



УДК 550.388.2

ДЕТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ СЛОЯ $F2$ ПЕРЕД МАГНИТНЫМИ БУРЯМИ. 9. ЗАВИСИМОСТЬ ОТ ИНТЕНСИВНОСТИ БУРИ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ПРЕДБУРЕВЫХ ДНЕЙ

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

Продолжен анализ поведения отклонений критической частоты $foF2$ от спокойных условий в дни, предшествующие магнитной буре, начатый в серии предыдущих публикаций авторов. Анализируется зависимость количества и интенсивности этих отклонений от интенсивности предстоящей бури. Получено, что при анализе указанной зависимости отдельно для каждого предбуревых дня подтверждается полученное в предыдущих работах авторов (без разделения на дни) уменьшение количества отклонений и увеличение их интенсивности с усилением бури. Получено, что как количество, так и интенсивность этих отклонений растет с удалением от момента начала бури.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ГЕОМАГНИТНАЯ БУРЯ, ИОНОСФЕРНЫЙ СЛОЙ $F2$, ПРЕДБУРЕВЫЕ ДНИ

DOI 10.5425/2304-7380_2022_34_13

<https://elibrary.ru/ipemud>

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 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, [Благовещенский и Калишин, 2009; Blagoveshchensky et al., 2012; Mansilla and Zossi, 2012]) высказывали предположение, что эти возмущения можно рассматривать, как своего рода предвестники предстоящей геомагнитной бури.

В предыдущих работах данной серии [Данилов и Константинова, 2020а, б, 2021 а, б, в] на основании данных вертикального зондирования на ст. Slough и Juliusruh были подробно рассмотрены отклонения критических частот ионосферного слоя $F2$ от спокойных условий в течение трех дней, предшествующих началу магнитной бури SO.

Было получено, что согласно данным обеих станций количество событий (отклонений $foF2$) N демонстрирует хорошо выраженную и статистически значимую зависимость от сезона (зимой больше, чем летом), от солнечной активности (N уменьшается с ростом индекса CA F10.7) и интенсивности

Электронная почта авторов для переписки:

Данилов Алексей Дмитриевич, e-mail: adanilov99@mail.ru
Константинова Анна Владимировна, e-mail: anna@tabulata.ruАдрес редакции журнала
«Гелиогеофизические исследования»:ФГБУ «ИПГ»
129128; Россия, Москва
ул. Ростокинская, 9.
e-mail: vestnik@ipg.geospace.ru

предстоящей магнитной бури (N уменьшается с ростом абсолютной величины максимального отрицательного Dst индекса). Кроме того, было обнаружено, что наблюдаются интервалы местного времени начала бури LT SO, когда вероятность появления событий наиболее высока.

В указанных выше работах рассматривались 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 работах [Данилов и Константинова, 2020а, б, 2021 а, б, в], а также в других публикациях на эту тему [Константинова и Данилов, 2020; Данилов и Константинова 2021; Danilov and Konstantinova, 2021] величина N определялась как сумма событий данного типа (всех отклонений, положительных и отрицательных отклонений, m и q событий) за день самой бури (до момента SC) и все три предбуревых дня.

Для дальнейшего анализа физических процессов возникновения предвестников и их связи с предстоящей магнитной бурей уместно проанализировать вклад каждого из анализируемых четырех дней в полученные зависимости. Именно этому и посвящена данная работа.

2. КОЛИЧЕСТВО СОБЫТИЙ

Будем называть день начала бури (день 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.

В предыдущих работах авторов [Константинова и Данилов, 2019, 2020; Данилов и Константинова 2021а] было обнаружено, что количество событий (возмущений $foF2$), как $N(q)$, так и $N(m)$, уменьшается с усилением предстоящей геомагнитной бури (т.е. с увеличением абсолютной величины максимального отрицательного значения индекса Dst). Этот вывод был получен при совместном анализе количества событий за все четыре дня и всех имеющихся бурь. Последнее обстоятельство означает, что на получаемую зависимость N от Dst влияла зависимость N от солнечной активности (индекса $F10.7$). Попытка разделить две эти зависимости была выполнена в недавних работах Данилова и Константиновой [2022а, б]. В этом параграфе мы рассмотрим результаты анализа зависимости числа событий отдельно для каждого из 4-х дней. Зависимость интенсивности событий будет рассмотрена в следующем параграфе.

При анализе зависимостей предвестников от различных параметров неизбежно встает вопрос о том, как разделить взаимное влияние таких зависимостей (подробнее см. Данилов и Константинова [2022б]). В данной работе, чтобы избежать при анализе зависимости от интенсивности бури в разные дни влияния зависимости от солнечной активности, мы анализировали зависимость от Dst для относительно узких интервалов $F10.7$ ($F10.7 = 60-79, 80-99$ и $100-119$). Естественно, статистическая обеспеченность данных при этом была значительно ниже, чем при анализе всего массива данных целиком, однако количество бурь для каждого дня в указанных интервалах $F10.7$ все-таки позволило сделать выводы, приведенные ниже. Для подобных интервалов в области более высоких $F10.7$ данных было недостаточно.

Результаты анализа приведены в таблице 1. В таблице приводятся: наклон получаемой в каждом случае зависимости k , коэффициент определенности по F-тесту Фишера R^2 , определяющий статистическую значимость S зависимости, и количество точек P на соответствующем графике.

Как следует из таблицы 1, в целом рассмотрены 48 зависимостей (4 дня, 2 параметра, 3 интервала $F10.7$ и 2 станции). Получено, что падение N с увеличением амплитуды отрицательного значения Dst при анализе всех имеющихся точек наблюдается в 29 случаях (60 %). При этом в ряде случаев эта зависимость очень хорошо выражена и обладает высокой статистической значимостью S (высокие величины R^2). Соответствующие примеры приведены на рисунках 1 и 2.

В некоторых случаях на соответствующих графиках нет падения N с увеличением амплитуды отрицательного значения Dst по всем точкам, но есть хорошо выраженный рост для нескольких точек (не менее 4-х). Такие данные обозначены в таблице 1 красным цветом (5 случаев – 14 %). Соответствующие примеры приведены на рис. 3. Мы интерпретируем такие случаи следующим образом. В некоторые интервалы Dst попадали бури со случайными отклонениями величин $foF2$, не связанные с анализируемой бурей. Такими отклонениями могут быть Q-возмущения, случайные ошибки в банках данных, ошибки при обработке исходных данных и т. д. При этом зависимость $N(q)$ или $N(m)$ от Dst , естественно, нарушалась при анализе всех точек, но сохранялась для части точек.

