

Г.И. Гордиенко, А.Ф. Яковец,
Ю.Г. Литвинов, М.Ю. Жиганбаев*

Институт ионосферы, Алматы, Казахстан

*e-mail: zhiganbayev@ionos.kz

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЕ: ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ И ТРЕНДЫ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ СЛОЯ F2 НА КАЗАХСТАНСКОМ РЕГИОНЕ

Исследованы долговременная изменчивость и тренды в вариациях критических частот слоя F2 ионосферы (foF2), полученные по данным наземного вертикального зондирования на ст. Алма-Ата [43.25N, 77.92E] за период 07.1958 – 04.2018 гг. Анализируются околополуденные (11–14 LT), околополуночные (23–01 LT) и часовые медианные значения foF2.

Показано, что как вариации foF2, так и вариации индекса солнечной активности F10.7 испытывают регулярную 11-летнюю цикличность, устойчивый отрицательный тренд на 60-летнем интервале наблюдений, а также некую долгопериодную (примерно четыре 11-летних солнечных циклов) осцилляцию. Изучены зависимости foF2 тренда от сезона и времени суток. Получено, что устойчивый отрицательный foF2 тренд наблюдается для всех рассматриваемых условий, за исключением ночного времени зимнего сезона, когда foF2 тренд, практически отсутствует. Максимальные отрицательные значения foF2 тренда наблюдаются в дневное время, ночные значения значительно ниже.

Критические частоты показывают хорошую связь с солнечной активностью за весь период наблюдений и для каждого сезона. Обнаружено, что значения dfoF2 (разность между наблюдаемыми foF2 и моделью (квадратичной регрессией между foF2 и F10.7), сглаженные с 11-летним (132 месяца) окном, также в целом отражают соответствующий ход F10.7. Однако, положение максимума во временном распределении dfoF2₁₃₂, переход к фазе понижения значений, наступает раньше (около 1980 г.) относительно положения максимума F10.7₁₃₂ (около 1986 г.), что может указывать на влияние на ионосферу дополнительного (к солнечной активности) источника, возможно источника антропогенного характера.

Расчёты изменчивости foF2 для 22-летних периодов до и после 1980 г. показали заметное понижение критических частот в более поздний период (1980–2001 гг.).

Ключевые слова: ионосфера, долговременные вариации и тренды, динамика ионосферы и климат.

G.I. Gordienko, A.F. Yakovets, Yu.G. Litvinov, M.Yu. Zhiganbayev*

Institute of the Ionosphere, Almaty, Kazakhstan

*e-mail: zhiganbayev@ionos.kz

Climatic changes in the upper ionosphere: long-term variations and trends in the critical frequency of the F2 layer in the Kazakhstan region

The long-term variability and trends in the variations of the ionospheric F2 layer critical frequencies (foF2) obtained from ground-based vertical sounding data at the Alma-Ata station [43.25N, 77.92E] for the period 07.1958 – 04.2018 are studied. Near-midday (11–14 LT), near-midnight (23–01 LT) and hourly median values of foF2 are analyzed. It is shown that both foF2 variations and variations in the solar activity index F10.7 experience a regular 11-year cyclicity, a stable negative trend over a 60-year observation interval, as well as some long-term (approximately four 11-year solar cycles) oscillation. The dependencies of the foF2 trend on the season and time of day are studied. It was found that a stable negative foF2 trend is observed for all the conditions under consideration, except for the night time of the winter season, when the foF2 trend is practically absent. The maximum negative values of the foF2 trend are observed during the daytime, the nighttime values are significantly lower.

Critical frequencies show a good relationship with solar activity for the entire observation period and for each season. It was found that the dfoF2 values (the difference between the observed foF2 and the model (quadratic regression between foF2 and F10.7), smoothed with an 11-year (132 months) window, also generally reflect the corresponding course of F10.7. However, the position of the maximum in the

time distribution of f_oF2 132, the transition to the phase of decreasing values, occurs earlier (around 1980) relative to the position of the maximum of $F10.7$ 132 (around 1986), which may indicate the influence of an additional (to solar activity) source on the ionosphere, possibly an anthropogenic source.

Calculations of f_oF2 variability for 22-year periods before and after 1980 showed a noticeable decrease in critical frequencies in the later period (1980–2001).

Key words: ionosphere, long-term variations and trends, ionospheric dynamics and climate.

Г.И. Гордиенко, А.Ф. Яковец, Ю.Г. Литвинов, М.Ю. Жиганбаев*

Ионосфера институты, Алматы, Қазақстан

*e-mail: zhiganbaev@ionos.kz

Жоғарғы ионосферадағы климаттық өзгерістер: Қазақстан аймағындағы F2 қабатының сыни жиілігінің ұзақ мерзімді вариациялары мен трендтері

Станциядағы жерүсті тік зондтау деректерінен алынған ионосфералық F2 қабатының (f_oF2) критикалық жиіліктерінің ұзақ мерзімді өзгергіштігі мен өзгеру тенденциялары зерттелді. Алма-Ата [43.25N, 77.92E] 07.1958 – 04.2018 кезеңге. Түске жақын (11–14 LT), түн ортасына жақын (23–01 LT) және сағаттық медианалық f_oF2 мәндері талданады.

f_oF2 вариациялары да, $F10.7$ күн белсенділігі индексінің вариациялары да 11 жылдық тұрақты циклді, 60 жылдық бақылау интервалында тұрақты теріс трендті, сондай-ақ кейбір ұзақ мерзімді (шамамен төрт 11-жылдық күн циклдері) тербеліс. f_oF2 трендінің маусымға және тәулік уақытына тәуелділігі зерттелді. f_oF2 үрдісі іс жүзінде жоқ қысқы маусымның түнгі уақытын қоспағанда, барлық қарастырылатын жағдайлар үшін тұрақты теріс f_oF2 үрдісі байқалатыны анықталды. Ең жоғары теріс f_oF2 тренд мәндері күндізгі уақытта байқалады;

Критикалық жиіліктер бүкіл бақылау кезеңінде және әр маусымда күн белсенділігімен жақсы қарым-қатынасты көрсетеді. f_oF2 мәндері (байқалған f_oF2 мен модель арасындағы айырмашылық (f_oF2 және $F10.7$ арасындағы квадраттық регрессия), 11 жылдық (132 ай) тереземен тегістелген, жалпы алғанда сәйкес курсты көрсететіні анықталды. $dfoF2$ 132 уақыт бөлудегі максимум позициясы, төмендеу фазасына көшу ертерек (шамамен 1980 ж.) орын алады. d $F10.7$ 132 максимумының позициясына қатысты (шамамен 1986 ж.), бұл қосымша (күн белсенділігіне) көздің, мүмкін антропогендік көздің ионосфераға әсерін көрсетуі мүмкін.

1980 жылға дейінгі және одан кейінгі 22 жылдық кезеңдерге арналған f_oF2 өзгермелілігінің есептеулері кейінгі кезеңде (1980–2001) критикалық жиіліктердің айтарлықтай төмендеуін көрсетті.

Түйін сөздер: ионосфера, ұзақ мерзімді вариациялар мен тенденциялар, ионосфералық динамика және климат.

