



УДК 550.388.2

МЕТОД АНАЛИЗА ИОНОСФЕРНЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ МАГНИТНЫХ БУРЬА. Д. Данилов¹, А. В. Константинова¹¹Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова, г. Москва, Россия

На основании большой серии публикаций авторов, посвященных возмущениям критической частоты слоя $F2$ $foF2$ в течение трех дней, предшествующих магнитной буре, описан метод выделения соответствующих магнитных бурь. Критериями для такого выделения являются интенсивность бури и спокойное состояние магнитного поля в течение анализируемых предбуревых дней. Описан метод анализа полученных возмущений (отклонений $foF2$ от значений в спокойных геомагнитных условиях) и проанализированы зависимости этих возмущений от параметров предстоящей магнитной бури.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ГЕОМАГНИТНАЯ БУРЯ, ИОНОСФЕРНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ, ИОНОСФЕРНЫЙ СЛОЙ $F2$.**DOI:** 10.54252/2304-7380_2021_31_3**1. ВВЕДЕНИЕ**

Проблема возмущений в ионосферном слое $F2$ перед магнитными бурями известна уже в течение почти 40 лет. Kane [1973a, b; 1975] был первым, кто указал на то, что иногда наблюдается положительная фаза ионосферной бури до SC магнитной бури. Примеры сильных положительных отклонений $foF2$ в предбуревые дни и предположения о возможных механизмах этого явления были приведены в работах [Данилов и др., 1985; Danilov and Belik, 1992].

В дальнейшем указанной проблеме было посвящено достаточно много работ. При этом анализировались не только отклонения от спокойных условий параметров слоя $F2$, но и полного содержания электронов (TEC). Подробный анализ этих работ можно найти в обзорах Данилова и Константиновой (2019) и Danilov and Konstantinova (2019). Здесь приведем лишь основной вывод указанных обзоров. Он состоит в том, что наблюдаются как положительные, так и отрицательные отклонения указанных параметров с амплитудой от десятков процентов до фактора 1.5–2 в течение двух-трех дней до начала магнитного возмущения (в большинстве случаев – бури), при этом положительные отклонения наблюдаются чаще. Ряд исследователей (см., например, Благовещенский и Калишин, (2009); Blagoveshchensky et al., (2017)), считают, что указанные отклонения могут использоваться как предвестники предстоящей магнитной бури. Учитывая прикладную важность возможности предсказания магнитных возмущений, обсуждаемая проблема представляет большой интерес.

Авторами была выполнена серия работ по изучению поведения ионосферных возмущений (отклонений $foF2$ от значений в спокойных условиях) в течение предбуревых дней на основании измерений методом ВЗ на станциях Slough и Juliusruh в течение 1976–2010 гг. В ходе указанных исследований был разработан метод выделения и анализа этих возмущений, который и излагается ниже.

2. ВЫДЕЛЕНИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ

На первом этапе работы проводится анализ геомагнитной обстановки для нахождения подходящих для анализа магнитных бурь. Основой анализа служит изменение индекса кольцевого тока Dst по данным соответствующих сайтов геомагнитных данных. В качестве интенсивности бури принимается минимальное значение, которого указанный индекс достигает после начала бури (storm onset SO). Рассматриваются события, в которых величина Dst опускается ниже -30 нТл.

Проводится проверка трех дней, предшествующих SO. Ионосферные возмущения анализируются только в магнитно спокойные дни. Суммарный Kp индекс за сутки должен быть меньше 12, а индекс авроральной активности AE должен быть меньше 120. Специальное внимание должно быть уделено возможному наличию магнитных возмущений в течение нескольких дней до анализируемых предбуревых дней – последние ни в коем случае не должны попадать на восстановительную фазу магнитной бури, случившейся несколькими днями ранее.

Следующим этапом является определение спокойных условий, с которыми будут сравниваться величины $foF2$, измеренные в предбуревые дни. Для контроля следует использовать две опции. Одна – должен быть выбран магнитно спокойный день поблизости (не далее двух недель в обе стороны от дня SO). Он должен удовлетворять тем же условиям по Kp и AE индексам, что и предбуревые дни. Необходимо также убедиться, что выбранный спокойный день не попадает на восстановительную фазу предшествующей бури, а также на три предбуревых дня последующей бури. Второй опцией является локальная модель $foF2$, построенная для прогностической модели SIMP [Лещинская и Михайлов, 2016] и хорошо зарекомендовавшая себя в работе указанной прогностической модели. Ниже результаты, полученные с помощью первой и второй опций будут обозначаться буквами q и m , соответственно.

