

## **Сравнительный анализ вариаций критической частоты слоя F2 ионосферы при различных гелиогеофизических условиях на станции Москва**

*А.Г. Иванникова<sup>1</sup>, Н.Г. Котонаева<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>ИПГ им. ак. Е.К. Фёдорова, 129128, г. Москва, ул. Ростокинская, 9, E-mail: antanta-annett@yandex.ru*

*Представлены результаты статистического анализа вариаций критической частоты слоя F2 ионосферы при различных уровнях солнечной и геомагнитной активности по данным со станции Москва с 1957 по 2019 гг. Экспериментально найдены оптимальные интервалы разделения на уровни геомагнитной активности. Показано различие вариативности в поведении ионосферы при различной солнечной активности. Показано влияние солнечной и геомагнитной активности на возникновение положительных и отрицательных отклонений критической частоты слоя F2 ионосферы от медианы, рассчитанной за 27 предыдущих суток в различные сезоны. Показано, что суточный ход отклонений при высоком уровне геомагнитной активности для отрицательных отклонений перестаёт быть выраженным, в отличие от положительных отклонений.*

*Ключевые слова: критическая частота, слой F2 ионосферы, отклонения критической частоты, солнечная активность, геомагнитная активность, вариативность ионосферы*

## **Comparative analysis of variations in the critical frequency of the ionosphere F2 layer under various heliogeophysical conditions at the Moscow station**

*A.G. Ivannikova<sup>1</sup>, N.G. Kotonayeva<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>IPG named after ak. E.K. Fedorova, 129128, Moscow, st.Rostokinskaya, 9, E-mail: antanta-annett@yandex.ru*

*Results of the statistical analysis of variations of critical frequency of a layer of F2 of an ionosphere at various levels of solar and geomagnetic activity are presented by data from the station Moscow from 1957 to 2019. Optimum intervals of division into levels of geomagnetic activity are experimentally found. The need to divide solar activity into low and high in ionospheric research has been proved. The effect of solar and geomagnetic activity on the occurrence of periodic positive and negative deviations of the critical frequency of the ionosphere F2 layer from the median, calculated for 27 previous days in various seasons, is shown. It has been shown that the daily course of deviations at a high level of geomagnetic activity for negative deviations ceases to be pronounced, unlike positive deviations.*

*Keywords: critical frequency, ionospheric layer F2, critical frequency deviations, solar activity, geomagnetic activity, ionospheric variability*

### **Введение**

Одними из ключевых факторов, влияющих на вариативность критической частоты слоя F2 ионосферы, являются солнечная и геомагнитная активность [1], [2].

Определение закономерностей вариативности критической частоты слоя F2 является одной из важнейших задач при решении проблемы прогнозирования состояния ионосферы. Несмотря на многочисленные исследования, из-за нетривиальности и влияния большого количества трудно прогнозируемых факторов, задача остаётся нерешённой. Для решения данного вопроса используют различные подходы: эмпирическое моделирование [3], [4],[5], анализ на основе данных полного электронного содержания [6], [7], многокомпонентные модельные построения [8], статистический анализ на основе данных наклонного и вертикального

радиозондирования [9], [10], [11], [12]. В настоящей работе использован последний из вышеперечисленных подходов, поскольку он позволяет наиболее точно определить взаимосвязь характеристик изменчивости отклонений критической частоты слоя F2 ионосферы от медианы и гелиогеофизических условий внешней среды за счёт наличия больших выборок накопленных данных вертикального радиозондирования.

В [10] на основе анализа больших выборок данных со станции Москва найдены статистические закономерности вариаций критической частоты ионосферы при низкой и умеренной геомагнитной активности. Однако не было произведено разделения данных на низкую и высокую солнечную активность. Основной задачей данной работы является сравнительный анализ вариаций критической частоты слоя F2 ионосферы при различных гелиогеофизических условиях на станции Москва на основе данных, полученных с 1957 по 2019 годы и поиск статистических закономерностей и их количественных характеристик для различных уровней солнечной и геомагнитной активности.

