

УДК 550.388.2

## ДЕТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ СЛОЯ $F_2$ ПЕРЕД МАГНИТНЫМИ БУРЯМИ

© 2022 г. А. Д. Данилов<sup>1</sup>, \*, А. В. Константинова<sup>1</sup><sup>1</sup>Институт прикладной геофизики им. Е.К. Федорова Росгидромета (ИПП), г. Москва, Россия

\*e-mail: adanilov99@mail.ru

Поступила в редакцию 07.04.2022 г.

После доработки 12.05.2022 г.

Принята к публикации 25.05.2022 г.

Выполнен детальный анализ зависимости количества событий (отклонений критической частоты  $foF_2$  в предбуревые дни от  $foF_2$  для спокойных геомагнитных условий) и величины отклонений критической частоты от интенсивности предстоящей бури и солнечной активности. Для разделения эффектов зависимости от разных параметров зависимость от солнечной активности рассматривается для узких интервалов индекса  $Dst$ , характеризующего интенсивность бури, а зависимость от интенсивности бури — для узких интервалов индекса  $F10.7$ , характеризующего солнечную активность. Подтверждены выводы об уменьшении числа указанных событий при увеличении отрицательной величины  $Dst$  (усилении бури) и  $F10.7$  (росте солнечной активности). Получено, что для подавляющего большинства ситуаций наблюдается увеличение интенсивности рассматриваемых событий при усилении бури и уменьшение при росте  $F10.7$ . Анализ зависимости количества возмущений  $foF_2$  в предбуревые дни от интенсивности бури с разделением эффектов по дням подтверждает результаты аналогичного анализа, проведенного авторами ранее без разделения данных по дням. Кроме того, получено, что с удалением от момента начала бури (с переходом от нулевого дня к остальным дням) как количество событий (отклонений  $foF_2$ ), так и величина отклонений критической частоты уменьшаются.

DOI: 10.31857/S0016794022050030

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Во многих исследованиях отмечался тот факт, что в течение 2–3 дней перед магнитными бурями наблюдаются возмущения критической частоты слоя  $F_2$  ионосферы — отклонения от спокойных условий. Обзор указанных исследований и подробное обсуждение проблемы можно найти в работах [Danilov and Konstantinova, 2019, 2021; Данилов и Константинова, 2019; Данилов, 2022].

Ранее был выполнен детальный анализ поведения критической частоты  $foF_2$  в течение трех дней, предшествующих магнитной буре, по наблюдениям методом вертикального зондирования на станциях Slough (Chilton) и Juliusruh [Константинова и Данилов, 2020, 2021; Данилов и Константинова 2020а, б; 2021а, б, в]. 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. Поясним, что анализируются отклонения критической частоты с амплитудой, превышающей 20%, в течение трех дней до начала геомагнитной бури

от значения этой частоты в спокойных геомагнитных условиях.

Недавно авторы провели ряд новых исследований по детальному анализу указанных выше зависимостей. С результатами этих исследований можно ознакомиться в серии публикаций в электронном журнале “Гелиогеофизические исследования” [Данилов и Константинова 2022а, б, в, г]. Были предприняты попытки разделения эффектов зависимостей от разных параметров, найденных ранее (прежде всего — от солнечной активности и интенсивности магнитной бури, а также сезона). Были получены и принципиально новые результаты. В частности, был проанализирован вклад каждого из четырех анализируемых предбуревых дней в наблюдаемые зависимости от интенсивности бури и солнечной активности. Было изучено изменение интенсивности анализируемых событий (отклонений  $foF_2$  от спокойных условий) с изменением солнечной активности и интенсивности бури.

В данной работе мы приводим описание основных результатов, полученных в указанной серии публикаций, отсылая читателей за деталями к оригинальным статьям.

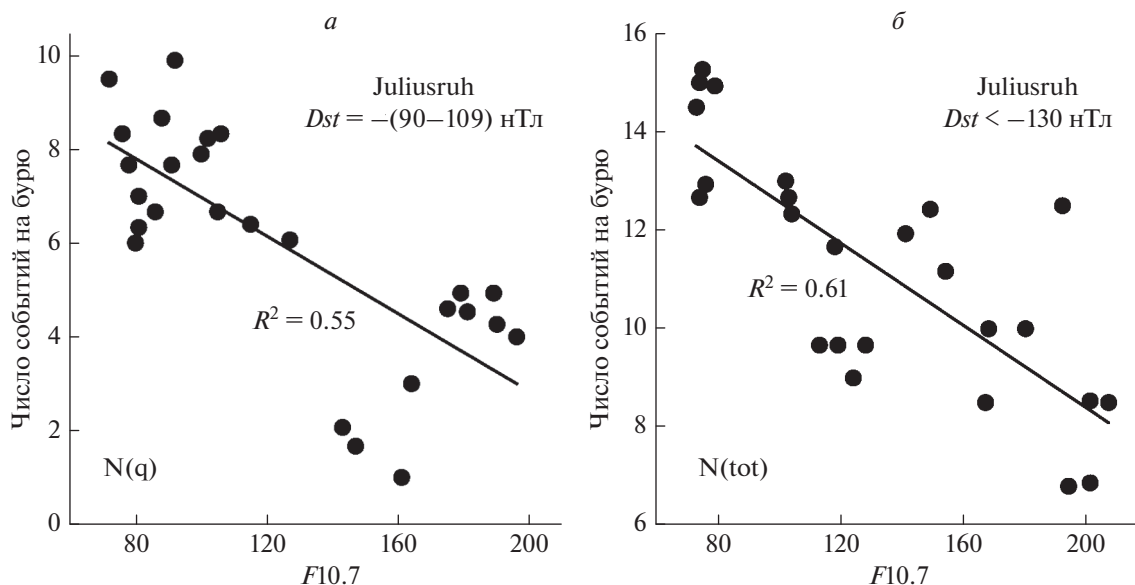


Рис. 1. Зависимость  $N(q)$  и  $N(tot)$  от  $F10.7$  для разных интервалов  $Dst$  (ст. Juliusruh).

Мы использовали тот же метод анализа, что и в указанных выше предыдущих публикациях: 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] (опция  $m$ ), и по выбранному спокойному дню (опция  $q$ ). Мы накладывали определенные ограничения на анализируемые предбуревые дни и на спокойный день. За деталями мы отсылаем читателей к публикациям Константиновой и Данилова [2020, 2021].

## 2. ЗАВИСИМОСТЬ ОТ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

В указанных выше работах авторов зависимости от интенсивности бури (амплитуда наибольшего отрицательного значения  $Dst$ ) и солнечной активности (индекс  $F10.7$ ) строились для всех имеющихся данных. Это означает, что в зависимости, скажем,  $N(tot)$  от  $F10.7$  точка на  $F10.7 = 85$  является усреднением  $N(tot)$  по всем бурям, которые попали в интервал  $F10.7 = 80-89$ . Но в этот интервал попали бури из разных сезонов и с разными величинами  $Dst$ . Понятно, что желательно попытаться найти зависимость от  $F10.7$ , “очищенную” от зависимостей от сезона и интенсивности геомагнитной бури.

Такая работа для обеих станций была проделана Даниловым и Константиновой [2022a, б]. Рассматривалась зависимость  $N(q)$ ,  $N(m)$  и  $N(tot)$  от  $F10.7$  для интервалов  $Dst = -(30-49)$  нТл,  $-(50-69)$  нТл,  $-(70-89)$  нТл,  $-(90-109)$  нТл,  $-(110-129)$  нТл, и  $<-130$  нТл. Результаты рас-

смотрения показали, что в большинстве случаев наблюдается статистически значимая зависимость количества событий от  $F10.7$  для каждого из указанных интервалов  $Dst$ .

Примеры таких зависимостей приведены на рисунках 1 и 2 для обеих станций и разных интервалов  $Dst$ . Приведенные на рисунках величины коэффициента определенности для F-теста Фишера  $R^2$  показывают, что при имеющемся количестве точек статистическая значимость получаемых зависимостей превышает 99%.

Отметим важный момент. На рисунках 1 и 2 обращает на себя внимание тот факт, что разброс точек существенно больше, чем на графиках соответствующих зависимостей в работах Константиновой и Данилова [2020, 2021]. Это объясняется следующими обстоятельствами. В указанных работах каждая точка на рисунке представляла собой усредненное значение многих (2–3 десятка) точек в соответствующем интервале  $F10.7$  шириной в 10 единиц. На рисунках 1 и 2 точки приведены для каждой бури без усреднения. Поскольку каждой буре соответствуют свои значения сезона, LT SO и  $Dst$  внутри рассматриваемого интервала  $Dst$ , разброс точек неизбежен. Важно, что рисунки 1 и 2 дают ту же зависимость  $N(q)$  и  $N(tot)$ , что была получена в предыдущих работах, т.е. падение величин  $N$  с ростом  $F10.7$ .

Поскольку существует зависимость числа событий  $N$  от сезона, мы постарались, избавиться от этой зависимости. Для этого мы рассмотрели отдельно зимние месяцы и месяцы равноденствия. Естественно, количество точек в рассматриваемом интервале  $Dst$  при этом уменьшалось.