Введение

В девяностых годах, используя модель общей циркуляции термосферы/ионосферы NCAR, авторы [1-3] предсказали, что за счет «парникового охлаждения» «температура термосферы снизится на 30–40K, а плотность воздуха на высотах 200–300 км уменьшится на 20–40%, что увеличит время жизни на орбите» спутников. Высота пика ионосферного слоя F2 упадет в среднем примерно на 15 км, что окажет некоторое влияние на распространение радиоволн, хотя критическая частота слоя F2 практически не изменится». С тех пор долговременные тренды в изменении ионосферных параметров были предметом многих исследований [4–11, ссылки в них]. В последние годы опубликован ряд обзоров, обобщающих результаты таких исследований и обсуждающих проблемы, связанные с расхождением и неопределённостью полученных результатов [12–21]. Авторами обсуждаются основные причины

обнаруженных расхождений, разные способы учёта влияния естественных источников на изменения ионосферных параметров, особенности анализируемых данных и методов их анализа. Показано, что тренды в f_oF2 слабы и в основном отрицательные, но в некоторых регионах они положительные [11], и величина их больше на средних широтах зимой. Тренды в f_oF2 изучены в основном по данным полуденных значений. Заметная зависимость f_oF2 трендов от местного времени и сезона была показана в работах [5–6] где авторы использовали медианные значения критических частот f_oF2 , полученных на трёх Европейских станциях (Slough, Juliusruh, Rome). Было показано, что сезонное и суточное поведение f_oF2 трендов для всех трёх станций является подобным, что максимальные значения отрицательных трендов в f_oF2 приходится на полуденный период суток, а в сезонном поведении максимальные значения f_oF2 трендов обнаруживаются зимой и в период весеннего

равноденствия. Особенно широко обсуждается вопрос выбора оптимального индекса солнечной активности для исследования связи с ионосферными параметрами [16-21]. Ластовичка [16], рассматривая параметр F10.7 (плотность потока радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см (частота 2800MHz)), число солнечных пятен R_z , Fa^1 и $MgII^2$ для ионосферных параметров foF2, foE, и глобального электронного содержания G-TEC. Результаты исследования показали, что среднегодовые значения ионосферных параметров полностью контролируются солнечной активностью. Автором было показано, что наиболее подходящим индексом для foF2 является MgII, для foE – F10.7, Fa и R_z показали худший результат. Сделано заключение, что предпочтительными индексами солнечной активности являются F10.7 и MgII, однако данные по MgII имеются только с 1978 г.

Недавно, в работах [20-21] были представлены результаты детального анализа зависимости foF2 от солнечной активности с использованием индексов, упомянутых в работе [16], и индекса F30 (плотность потока радиоизлучения Солнца на длине волны 30 см (частота 1 ГГц)). В качестве критерия качества описания зависимости foF2 от солнечной активности с каждым индексом использовалась величина коэффициента детерминации R^2 для каждой из этих зависимостей. Авторы показали, что наилучшим индексом солнечной активности для описания поведения foF2 в солнечном цикле является индекс F30, тогда как число солнечных пятен является наихудшим. При этом получено, что результаты с использованием F30 и F10.7 достаточно близки (см. рисунок 3 в [21]).

Ранее нами, по данным медианных значений критических частот слоя F2 ионосферы (foF2), измеренных методом наземного зондирования на ст. Алма-Ата [43.25N, 76.92E], были исследованы foF2 тренды за период 1957-2017 гг. [22-23]. Используя разные варианты набора данных для расчёта foF2 тренда (около-полуденные foF2₁₀₋₁₄, около-полуночные foF2₂₃₋₀₁, среднесуточные foF2_{d.av.} значения foF2) было показано, что для всех рассмотренных вариантов представления данных наблюдаются устойчивые отрицательные тренды foF2 как днем, так и ночью. Причём, не смотря на разброс значений foF2 тренда, наблюдается один и тот же порядок величины для ночных и дневных условий независимо от того исключался эффект солнечных циклов или нет (см. таблицу 1 в [23]). Усреднение результатов показало, что для дневных условий foF2

тренд составляет -0.0234 МГц/год и -0,0152МГц/год для ночных условий. Кроме того, путём исключения 11-летнего цикла (методом расчёта скользящего среднего медианных значений foF2 с окном усреднения W=132 (11 лет)) была получена картина долговременных изменений критических частот foF2(132) с выраженной периодичностью порядка 34-36 лет, коррелирующая с соответствующими вариациями F10.7(132).

Данная работа является продолжением выполненных нами ранее работ [22-23] по исследованию долговременных трендов в foF2 вариациях. Основная цель настоящей работы состоит в исследовании изменчивости foF2 тренда в зависимости от сезона и времени суток и исследовании характера связи между изменчивостью foF2 и F10.7.

Материалы и методы

Работа выполняется по данным ионозондовых наблюдений ионосферы на ст. Алма-Ата [43.25N, 76.92E]. Регулярные ионосферные наблюдения на ст. Алма-Ата начались в 1957 году. До 1999г результаты наблюдений регистрировались на плёнке и обрабатывались вручную, формируя, таким, образом, архив таблиц ионосферных данных. С 2000 года наблюдения ионосферы осуществлялись с помощью цифрового ионозонда ПАРУС (<http://www.izmiran.rssi.ru>). С мая 2018 года ионозондовые наблюдения на станции Алма-Ата временно не ведутся. Была выполнена большая работа по оцифровке табличных данных и переводу их на электронные носители, что дало возможность исследовать тенденции изменения ионосферы над Казахстанским регионом более чем за ~5 11-летних солнечных циклов (60 лет).

Чтобы исследовать тенденции изменения foF2 по сезонам, времени суток и уровню солнечной активности использовались месячные медианные значения foF2 для соответствующих условий за весь период наблюдений с июля 1957 г. по апрель 2018 г. Под foF2 трендом понимается изменение соответствующих значений критических частот за 1 год при линейной аппроксимации вариаций foF2 за рассматриваемый период. Поскольку период наблюдения достаточно большой (60 лет), ряды ионосферных данных содержат некоторые пробелы в наблюдениях по разным причинам, таким как: неопределённости при расчёте медианных значений, ремонт ионозондов, профилактическая диагностика аппаратуры и другие технические

проблемы. Отсутствующие значения $foF2$ рассчитывались исходя из регрессионной связи критических частот с индексом солнечной активности F10.7 (данные по F10.7 загружены с сайта <http://www.swpc.noaa.gov>). Качество связи рассматриваемых параметров оценивалась по величине коэффициента детерминации (R^2).

Результаты

Общая картина вариаций F10.7 и медианных значений критических частот слоя F2 ионосферы $foF2$ за весь период ионосферных наблюдений на ст. Алма-Ата представлена на рисунке 1 для полуденных и полуночных условий местного времени ($75^\circ E$).

На рисунке 1 показан регулярный 11-летний солнечный цикл в вариациях F10.7 и $foF2$ (серые тонкие линии), сглаженных методом скользящего среднего для наглядности (черные тонкие линии), линейный отрицательный тренд (чер-

ные пунктирные линии) на 60-летнем интервале наблюдений и наблюдаемая долговременная осцилляция (примерно четыре 11-летних цикла, черные сплошные линии) в вариациях ионосферных данных. Замечен значительный разброс значений $foF2$ относительно сглаженных 11-летних вариаций, что, по-видимому, связано с неучтенными в данном случае сезонными изменениями $foF2$.

Для изучения изменения линейных трендов для разных сезонов и времени суток данные были разделены на 3 группы: 1 – зима (декабрь–февраль), 2 – лето (июнь–август), 3 – равноденствие (март–апрель). Для всех трех групп используются медианные значения $foF2$, усредненные за околополуденные (10–14LT) и полуночные (23–01LT) часы местного времени для каждого месяца рассматриваемого сезона ($foF2_{10-14}$ и $foF2_{23-01}$ соответственно), а также данные за каждый четный час суток (00, 02, 04 ... 22LT).