Таблица 1. Зависимость N(q) и N(m) от Dst для разных интервалов F10.7

День	Slough						Juliusruh					
	N(q)			N(m)			N(q)			N(m)		
	k	R ²	P	k	R ²	P	k	R ²	P	k	R ²	P
F10.7=60-79												
0	no			no			-0.0020	0.35	6	-0.0105	0.94	6
1	no			no			-0.0118	0.89	6	-0.0169	0.99	6
2	-0.0048	0.46	7	no			-0.0120	0.81	6	-0.0109	0.80	6
3	-0.0087	0.63	7	-0.0090	0.89	4	no			no		
F10.7=80-99												
0	no			-0.0033	0.56	6	-0.0034	0.59	6	-0.0059	0.66	6
1	-0.0023	0.31	7	-0.0074	0.80	6	no			-0.0079	0.36	7
2	no			-0.0067	0.57	6	-0.0079	0.80	6	-0.0154	0.62	6
3	-0.0042	0.31	5	-0.0129	0.89	6	-0.0130	0.66	6	-0.0097	0.79	6
F10.7=100-119												
0	-0.0037	0.70	4	no			-0.0072	0.79	7	-0.0039	0.14	7
1	-0.0124	0.91	4	-0.0051	0.83	4	-0.0017	0.09	6	-0.0059	0.31	8
2	no			no			-0.0013	0.76	4	-0.0075	0.76	7
3	-0.0050	0.73	7	-0.0121	0.81	4	-0.0158	0.95	7	-0.0194	0.47	7

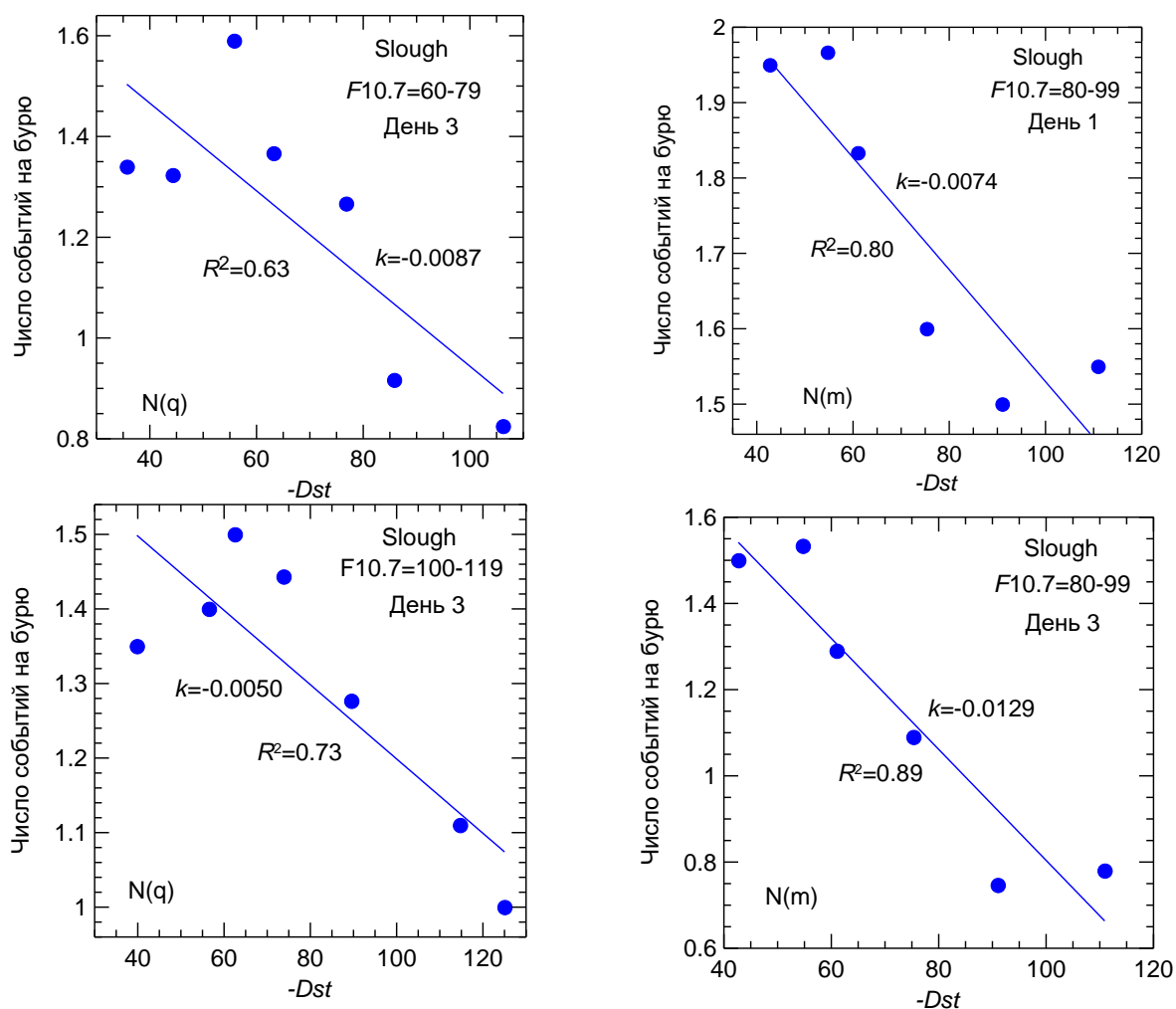


Рис. 1. Примеры хорошо выраженных зависимостей N(q) и N(m) от интенсивности бури для ст. Slough.