С использованием обеих опций вычисляются отклонения $\Delta foF2$ (в процентах) для каждого часа трех предбуревых дней:

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

где $foF2_{\text{набл}}$ и $foF2_{\text{спок}}$ – величины критической частоты в анализируемый предбуревой день и в спокойных условиях.

Полученные указанным образом величины $\Delta foF2$ наносятся на график. Пример такого графика приведен на рис. 1 и 2. В случае бури 8 марта 2008 г. (рис. 1) день 5 марта был возмущенным и, в соответствии с критериями, приведенными выше, в анализ не включаться не должен. В случае бури 11 ноября 2007 г. (рис. 2) все три дня удовлетворяли указанным критериям и могут использоваться для дальнейшего анализа.

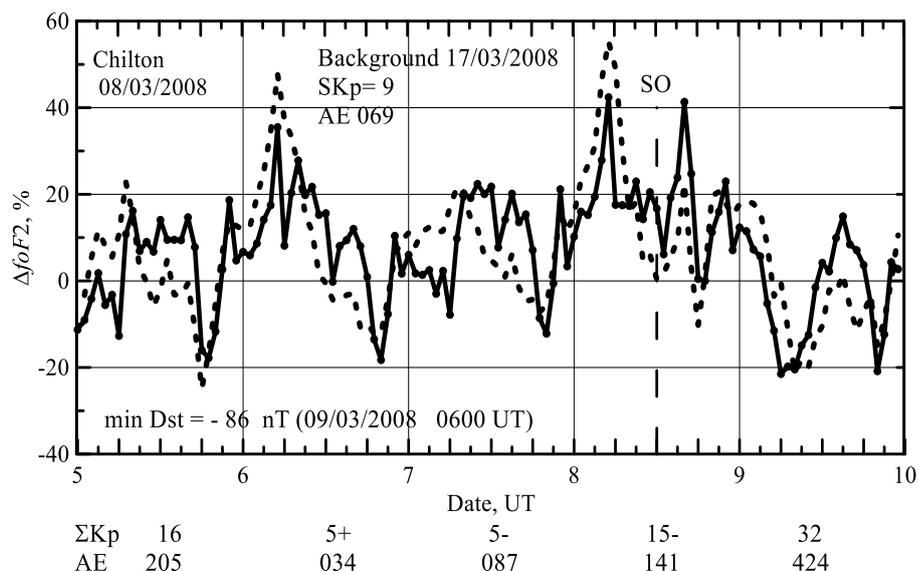


Рис. 1. График изменения $\Delta foF2$ для бури 8 марта 2008 г. (сплошная линия и пунктир соответствуют m и q событиям).

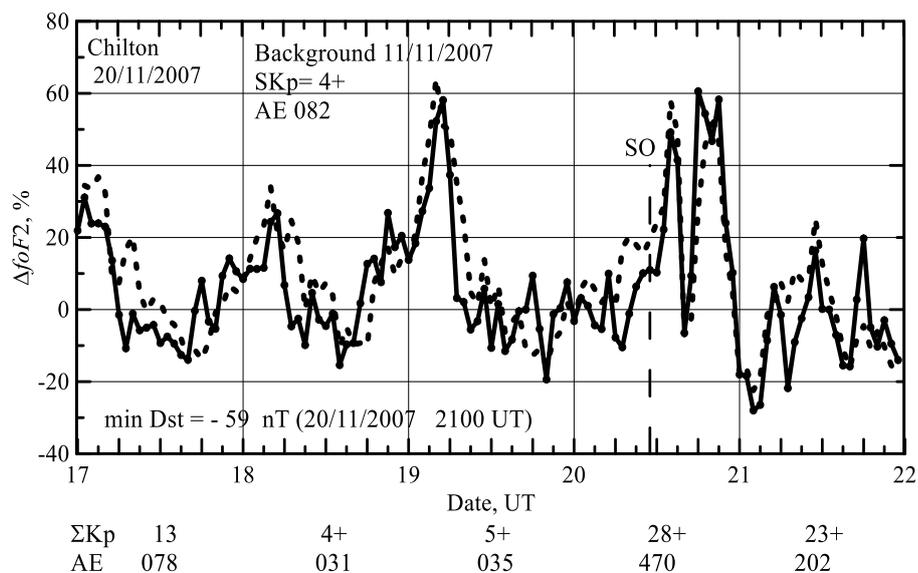


Рис. 2. График изменения $\Delta foF2$ для бури 20 ноября 2007 г. (сплошная линия и пунктир соответствуют m и q событиям).