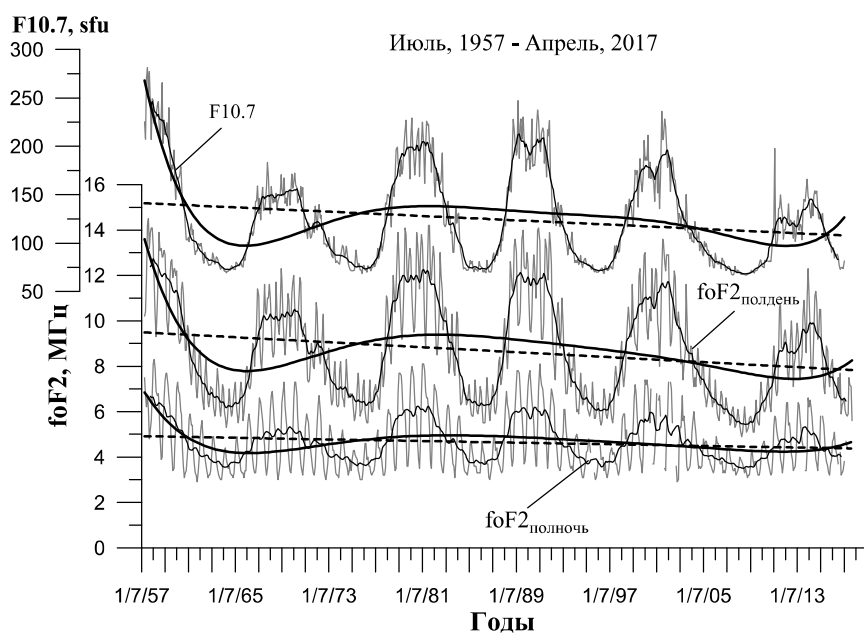


Рисунок 1 – Изменения индекса солнечной активности (F10.7) и наблюдавшихся на станции Алма-Ата критических частот ионосферного слоя F2 ($foF2$) для полуденных и полуночных условий за период с 07.1957 по 04.2018.

Тонкие линии на рисунках 2-3 представляют собой вариации F10.7(a), $foF2_{10-12}$ и $foF2_{23-01}$ для выбранных сезонов. Толстые линии показывают долговременные квазипериодические колебания этих параметров с периодом около четырех 11-летних солнечных циклов,

полученные путем аппроксимации вариаций F10.7(a), $foF2_{10-12}$ и $foF2_{23-01}$ полиномом 6-й степени. Штриховые линии представляют собой линейные компоненты этих вариаций (тренд), формулы для которых приведены в поле рисунков. Коэффициенты «a» при переменной «X»

характеризуют наклон линий тренда, которые в свою очередь представляют собой значение тренда « k » рассматриваемых параметров. В данной работе для выбранных сезонов каждый год представлен двумя (март-апрель) или тремя (июль-август, декабрь-февраль) месяцами, тог-

да для расчета значения тренда соответствующий коэффициент « a » следует умножить на 2 или 3 соответственно. Значения « a » и « k » для рассматриваемых сезонов приведены в таблице 1. Этот же принцип расчёта foF2 тренда применяется и в других примерах.

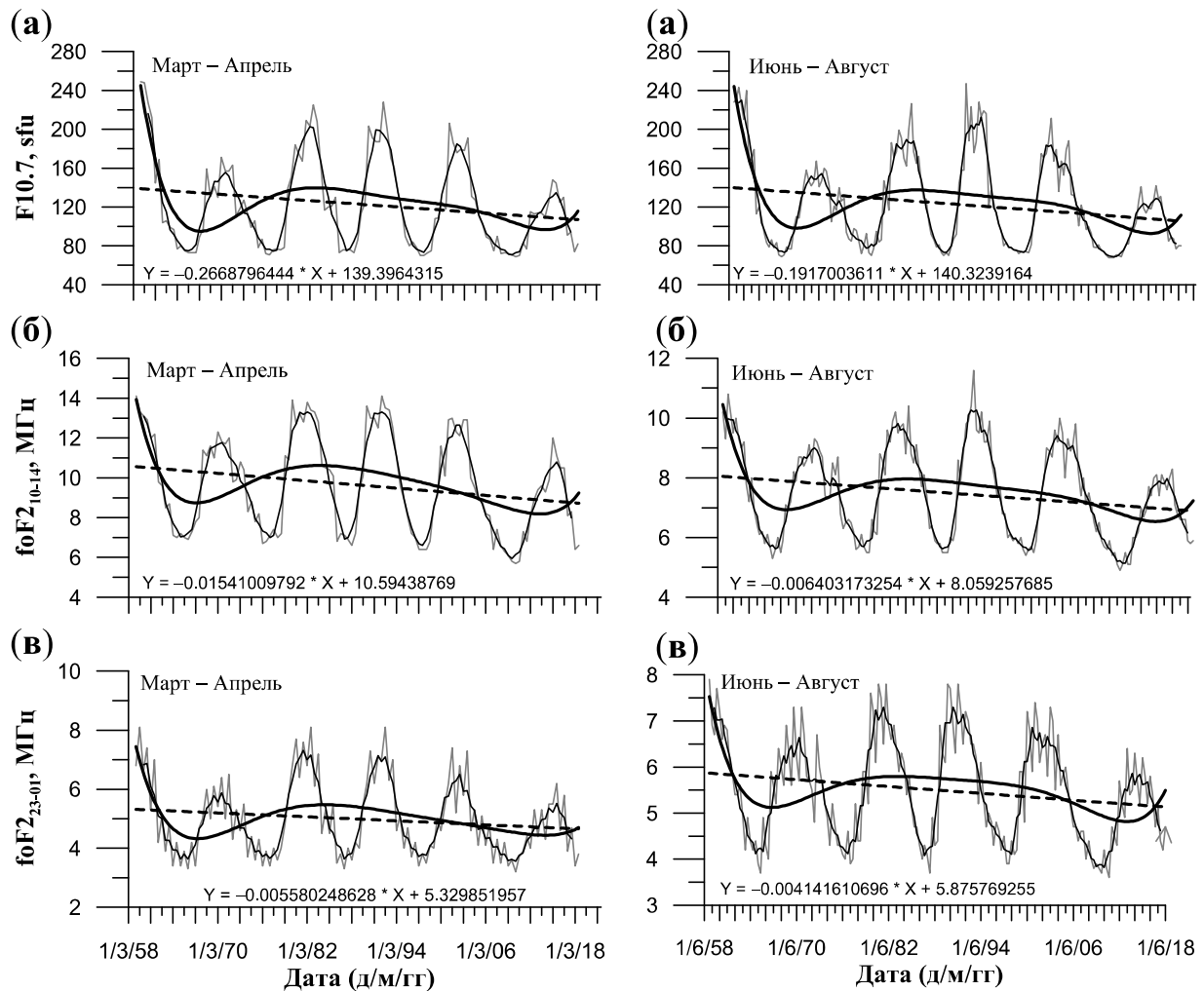


Рисунок 2 – Изменения индекса солнечной активности F10.7 (а), критической частоты F2слоя foF2 для 10–14LT (б) и 23–01LT (в) в периоды равноденствия и лета (серые и черные тонкие линии), линейный тренд (черные пунктирные линии) и долговременное колебание (черные сплошные линии).