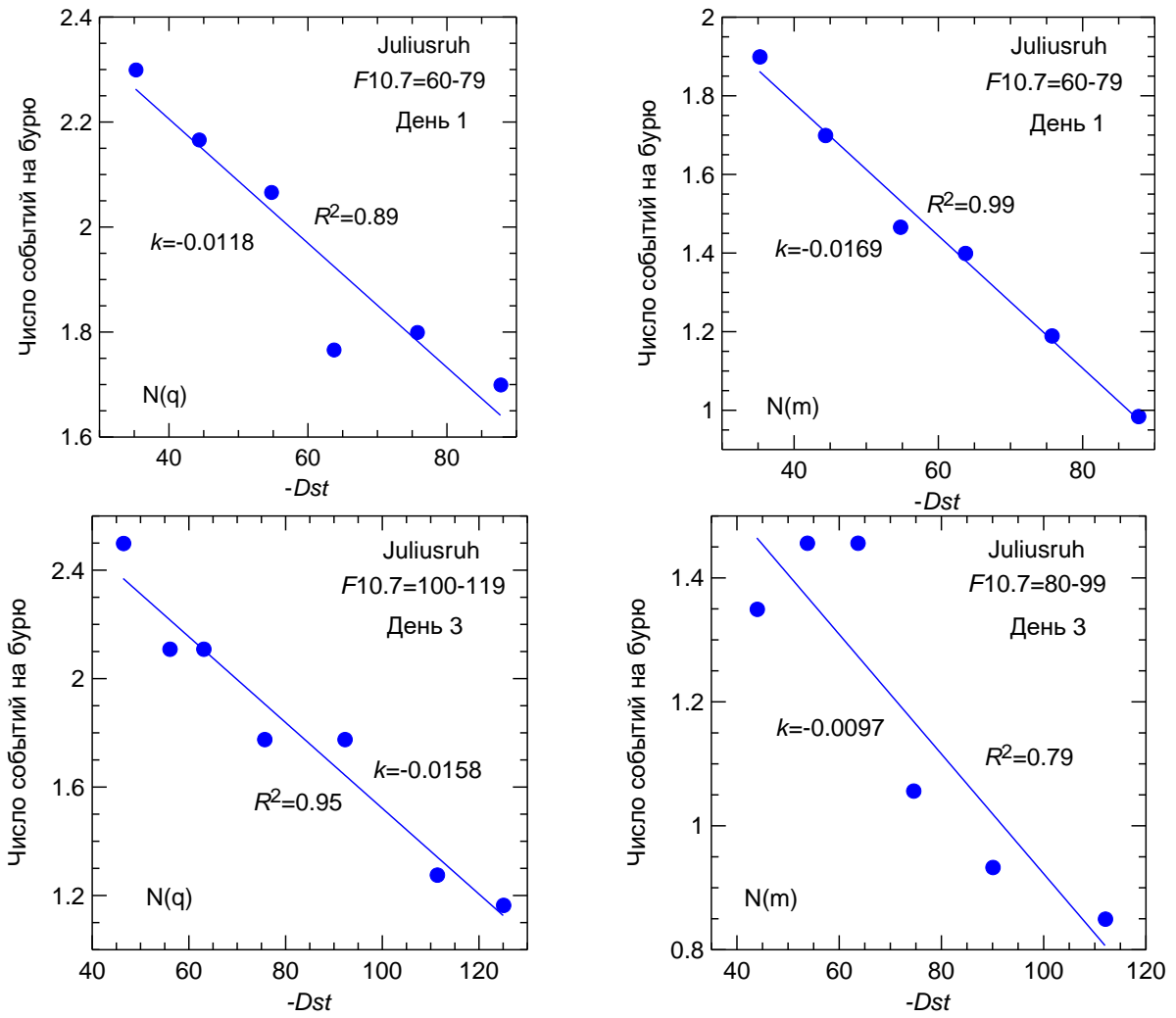


Рис. 2. Примеры хорошо выраженных зависимостей N(q) и N(m) от интенсивности бури для ст. Juliusruh.

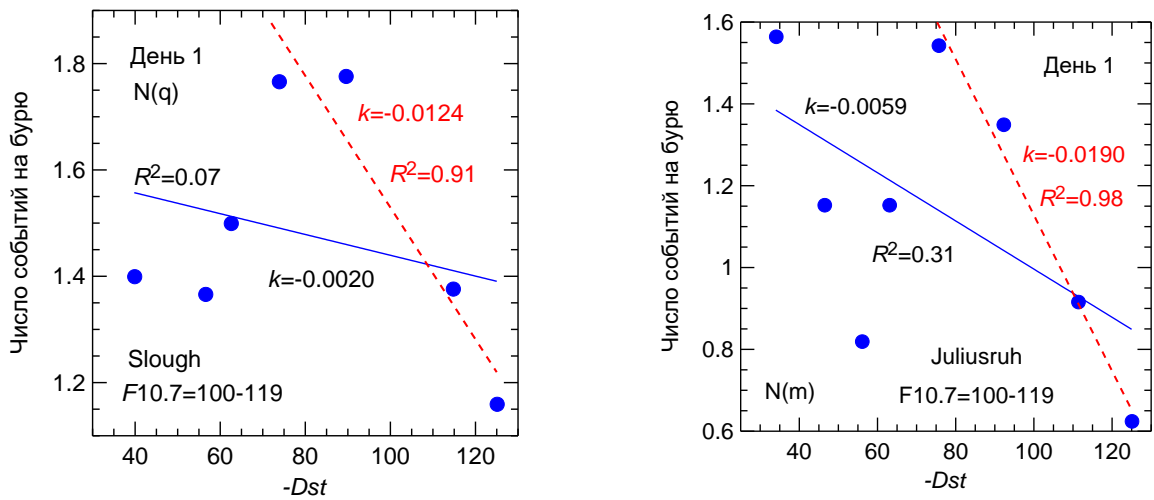


Рис. 3. Примеры ситуаций, когда по нескольким точкам получается зависимость с более высокими R².

Как видно из таблицы 1, искомой зависимости N от Dst совсем не наблюдается в 13 случаях (27 %). Мы объясняем это теми же случайными отклонениями, описанными выше.

Поскольку в некоторых случаях мы рассматриваем зависимость, основанную на небольшом количестве точек, уместно напомнить, как определяется статистическая значимость S получаемых зависимостей по F-тесту Фишера. Для количества точек P и величины коэффициента определенности R^2 определяется величина L :

$$L = (P-2) R^2 / (1-R^2)$$

По величине P и полученной таким образом величине L статистическая значимость S определяется из соответствующим таблиц. Как видно из приведенной формулы, величина L может быть достаточно велика даже при небольшом количестве точек P при высоких величинах R^2 . Например, для зависимости по 4-м точкам для $Dst = -(75-130)$ на рис. 3б величина L в соответствии с этой формулой равна 98. В соответствии с указанными таблицами для того, чтобы статистическая значимость для 4-х точек была выше 95%, величина L должна быть больше 18.5. Чтобы величина S была выше 90% и 99%, величина L должна быть больше 8.5 и 99, соответственно. Соответствующие величины L для 10 точек и трех указанных значений S должны быть выше 5.3, 3.5 и 11.3.

