ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ. ВЫПУСК 30, 14 – 20, 2021

Поступила в редакцию 24.05.2021 г.
Опубликована 14.06.2021 г.

ISSN 2304-7380

УДК 550.388.2

ДЕТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ СЛОЯ *F*2 ПЕРЕД МАГНИТНЫМИ БУРЯМИ. 5. ЗАВИСИМОСТЬ ОТ МЕСТНОГО ВРЕМЕНИ НАЧАЛА БУРИ

А. Д. Данилов[1], А. В. Константинова[1]

[1]*Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова, г. Москва, Россия*

На основании данных станции Juliusruh проведен анализ поведения критической частоты слоя *F*2, *foF*2, в течение трех дней, предшествующих магнитной буре. Рассмотрены 272 бури за период с 1976 по 2010 гг. и найдено 2682 события (отклонения *foF*2 от спокойных условий). Получено, что указанные отклонения демонстрируют наличие интервалов LT SO, в которых вероятность появления максимальна. Проведен детальный анализ этих интервалов для всех событий вместе и для отдельных типов отклонений: положительных, отрицательных, полученных сравнением с разными данными для спокойных условий, а также имеющих различную амплитуду. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами по станции Slough как опубликованными авторами ранее, так и полученными в ходе дальнейшего анализа, и позволяют считать, что найденные отклонения не являются случайными флуктуациями *foF*2, но связаны с предстоящей магнитной бурей, т.е. являются ее предвестниками.

Ключевые слова: геомагнитная буря, время начала бури, ионосферный слой *F*2.

DOI: 10.54252/2304-7380_2021_30_14

1. ВВЕДЕНИЕ

Во многих ионосферных исследованиях отмечался тот факт, что в течение 2-3 дней перед магнитными бурями наблюдаются возмущения критической частоты слоя *F*2 ионосферы – отклонения от спокойных условий. Подробное обсуждение проблемы можно найти в обзорных работах авторов [Danilov and Konstantinova, 2019; Данилов и Константинова, 2019]. Отметим здесь лишь кратко, что эти отклонения в среднем составляют 30-40%, однако в некоторых случаях могут достигать фактора 2 и более. Некоторые авторы (см., например, [Blagoveshchensky et al., 2012; Mansilla and Zossi, 2012]) высказывали предположение, что эти возмущения можно рассматривать, как своего рода предвестники предстоящей геомагнитной бури.

Авторами был выполнен детальный анализ поведения критической частоты *foF*2 в течение трех дней, предшествующих магнитной буре, по наблюдениям методом вертикального зондирования на станции Slough (Chilton) [Константинова и Данилов, 2020]. Были рассмотрены 254 бури за период с 1976 по 2010 гг. и было найдено 1353 события (отклонения *foF*2 от спокойных условий). Из них 996 отклонений имели положительный знак и 357 – отрицательный. Было получено, что указанные отклонения демонстрируют хорошо выраженную и статистически значимую зависимость от пяти параметров: сезона, интенсивности магнитной бури, уровня солнечной активности, местного времени начала магнитной бури SO и времени между событием и моментом SO.

Аналогичный анализ был выполнен по данным ст. Julusruh. Результаты для зависимости от сезона, интенсивности магнитной бури, солнечной активности и времени до начала бури приведены в первых четырех работах данной серии [Данилов и Константинова, 2020 а, б; 2021а, б]. В данной работе мы рассматриваем зависимость числа событий от местного времени начала геомагнитной бури (LT SO).

Электронная почта авторов для переписки:
Данилов Алексей Дмитриевич, e-mail: adanilov99@mail.ru
Константинова Анна Владимировна, e-mail: anna@tabulata.ru

ФГБУ «ИПГ»
129128; Россия, Москва
ул. Ростокинская, 9.

2. ЗАВИСИМОСТЬ ЧИСЛА СОБЫТИЙ ОТ LT SO.