Для описания уровня геомагнитной активности использован эффективный интегральный индекс геомагнитной активности  $A_{pt}$ , который наилучшим образом взаимосвязан с поведением ионосферы [10]. Интервалы геомагнитной активности были выбраны экспериментально, в результате проведённого исследования графиков суточных ходов отклонений критической частоты слоя F2 ионосферы от медианы, высчитанной за 27 предыдущих суток на станции Москва с различными уровнями геомагнитной активности. Сравнение графиков с интервалами геомагнитной активности  $0 < A_{pt} \leq 10$ ,  $0 < A_{pt} \leq 15$  и  $0 < A_{pt} \leq 20$  при низкой и высокой солнечной активности для различных сезонов разница между относительными отклонениями составляет более 3%, что означает снижение точности более чем на 3% в ряде случаев при увеличении интервала. Это позволяет сделать вывод о том, что увеличение интервала низкой геомагнитной активности до  $0 < A_{pt} \leq 15$  нецелесообразно вследствие потери точности. Поэтому оптимальным интервалом для низкой геомагнитной активности является  $0 < A_{pt} \leq 10$ . Верхний интервал геомагнитной активности целесообразно было выбрать от  $A_{pt} \geq 15$ , поскольку при увеличении нижней границы данного интервала размер выборки значительно сокращается (например, в январе, в 00UT при низкой солнечной активности для геомагнитной активности с  $A_{pt} \geq 15$  размер выборки составляет 224, если геомагнитная активность  $A_{pt} \geq 20$ , размер выборки сократится до 158). При уменьшении же нижней границы интервала до 10 даже летом произойдет снижение точности на 10%.

Поскольку выбранные интервалы не пересекаются, для увеличения точности исследований необходимо было выбрать еще несколько интервалов. Экспериментальным путём установлено, что оптимальным является интервал  $5 < A_{pt} \leq 20$ , при котором размеры выборки составляют порядка 450.

Для описания солнечной активности использовано число Вольфа, отражающее 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 были проанализированы данные наблюдения критической частоты  $f_oF2$  на станции Москва 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 только полученные в те дни, когда выполнялись необходимые условия по уровням солнечной и геомагнитной активности, описанные выше. 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. Исследуемая

выборка группировалась по месяцам, для анализа использовались данные конкретного ионосферного наблюдательного пункта Москва, оборудованного ионозондом вертикального радиозондирования.

Исследование было разделено на три части:

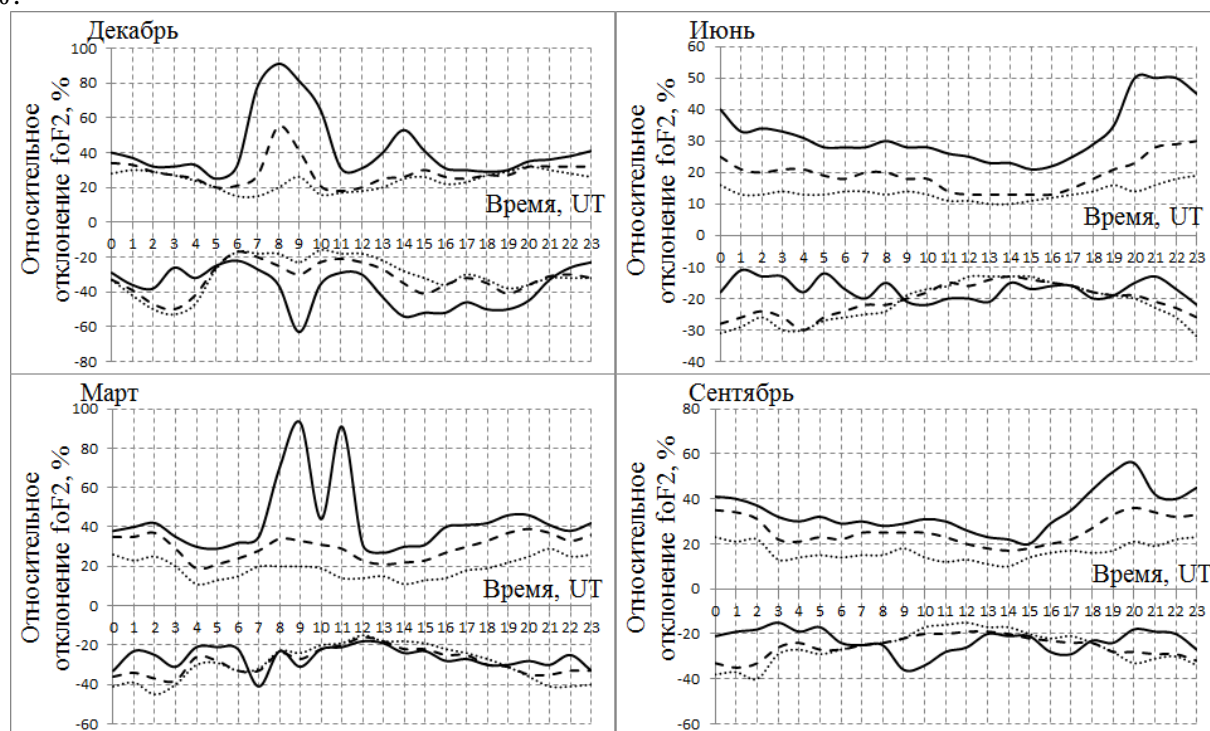
- исследование выборок при низком уровне солнечной активности для разных уровней геомагнитной активности;
- исследование выборок при низком уровне геомагнитной активности для разных уровней солнечной активности;
- исследование выборок при высоком уровне геомагнитной активности для разных уровней солнечной активности.

