



УДК 550.388.2

ДЕТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ СЛОЯ F2 ПЕРЕД МАГНИТНЫМИ БУРЯМИ. 3. ЗАВИСИМОСТЬ ОТ ИНТЕНСИВНОСТИ БУРИ

А. Д. Данилов¹, А. В. Константинова¹¹Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова, г. Москва, Россия

На основании данных станции Juliusruh проведен анализ поведения критической частоты слоя $F2$, $foF2$, в течение трех дней, предшествующих магнитной буре. Рассмотрены 272 бури за период с 1976 по 2010 гг. и найдено 2682 события (отклонения $foF2$ от спокойных условий). Получено, что указанные отклонения демонстрируют хорошо выраженную зависимость от интенсивности предстоящей магнитной бури. 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 $foF2$, но связаны с предстоящей магнитной бурей, т.е. являются ее предвестниками.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ГЕОМАГНИТНАЯ БУРЯ, ИОНОСФЕРНАЯ БУРЯ, ИОНОСФЕРНЫЙ СЛОЙ $F2$.

DOI: 10.54252/2304-7380_2021_29_24

1. ВВЕДЕНИЕ

Во многих ионосферных исследованиях отмечался тот факт, что в течение 2-3 дней перед магнитными бурями наблюдаются возмущения критической частоты слоя $F2$ 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., 2017; 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 $foF2$ 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 $foF2$ 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 и времени до начала бури приведены в первых двух работах данной серии [Данилов и

Константинова, 2020 а, б]. В данной работе мы рассматриваем зависимость числа событий от интенсивности предстоящей магнитной бури. В качестве меры этой интенсивности мы будем использовать минимальное значение Dst индекса в течение 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 Dst

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 интенсивности предстоящей магнитной бури, мы сравнивали количество событий на одну бурю K с наименьшим значением Dst индекса в каждой буре. Мы разбили весь диапазон изменения $Dst \text{ min}$ на интервалы по 10 нТ каждый и анализировали изменение величины K , взятой для каждого интервала.

На рисунке 1 приведена зависимость K от интенсивности предстоящей магнитной бури $Dst(\text{min})$. Видно, что для всех событий эта зависимость хорошо выражена и статистически значима ($R^2 = 0.90$) для $Dst(\text{min}) \leq 150$ нТ. Для сильных бурь ($Dst(\text{min}) \geq 150$ нТ) эта зависимость нарушается, и в правой части рис. 1 наблюдается разброс точек.

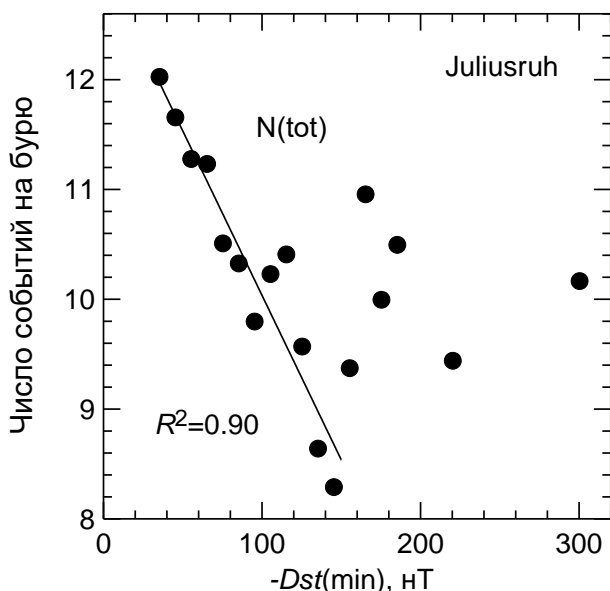


Рис. 1. Зависимость числа всех событий от $Dst(\text{min})$ для ст. Juliusruh.

Тот факт, что зависимость от $Dst(\text{min})$, хорошо выраженная для малых и средних величин, нарушается для высоких, может быть связан как с малым числом бурь на интервал $Dst(\text{min})$ для сильных бурь, так и с реальной физической причиной – отклонения $foF2$ перед очень сильными бурями могут происходить иначе (с другой частотой), чем перед слабыми, умеренными и умеренно сильными бурями. Нам представляется, что первая причина более вероятна, поскольку точки для $Dst(\text{min}) \leq -150$ нТ демонстрируют скачки, а это более типично именно для случайного разброса. Этот вывод подкрепляется и результатами для ст. Slough (см. ниже), данные которой демонстрируют хорошо выраженное падение для всего интервала величин $Dst(\text{min})$.

По причине сказанного выше мы будем рассматривать зависимость числа различных типов событий от интенсивности бури для $Dst(\text{min}) > -150$ нТ. Результаты для обеих станций приведены на рис. 2.