Для более детального анализа изменчивости критических частот были рассчитаны суточные зависимости $foF2$ тренда « k » для каждого четного часа суток равноденственных, зимних и летних условий. Суточный ход значений « k » показан на рисунке 5.

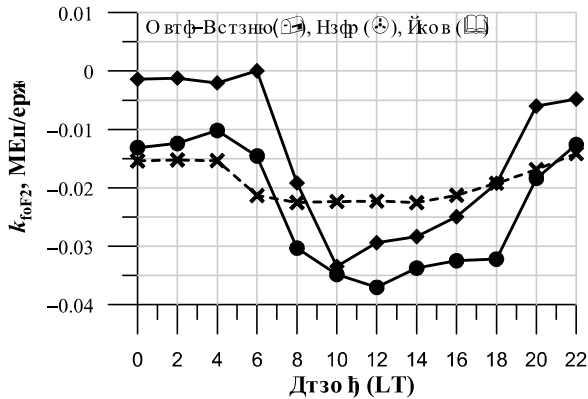


Рисунок 5 — Суточный ход $foF2$ тренда « k » по местному времени в равноденственных (символ ♦), зимних (символ ●) и летних (символ >) условиях.

Анализ суточного поведения $foF2$ тренда показывает отрицательный тренд для всех рассматриваемых условий, исключением является, практически, отсутствие тренда в ночное время (00-04LT) зимнего сезона. Максимальные отрицательные значения $foF2$ тренда (наблюдаются

в дневное время когда $-0.04 < k < -0.03$, $-0.035 < k < -0.025$ и $-0.02 < k < -0.025$ для равноденственного, зимнего и летнего сезонов соответственно. Ночные значения $foF2$ тренда значительно ниже, около $-0,015$ для летнего и равноденственного сезонов около нуля для зимнего сезона (см. табл. 1 и рис. 5).

Полученные нами результаты сопоставлены с результатами [6], где авторами в деталях исследованы вариации $foF2$ трендов, полученных с использованием данных трёх Европейских станций. Результаты сопоставления показали, что общая картина изменения $foF2$ тренда с сезоном и временем суток хорошо согласуется с результатами данной работы, хотя имеются некоторые расхождения по амплитуде суточной зависимости $foF2$ тренда, что, возможно, обусловлено региональными особенностями ионосферы с одной стороны и с другой стороны эффектами 11-летней цикличности солнечной активности, которые здесь не учитывались.

Далее на примере околополуденных условий были рассмотрены 11-летние (132-месячные) скользящие средние годовых значений $foF2$ ($foF2_{an}$), рисунок 6 (символ ●). В данном случае годовые значения $foF2_{an}$ были получены путем сглаживания месячных медианных значений $foF2$ с 12-месячным окном, что определило рассматриваемый период как 01.1958–10.2017. Таким образом, $foF2_{an}$ представляют собой годовые значения $foF2$, рассчитанные для каждого месяца.

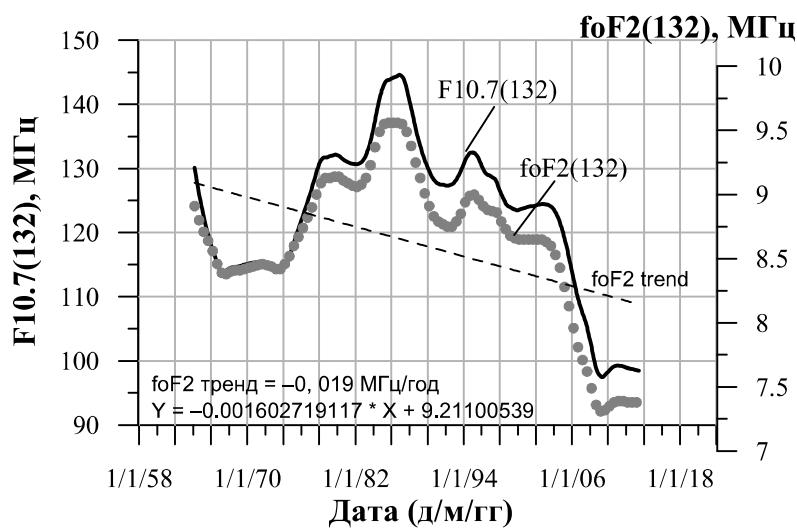


Рисунок 6 — Распределение годовых значений $foF2$ и $F10.7$ (сплошная линия), сглаженных методом скользящего среднего с 11-летним (132 месяца) окном. Пунктирная линия — линейный тренд.

Те же методы сглаживания были применены к данным F10.7, Рисунок 6 (сплошная линия). В результате применения методов сглаживания, исследуемые ряды foF2 (132) и F10.7 (132) представляют период с 07.1963 по 10.2012. Регрессионная зависимость foF2an от F10.7an показана на рисунке 7.

Рисунки 6 и 7 демонстрируют, что поведение ионосферы строго контролируется солнечной активностью. Кроме того, как foF2 (132), так и F10.7 (132) выявляют картину долговременных колебаний с периодом около четырех 11-летних солнечных циклов и трендовую

компоненту (штриховая линия) с трендом foF2 $-0,019$ МГц/год.

Далее выполняются расчеты dfoF2 (рисунок 8), которые представляют собой разницу между наблюдаемыми foF2 и рассчитанными с использованием регрессионной зависимости, показанной на рисунке 7. Значения dfoF2, сглаженные с 11-летним окном, dfoF2 (132), показаны на рисунке 9 (символ .), здесь же показано распределение сглаженных значений F10.7 (132) (сплошная линия) для этого периода. Для ясности пунктирные линии представляют собой полиномиальную аппроксимацию вариаций F10.7 (132) и dfoF2 (132).

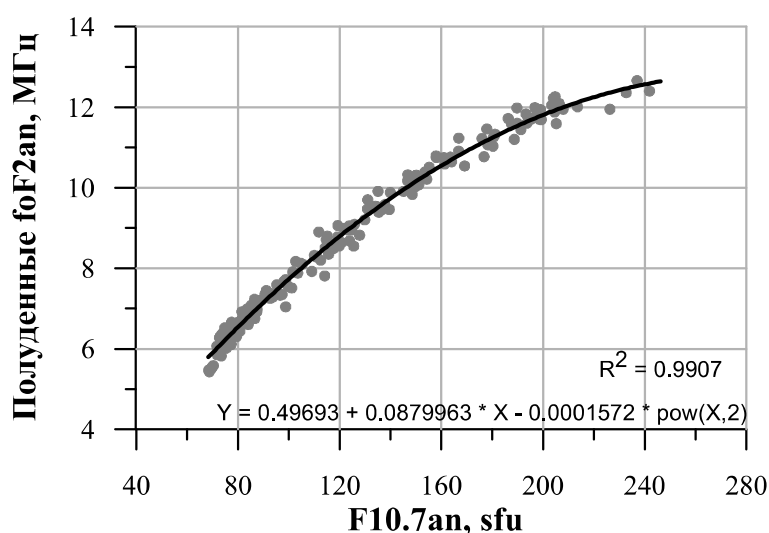


Рисунок 7 – Квадратичная регрессия между foF2an с F10.7an за период 01.1958 – 10.2017.