Многими исследователями отмечалось (см. обзор Данилова и Константиновой [2019]), что реакция ионосферы как в буревые, так и в предбуревые, дни различна для близких по характеру магнитных бурь, но начинающихся в разные моменты суток. Поэтому мы провели детальный анализ зависимости количества событий (отклонение критической частоты *foF*2 от спокойных условий в течение трех предбуревых дней) от местного времени начала бури (LT SO). Как и при анализе зависимостей от сезона, интенсивности бури и солнечной активности в предыдущих работах серии, мы рассматривали количество событий на одну бурю *K*.

Результаты анализа приведены на рис. 1. Из рисунка 1а следует, что имеются преимущественные интервалы LT SO, для которых величина *K* (т.е. вероятность появления отклонений *foF*2) выше, чем в соседних интервалах. Особенно хорошо выражен максимум *K* для LT SO = 23 ч. Видно также, что это вероятность высока для SO, происходящихся на интервал 05:00–13:00 LT. В то же время, бури, которые начинаются в интервале 16:00–20:00 LT, обладают наименьшим количеством предбуревых отклонений *foF*2. Рисунок 7а показывает также, что эта закономерность распределения *K* по всему интервалу LT SO сохраняется и при раздельном рассмотрении q и m событий. При этом вклад обоих типов событий в общее количество событий примерно одинаков.

Сравнение поведения *K* для ст. Juliusruh и Slough приводит к интересным результатам. Во-первых, как показывает рис 1а, изменение *K* для обоих станций очень близко по характеру. В обоих случаях наблюдается пик *K* на 21:00–23:00 LT и интервал высоких *K* от 05:00 – 06:00 до 12:00 – 13:00 LT. Во-вторых, заметен небольшой сдвиг по горизонтальной оси данных Slough относительно данных Juliusruh. Если сдвинуть данные Slough на два часа вправо, то получится картина, представленная на рис. 1б. Видно, что при этом два пика (в 13:00 и 23:00 LT) и минимум в 17:00 – 19:00 LT полностью совпадают, а левый пик сдвинут только на один час.

Обращает на себя внимание тот факт, что подобный сдвиг на те же 2 часа и в ту же сторону был обнаружен и при анализе зависимости числа событий от времени до SO (см. Данилов и Константинова [2020a]). Природа обнаруженных сдвигов пока не понятна. Однако их наличие может оказаться важным при дальнейшем анализе процессов, приводящих к возникновению анализируемых событий (предвестников) до начала магнитной бури.