### Низкая солнечная активность

На рис. 1 представлены значения суточных ходов квантилей распределения 3% в различные сезоны.

В декабре наблюдаются положительные возмущения до 90% при высокой геомагнитной активности с 6 до 11 UT, при среднем уровне геомагнитной активности возмущения в тот же период составляют 55%. Также наблюдаются отрицательные возмущения меньшей амплитуды – до 60%.

Максимум отрицательных и положительных отклонений при спокойных условиях наблюдается перед рассветом. Для отрицательных отклонений он достигает уровня 55%.



**Рис. 1. Суточный ход квантилей отклонений текущих значений foF2 от медианы уровня 0,03 и 0,97 в различные месяцы при низкой солнечной активности и различных уровнях геомагнитной активности. На рисунке обозначено: сплошная линия – высокая геомагнитная активность. Крупный пунктир – умеренная геомагнитная активность. Мелкий пунктир – низкая геомагнитная активность.**

При высоком уровне геомагнитной активности от 0 до 12 UT и положительные и отрицательные отклонения имеют примерно одинаковый уровень, порядка 30%, после 12 отрицательные отклонения больше и составляют порядка 50%, в то время как положительные порядка 30%. Суточный ход квантилей положительных и

отрицательных отклонений при среднем и низком уровне геомагнитной активности имеет практически одинаковую форму и различие в значениях порядка 5-10% во все моменты, кроме момента возмущения с 6 до 11 UT, когда разница в значениях составляет 30%.

В июне максимум положительных отклонений наблюдается с 19 до 0 UT. При высоком уровне геомагнитной активности отклонения в этот период увеличиваются на 20-30% по сравнению с дневными значениями, при низком на 5-10%. При высокой геомагнитной активности положительные отклонения больше отрицательных и находятся на уровне 30-50%, в то время как отрицательные на уровне порядка 20%. Суточный ход квантилей положительных и отрицательных отклонений при всех уровнях геомагнитной активности имеет практически одинаковую форму. Различие в значениях положительных отклонений составляет порядка 5-10% между низким и средним уровнями геомагнитной активности и 10-20% между средним и высоким уровнями.

В марте при высоком уровне геомагнитной активности наблюдаются возмущения в области положительных отклонений, с амплитудами 92% в 9 UT и 90% в 11 UT. Однако, при сравнении квантилей 5% и 3% для высокого уровня геомагнитной активности выявлено, что при 5% данные возмущения значительно (до 45%) уменьшаются по амплитуде.

Также при высоком уровне геомагнитной активности положительные отклонения находятся на уровне порядка 40%, в то время как отрицательные на уровне 20-30%. Максимум положительных отклонений наблюдается перед рассветом и после заката.

В сентябре при высоком уровне геомагнитной активности максимум положительных отклонений, как и в июне наблюдается в 20 UT (до 56%), однако в отличие от июня, сразу после этого уровень отклонений опускается до 40%. Минимум положительных отклонений наблюдается в 15 UT. И положительные и отрицательные отклонения имеют примерно одинаковый уровень в течение дня, от 20 до 40%, не считая максимума.

Проведя анализ графиков за каждый месяц, можно выделить следующие моменты:

1) Во все месяцы положительные отклонения больше при высокой геомагнитной активности. С апреля по сентябрь разница между значениями отклонений при низком и высоком уровнях геомагнитной активности составляет порядка 20% с 0 до 17-18 UT и порядка 40% с 18 до 0 UT. В остальные месяцы разница в значениях отклонений составляет порядка 5-10%.

