



## ДЕТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ СЛОЯ $F_2$ ПЕРЕД МАГНИТНЫМИ БУРЯМИ. 4. ЗАВИСИМОСТЬ ОТ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

А. Д. Данилов<sup>1</sup>, А. В. Константинова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>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 хорошо выраженную зависимость от солнечной активности. Проведен детальный анализ этой зависимости 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, опубликованными авторами ранее, 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, СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ, ИОНОСФЕРНЫЙ СЛОЙ  $F_2$ .

**DOI:** 10.54252/2304-7380\_2021\_30\_3

### 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 недавних 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. Juliusruh. Результаты для зависимости от сезона, интенсивности магнитной бури и времени до начала бури приведены в первых трех работах данной серии [Данилов и Константинова, 2020 а,б; 2021]. В данной работе мы рассматриваем зависимость числа событий от солнечной активности (СА). В качестве индикатора СА мы будем использовать величину индекса F10.7 на день начала бури.

Процедура анализа, а также выбор анализируемых дней и спокойных дней, используемых для сравнения, подробно описан в предыдущих публикациях [Константинова и Данилов, 2020; Данилов и Константинова, 2020 а, б]. Здесь напомним только, что мы рассматриваем отклонения критической частоты  $\Delta foF2$  от спокойных условий в течение трех дней, предшествующих магнитной буре. Для спокойных условий используются две опции: ближайший спокойный день и фоновая модель, разработанная для прогностической программы SIMP [Лещинская и Михайлов, 2016]. Соответствующие события (отклонения) обозначаются индексами  $q$  и  $m$ , соответственно.

## 2. ЗАВИСИМОСТЬ ЧИСЛА СОБЫТИЙ ОТ $F10.7$

Как и в предыдущих работах данной серии, мы будем анализировать зависимость числа событий  $N$  на трех уровнях. Первый уровень – общее число событий  $N(\text{tot})$ , число  $q$  и  $m$  событий и число всех положительных отклонений (событий)  $N(+)$  и отрицательных отклонений  $N(-)$ . Второй уровень – число положительных и отрицательных отклонений от спокойных условий по модели,  $N(m+)$  и  $N(m-)$ , и число таких отклонений от наблюдений в спокойный день,  $N(q+)$  и  $N(q-)$ . Третий уровень – число положительных и отрицательных отклонений  $\Delta foF2$  с амплитудой 20-30%, 30-40% и >40%. При этом по возможности мы будем вести анализ параллельно для данных двух станций: Slough и Juliusruh.

Для того, чтобы понять, как количество событий зависит от солнечной активности, мы сравнивали количество событий на одну бурю  $K$  с величиной  $F10.7$  в день начала бури. Мы разбили весь диапазон изменения  $F10.7$  на интервалы по 10 единиц каждый и анализировали изменение величины  $K$ , взятой для каждого интервала.