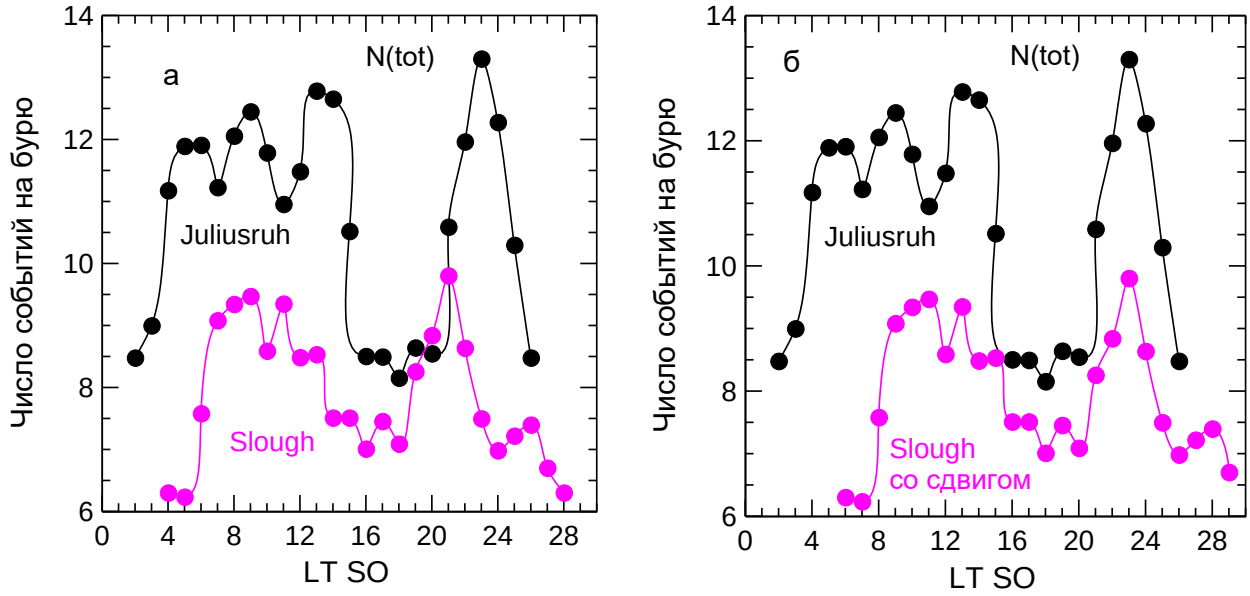

Рис. 1. Изменение числа событий на бурю *K* с местным временем начала бури LT SO.

На рисунке 2 приведен вклад в общее число событий N(tot) числа q и m событий для обеих станций. Этот рисунок показывает, что вклад обоих типов событий в N(tot) примерно одинаков для Slough (рис. 2а), в то время как для Juliusruh (рис. 2б) величины N(q) несколько выше, чем N(m). Рисунок 2 показывает также, что закономерность распределения *K* по всему интервалу LT SO, отмеченные выше на рис. 1, видны и при раздельном рассмотрении q и m событий. Это особенно четко видно на рис. 2б, где кривая для N(q) почти точно повторяет форму кривой для N(tot).

Рисунок 3 показывает, что основной вклад в изменение числа всех событий вносят «положительные» события (положительные отклонения *foF*2). Величины К для «отрицательных» событий относительно малы, а их характер изменения с LT SO носит хаотичный характер.

Таким образом, и для ст. Slough и для ст. Juliusruh характер зависимости общего числа событий от местного времени начала бури определяется только характером этой зависимости для положительных отклонений. Этот вывод согласуется с фактом, на который обращалось внимание в обзоре предбуревых эффектов [Данилов и Константинова, 2019] – большинство исследователей обнаруживали именно положительные отклонения *foF*2, *Ne* и TEC в предбуревые дни.