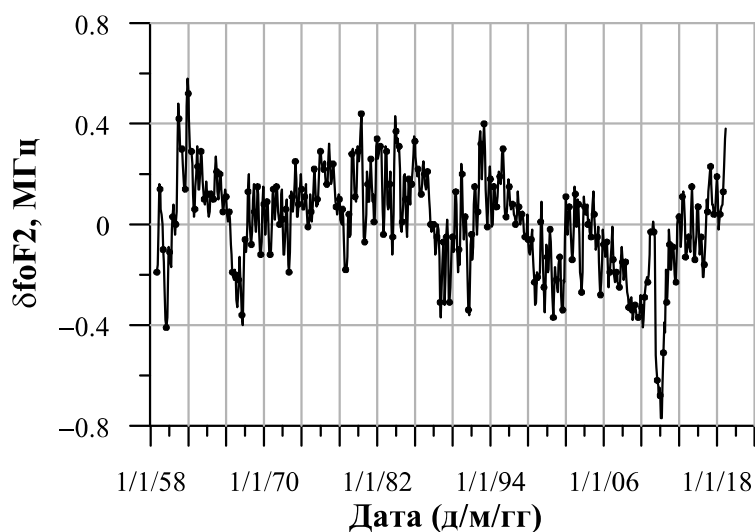


Рисунок 8 – Зависимость околополуденных значений dfoF2 от года в период 01.1958 – 10.2017.

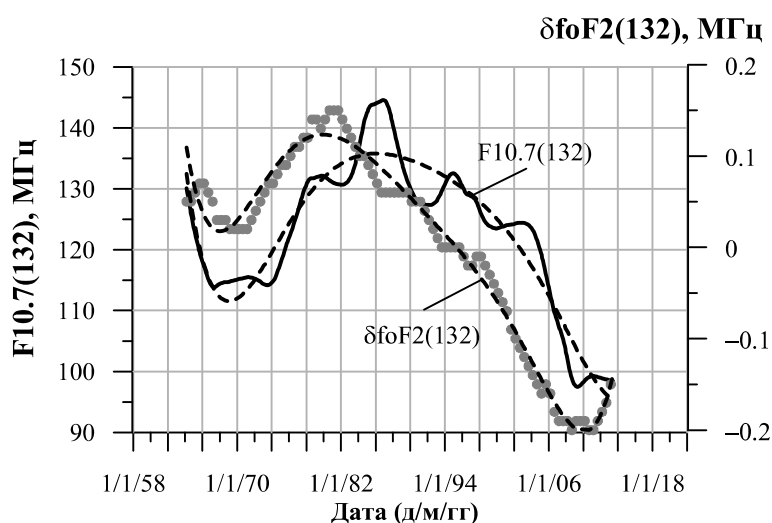


Рисунок 9 – 11-летние (132-месячные) скользящие средние значения околополуденных $dfoF2(132)$ и $F10.7(132)$ за период с 07.1963 по 10.2012.

Из рисунка 9 видно, что характер поведения $dfoF2(132)$ в целом отражает и ход $F10.7(132)$, но положение максимума во временном распределении $dfoF2(132)$, т.е. переход к фазе убывания значений $dfoF2(132)$, происходит раньше (около 1980 г.) относительно максимума в распределении $F10.7(132)$ (около 1986 г.). Последнее указывает на эффект дополнительного (к солнечной активности) влияния на распределение электронной концентрации в ионосфере с 1980 г. Здесь следует отметить ряд работ Данилова и Константиновой [6, 8 и ссылки в них], в основе которых лежит предположение о том, что с 1980 г. происходит изменение режима всей атмосферы в целом, что должно отражаться на параметрах слоя F2. Это предположение подробно обсуждается в [24]. Выявленная нами особенность резкого изменения поведения $dfoF2$ около 1980 года может служить иллюстрацией этого факта.

Далее была предпринята попытка изучить тренд изменений $foF2$ до и после 1980 г. Для примера были выбраны дневные условия зимнего сезона (январь). Выбор условий был обусловлен полученными выше результатами, в частности тем, что значение тренда $foF2$ больше в дневное время зимнего сезона (см. таблица 1 и рисунок 5). Следуя примеру работ [6, 8], возьмем период 1958–1979 гг. в качестве «эталонного» в предположении отсутствия влияния процессов глобального потепления в этот период. Период 1980–2001 гг. (такой же продолжительности) рассмотрим как анализируемый. Данные $F10.7$ и $foF2$ являются среднегодовыми. Для выявле-

ния трендов воспользуемся методом Данилова и Константиновой [8], что позволит сравнить полученные нами результаты с результатами этих авторов. Используя формулу регрессионной зависимости $foF2$ от $F10.7$ для «эталонного» периода (рис. 10), вычисляем «эталонные» значения $foF2$ для соответствующих значений $F10.7$ для обоих периодов.

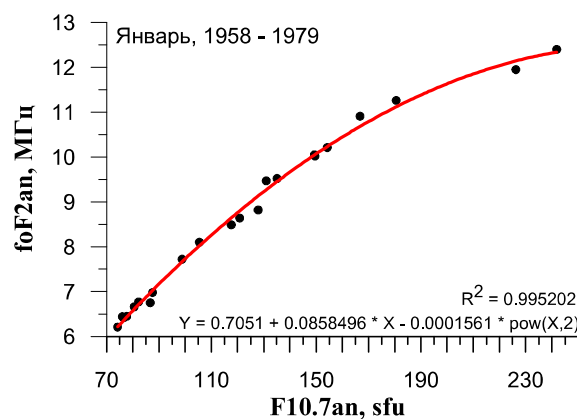


Рисунок 10 – Зависимость околополуденной $foF2an$ от индекса солнечной активности $F10.7an$ и аппроксимация этой зависимости (кривой) полиномом второй степени для «эталонного» периода января 1958–1979 гг.

Затем была рассчитана разность $dfoF2$ между наблюдаемыми и «эталонными» значениями критических частот, результаты расчетов представлены на рисунке 11. Точками обозначены

расчетные значения $dfoF2$, сплошная линия – сглаженный ход их распределения, а штриховая линия – трендовая составляющая. Наклон линейного тренда (угловой коэффициент «а») дает нам значение $foF2$ тренда, которое для «эталонного» периода практически равно нулю ($\sim 0,0006$ МГц/год) и примерно $-0,014$ МГц/год

для периода 1980–2001 гг. Поскольку ряд данных $dfoF2$ за анализируемый период достаточно короткий, его сглаживание с 11-летним окном не проводилось. При этом, чтобы избежать влияния эффектов «около 1980 г.» и «до глубокого минимума 2008–2009 гг.», длина ряда не увеличивалась.

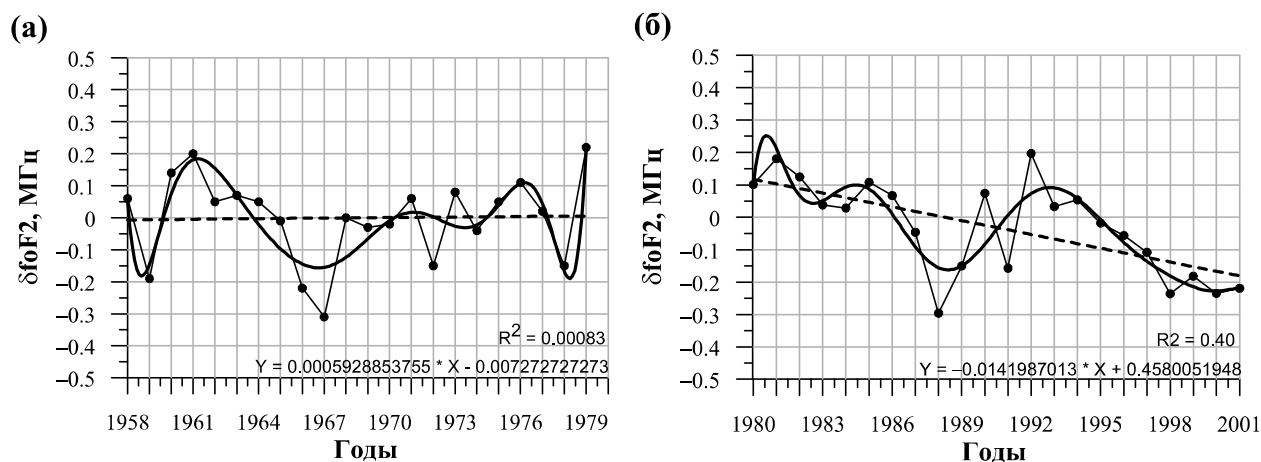


Рисунок 11 – Разность $dfoF2$ между наблюдаемыми и рассчитанными «эталонными» значениями критических частот. Штриховая линия – линейная аппроксимация вариаций $dfoF2$. Станция Алма-Ата, 10–14LT, январь, 1958–1979 (а) и 1980–2001 (б).