2) Отрицательные отклонения во все месяцы в дневное время больше при высокой геомагнитной активности и меньше при низкой. В ночное время – наоборот. В дневное время разница обычно меньше, чем в ночное и составляет до 10-15%, в ночное время в некоторые месяцы разница между значениями отклонений достигает 20-25% (октябрь-январь).

3) Во все сезоны, кроме зимы при низкой геомагнитной активности отрицательные отклонения имеют выраженный суточный ход, снижаясь днём и увеличиваясь ночью. Отрицательные отклонения при высокой геомагнитной активности не имеют выраженного суточного хода.

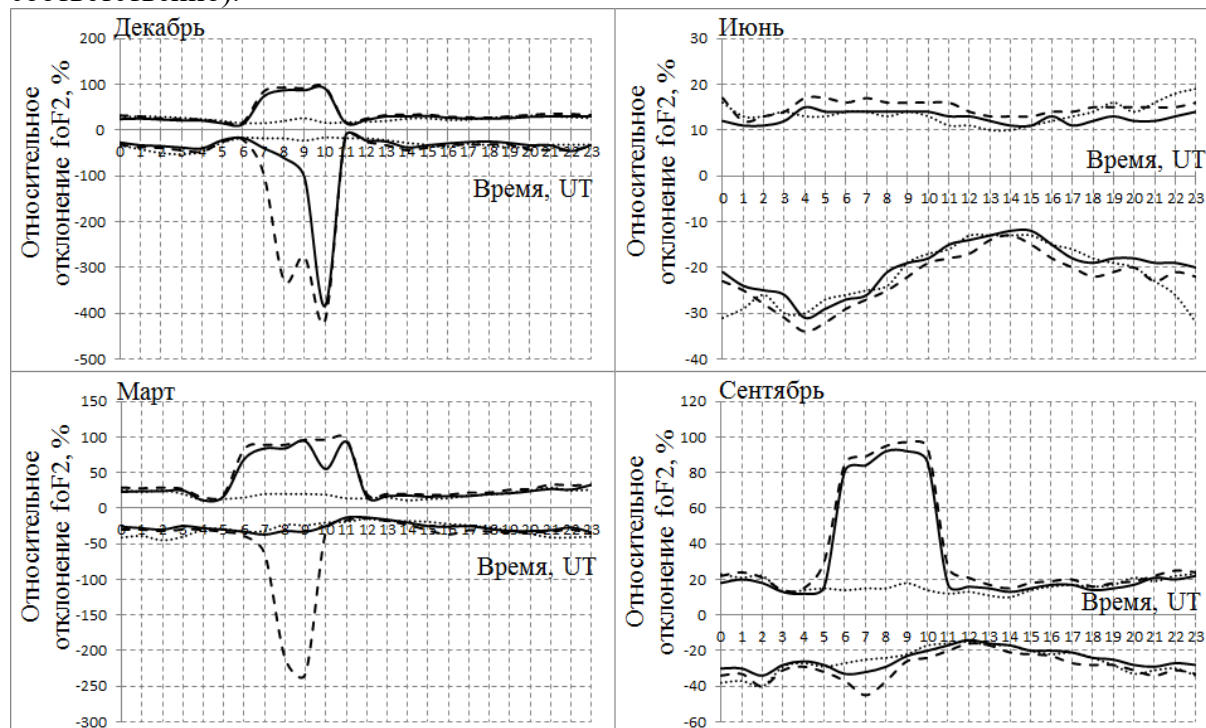
4) Положительные отклонения имеют суточный ход как при высокой, так и при низкой геомагнитной активности, на который оказывают влияние моменты восхода и заката Солнца. Особенно сильно это выражено в летний период, когда с заходом Солнца при высоком уровне геомагнитной активности происходит рост положительных отклонений на 40%.

5) Во все сезоны, кроме зимнего, при высоком уровне геомагнитной активности положительные отклонения больше отрицательных. В зимний период отрицательные отклонения незначительно больше положительных.

#### Низкая геомагнитная активность

На рис. 2 представлены значения суточных ходов квантилей распределения 3% в различные сезоны.