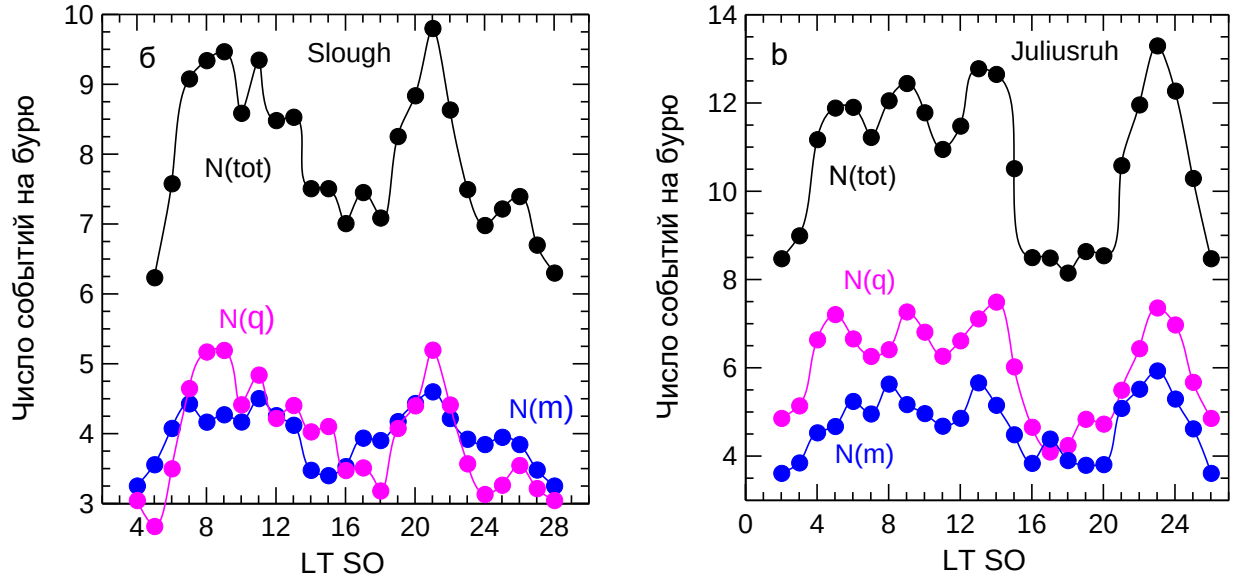

Рис. 2 Вклад q и m событий в общее число событий для ст. Slough и ст. Juliusruh.

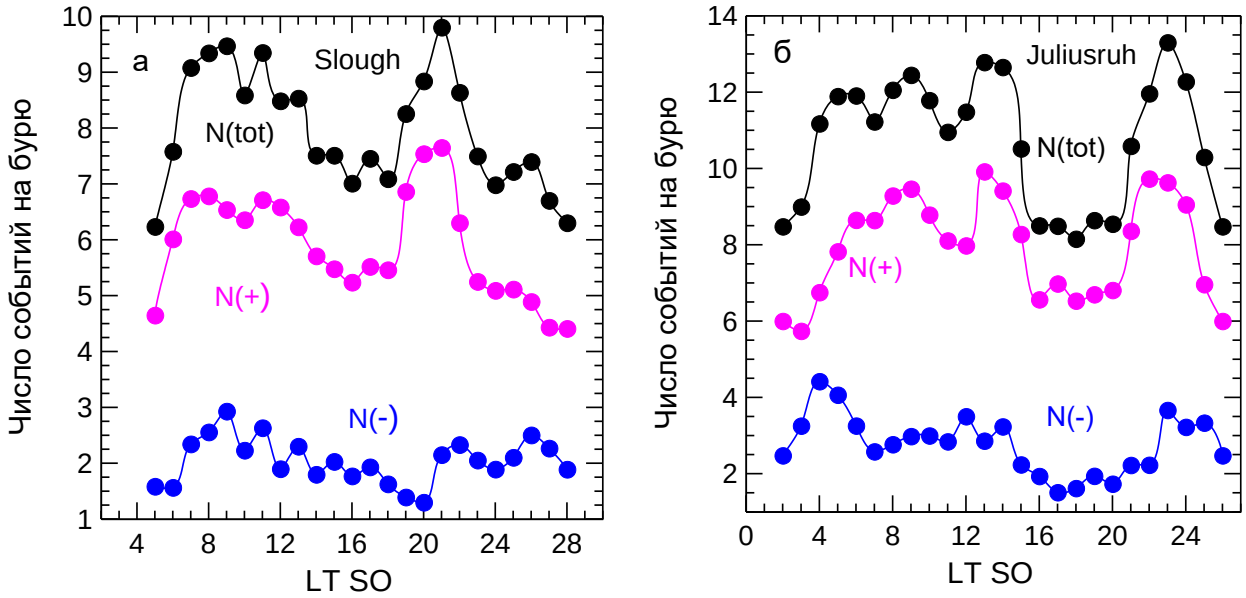

Рис. 3. Вклад положительных и отрицательных отклонений в общее число событий для ст. ст. Slough и ст. Juliusruh

Как видно из рисунков 1–3, при всех сравнениях получается похожая картина для обеих станций. Этот результат очень важен для нашего рассмотрения, поскольку, во-первых, результаты измерений для каждой станции представляют собой совершенно независимые банки данных, потому

© Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

подобие зависимости от LT SO для обеих станций подтверждает правильность получаемых выводов. Во-вторых, результаты для различных типов событий также представляют собой независимые наборы данных, поэтому подобие кривых, например, для N(tot) и N(q) является дополнительным подтверждением реальности получаемых зависимостей.