Для оценки изменения критических частот за анализируемый период относительно «эталонного» периода, была рассчитана регрессионная зависимость $foF2$ от $F10.7$ за период 1980–2001 гг., Рисунок 12.

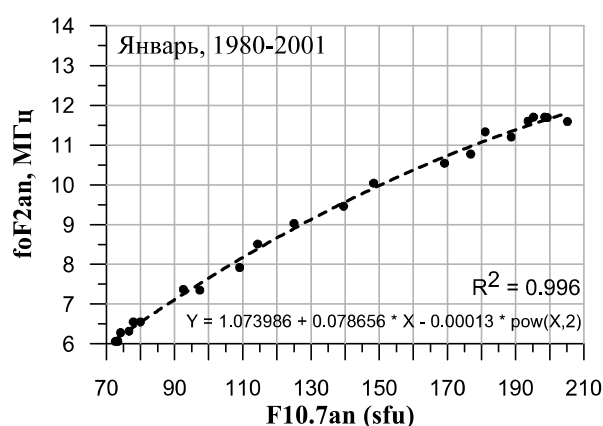


Рисунок 12 – То же, что и на рисунке 10, но только для периода 1989–2001 гг.

Затем, используя ряд фиксированных значений $F10.7$, заданных как в работе [8] от 70 до 200 sfu, по обеим зависимостям (рис. 10 и рис. 12) были рассчитаны значения $foF2$ для рассматриваемых 22-летних периодов. Среднее значение вычисленной разности между ними, $foF2_{1958-1979}$ минус $foF2_{1980-2001}$, показало заметное изменение – уменьшение значений критических частот после 1980 г. при $DfoF2 = 0,0586$ МГц. Полученные результаты по оценке тренда $foF2$ ($-0,014$ МГц/год) и изменению значений $foF2$ за 22-летний период после 1980 г. (1980–2001 гг.) по порядку величины соответствуют результатам работы [8].

Обсуждение

Долговременные тренды в ионосфере, в частности тренды в F2-слое критических частот, широко обсуждаются с 1990-х годов, т.е. с тех пор, как Roble, Dickinson и Rishbeth [1-3] предсказали эффекты в ионосфере от увеличения концентраций парниковых газов (прежде всего CO_2)

в атмосфере [см. раздел 2]. Хотя эти тренды и невелики, они могут служить, с одной стороны, индикаторами изменения климата, важных в прикладном плане ионосферных параметров, а с другой стороны, индикатором нарастающего роста концентраций парниковых газов в атмосфере. Если говорить об изменениях в F2-слое критических частот foF2 в зависимости от факторов антропогенного происхождения, то надо помнить о необходимости учета зависимости foF2 от других различных внешних воздействий, в первую очередь от солнечной активности.

В данной работе на основе медианных значений критических частот ионосферного слоя F2 foF2 за период 1957–2018 гг. исследована долговременная изменчивость вариаций foF2 (foF2 тренды, k) без исключения и с исключением эффектов солнечной активности. Рассматривались дневные и ночные условия равноденствия, зимнего и летнего сезонов. Показано, что тренды foF2 устойчиво отрицательны для всех рассмотренных условий и зависят от времени суток. Амплитуда суточной зависимости тренда foF2 максимальна в дневные часы зимнего и равноденственного сезонов, численные значения составляют около $-0,03 \pm 0,005$ МГц/год. В летний сезон дневные значения k составляют около $-0,02$ МГц/год. Более того, на примере полуденных и полуденных условий показана высокая степень корреляции между наклоном линий тренда foF2 ($afoF2$) и трендом F10.7 ($aF10.7$), что свидетельствует о том, что медленное изменение foF2 (пропорциональное изменению электронной концентрации в слое F2) регулируется процессами на Солнце, рисунок 4. Исключение сезонных вариаций (сглаживание с окном $W=12$ месяцев) и циклических вариаций (с окном $W=132$ месяца (11 лет)) в данных foF2 выявило долговременную осцилляцию как в вариациях foF2, так и в вариациях F10.7, рисунок 6. Представляется, что в данном случае попытка исключить эффекты солнечной активности из вариаций foF2 оказалась неудачной в том смысле, что это снова привело к новой картине связи foF2 и F10.7, но уже на фоне иного масштаба вариаций, на фоне вариаций с периодом более 40 лет.

Применение той же методики к данным dfoF2 (разнице между наблюдаемыми и расчетными значениями по регрессионной зависимости между foF2 и F10.7 (рисунок 7)) выявило интересный факт: положения максимумов во временных вариациях dfoF2(132) и F10.7(132) не совпадают, максимум значений dfoF2(132)

приходится на более раннюю дату (примерно 1980 г.) относительно максимума F10.7(132), который приходится примерно на 1986 г. Получается, что если рассматривать тренды foF2 «кусочно» на фоне столь долговременного изменения солнечной активности, то расчеты могут давать разные результаты. Возникает вопрос: в чем причина такого расхождения? Здесь особенно примечателен “эффект 1980 года”, когда, как полагают авторы [6, 8 и ссылки в них], антропогенные процессы начинают играть роль в атмосферных и ионосферных процессах. Конечно, можно предположить, что такое расхождение максимумов могло быть результатом упрощенного подхода к усреднению и сглаживанию. Однако, все ряды сглаживались одним и тем же методом и с одним и тем же окном. Несомненно, полученный результат требует тщательного анализа и исследования, которые будут выполнены в дальнейшем. Что касается природы долговременной осцилляции параметров foF2 и F10.7, то на данный момент это выходит за рамки планов настоящей работы, но станет предметом дальнейших исследований.

Выводы

Данная работа посвящена исследованию долговременных вариаций и трендов критической частоты слоя F2. Работа выполнена на основе данных наземного вертикального зондирования ионосферы, полученных на станции Алма-Ата за период с 07.1957 по 04.2018.

Показано, что долговременное поведение ионосферы строго контролируется вариациями солнечной активности, что проявляется в высокой степени детерминированности регрессионной связи между значениями критических частот и индексом солнечной активности F10.7. Выявлен устойчивый отрицательный тренд foF2, его зависимость от сезона и времени суток, что, по сути, следует отнести к климатическим изменениям электронной концентрации в области F2 ионосферы.

