагнитной активности соответственно. Эти зависимости можно учесть с помощью приближенных индексов F_{12} (средней за 12 месяцев величины потока солнечного радиоизлучения на длине волны 10.7 см) и Ap_m (среднего за месяц значения Ap -индекса геомагнитной активности), что обеспечивает потенциальную возможность использования данной методики для прогноза $foF2_{med}$.

С помощью этой методики по данным ст. Слау за 1954–1955 гг. для полудня и полуночи установлено, что для полуночи зависимость $\delta foF2$ от Ap_m значима (при доверительном уровне 95 %) в равноденствия и летом, для полудня она менее отчетлива и значима с апреля по июль. В равноденствия и летом в полдень и полночь преобладают отрицательные возмущения $\delta foF2$, т. е. увеличение Ap_m приводит к уменьшению $\delta foF2$. Преобладание отрицательного возмущения медианы $foF2$ основную часть года приводит к тому, что и для среднего за год значения $\delta foF2_{12}$ характерно значимое отрицательное возмущение, которое в полночь более отчетливо, чем в пол-

день. Амплитуда δf_oF_{212} по абсолютной величине не превышает 5–7 % в полдень и 10–13 % в полночь для анализируемых условий. Такие слабые отклонения δf_oF_{212} от фона, связанные с ростом геомагнитной активности A_p_{12} , по-видимому, целесообразно учитывать только при анализе эффектов в ионосфере с относительно низкой амплитудой, например долговременных изменений в ионосфере или эффектов землетрясений.

