

Поступила в редакцию25.10.2020 г.Опубликована15.11.2020 г.

ISSN 2304-7380

УДК 550.388.2

## ДЕТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ СЛОЯ F2 ПЕРЕД МАГНИТНЫМИ БУРЯМИ. 2. ЗАВИСИМОСТЬ ОТ ВРЕМЕНИ ДО НАЧАЛА БУРИ

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 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 времени  $\Delta T$  до начала магнитной бури SO. 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.

#### 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., 2012; Mansilla and Zossi, 2010]) 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. Julusruh. Результаты для зависимости от сезона приведены в первой работе данной серии [Данилов и Константинова, 2020]. В данной работе

Электронная почта автора для переписки:

Данилов Алексей Дмитриевич, e-mail: <u>adanilov99@mail.ru</u> Константинова Анна Владимировна, e-mail: <u>anna@tabulata.ru</u>

14

мы рассматриваем зависимость числа событий от времени ∆Т между моментом события и моментом SO.

Процедура анализа, а также выбор анализируемых дней и спокойных дней, используемых для сравнения, подробно описаны в предыдущих публикациях [Константинова и Данилов, 2020; Данилов и Константинова, 2020]. 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 $\Delta T$

Как и в предыдущей работе данной серии, мы будем анализировать сезонную зависимость числа событий N на трех уровнях. Первый уровень – общее число событий N(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.

#### 2.1 ПЕРВЫЙ УРОВЕНЬ

Зависимость общего числа событий N(tot) от времени до момента SO,  $\Delta T$ , для обеих станций приведена на рис. 1а. Несколько фактов обращают на себя внимание на этом рисунке.

Прежде всего для обеих станций получается хорошо выраженное падение N(tot) с увеличением  $\Delta T$ , т. е. с удалением момента события от SO. Если аппроксимировать изменение N(tot) с  $\Delta T$  экспонентой, то получаются зависимости, показанные на рис. 1а пунктиром.

Как и в предыдущих работах, для определения статистической значимости получаемых зависимостей мы используем коэффициент определенности  $R^2$  по F-критерию Фишера. Хотя обе кривые на рис. 1а демонстрируют хорошо выраженные особенности, о которых мы будем говорить ниже, величины  $R^2$  дают статистическую значимость S для общего падения N с ростом  $\Delta T$  (штриховые кривые), превышающую 99%. При этом наклон аппроксимирующих кривых *k* для обоих станций также оказывается достаточно близким: -0.39 и -0.28 для Juliusruh и Slough, соответственно.



Рис. 1. Изменение N(tot) со временем до SO для двух станций.

Однако, как следует из рис. 1а, это падение не является монотонным. Хорошо видны интервалы ΔT, когда величины N(tot) имеют пик на обоих станциях. Исключение составляют лишь самые первые часы. На наличие таких пиков обращалось внимание при анализе данных ст. Slough [Константинова и Данилов, 2020]. Рисунок 1а показывает, что наблюдается значительная схожесть обеих кривых. При

Это впечатление подтверждается рис. 16, где кривая для ст. Slough нанесена именно с таким сдвигом. Видно, что поведение N(tot) с  $\Delta T$  становится очень похожим для обеих станций: два первых максимума и все три минимума практически совпадают, а различие во времени третьих максимумов составляет около часа. При этом, естественно, за счет сдвига исчезает противоречие между данными двух станций в первые часы, отмеченное выше.

этом создается впечатление, что есть временной сдвиг между этими кривыми примерно на 2 часа.

Такое согласие между кривыми на рис. 16 является, на наш взгляд, очень важным подтверждением правильности нашего метода анализа и того факта, что мы действительно анализируем события, связанные с предстоящей магнитной бурей. Если бы, как можно было опасаться, анализируемые нами события представляли собой случайные отклонения foF2 от спокойных условий (например, Q-возмущения в терминологии Михайлова и Перроне [Mikhailov and Perrone, 2009]), мы не могли бы иметь таких выраженных зависимостей N(tot) от  $\Delta T$ , поскольку случайные отклонения ничего «не знают» о предстоящей буре. Точно также невозможно было бы ожидать такой схожести кривых для двух станций на рис. 16 – ведь исходные банки данных для ст. Slough и Juliusruh совершенно независимы. Поскольку по указанным причинам подобие кривых для двух станций нам представляется важным, мы будем привлекать к нему внимание и при описании результатов анализа на следующих уровнях.

Вклад q и m событий в общее количество событий N(tot) для обеих станций приведен на рис. 2. Видно, что вклад N(q) и N(m) в N(tot) в обоих случаях примерно одинаков. Это означает, что обе опции определения спокойных величин foF2, от которых отсчитывается амплитуда возмущения, дают схожие результаты.

На рисунке 3 приведено изменение тех же величин для ст. Juliusruh, но для наглядности использованы разные масштабы для N(tot) (левая шкала) и N(m), N(q) (правая шкала). Видно, что кривые для N(m) и N(q) практически повторяют ход кривой для N(tot). Это свидетельствует о том, что обе опции выбора спокойных условий, использованные в работе, дают близкие результаты.



Рис. 2. Изменение с  $\Delta T$  величин N(tot), N(m) и N(q) для двух станций.



Рис. 3. Изменение N(tot), N(q) и N(m) со временем до SO,  $\Delta T$ 



Рис. 4. Изменение с  $\Delta T$  величин N(tot), N(+) и N(-) для двух станций.

На рисунке 4 приведен вклад положительных и отрицательных отклонений в общее количество событий N(tot). Хорошо видно, что для обеих станций основной вклад в N(tot) обеспечивают N(+), а вклад N(-) мал. Мы вновь обращаем внимание на подобие рисунков для двух станций.

И по расположению основных пиков, и по общему наклону кривых плюс события обеспечивают основной вклад в изменение общего числа событий. Иначе говоря, в течение интервала 1-25 ч до SO основными событиями являются именно положительные отклонения.

Видно, что отношение N(+)/N(–), в среднем (хотя и не равномерно) уменьшается по мере удаления от SO. Так среднее значение этого отношения для  $\Delta T = 1-3$  ч составляет 6.2, а для  $\Delta T = 23-25$  ч оно равно 4.7. Если это падение отношения положительных и отрицательных событий с удалением от момента SO реально, то оно должно проявляться и в изменении этого отношения для разных календарных дней. Хотя момент SO может приходиться на разные моменты дня 0, всегда в среднем события дня 1 будут сильнее удалены от момента SO, чем дня 0, а события дней 2 и 3 – сильнее, чем события дня 1. Поэтому, если закономерность, которая проявляется на рис. 4 справедлива, можно ожидать, что отношение N(+)/N(–), будет падать по мере удаления от SO. Именно это и наблюдается по данным ст. Juliusruh: N(+)/N(–) равно 7, 3.1, 2.7 и 2.3 для 0, 1, 2 и 3 дня, соответственно. Усредненная за все 4 дня величина N(+)/N(–) равна 3.08.

## 2.2 ВТОРОЙ УРОВЕНЬ

Вклад N(m+) в общее число m событий N(m) для обеих станций приведен на рис. 5. По небольшому различию между двумя кривыми легко понять, что положительные m события обеспечивают основной вклад в общее число m событий, а, соответственно, вклад отрицательных m событий мал. Именно поэтому, чтобы не удлинять вертикальную ось на обеих рисунках, мы не привели на них величины N(m-).



Рис. 5. Изменение с ∆Т величин N(m) и N(m+) для двух станций.



Рис. 6. Изменение N(m+) с ∆Т для ст. Juliusruh и Slough (со сдвигом на 2ч)

Вновь, как и на рис. 1а, на рис. 5 обращает на себя внимание большая похожесть кривых N(m+) для двух станций. И вновь создается впечатление, что наблюдается сдвиг кривой для Slough относительно кривой для Juliusruh примерно на два часа.

Для проверки этого впечатления мы построили на рис. 6 кривые N(m+) для двух станций именно с таким сдвигом. Видно, что вновь, как и на рис. 16, до 16 ч. наблюдается хорошее согласие между двумя кривыми: два первых минимума в 4 и 10 ч, а также два первых максимума в 7 и 14 ч совпадают полностью. Согласие после 16 ч. несколько хуже, но все же есть хорошо выраженный пик в 21-23 ч.

Мы вновь подчеркиваем важность этого согласия для подтверждения правильности нашей концепции в целом, поскольку банки данных для двух станций совершенно независимы.



Рис. 7. Изменение с  $\Delta T$  величин N(q) и N(q+) для двух станций.

Изменение с  $\Delta T$  величин N(q) и N(q+) для двух станций приведено на рис. 7. Здесь не наблюдается такой четкой картины, как на рис. 4. Можно лишь отметить, что и для N(q), и для N(q+) наблюдается уменьшение с ростом  $\Delta T$ , о котором уже упоминалось в связи с кривыми на рис. 1а и которое наблюдается и на других рисунках.

## 2.3 ТРЕТИЙ УРОВЕНЬ

Вклад событий различной интенсивности в изменение N(m+) приведен на рис. 8. Поскольку число событий с амплитудой больше 40% мало, мы приводим на рис. 8 и 9 кривые для суммарного количества событий с амплитудой >30% (N(>30m+) и N(>30q+)).

Видно, что для ст. Slough вклад N(20m+) и N(>30m+) в общее число m+ событий примерно одинаков в течение всего интервала  $\Delta T = 1-25$  ч. Для ст. Juliusruh картина несколько иная: до 16 ч. вклад примерно одинаков, но в течение последующих часов постепенно начинают доминировать события с амплитудой больше 20%.



Рис. 8 Изменение с  $\Delta T$  величин N(m+), N(20m+) и N(>30m+).



Рис. 9. Изменение с ∆Т величин N(q+), N(20q+) и N(>30q+)

В случае q событий наблюдается почти такая же картина. Во всяком случае, до 19 ч вклад событий с амплитудами +20% и > +30% практически одинаков по данным обеих станций. Лишь после 20 ч для ст. Slough наблюдается некоторое превышение вклада 20q+ событий.

## 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, мы провели второй этап анализа предбуревых отклонений критической частоты *foF2* (событий) от спокойных условий. Вслед за анализом сезонных вариаций числа таких событий N, результаты которого опубликованы ранее [Данилов и Константинова, 2020], мы рассмотрели подробно зависимость N от времени события до момента начала магнитной бури SO. Как и в указанной предыдущей работе, мы по возможности сравнивали получаемые результаты для ст. Juliusruh с результатами по ст. Slough, как опубликованными ранее, так и полученными в ходе дальнейшего анализа в данной работе.

Результаты данного исследования можно сформулировать следующим образом. Для обеих станций наблюдается хорошо выраженное уменьшение общего числа событий N с увеличением времени  $\Delta T$ . Это уменьшение для обоих станций статистически значимо (S>99%). При этом величины наклона k для обеих станций близки. Хорошее согласие этих результатов для двух станций (как и результатов, полученных при дальнейшем анализе той же зависимости) мы считаем очень важным для подтверждения нашей исходной концепции, что мы анализируем события, связанные с предстоящей магнитной бурей, а не случайные отклонения *foF2*. В противном случае по очевидным причинам никакой зависимости от момента SO предстоящей бури быть не могло бы.

Хотя на этом этапе исследований мы не ставим себе задачи физического объяснения наблюдаемых статистических закономерностей, следует отметить, что полученное уменьшение N при увеличении  $\Delta T$  (удалении от SO) с точки зрения элементарной физики выглядит вполне понятным.

Неожиданным для нас явился результат, что наблюдается достаточно хорошо выраженный сдвиг по времени между данными для двух станций. При сдвиге данных ст. Slough на два часа вправо по оси времени относительно данных ст. Juliusruh два пика и два минимума на кривых совпадают полностью, а третьи пики различаются незначительно (см. рис. 16). Подобный сдвиг получается и при анализе m+ событий. Этот факт может оказаться полезным при дальнейших попытках построить физическую картину явления на основании всех закономерностей изменения N с различными факторами.

Мы получили, что вклад q и m событий в общее число событий N(tot) практически одинаков. Это свидетельствует о том, что обе опции выбора спокойных условий, использованные в работе, дают близкие результаты.

20

Вклад положительных отклонений foF2 в общее число событий N доминирует (это очень наглядно иллюстрирует рис. 4). Этот вывод совпадает с выводом, полученным Даниловым и Константиновой [2019] на основании анализа большого числа публикаций, посвященных поведению ионосферы перед магнитными возмущениями, о том, что в предбуревые дни преобладают положительные отклонения foF2 от спокойных условий.

Новым для нас является вывод о том, что отношение N(+)/N(-), в среднем (хотя и не равномерно) уменьшается по мере роста  $\Delta T$ . Это падение отношения положительных и отрицательных отклонений *foF2* с удалением от момента SO проявляется и в изменении этого отношения для разных календарных дней. Оба полученных вывода позволяют сделать предварительное заключение о том, что именно положительные события (отклонения *foF2*) и именно в течение ближайших к SO 15-20 часов следует рассматривать как наиболее важные предвестники предстоящей магнитной бури. Это заключение должно в дальнейшем быть проверено при детальном анализе зависимостей числа событий от других факторов.

В параграфах 2.2 и 2.3 приводятся результаты «препарирования» зависимостей, полученных в параграфе 2.1. Следует иметь в виду что при переходе ко второму и третьему уровням такого «препарирования», естественно, уменьшается количество анализируемых данных для каждой зависимости, а, следовательно, уменьшается и статистическая значимость получаемых результатов. Однако, мы считаем получаемые результаты интересными, поскольку они позволяют сделать предварительное заключение о вкладе тех, или иных, событий в полученные в параграфе 2.1 зависимости, и могут оказаться полезными при дальнейшем анализе зависимости числа событий от других факторов.

В частности, представляет интерес вывод о том, что вклад m+ и q+ событий доминирует в изменении с  $\Delta T$  всех m и всех q событий, соответственно. Получено также, что для положительных (как q, так и m) событий наблюдается примерно одинаковое количество отклонений *foF2* с амплитудой в +20% и >30% по меньшей мере до 16-10 ч. Этот результат также будет полезен при дальнейшем анализе.

Резюмируя, отметим следующее. В данной работе был продолжен детальный анализ данных для ст. Juliusruh, начатый в работе [Данилов и Константинова, 2020]. Мы использовали тот же метод анализа и получили результаты, которые оказались в хорошем согласии с результатами для ст. Slough. Это согласие очень важно для всей проблемы, поскольку данные двух станций представляют собой два совершенно независимых банка данных. Полученные результаты, на наш взгляд, подтверждают концепцию ионосферных предвестников магнитных бурь, высказывавшуюся рядом авторов и нами в наших предыдущих работах.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Данные по критическим частотам *foF2* были взяты с сайта Space Weather Services, Sydney, Australia и с сайта банка данных SPIDR. Авторы выражают глубокую благодарность В. В. Михайлову за предоставленную программу расчетов спокойных условий по локальной модели, созданной для прогностической модели SIMP.

#### 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. 2020.
- 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 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.

<sup>©</sup> Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

- Danilov A.D., Konstantinova A.V. Behavior of the ionospheric F region prior to geomagnetic storms, Adv. Space Res. 64, 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.
- Mikhailov, A.V, Perrone, L. Pre-storm NmF2 enhancements at mid latitudes: Delusion or reality? // Ann. Geophysicae.
  V. 27. P. 1321–1330. 2009.

# DETAILED ANALYSIS OF THE BEHAVIOR OF THE F2-LAYER CRITICAL FREQUENCY PRIOR TO GEOMAGNETIC STORMS. 2. DEPENDENCE ON THE TIME TO THE STORM ONSET

Danilov A.D., Konstantinova A.V.

Based on the data of Juliusruh station, an analysis of the behavior of the F2-layer critical frequency, foF2, during three days preceding magnetic storm is performed. Over the 1976–2010 period, 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 the time  $\Delta T$  to the magnetic storm onset SO. A detailed analysis of this dependence for all events together and for different types of deviations (positive, negative, obtained by comparison to different data for quiet conditions, and having different amplitude) is performed. The obtained results agree well with the results published by the authors earlier and make it possible to state that the obtained deviations are not occasional fluctuations in foF2, but are related to the coming magnetic storm, that is, are its precursors.

 $\label{eq:keywords:geomagnetic storm, ionospheric storm, ionospheric F2-layer$