

УДК: 087.2 + 537.87

DOI: 10.26907/rwp29.2025.106-109

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВАРИАЦИЙ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ СЛОЯ F2 ИОНОСФЕРЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ НА РАЗНЫХ ДОЛГОТАХ

А.Г. Иванникова, Н.Г. Котонаева, В.В. Михайлов

ИППГ им. ак. Е.К. Фёдорова, 129128, г. Москва, ул. Ростокинская, 9

E-mail: antanta-annett@yandex.ru

**Аннотация.** Представлены результаты статистического анализа относительных вариаций критической частоты слоя F2 ионосферы на станциях: Новосибирск, Магадан, Калининград, при различных гелиогеофизических условиях по данным с 1957 по 2024 гг. Рассмотрена форма суточного хода и количественные характеристики положительных и отрицательных отклонений на каждой из указанных станций при различных уровнях солнечной и геомагнитной активности. Исследованы квантили уровней 3 и 97% для отрицательной и положительной области. Показаны различия анализируемых характеристик на различных долготах при одинаковых уровнях солнечной и геомагнитной активности. Анализ проведён отдельно для каждого месяца, приведены результаты для четырёх месяцев: март, июнь, сентябрь и декабрь. Сделаны выводы относительно исследуемых характеристик для каждого ионосферного сезона.

**Ключевые слова:** критическая частота; слой F2 ионосферы; отклонения критической частоты; солнечная активность; долготная зависимость; геомагнитная активность.

## COMPARATIVE ANALYSIS OF VARIATIONS IN THE CRITICAL FREQUENCY OF THE IONOSPHERIC F2 LAYER UNDER VARIOUS HELIOGEOPHYSICAL CONDITIONS AT DIFFERENT LONGITUDES

A. G. Ivannikova, N. G. Kotonaeva, V. V. Mikhailov

**Abstract.** Presents the results of statistical analysis of variations in the critical frequency of the F2 layer of the ionosphere at the stations: Novosibirsk, Magadan, Kaliningrad, under various heliogeophysical conditions based on data from 1957 to 2024. The form of the diurnal variation and quantitative characteristics of positive and negative deviations at each of the specified stations at different levels of solar and geomagnetic activity are considered. Quantiles of levels 3% are studied. Differences in the analyzed characteristics at different longitudes at the same levels of solar and geomagnetic activity are shown. The analysis was carried out separately for each month, the results are given for four months: March, June, September and December. Conclusions were made regarding the studied characteristics for each ionospheric season.

**Keywords:** critical frequency; ionospheric F2 layer; critical frequency deviations; solar activity; longitudinal dependence; geomagnetic activity.

### Введение

Данная работа является продолжением [1], где исследовалась зависимость вариаций критической частоты слоя F2 ионосферы от таких факторов, как солнечная и геомагнитная активность, а также широта наблюдательного пункта по данным, полученным на станциях ионосферного зондирования Москва, Ростов и Ленинград с 1957 по 2022 годы. В данной работе для анализа влияния долготного расположения рассмотрены три станции вертикального радиозондирования, расположенные на различных долготах: Новосибирск, Магадан и Калининград. Исследовались квантили относительных отклонений критической частоты слоя F2 ионосферы от медианы, рассчитанной за 27 суток (13 дней до и 13 дней после получения конкретного значения). При проведении анализа учитывался уровень солнечной (CA) и геомагнитной активности (ГА).

Геомагнитная активность оценивалась с помощью эффективного интегрального индекса геомагнитной активности  $A_{\text{рт}}$ , который наиболее подходит описания взаимосвязи с состоянием ионосферы [2]. Интервалом для низкой геомагнитной активности принят  $0 < A_{\text{рт}} \leq 10$ . Высокая геомагнитная активность в данном случае учитывалась для  $A_{\text{рт}} > 10$ .

Солнечная активность оценивалась с помощью числа Вольфа, отражающего количество солнечных пятен. За высокую солнечную активность приняты моменты времени, при которых число Вольфа  $W \geq 70$ , а за низкую те, в которые число Вольфа  $W < 70$ .