Графики типа рис. 1 и 2 строятся для каждой анализируемой бури. С помощью указанных графиков определяются и заносятся в таблицу следующие параметры каждого отклонения $foF2$: амплитуда в процентах (используются три градации; 20-30%, 30-40% и >40%), знак величины $\Delta foF2$ и время ΔT от момента данного отклонения до момента SO (только для отклонений с ΔT меньше 36 ч.).

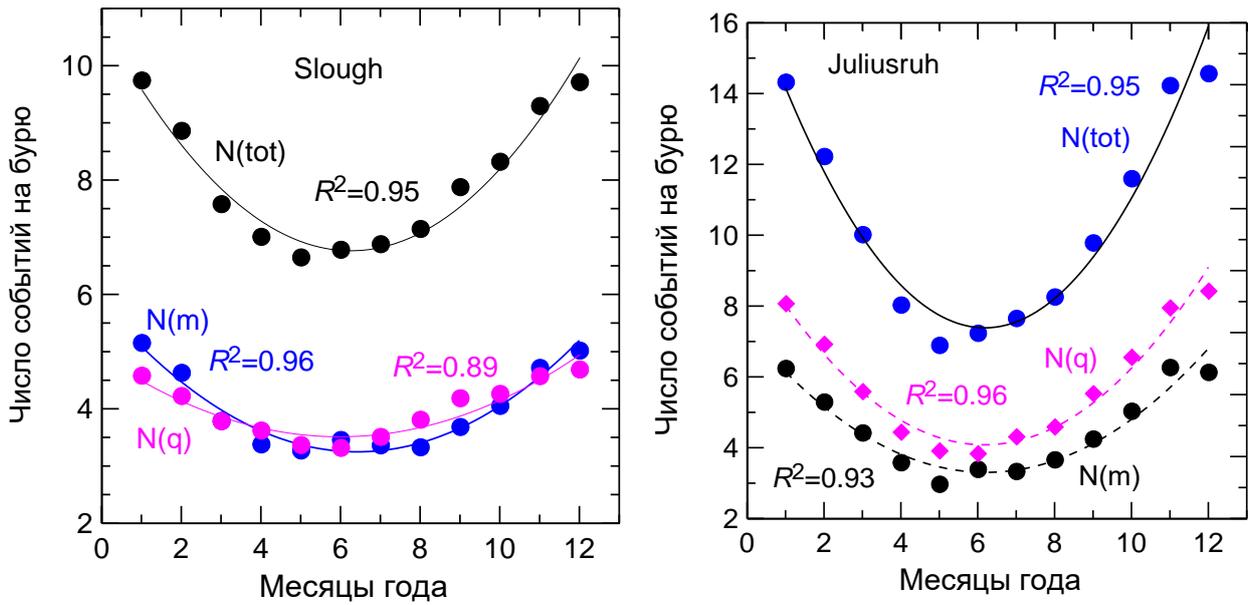
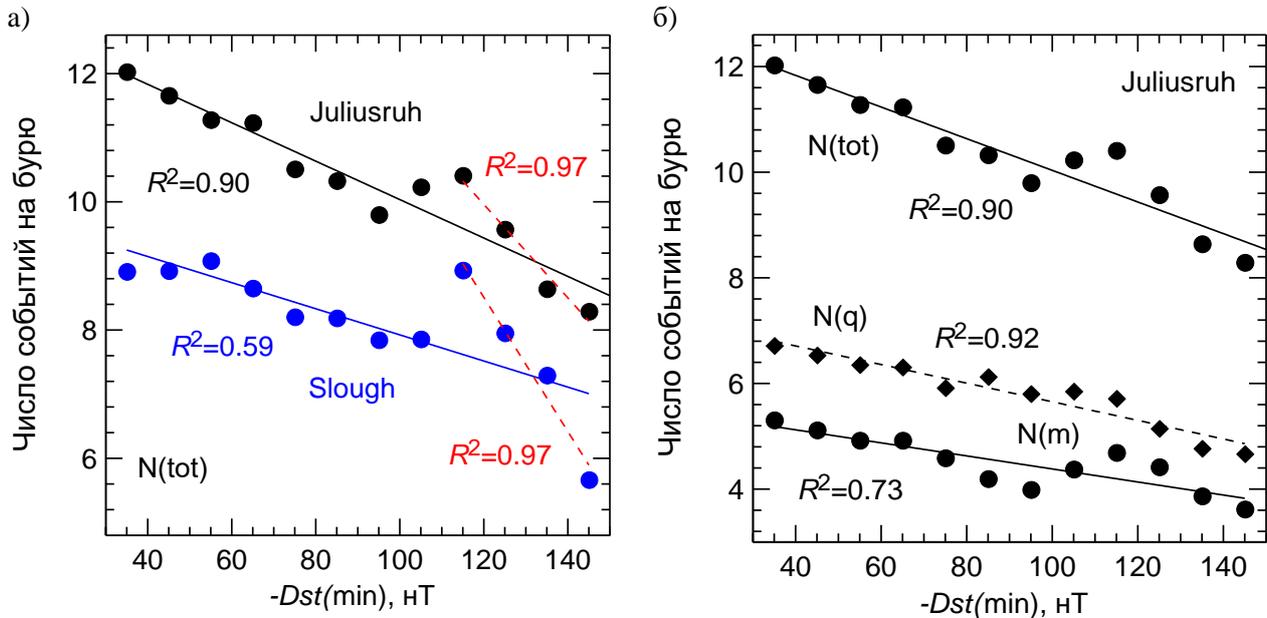
Полученные результаты для конкретной бури заносятся в таблицу вместе с характеристиками самой бури: дата SO, интенсивность (минимальное значение Dst индекса), солнечная активность (величина индекса солнечной активности $F10.7$), местное время начала бури LT SO. Эта таблица и является для данной ионосферной станции исходной базой данных для дальнейшего анализа.

3. АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ ПОЛУЧЕННЫХ ОТКЛОНЕНИЙ

В результате серии работ авторов [Данилов и Константинова, 2020а, б; 2021а, б, в; Константинова и Данилов, 2020, 2021; Danilov and Konstantinova, 2021] было найдено, что анализируемые отклонения $foF2$ в предбуревые дни демонстрируют зависимости от следующих параметров: сезон, интенсивность последующей магнитной бури, солнечная активность, местное время начала магнитной бури LT SO и время от момента события (отклонения) от момента SO. Ниже приводятся примеры зависимостей от каждого параметра, полученных в указанной серии работ, а также некоторые комментарии методического характера.

Пример зависимости числа событий N от месяца года для ст. Slough и Juliusruh согласно [Данилов и Константинова, 2020а] приведен на рис. 3. Поскольку количество бурь, которые оказались отобраны для анализа, может быть различно в различные месяцы, необходимо анализировать число событий на одну бурю, т. е. делить количество событий на количество бурь в данном месяце. Аналогичным образом надо поступать и при анализе других зависимостей, за исключением зависимости от ΔT , в которой по очевидным соображениям определить число бурь нельзя и необходимо брать просто число событий с данным ΔT .

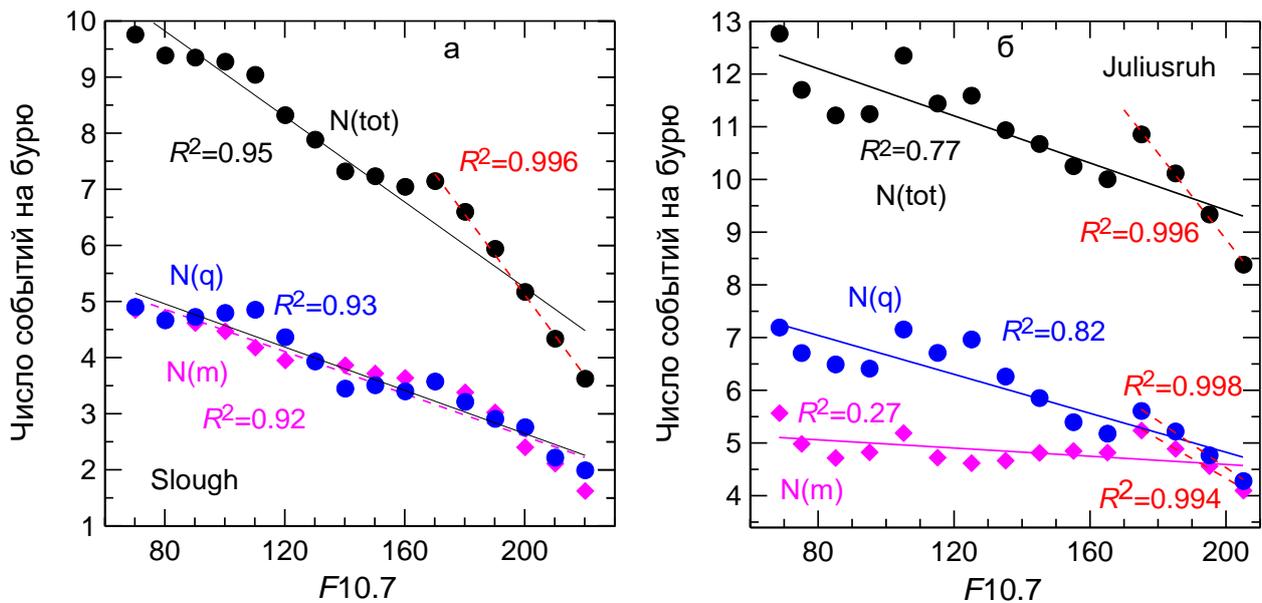
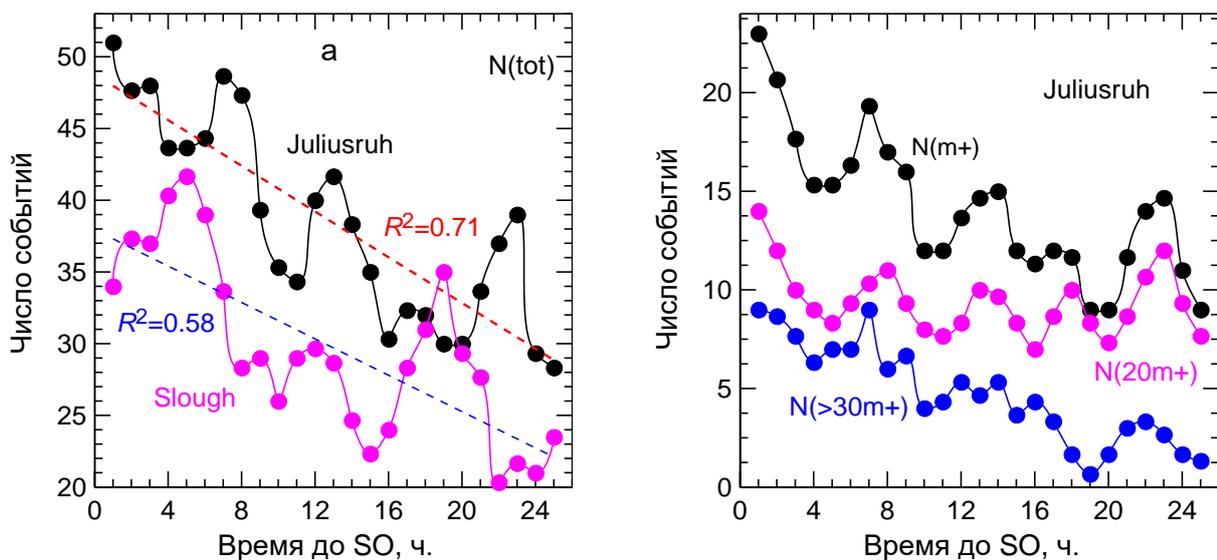
Следует отметить несколько важных особенностей на рис. 3. Во-первых, наблюдается хорошо выраженная и статистически значимая (величины коэффициента определенности R^2 по F-тесту Фишера достаточно велики) зависимость анализируемых событий от сезона: зимой вероятность появления таких событий заметно выше, чем летом. Во-вторых, характер полученной зависимости одинаков для обеих рассмотренных станций. В-третьих, использование двух опций (q и m) дает одинаковые результаты.