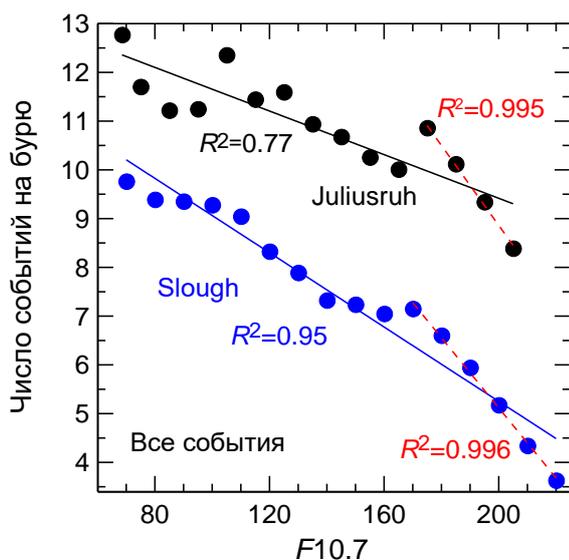
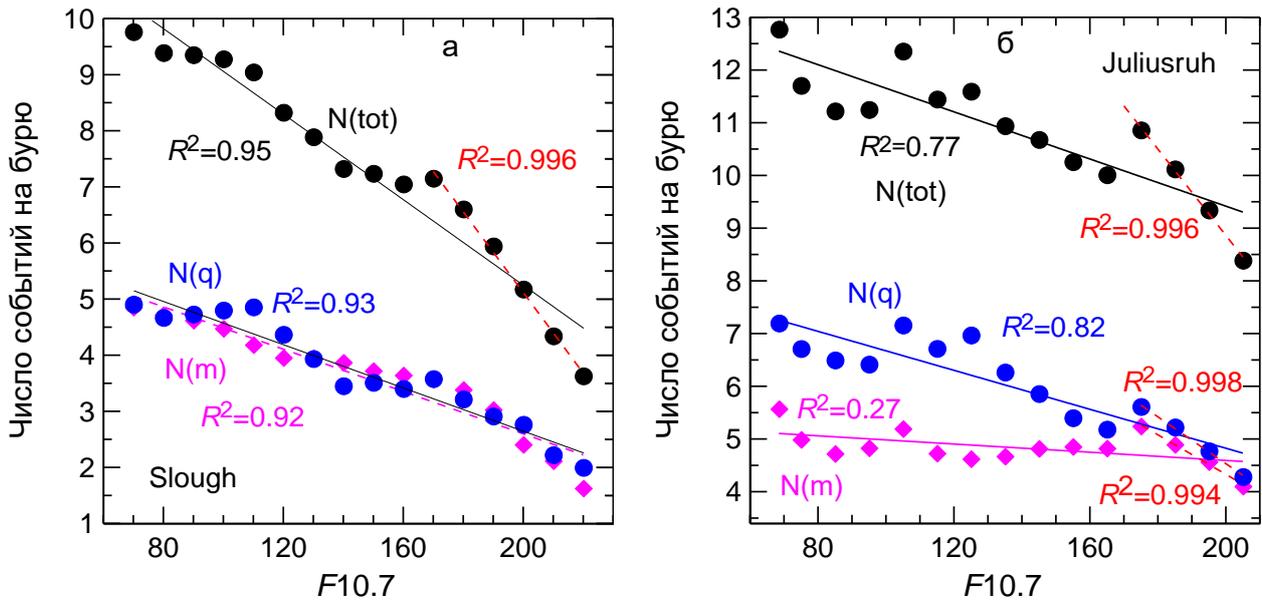
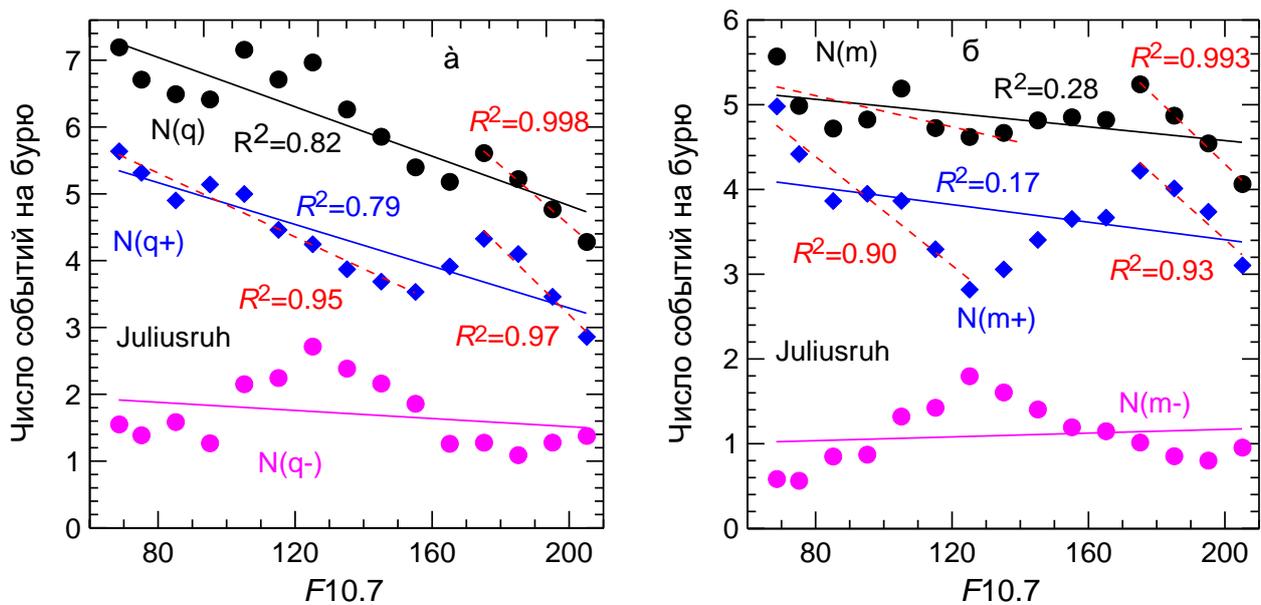