Для создания необходимых выборок проанализированы данные наблюдения критической частоты foF2 на станциях Новосибирск (55,0415 северной широты, 82,9346 восточной долготы), Магадан (59,5638 северной широты, 150,803 восточной долготы), Калининград (54,7065 северной широты, 20,511 восточной долготы) за период 1957 по 2024 годы. Каждому измеренному значению ставилось в соответствие медианное значение за 27 суток. Из данного объема выбирались только полученные в те дни, когда уровни солнечной и геомагнитной активности соответствовали анализируемому случаю. Рассмотрены значения уровней квантилей  $\alpha = 0,03$  при отрицательных отклонениях от медианы, и  $\alpha = 0,97$  при положительных отклонениях от медианы. Исследуемая выборка группировалась по месяцам, для сравнения сезонных различий приведены результаты за четыре месяца: март, июнь, сентябрь, декабрь. Для исследования влияния моментов прохождения вечернего и утреннего терминатора, а также астрономического полдня и конца ночи приведены данные указанных моментов по долготному времени для каждой станции.

### Оценка долготного влияния при спокойных условиях

Влияние геомагнитной активности на отклонения критической частоты слоя F2 ионосферы от медианы рассматривается в [2] на примере нескольких станций, расположенных на различных широтах. В данной работе подробно рассмотрено различие во влиянии геомагнитной активности на отклонения на различных долготах. Выявлено, что при спокойных условиях на каждой из станций квантили имеют выраженный суточный ход с увеличением ночью и снижением днём как в положительной, так и отрицательной области. В большинстве случаев дневные квантили на различных станциях находятся практически на одинаковом уровне. Статистически значимое различие между дневными квантилями присутствует в отрицательной области в июне и сентябре (Рисунок 1) между Новосибирском и Магаданом (в июне в Новосибирске квантили имеют более высокие значения, в сентябре – в Магадане), а также в положительной области – в декабре между Магаданом и другими станциями (здесь разница между квантилями составляет порядка 5%).

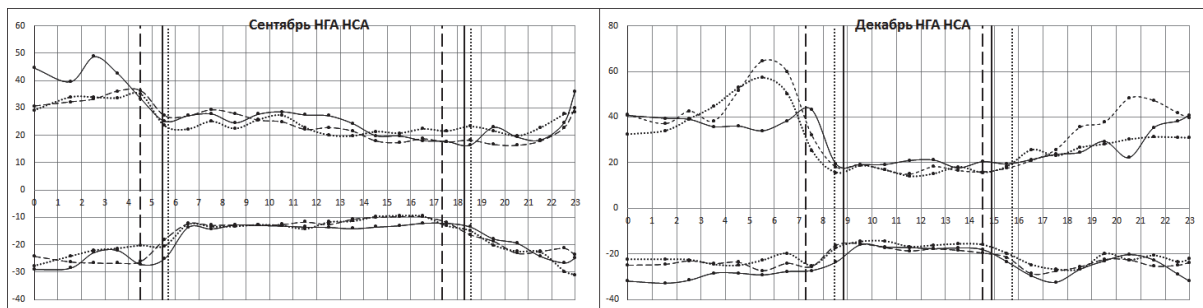


Рис. 1. Суточный ход квантилей 97% относительных отклонений критической частоты слоя F2 ионосферы от медианы при спокойных условиях на различных станциях для сентября и декабря. На графиках: сплошная линия – Магадан, крупный пунктир – Новосибирск, мелкий пунктир – Калининград. Вертикальными линиями обозначены моменты восхода и заката на каждой станции. По горизонтали отложено местное время, по вертикали – относительные отклонения критической частоты в процентах

Данные различия говорят о том, что на разницу значений дневных квантилей в большей степени влияет разница широтного расположения станций, чем долготного, поскольку в отрицательной области наблюдается разница между Магаданом и Новосибирском, несмотря на то, что наиболее удалены по долготам станции Магадан и Калининград. В положительной же области в декабре так же наблюдается разница между значениями на станции Магадан и обеими оставшимися станциями. Несмотря на то, что все три станции располагаются на достаточно близких широтах, Новосибирск и Калининград попадают в зону среднеширотной ионосферы (30–55° с. ш.), в то время как Магадан находится в зоне субавроральной ионосферы (55–65° с. ш.). Предположительно это оказывает наибольшее влияние на разницу отрицательных отклонений. Кроме того, особенно в положительной области, в декабре на данное различие влияет

значительная долготная удалённость станции Магадан по сравнению с другими двумя станциями.