На рисунке 4 приведено сравнение изменения числа m событий (рис. 4а) и q событий (рис. 4б) для двух станций. Хорошо видно, что для обоих типов событий наблюдается сдвиг данных примерно на 2 часа для данных Slough относительно данных для Juliusruh, о котором мы говорили выше при обсуждении рис. 1.

Как и в случае предыдущих публикаций данной серии, мы провели дальнейшее «препарирование» данных, чтобы посмотреть, какой вклад вносят отклонения разной амплитуды. Поскольку, как следует из рис. 3, число отрицательных отклонений мало и они не демонстрируют выраженной зависимости от LT SO, мы провели указанное «препарирование» данных только для положительных отклонений.

Результаты «препарирования» числа m событий приведены на рис. 5. Из этого рисунка видно, что изменение N(>+30m) лучше согласуется с изменением N(m+), чем N(+20m). Для ст. Jukiusruh, например, ход N(+20m) для LT SO меньше 20 ч. совсем не похож на ход N(m+). В то же время, подобие ходов N(>+30m) и N(m+) наблюдается для обеих станций.

Подобная картина видна и на рис. 6, где аналогичные зависимости представлены для q+ событий. Пики на кривой N(>+30q) лучше выражены и лучше согласуются с пиками на кривой N(q+), чем пики на криво N(+20q).

Указанный факт, на наш взгляд, говорит о том, что количество событий с амплитудой 20-30%, которые мы регистрируем, может быть «загрязнено» небольшими случайными отклонениями *foF*2 от спокойных условий, не связанными с предстоящей бурей. К такому же выводу нас привел также анализ зависимостей числа событий от других параметров, что подробно описано в предыдущих работах данной серии. Например, при анализе зависимости числа событий от солнечной активности [Данилов и Константинова, 2021б], получены меньшие величины коэффициента определенности R^2 для зависимости N(20q+) от *F*10.7, чем для зависимости N(>30q+) и высказано то же предположение, что число событий с амплитудой +(20–30%) может быть «засорено» случайными отклонениями *foF*2, и более надежным предвестником предстоящей бури является количество событий с большей амплитудой.