Рис. 1. Зависимость общего числа событий  $N(\text{tot})$  от  $F10.7$  для обеих станций

Зависимость общего числа событий от  $F10.7$  приведена на рис. 1. Как следует из этого рисунка, для обеих станций наблюдается хорошо выраженная зависимость – величина  $N(\text{tot})$  уменьшается с увеличением СА. Величины  $R^2$  для зависимостей, проведенных по всем точкам, обеспечивают высокую статистическую значимость  $S$  выше 99%. Однако, привлекает внимание одна особенность – для  $F10.7 > 165$  рассматриваемая зависимость во-первых имеет больший наклон, чем зависимость для всех точек, и, во вторых, точки ложатся почти точно на прямую. Это подтверждают и соответствующие (очень высокие) величины  $R^2$ , приведенные в правой части рис.1.

На рисунке 2 приведена зависимость полного числа событий, а также количества  $m$  и  $q$  событий от  $F10.7$ . Картина очень наглядна для Slough. Вклад  $m$  и  $q$  событий в зависимость  $N(\text{tot})$  от  $F10.7$  совершенно одинаков, при этом все три зависимости имеют высокую статистическую значимость  $S$ , поскольку все три величины  $R^2$  превышают 0.92. На рисунке 2а хорошо видна та же особенность, которую мы отмечали при обсуждении рис. 1 – при  $F10.7 > 165$  наклон зависимости для  $m$  и  $q$  событий становится более крутым, чем для  $F10.7 < 165$ . При этом эффект лучше выражен для  $m$  событий, что показывает, что именно эти события обуславливают хорошо выраженный эффект в поведении  $N(\text{tot})$ .

Картина выглядит менее ясной для Juliusruh – все величины  $R^2$  существенно меньше, чем на рис. 2а. При этом очень плохо выражена зависимость для  $m$  событий. Причина этого нам пока не понятна. Стоит подчеркнуть, однако, тот факт, что особенность, на которую мы обращали внимание выше (увеличение наклона зависимости при высоких  $F10.7 > 165$ ) наблюдается на рис. 2б и для  $m$  и для  $q$  событий, не смотря на плохо выраженную зависимость  $N(m)$  при  $F10.7 < 165$ .

Рис. 2. Зависимость  $N(\text{tot})$ ,  $N(m)$  и  $N(q)$  от  $F10.7$  для ст. Slough и ст. JuliusruhРис. 3. а – зависимость  $N(q)$ ,  $N(q+)$  и  $N(q-)$  от  $F(10.7)$ , б – зависимость  $N(m)$ ,  $N(m+)$  и  $N(m-)$  от  $F(10.7)$  для ст. Juliusruh

На рисунке 3 представлены результаты дальнейшего «препарирования» данных для Juliusruh. Каждый из двух рисунков по-своему интересен. Из рисунка 3а следует, что хорошо выраженная зависимость  $N(q)$  от  $F10.7$  обусловлена четкой зависимостью положительных  $q$  событий до  $F10.7 < 165$  и  $F10.7 > 170$ . Непонятный нам пока скачок  $N(q+)$  от 155 к 175 как раз и обуславливает соответствующий скачок в  $N(q)$ . Характерно, что для зависимости  $N(q+)$  для  $F10.7 < 165$  величина  $R^2$  очень высока (0.95). Это показывает, что именно положительные  $q$  события определяют зависимость  $N(q)$ , а, следовательно, и  $N(\text{tot})$  (см. рис. 2б) от СА.

На рисунке 3б, прежде всего, привлекает внимание поведение  $N(m+)$ . Во-первых, для  $F10.7 < 130$   $N(m+)$  демонстрирует хорошо выраженное падение с  $F10.7$ , тогда как падение всех  $m$  событий в этом интервале СА выражено плохо. Это означает (и подтверждается ходом  $N(m-)$  на рис. 3б), что хорошо выраженное падение  $N(m+)$  «компенсируется» плохо выраженной зависимостью  $N(m-)$  (напомним, что  $N(m) = N(m+) + N(m-)$ ).