В декабре отрицательные отклонения имеют два максимума, достигающие 328% и 416%, в 8 и 10 UT соответственно. При рассмотрении квантилей 5%, видно, что амплитуда отклонений в 8 UT уменьшается до 60%, а в 10 UT остаётся на высоком уровне – 384%. В остальное время отрицательные отклонения при низкой и высокой солнечной активности имеют разницу не более 10%. Такое же расхождение наблюдается и в положительной области во все моменты времени, кроме промежутка с 7 до 10 UT. На данном отрезке времени наблюдается увеличение отклонений до 100%. При сравнении квантилей 3% и 5% видно, что амплитуда самого большого положительного возмущения остаётся практически неизменной. Минимум как положительных, так и отрицательных отклонений наблюдается до и после максимальных возмущений – в 6 и 11 UT. Отрицательные отклонения на протяжении всех суток больше положительных на 30% (они имеют уровни порядка 50 и 20% соответственно).



**Рис. 2. Суточный ход квантилей отклонений текущих значений foF2 от медианы в различные месяцы при низкой геомагнитной активности и различных уровнях солнечной активности. На рисунке обозначено: крупный пунктир – квантили уровней 0,03 и 0,97 для высокой солнечной активности. Сплошная линия – квантили уровней 0,05 и 0,95 для высокой солнечной активности. Мелкий пунктир – квантили уровней 0,03 и 0,97 для низкой солнечной активности.**

В июне не наблюдается сильных возмущений даже при высоком уровне солнечной активности. Суточный ход положительных отклонений при высокой солнечной активности сохраняется примерно на одном уровне, порядка 17%, незначительно, на 5% снижаясь с 0 до 3 UT. Таким образом, в дневное время отклонения при высокой солнечной активности превышают отклонения при низкой солнечной активности на

5%, а в ночное время – наоборот, что достигается в основном за счёт увеличения отклонений при низкой солнечной активности в ночное время.

Суточный ход отрицательных отклонений при высокой солнечной активности выражен и по форме повторяет суточный ход отрицательных отклонений при низкой солнечной активности. С 0 до 9 UT отрицательные отклонения больше положительных на 10-15%.

В марте расхождение суточных ходов при высокой солнечной активности и низкой солнечной активности для положительных отклонений составляет до 4% (отклонения при высокой солнечной активности больше), кроме момента времени с 6 до 11 UT, в который наблюдается подобное декабрю положительное возмущение до 100% при высокой солнечной активности.

Отрицательные отклонения ночью при высокой солнечной активности меньше на 10-13%, чем при низкой солнечной активности, с 13 до 19 UT - наоборот. С 10 до 13 UT суточные ходы совпадают, а с 7 до 10 UT наблюдается увеличение амплитуды до 232%. При сравнении квантилей 3% и 5% видно, что амплитуда самого большого положительного возмущения остаётся практически неизменной, не считая 10 UT, где она опускается до 55%. Амплитуда же отрицательного возмущения с 7 до 10 UT становится равна уровню отклонений при низкой солнечной активности. Неизменность положительного возмущения при изменении отрицательного говорит о том, что они имеют разную природу и таким образом в данном случае отдельно наблюдаются положительное возмущение и отрицательное возмущение, однако исключать также наличие двухфазных возмущений нельзя.

В сентябре в положительной области присутствуют возмущения до 97% с 6 до 10 UT, а также в 12 до 13 UT отклонения при высокой солнечной активности больше, чем при низкой солнечной активности на 10%. При сравнении квантилей 3 и 5% видно, что суточный ход остаётся неизменным и характерен для отклонений данного периода.

Отрицательные отклонения при высокой СА на протяжении всего дня не расходятся в значениях с отклонениями при низкой солнечной активности более, чем на 5%, не считая периода с 6 до 8 UT, когда расхождение составляет до 20%.

### **Высокая геомагнитная активность**

На рис. 3 представлены значения суточных ходов квантилей распределения 3% в различные сезоны.