Данные f_oF_2 ионосферной станции Слау (Slough) и индексы солнечной и геомагнитной активности были взяты с сайтов Space Physics Interactive Data Resource (SPIDR) [<http://spidr.ngdc.noaa.gov/>], World Data Center for Solar-Terrestrial Physics, Chilton [<http://www.ukssdc.ac.uk/wdcc1/>], World Data Center for Geomagnetism, Kyoto [<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>]. Работа частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (гранты № 17-05-00427 и № 17-55-45094) и Программой 1.7 Президиума РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Деминов М.Г., Деминова Г.Ф., Жеребцов Г.А., Полев Н.М. Свойства изменчивости концентрации максимума F2-слоя над Иркутском при разных уровнях солнечной и геомагнитной активности // *Солнечно-земная физика*. 2015. Т. 1, № 1. С. 56–62. DOI: [10.12737/6558](https://doi.org/10.12737/6558).
- Bilitza D., Altadill D., Zhang Y., et al. The International Reference Ionosphere 2012 — a model of international collaboration // *J. Space Weather Space Clim.* 2014. V. 4, A07. DOI: [10.1051/swsc/2014004](https://doi.org/10.1051/swsc/2014004).
- Bremer J. Trends in the ionospheric E and F regions over Europe // *Ann. Geophysicae*. 1998. V. 16, N 8. P. 986–996.
- Buonsanto M.J. Ionospheric storms — a review // *Space Sci. Rev.* 1999. V. 88. P. 563–601. DOI: [10.1023/A:1005107532631](https://doi.org/10.1023/A:1005107532631).
- Caruana J. The IPS monthly T index // *Solar-Terrestrial Prediction: Proc. Workshop at Leura, Australia* (October 16–20, 1989). 1990. V. 2. P. 257–263.
- Cliwer E.W., Kamide Y., Ling A.G. The semiannual variation of geomagnetic activity: phases and profiles for 130 years of aa data // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2002. V. 64, N 1. P. 47–53. DOI: [10.1016/S1364-6826\(01\)00093-1](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(01)00093-1).
- Deminov M.G. Solar activity index for long-term ionospheric forecasts // *Cosmic Res.* 2016. V. 54, N 1. P. 1–7. DOI: [10.1134/S0010952516010068](https://doi.org/10.1134/S0010952516010068).
- Deminov M.G., Deminova G.F. What solar and geomagnetic activities does F2-layer critical frequency median correspond to in midlatitudes? // *Geomagn. Aeron.* 2015. V. 55, N 3. P. 326–332. DOI: [10.1134/S0016793215030068](https://doi.org/10.1134/S0016793215030068).
- Deminov M.G., Zherebtsov G.A., Pirog O.M., Shubin V.N. Regular changes in the critical frequency of the F2 layer of the quiet midlatitude ionosphere // *Geomagn. Aeron.* 2009. V. 49, N 3. P. 374–380. DOI: [10.1134/S0016793209030116](https://doi.org/10.1134/S0016793209030116).
- Deminov M.G., Deminova G.F., Zherebtsov G.A., Polekh N.M. Statistical properties of variability of the quiet ionosphere F2-layer maximum parameters over Irkutsk under low solar activity // *Adv. Space Res.* 2013. V. 51, N 5. P. 702–711. DOI: [10.1016/j.asr.2012.09.037](https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.09.037).
- Echer E., Gonzalez W.D., Gonzalez A.L.C., et al. Long-term correlation between solar and geomagnetic activity // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2004. V. 66, N 12. P. 1019–1025. DOI: [10.1016/j.jastp.2004.03.011](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2004.03.011).
- Fuller-Rowell T.J., Araujo-Pradere E., Codrescu M.V. An empirical ionospheric storm-time correction model // *Adv. Space Res.* 2000. V. 25, N 1. P. 139–146. DOI: [10.1016/S0273-1177\(99\)00911-4](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(99)00911-4).
- Joselyn J.A. Geomagnetic activity forecasting: The state of the art // *Rev. Geophys.* 1995. V. 33, N 3. P. 383–401. DOI: [10.1029/95RG01304](https://doi.org/10.1029/95RG01304).
- Kutiev I., Muhtarov P. Modeling of midlatitude F region response to geomagnetic activity // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106, N A8. P. 15501–15509. DOI: [10.1029/2001JA900018](https://doi.org/10.1029/2001JA900018).
- Kutiev I., Muhtarov P. Empirical modeling of global ionospheric foF2 response to geomagnetic activity // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108, N A1. 1021. DOI: [10.1029/2001JA009134](https://doi.org/10.1029/2001JA009134).
- Laštovička J., Mikhailov A.V., Ulich T. et al. Long-term trends in foF2: a comparison of various methods // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2006. V. 68, N 17. P. 1854–1870. DOI: [10.1016/j.jastp.2006.02.009](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2006.02.009).
- Liu R., Smith P., King J. A new solar index which leads to improved foF2 predictions using the CCIR atlas // *Telecommun. J.* 1983. V. 50, N 8. P. 408–414.
- Mielich J., Bremer J. Long-term trends in the ionospheric F2 region with different solar activity indices // *Ann. Geophys.* 2013. V. 31. P. 291–303. DOI: [10.5194/angeo-31-291-2013](https://doi.org/10.5194/angeo-31-291-2013).
- Mikhailov A.V., Mikhailov V.V. A new ionospheric index MF2 // *Adv. Space Res.* 1995. V. 15, N 2. P. 93–97.
- Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: statistical comparisons and scientific issues // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107, N A12. 1468. DOI: [10.1029/2002JA009430](https://doi.org/10.1029/2002JA009430).
- Pietrella M. A short-term ionospheric forecasting empirical regional model (IFERM) to predict the critical frequency of the F2 layer during moderate, disturbed, and very disturbed geomagnetic conditions over the European area // *Ann. Geophysicae*. 2012. V. 30, N 2. P. 343–355. DOI: [10.5194/angeo-30-343-2012](https://doi.org/10.5194/angeo-30-343-2012).
- Pietrella M., Perrone L. A local ionospheric model for forecasting the critical frequency of the F2 layer during disturbed geomagnetic and ionospheric conditions // *Ann. Geophysicae*. 2008. V. 26, N 2. P. 323–334. DOI: [10.5194/angeo-26-323-2008](https://doi.org/10.5194/angeo-26-323-2008).
- Prolls G.W. Seasonal variations of atmospheric-ionospheric disturbances // *J. Geophys. Res.* 1977. V. 82, N 10. P. 1635–1640. DOI: [10.1029/JA082i010p01635](https://doi.org/10.1029/JA082i010p01635).
- Ramachandran K.M., Tsokos C.P. Mathematical statistics with applications. Oxford: Elsevier Academic Press, 2009. 824 p.
- Shubin V.N., Anakuliev S.K. Ionospheric storm negative phase model at middle latitudes // *Geomagn. Aeron.* 1995. V. 35, N 3. P. 363–369.
- Sole J.G. Relations between hourly monthly median values of foF2 and some geophysical indices. Their application to an ionospheric single station model // *Acta Geophys. Polonica*. 1998. V. 46, N 1. P. 77–88.
- Wrenn G.L. Time-weighted accumulations $ap(\tau)$ and $Kp(\tau)$ // *J. Geophys. Res.* 1987. V. 92, N A9. P. 10125–10129. DOI: [10.1029/JA092iA09p10125](https://doi.org/10.1029/JA092iA09p10125).
- Wrenn G.L., Rodger A.S. Geomagnetic modification of the mid-latitude ionosphere: toward a strategy for the improved forecasting of foF2 // *Radio Sci.* 1989. V. 24, N 1. P. 99–111. DOI: [10.1029/RS024i001p00999](https://doi.org/10.1029/RS024i001p00999).
- Xu T., Wu Z.-S., Wu Jian, Wu Jun. Solar cycle variation of the monthly median foF2 at Chongqing station, China // *Adv. Space Res.* 2008. V. 42, N 1. P. 213–218. DOI: [10.1016/j.asr.2008.01.012](https://doi.org/10.1016/j.asr.2008.01.012).
- Zolesi B., Cander L.R. *Ionospheric Prediction and Forecasting*. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. 240 p. DOI: [10.1007/978-3-642-38430-1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-38430-1).
- URL: <http://spidr.ngdc.noaa.gov> (дата обращения 30 июня 2017 г.).
- URL: <http://www.ukssdc.ac.uk/wdcc1> (дата обращения 11 июня 2017 г.).
- URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp> (дата обращения 1 июля 2017 г.).

REFERENCES

- Bilitza D., Altadill D., Zhang Y., Mertens C., Truhlik V., Richards P., McKinnell L.A., Reinisch B. The International Reference Ionosphere 2012 — a model of international collaboration. *J. Space Weather Space Clim.* 2014, vol. 4, A07. DOI: [10.1051/swsc/2014004](https://doi.org/10.1051/swsc/2014004).
- Bremer J. Trends in the ionospheric E and F regions over Europe. *Ann. Geophysicae.* 1998, vol. 16, no 8, pp. 986–996.
- Buonsanto M.J. Ionospheric storms – a review. *Space Sci. Rev.* 1999, vol. 88. pp. 563–601. DOI: [10.1023/A:1005107532631](https://doi.org/10.1023/A:1005107532631).
- Caruana J. The IPS monthly *T* index. *Solar-Terrestrial Prediction: Proc. Workshop at Leura, Australia (October 16–20, 1989)*. 1990, vol. 2, pp. 257–263.
- Cliwer E.W., Kamide Y., Ling A.G. The semiannual variation of geomagnetic activity: phases and profiles for 130 years of *aa* data. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2002, vol. 64, no. 1, pp. 47–53. DOI: [10.1016/S1364-6826\(01\)00093-1](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(01)00093-1).
- Deminov M.G. Solar activity index for long-term ionospheric forecasts. *Cosmic Research.* 2016, vol. 54, no. 1, pp. 1–7. DOI: [10.1134/S0010952516010068](https://doi.org/10.1134/S0010952516010068).
- Deminov M.G., Deminova G.F. What solar and geomagnetic activities does F2-layer critical frequency median correspond to in midlatitudes? *Geomagn. Aeron.* 2015, vol. 55, no. 3, pp. 326–332. DOI: [10.1134/S0016793215030068](https://doi.org/10.1134/S0016793215030068).
- Deminov M.G., Zherebtsov G.A., Pirog O.M., Shubin V.N. Regular changes in the critical frequency of the F2 layer of the quiet midlatitude ionosphere. *Geomagn. Aeron.* 2009, vol. 49, no. 3, pp. 374–380. DOI: [10.1134/S0016793209030116](https://doi.org/10.1134/S0016793209030116).
- Deminov M.G., Deminova G.F., Zherebtsov G.A., Polekh N.M. Statistical properties of variability of the quiet ionosphere F2-layer maximum parameters over Irkutsk under low solar activity. *Adv. Space Res.* 2013, vol. 51, no. 5, pp. 702–711. DOI: [10.1016/j.asr.2012.09.037](https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.09.037).
- Deminov M.G., Deminova G.F., Zherebtsov G.A., Polekh N.M. Properties of the F2-layer maximum density variability over Irkutsk under different levels of the solar and geomagnetic activity. *Solnechno-zemnaya fizika [Solar-Terrestrial Physics]*. 2015, vol. 1, iss. 1, pp. 56–62. DOI: [10.12737/6558](https://doi.org/10.12737/6558). (in Russian).
- Echer E., Gonzalez W.D., Gonzalez A.L.C., Prestes A., Vieira L.E.A., Dal Lago A., Guarnieri F.L., Schuch N.J. Long-term correlation between solar and geomagnetic activity. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2004, vol. 66, no. 12, pp. 1019–1025. DOI: [10.1016/j.jastp.2004.03.011](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2004.03.011).
- Fuller-Rowell T.J., Araujo-Pradere E., Codrescu M.V. An empirical ionospheric storm-time correction model. *Adv. Space Res.* 2000, vol. 25, no. 1, pp. 139–146. DOI: [10.1016/S0273-1177\(99\)00911-4](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(99)00911-4).
- Joselyn J.A. Geomagnetic activity forecasting: the state of the art. *Rev. Geophys.* 1995, vol. 33, no. 3, pp. 383–401. DOI: [10.1029/95RG01304](https://doi.org/10.1029/95RG01304).
- Kutiev I., Muhtarov P. Modeling of midlatitude F region response to geomagnetic activity. *J. Geophys. Res.* 2001, vol. 106, no. A8, pp. 15501–15509. DOI: [10.1029/2001JA000018](https://doi.org/10.1029/2001JA000018).
- Kutiev I., Muhtarov P. Empirical modeling of global ionospheric foF2 response to geomagnetic activity. *J. Geophys. Res.* 2003, vol. 108, no. A1, 1021. DOI: [10.1029/2001JA009134](https://doi.org/10.1029/2001JA009134).