Полученная по F-тесту Фишера величина S для всех зависимостей, приведенных на рис. 1 и 2, выше 95%, а для большинства – выше 99%.

Поясним, что для получения каждой точки на рис. 1–3 усреднялись данные по всем бурям, попадавшим (при данном $F10.7$) в интервал Dst шириной в 10 нТл. При этом количество таких бурь оказывалась по очевидным причинам невелико. В такой ситуации любое случайное отклонение в данных даже для одной бури могло приводить к существенному искажению, или даже исчезновению, искомой зависимости. Это объясняет разброс точек на некоторых анализируемых графиках (невысокие R^2), а также наличие случаев с отсутствием зависимости (см. таблицу 1). Тем не менее, тот факт, что в ряде случаев, как это видно из таблицы 1 и рис. 1 и 2, наблюдался очень хорошо выраженное и статистически значимое падение как $N(q)$, так и $N(m)$ с усилением бури (ростом амплитуды отрицательной величины Dst) позволяет с уверенностью утверждать, что указанное падение реально существует. Случайные отклонения могут нарушить зависимость, но не могут привести к таковой со статистической значимостью 95% и выше.

Переходим теперь к анализу роли различных дней. Следует подчеркнуть, что день 0 является особенным – его длина различна для разных бурь, поскольку различны моменты начала бури SO по местному времени LT . Очевидно, что длительность анализируемой части дня 0 меняется в интервале от 1 до 23 часов в зависимости от указанного момента. Это делает данные для дня 0 гораздо менее надежными, чем для трех остальных анализируемых дней. Тем не менее, мы включили этот день в общий анализ в таблице 1 для увеличения статистики.

Однако, следует посмотреть, как изменится картина этой статистики, если мы будем рассматривать только «полюценные» дни 1–3. В этом случае число анализируемых ситуаций уменьшится с 48 до 36. Падение N с усилением бури наблюдается в 22 случаях (61%). Ситуация, когда с усилением бури нет падения N по всем точкам, но есть падение для 4-х точек, видна в 5 случаях (14 %). Полностью отсутствует падение N с ростом отрицательной амплитуды Dst в 9 случаях (25 %). Таким образом, исключение дня 0 из анализа лишь на 1–2 % увеличивает долю «благоприятных» случаев и уменьшает долю случаев с полным отсутствием зависимости. Такое небольшое изменение статистических результатов при исключении дня 0 и позволяет нам включать его в общую статистику при анализе зависимости от Dst как N , так и интенсивности предвестников ($(N(>30))/N$, см. следующий параграф).

В таблице 2 приводится величина наклона аппроксимирующей линии k . Она характеризует скорость падения отношения N с ростом абсолютного значения отрицательной величины Dst . Представляет интерес вопрос о том, с одинаковой ли скоростью происходит это падение в разные дни. К сожалению (см. таблицу 1) соответствующий анализ можно провести только для данных по $N(m)$ на двух станциях для $F10.7=80-99$. Результаты анализа приведены в таблице 2.

Тенденция роста k от нулевого дня к третьему видна и в других случаях, например, в $N(q)$ для $F10.7 = 60-79$ и $80-99$, или в $N(m)$ для $F10.7 = 100-119$. Таким образом, падение $N(q)$ и $N(m)$ с усилением бури более резко происходит в два последних дня, чем в два первых. Этот факт интересен сам по себе и может оказаться важным при дальнейших попытках построить картину физических процессов, приводящих к появлению ионосферных предвестников магнитных бурь.

Таблица 2. Величины k для разных дней ($N(m)$, $F10.7=80-99$)

Дни	Slough	Juliusruh	Average
0	-0.0033	-0.0059	-0.0046
1	-0.0074	-0.0079	-0.0076
2	-0.0067	-0.0154	-0.0110
3	-0.0129	-0.0097	-0.0113

Представляет интерес вопрос о том, есть ли систематическая зависимость $N(q)$ и $N(m)$ от номера дня перед бурей. К сожалению, как видно из таблицы 1, ситуаций, для которых удалось получить статистически значимые зависимости от Dst для трех и более дней, не так много. Тем не менее, для этих ситуаций мы посчитали величины N для фиксированного значения $Dst = -80$ нТл с помощью полученной в каждом случае аппроксимации. Результаты расчетов приведены в таблице 3. День 0 в среднем по определению в два раз короче, чем любой из остальных трех дней. Поэтому при той же вероятности появления предвестников в единицу времени, что и в остальные дни, величины N для конкретной бури в день 0 должны быть в среднем вдвое меньше, чем в три других дня для той же бури. По этой причине для правильного сравнения с другими днями мы приводим в таблице 3 для дня 0 удвоенные величины N .

Таблица 3. Величины N для $Dst = -80$ нТл в разные дни.

День	Slough		Juliusruh		Slough	Juliusruh	Среднее по двум станциям		
	$N(q)$	$N(m)$	$N(q)$	$N(m)$	$N(q+m)$		$N(q)$	$N(m)$	$N(q+m)$
0	–	1.78	2.68	1.74	1.78	2.22	2.68	1.76	2.00
1	1.48	1.53	1.76	1.18	1.50	1.47	1.62	1.36	1.48
2	1.32	1.25	1.56	1.13	1.28	1.34	1.44	1.27	1.31
3	1,17	1.07	1.77	1.09	1.43	1.10	1.47	1.08	1.26

Таблица 3 показывает, что есть тенденция падения числа как q так и m событий ото дня 0 к дню 3. Эта тенденция видна также и в суммарных величина $N(q+m)$ для каждой станции, и в величинах $N(q)$ и $N(m)$, усредненных по двум станциям. Хотя статистически этот вывод обоснован достаточно слабо, он интересен, поскольку согласуется с ожидаемой с точки зрения примитивной физики явления картиной: чем ближе к моменту начала бури (день 0) тем число событий (предвестников) должно быть больше.