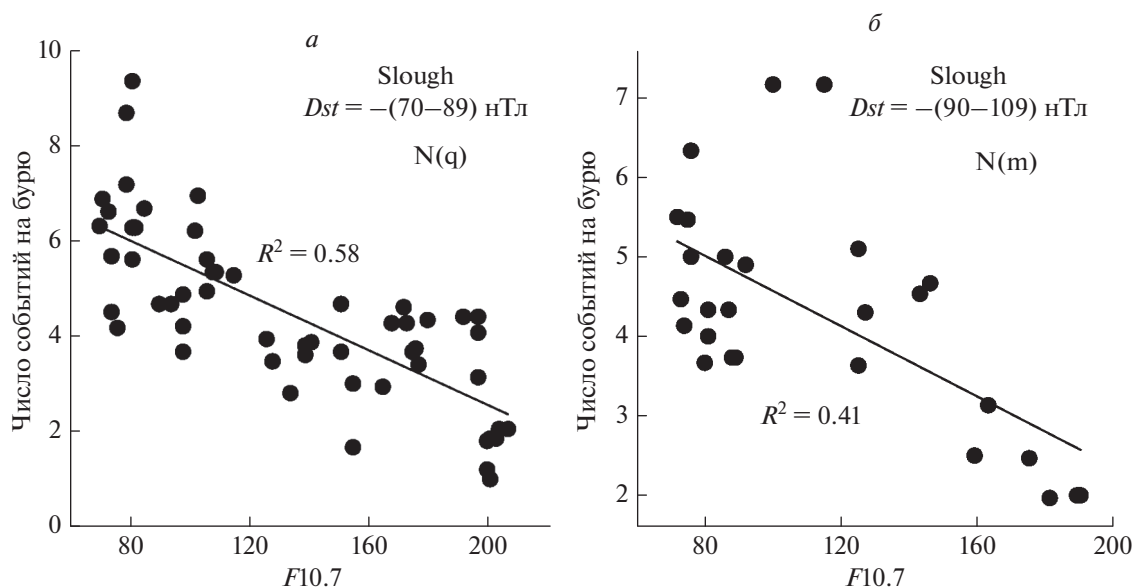


Рис. 2. Зависимость  $N(q)$  и  $N(tot)$  от  $F10.7$  для разных интервалов  $Dst$  (ст. Slough).

Для половины рассмотренных интервалов  $Dst$  количество точек оказывалось слишком мало для анализа зависимостей для отдельных сезонов, но для интервалов  $Dst = -(30-49)$  нТл,  $-(50-69)$  нТл и  $-(70-89)$  нТл такую зависимость получить удалось. Оказалось, что при рассмотрении отдельного сезона (зимы или равноденствия) зависимость от  $F10.7$  становится лучше выраженной, чем при рассмотрении всех сезонов.

Пример указанного эффекта в интервале  $Dst = -(50-69)$  нТл для обеих станций приведен на рисунках 3 и 4. Видно, что при использовании всех точек (рис. 3а и 4а) наблюдается заметный разброс точек и величина  $R^2$  невелика. Однако за счет большого числа точек обеспечивается высокое значение статистической значимости  $S$ . Количество бурь для зимних месяцев значительно меньше, но зависимость выражена гораздо лучше и величины  $R^2 = 0.69$  и  $0.64$  обеспечивают высокую статистическую значимость ( $S > 99\%$ ). Все сказанное выше относится также к переходу ото всех бурь только к равноденственным бурям, что показано на рис. 5.

Таким образом, анализ зависимости количества событий (предвестников) от солнечной активности показывает, что эта зависимость (уменьшение  $N$  с ростом  $F10.7$ ) статистически значима при анализе данных в узком интервале величин  $Dst$  (чтобы исключить зависимость от интенсивности бури). Это подтверждает вывод об уменьшении  $N$  с ростом  $F10.7$ , полученный в предыдущих работах на основании анализа всего массива бурь.

Получено также, что при анализе бурь в данном интервале  $Dst$ , относящихся к одному кон-

кретному сезону, зависимость от  $F10.7$  становится лучше выраженной (см. рис. 3–5).

### 3. ЗАВИСИМОСТЬ ОТ ИНТЕНСИВНОСТИ БУРИ

Зависимость параметров предбуревых отклонений  $foF2$  от интенсивности магнитной бури представляет первостепенный интерес, поскольку она является одним из основных аргументов в пользу того, что эти отклонения являются предвестниками бури.

Анализ, аналогичный описанному выше для зависимости от  $F10.7$ , был проведен и для зависимости от  $Dst$  (Данилов и Константинова [2022а, б]). Она рассматривалась для следующих интервалов  $F10.7$ : 65–79, 80–99, 100–119, 120–139, 140–159, 160–179 и 180–207.

Получено статистически значимое падение  $N(q)$ ,  $N(m)$  и  $N(tot)$  с увеличением интенсивности бури. Когда имелось достаточное количество бурь, строилась зависимость этих величин от  $Dst$  отдельно для зимы и равноденствия. При этом, несмотря на уменьшение количества анализируемых бурь, зависимость от  $Dst$  становилась лучше выраженной.

Так, для ст. Juliusruh для интервала  $F10.7 = 65-79$  при рассмотрении данных за все сезоны значимую зависимость от  $Dst$  удается получить только для  $N(q)$ . Видимо, в этот интервал  $F10.7$  попадают “ошибочные”  $m$ -точки, которые нарушают зависимость для  $N(m)$  при использовании всех точек в данном интервале. При переходе к анализу только зимних точек в этом интервале  $F10.7$  и для  $N(m)$ , и для  $N(tot)$  получаются зависимости с ве-

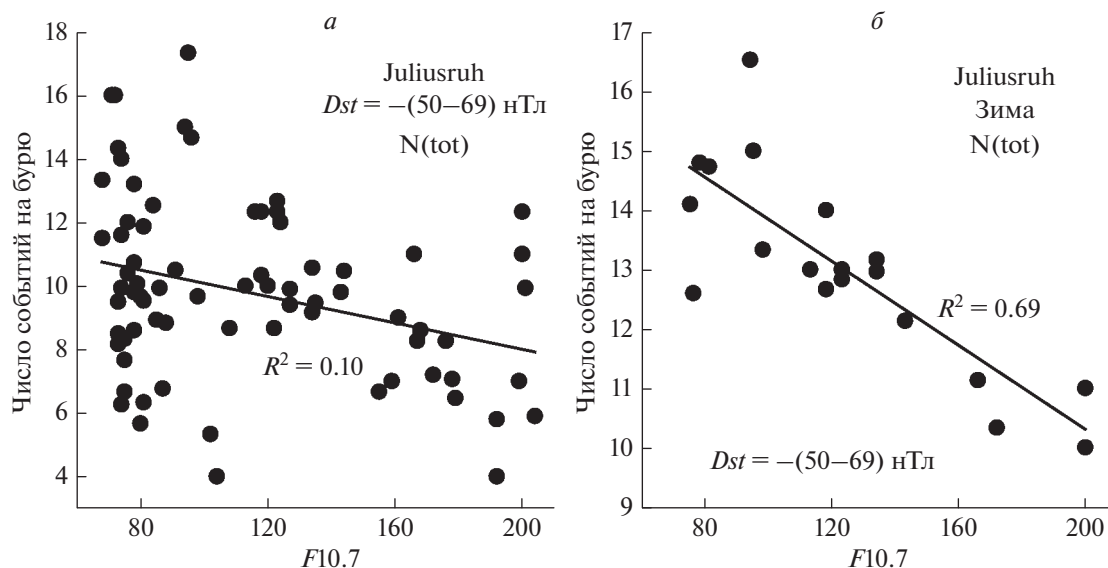


Рис. 3. Изменение характера зависимости от  $F10.7$  при переходе ото всех точек в заданном интервале  $Dst$  (а) к только зимним точкам (б) (ст. Juliusruh).

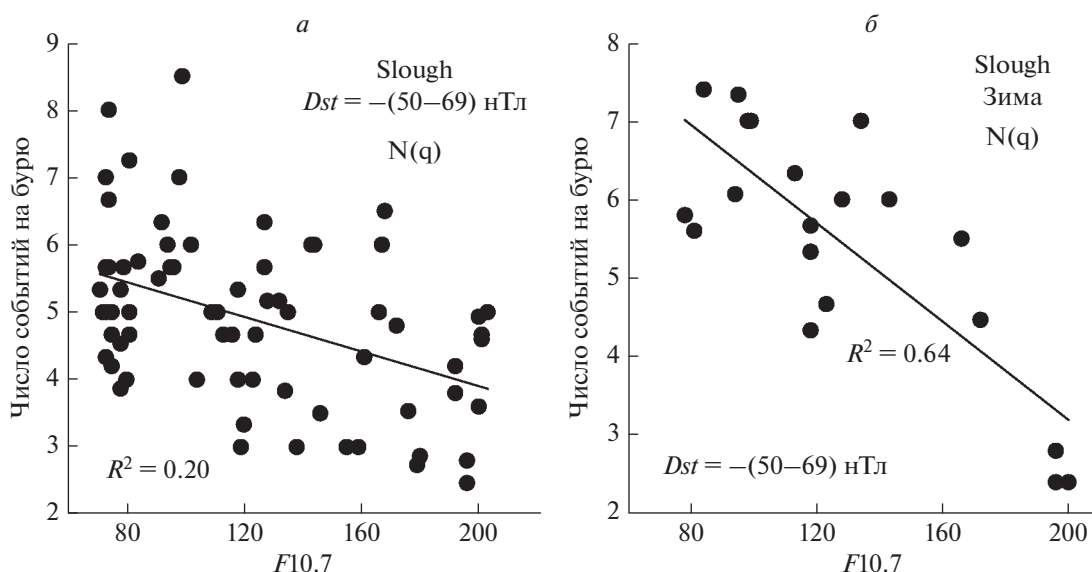


Рис. 4. Изменение характера зависимости от  $F10.7$  при переходе ото всех точек в заданном интервале  $Dst$  (а) к только зимним точкам (б) (ст. Slough).

личинами  $R^2$ , обеспечивающими высокую статистическую значимость  $S = 95-99\%$ .