Анализ среднегодовых значений F10.7 и foF2, сглаженных с 11-летним окном, выявил долговременную (около четырех 11-летних солнечных циклов) осцилляцию в вариациях обоих параметров, что также свидетельствует о доминирующей роли солнечной активности на поведение состояния F-области ионосферы. Показано, что долговременные вариации разности наблюдаемых и прогнозируемых значе-

ний критических частот (f_oF_2), сглаженных с 11-летним окном, также в целом контролируются солнечной активностью, однако обнаруживается заметное смещение положения максимума в распределении f_oF_2 на более раннюю дату (около 1980 г.) относительно максимума в распределении $F_{10.7}$ (около 1986 г.). Расчёты f_oF_2 тренда на участках до и после 1980 г. показал изменение его величины практически от нуля до -0.014 МГц/год соответственно, что может быть связано с антропогенным воздействием.

Благодарности: Данное исследование спонсировано Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант №BR21882375 «Создание и модернизация изделий космической техники повышенной надежности наземного и космического сегментов и исследование ионосферы»). Данные по $F_{10.7}$ загружены с сайта <http://www.swpc.noaa.gov/>. Авторы выражают благодарность О. Шкрамада за помощь в обработке материалов архивных ионосферных данных.

Литература

1. Roble, R.G.; Dickinson, R. E. How will changes in carbon dioxide and methane modify the mean structure of the mesosphere and thermosphere? *Geophys. Res. Lett.* 1989, *16*, 1441–1444. DOI:10.1029/gl016i012p01441.
2. Rishbeth, H. A greenhouse effect in the ionosphere? *Planet. Space Sci.* 1990, *38*, 945–948. DOI: 10.1016/0032-0633(90)90061-T.
3. Rishbeth, H.; Roble, R.G. Cooling of the upper atmosphere by enhanced greenhouse gases – modelling of the thermospheric and ionospheric effects. *Planet. Space Sci.* 1992, *40*, 1011–1026. DOI: 10.1016/0032-0633(92)90141-A.
4. Laštovička, J. Trends in the upper atmosphere and ionosphere: Recent progress. *J. Geophys. Res.—Space Physics* 2013, *118*, 3924–3935. DOI: 10.1002/jgra.50341.
5. Danilov, A.D. Seasonal and diurnal variations in f_oF_2 trends. *J. Geophys. Res.—Space Physics* 2015, *120* (5), 3868–3882. DOI: 10.1002/2014JA020971.
6. Danilov A. D. and Konstantinova, A. V. Variations in f_oF_2 Trends with Season and Local Time. *Geomagnetism and Aeronomy* 2015, *55* (1), 51–58. DOI: 10.1134/S0016793215010041.
7. Danilov, A.D. and Konstantinova, A.V. Comparison of trends in parameters of the F2 layer obtained by various authors. *Geomagnetism and Aeronomy* 2015, *55* (4), 457–466. DOI: 10.1134/S0016793215030056.
8. Danilov, A.D. and Konstantinova, A.V. Trends in the critical frequency f_oF_2 after 2009. *Geomagnetism and Aeronomy* 2016, *56*, (3), 302–310. DOI: 10.1134/S0016793216030026.
9. Perrone, L.; Mikhailov, A.; Cesaroni, C.; Alfonsi, L.; De Santis, L.; Pezzopane, M. and Scotto, C. Long-term variations of the upper atmosphere parameters on Rome ionosonde observations and their interpretation. *J. Space Weather Space Clim.* 2017, *7*, A21. DOI: 10.1051/swsc/2017021.
10. Yue, X.; Hu, L.; Wei, Y.; Wan, W.; & Ning, B. Ionospheric trend over Wuhan during 1947–2017: Comparison between simulation and observation. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2018, *123*, 1396–1409. DOI: 10.1002/2017JA024675.
11. Laštovička, J. Long-Term Changes in Ionospheric Climate in Terms of f_oF_2 . *Atmosphere* 2022, *13*, 110. DOI: 10.3390/atmos13010110.
12. Laštovička, J. Progress in investigating long-term trends in the mesosphere, thermosphere, and ionosphere. *Atmos. Chem. Phys.* 2023, *23*, 5783–5800. DOI: 10.5194/acp-23-5783-2023.
13. Laštovička, J.; Jelinek, S. Problems in calculating long-term trends in the upper atmosphere. *J. Atmos. Sol.–Terr. Phys.* 2019, *189*, 80–86. DOI: 10.1016/j.jastp.2019.04.011.
14. Laštovička, J. A review of recent progress in trends in the upper atmosphere. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 2017, *163*, 2–13. DOI: 10.1016/j.jastp.2017.03.009.
15. Danilov, A. D., and Konstantinova, A. V. Long-term variations of the parameters of the middle and upper atmosphere and ionosphere (review). *Geomagnetism and Aeronomy* 2020, *60*, 397–420. DOI: 10.1134/S0016793220040040.
16. Laštovička J. What is the optimum solar proxy for long-term ionospheric investigations? *Adv. Space Res.* 2021, *67*(1), 2–8. DOI: 10.1016/j.asr.2020.07.025.
17. Laštovička, J. The best solar activity proxy for long-term ionospheric investigations. *Adv. Space Res.* 2021, *68*, 2354–2360. DOI: 10.1016/j.asr.2021.06.032.
18. Laštovička, J. Dependence of long-term trends in f_oF_2 at middle latitudes on different solar activity proxies. *Adv. Space Res.* 2024, *73*(1), 685–689. DOI: 10.1016/j.asr.2023.09.047.
19. Laštovička J.; Burešová, D. Relationships between f_oF_2 and various solar activity proxies. *Space Weather*. 2023, *21*, e2022SW003359. DOI: 10.1029/2022SW003359.
20. Danilov, A.D.; Berbeneva, N.A. Statistical analysis of the dependence of the critical frequency f_oF_2 on various indices of solar activity. *Geomagnetism and Aeronomy* 2023, *63*, № 5, 610–629. DOI: 10.31857/S0016794023600588.
21. Danilov, A.D.; Konstantinova, A.V.; Berbeneva, N.A. Further detailed analysis of the f_oF_2 dependence on solar activity. *Heliogeophysical Research* 2023, *40*, 68 – 80. DOI: 10.5425/2304-7380_2023_40_68.
22. Gordiyenko, G.I.; Vodyannikov, V.V.; Yakovets, A.F. and Litvinov, Yu.G. A long-term trend in the F2-layer critical frequency as observed at Alma-Ata ionosonde station. *Earth, Planets and Space* 2014, *66*:125. DOI: 10.1186/1880-5981-66-125.

23. Gordiyenko, G.I.; Yakovets, A.F.; Litvinov, Yu.G. Long-term trends in the upper and lower ionosphere. *Eurasian Union of Scientists (EUS)*, 2019, 8 (65), 31–40. DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2019.4.65.278.
24. Danilov, A.D. Long-term trends in the upper atmosphere and ionosphere (a review), *Geomagnetism and Aeronomy*, 2012, 52 (3), 271–291. DOI: 10.1134/S0016793212030036.