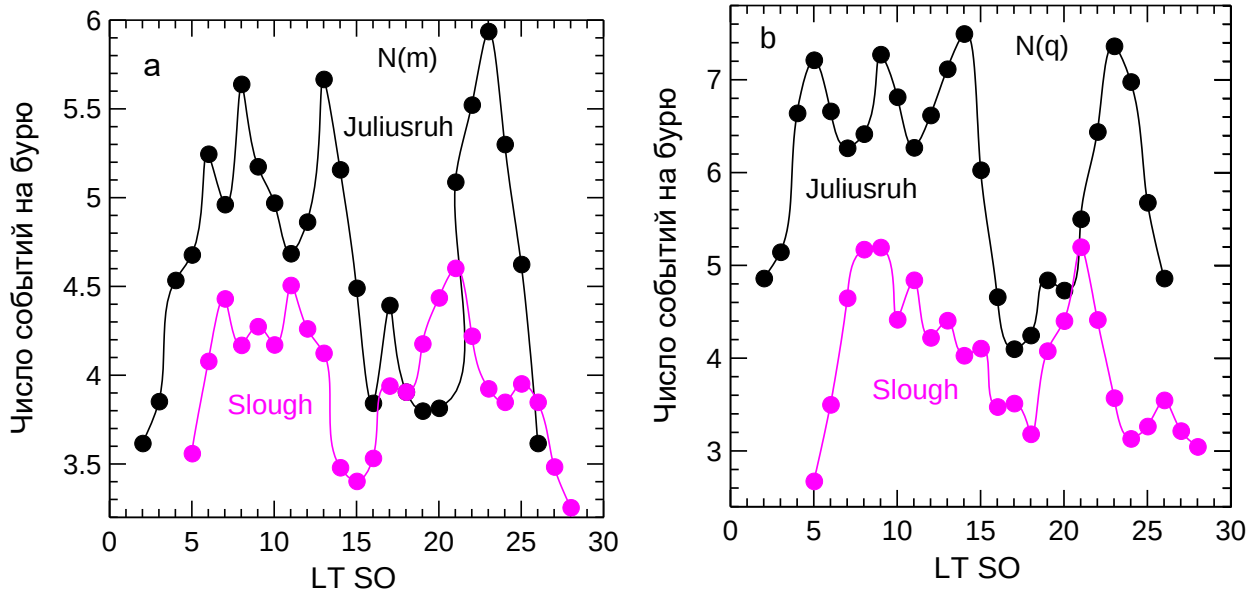

Рис. 4. Сравнение изменения числа m и q событий для ст. Slough и Juliusruh.

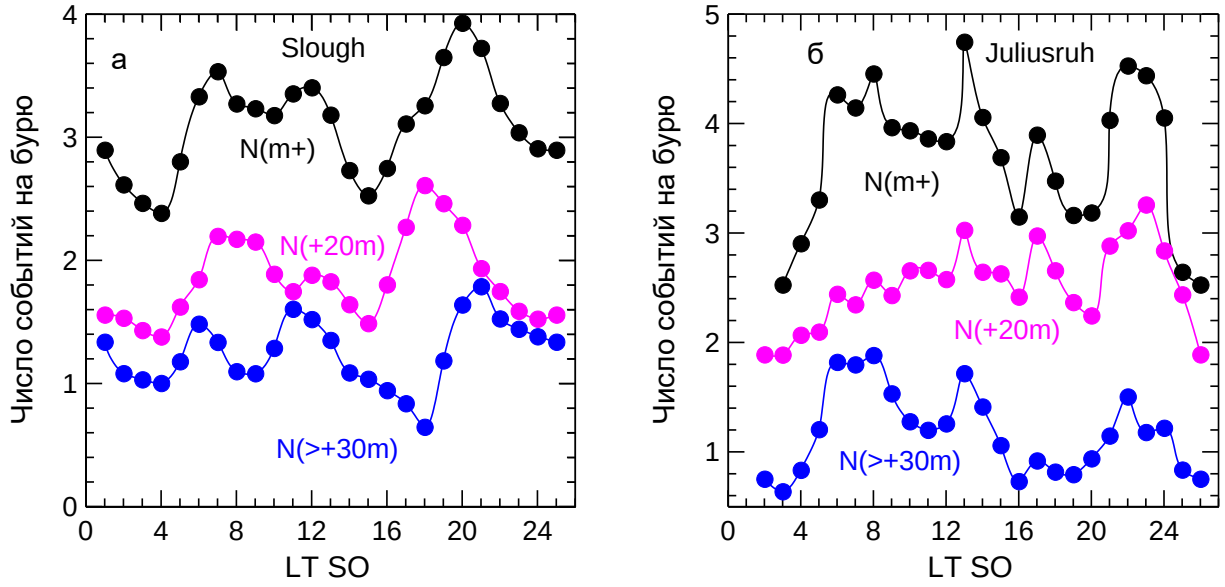

Рис. 5. Зависимость от LT SO числа всех m+ событий, а также m+ событий с амплитудой +20% и >+30%.