### Оценка влияния геомагнитной активности на разных долготах в разные сезоны

Для оценки различий во влиянии геомагнитной активности на отклонения критической частоты слоя F2 ионосферы на различных долготах были исследованы квантили отклонений уровня 97% при различных уровнях геомагнитной активности. Выявлено, что при высоком уровне геомагнитной активности, с сохранением того же уровня солнечной, что и при спокойных условиях, суточный ход выражен гораздо хуже. На графиках имеется большое количество возмущений, особенно в положительной области. При этом квантили в отрицательной области имеют гораздо более выраженный суточный ход со снижением днём и увеличением ночью. Можно отметить, что в декабре (рис. 2) и марте наибольшие значения в рассветный период наблюдаются на станции Новосибирск. В сентябре дневные квантили имеют наибольшие значения на станции Калининград в предзакатный период. В декабре положительные квантили имеют в целом более высокий уровень (порядка 20-30%) по сравнению с другими месяцами.

Как и в случае со спокойной обстановкой, в каждый из месяцев на каждой из станций квантили находятся примерно на одном уровне. Кроме того, как и в предыдущем случае, заметно влияние на суточный ход квантилей моментов восхода и захода Солнца.

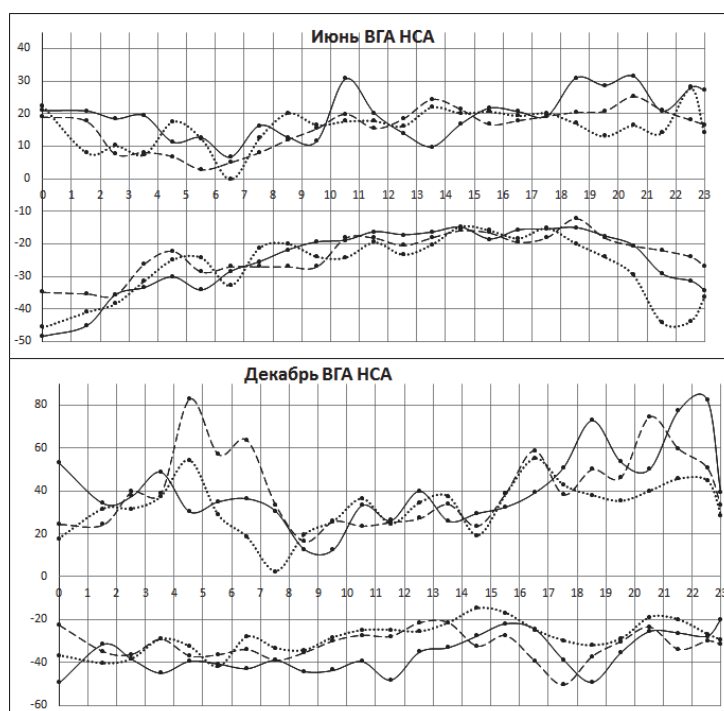


Рис. 2. Суточный ход квантилей 97% относительных отклонений критической частоты слоя F2 ионосферы от медианы при низкой солнечной (НСА) и высокой геомагнитной активности (ВГА) на различных станциях для декабря и июня. На графиках: сплошная линия – Магадан, крупный пунктир – Новосибирск, мелкий пунктир – Калининград.

### Оценка влияния солнечной активности на разных долготах в разные сезоны

Наиболее хорошо выраженный суточный ход со снижением отклонений днём и увеличением ночью при высокой солнечной активности сохраняется в декабре на всех трёх станциях (рис. 3). Особенность суточного хода в июне на всех станциях заключается в увеличении (порядка 15%) положительных квантилей в рассветный период, постепенном снижении их уровня к закату и незначительном увеличении после заката. Отрицательные же квантили в июне при этом имеют суточный ход с небольшим (до 5%) увеличением днём и снижением ночью (обратно суточному ходу отрицательных квантилей в июне при спокойных условиях). При этом в Магадане в отличие от других станций в период рассвета наблюдается увеличение отрицательных квантилей порядка 5%.