References

1. Roble, R.G.; Dickinson, R. E. How will changes in carbon dioxide and methane modify the mean structure of the mesosphere and thermosphere? *Geophys. Res. Lett.* 1989, 16, 1441–1444. DOI:10.1029/gl016i012p01441.
2. Rishbeth, H. A greenhouse effect in the ionosphere? *Planet. Space Sci.* 1990, 38, 945–948. DOI: 10.1016/0032-0633(90)90061-T.
3. Rishbeth, H.; Roble, R.G. Cooling of the upper atmosphere by enhanced greenhouse gases – modelling of the thermospheric and ionospheric effects. *Planet. Space Sci.* 1992, 40, 1011–1026. DOI: 10.1016/0032-0633(92)90141-A.
4. Laštovička, J. Trends in the upper atmosphere and ionosphere: Recent progress. *J. Geophys. Res.— Space Physics* 2013, 118, 3924–3935. DOI: 10.1002/jgra.50341.
5. Danilov, A.D. Seasonal and diurnal variations in foF2 trends. *J. Geophys. Res.— Space Physics* 2015, 120 (5), 3868–3882. DOI: 10.1002/2014JA020971.
6. Danilov A. D. and Konstantinova, A. V. Variations in foF2 Trends with Season and Local Time. *Geomagnetism and Aeronomy* 2015, 55 (1), 51–58. DOI: 10.1134/S0016793215010041.
7. Danilov, A.D. and Konstantinova, A.V. Comparison of trends in parameters of the F2 layer obtained by various authors. *Geomagnetism and Aeronomy* 2015, 55 (4), 457–466. DOI: 10.1134/S0016793215030056.
8. Danilov, A.D. and Konstantinova, A.V. Trends in the critical frequency foF2 after 2009. *Geomagnetism and Aeronomy* 2016, 56, (3), 302–310. DOI: 10.1134/S0016793216030026.
9. Perrone, L.; Mikhailov, A.; Cesaroni, C.; Alfonsi, L.; De Santis, L.; Pezzopane, M. and Scotto, C. Long-term variations of the upper atmosphere parameters on Rome ionosonde observations and their interpretation. *J. Space Weather Space Clim.* 2017, 7, A21. DOI: 10.1051/swsc/2017021.
10. Yue, X.; Hu, L.; Wei, Y.; Wan, W.; & Ning, B. Ionospheric trend over Wuhan during 1947–2017: Comparison between simulation and observation. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2018, 123, 1396–1409. DOI: 10.1002/2017JA024675.
11. Laštovička, J. Long-Term Changes in Ionospheric Climate in Terms of foF2. *Atmosphere* 2022, 13, 110.
12. DOI: 10.3390/atmos13010110.
13. Laštovička, J. Progress in investigating long-term trends in the mesosphere, thermosphere, and ionosphere. *Atmos. Chem. Phys.* 2023, 23, 5783–5800. DOI: 10.5194/acp-23-5783-2023.
14. Laštovička, J.; Jelínek, S. Problems in calculating long-term trends in the upper atmosphere. *J. Atmos. Sol.–Terr. Phys.* 2019, 189, 80–86. DOI: 10.1016/j.jastp.2019.04.011.
15. Laštovička, J. A review of recent progress in trends in the upper atmosphere. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 2017, 163, 2–13. DOI: 10.1016/j.jastp.2017.03.009.
16. Danilov, A. D., and Konstantinova, A. V. Long-term variations of the parameters of the middle and upper atmosphere and ionosphere (review). *Geomagnetism and Aeronomy* 2020, 60, 397–420. DOI: 10.1134/S0016793220040040.
17. Laštovička J. What is the optimum solar proxy for long-term ionospheric investigations? *Adv. Space Res.* 2021, 67(1), 2–8. DOI: 10.1016/j.asr.2020.07.025.
18. Laštovička, J. The best solar activity proxy for long-term ionospheric investigations. *Adv. Space Res.* 2021, 68, 2354–2360. DOI: 10.1016/j.asr.2021.06.032.
19. Laštovička, J. Dependence of long-term trends in foF2 at middle latitudes on different solar activity proxies. *Adv. Space Res.* 2024, 73(1), 685–689. DOI: 10.1016/j.asr.2023.09.047.
20. Laštovička J.; Burešová, D. Relationships between foF2 and various solar activity proxies. *Space Weather.* 2023, 21, e2022SW003359. DOI: 10.1029/2022SW003359.
21. Danilov, A.D.; Berbeneva, N.A. Statistical analysis of the dependence of the critical frequency foF2 on various indices of solar activity. *Geomagnetism and Aeronomy* 2023, 63, № 5, 610–629. DOI: 10.31857/S0016794023600588.
22. Danilov, A.D.; Konstantinova, A.V.; Berbeneva, N.A. Further detailed analysis of the foF2 dependence on solar activity. *Heliogeophysical Research* 2023, 40, 68 – 80. DOI: 10.5425/2304-7380_2023_40_68.
23. Gordiyenko, G.I.; Vodyannikov, V.V.; Yakovets, A.F. and Litvinov, Yu.G. A long-term trend in the F2-layer critical frequency as observed at Alma-Ata ionosonde station. *Earth, Planets and Space* 2014, 66:125. DOI: 10.1186/1880-5981-66-125.
24. Gordiyenko, G.I.; Yakovets, A.F.; Litvinov, Yu.G. Long-term trends in the upper and lower ionosphere. *Eurasian Union of Scientists (EUS)*, 2019, 8 (65), 31–40. DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2019.4.65.278.
25. Danilov, A.D. Long-term trends in the upper atmosphere and ionosphere (a review), *Geomagnetism and Aeronomy*, 2012, 52 (3), 271–291. DOI: 10.1134/S0016793212030036.

Сведения об авторах:

Гордиенко Г.И., ТОО «Институт ионосферы», кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник (Алматы, Казахстан, e-mail: ggordiyenko@mail.ru)

Яковец А.Ф., ТОО «Институт ионосферы», кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник (Алматы, Казахстан, e-mail: artyak40@mail.ru)

Литвинов Ю.Г., ТОО «Институт ионосферы», кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник (Алматы, Казахстан, e-mail: yurii-litvinov@mail.ru)

Жиганбаев М.Ю., ТОО «Институт ионосферы», магистр, научный сотрудник (Алматы, Казахстан, e-mail: murat-0509@mail.ru)

Information about authors:

Gordiyenko G.I. – Candidate of Physical and Mathematical Sciences (PhD), Leading Researcher, LLP “Institute of ionosphere” (Almaty, Kazakhstan, e-mail: ggordiyenko@mail.ru)

Yakovets A.F. – Candidate of Physical and Mathematical Sciences (PhD), Senior staff scientist, LLP “Institute of ionosphere”, (Almaty, Kazakhstan, e-mail: artyak40@mail.ru).

Litvinov Yu.G. – Candidate of Physical and Mathematical Sciences (PhD), Senior staff scientist, LLP “Institute of ionosphere” (Almaty, Kazakhstan, e-mail: yurii-litvinov@mail.ru).

Zhiganbaev M.Yu. – Master of Science, Junior researcher, LLP “Institute of ionosphere” (Almaty, Kazakhstan, e-mail: murat-0509@mail.ru)

Авторлар туралы мәлімет:

Гордиенко Г.И. – физика-математика ғылымдарының кандидаты, жетекші ғылыми қызметкер, “Ионосфера институты” ЖШС (Алматы, Қазақстан, e-mail: ggordiyenko@mail.ru)

Яковец А.Ф. – физика-математика ғылымдарының кандидаты, аға ғылыми қызметкер, “Ионосфера институты” ЖШС (Алматы, Қазақстан, e-mail: artyak40@mail.ru)

Литвинов Ю.Г. – физика-математика ғылымдарының кандидаты, аға ғылыми қызметкер, “Ионосфера институты” ЖШС (Алматы, Қазақстан, e-mail: yurii-litvinov@mail.ru)

Жиганбаев М.Ю.* – магистр, ғылыми қызметкер, “Ионосфера институты” ЖШС (Алматы, Қазақстан, e-mail: murat-0509@mail.ru)