Резюмируя результаты этого параграфа, можно отметить следующее. Анализ зависимости количества возмущений $foF2$ в предбуревые дни от интенсивности бури с разделением величин N по дням подтверждает результаты аналогичного анализа, проведенного авторами ранее без разделения данных по дням [Константинова и Данилов 2019, 2020; Данилов и Константинова 2021а; 2022в]. Видна тенденция изменения скорости падения N с ростом амплитуды Dst (т.е. величины k) по мере удаления от момента начала бури SC. Получено также, что для конкретных условий (фиксированной интенсивности бури) величины $N(q)$ и $N(m)$ демонстрируют тенденцию к падению ото дня 0 к последующим дням, т.е. по мере удаления от момента начала бури.

3. ИНТЕНСИВНОСТЬ СОБЫТИЙ

В предыдущей работе данной серии [Данилов и Константинова, 2022 в] был рассмотрен вопрос об изменении интенсивности событий (предвестников) от солнечной активности и интенсивности предстоящей магнитной бури. При этом, как и во всех предыдущих работах серии, рассматривалось суммарное количество событий за все 4 дня. В этом параграфе мы рассмотрим вопрос о зависимости интенсивности событий от индекса Dst отдельно для всех четырех дней.

Как и в работе Данилова и Константиновой [2022в], мы рассматриваем в качестве индикатора интенсивности событий отношения количества возмущений с амплитудой более 30% ($N(q>30)$ и $N(m>30)$) к общему количеству q и m событий ($N(q)$ и $N(m)$). Зависимость $N(q>30)/N(q)$ и $N(m>30)/N(m)$ от Dst рассматривалась внутри каждого интервала $F10.7$ отдельно для каждого дня.

В данном параграфе, чтобы избежать влияния зависимости от солнечной активности при анализе зависимости $N(>30)/N$ от интенсивности бури, мы анализировали зависимость от Dst для относительно узких интервалов $F10.7$ ($F10.7 = 60-79, 80-99$ и $100-119$) так же, как это делалось при анализе величин N в предыдущем параграфе. Естественно, статистическая обеспеченность данных при этом была значительно ниже, чем при анализе всего массива данных целиком, однако количество бурь для каждого дня в указанных интервалах $F10.7$ все-таки позволило сделать выводы, приведенные ниже.

В целом рассмотрены 48 зависимостей (4 дня, 2 параметра, 3 интервала $F10.7$ и 2 станции). Получено, что рост $N(>30)/N$ с увеличением отрицательной амплитуды Dst при анализе всех имеющихся точек наблюдается в 35 случаях (73 %). При этом в ряде случаев эта зависимость очень хорошо выражена и обладает высокой статистической значимостью S (высокие величины R^2). Соответствующие примеры приведены на рисунках 4 и 5.

Как и при анализе данных в предыдущем параграфе, в некоторых случаях при использовании всех точек на графике искомой зависимости не наблюдается. Нет роста $N(>30)/N$ с увеличением отрицательной амплитуды Dst по всем точкам, но есть хорошо выраженный рост для 4-х точек. Такие данные обозначены в таблице 4 красным цветом (3 случая – 6%). Соответствующие рисунки аналогичны рис. 3 для N . Так же, как и при анализе данных в предыдущем параграфе, мы интерпретируем такие случаи следующим образом. В некоторые интервалы Dst попадали бури со случайными отклонениями величин $foF2$, не связанные с анализируемой бурей. При этом рост $N(>30)/N$, естественно, нарушался при анализе всех точек, но сохранялся для части точек.

Как видно из таблицы 4, искомой зависимости $N(>30)/N$ от Dst совсем не наблюдается в 10 случаях (21%). Мы объясняем это теми же случайными отклонениями, описанными выше.

Таблица 4. Зависимость $N(>30)/N$ от Dst для разных интервалов $F10.7$

Дни	$N(q>30)/N(q)$			$N(m>30)/N(m)$			$N(q>30)/N(q)$			$N(m>30)/N(m)$		
	k	R^2	P	k	R^2	P	k	R^2	P	k	R^2	P
$F10.7=60-79$												
0	нет зависимости			нет зависимости			0.0111	0.52	6	0.0077	0.96	6
1	0.0060	0.94	7	0.0041	0.85	7	нет зависимости			0.0080	0.92	6
2	0.0056	0.82	7	0.0027	0.75	8	0.0031	0.61	6	нет зависимости		
3	0.0081	0.88	7	0.0064	0.83	7	0.0026	0.41	5	нет зависимости		
$F10.7=80-99$												
0	нет зависимости			0.0052	0.77	4	0.0008	0.43	6	0.0017	0.91	7
1	0.0016	0.39	4	0.0014	0.73	7	0.0043	0.71	8	0.0024	0.67	7
2	0.0026	0.53	5	0.0043	0.78	5	0.0043	0.73	7	нет зависимости		
3	нет зависимости			0.0143	0.77	4	0.0017	0.39	5	нет зависимости		
$F10.7 = 100-119$												
0	0.0045	0.94	7	0.0040	0.98	7	0.0051	0.62	7	0.0005	0.15	6
1	0.0053	0.80	7	0.0048	0.31	7	0.0048	0.93	8	0.0046	0.84	7
2	0.0026	0.65	7	0.0033	0.58	7	0.0045	0.77	6	0.0030	0.75	8
3	0.0042	0.85	6	0.0029	0.83	6	нет зависимости			0.0065	0.81	5

Примечание: В таблице 2 используются те же обозначения, что и в таблице 1.

Также как и в предыдущем параграфе, усреднялись данные по всем бурям, попадавшим (при данном $F10.7$) в интервал Dst шириной в 10 нТл. При этом количество таких бурь оказывалась по очевидным причинам невелико. В такой ситуации любое случайное отклонение в данных даже для одной бури могло приводить к существенному искажению, или даже исчезновению, искомой зависимости. Это объясняет разброс точек на некоторых анализируемых графиках $N(>30)/N$

(невысокие R^2), а также наличие случаев с отсутствием зависимости (см. таблицу 4). Тем не менее, тот факт, что в ряде случаев, как это видно из таблицы 4 и рис. 4 и 5, наблюдался очень хорошо выраженный и статистически значимый рост как $N(q>30)/N(q)$, так и $N(m>30)/N(m)$ с усилением бури (ростом отрицательной амплитуды Dst), позволяет с уверенностью утверждать, что указанный рост реально существует. Случайные отклонения могут нарушить зависимость, но не могут привести к таковой со статистической значимостью 95% и выше.