Во-вторых, картины изменения с  $F10.7$  количества  $q^+$  и  $m^+$  событий похожи. В обоих случаях сначала происходит хорошо выраженное падение и  $N(q^+)$ , и  $N(m^+)$ . Затем происходит скачок обеих величин, а для четырех последних точек вновь наблюдается очень хорошо выраженное ( $R^2 > 0.93$ ) падение. Правда для  $m^+$  скачок начинается раньше (на  $F10.7 = 135$ ), чем для  $q^+$  ( $F10.7 = 165$ ). Было бы естественно предположить, что где-то в интервале  $F10.7 = 130-160$  при анализе данных станции Juliusruh попала буря (или бури), в которых допущена ошибка в исходных данных.

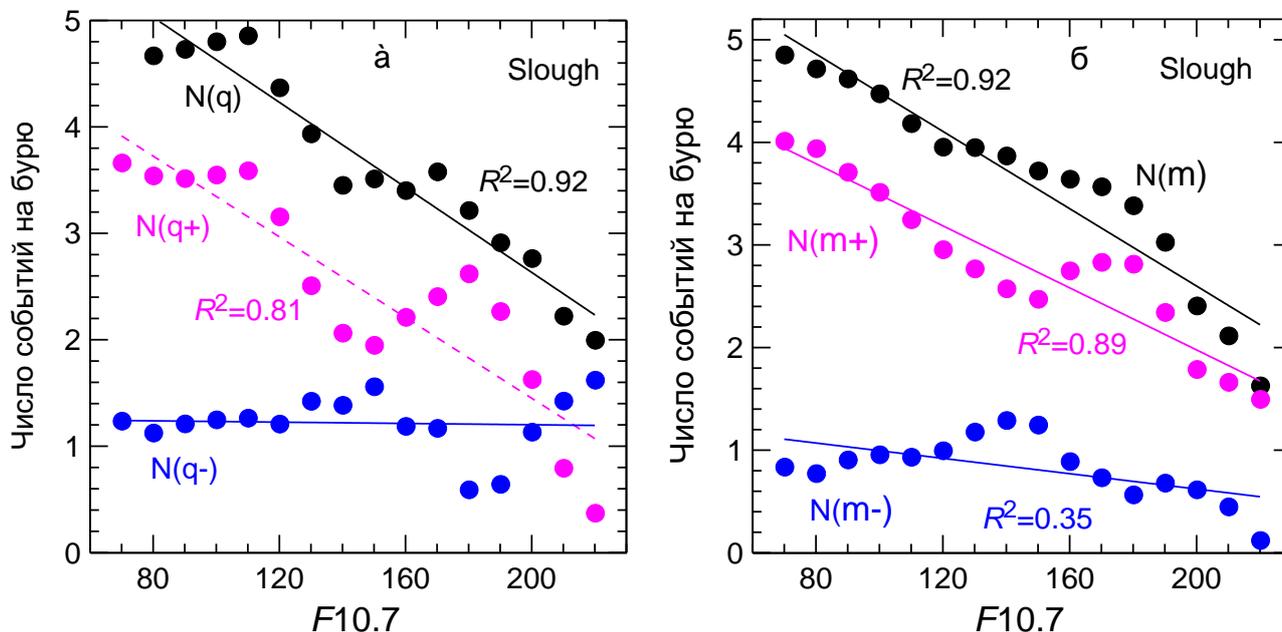


Рис. 4. а – зависимость  $N(q)$ ,  $N(q^+)$  и  $N(q^-)$  от  $F(10.7)$ ,  
б – зависимость  $N(m)$ ,  $N(m^+)$  и  $N(m^-)$  от  $F(10.7)$  для ст. для Slough

Но нечто подобное наблюдается также и на аналогичных зависимостях для Slough (рис. 4). Это подобие поведения числа событий для двух станций требует более сложного объяснения. Такого объяснения у нас пока нет. Можно лишь предположить, что при анализе данных обеих станций в интервал  $F10.7=160-180$  попадает буря (или бури), в которой по каким-то причинам нарушается связь количества событий с  $CA$ , получаемая для других интервалов  $F10.7$ .