Для интервалов  $F10.7 = 80-99$  и  $100-119$  при анализе всех точек получается статистически значимая зависимость всех величин  $N$  от  $Dst$  ( $S \sim 95\%$ ). При переходе же к только зимним или только равноденственным данным величина  $R^2$  заметно возрастает, и величина  $S$  приближается к  $99\%$ . Пример зависимости  $N(\text{tot})$  от  $Dst$  для интервала  $F10.7 = 100-119$  при анализе всех точек и только точек для зимы приведен на рис. 6.

Для интервалов  $F10.7 = 120-139$ ,  $140-159$ ,  $160-179$  и  $180-207$  точек недостаточно, чтобы строить зависимости отдельно по сезонам. Но для всех точек каждого интервала уменьшение величин  $N$  при увеличении отрицательной амплитуды  $Dst$  получается со статистической значимостью от  $90\%$  до  $99\%$ .

Картина для ст. Slough очень близка к описанной для ст. Juliusruh. Пример перехода от анализа всех бурь к анализу только равноденственных

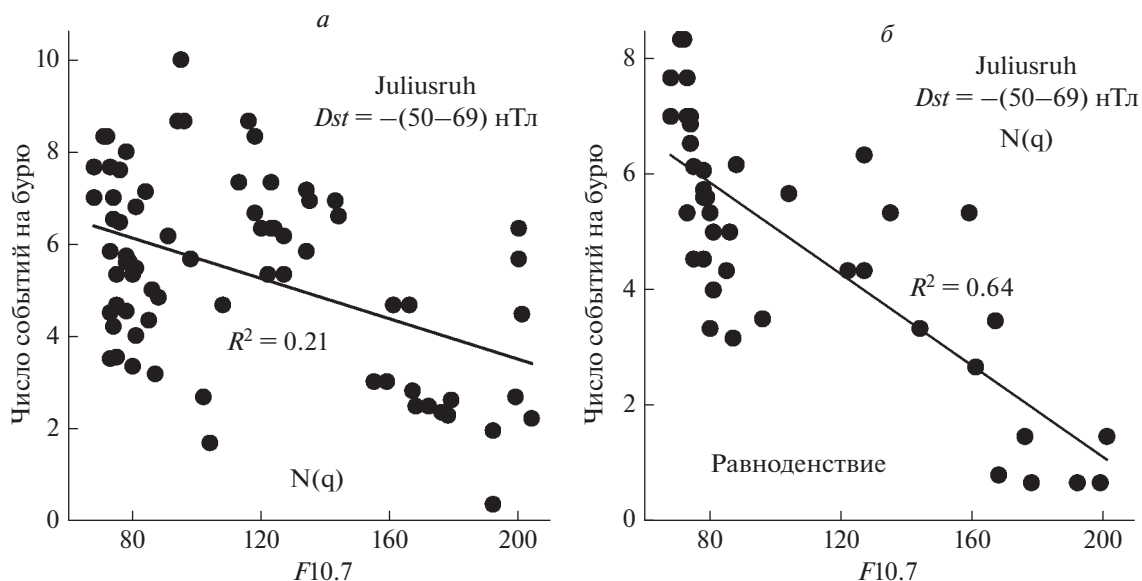


Рис. 5. Изменения характера зависимости  $N(q)$  от  $F10.7$  при переходе ото всех точек в заданном интервале  $Dst$  (а) к только равноденственным точкам (б) (ст. Juliusruh).

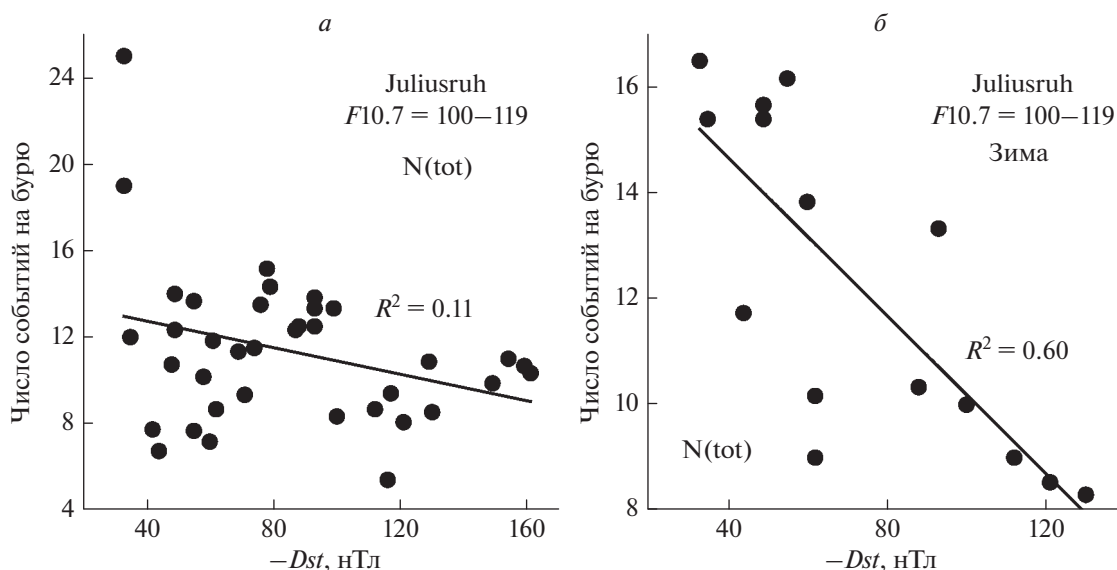


Рис. 6. Зависимость  $N(tot)$  от  $Dst$  для всех сезонов (а) и только для зимних точек (б) (ст. Juliusruh).

бурь со значительным увеличением величины  $R^2$  приведен на рис. 7.

Таким образом, анализ зависимости величин  $N$  от интенсивности предстоящей магнитной бури для узких фиксированных интервалов  $F10.7$  подтверждает уменьшение  $N(q)$ ,  $N(m)$  и  $N(tot)$  с увеличением амплитуды отрицательной величины  $Dst$  (являющейся критерием интенсивности предстоящей магнитной бури), как это и было получено в предыдущих публикациях [Константинова

и Данилов 2020, 2021; Данилов и Константинова 2021a].

В тех случаях, где в выбранном интервале  $F10.7$  имеется достаточно точек, чтобы рассмотреть отдельно зависимость в различные сезоны, зависимость  $N$  от  $Dst$  становится лучше выраженной и более значимой статистически. Это подтверждает существование сезонной зависимости количества событий (предвестников), подробно проанализированной в наших предыдущих работах.

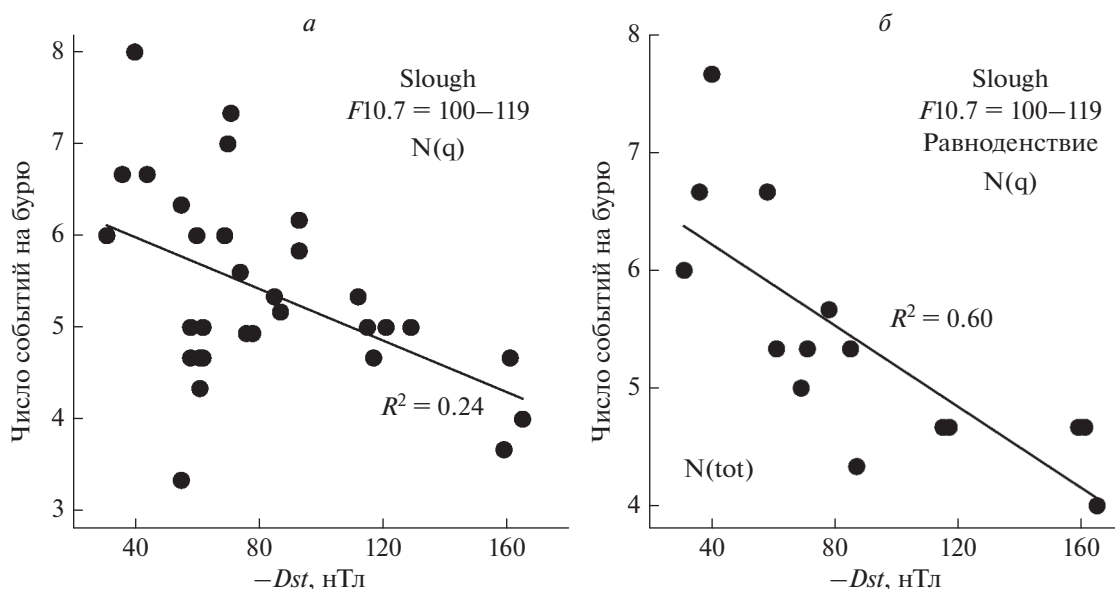


Рис. 7. Зависимость  $N(q)$  от  $Dst$  для всех сезонов (а) и только для зимних точек (б) (ст. Slough).

#### 4. НАКЛОН ЗАВИСИМОСТЕЙ

В двух предыдущих параграфах зависимость величин  $N$  от  $F10.7$  и  $Dst$  анализировалась в плане ее существования и статистической обоснованности, как это было сделано в работах Данилова и Константиновой [2022а, б]. Основной целью было подтвердить падение  $N$  с ростом солнечной активности и интенсивности бури и оценить статистическую значимость этого падения на основании коэффициента  $R^2$ . Однако представляет очевидный интерес и вопрос количественного сравнения. Иначе говоря, анализ наклона  $k$  линейных аппроксимаций получаемых зависимостей  $N$  от  $F10.7$  и  $Dst$  и сравнение величин  $k$ , получаемых для одной станции, но разных условий (разных интервалов  $F10.7$  и  $Dst$ ) и, наоборот, для разных станций в одинаковых условиях.