Переходим теперь к анализу роли различных дней. О том, что день 0 является особенным, мы уже подробно говорили в предыдущем параграфе. Но при анализе относительных величин $N(>30)/N$ это, естественно, значения не имеет.

Рассмотрим вопрос о том, как изменится картина этой статистики, если мы будем рассматривать только «полноценные» дни 1–3. В этом случае число анализируемых ситуаций уменьшится с 48 до 36. Рост $N(>30)/N$ с усилением бури наблюдается в 27 случаях (75%). Ситуация, когда нет роста $N(>30)/N$ с усилением бури по всем точкам, но есть рост для 4-х точек видна в 2 случаях (6%). Полностью отсутствует рост $N(>30)/N$ с ростом отрицательной амплитуды Dst в 7 случаях (19%). Таким образом, исключение дня 0 из анализа лишь на 2% увеличивает долю «благоприятных» случаев и уменьшает долю случаев с полным отсутствием зависимости. Такое небольшое изменение статистических результатов при исключении дня 0 позволяет нам, как и в предыдущем параграфе, включать день 0 в общий анализ.

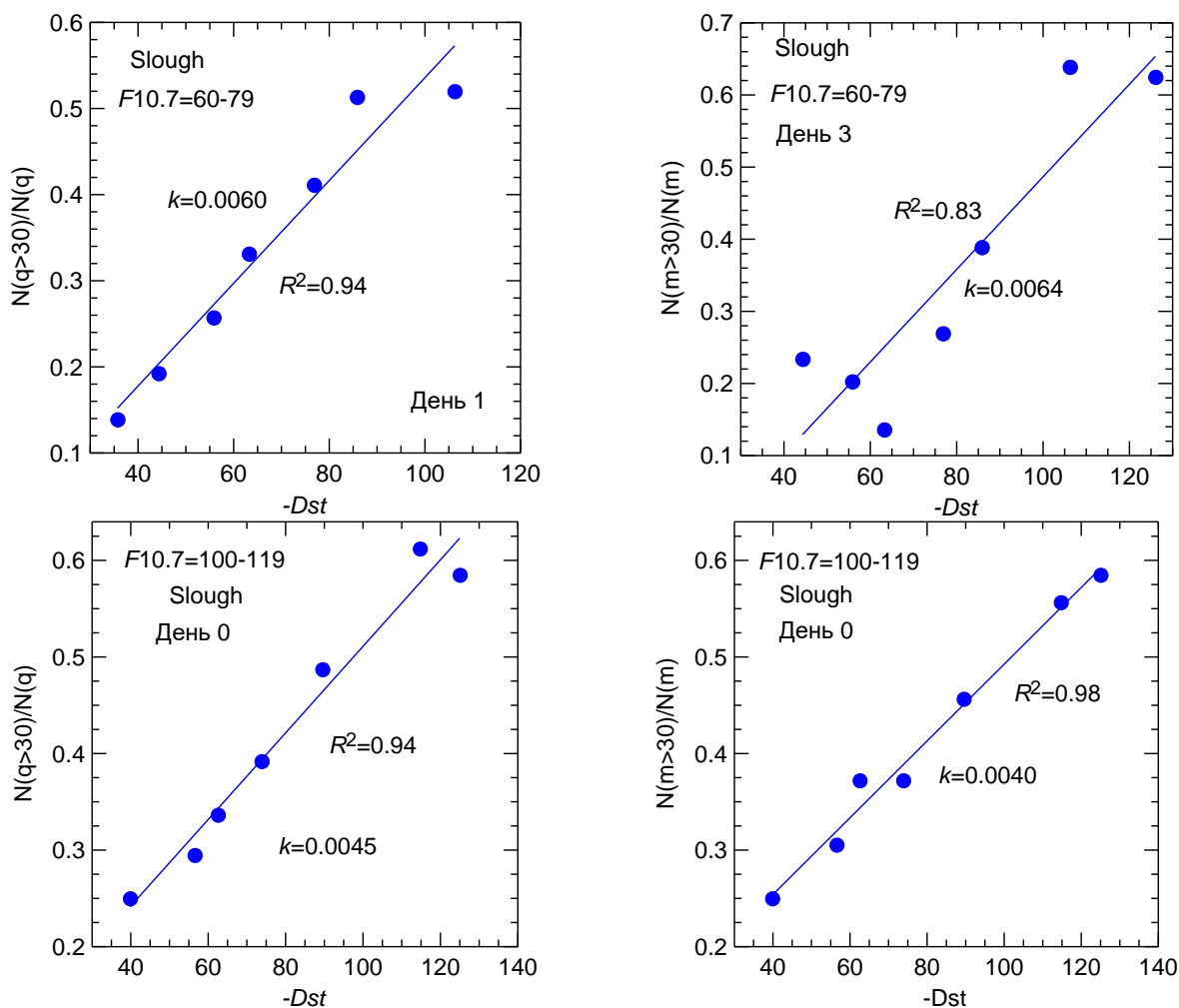


Рис. 4. Примеры хорошо выраженных зависимостей $N(q>30)/N(q)$ и $N(m>30)/N(m)$ от интенсивности бури для ст. Slough.

В таблице 4 приводится величина наклона аппроксимирующей линии k . Она характеризует скорость нарастания отношения $N(>30)/N$ с ростом абсолютного значения отрицательной величины Dst . Сравнение аппроксимирующих линий для разных дней приведено на рис. 6 для $N(q>30)/N(q)$ (6а) и $N(m>30)/N(m)$ (6б). Видно, что наклоны линий близки и внутри одного рисунка (исключение составляет день 2 на рис. 6а) и между двумя рисунками.

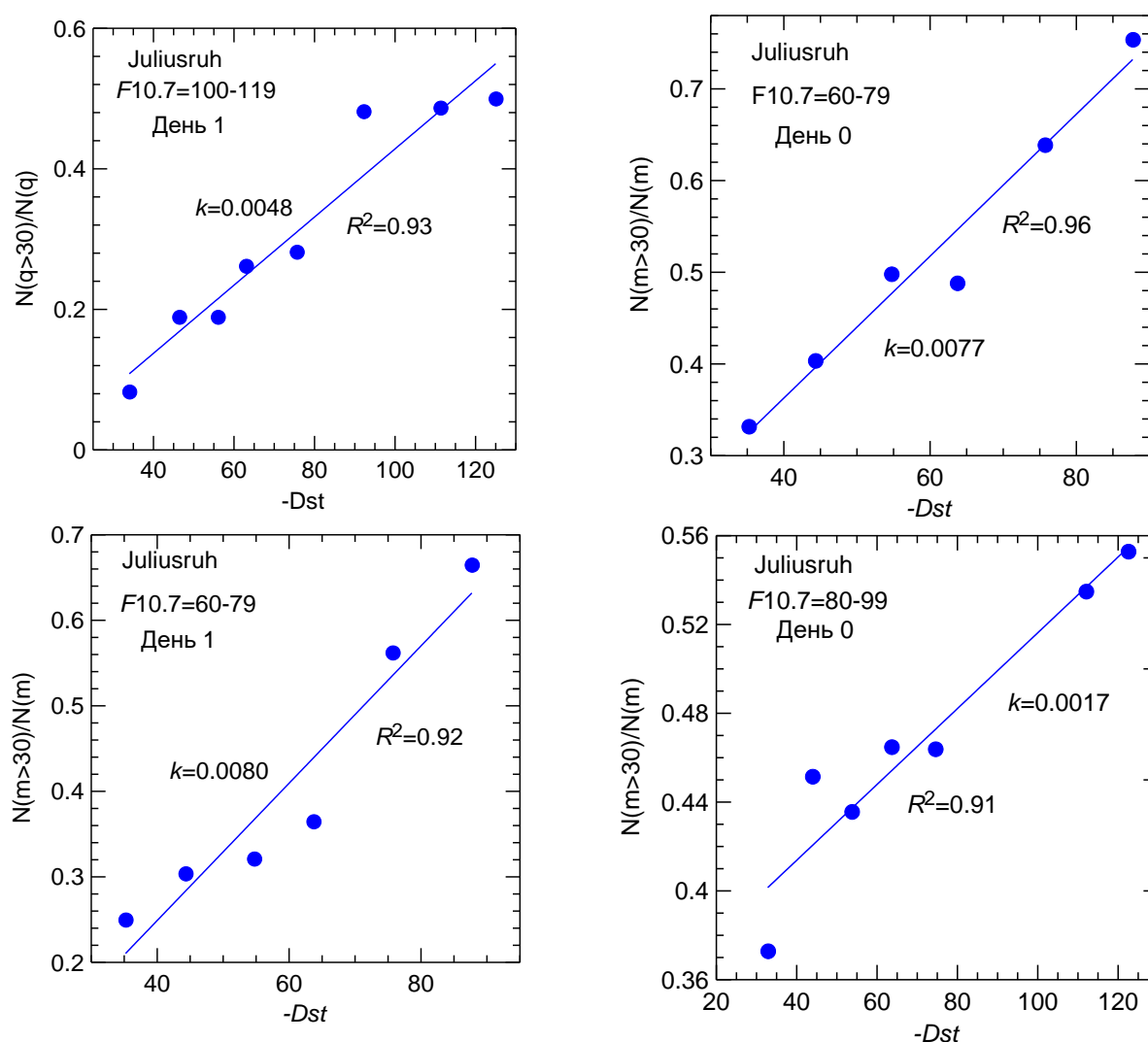


Рис. 5. Примеры хорошо выраженных зависимостей $N(q>30)/N(q)$ и $N(m>30)/N(m)$ от интенсивности бури для ст. Juliusruh

В отличие от результатов предыдущего параграфа, нам не удалось обнаружить систематической зависимости величины k от номера дня. Как видно из данных для $F10.7=100-119$ в таблице 4, величина k для $N(q>30)/N(q)$ колеблется от 0.0026 до 0.0053 (среднее = 0.0042) для Slough и от 0.0045 до 0.0051 (среднее = 0.0048) для Juliusruh. Соответствующие средние значения для $N(m>30)/N(m)$ равны 0.0038 и 0.0037. Близость обоих значений для двух станций (напомним, что исходный массив представляют собой совершенно независимые банки данных) является еще одним подтверждением того, что мы анализируем предвестники предстоящей магнитной бури, а не случайные отклонения $foF2$ (например, Q возмущения, см. Данилов [2022]).

Еще один факт привлекает внимание на рисунке 6. Амплитуда увеличения как $N(q>30)/N(q)$ так и $N(m>30)/N(m)$ при переходе от $Dst = 40$ (слабые бури) к $Dst = 120$ (сильные бури) различна для разных дней. Она минимальна в день 0 (около фактора 2.4) и гораздо больше в дни 2 и 3 (фактор 6 на рис. 6б). Это означает, что дни, более далекие от начала бури более чувствительны к интенсивности бури, чем день 0.

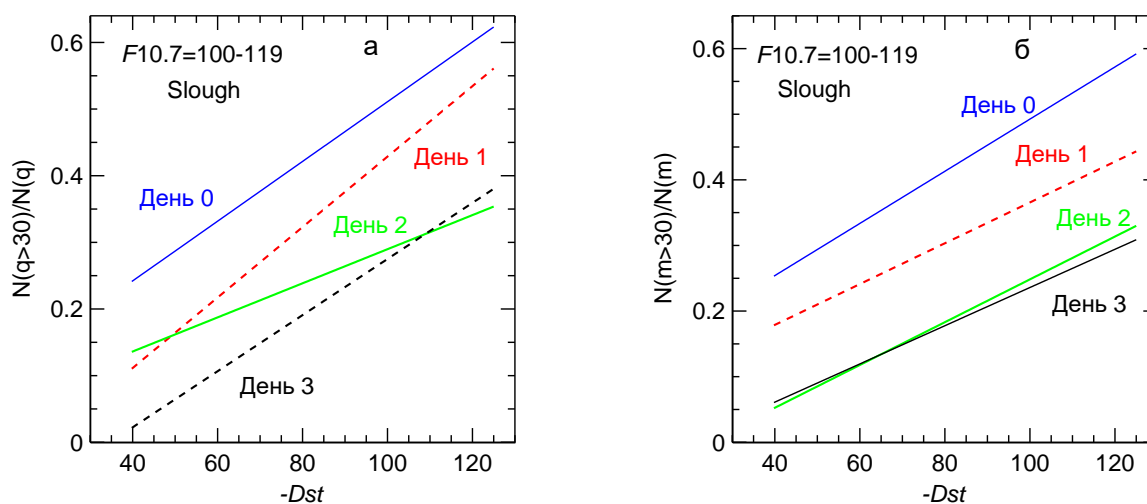


Рис. 6. Аппроксимации зависимости $N(q>30)/N(q)$ (а) и $N(m>30)/N(m)$ (б) от интенсивности бури в разные дни

Представляет большой интерес вопрос о том, зависит ли интенсивность предвестников (т. е. величина $N(>30)/N$) от номера предбурового дня. Для ситуаций, для которых удалось построить статистически значимые зависимости $N(>30)/N$ от интенсивности бури (см. таблицу 4), мы рассчитали с помощью полученных аппроксимаций величины $N(q>30)/N(q)$ и $N(m>30)/N(m)$ для фиксированной интенсивности бури ($Dst = -80$ нТл) для каждого из анализируемых дней. Результаты расчетов приведены в таблице 5.

Таблица 5. Величины $N(>30)/N$ для $Dst = -80$ нТл в разные дни.

День	F10.7=60-79		F10.7=80-99		F10.7=100-119					
	Slough		Juliusruh		Juliusruh		Slough		Juliusruh	
	q	m	q	m	q	q	m	q	m	
0	–	–	0.71	0.67	0.56	0.41	0.40	0.40	0.39	
1	0.41	0.43	–	0.57	0.47	0.32	0.29	0.32	0.26	
2	0.51	0.45	0.48	–	0.41	0.23	0.17	0.48	0.19	
3	0.26	0.34	0.32	–	0.28	0.19	0.16	–	–	

Как и в случае аналогичных расчетов в предыдущем параграфе (см. таблицу 3) статистическая обеспеченность выводов невелика. Тем не менее, явно прослеживается тенденция уменьшения величин $N(>30)/N$ ото дня 0 к остальным дням. Иначе говоря, чем дальше событие (предвестник) от момента начала магнитной бури, тем меньше его интенсивность. В предыдущем параграфе мы пришли к выводу о том, что с удалением от момента начала бури уменьшается количество событий. Оба вывода представляются вполне естественными если ионосфера, действительно, «предчувствует» предстоящую магнитную бурю и анализируемые события являются ее предвестниками. Очевидно, что полученных закономерностей не могло бы быть, если бы мы анализировали случайные отклонения $foF2$, например, Q-возмущения (см. Данилов [2022]).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Резюмируя результаты этой работы, необходимо отметить следующее. Анализ зависимости количества возмущений $foF2$ ($N(q)$ и $N(m)$) в предбуровые дни от интенсивности бури с разделением величин N по дням подтверждает результаты аналогичного анализа, проведенного авторами ранее без разделения данных по дням [Константинова и Данилов 2019, 2020; Данилов и Константинова 2021а; 2022в]. Получено, что величины N уменьшаются с увеличением интенсивности бури (ростом амплитуды отрицательной величины Dst). При этом падение $N(q)$ и $N(m)$ с усилением бури более резко происходит в дни 2 и 3, чем в дни 0 и 1.

Анализ зависимости интенсивности возмущений $foF2$ (отношений $N(q>30)/N(q)$ и $N(m>30)/N(m)$) в предбуревые дни от интенсивности бури с разделением величин $N(>30)/N$ по дням также подтверждает результаты аналогичного анализа, проведенного авторами ранее без разделения данных по дням [Константинова и Данилов 2022в]. Указанная интенсивность растет с усилением бури (т.е. с ростом абсолютной величины отрицательного значения Dst): чем сильнее буря, тем больше величины $N(>30)/N$ при заданном $F(10.7)$.

Скорость увеличения интенсивности возмущений $foF2$, т.е. роста $N(>30)/N$ с ростом интенсивности бури (величина k) имеет для большинства рассмотренных ситуаций близкий порядок величины. Однако амплитуда этого роста при переходе от слабых бурь к сильным больше для дней 2 и 3, чем для дней 0 и 1.

Оценки показывают, что с удалением от момента начала бури (с переходом ото дня 0 к остальным дням) как количество событий (отклонений $foF2$), так и их интенсивность уменьшаются. Этого и следует ожидать, если эти события являются предвестниками предстоящей бури.

Таким образом, можно утверждать, что анализ зависимости событий от интенсивности бури при раздельном рассмотрении предбуревых дней подтвердил выводы, полученные ранее, и позволил получить ряд новых выводов, которые хорошо укладываются в картину поведения указанных событий как предвестников предстоящего геомагнитного возмущения.

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., Обсуждение проблемы предвестников геомагнитных бурь // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 62. № 1. С. 97–105. 2022.
- 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., Константинова А. В. Детальный анализ поведения критической частоты слоя $F2$ перед магнитными бурями. 6. Разделение эффектов интенсивности бури и солнечной активности (ст. Juliusruh) // Гелиогеофизические исследования. Вып. 33. С. 3–11. 2022а.
- Данилов А. Д., Константинова А. В. Детальный анализ поведения критической частоты слоя $F2$ перед магнитными бурями. 7. Разделение эффектов интенсивности бури и солнечной активности (ст. Slough) // Гелиогеофизические исследования. Вып. 33. С. 12–23. 2022б.
- Данилов А. Д., Константинова А. В. Детальный анализ поведения критической частоты слоя $F2$ перед магнитными бурями. 8. Интенсивность предвестников // Гелиогеофизические исследования. Вып. 34. С. 3–12. 2022с.
- 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.

- 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.
- 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.
- 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.

DETAILED ANALYSIS OF THE BEHAVIOR OF THE $F2$ -LAYER CRITICAL FREQUENCY PRIOR TO MAGNETIC STORMS. 9. DEPENDENCE ON THE STORM INTENSITY ON VARIOUS PRESTORM DAYS

Danilov A.D., Konstantinova A.V.

The analysis of the behavior of the critical frequency $foF2$ deviation from quiet conditions on the days preceding a magnetic storm that has been started in the series of previous publications of the authors is continued. The dependence of the number and intensity of these deviations on the intensity of the coming storm is analyzed. It is found that under analysis of the aforementioned dependence separately for every prestorm day, the conclusion obtained in the previous publications of the authors (without the separation of days) is confirmed. The conclusion is that the number of deviations decreases and their intensity increases with intensification of the storm. It is found that both the number and intensity of these deviations increases with remoting from the storm onset moment.

KEYWORDS: GEOMAGNETIC STORM, SOLAR ACTIVITY, PRESTORM DAYS.