Хотя, как следует из рис. 3 и 4, вклад отрицательных отклонений (событий) как  $q$ , так и  $m$  в изменение  $N(m)$  и  $N(q)$  для обеих станций мал, удивительно близкими являются формы зависимостей  $N(q^-)$  и  $N(m^-)$  от  $F10.7$ . На рисунках 3а, 3б и 4б картина очень похожа: рост в первой половине интервала  $F10.7$  и падение во второй половине с максимумом в области  $F10.7=120-140$ . На рисунке 4а картина несколько отличается, но некий пик (переход от роста к падению) виден на  $F10.7=150$ . Хотя объяснения наблюдаемым эффектам у нас на сегодня нет, они косвенно указывают на то, о чем уже говорилось выше – где-то в середине интервала  $F10.7$  в наш анализ попадает буря (или бури), в которой иная связь количества событий с  $F10.7$  и которая искажает получаемые зависимости. Тот факт, что эти искажения очень похожи в данных обеих станций, практически исключает их объяснение ошибкой в исходных данных.

Результаты дальнейшего «препарирования» данных до третьего уровня приведены на рис. 5. Как и в предыдущей работе [Данилов и Константинова, 2021], где анализировалась зависимость от интенсивности магнитной бури, мы рассмотрели зависимость от  $F10.7$  числа положительных  $q$  событий с амплитудами  $+(20-30)\%$   $N(20q^+)$  и суммарного числа событий с амплитудами  $+(30-40\%)$  и  $>+40\%$   $N(>30q^+)$ .

Как видно из рис. 5, в случае обеих станций зависимость  $N(>30q^+)$  от  $F10.7$  выражена гораздо лучше ( $R^2 = 0.92$  и  $0.93$ ) чем зависимость  $N(20q^+)$  ( $R^2 = 0.66$  и  $0.45$ ).

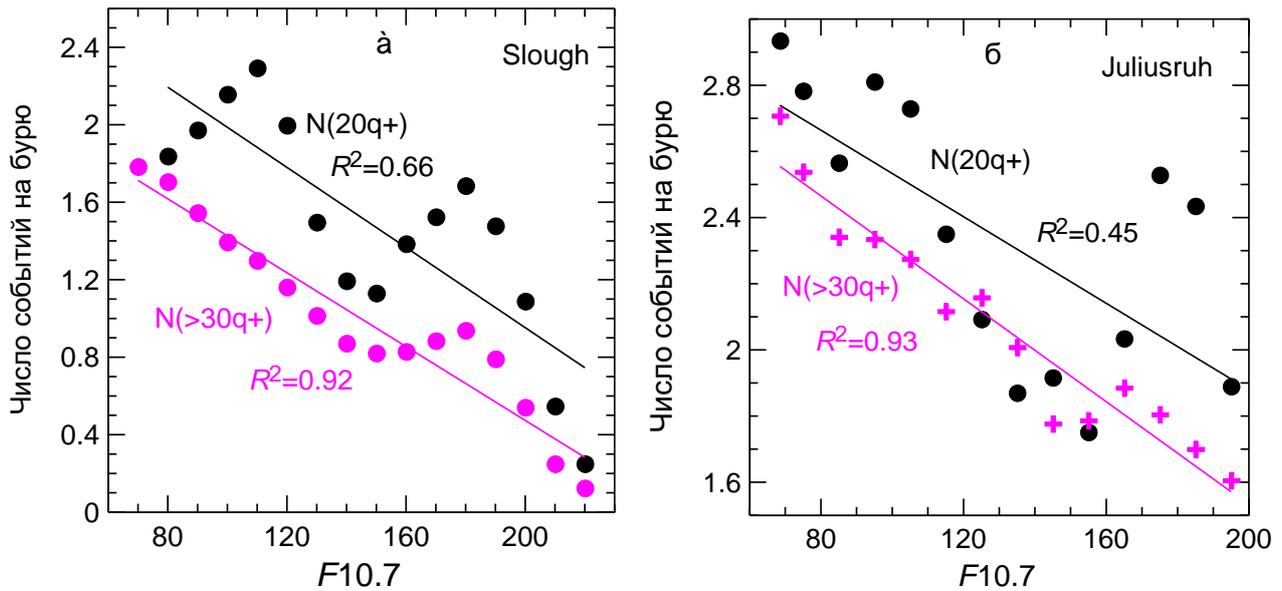


Рис. 5. Зависимость  $N(20q+)$  и  $N(>30q+)$  от  $F10.7$  для Slough и Juliusruh