Наклон  $k1$  зависимости  $N(q)$  и  $N(m)$  от  $F10.7$  определялся для тех же интервалов  $Dst$ , что и в параграфе 2. Обнаружено, во-первых, что при анализе всех точек данного интервала  $Dst$  лишь в двух случаях ( $N(m)$ , Juliusruh,  $Dst = -(70-89)$  и  $-(110-129)$  нТл) не удается получить значимой величины  $k1$ . Во-вторых, большинство величин  $k1$ , полученных при анализе всех точек, близки по порядку величины ( $k1 = -(0.008-0.013)$ ) и лишь в двух случаях  $k1 < -0.020$ . В некоторых ситуациях зависимость  $N$  от  $F10.7$  была гораздо лучше выражена (гораздо более высокие величины  $R^2$ ), если отбрасывались две-три крайних точки. Естественно, для таких случаев величины  $k1$  были значительно выше.

Рисунок 8 показывает, как меняются полученные величины наклона  $k1$  для зависимости  $N$  от

$F10.7$  для различных интервалов  $Dst$ . Видно, что для обеих станций получен четко выраженный рост абсолютной величины  $k1$  с ростом  $Dst$ . Иначе говоря, рис. 8 показывает, что при увеличении интенсивности бури падение  $N(q)$  и  $N(m)$  с ростом солнечной активности становится более резким (отрицательная величина  $k1$  растет).

Очевидно, что представляет не меньший интерес и поведение наклона  $k2$  зависимости  $N$  от интенсивности бури при изменении солнечной активности. Для обеих станций зависимость  $N$  от интенсивности бури (индекса  $Dst$ ) рассматривалась для тех же интервалов  $F10.7$ , для которых анализировались зависимости  $N$  от  $Dst$  в параграфе 3.

Результаты этого рассмотрения приведены на рис. 9 для  $N(tot)$  на обеих станциях. Как и в случае рис. 8, обращает на себя внимание главный факт — и для Slough, и для Juliusruh абсолютная величина  $k2$  уменьшается с ростом  $F10.7$ . Это означает, что чем выше солнечная активность, тем слабее величины  $N$  падают с ростом интенсивности бури (т.е. с ростом максимального отрицательного значения  $Dst$ ). Рисунок 9 содержит еще один важный и неожиданный результат. Наклон  $j$  аппроксимирующих линий на рис. 9 оказывается поразительно близким для обеих станций:  $6.46 \times 10^{-5}$  для Slough и  $9.58 \times 10^{-5}$  для Juliusruh. Учитывая неоднократно отмечавшийся факт, что величины  $foF2$  для двух станций представляют собой совершенно независимые массивы данных, близость величин  $j$  на рис. 9а и 9б представляет еще одним подтверждением того, что мы действительно анализируем реальные отклонения  $foF2$ , связанные с предстоящей бурей, а не случайные события.

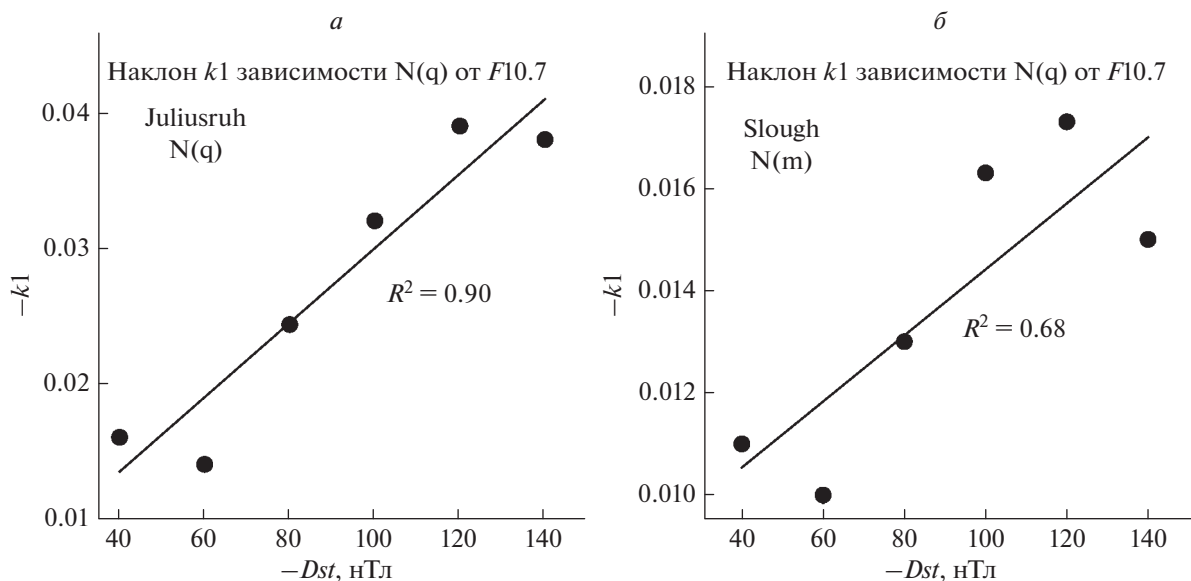


Рис. 8. Зависимость от  $Dst$  величины наклона  $k_1$  зависимости  $N(q)$  для ст. Juliusruh (а) и  $N(m)$  для ст. Slough (б) от солнечной активности.

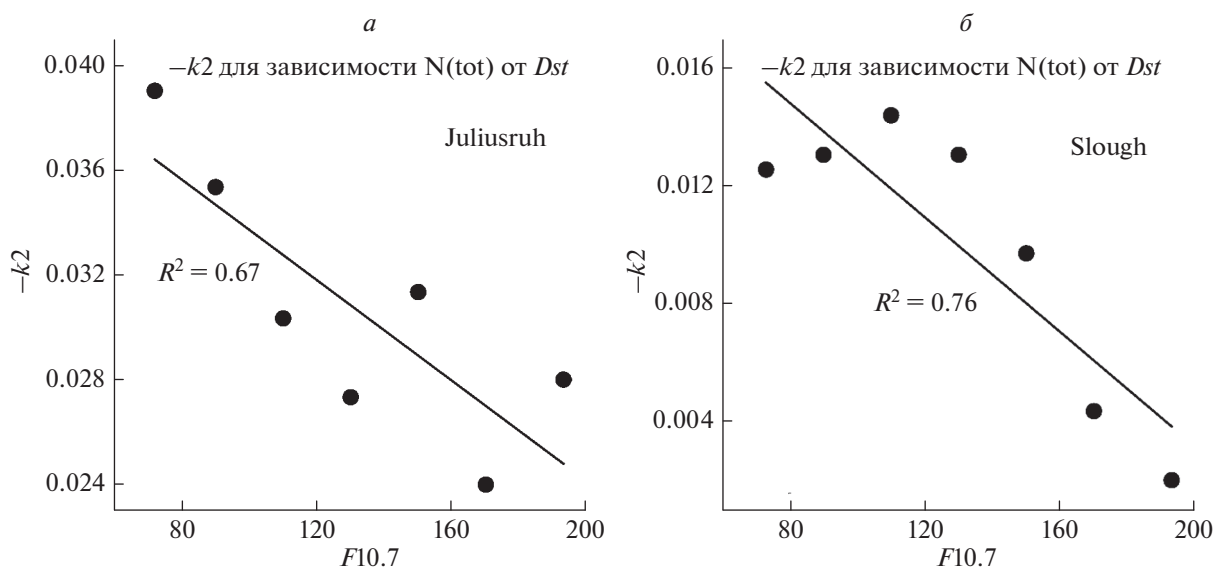


Рис. 9. Зависимость от  $F10.7$  величины наклона  $k_2$  зависимости  $N(\text{tot})$  для ст. Juliusruh (а) и  $N(m)$  для ст. Slough (б) от интенсивности бури.

## 5. ИНТЕНСИВНОСТЬ СОБЫТИЙ

Представляет несомненный интерес вопрос об интенсивности рассматриваемых отклонений  $foF2$  в предбуревые дни. В наших предыдущих публикациях рассматривались положительные и отрицательные отклонения  $foF2$  с амплитудами 20–30%, 30–40% и >40%. Количество отрицательных отклонений меньше, чем количество положительных. События с амплитудой минус 20–30% и <–40% встречаются довольно редко, по-

этому провести их статистический анализ не представляется возможным. Положительные отклонения с амплитудой >40% также встречаются достаточно редко. Но есть возможность (подробнее см. [Данилов и Константинова, 2022в]) проанализировать количество положительных отклонений с амплитудой в 30% и больше в общем количестве событий. Рассматриваются доля всех событий с амплитудой  $A \geq 30\%$  в общем количестве событий  $N(\text{tot} > 30)/N(\text{tot})$  и в количестве со-

Таблица 1. Зависимость  $N(>30)/N$  от интенсивности бури

F10.7	$N(q > 30)/N(q)$			$N(m > 30)/N(m)$			$N(\text{tot} > 30)/N(\text{tot})$		
	$R^2$	$P$	$-Dst$	$R^2$	$P$	$-Dst$	$R^2$	$P$	$-Dst$
Slough									
65–79	0.61	14	30–310	0.72	14	30–310	0.73	15	30–310
80–99	0.51	5	80–130	0.89	5	80–130	0.84	5	80–130
100–119	0.81	10	30–130	0.46	9	30–130	0.74	9	30–140
120–139		нет			нет			нет	
140–159	0.72	5	30–180	0.42	12	30–240	0.47	6	30–240
160–179	0.94	8	30–120	0.39	7	30–100	0.53	9	30–140
180–218	0.55	6	30–90	0.72	6	30–90	0.34	9	30–140
Juliusruh									
65–79	0.91	10	30–320	0.42	10	30–280	0.72	10	30–280
80–99	0.70	10	30–140	0.75	5	80–140	0.39	10	30–140
100–119	0.85	9	30–120	0.90	5	30–80	0.71	10	30–140
120–139	0.20	9	30–140	0.18	6	30–120	0.47	6	30–220
140–159	0.47	6	30–220	0.82	6	30–220	0.89	6	30–220
160–179		нет		0.65	9	30–140		нет	
180–207	0.45	6	100–320	0.35	14	30–320	0.68	8	85–320

бытий по  $q$  и  $m$  опциям ( $N(q > 30)/N(q)$  и  $N(m > 30)/N(m)$  соответственно).

