

Дистанционное зондирование сред

DOI 10.24412/2221-2574-2023-1-5-11

УДК 537.874; 537.876

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВАРИАЦИЙ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ СЛОЯ F2 ИОНОСФЕРЫ ПРИ СПОКОЙНЫХ ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ НА РАЗЛИЧНЫХ ШИРОТНЫХ СТАНЦИЯХ

Иванникова Анна Глебовна

младший научный сотрудник отдела Института прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова¹.

E-mail: antanta-annett@yandex.ru

Котонаева Надежда Геннадьевна

доктор физико-математических наук, доцент, заместитель начальника отдела Института прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова¹.

Иванников Дмитрий Анатольевич

кандидат технических наук, доцент, начальник отдела АО «ННПО имени М.В.Фрунзе»².

E-mail: ccs5000@mail.ru

¹Адрес: 129128, Российская Федерация, 129128, г. Москва, ул. Ростокинская, д. 9.

²Адрес: 603009, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 174.

Аннотация: Рассмотрены часовые данные критических частот слоя F2 ионосферы, полученные со станций зондирования ионосферы, расположенных в зонах среднеширотной, субавроральной ионосферы и на границе данных зон: Ростов, Москва и Ленинград с 1957 по 2019 год. Приведены результаты статистического анализа вариаций критической частоты слоя F2 ионосферы при спокойных гелиогеофизических условиях для различных широтных станций. Графически показаны суточные ходы квантилей отклонений критической частоты слоя F2 ионосферы от медианы, вычисленной за 27 предыдущих суток уровнями 3% и 5% на всех вышеуказанных станциях для разных сезонов и времени суток. Выявлена широтная зависимость вариаций критической частоты слоя F2 ионосферы. Показано, что на низких широтах суточный ход квантилей отклонений критической частоты слоя F2 ионосферы от медианы имеет более выраженную форму, чем в области высоких широт. На станции средних широт суточный ход более выражен, чем на высокоширотной станции, но менее, чем на низкоширотной. Также, в высокоширотной области присутствует большее количество значительных ионосферных возмущений, чем в области низких и средних широт вследствие влияния на неё внешних факторов, специфических для данной области атмосферы. Особенно сильно разница выражена в зимнее время, тогда как в летний период отклонения критической частоты слоя F2 ионосферы от медианы для различных широт отличаются незначительно. В течение суток наиболее сильно заметна разница в отклонениях между станциями разных широт в предрассветный и послезакатный период.

Ключевые слова: критические частоты слоя F2 ионосферы, станции зондирования ионосферы, статистический анализ вариаций критической частоты, индекс геомагнитной активности, ионосферные возмущения.

Введение

Прогнозирование вариаций критической частоты слоя F2 ионосферы является одной из важных задач при её исследовании [1–3]. Установление зависимостей между изменениями критической частоты слоя F2 ионосферы и различными внешними факторами позволяет

определить оптимальные начальные условия для нахождения законов, которые можно использовать для описания поведения ионосферы в будущем [4–6]. Одним из важнейших факторов, оказывающих влияние на вариативность критической частоты слоя F2 ионосферы, является широта пункта наблюдения [7].

Определение взаимосвязи вариативности критической частоты слоя $F2$ с широтой наблюдательного пункта чрезвычайно актуально для прогнозирования ее состояния.

Основными задачами данной работы является сравнительный анализ вариаций критической частоты слоя $F2$ ионосферы с дифференцированной оценкой влияния солнечной и геомагнитной активности (в отличие от исследований [8]) при спокойных гелиогеофизических условиях на различных широтных станциях, а также поиск статистических закономерностей вариаций критической частоты и их количественных характеристик в зависимости от широты наблюдательного пункта.

Для исследования были рассчитаны квантили отклонений критической частоты слоя $F2$ ионосферы от медианы, высчитанной за 27 предыдущих суток на станциях Москва, Ростов и Ленинград уровнями 3 и 5%.

Квантилем уровня α распределения случайной величины X в данном случае называется число X_α , такое что:

$$P(X(t_0) \leq X_\alpha) = \alpha,$$

где $X(t_0)$ — отклонение текущего значения критической частоты f_0F2 от медианы в момент времени t_0 (ч).

При этом:

$$X(t_0) = (f_0F2_{med} - f_0F2) | t = t_0, \alpha \leq \alpha_p(\tau) < \beta,$$

где f_0F2_{med} — 27-дневная плавающая медиана критической частоты для времени t_0 ; f_0F2 — текущее значение критической частоты слоя $F2$; α, β — границы уровня геомагнитной активности.

Для описания уровня геомагнитной активности использован эффективный интегральный индекс геомагнитной активности A_{pt} , который наилучшим образом коррелирует с поведением ионосферы [9]. За низкую геомагнитную активность принято значение $A_{pt} \leq 10$.

Для описания солнечной активности использовано число Вольфа [10], отражающее количество солнечных пятен. За низкую солнечную активность приняты моменты времени, при которых число Вольфа $W < 70$.

Для создания необходимых выборок были проанализированы данные наблюдения критической частоты f_0F2 на различных широтных станциях — Москва, Ростов и Ленинград за период 1957 по 2019 годы. Каждому измеренному значению ставилось в соответствие медианное значение за 27 суток (13 дней до и 13 дней после получения конкретного значения). Из данного объема выбирались выборки, полученные в дни с низкой солнечной и геомагнитной активностью. Рассмотрены значения уровней квантилей $\alpha = 0,05; 0,03$ при отрицательных отклонениях от медианы, и $\alpha = 0,95; 0,97$ при положительных отклонениях от медианы. Исследуемые выборки группировались по месяцам, для анализа использовались данные конкретных ионосферных наблюдательных пунктов, оборудованных ионозондами вертикального радиозондирования.

Сравнение квантилей 3% и 5% на различных широтах

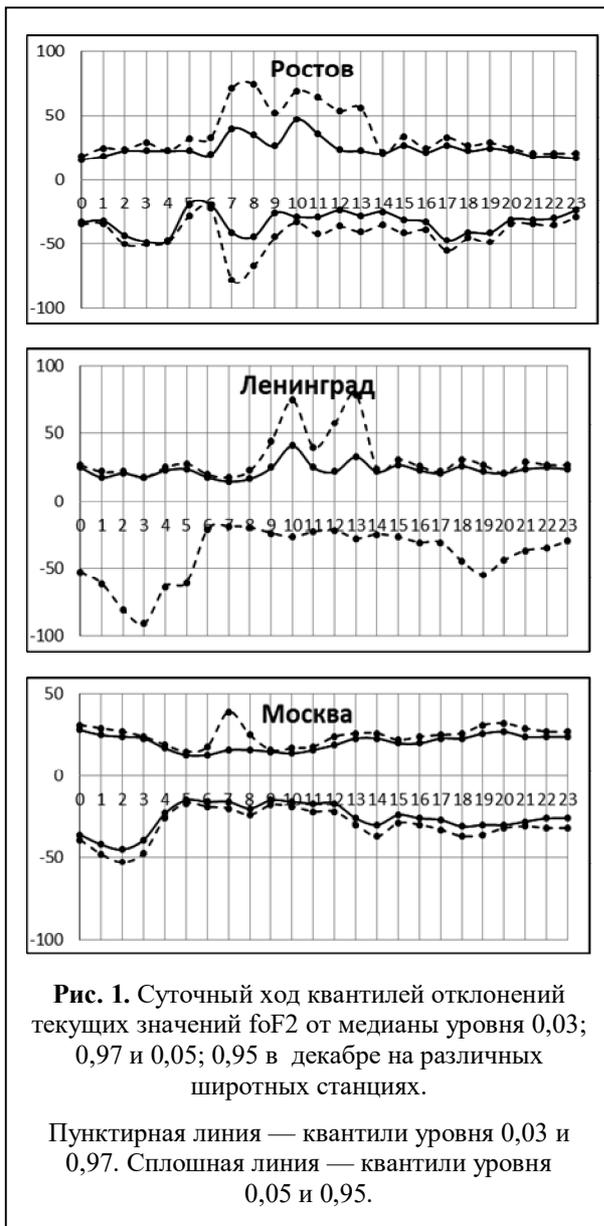
На рис. 1 представлены значения суточных ходов квантилей отклонений текущих значений f_0F2 от медианы уровня 0,03; 0,97 и 0,05; 0,95 в декабре на различных широтных станциях (Ростов, Ленинград, Москва).

Квантили уровнями 3 и 5% отличаются на 5–10% на всех станциях и до 40% во время сильного увеличения отклонений. Примерно такая же закономерность наблюдается в другие сезоны на всех широтах.

Суточные вариации в различные месяцы.