Рис. 3. Сезонная зависимость $N(\text{tot})$, $N(\text{m})$ и $N(\text{q})$ для ст. Slough и Juliusruh.Рис. 4. Зависимость $N(\text{tot})$ от $Dst(\text{min})$ для двух станций.

Зависимость числа событий (отклонений $foF2$) от интенсивности бури согласно Данилову и Константиновой [2021a] приведена на рис. 4. Рисунок 4а показывает сравнение зависимостей общего числа событий $N(\text{tot})$ для двух станций. Видно, что характер изменения с Dst практически одинаков для обеих станций. Обращает на себя внимание тот факт, что при $Dst < 110$ нТл характер зависимости меняется – увеличивается ее наклон и она становится очень хорошо выраженной ($R^2 = 0.97$).

На рисунке 4б приведено изменение $N(\text{tot})$, $N(\text{q})$ и $N(\text{m})$ для ст. Juliusruh. Как и в случае зависимости от сезона (см. рис. 3) использование обеих опций выбора спокойных условий дает близкие результаты.

Следует отметить, что в работе Данилова и Константиновой [2021a] было получено, что четкая зависимость от интенсивности бури нарушается для очень сильных и выдающихся бурь ($Dst < -150$ нТл). В настоящее время трудно сказать, связано ли это с реальной физической ситуацией, или с недостатком данных, поскольку такие бури случаются очень редко.

Рис. 5. Зависимость $N(\text{tot})$, $N(m)$ и $N(q)$ от $F10.7$ для Slough и JuliusruhРис. 6. Зависимость $N(\text{tot})$, $N(m+)$, $N(20m+)$ и $N(>30m+)$ от времени до SO.

Зависимость числа событий от индекса солнечной активности $F10.7$ для Slough и Juliusruh приведена на рис. 5, взятом из работы Данилова и Константиновой (2021б). Видно, что зависимость общего $N(\text{tot})$ существует и лучше выражена для Slough ($R^2 = 0.95$), чем для Juliusruh ($R^2 = 0.77$). При высокой солнечной активности ($F10.7 > 160$) для обеих станций зависимость становится более крутой и лучше выраженной ($R^2 = 0.996$).

Сравнение зависимостей, полученных при использовании двух опций выбора спокойных величин $foF2$ показывает, что в случае Slough обе опции дают близкие результаты (рис. 5а), тогда как в случае Juliusruh для $N(q)$ получается хорошо выраженная зависимость ($R^2 = 0.82$), тогда как для $N(m)$ эта зависимость выражена плохо ($R^2 = 0.27$). Последнее может означать, что модель, используемая для m опции (см. выше параграф 2) в случае ст. Juliusruh недостаточно хорошо описывает зависимость $foF2$ от солнечной активности для $F10.7 < 170$. В этом случае лучше отдавать предпочтение q опции, т. е. сравнению с величинами $foF2$ в ближайший к буре спокойный день.

На рисунке 6а, взятом из работы Данилова и Константиновой (2020б), приведена зависимость общего числа событий от времени до начала бури ΔT . Видно, что для обеих станций хорошо выражена тенденция уменьшения $N(\text{tot})$ с ростом ΔT . В то же время, видно, что имеются интервалы ΔT , в которых

вероятность появления анализируемых событий более высока. Для ст. Juliusruh это 6–9, 10–14 и 22–23 часа. Для ст. Slough наблюдаются те же интервалы, но на 2 часа раньше.

На рисунке 6б показано изменение с ΔT общего числа положительных отклонений $N(m+)$ по m опции и этих же отклонений с амплитудами 20-30% ($N(20m+)$) и больше 30% ($N(>30m+)$) для ст. Juliusruh. Этот рисунок иллюстрирует важный факт, на который в упомянутой серии работ Данилова и Константиновой обращалось внимание при анализе зависимостей от различных параметров последующей магнитной бури. Речь идет о том, что в ряде случаев зависимости для $N(20m+)$ выражены хуже, чем для $N(>30m+)$. Это, скорее всего, связано с тем, что количество событий с амплитудами 20-30% может быть «загрязнено» случайными небольшими отклонениями $foF2$. При анализе рассматриваемых событий как возможных предикторов предстоящей магнитной бури в таком случае более надежно использовать события с амплитудой в 30% и выше.