Рисунок 2 показывает, что с учетом ограничений на $Dst(\text{min})$, которые мы приняли, картина для ст. Juliusruh стала очень хорошей. Зависимость от $Dst(\text{min})$ четко выражена с достаточно высокими величинами R^2 как для $N(\text{tot})$, так и для $N(m)$ и $N(q)$. Зависимости для ст. Slough и Juliusruh подобны. Вклад q событий в зависимость $N(\text{tot})$ для Juliusruh несколько больше, чем вклад m событий, тогда как для Slough оба вклада примерно одинаковы. Величины R^2 для Slough несколько ниже, чем для Juliusruh,

но статистическая значимость получаемой зависимости все равно достаточно высока. Остается непонятной причина резкого падения $N(m)$ на $Dst(\min) = -145$ нТ в данных Slough.

Однако, сравнение поведения $N(\text{tot})$ для Slough и Juliusruh при $Dst(\min) < -115$ нТ на рис. 3 указывает на интересную особенность. В данных обеих станций виден скачок $N(\text{tot})$ вверх при $Dst(\min) = -115$ нТ, а наклон зависимости для больших отрицательных величин $Dst(\min)$ круче, чем для меньших, причем линейная зависимость выражена с очень высокими величинами $R^2 = 0.97$. Поскольку, в основном, одни и те же бури попадают в конкретный интервал $Dst(\min)$ на обеих станциях (исключение может быть только если были пропуски в данных по $foF2$ на одной из станций для одной-двух бурь), это позволяет нам предположить, что указанный эффект реален, и зависимость $N(\text{tot})$ от $Dst(\min)$ является более крутой для $Dst(\min) < -115$ нТ.

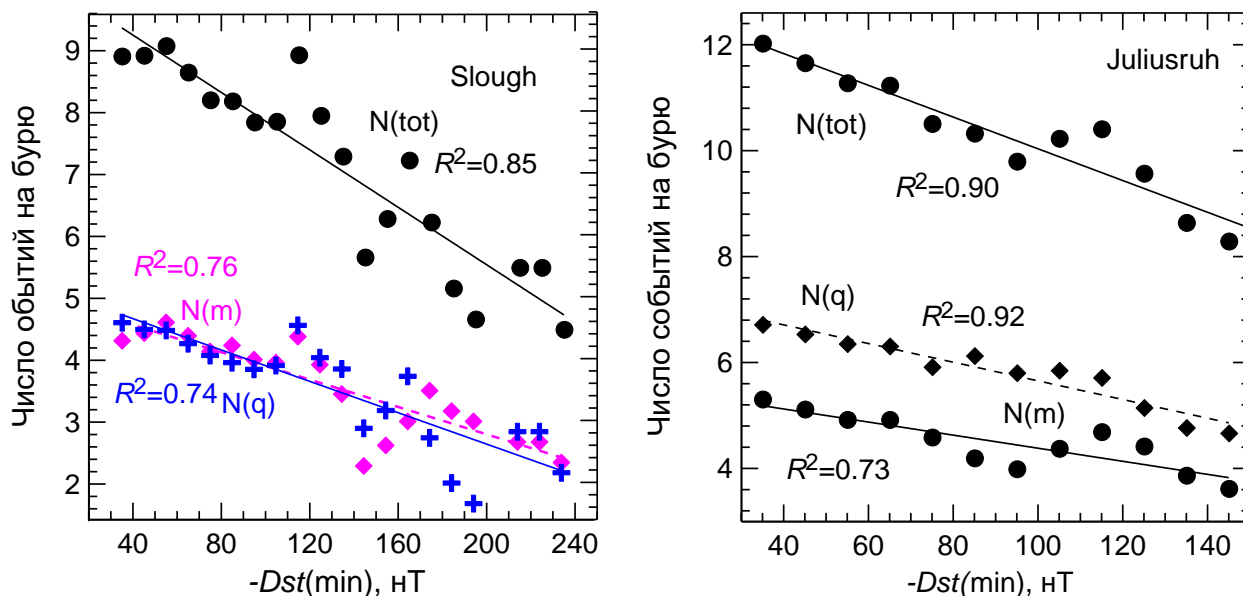


Рис. 2. Зависимость $N(\text{tot})$, $N(m)$ и $N(q)$ от $Dst(\min)$ для Slough и Juliusruh

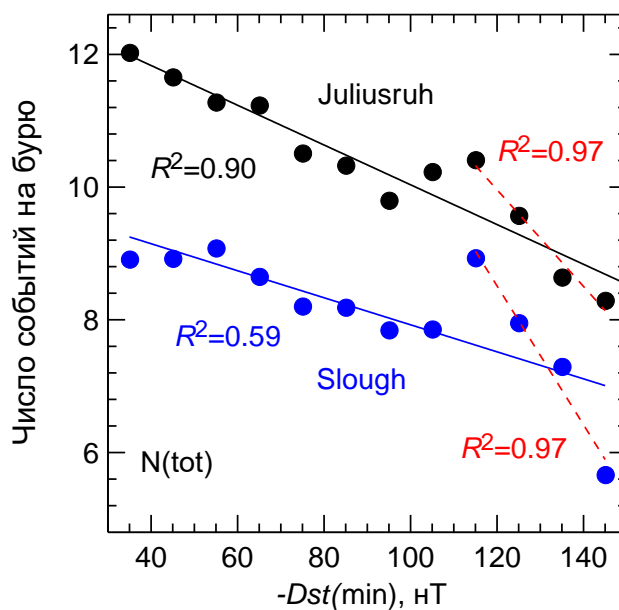
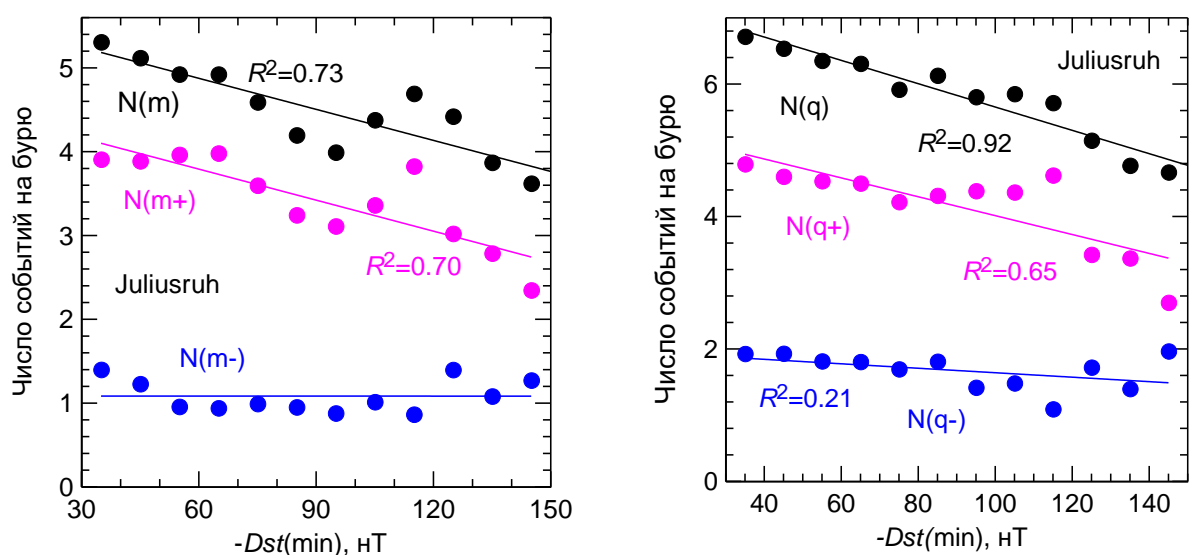
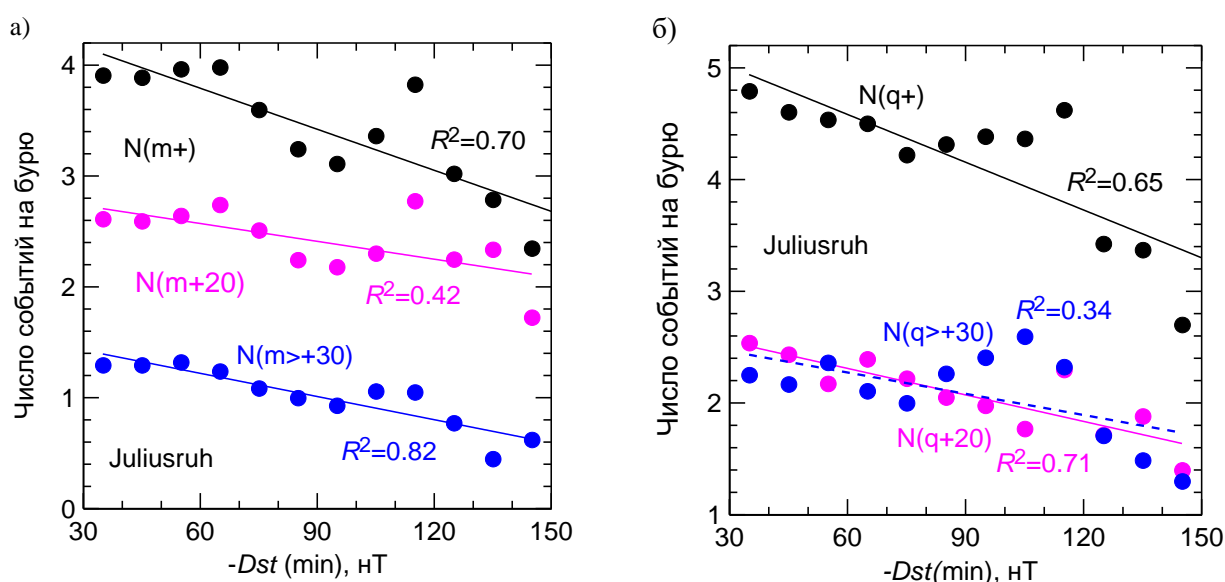


Рис. 3. Зависимость $N(\text{tot})$ от $Dst(\min)$ для двух станций.

Рис. 4. Зависимость различных событий второго уровня от $Dst(\text{min})$ для обеих станций.Рис. 5. Зависимость событий третьего уровня от $Dst(\text{min})$ для ст. Juliusruh.

На рисунке 4 приведены результаты анализа зависимостей для второго уровня. Прежде всего, обращает на себя внимание тот факт, что рисунки очень похожи. Мы постоянно обращаем на это внимание, поскольку сходство рисунков для двух станций, исходные банки данных для которых совершенно независимы, является подтверждением того, что мы, действительно, анализируем события, связанные с предстоящей бурей, так как случайные отклонения $\Delta foF2$ на двух станциях коррелировать не должны.

Как видно из рис. 4, для обеих станций характерно преобладание $N(m+)$ над $N(m-)$ и $N(q+)$ над $N(q-)$. В обоих случаях зависимость, видимая в поведении всех m и всех q событий, обуславливается зависимостью от $Dst(\text{min})$ именно $N(m+)$ и $N(q+)$. Вклад отрицательных m и q отклонений (событий) мал. Эти результаты означают, что общая зависимость числа событий от $Dst(\text{min})$ определяется именно зависимостью положительных отклонений, как m , так и q . Этот вывод согласуется с выводом, полученным авторами [Danilov and Konstantinova, 2019; Данилов и Константинова, 2020] на основании обзора большого числа работ по предбуревым эффектам, что основными предвестниками предстоящей магнитной бури являются именно положительные отклонения $\Delta foF2$.

Результаты перехода к третьему уровню деления для ст. Juliusruh приведены на рис. 5. Обращает на себя внимание следующий факт. Хотя количество m событий с отклонением $>30\%$ больше, чем событий с отклонением $20\text{--}30\%$, что должно приводить к ухудшению статистической значимости получаемой зависимости, величина R^2 для $N(m+>30)$ значительно выше, чем для $N(m+20)$. Более того, она даже заметно выше, чем для суммарной величины $N(m+)$. Это означает, что зависимость последней величины от $Dst(\min)$ определяется именно зависимостью событий с амплитудой, больше 30% . Малая величина R^2 для событий с амплитудой $20\text{--}30\%$ показывает, что, как мы получили и при анализе зависимости от сезона [Данилов и Константинова, 2020a], число событий с амплитудой $20\text{--}30\%$ может быть «засорено» случайными отклонениями $\Delta foF2$, которые в отдельных случаях могут превышать границу в 20% .

Как видно из рис. 5б, в случае $q+$ событий наблюдается обратная ситуация. Это может означать, что вероятность случайных отклонений, превышающих по амплитуде 20% выше в случае отклонений, определяемых на основании сравнения со спокойным днем, а не с моделью. Этот факт, если он подтвердится при анализе других зависимостей, также войдет в список фактов, которые можно будет использовать для построения картины физических процессов, приводящих ко всей картине появления предвестников.

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 для слабых бурь и уменьшается к умеренным и умеренно сильным бурям. 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 интенсивности бури.

Очень похожее поведение общего числа событий для двух станций на рис. 2, как и в случае зависимости от других параметров, рассмотренной 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 $foF2$.

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 $F2$ 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.
- 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.
- Лецинская Т.Ю., Михайлов В.В. Модель SIMP-1: картирование месячных медиан $foF2$ 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 F2-LAYER CRITICAL FREQUENCY PRIOR TO GEOMAGNETIC STORMS. 3. DEPENDENCE ON THE STORM INTENSITY

Danilov A.D., Konstantinova A.V.

Based on the data of Juliusruh station, an analysis of the behavior of the $F2$ -layer critical frequency, f_oF2 , during three days preceding magnetic storm is performed. Over the 1976–2010 period, 272 storms are considered and 2682 events (deviations of f_oF2 from quiet conditions) are found. It is obtained that the aforementioned deviations demonstrate a well pronounced dependence on the intensity of the coming storm. A detailed analysis of this dependence for all events together and for separate types of deviations (positive, negative, having different amplitude) is performed. The obtained results agree well with the results for Slough station published by the authors earlier. The results allow us to state that the obtained deviations are not occasional fluctuations of f_oF2 , but are related to the coming magnetic storm, that is, are its precursors.

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