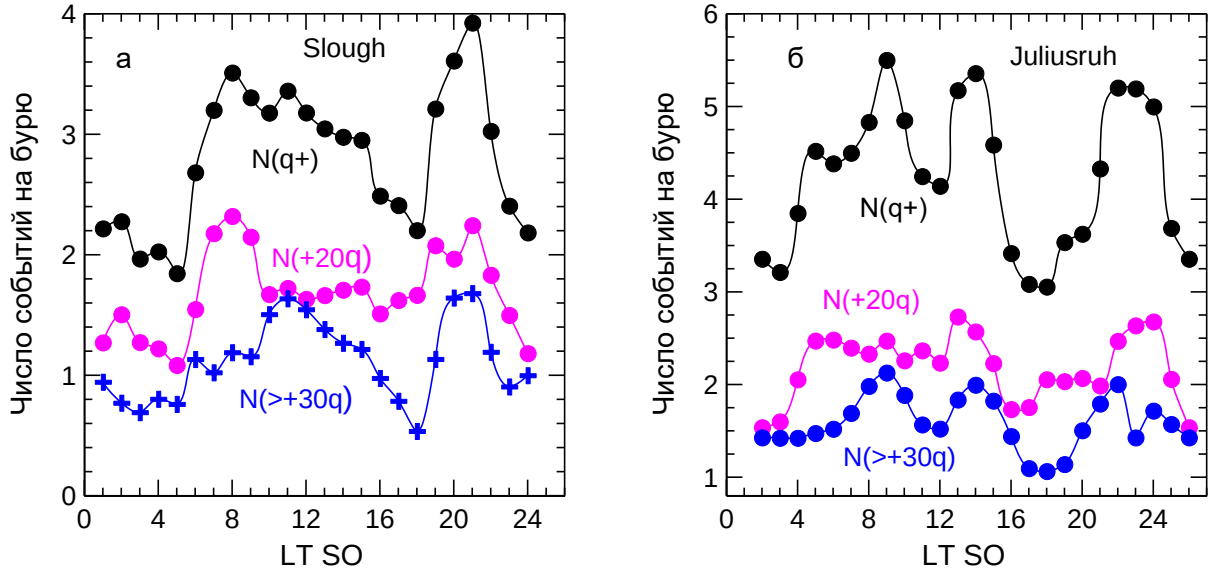

Рис. 6. Зависимость от LT SO числа всех q+ событий, а также q+ событий с амплитудой +20% и >+30%.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Этот вывод (также, как и вывод о зависимости *K* от *Dst* min) важны для подтверждения того факта, что мы действительно анализируем события, связанные с предстоящей магнитной бурей (предвестники), поскольку очевидно, что случайные отклонения *foF*2 (скажем, Q-возмущения) не могут демонстрировать выраженную зависимость от времени начала предстоящей бури.

Таким образом, результаты данной работы подтверждают вывод, полученный Константиновой и Даниловым [2020] о том, что количество событий (отклонений *foF*2 от спокойных условий) демонстрирует зависимость от времени начала предстоящей магнитной бури LT SO. Обнаружено, что имеются два интервала местного времени: с 05-06 до 12-13 LT и с 21 до 23 LT. Если магнитная буря начинается в течение этих интервалов, вероятность появления отклонений *foF*2 максимальна. В то же время, начало бури в интервале 16-19 LT «неблагоприятно» для появления отклонений *foF*2.

© Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

Очень похожее поведение общего числа событий с *F*10.7 для ст.Slough и Juliusruh на рис. 1, как и в случае зависимостей от других параметров, рассмотренных в предыдущих публикациях серии, позволяет нам считать это еще одним подтверждением того, что мы, действительно, имеем дело с предвестниками предстоящей бури, а не случайными отклонениями *foF*2, поскольку измерения на двух станциях представляют собой независимые банки данных.

То же самое можно сказать и о «близости» кривых для N(tot), N(m) и N(q) на рис. 2, поскольку числа всех событий, а также m и q событий представляют собой независимые массивы данных.