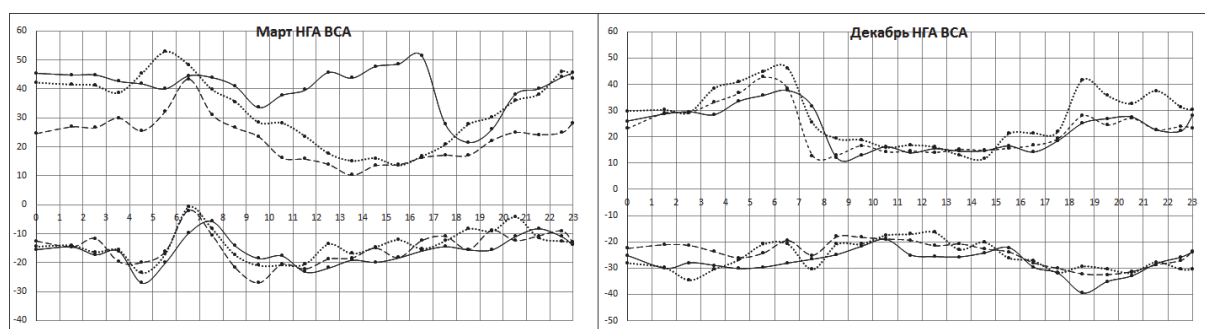


Рис. 3. Суточный ход квантилей 97% относительных отклонений критической частоты слоя F2 ионосферы от медианы при низкой солнечной и высокой геомагнитной активности на различных станциях для марта и декабря. На графиках: сплошная линия – Магадан, крупный пунктир – Новосибирск, мелкий пунктир – Калининград.

Суточный ход в марте значительно отличается на всех трёх станциях. Положительные квантили на станциях Новосибирск и Калининград имеют выраженный суточный ход как и при спокойных условиях с понижением квантилей днём и увеличением ночью, однако пики более выраженные и короткие, чем при спокойных условиях.

В сентябре в положительной области наибольшие значения квантилей на протяжении всего периода наблюдаются в Магадане, а наименьшие в Новосибирске. В отрицательной области в отличие от июня присутствуют более сильное (до 10%) предрассветное увеличение квантилей, наиболее выраженное в Магадане.

### Заключение

После проведённого статистического анализа квантилей уровня 3 и 97% отклонений критической частоты слоя F2 ионосферы от скользящей медианы, вычисленной за 27 суток по данным со станций Магадан, Новосибирск, Калининград, полученным с 1957 года по настоящее время при различных уровнях солнечной и геомагнитной активности можно сделать следующие выводы: при сравнении суточного хода квантилей отклонений критической частоты на различных долготах был выявлен ряд отличий в графиках при одинаковых гелиогеофизических условиях в одни и те же моменты времени, что позволяет сделать выводы о существовании долготной неоднородности ионосферы в части вариативности критической частоты. При этом при спокойных условиях различия выражены менее ярко, чем при высоком уровне солнечной или геомагнитной активности. При высокой геомагнитной активности различия обусловлены большим количеством кратковременных возмущений на всех трёх станциях на протяжении всех суток, нестабильностью суточного хода. Для анализа в этом случае следует использовать квантили меньшего порядка (5 и 95%). При высокой солнечной активности сама форма суточного хода на разных станциях различна (в марте суточный ход на станции Магадан имеет форму отличную от двух других станций). Кроме того, отличается величина уровня как положительных, так и отрицательных квантилей на каждой из станций в течение всех суток даже при одинаковой форме суточного хода.

### Список литературы

1. Иванникова А.Г., Котонаева Н.Г. Сравнительный анализ вариаций критической частоты слоя F2 ионосферы // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». – М.: ИКИ РАН, 2022. – С. 364.
2. Киселева М.В., Кияновский М.П., Князюк В.С., Ляхова Л.Н., Юдович Л.А. Прогнозирование критических частот области F2 // Ионосферные возмущения и их влияние на радиосвязь. – М. Наука, 1971. – С. 74–99.