Нам представляется, что этот результат подтверждает предположение, которое мы уже высказывали в предыдущих публикациях серии: в число событий с амплитудой  $+(20-30)\%$  попадают случайные флуктуации  $foF2$  (вероятно, с амплитудой лишь немного превышающей 20%), которые «засоряют» исходные данные и приводят к ухудшению искомых зависимостей.

Обращает на себя внимание также и близость наклонов  $k$  всех 4-х аппроксимирующих линий на рис. 5. Этот наклон совпадает для обеих линий на рис. 4а ( $k = 0.010$ ) и близок для линий на рис. 4б ( $k = 0.007$  и  $0.008$  для  $N(20q+)$  и  $N(>30q+)$ , соответственно). Такое согласие величин  $k$  для разных амплитуд отклонений и двух станций является еще одним подтверждением того, что мы исследуем некий процесс (по нашему убеждению, связанный с предстоящей магнитной бурей), а не случайные отклонения  $foF2$ .

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, результаты данной работы подтверждают вывод, полученный Константиновой и Даниловым [2020] о том, что количество событий (отклонений  $foF2$  от спокойных условий) максимально при низкой солнечной активности и уменьшается с ростом СА (увеличением  $F10.7$ ). Этот вывод важен для подтверждения того факта, что мы действительно анализируем события, связанные с предстоящей магнитной бурей (предвестники), поскольку очевидно, что случайные отклонения  $foF2$  не могут демонстрировать значимую зависимость от СА.

Очень похожее поведение общего числа событий с  $F10.7$  для двух станций 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  $foF2$ .

То же справедливо и для сходства зависимостей  $N(20q+)$  и  $N(>30q+)$  для двух станций (рис. 5). Меньшие величины  $R^2$  для зависимости  $N(20q+)$ , чем для зависимости  $N(>30q+)$  подтверждают предположение, что число событий с амплитудой  $+(20-30)\%$  может быть «засорено» случайными отклонениями  $foF2$ , и более надежным предвестником предстоящей бури является количество событий с большей амплитудой.

Нам пока понятны не все особенности полученной зависимости числа событий от  $F10.7$ . Более сильное падение при  $F10.7 > 160$ , которое очень хорошо выражено на рис. 1 (с очень высокими величинами  $R^2$ ), затем прослеживается и при переходе к следующим уровням деления (рис. 2–4). Мы надеемся, что этот экспериментальный факт будет полезен в дальнейшем при построении физической картины происходящих процессов.

**ЛИТЕРАТУРА**

- Данилов А.Д., Константинова А.В. Ионосферные предвестники геомагнитных бурь. 1. Обзор проблемы // Геомагнетизм и аэрномия. Т.59. №5. С. 594–606. 2019.
- Данилов А.Д., Константинова А.В. Детальный анализ поведения критической частоты слоя  $F2$  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  $F2$  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  $F2$  перед магнитными бурями. 3. Зависимость от интенсивности магнитной бури // Гелиогеофизические исследования. Вып. 29. 24–29. 2021.
- Константинова А. В. Данилов А.Д., Ионосферные предвестники геомагнитных бурь. 2. Анализ данных ст. Slough // Геомагнетизм и аэрномия. Т.60. №3. С. 329–336. 2020.
- Лецинская Т.Ю., Михайлов В.В. Модель SIMP-1: картирование месячных медиан  $foF2$  по северному полушарию // Геомагнетизм и аэрномия. 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  $F2$ -LAYER CRITICAL FREQUENCY PRIOR TO MAGNETIC STORMS. 4. DEPENDENCE ON SOLAR ACTIVITY**

Danilov A.D., Konstantinova A.V.

An analysis of the behavior of the  $F2$ -layer critical frequency,  $foF2$ , 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  $foF2$  from quiet conditions) are found. It is obtained that the aforementioned deviations demonstrate a well pronounced dependence on solar activity. 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  $foF2$ , but are related to the coming magnetic storm, i. e., are its precursors.

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