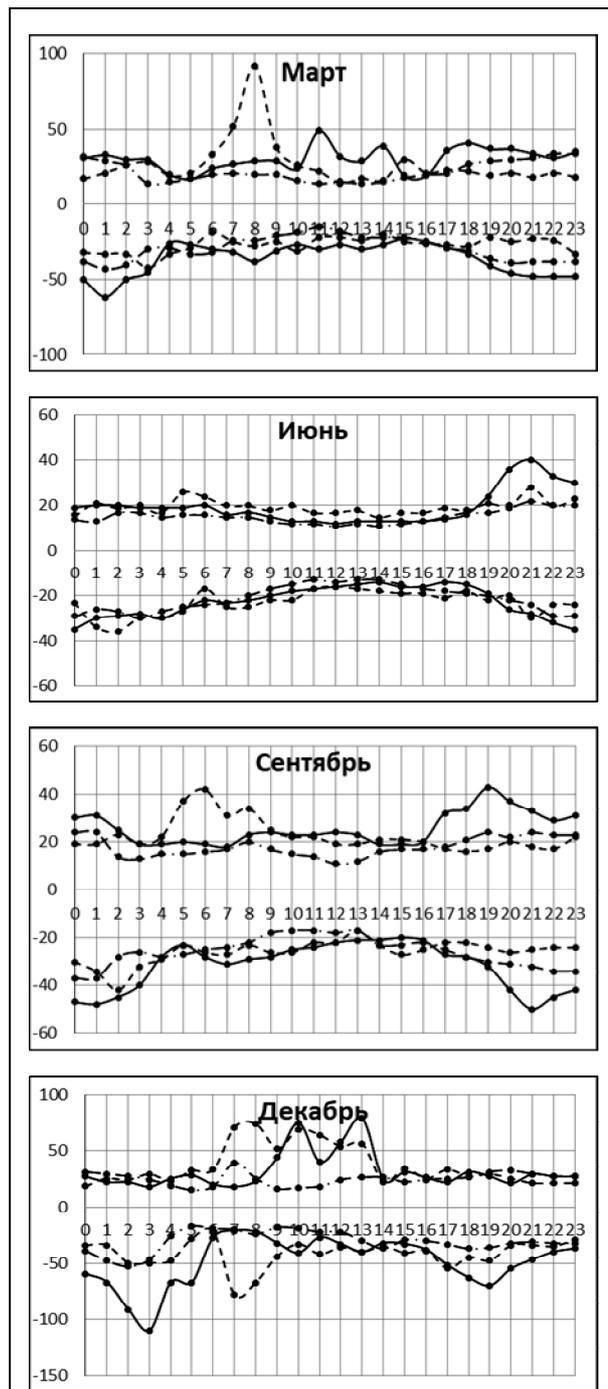
На рис. 2 показан суточный ход квантилей отклонений текущих значений f_0F2 от медианы уровня 0,03 и 0,97 в различные месяцы (март, июнь, сентябрь, декабрь) на различных широтных станциях при спокойных гелиогеофизических условиях.

В зимний период отклонения на всех станциях имеют менее выраженный суточный ход, чем в другие периоды, как в положительной, так и в отрицательной области, что обусловлено большим количеством незначительных воз-



мущений. На станции Ростов возмущения наиболее сильные и достигают порядка 10%. Суточный ход на станции Москва наиболее сглажен. При этом суточные ходы отличаются: наибольшие отклонения в предрассветный период наблюдаются на самой высокоширотной станции из рассматриваемых, наименьший — на среднеширотной.

В летний период суточные ходы хорошо выражены на станции Ленинград и Москва, менее выражен суточный ход на станции Ростов, т.к. имеет множество незначительных (до 5%) отклонений как в положительной, так



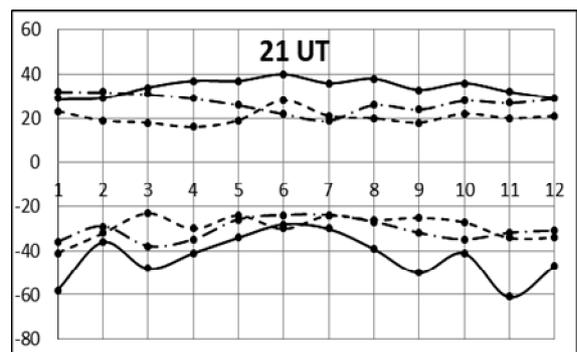
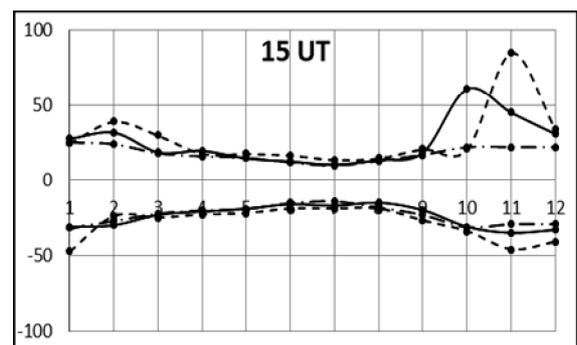
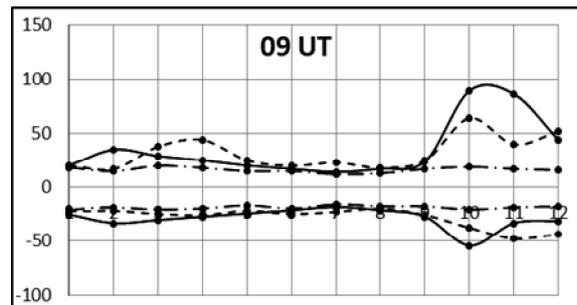
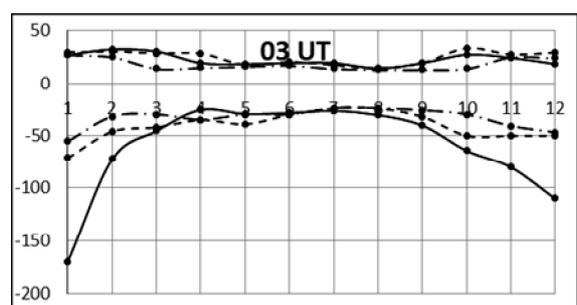


Рис. 3. Годовой ход квантилей отклонений текущих значений f_0F2 от медианы уровня 0,03 и 0,97 в различное время суток на различных широтных станциях при спокойных геогелиофизических условиях.

Пунктирная линия — Ростов. Штрих-пунктирная линия — Москва. Сплошная линия — Ленинград.

и в отрицательной области. Послезакатный рост отклонений больше с увеличением широты станции. В отрицательных отклонениях это просматривается хорошо, в положительных отклонениях присутствуют возмущения на станции Ростов, мешающие сделать однозначный вывод.

Сезонные вариации в различное время суток

На рис. 3 показан годовой ход квантилей отклонений текущих значений f_0F2 от медианы уровня 0,03 и 0,97 в различное время суток на различных широтных станциях при спокойных геогелиофизических условиях.

В 03 UT на всех станциях наблюдается значительное увеличение отклонений в отрицательной области в зимний период. Особенно ярко это выражено на станции Ленинград, где в январе уровень отрицательных отклонений достигает 170%. Менее выражено в Ростове (до 65%) и еще меньше в Москве (до 48%).

В 09 UT наблюдается значительное увеличение отклонений в положительной области и менее значительное в отрицательной в октябре. Наиболее ярко это выражено также на станции Ленинград (до 77% в положительной области и до 42% в отрицательной). Данный всплеск отсутствует на станции Москва. Вероятно, он происходит в другое время. В Ростове данный всплеск менее выражен.

В 15 UT на всех станциях наблюдается рост отклонений в положительной и отрицательной области с октября по декабрь. Наиболее он выражен на станции Ленинград в положительной области, где достигает 35%.

В 21 UT всплеск отклонений в отрицательной области имеется лишь на станции Ленинград в ноябре и достигает 54%. Однако в 21 UT отклонения на всех станциях во все сезоны достигают порядка 20–30% в сравнении с 10–15% в другое время суток.

Выводы

Вариативность в поведении ионосферы существенно различается на различных широтных станциях при спокойной геогелиофизической активности.

На станции Ростов зарегистрированы значительные отклонения — до 50% в положительной и отрицательной областях в некоторые месяцы (декабрь, март) и менее значительные — до 30% в положительной области, 40% в отрицательной области в осенний период (сентябрь) и 30% в отрицательной области в летний период. При этом широта станции Ростов ниже других станций.

Менее значительные отклонения в положительной области наблюдаются на станции Ленинград — до 40% зимой и 30% в другие сезоны. В отрицательной области на станции Ленинград наблюдаются максимальные отклонения до 90% зимой, до 30% летом и 40% в демисезонный период. Широта станции Ленинград выше других станций.

Во все сезоны наиболее нестабильны отклонения на станции Ростов. Это хорошо видно в период равноденствия, для которого характерны ионосферные бури, в положительной области в 6–8 утра, где присутствуют значительные ионосферные возмущения.

Наиболее спокойным поведением обладает ионосфера на среднеширотной станции Москва. На других станциях, как с увеличением, так и с уменьшением широты, наблюдаются различные всплески даже в спокойных геогелиофизических условиях. Данные особенности в поведении ионосферы имеют разную природу и могут быть связаны со специфическими процессами, характерными отдельно для нижних и высоких широт.

Литература

1. Дёминов М.Г. Ионосфера Земли: закономерности и механизмы // В сб. «Электромагнитные и плазменные процессы от недр Солнца до недр Зем-

ли. Юбилейный сборник ИЗМИРАН-75». М.: ИЗМИРАН, 2015. С. 295–346.

2. Брюнелли Б.Е., Намгалдзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 526 с.

3. Бенькова Н.П., Деминов М.Г., Зевакина Р.А., Керблай Т.С., Фаткуллин М.Н. Ионосфера Земли и прогноз её вариаций // Электромагнитные и плазменные процессы от Солнца до ядра Земли / Под ред. В. В. Мигулина. М.: Наука, 1989. С. 86–97.

4. Иванникова А.Г., Котонаева Н.Г., Михайлов В.В. Аппроксимация законов распределения вероятностей отклонений критической частоты слоя F2 ионосферы полиномами четвёртой степени // Материалы X Всероссийской научной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн». Муром. 2020. С. 48–53

5. Котонаева Н.Г., Михайлов В.В., Перминова Е.С. Статистические закономерности вариаций критической частоты ионосферы при спокойных геофизических условиях // Труды конференции РРВ-25, 4–9 июля 2016, Томск. С. 121–124.

6. Polyakova A., Kotonaeva N., Mikhailov V. Testing of statistical hypotheses about the distribution laws of deviations probabilities of the F2 layer critical frequency for the longitudinal chain of observation stations. Russian Open Conference on Radio Wave Propagation, 2019. DOI:10.1109/RWP.2019.8810390.

7. Ратовский К.Г. Сравнение ионосферной возмущенности в высоких и средних широтах // XXV Всероссийская открытая научная конференция «Распространение радиоволн», посвященная 80-летию отечественных ионосферных исследований. РРВ-25: тр. конф., Томск, 4–9 июля 2016 г. Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2016. Т. I. С. 101–105.

8. Котонаева Н.Г., Денисова В.И., Михайлов В.В., Перминова Е.С. Сравнение вариаций критической частоты слоя F2 ионосферы на ионосферных станциях Москва и Калининград при спокойных геофизических условиях. // Материалы VI Всероссийской научной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн». Муром. 2016. С. 87–91.

9. Ivannikova A., Kotonaeva N. Comparative analysis of variations in the critical frequency of the ionospheric F2 layer under different heliogeophysical conditions at the Moscow station. Journal of Physics Conference Series 1991(1):012005 DOI:10.1088/1742-6596/1991/1/012005

10. Витинский Ю.И. Цикличность и прогнозы солнечной активности. Л.: Наука, 1973. 257 с.

Поступила 10 января 2023 г.

English

COMPARATIVE ANALYSIS OF VARIATIONS IN CRITICAL FREQUENCY OF THE IONOSPHERE F2 LAYER UNDER STATIC HELIOGEOPHYSICAL CONDITIONS AT VARIOUS LATITUDINAL STATIONS

Anna Glebovna Ivannikova — Junior Researcher; Institute of Applied Geophysics named after Academician E.K. Fedorov¹.

E-mail: antanta-annett@yandex.ru

Nadezhda Gennadyevna Kotonaeva — Grand Dr. in Physics and Mathematics, Associate Professor, Deputy Head of the Department, Institute of Applied Geophysics named after Academician E.K. Fedorov¹.

Dmitry Anatolyevich Ivannikov — PhD, Associate Professor, Head of JSC «Research and Production Association named by M. Frunze»².

E-mail: ccs5000@mail.ru

¹Address: 129128, Russian Federation, Moscow, Rostokinskaya str., 9.

²Address: 603009, Russian Federation, Nizhny Novgorod, Gagarin Ave., 174.

Abstract: Hourly data of critical frequencies of the ionosphere F2 layer obtained from ionospheric sounding stations located in mid-latitude, subauroral ionosphere areas and on the border of these areas are examined: Rostov, Moscow and Leningrad since 1957 till 2019. There are presented results for statistical analysis of critical frequency variations in the ionosphere F2 layer under static heliogeophysical conditions for various latitudinal stations. There are shown diagrammatically daily quantile deviation rates of critical frequency of the ionosphere F2 layer in regard to the median calculated for the 27 previous days of 3% and 5% levels at all the above stations for different seasons and time of day. The latitudinal dependence of critical frequency variations of the ionosphere F2 layer is revealed. It is demonstrated that daily quantile deviation rate of critical frequency of the ionosphere F2 layer in regard to the median at low latitudes is more pronounced than in high latitude area. The daily rate is more pronounced at the mid-latitude station than at the high-latitude station, but less than at the low-latitude one. And there are many considerable ionospheric perturbations in high-latitude area compared to those in low and middle latitudes due to the influence on of ambient factors on it specific to this atmosphere area. The difference is especially pronounced in winter, while there is only a slight difference in summer in critical frequency deviations of the ionosphere F2 layer in regard to the median for various latitudes. The clearly noticeable difference during the day in deviations is between stations of different latitudes in the pre-dawn and post-sunset period.

Keywords: critical frequencies of the ionosphere F2 layer, ionosphere sounding stations, statistical analysis of critical frequency variations, index of geomagnetic activity, ionospheric disturbances.

References

1. *Deminov M.G.* The Earth's ionosphere: patterns and mechanisms. In the collection "Electromagnetic and plasma processes from the bowels of the Sun to the bowels of the Earth. Jubilee collection IZMIRAN-75". Moscow: IZMIRAN, 2015. Pp. 295–346.
2. *Brunelli B.E., Namgaladze A.A.* Ionospheric Physics. Moscow: Nauka, 1988. 526 p.
3. *Benkova N.P., Deminov M.G., Zevakina R.A., Kerblay T.S., Fatkullin M.N.* The Earth's ionosphere and the forecast of its variations. Electromagnetic and plasma processes from the Sun to the Earth's core. Edited by *V.V. Migulin*. Moscow: Nauka, 1989. Pp. 86–97.
4. *Ivannikova A.G., Kotonaeva N.G., Mikhailov V.V.* Approximation of the laws of probability distribution of deviations of the critical frequency of the ionosphere layer F2 by polynomials of the fourth degree. Materials of the X All-Russian Scientific Conference "Modern problems of remote sensing, radar, propagation and diffraction of waves". Murom. 2020. Pp. 48–53
5. *Kotonaeva N.G., Mikhailov V.V., Perminova E.S.* Statistical patterns of variations of the critical frequency of the ionosphere under calm geophysical conditions. Proceedings of the Conference RVV-25, July 4–9, 2016, Tomsk. Pp. 121–124.
6. Polyakova A., Kotonaeva N., Mikhailov V. Testing of statistical hypotheses about the distribution laws of deviations probabilities of the F2 layer critical frequency for the longitudinal chain of observation stations. Russian Open Conference on Radio Wave Propagation, 2019. DOI:10.1109/RWP.2019.8810390.
7. Ratovsky K.G. Comparison of ionospheric disturbances in high and middle latitudes. XXV All-Russian open scientific conference "Radio Wave Propagation" dedicated to the 80th anniversary of Russian ionospheric research.

RVV-25: Conf. Proc, Tomsk, July 4-9, 2016 Tomsk: Publishing House of Tomsk. State University of Control Systems and Radioelectronics, 2016. Vol. I. Pp. 101–105.

8. *Kotonaeva N.G., Denisova V.I., Mikhailov V.V., Perminova E.S.* Comparison of variations of the critical frequency of the ionosphere layer F2 at the ionospheric stations Moscow and Kaliningrad under calm geophysical conditions. Materials of the VI All-Russian Scientific Conference "Modern problems of remote sensing, radar, wave propagation and diffraction". Murom. 2016. Pp. 87–91.

9. *Ivannikova A., Kotonaeva N.* Comparative analysis of variations in the critical frequency of the ionospheric F2 layer under different heliogeophysical conditions at the Moscow station. Journal of Physics Conference Series 1991. Vol. 1. Pp. 012005. DOI:10.1088/1742-6596/1991/1/012005

10. *Vitinsky Yu.I.* Cyclicity and forecasts of solar activity. Leningrad: Nauka, 1973. 257 p.