На рисунке 7, взятом из работы Данилова и Константиновой [2021в] приведена зависимость общего числа событий $N(\text{tot})$, а также числа положительных событий $N(+)$ и отрицательных событий $N(-)$ от местного времени начала бури LT SO. Рисунок 7а показывает, что есть «предпочтительные» интервалы местного времени начала магнитной бури, в которые вероятность появления отклонений $foF2$ максимальна. Для ст. Slough это 0700-1100 LT и 2100-2300 LT. Для ст. Juliusruh первый интервал значительно шире (0500LT–1300 LT), но пик в 2300 LT выражен особенно четко.

Из рисунка 7б следует, что, во-первых, число отрицательных отклонений $foF2$ существенно меньше числа положительных отклонений. Это согласуется с выводами, приведенными в обзоре Данилова и Константиновой [2019] на основании публикаций различных групп исследователей. Во-вторых, видно, что для $N(+)$ зависимость подобна зависимости для $N(\text{tot})$, тогда как для $N(-)$ эта зависимость выражена плохо. Последнее обстоятельство приводит к выводу, что при анализе рассматриваемых событий как возможных предикторов предстоящей магнитной бури следует больше опираться на поведение положительных отклонений $foF2$, т. к. количество отрицательных отклонений, видимо, сильнее загрязнено случайными отклонениями, не связанными с предстоящей бурей.

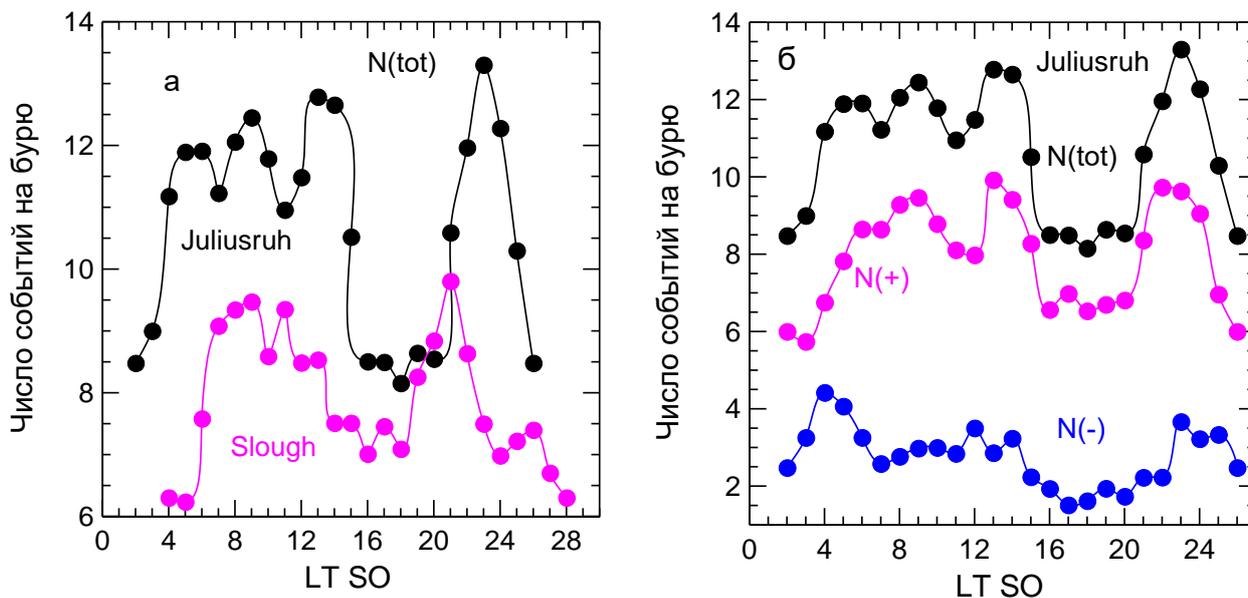


Рис. 7. Зависимости $N(\text{tot})$, $N(+)$ и $N(-)$ от местного времени начала бури LT SO.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных в серии работ авторов [Данилов и Константинова, 2020а, б, в; 2021а, б, в; Константинова и Данилов, 2021; Danilov and Konstantinova, 2021] детальных исследований отклонений критической частоты слоя $F2$ $foF2$ в течение трех предбуревых дней от соответствующих величин в геомагнитно спокойных условиях сформировался метод выделения и анализа этих отклонений.

В параграфе 2 описан метод выделения магнитных бурь, удовлетворяющих определенным условиям. Это выделение основывается как на интенсивности бури (минимальном значении Dst индекса), так и на степени магнитной возмущенности анализируемых предбуревых дней. Последние должны удовлетворять определенным ограничениям по двум основным магнитным индексам Kp и AE , а также не должны приходиться на восстановительную фазу предыдущей бури.

В параграфе 3 описан метод анализа связи возмущений $foF2$ в предбуревые дни с характеристиками предстоящей магнитной бури. В указанной выше серии работ авторов было обнаружено, что эти отклонения зависят от пяти параметров предстоящей магнитной бури. Этими параметрами являются: сезон, интенсивность бури, солнечная активность, время от момента события до начала бури, а также местное время начала бури.

Приведены примеры всех указанных зависимостей и комментарии к полученным результатам, существенные при анализе рассматриваемых событий как возможных предикторов предстоящей магнитной бури. Эти результаты должны в дальнейшем использоваться для разработки метода прогнозирования вероятности наступления последующей геомагнитной бури и ее характеристик.

ЛИТЕРАТУРА

- Благовещенский Д. В., Калишин А. С. Механизм возрастания критической частоты ионосферы до начала суббури // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 49. № 3. С. 213–223. 2009.
- 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. Сезонные вариации // Гелиогеофизические исследования. Вып. 28. С. 13–12. 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. С. 13–21. 2020б.
- Данилов А. Д., Константинова А. В. Детальный анализ поведения критической частоты слоя $F2$ перед магнитными бурями. 3. Зависимость от интенсивности бури // Гелиогеофизические исследования. Вып. 29. С. 24–29. 2021а.
- Данилов А. Д., Константинова А. В. Детальный анализ поведения критической частоты слоя $F2$ перед магнитными бурями. 4. Зависимость от солнечной активности // Гелиогеофизические исследования. Вып. 30. С. 3–8. 2021б.
- Данилов А. Д., Константинова А. В. Детальный анализ поведения критической частоты слоя $F2$ перед магнитными бурями. 5. Зависимость от местного времени начала бури // Гелиогеофизические исследования. Вып. 30. С. 15–21. 2021в.
- Данилов А. Д., Морозова Л. Д., Мирмович Э. Г. О возможной природе положительной фазы ионосферных бурь // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 25. № 5. С. 768–772. 1985.
- Константинова А. В., Данилов А. Д. Ионосферные предвестники геомагнитных бурь. 2. Анализ данных ст. Slough // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 60. № 3. С. 329–336. 2020а.
- Константинова А. В., Данилов А. Д. Ионосферные предвестники геомагнитных бурь. 3. Анализ данных ст. Juliusruh // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 61. № 3. С. 341–348. 2021.
- 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., Belik L.D. Thermospheric composition and the positive phase of an ionospheric storm // Adv. Space Res. V. 12. N 10. P. 257–260. 1992.
- 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.
- Danilov A.D., Konstantinova A.V. Behavior of $foF2$ prior to geomagnetic storms according to Slough and Juliusruh data // Adv. Space Res. V. 67. N 12. P. 4066–4077. 2021.
- Kane R.P. Storm-time variations of $F2$ // Ann. Geophysicae. V. 29. N 1. P. 25–42. 1973а.

-
- Kane R.P. Global evolution of $F2$ -region storms // J. Atmos. Terr. Phys. V. 35. P. 1953–1966. 1973b.
 - Kane R.P. Global evolution of the ionospheric electron content during some geomagnetic storms // J. Atmos. Terr. Phys. V. 37. P. 601–611. 1975.

METHOD OF ANALYSIS OF IONOSPHERIC PRECURSORS OF MAGNETIC STORMS

Danilov A. D., Konstantinova A. V.

Based on a large series of publications of the authors dedicated to disturbances of the $F2$ -layer critical frequency $foF2$ during three days preceding a magnetic storm, a method of selecting corresponding storms is described. The storm intensity and quiet state of the magnetic field during the analyzed prestorm days are criteria for such selection. A method of analyzing the obtained disturbances ($foF2$ deviations from its values in quiet geomagnetic conditions) and the dependencies of parameters of these disturbances on parameters of the coming magnetic storm are described.

KEYWORDS: MAGNETIC STORM, IONOSPHERIC DISTURBANCE, IONOSPHERIC $F2$ LAYER