### 5.1. Зависимость от интенсивности бури

Как и в параграфе 3, мы в качестве индикатора интенсивности магнитной бури использовали наибольшее отрицательное значение индекса  $Dst$  во время этой бури.

Чтобы устранить влияние зависимости от индекса  $F10.7$  на зависимость  $N(>30)/N$  от  $Dst$ , анализ проводился для достаточно узких интервалов  $F10.7$  ( $F10.7 = 65–79, 80–99, 100–119, 120–139, 140–159, 160–179$  и  $180–210$ ) точно так же, как это делалось при анализе зависимости величин  $N$  в параграфе 3. Результаты приведены в табл. 1.

В этой таблице приведены: интервал  $F10.7$ , в котором анализируется зависимость, коэффициент определенности  $R^2$ , количество точек  $P$  и интервал  $Dst$  в нТл, в котором эта зависимость наблюдается. Как видно из табл. 1, из 42 рассмотренных ситуаций только в 5 не наблюдается значимой зависимости (роста  $N(>30)/N$  с ростом интенсивности бури).

Рассмотрим полученные результаты подробнее. Существование зависимостей для всех рассмотренных точек с высокими величинами  $R^2$  доказывает, что величины  $N(>30)/N$  действительно растут с ростом отрицательной величины  $Dst$  (т.е. с усилением бури). Примеры хорошо выраженной зависимости приведены на рис. 10 и 11.

Как видно из табл. 1, в ряде случаев хорошо выраженная зависимость наблюдается не для всех точек интервала. Дело в том, что каждая точка на рисунках 10 и 11 представляет собой среднее значение по всем бурям в данном интервале  $Dst$ . Усреднение производится по интервалам в 10 нТл ( $-(30–40), -(40–50), -(50–60)$  нТл и т.д.). Каждая точка наносится для значения  $Dst$ , среднего для попавших в данный интервал бурь. В некоторые интервалы, особенно для высоких  $Dst$ , может попасть всего одна буря. И случайное отклонение анализируемой величины во время этой бури может существенно нарушить получаемую зависимость.

Так, например, при анализе  $N(q > 30)/N(q)$  для Slough для  $Dst > -90$  нТл получается очень хорошо выраженная зависимость с  $R^2 = 0.95$ . Добавление точки для  $Dst = -167$  нТл ухудшает величину  $R^2$  ( $R^2 = 0.79$ ), но все еще сохраняет значимую зависимость. А добавление точки для  $Dst = -213$  нТл фактически уничтожает зависимость, или делает ее статистически малозначимой. Точно такая же картина наблюдается и для ст. Juliusruh. Для  $Dst > -120$  нТл наблюдается зависимость с высоким значением  $R^2 = 0.89$ , а добавление точек для  $Dst = -(100–160)$  нТл значительно ухудшает получаемую зависимость ( $R^2 = 0.52$ ).

Сказанное выше призвано пояснить, что определение зависимостей  $N(>30)/N$  от интенсивности бури представляет собой сложную задачу. В некоторых случаях встречаются бури, для которых эта зависимость нарушается. Скорее всего,



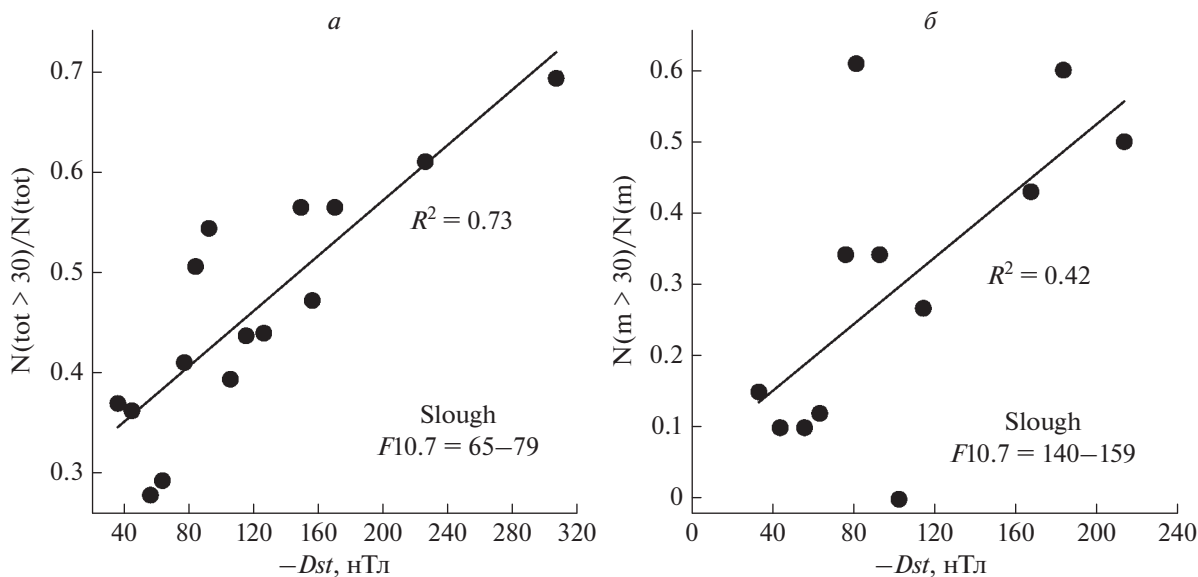


Рис. 10. Зависимость для  $F10.7 = 65-79$  (а) и  $F10.7 = 140-159$  (б) от  $Dst$  для ст. Slough.

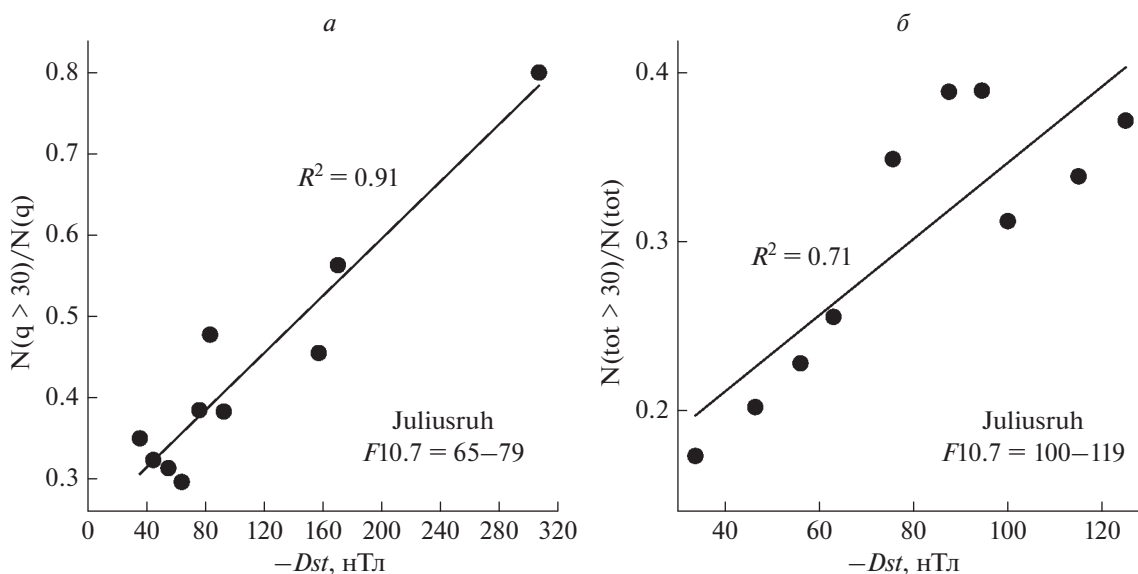


Рис. 11. Зависимость  $F10.7 = 65-79$  и  $F10.7 = 100-119$  от  $Dst$  для ст. Juliusruh.

это связано со случайными отклонениями  $foF2$  (например, “загрязнением” числа предвестников отклонениями  $foF2$ , не связанными с предстоящей магнитной бурей). Когда такое отклонение попадает в определенный интервал  $Dst$ , оно нарушает зависимость или, во всяком случае, резко снижает ее статистическую значимость. Наиболее часто это случается для сильных бурь (т.е. для интервалов больших отрицательных  $Dst$ ). Именно поэтому в большинстве рассмотренных случаев для слабых и умеренных бурь (для  $Dst > -100$  нТл) рост всех трех параметров ( $N(tot > 30)/N(tot)$ ,

$N(q > 30)/N(q)$  и  $N(m > 30)/N(m)$ ) с ростом отрицательной величины  $Dst$  хорошо выражен и статистически значим, даже если число анализируемых точек невелико.

Реже встречаются обратные ситуации: хорошо выраженный рост  $N(>30)/N$  начинается не с  $Dst = -30$  нТл, а со значений этого индекса с более высокой отрицательной амплитудой. Такая ситуация встречается трижды (см. табл. 1) – для  $F10.7 = 80-99$  (Slough),  $F10.7 = 80-99$  (Juliusruh), и  $F10.7 = 180-207$  (Juliusruh).