Обнаружено, что подобие соответствующих кривых для двух станций значительно улучшается, если данные для ст. Slough сдвинуты на два часа вправо по оси времени Juliusruh. Точно такой же сдвиг обнаружен и при анализе зависимости числа событий от времени события до LT SO в работе Данилова и Константиновой [2020б]. Нам пока непонятна причина этого сдвига, но он может оказаться важен при дальнейшем анализе физических процессов, приводящих к появлению анализируемых событий (предшественников) в предбуревые дни.

ЛИТЕРАТУРА

- *Данилов А.Д., Константинова А.В*. Ионосферные предвестники геомагнитных бурь. 1. Обзор проблемы // Геомагнетизм и аэрономия. Т.59. №5. С. 594-606. 2019.
- *Данилов А.Д., Константинова А.В*. Детальный анализ поведения критической частоты слоя *F*2 перед магнитными бурями. 1. Зависимость от сезона // Гелиогеофизические исследования. Вып. 28. С. 3–12. 2020а.
- *Данилов А.Д., Константинова А.В.* Детальный анализ поведения критической частоты слоя *F*2 перед магнитными бурями. 2. Зависимость от времени до начала бури // Гелиогеофизические исследования. Вып. 28, 13 – 21, 2020б.
- *Данилов А.Д., Константинова А.В.* Детальный анализ поведения критической частоты слоя *F*2 перед магнитными бурями. 3. Зависимость от интенсивности магнитной бури // Гелиогеофизические исследования. Вып. 29. С. 24–29. 2021а.
- *Данилов А.Д., Константинова А.В.* Детальный анализ поведения критической частоты слоя *F*2 перед магнитными бурями. 4. Зависимость от солнечной активности // Гелиогеофизические исследования. Вып. 30. С. 3–8. 2021б.
- *Константинова А. В*. *Данилов А.Д.* Ионосферные предвестники геомагнитных бурь. 2. Анализ данных ст. Slough // Геомагнетизм и аэрономия. Т.60. №3. С. 329–336. 2020.
- *Лещинская Т.Ю., Михайлов В.В*. Модель SIMP-1: картирование месячных медиан *foF*2 по северному полушарию // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 56. № 6. С. 772–780. 2016.
- *Blagoveshchensky D.V., Sergeeva M.A., Kozlovsky A.* Ionospheric parameters as the precursors of disturbed geomagnetic conditions // Adv. Space Res. V. 60. N 11. P. 2437–2451. 2017.
- *Danilov A.D, Konstantinova A.V.* Behavior of the ionospheric *F* region prior to geomagnetic storms // Adv. Space Res. V. 64. P. 1375-1387. 2019.
- *Mansilla G.A., Zossi M.M.* Ionospheric response to the 3 August 2010 geomagnetic storm at mid and mid-high latitudes // Adv. Space Res. V. 51. N 1. P. 50–60. 2012.

DETAILED ANALYSIS OF THE BEHAVIOR OF THE *F*2-LAYER CRITICAL FREQUENCY PRIOR TO MAGNETIC STORMS. 5. DEPENDENCE ON THE LOCAL TIME OF STORM ONSET

Danilov A.D., Konstantinova A.V.

An analysis of the behavior of the *F*2-layer critical frequency, *foF*2, during three days preceding a magnetic storm is performed based on the Juliusruh station data. Over the period of 1976-2010, 272 storms are considered and 2682 events (deviations of *foF*2 from quiet conditions) are found. It is obtained that the aforementioned deviations demonstrate a presence of LT SO intervals in which the probability of appearance of these deviations is maximal. A detailed analysis of this dependence is performed for all the events together and for particular types of the deviations: positive, negative, obtained by comparison with different data for quiet conditions, and also having different amplitude. The obtained results agree well with the data for Slough station published by the authors earlier and make it possible to believe that the found deviations are not occasional fluctuations of *foF*2, but are related to the coming magnetic storm, i. e., are its precursors.

KEYWORDS: GEOMAGNETIC STORM, IONOSPHERIC STORM, IONOSPHERIC F2-LAYER

© Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова