



УДК 550.388.2

ДЕТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ СЛОЯ F2 ПЕРЕД МАГНИТНЫМИ БУРЯМИ. 1. СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ

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 и статистически значимую зависимость от сезона. 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 $foF2$ (Q -возмущения), но связаны с предстоящей магнитной бурей, т.е. являются ее предвестниками.

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

1. ВВЕДЕНИЕ

Во многих исследованиях отмечался тот факт, что в течение 2-3 дней перед магнитными бурями наблюдаются возмущения критической частоты слоя $F2$ ионосферы – отклонения от спокойных условий. Обзор указанных исследований и подробное обсуждение проблемы можно найти в недавних 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). 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 .

Ниже приводятся результаты аналогичного исследования для данных станции Juliusruh. Были рассмотрены 272 бури за период с 1976 по 2010 гг. и найдено 2682 события. Мы использовали тот же метод анализа, что и в предыдущей работе, и сравнивали поведение $foF2$ в течение трех предбуревых

дней с двумя версиями спокойных условий: по фоновой модели, используемой в прогностической программе SIMP [Лещинская и Михайлов, 2016], и по выбранному спокойному дню. Мы накладывали те же ограничения на анализируемые предбуревые дни и на спокойный день, что и в предыдущей работе. За деталями мы отсылаем читателей к указанной публикации [Константинова и Данилов, 2020].

Также, как и в указанной выше работе, мы рассматривали наблюдаемые в предбуревые дни отклонения $foF2$ от фоновой модели (эти отклонения обозначались как m события) и от величин, наблюдаемых в спокойный день (эти отклонения обозначались как q события). В качестве анализируемого параметра использовалось отклонение $\Delta foF2$, которое представляет собой разницу в процентах между величинами $foF2$, наблюдаемыми в анализируемый день и в спокойных условиях:

$$\Delta foF2 = (foF2_{\text{наб}} - foF2_{\text{спок}}) / foF2_{\text{спок}}$$

Для каждой рассматриваемой бури строился рисунок изменения $\Delta foF2$ согласно m и q опциям в течение дня SO и трех предшествующих дней. Примеры таких рисунков приведены на рисунках 1 и 2. На этих рисунках под осью абсцисс приведены величины AE и ΣKp индексов для рассматриваемых дней. Вертикальной штриховой линией отмечен момент SO .

Пример, приведенный на рис. 2, соответствует условиям, когда первый из трех предбуревых дней был возмущенным ($AE = 198$ нТ и $\Sigma Kp = 19-$) и потому из дальнейшего анализа исключался. Остальные дни на рисунках 1 и 2 соответствовали принятым нами условиям отбора и использовались в дальнейшем анализе.

Мы проанализировали все 272 рисунка типа рис. 1 и 2. На каждом рисунке мы определяли количество отклонений $\Delta foF2$ и, в течение 30 часов до SO , также время ΔT данного отклонения до SO . Мы ввели градацию отклонений: $+(20-30)\%$, $+(30-40)\%$, $> +40\%$, $-(20-30)\%$, $-(30-40)\%$ и $< -40\%$.

Мы рассматривали те же зависимости числа отклонений (событий) N от различных условий, что и для ст. Slough (см. выше). В данной работе будут представлены результаты анализа сезонной зависимости появления этих событий. Для каждого типа событий мы будем сравнивать результаты с аналогичными результатами для ст. Slough, как опубликованными ранее, так и полученными в ходе данной работы.

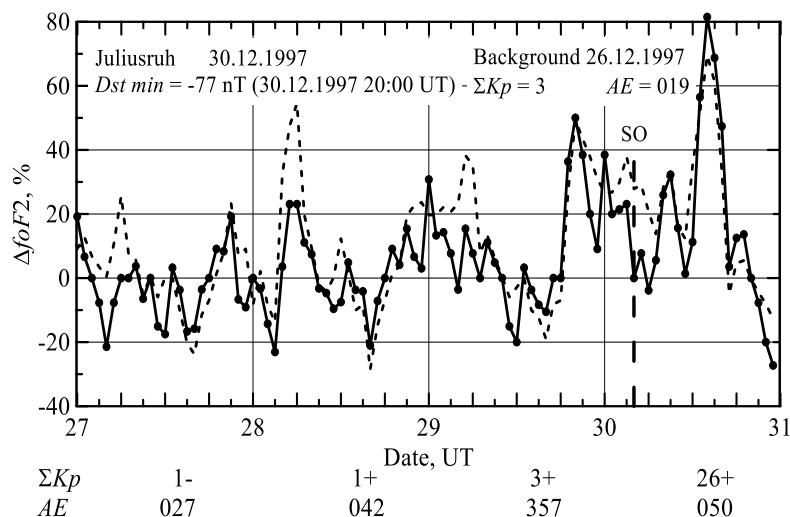


Рис. 1. Изменение $\Delta foF2$ со временем в течение дня бури и трёх предбуревых дней для бури 30 декабря 1997 г. (сплошная линия и пунктир соответствуют m и q событиям).

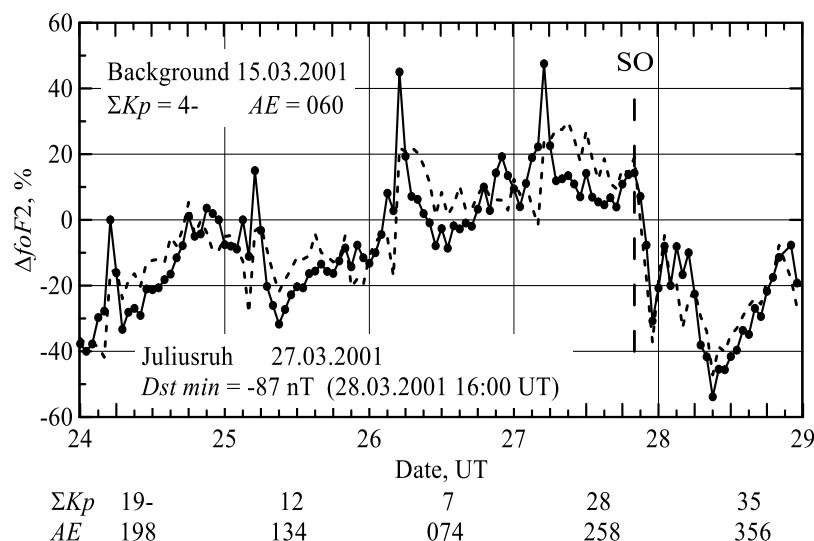


Рис. 2. Изменение $\Delta foF2$ со временем в течение дня бури и трёх предбуревых дней для бури 15 марта 2001 г. (сплошная линия и пунктир соответствуют m и q событиям).

2. СЕЗОННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ СОБЫТИЙ

Мы будем анализировать сезонную зависимость 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 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%. Поскольку количество выбранных нами бурь, попавших в тот, или другой месяц, могло быть различно, мы строили сезонную зависимость числа событий на одну бурю (делили найденное количество событий на количество бурь, проанализированных в данном месяце), т.е., фактически, вероятности появления события данного типа K .

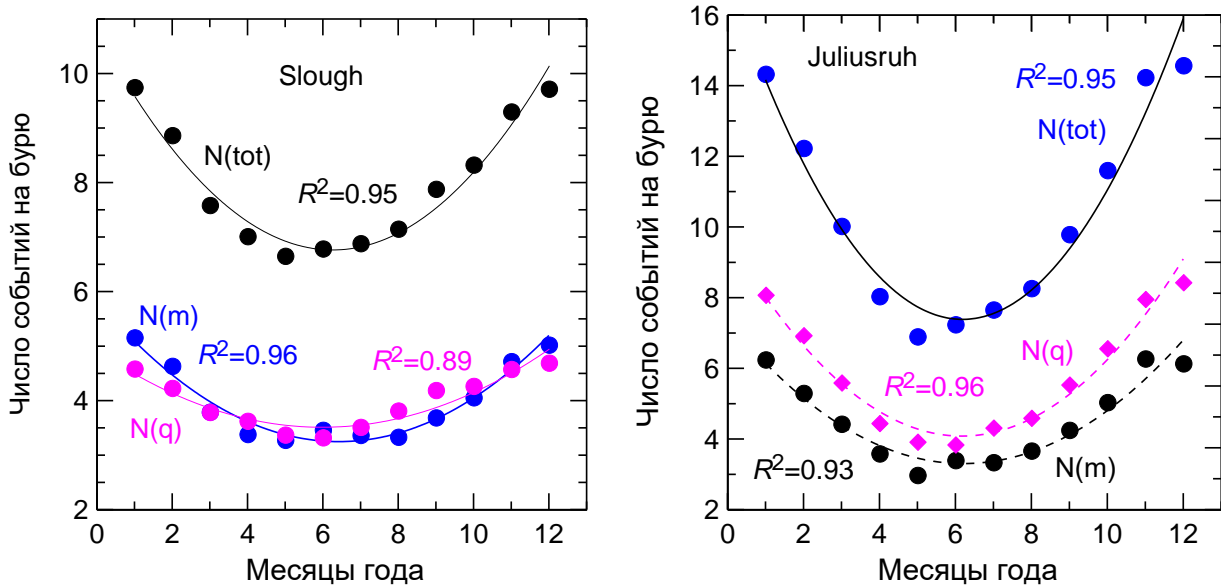
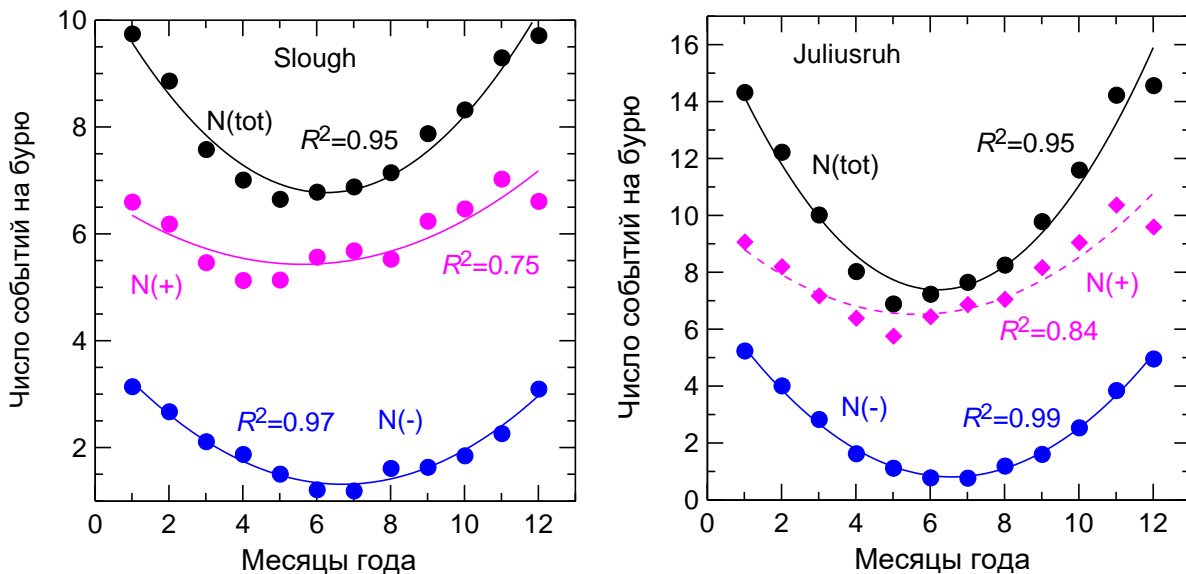
2.1 ПЕРВЫЙ УРОВЕНЬ

Сезонные вариации общего числа событий $N(\text{tot})$, а также числа q и m событий для обеих станций приведено на рис. 3. Видно, что приведенные зависимости дают высокие величины R^2 (коэффициент определенности по F-тесту Фишера), что обеспечивает очень высокую статистическую значимость S выше 99%.

Первый и главный вывод из рис. 3 (как и из всех последующих рисунков) состоит в том, что наблюдается четко выраженная сезонная зависимость всех рассматриваемых событий: зимой вероятность появления событий значительно выше, чем летом.

Здесь и далее, мы будем подчеркивать очень близкий характер рисунков для двух станций. Это очень важно для развиваемой нами концепции, что анализируемые события связаны с предстоящей магнитной бурей, т.е. могут рассматриваться как ее предвестники. Одинаковый характер соответствующих кривых для двух станций является весомым аргументом в пользу того, что это именно так, поскольку, если бы мы анализировали случайные отклонения $foF2$, вызванные неточностями измерений, или какими-либо другими случайными причинами, согласия между данными для двух станций быть не могло бы. Рисунок 3 показывает также, что для обеих станций вклад q и m событий в общее число событий $N(\text{tot})$ примерно одинаков.

Следует подчеркнуть один важный момент. Когда мы переходим от первого уровня ко второму, уменьшается количество рассматриваемых событий и, следовательно, уменьшается статистическая обеспеченность результатов. Можно было опасаться, что переходы к более низким уровням будут приводить к существенному падению величин R^2 и, соответственно, S . Однако, рис. 3 показывает, что для q и m событий наблюдаются такие же высокие величины R^2 , как и для $N(\text{tot})$. Как следует из рис. 4, это справедливо также и для перехода от $N(\text{tot})$ к $N(+)$ и $N(-)$.

Рис. 3. Сезонная зависимость $N(\text{tot})$, $N(\text{m})$ и $N(\text{q})$ для ст. Slough и Juliusruh.Рис. 4. Сезонная зависимость $N(\text{tot})$, $N(+)$ и $N(-)$ для ст. Slough и Juliusruh.

Еще два факта обращают на себя внимание на рис. 4. Во-первых, летом (июнь-июль) наблюдается высокое отношение $N(+)$ к $N(-)$ около 5–6 (Slough) и около 10 (Juliusruh). В то же время, в декабре оно равно примерно 3.5 для обеих станций. Причина этого явления нам пока непонятна. Во-вторых, для обеих станций зависимость $N(+)$ выражена несколько хуже, чем для $N(-)$ (более низкие величины R^2). Мы будем возвращаться к этому вопросу ниже при рассмотрении зависимостей на следующих уровнях.

Интересно проанализировать вклад в общее количество событий $N(\text{tot})$ различных анализируемых дней. Мы называем день начала бури SO днем 0. Соответственно, дни 1–3 отсчитываются от SO в обратном порядке: день 1 является самым близким к SO, а день 3 – самым дальним. Результаты анализа для 1-3 дней для ст. Juliusruh приведены на рис. 5. Мы не приводим данные для дня 0, поскольку его длительность для разных бурь (в зависимости от момента SO) различна и может меняться от 1 до 24 часов.

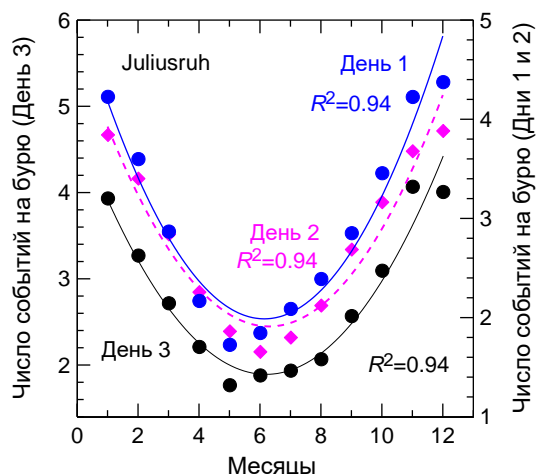


Рис. 5. Сезонные вариации числа событий в различные дни до бури.

Рисунок 5 показывает, что вклад каждого из трех дней в общее количество событий примерно одинаков и что для каждого из дней наблюдается хорошо выраженная сезонная зависимость с одной и той же величиной $R^2=0.94$.

2.2 ВТОРОЙ УРОВЕНЬ

На рисунке 6 приведены сезонные вариации для всех m событий, а также для $N(m+)$ и $N(m-)$. Вновь видно очень хорошее согласие результатов для двух станций. В обоих случаях основной вклад во все m события вносят $N(m+)$. И вновь обращает на себя внимание худшая зависимость от сезона для $m+$ событий, чем для $m-$ событий. Для $N(m+)$ величина R^2 составляет 0.77 (ст. Slough) и 0.69 (ст. Juliusruh), тогда как для $N(m-)$ эта величина равна 0.95 и 0.99, соответственно. Следует сразу подчеркнуть, что и при приведенных величинах R^2 зависимость $N(m+)$ статистически значима (величина $S>98\%$). Мы обращаем внимание на меньшие величины R^2 для положительных событий лишь потому, что это может помочь в понимании физики процессов, приводящих к формированию анализируемых отклонений $foF2$.

Уместно подчеркнуть, что хотя число $m-$ событий существенно меньше, чем $N(m)$, сезонная зависимость для этих событий (вопреки тому, что можно было бы ожидать – см. выше) очень хорошо выражена для обеих станций.

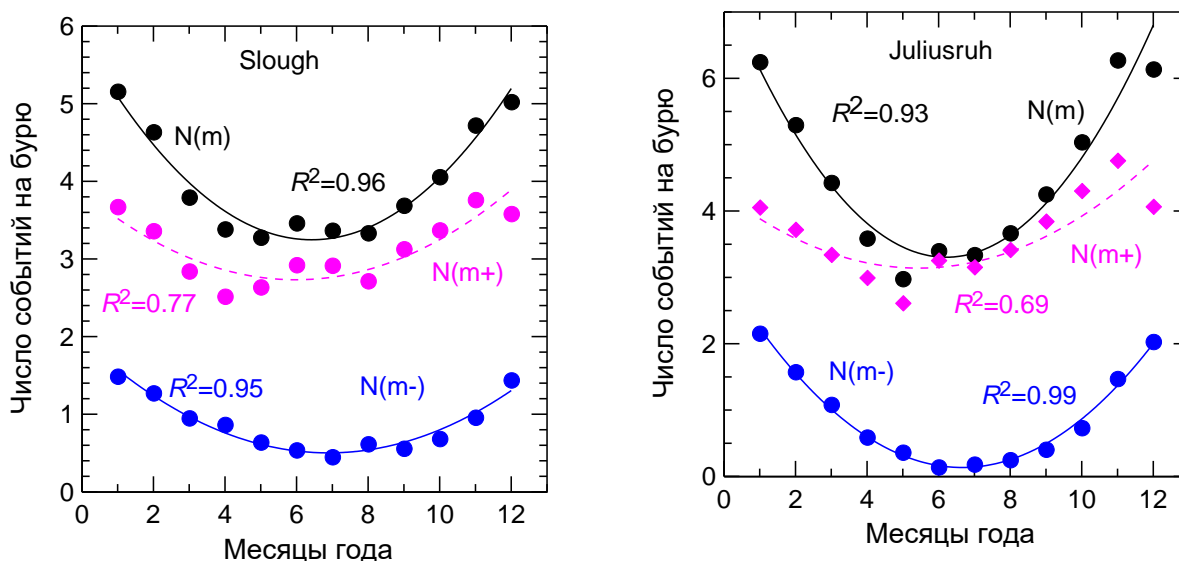


Рис. 6. Сезонная зависимость $N(m)$, $N(m+)$ и $N(m-)$ для ст. Slough и Juliusruh.

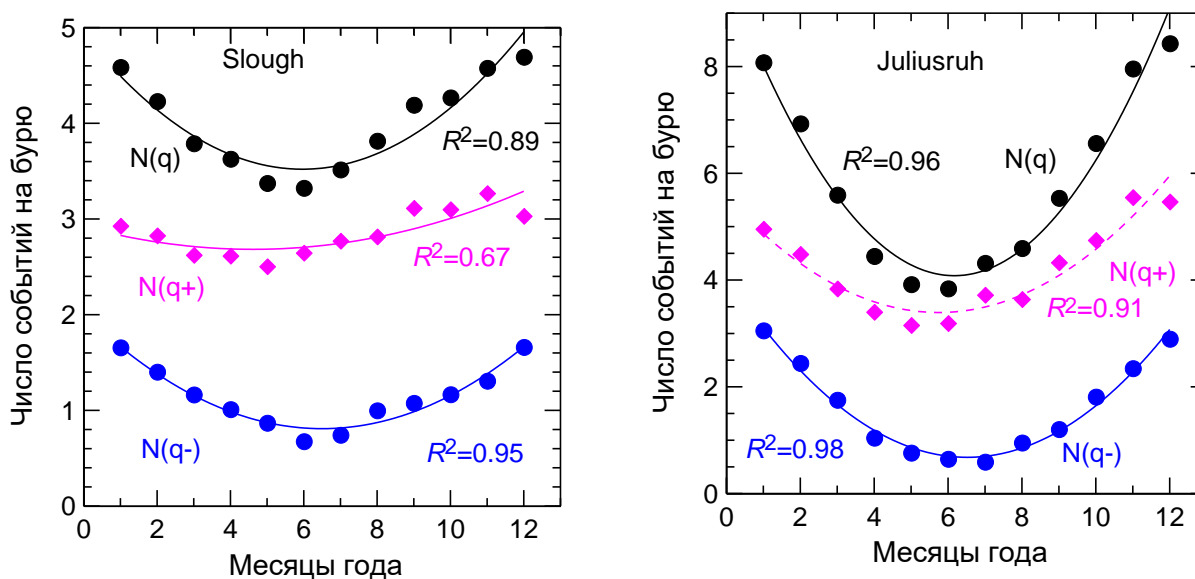


Рис. 7. Сезонная зависимость $N(q)$, $N(q+)$ и $N(q-)$ для ст. Slough и Juliusruh.

На рисунке 7 представлен аналогичный анализ для q событий. Здесь видны высокие значения R^2 для $N(q)$ и $N(q-)$. Однако для $N(q+)$ эти значения ниже: для ст. Juliusruh разница не очень велика, а вот для ст. Slough величина R^2 заметно ниже. Это вновь привлекает внимание к более низким R^2 для положительных отклонений.

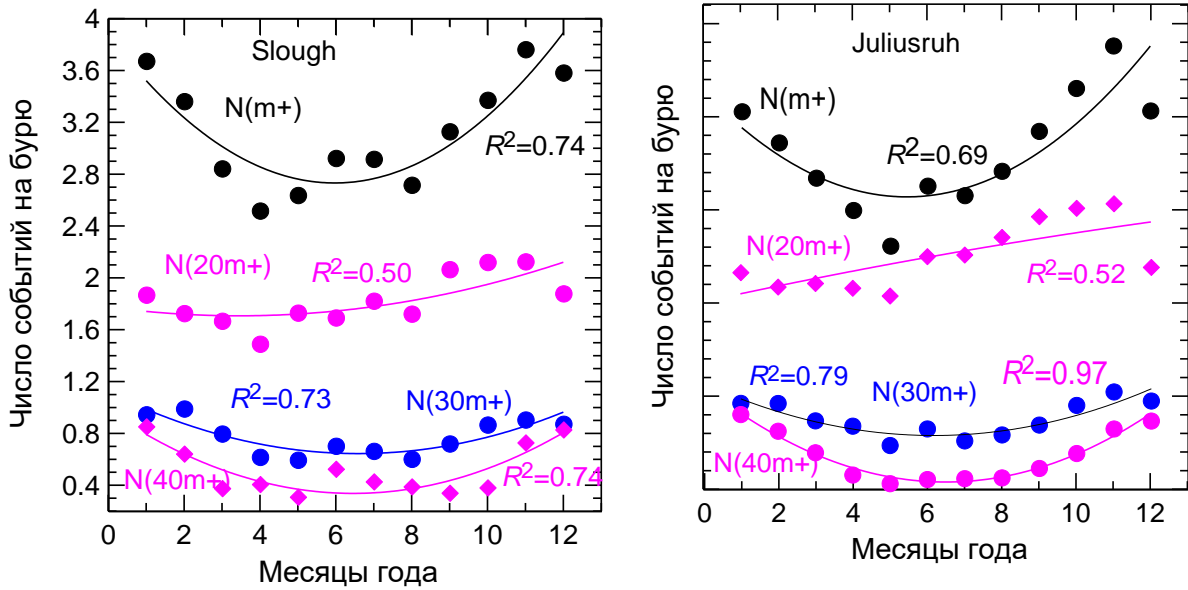
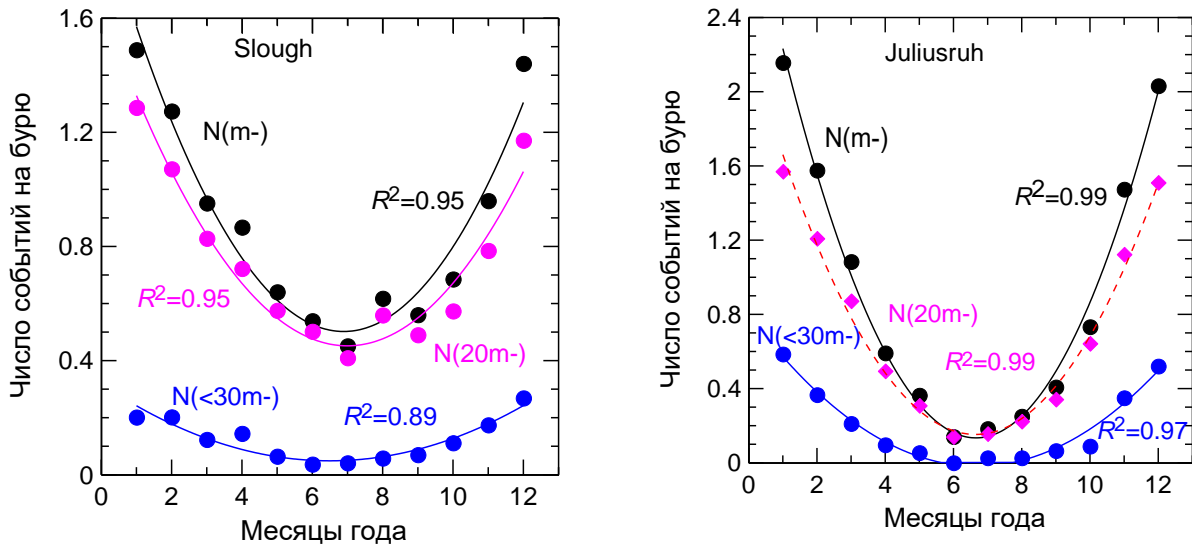
Вызывает удивление «похожесть» кривых $N(q+)$ для обеих станций. В обоих случаях видна «ступенька» в июне–августе и нарушающее общую зависимость падение $N(q+)$ в декабре. Причина этой «похожести» совершенно непонятна – ведь исходные сводки событий для двух станций абсолютно независимы. Единственным приемлемым объяснением могло бы быть предположение, что указанная «похожесть» отражает какую-то реальную геофизическую ситуацию. Однако, в настоящий момент мы не представляем, что это может быть за ситуация.

2.3 ТРЕТИЙ УРОВЕНЬ

Результаты анализа событий третьего уровня представлены на рис. 8–11. В случае отрицательных отклонений количество событий с амплитудой больше 40% мало, поэтому мы приводим на рис. 9 и 11 кривые для суммарного количества отрицательных событий с амплитудой $<30\%$ ($N(<30q-)$ и $N(<30m-)$).

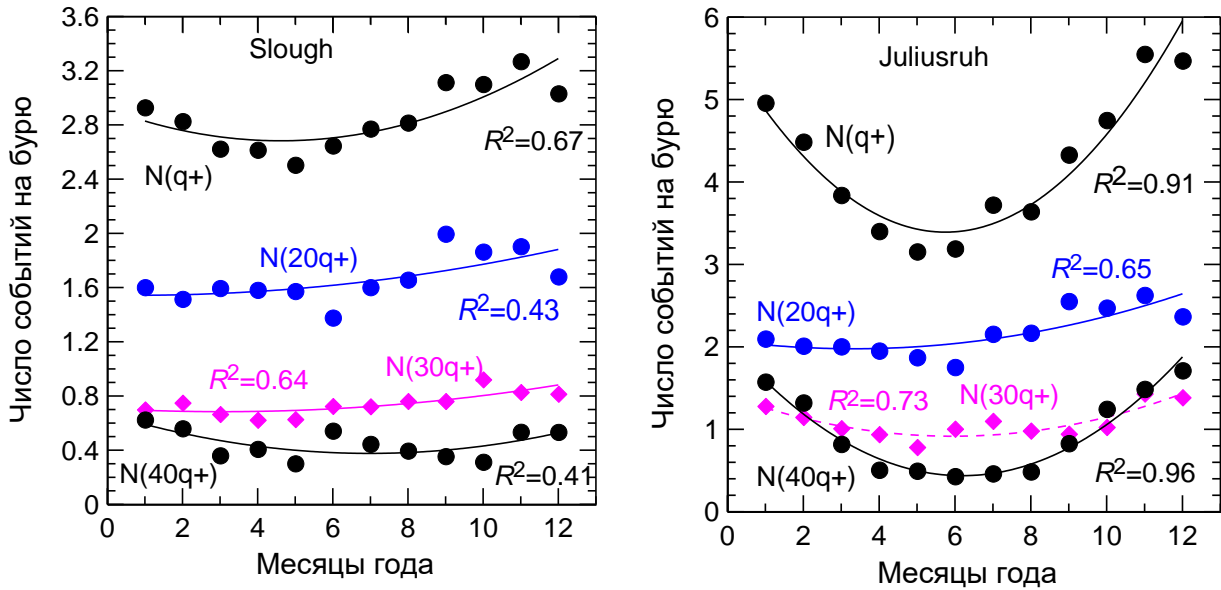
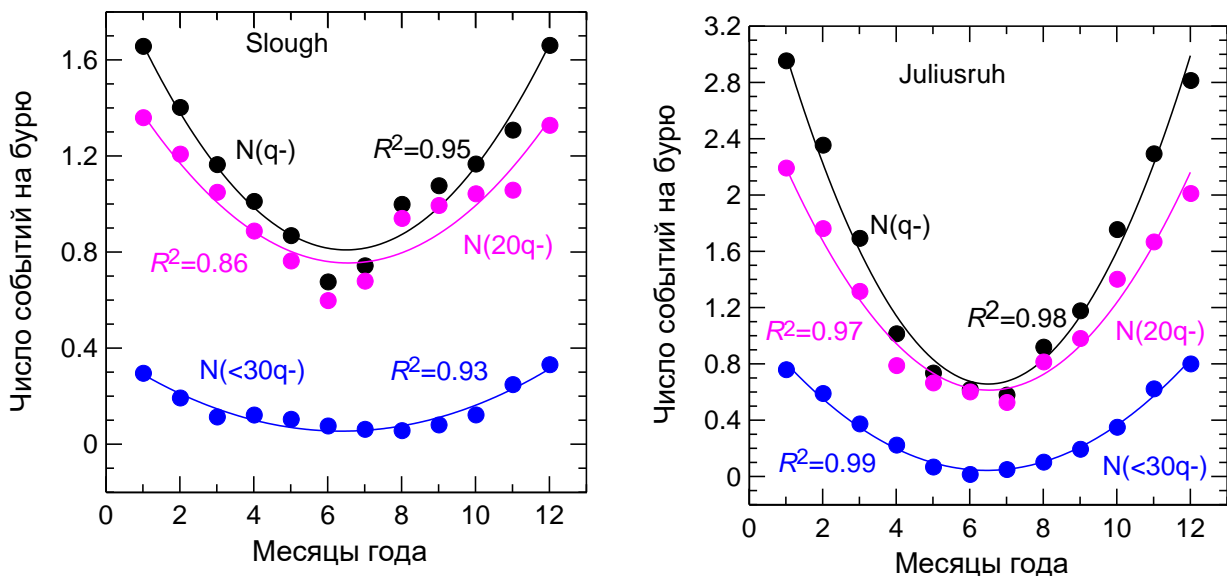
Прежде всего, поражает тот факт, что даже для событий, число которых много меньше, чем число событий первого и второго уровня, сохраняется достаточно высокая (а в некоторых случаях – даже очень высокая, больше 0.9) величина R^2 . Как уже указывалось выше, можно было ожидать, что с уменьшением числа событий статистическая значимость получаемых зависимостей будет падать. Однако этого не происходит. Этот факт является очень сильным аргументом в пользу реальности получаемой сезонной зависимости, поскольку исходные наборы данных для каждого типа событий, получаемые при анализе рисунков типа рис. 1 и 2, совершенно независимы. То же можно сказать и об очень большой «похожести» соответствующих рисунков для двух станций.

Единственным исключением является поведение величин $N(20m+)$ и $N(20q+)$ в данных обеих станций. Величины R^2 для $N(20m+)$ на рис. 8 составляют 0.50 и 0.52 для Slough и Juliusruh, соответственно, что контрастирует с гораздо более высокими значениями R^2 для других событий. Еще более низкая величина $R^2 = 0.45$ наблюдается для $N(20q+)$ для ст. Slough на рис. 10.

Рис. 8. Сезонная зависимость $N(m+)$, $N(20m+)$, $N(30m+)$ и $N(40m+)$ для ст. Slough и Juliusruh.Рис. 9. Сезонная зависимость $N(m-)$, $N(20m-)$ и $N(<30m-)$ для ст. Slough и Juliusruh.

Рисунки 8 и 10 ясно показывают, что меньшие величины R^2 для положительных событий, на которые мы обращали внимание при анализе данных 1-го и 2-го уровня, обусловлены именно «плохой» сезонной зависимостью отклонений $foF2$ с амплитудой $+20-30\%$. Поскольку величины $N(20m+)$ и $N(20q+)$ вносят наибольший вклад в зависимости $N(m+)$ и $N(q+)$, соответственно, эта «плохая» зависимость определяет и более низкие величины R^2 для сезонной зависимости всех $m+$ и $q+$ событий (см. рис. 8 и 10). Последние, в свою очередь, вносят основной вклад во все положительные события, что приводит к меньшим величинам R^2 для $N(+)$, чем для $N(-)$ на рис. 4. Тот факт, что описанная картина в равной мере справедлива для обеих станций, дает еще одно подтверждение ее реальности.

Мы предполагаем, что при подсчете числа отклонений с амплитудой более $+20\%$ происходит «засорение» получаемого числа событий за счет случайных флуктуаций $foF2$, не связанных с рассматриваемым нами предбуревым эффектом. Обычно принимается, что отклонения $foF2$ от спокойных условий в пределах $\pm 20\%$ имеют случайную природу, тогда как отклонения с большей амплитудой могут рассматриваться как некие закономерности. Однако, очевидно, что время от времени случайные отклонения могут слегка превышать $+20\%$, попадая таким образом в результаты нашего подсчета предбуревых событий и «засоряя» тем самым нашу статистику.

Рис. 10. Сезонная зависимость $N(q+)$, $N(20q+)$, $N(30q+)$ и $N(40q+)$ для ст. Slough и Juliusruh.Рис. 11. Сезонная зависимость $N(q-)$, $N(20q-)$ и $N(30q-)$ для ст. Slough и Juliusruh.

Обращает на себя внимание тот факт, что указанный эффект наблюдается только для положительных событий. Сезонные зависимости для $N(20m-)$ на рис. 9 и $N(20q-)$ на рис. 11 выражены также хорошо, как и другие зависимости на этих рисунках. Видимо, вероятность случайных отрицательных отклонений $foF2$, превышающих по амплитуде 20%, меньше, чем вероятность подобных положительных отклонений, и такие отрицательные отклонения на «засоряют» величины $N(m-)$ $N(q-)$, которые мы анализируем.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подведем краткие итоги проведенного исследования. Прежде всего, отметим, что анализ данных для станции Juliusruh подтвердил полученное нами ранее заключение о хорошо выраженной сезонной зависимости числа событий (отклонений $foF2$ от спокойных условий) в течение трех

предбуревых дней от сезона. По данным обеих станций количество таких событий зимой существенно больше, чем летом.

Показано, что, как по данным Slough, так и по данным Juliusruh, вклад q и m событий в общее число событий примерно одинаков, а вклад положительных и отрицательных событий – различен: величины $N(+)$ больше, чем величины $N(-)$.

Найдено, что вклад каждого из анализируемых дней (за исключением дня SO, длительность которого различна из-за разных LT моментов самого SO) в общее количество событий примерно одинаков, причем это количество для всех трех дней (1–3) демонстрирует хорошо выраженные сезонные вариации с высоким уровнем значимости ($R^2 = 0.94$, см. рис. 5).

Вызывает большое удовлетворение тот факт, что во всех парах рисунков 3–11 наблюдается очень похожая картина. Это относится и к соотношению между вкладами разных событий, и к величинам R^2 , определяющим статистическую значимость получаемых зависимостей. Поскольку исходные данные по Slough и Juliusruh независимы по определению, указанная «похожесть» свидетельствует в пользу реальности этих зависимостей.

Для нас оказался приятной неожиданностью тот факт, что при переходе на следующие уровни деления событий статистически значимые зависимости получаются вплоть до отклонений с магнитудой 30%, а в ряде случаев даже 40%, хотя число событий при таком делении, естественно, сильно уменьшается.

Обнаружен интересный факт: сезонная зависимость для положительных отклонений выражена хуже, чем для отрицательных, причем это справедливо как для q , так и для m событий. Более детальный анализ показал, что это связано, видимо, с тем, что количество событий с амплитудой $+(20-30)\%$, которое мы определяли на рисунках типа рис. 1-2 и считали связанными с предстоящей магнитной бурей, было «загрязнено» случайными отклонениями $\Delta foF2$, которые в некоторых случаях могут превышать $+20\%$.

Полученные в данной работе результаты на наш взгляд подтверждают основной вывод, полученный Константиновой и Даниловым [2020], что анализируемые события (отклонения $foF2$ от спокойных условий в течение трех дней, предшествующих магнитной буре) являются предвестниками этой бури. Дальнейшие подтверждения этого вывода следует искать в анализе зависимостей числа событий от других факторов, перечисленных во Введении. Мы планируем опубликовать результаты этого анализа в следующих работах серии.

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.
- 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.
- Леуцинская 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. 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.

**DETAILED ANALYSIS OF THE BEHAVIOR OF THE F2-LAYER CRITICAL FREQUENCY PRIOR TO GEOMAGNETIC STORMS.
1. SEASONAL VARIATIONS**

Danilov A.D., Konstantinova A.V.

Based on the data of Juliusruh station, analysis of the behavior of the ionospheric $F2$ -layer critical frequency, f_oF2 , during three days preceding magnetic storm is performed. Overall, 272 storms over the period from 1976 to 2010 are considered and 2682 events (f_oF2 deviations from quiet conditions) are found. It is obtained that the above deviations demonstrate a well pronounced and statistically significant dependence on season. A detailed analysis of this dependence is performed for the total number of the events and for various types of deviations. Positive and negative deviations, deviations obtained by comparison to different data for quiet conditions, and also deviations with different amplitudes are analyzed. The obtained results agree well with the results for Slough station published by the authors earlier. These results allow us to think that the obtained deviations are not occasional fluctuations of f_oF2 (Q-disturbances), but are related to the coming magnetic storm, that is, are its precursors.

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