Таблица 2. Зависимость интенсивности событий от солнечной активности

$-Dst$ , нТл	Slough						Juliusruh					
	q		m		tot		q		m		tot	
	$R^2$	$P$	$R^2$	$P$	$R^2$	$P$	$R^2$	$P$	$R^2$	$P$	$R^2$	$P$
30–49	0.31	14	0.30	14	0.31	30	0.52	12	0	13	0.33	12
50–69	0.23	14	0.12	14	0.18	14	0.59	13	0.64	13	0.82	13
70–89	0.28	14	0.73	14	0.59	14	0.53	13	0	13	0.63	13
90–109	0.11	11	0.53	12	0.65	12	0.49	11	0.30	11	0.62	11
110–129	0.30	11	0.92	11	0.77	12						
>130	0.60	11	0.30	11	0.53	11						

Таким образом, можно утверждать, что имеет-ся хорошо выраженная тенденция увеличения доли анализируемых событий (отклонений  $foF2$ ) с большими амплитудами ( $A \geq 30\%$ ) в общем количестве событий при переходе от более слабых бурь к более сильным. Для бурь с  $Dst > -100$  нТл такая зависимость наблюдается почти всегда. Анализ бурь с более высокими величинами  $Dst$  в большинстве случаев затруднен, поскольку сильные бури встречаются реже, и данных для анализа становится мало. Но в тех случаях, когда данных для интервала  $Dst$  было достаточно (например, Juliusruh для  $F10.7 = 65-79$ ), также получается хорошо выраженный рост  $N(>30)/N$  с ростом интенсивности бури во всем этом интервале.

Полученный результат представляется важным по двум причинам. Во-первых, он является еще одним аргументом в пользу того, что анализируемые отклонения  $foF2$  в предбуревые дни связаны с предстоящей бурей, т.е. являются ее предвестниками. Если бы эти отклонения представляли собой так называемые Q-возмущения (дискуссия по поводу этих возмущений подробно описана Даниловым [2022]), они не могли бы продемонстрировать зависимости их интенсивности от характеристик бури (в том числе от ее интенсивности).

Во-вторых, обнаруженное увеличение количества более сильных отклонений  $foF2$  в предбуревые дни с увеличением интенсивности бури может оказаться важным при попытках использовать предбуревые эффекты в слое  $F2$  для предсказания предстоящей бури. Указанные результаты могут быть полезны в совокупности с другими результатами прогноза параметров магнитной бури (например, времени начала бури и ее ожидаемой интенсивности) по данным о состоянии межпланетного и околоземного космического пространства.

### 5.2. Зависимость от солнечной активности

Аналогичный анализ был выполнен и для зависимости  $N(>30)/N$  от солнечной активности. Чтобы избавиться от влияния интенсивности бури, анализировалась зависимость  $N(q)$ ,  $N(m)$ , и  $N(\text{tot})$  от  $F10.7$  внутри достаточно узких интервалов  $Dst$ .

Результаты для обеих станций приведены в табл. 2. Эта таблица по своему формату несколько отличается от табл. 1. Поскольку при анализе зависимости  $N(>30)/N$  от солнечной активности в большинстве интервалов  $Dst$  статистически значимая зависимость от  $F10.7$  наблюдалась для всего интервала  $F10.7$ , мы приводим в таблице величины  $R^2$  именно для нее. Величины  $P$  в табл. 2, как и ранее, показывают количество точек в рассматриваемом интервале  $Dst$ .

Для ст. Slough (левая половина табл. 2) удалось проанализировать все интервалы  $Dst$ . Для ст. Juliusruh в интервалы  $Dst = -(110-129)$  и  $< -130$  нТл попадает менее 10 точек, поэтому построить надежные зависимости  $N(>30)/N$  от  $F10.7$  не представлялось возможным.

Как видно из табл. 2, во всех случаях кроме двух (Juliusruh,  $N(m)$ ,  $Dst = -(30-49)$  и  $-(70-89)$  нТл) для всех точек в данном интервале  $Dst$  получаются значимые зависимости  $N(>30)/N$  от солнечной активности – величины  $N(>30)/N$  падают с ростом  $F10.7$ . Примеры наиболее хорошо выраженной зависимости для обеих станций приведены на рис. 12.

Как и в случае анализа зависимости  $N(>30)/N$  от интенсивности бури в предыдущем параграфе, при анализе зависимости от солнечной активности встречались случаи, когда одна, или 2–3 точки выпадали из общей зависимости и резко уменьшали величину  $R^2$  при формальном анализе всех точек.

Например, для Slough для  $Dst = -(50-69)$  нТл первые 8 точек (для  $F10.7 < 160$ ) демонстрируют хорошо выраженную зависимость от  $F10.7$  с достаточно высокими величинами  $R^2$ . Точки при

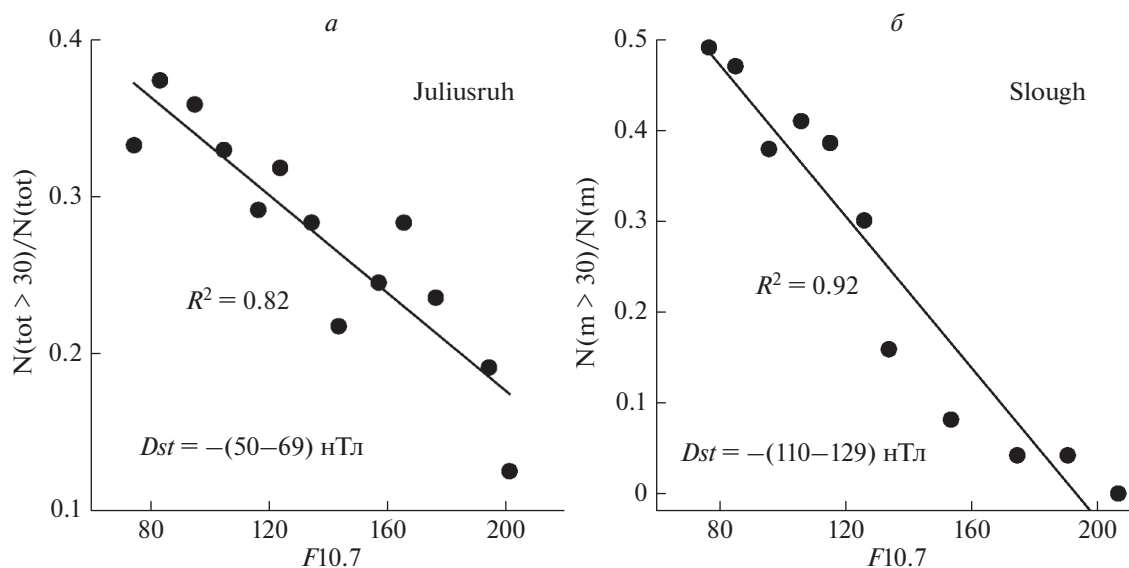


Рис. 12. Зависимость от  $F10.7$  величин  $N(\text{tot} > 30)/N(\text{tot})$  для  $Dst = -(50-69) \text{ нТл}$  (а) и  $N(m > 30)/N(m)$  для  $Dst = -(110-130) \text{ нТл}$  (б) (ст. Slough).

высокой солнечной активности ( $F10.7 > 160$ ) резко выпадают из этой зависимости, что и приводит к значительно меньшим величинам  $R^2$  при анализе всех точек, приведенных в табл. 2.

Похожая картина наблюдается и для ст. Juliusruh. Зависимость  $N(q > 30)/N(q)$  от  $F10.7$  для  $Dst = -(50-60) \text{ нТл}$  достаточно хорошо выражена ( $R^2 = 0.73$ ) для  $F10.7 < 160$ , тогда как точки для  $F10.7 > 160$  демонстрируют большой разброс, что, естественно приводит к более низким величинам  $R^2$  при анализе всех точек.

Для бурь с  $Dst > -100 \text{ нТл}$  падение  $N(>30)/N$  наблюдается почти всегда. Анализ бурь с большими отрицательными величинами  $Dst$  в большинстве случаев затруднен, поскольку сильные бури встречаются реже и статистическая обеспеченность данных становится низкой. Тем не менее, те случаи, когда данных для всего рассматриваемого интервала  $Dst$  было достаточно (например, Juliusruh для  $F10.7 = 65-79$ ), дают также хорошо выраженное падение  $N(>30)/N$  с ростом солнечной активности в этом интервале  $Dst$ .

Таким образом, в данном параграфе получены два совершенно определенных результата: отношение  $N(>30)/N$  растет с ростом интенсивности бури, но падает с ростом солнечной активности. Эти результаты важны, на наш взгляд, в двух отношениях. Во-первых, они дополняют картину поведения отклонений  $foF2$  от спокойных условий в предбуревые дни (предвестников), которая сложилась в результате серии предыдущих работ авторов. Во-вторых, они будут дополнительным важным экспериментальным фактом при постро-

ении в дальнейшем физической картины всего явления.

## 6. РОЛЬ РАЗЛИЧНЫХ ПРЕДБУРЕВЫХ ДНЕЙ

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 посвящен данный параграф. Более подробный анализ проблемы можно найти в работе Данилова и Константиновой [2022г].

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. 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 ч в зависимости от указанного момента.

### 6.1. Количество событий

В параграфе 3 было показано, 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. Рассмотрим теперь зависимость числа событий отдельно для каждого из 4 дней.