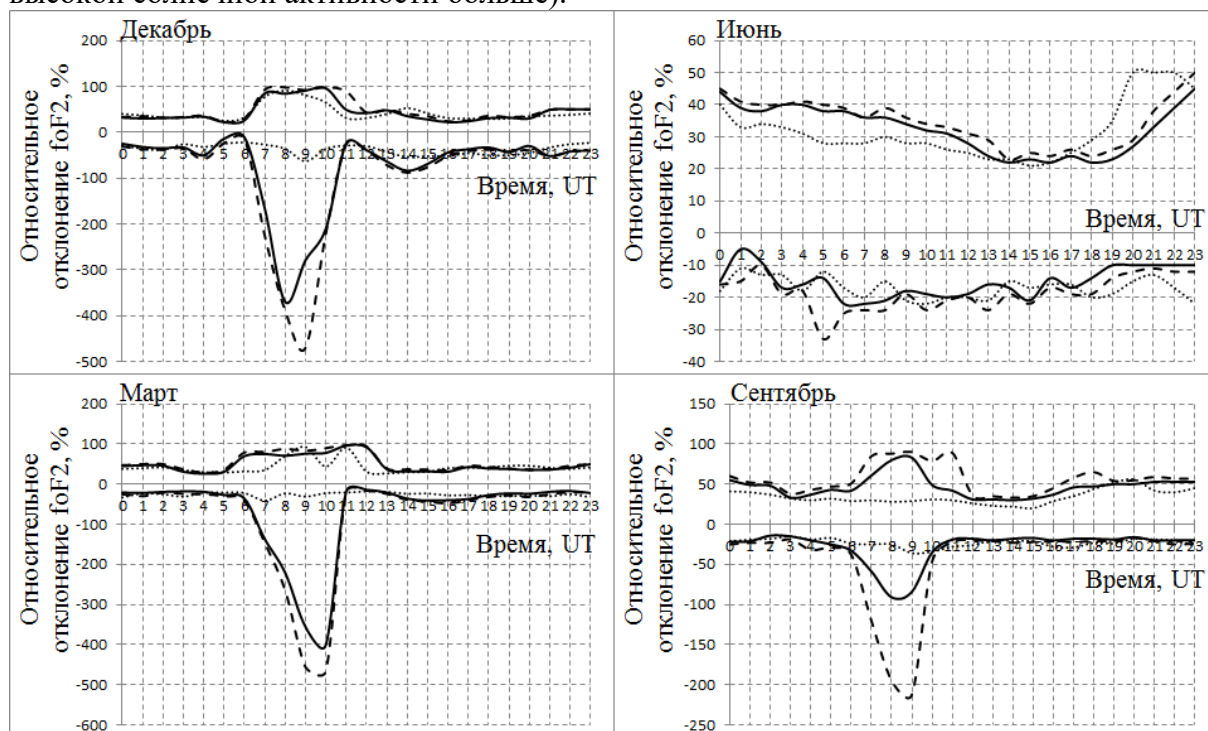
В декабре в положительной области присутствует возмущение до 98% при обоих уровнях солнечной активности с 7 до 11 UT при высокой солнечной активности и с 7 до 10 UT при низкой, что говорит о том, что природа данного возмущения в большей степени зависит от геомагнитной активности, чем от солнечной. В отрицательной области в 9 UT присутствует возмущение, амплитуда которого достигает 470%. При рассмотрении квантилей 5% видно, что данное возмущение является характерным для данного периода. Минимумы как отрицательных, так и положительных отклонений наблюдаются до и после крупных возмущений - в 6 и 11 UT соответственно.

В июне отрицательные отклонения отличаются нестабильностью, но можно заметить, что отклонения при высокой солнечной активности выше в дневное время (порядка 20%) и ниже в ночное (порядка 10%). Наибольшее различие между отклонениями при высокой и низкой солнечной активности присутствует в 20 UT и составляет 21%. Суточные ходы отклонений при низкой и высокой солнечной активности имеют схожую форму. При рассмотрении квантилей 5% видно, что суточный ход положительных отклонений для 3 и 5% практически не различается, а для отрицательных имеет существенную разницу, в частности, в 5 UT разница составляет

19%, что говорит о том, что отрицательные отклонения в данный период могут иметь множество случайных небольших возмущений в течение всех суток.

Уровень положительных отклонений (22-40%) в данный период почти вдвое выше уровня отрицательных (25-33%).

В марте с 6 до 12 UT наблюдается рост отклонений при высокой солнечной активности до 97%. В 9 и 11 UT отклонения достигают максимума при обоих уровнях солнечной активности. Можно предположить, что данные возмущения в большей степени зависят от уровня геомагнитной активности, чем от уровня солнечной. Суточный ход отрицательных отклонений при высокой солнечной активности совпадает с суточным ходом при низкой солнечной активности во всех случаях кроме периода с 7 до 10 UT, в который наблюдается значительное увеличение отклонений, до 466% и периода с 15 до 17 UT, где расхождение между отклонениями составляет 15-20% (отклонения при высокой солнечной активности больше).



**Рис. 3. Суточный ход квантилей отклонений текущих значений foF2 от медианы в различные месяцы при высокой геомагнитной активности и различных уровнях солнечной активности. На рисунке обозначено: крупный пунктир – квантили уровней 0,03 и 0,97 для высокой солнечной активности. Сплошная линия – квантили уровней 0,05 и 0,95 для высокой солнечной активности. Мелкий пунктир – квантили уровней 0,03 и 0,97 для низкой солнечной активности.**

При рассмотрении квантилей 5% видно, что для высокой солнечной активности амплитуды как положительных, так и отрицательных возмущений изменяются слабо, остальные значения суточного хода тоже остаются полностью неизменными.

В сентябре положительные отклонения на протяжении всех суток больше при высокой СА на 20-23%, чем при низкой. С 7 до 11 наблюдается увеличение положительных отклонений до 90%.

В отрицательных отклонениях в сентябре наблюдается всплеск с 7 до 9 UT при высокой СА до 212%, однако на графике с квантилями 5% видно, что амплитуда данного возмущения снижается до 90%. Также положительные возмущения сохраняются только в 8-9 UT, а в остальные моменты остаются на уровне порядка 40%.

Проведя анализ графиков за каждый месяц для низкой и высокой солнечной активности, можно выделить следующие моменты:

1) В летний период значительные возмущения при высоком уровне солнечной активности могут возникнуть с очень низкой долей вероятности – на графиках квантилей отклонений уровня 3% они отсутствуют. Суточные ходы квантилей 3% находятся на уровнях порядка 30-60% для положительной области и 20-30% для отрицательной.

2) При низкой геомагнитной активности значительные отрицательные возмущения, амплитуда которых составляет 100-260%, при высоком уровне солнечной активности, преимущественно в 7-10 UT октября по март возникают с меньшей вероятностью, чем в ноябре и декабре. В ноябре и декабре амплитуда таких возмущений достигает 400%. При высокой геомагнитной активности данные возмущения присутствуют с сентября по апрель (амплитуды 318-548%), в сентябре с амплитудой 212% и меньшей вероятностью, чем в другие месяцы.

3) Значительные (до 100%) положительные возмущения при высоком уровне солнечной активности в 6-7 – 10-12 UT при низкой геомагнитной активности возникают августа по май (в августе с меньшей вероятностью), как и при высокой геомагнитной активности (с меньшей вероятностью в мае).

4) При низкой геомагнитной активности уровень отрицательных и положительных отклонений для высокой солнечной активности примерно одинаков или отрицательные отклонения больше на 5%. При высокой геомагнитной активности для высокой солнечной активности в период с марта по сентябрь уровень положительных отклонений почти вдвое выше уровня отрицательных, особенно с 18 по 00 UT, в остальные периоды примерно одинаков.

5) Форма суточных ходов в большинстве случаев совпадает при низкой и высокой солнечной активности.

6) В 8 UT в ноябре наблюдается значительное (от 250 до 375% в разных случаях) отрицательное отклонение для всех гелиогеофизических условий, кроме полностью спокойных. В декабре в 8 UT наблюдается такое же положительное отклонение, с амплитудами от 55% (при средней геомагнитной активности низкой солнечной активности) до 97% при высокой геомагнитной активности солнечной активности.

7) С апреля по август при высокой геомагнитной активности наблюдается рост отклонений на 30% с 16 по 18 UT как для высокой, так и для низкой солнечной активности. При этом разница между самими отклонениями для высокой и низкой солнечной активности может составлять в эти моменты 10-20% (при высокой солнечной активности отклонения больше).

### **Заключение**

В результате проведения сравнительного анализа вариаций критической частоты слоя F2 ионосферы при различных гелиогеофизических условиях на станции Москва можно сделать следующие выводы:

1) Высокая солнечная активность при низкой геомагнитной активности в большем количестве случаев (все месяцы, кроме июня-августа) приводит к сильным возмущениям ионосферы, зависящим также от сезона, чем высокая геомагнитная активность при низкой солнечной активности (февраль, март, ноябрь, декабрь). Помимо наличия спокойных геофизических условий наличие указанных возмущений зависит также от сезона.

2) Ионосферные бури, характерные для периодов равноденствия происходят периоды высокой солнечной активности и почти не встречаются в периоды низкой солнечной активности, независимо от уровня геомагнитной активности:



- Высокая геомагнитная активность, высокая солнечная активность, сентябрь, с 7 до 11 UT увеличение амплитуды положительных отклонений до 89%, отрицательных с 7 до 9 UT до 212%

- Высокая геомагнитная активность, высокая солнечная активность, март, с 6 до 12 UT увеличение амплитуды положительных отклонений до 97%, отрицательных с 7 до 10 UT до 466%

- Низкая геомагнитная активность, высокая солнечная активность, сентябрь, с 6 до 10 UT увеличение амплитуды положительных отклонений до 97%.

- Низкая геомагнитная активность, высокая солнечная активность, март, с 6 до 11 UT увеличение амплитуды положительных отклонений до 97%, отрицательных с 7 до 10 UT до 232%.

3) При спокойных геофизических условиях значительных возмущений в ионосфере не наблюдается ни в какие месяцы, кроме октября. В октябре 7-8 UT наблюдается положительное возмущение с амплитудой 77%.

4) Отрицательные отклонения при высокой геомагнитной активности не имеют такого выраженного суточного хода как при низкой геомагнитной активности и для низкой, и для высокой солнечной активности, что обусловлено большим количеством незначительных (с амплитудой 5-10%) возмущений. При рассмотрении квантилей 5% суточные ходы выглядят более сглаженными.

5) Положительные отклонения имеют суточный ход как при высокой, так и при низкой ГА, на который оказывают влияние моменты восхода и заката Солнца, особенно в летний период, когда с заходом солнца происходит рост положительных отклонений.

6) Вариативность в поведении ионосферы существенно различается при различных уровнях солнечной активности как при низкой, так и при высокой геомагнитной активности. Различия в основном заключаются в наличии при высокой солнечной активности значительных отклонений, до 100% в положительной области и до 500% в отрицательной области в утреннее время с 6 до 12 во все сезоны, кроме летнего. В летний период различия тоже присутствуют, но составляют до 20%.

7) Значительные, до 60-100% положительные возмущения имеют большую зависимость только от солнечной активности, чем отрицательные, которые имеют зависимость от солнечной активности и геомагнитной активности.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-05-80023 Опасные явления.*

### **Литература**

1. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. - М.: Наука, 1988. - 526 с.
2. Дёминов М.Г. Ионосфера Земли: закономерности и механизмы // В сб. «Электромагнитные и плазменные процессы от недр Солнца до недр Земли. Юбилейный сборник ИЗМИРАН-75». М.: ИЗМИРАН. С.295 – 346. 2015.
3. Денисенко П. Ф., Соцкий В. В. Коррекция высотных профилей электронной концентрации модели IRI по данным вертикального зондирования // Труды конференции РРВ-26, 1-6 июля 2019, Казань. - С.129-133.
4. Денисенко П. Ф., Жбанков Г. А., Соцкий В. В. Коррекция моделей ионосферы по данным сети наземных ионозондов // Труды конференции РРВ-26, 1-6 июля 2019, Казань. - С.133-137.
5. Котова Д.С., Клименко М.В., Клименко В.В., Захаров В.Е. Отклик ионосферы на геомагнитную бурю 2 мая 2010 г. И его влияние на распространение кв-радиоволн в высокоширотной ионосфере // “Physics of Auroral Phenomena”, Proc. XXXVI Annual Seminar, Apatity, pp.174 - 177, 2013.

6. Ратовский К.Г. Сравнение ионосферной возмущенности в высоких и средних широтах // Труды конференции РРВ-25, 4-9 июля 2016, Томск. - С.101-105.
7. Ясюкевич А.С., Веснин А.М., Ясюкевич Ю.В., Падохин А.М. Исследование корреляции долговременных рядов полного и плазмосферного электронного содержания с индексами солнечной и геомагнитной активности // Труды конференции РРВ-26, 1-6 июля 2019, Казань. - С.380-384.
8. Мандрикова О.В., Полозов Ю.А., Соловьев И.С., Фетисова Н.В. Анализ ионосферных параметров в периоды солнечных событий и геомагнитных бурь // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2016. №4(15). С. 49-55.
9. Куркин В.И., Полех Н.И., Пирог О.М., Мошкова В.А., Поддельский И.Н. Ионосферные возмущения в годы минимума солнечной активности и их влияние на распространение КВ-радиоволн // Солнечно-земная физика. Вып. 12. Т. 2. 2008. С. 242–245.
10. 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.
11. Котонаева Н.Г., Денисова В.И., Михайлов В.В., Перминова Е.С. // Материалы VI всероссийской научной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн». Муром. 2016. С. 87-91.
12. Иванникова А.Г., Котонаева Н.Г., Михайлов В.В. Аппроксимация законов распределения вероятностей отклонений критической частоты слоя F2 ионосферы полиномами четвертой степени // Материалы X всероссийской научной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн». Муром. 2020. С. 48-53.