- Laštovička J., Mikhailov A.V., Ulich T., Bremer J., Elias A.G., Ortiz de Adler N., Jara V., Abarca del Rio R., Foppiano A.J., Ovalle E., Danilov A.D. Long-term trends in foF2: a comparison of various methods. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2006, vol. 68, no. 17, pp. 1854–1870. DOI: [10.1016/j.jastp.2006.02.009](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2006.02.009).
- Liu R., Smith P., King J. A new solar index which leads to improved foF2 predictions using the CCIR atlas. *Telecommun. J.* 1983, vol. 50, no. 8, pp. 408–414.
- Mielich J., Bremer J. Long-term trends in the ionospheric F2 region with different solar activity indices. *Ann. Geophys.* 2013, vol. 31, pp. 291–303. DOI: [10.5194/angeo-31-291-2013](https://doi.org/10.5194/angeo-31-291-2013).
- Mikhailov A.V., Mikhailov V.V. A new ionospheric index MF2. *Adv. Space Res.* 1995, vol. 15, no. 2, pp. 93–97.
- Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: statistical comparisons and scientific issues. *J. Geophys. Res.* 2002, vol. 107, no. A12, 1468. DOI: [10.1029/2002JA009430](https://doi.org/10.1029/2002JA009430).
- Pietrella M. A short-term ionospheric forecasting empirical regional model (IFERM) to predict the critical frequency of the F2 layer during moderate, disturbed, and very disturbed geomagnetic conditions over the European area. *Ann. Geophysicae.* 2012, vol. 30, no. 2, pp. 343–355. DOI: [10.5194/angeo-30-343-2012](https://doi.org/10.5194/angeo-30-343-2012).
- Pietrella M., Perrone L. A local ionospheric model for forecasting the critical frequency of the F2 layer during disturbed geomagnetic and ionospheric conditions. *Ann. Geophysicae.* 2008, vol. 26, no. 2, pp. 323–334. DOI: [10.5194/angeo-26-323-2008](https://doi.org/10.5194/angeo-26-323-2008).
- Prolss G.W. Seasonal variations of atmospheric-ionospheric disturbances. *J. Geophys. Res.* 1977, vol. 82, no. 10, pp. 1635–1640. DOI: [10.1029/JA082i010p01635](https://doi.org/10.1029/JA082i010p01635).
- Ramachandran K.M., Tsokos C.P. *Mathematical statistics with applications*. Oxford, Elsevier Academic Press, 2009. 824 p.
- Shubin V.N., Anakuliev S.K. Ionospheric storm negative phase model at middle latitudes. *Geomagn. Aeron.* 1995, vol. 35, no. 3, pp. 363–369.
- Sole J.G. Relations between hourly monthly median values of foF2 and some geophysical indices. Their application to an ionospheric single station model. *Acta Geophys. Polonica.* 1998, vol. 46, no. 1, pp. 77–88.
- Wrenn G.L. Time-weighted accumulations $ap(\tau)$ and $Kp(\tau)$. *J. Geophys. Res.* 1987, vol. 92, no. A9, pp. 10125–10129. DOI: [10.1029/JA092iA09p10125](https://doi.org/10.1029/JA092iA09p10125).
- Wrenn G.L., Rodger A.S. Geomagnetic modification of the mid-latitude ionosphere: toward a strategy for the improved forecasting of foF2. *Radio Sci.* 1989, vol. 24, no. 1, pp. 99–111. DOI: [10.1029/RS024i001p00099](https://doi.org/10.1029/RS024i001p00099).
- Xu T., Wu Z-S., Wu Jian, Wu Jun. Solar cycle variation of the monthly median foF2 at Chongqing station, China. *Adv. Space Res.* 2008, vol. 42, no. 1, pp. 213–218. DOI: [10.1016/j.asr.2008.01.012](https://doi.org/10.1016/j.asr.2008.01.012).
- Zolesi B., Cander L.R. *Ionospheric Prediction and Forecasting*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2014, 240 p. DOI: [10.1007/978-3-642-38430-1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-38430-1).
- URL: <http://spidr.ngdc.noaa.gov> (accessed 30.06.2017).
- URL: <http://www.ukssdc.ac.uk/wdcd1> (accessed 11.06.2017)
- URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp> (accessed 01.07.2017)

Как цитировать эту статью

Деминов М.Г., Деминова Г.Ф., Депенев В.Х., Депенева А.Х. Зависимость медианы критической частоты F2-слоя на средних широтах от геомагнитной активности. *Солнечно-земная физика.* 2017. Т. 3, № 4. С. 74–81. DOI: [10.12737/szf-34201707](https://doi.org/10.12737/szf-34201707).