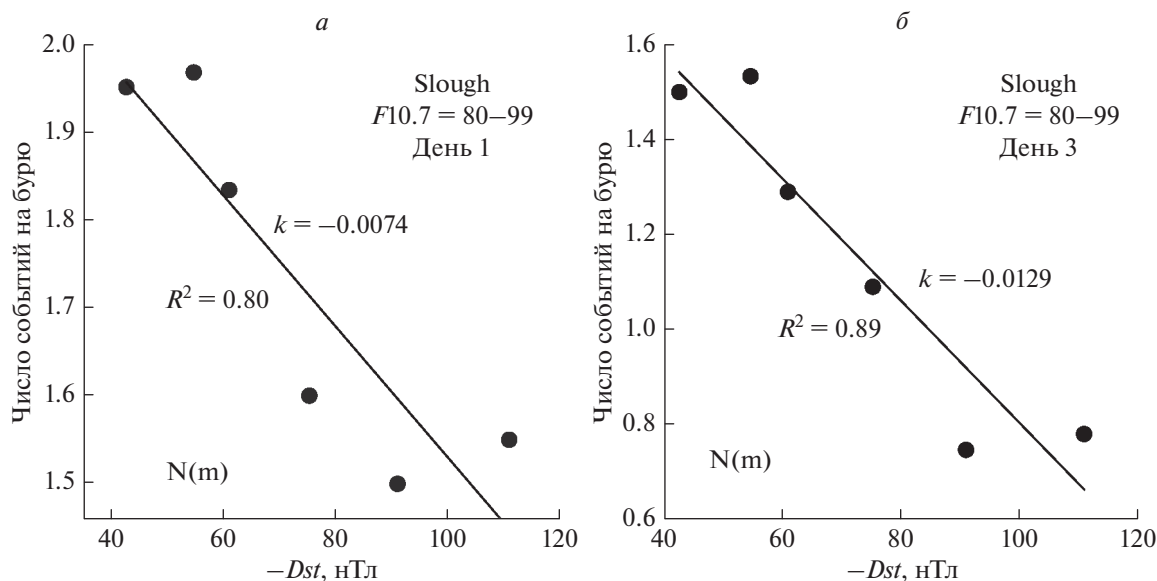


Рис. 13. Примеры хорошо выраженных зависимостей  $N(q)$  и  $N(m)$  от интенсивности бури для ст. Slough.

Зависимость интенсивности событий будет кратко рассмотрена в следующем подразделе.

Как и в предыдущих параграфах, чтобы избежать при анализе зависимости от  $Dst$  влияния зависимости от солнечной активности, мы анализировали зависимость от  $Dst$  в разные дни 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.

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 рис. 13 и 14.

В некоторых случаях нет падения  $N$  с увеличением амплитуды отрицательного значения  $Dst$  по всем точкам, но есть хорошо выраженное падение для нескольких точек (не менее 4). Мы интерпретируем такие случаи следующим образом. В некоторые интервалы  $Dst$  попадали бури со случайными отклонениями величин  $foF2$ , не связанными 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. Искомой зависимости  $N$  от  $Dst$  совсем не наблюдается в 13 случаях (27%). Мы объясняем это теми же случайными отклонениями.

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  $R^2$ . Чтобы величина  $S$  была выше 90%, 95% и 99% при 4 точках, величина  $L$  должна быть больше 8.5, 18.5 и 99 соответственно. Подобные величины  $L$  для 10 точек и трех указанных значений  $S$  должны быть выше 3.5, 5.3 и 11.3.

Полученная по  $F$ -тесту Фишера величина  $S$  для всех зависимостей, приведенных на рисунках 13 и 14, выше 95%, а для большинства — выше 99%.

Мы подробно рассмотрели величину наклона аппроксимирующей линии  $k_2$  на графиках зависимости  $N$  от  $Dst$  (см. параграф 4). Она характеризует скорость падения величин  $N$  с ростом абсолютного значения отрицательной величины  $Dst$ .

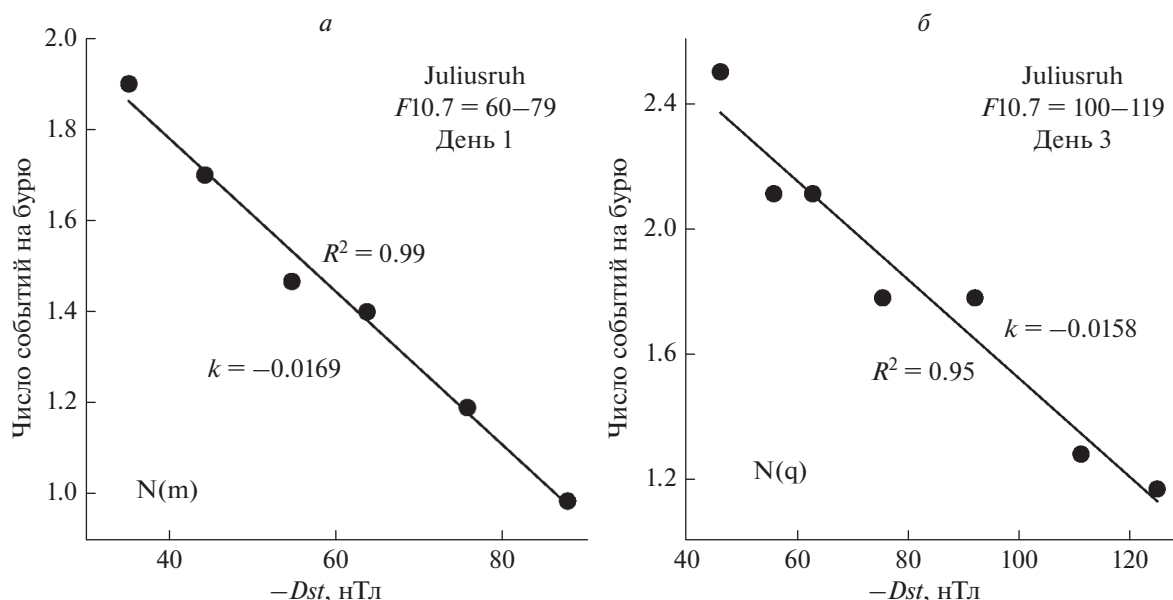


Рис. 14. Примеры хорошо выраженных зависимостей  $N(q)$  и  $N(m)$  от интенсивности бури для ст. Juliusruh.

Представляет интерес вопрос о том, с одинаковой ли скоростью происходит это падение в разные дни.

Оказалось, что 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.

Перейдем теперь к вопросу о том, есть ли систематическая зависимость  $N(q)$  и  $N(m)$  от номера дня перед бурей. Мы посчитали величины  $N$  для фиксированного значения  $Dst = -80$  нТл с помощью полученной в каждом случае аппроксимации. Результаты расчетов приведены в табл. 3. День 0 в среднем по определению в два раза 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 пра-

вильного сравнения с другими днями мы приводим в табл. 3 для дня 0 удвоенные величины  $N$ .

Таблица 3 показывает, что есть тенденция падения числа как  $q$ -, так и  $m$ -событий ото дня 0 ко дню 3. Эта тенденция видна также и в суммарных величинах  $N(q + m)$  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 физики явления картиной: чем ближе к моменту начала бури (день 0) тем число событий (предвестников) должно быть больше.

Таким образом, анализ зависимости количества возмущений  $foF2$  в предбуревые дни от интенсивности бури с разделением величин  $N$  по дням подтверждает результаты аналогичного анализа, проведенного без разделения данных по дням [Константинова, Данилов, 2020, 2021; Данилов, Константинова 2021, 2022в]. Видна тенденция изменения скорости падения  $N$  (т.е. величины  $k_2$ ) с ростом отрицательного значения  $Dst$  по мере удаления от момента начала бури SC. По-

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

	Slough		Juliusruh		Slough	Juliusruh	Среднее по двум ст.		
	$N(q)$	$N(m)$	$N(q)$	$N(m)$	$N(q + m)$		$N(q)$	$N(m)$	$N(q + m)$
День 0	—	1.78	2.68	1.74	1.78	2.22	2.68	1.76	2.00
День 1	1.48	1.53	1.76	1.18	1.50	1.47	1.62	1.36	1.48
День 2	1.32	1.25	1.56	1.13	1.28	1.34	1.44	1.27	1.31
День 3	1.17	1.07	1.77	1.09	1.43	1.10	1.47	1.08	1.26

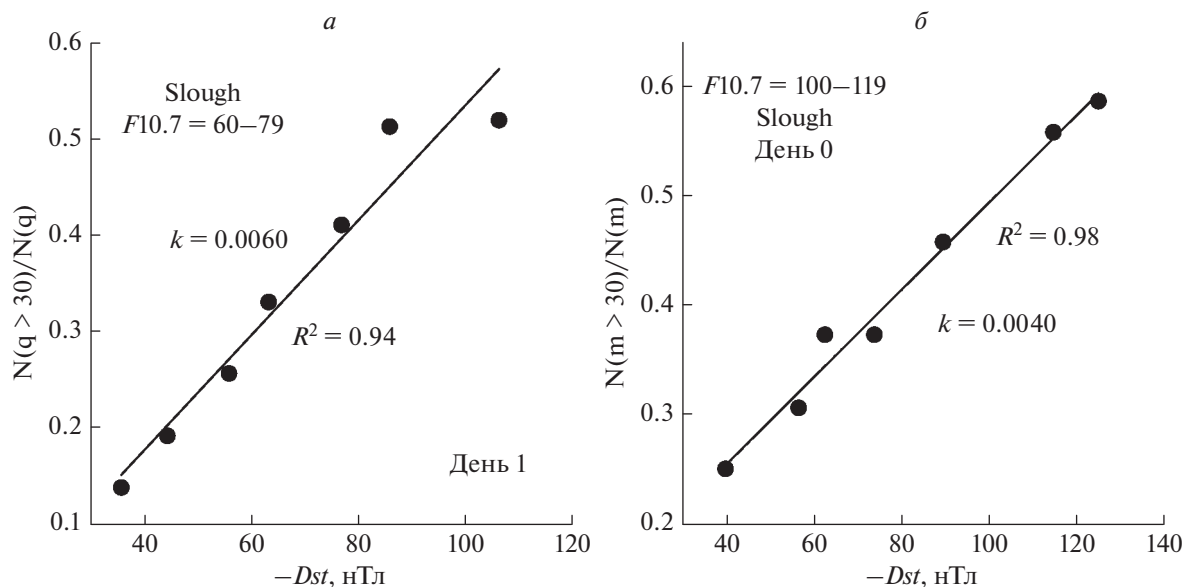


Рис. 15. Примеры хорошо выраженных зависимостей  $N(q > 30)/N(q)$  и  $N(m > 30)/N(m)$  от интенсивности бури для ст. Slough.

лучено 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.

### 6.2. Интенсивность событий

В подразделе 5.1 был рассмотрен вопрос о зависимости интенсивности событий (предвестников) от интенсивности предстоящей магнитной бури. При этом, как и во всех предыдущих работах авторов, рассматривалось суммарное количество событий за все 4 дня. В этом подразделе мы рассмотрим вопрос о зависимости интенсивности событий от индекса  $Dst$  отдельно для всех четырех дней.

Как и выше, 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.

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 подразделе. 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.

Были рассмотрены 48 ситуаций (4 дня, 2 параметра, 3 интервала  $F10.7$  и 2 станции) и получено, что характерный 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 рис. 15 и 16.

Как и при анализе данных в предыдущем подразделе, в некоторых случаях при использовании всех точек на графике искомой зависимости не наблюдается. Нет роста  $N(>30)/N$  с увеличением отрицательных значений  $Dst$  по всем точкам, но есть хорошо выраженный рост для 4 точек. Так же, как и при анализе данных в предыдущем параграфе, мы объясняем такие случаи тем, что 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. Искомой зависимости  $N(>30)/N$  от  $Dst$  совсем не наблюдается в 10 случаях (21%). Мы объясняем это теми же случайными отклонениями, описанными выше.

Так же 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

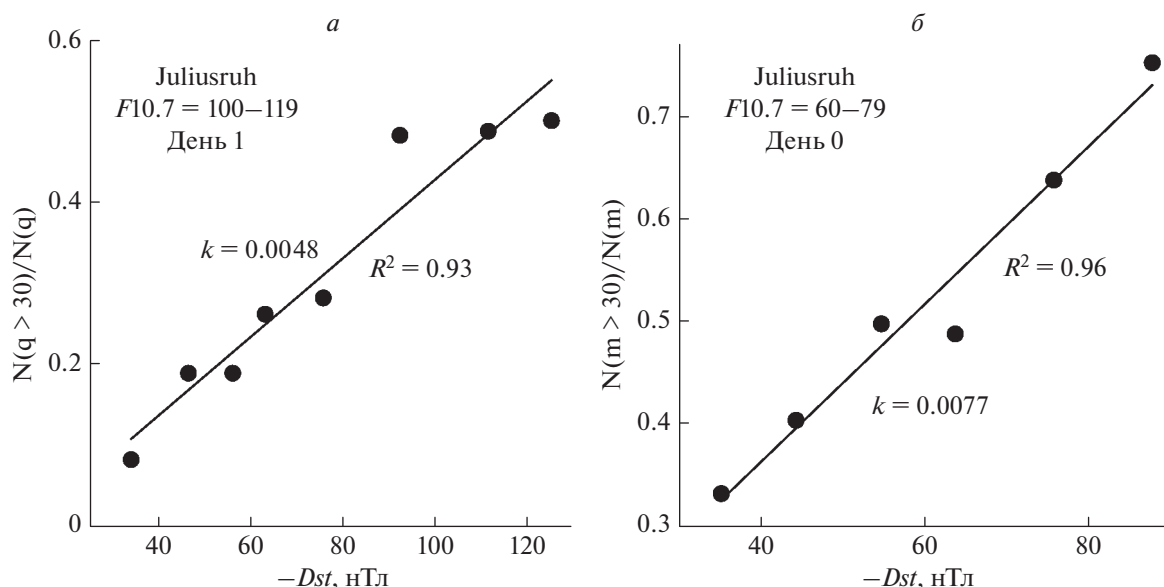


Рис. 16. Примеры хорошо выраженных зависимостей  $N(q > 30)/N(q)$  и  $N(m > 30)/N(m)$  от интенсивности бури для ст. Juliusruh

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. Тем не менее, тот факт, что в ряде случаев, как это видно из рисунков 15 и 16, наблюдался очень хорошо выраженный и статистически значимый рост как  $N(q > 30)/N(q)$ , так и  $N(m > 30)/N(m)$  с усилением бури (увеличением отрицательной величины  $Dst$ ), позволяет с уверенностью утверждать, что указанный рост реально существует. Случайные отклонения могут нарушить зависимость, но не могут привести к таковой со статистической значимостью 99% 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.

Мы анализировали величину наклона аппроксимирующей линии  $k3$ . Она характеризует скорость нарастания отношения  $N(>30)/N$  с ростом абсолютного значения отрицательной величины  $Dst$ . Сравнение аппроксимирующих линий для разных дней для ст. Slough приведено на рис. 17 для  $N(q > 30)/N(q)$  (а) и  $N(m > 30)/N(m)$  (б). Видно, что наклоны линий близки как внутри одного рисунка (исключение составляет день 2 на рис. 17а), так и между двумя рисунками.

В отличие от результатов предыдущего параграфа, нам не удалось обнаружить систематической зависимости величины  $k3$  от номера дня. Для  $F10.7 = 100-119$  величина  $k3$  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 маг-

Таблица 4. Величины  $N(>30)/N$  для  $Dst = -80$  нТл в разные дни

	Slough		Juliusruh		Juliusruh	Slough		Juliusruh	
	q	m	q	m	q	q	m	q	m
День 0	—	—	0.71	0.67	0.56	0.41	0.40	0.40	0.39
День 1	0.41	0.43	—	0.57	0.47	0.32	0.29	0.32	0.26
День 2	0.51	0.45	0.48	—	0.41	0.23	0.17	0.48	0.19
День 3	0.26	0.34	0.32	—	0.28	0.19	0.16	—	—

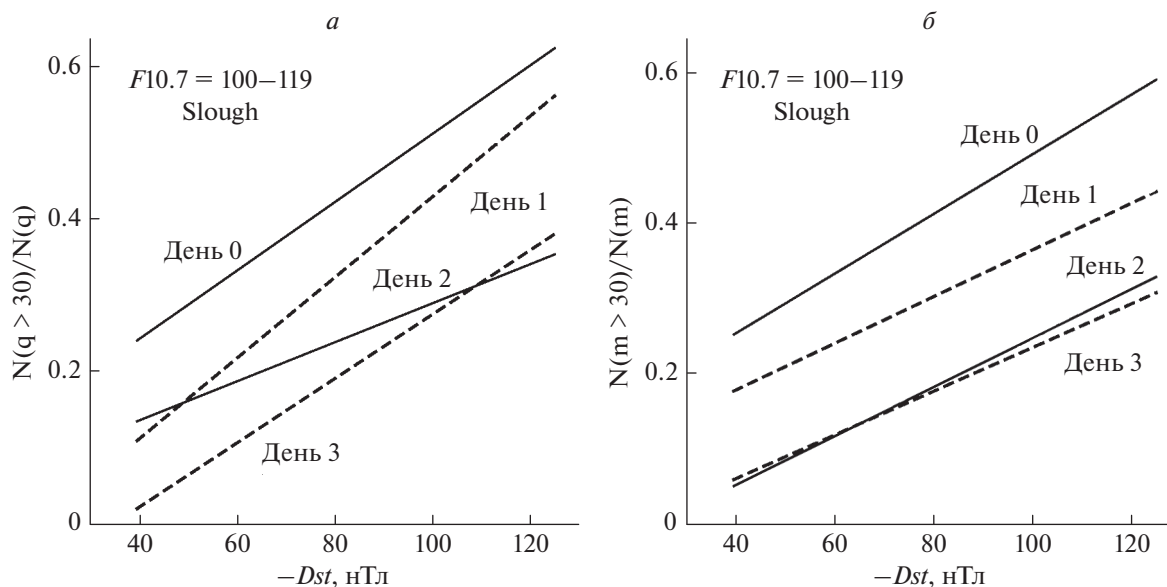


Рис. 17. Аппроксимации зависимости  $N(q > 30)/N(q)$  (а) и  $N(m > 30)/N(m)$  (б) от интенсивности бури в разные дни.

нитной бури, а не случайные отклонения  $foF2$  (например, Q-возмущения, см. Данилов [2022]).

Еще один факт привлекает внимание на рис. 17. Амплитуда увеличения как  $N(q > 30)/N(q)$ , так и  $N(m > 30)/N(m)$  при переходе от  $Dst = -40$  нТл (слабые бури) к  $Dst = -120$  нТл (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. 17б). Это означает, что дни, более далекие от начала бури, более чувствительны к интенсивности бури, чем день 0.

Представляет большой интерес вопрос о том, зависит ли интенсивность предвестников (т.е. величина  $N(>30)/N$ ) от номера предбуревоего дня. Для ситуаций, для которых удалось построить статистически значимые зависимости  $N(>30)/N$  от интенсивности бури, 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 табл. 4.

Как и в случае аналогичных расчетов в предыдущем подразделе (см. табл. 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 анализировались случайные отклонения  $foF2$ .

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Одной из целей данной работы была попытка разделить эффекты зависимости количества отклонений  $foF2$  (предположительно предвестников) от трех параметров: солнечной активности, интенсивности предстоящей бури и сезона. Для этого анализ зависимости от одного параметра (например, солнечной активности в параграфе 2) проводился для узких интервалов другого параметра (в данном случае  $Dst$ -индекса, характеризующего интенсивность бури). При этом, когда имелось достаточное количество данных в выбранном интервале  $F10.7$  или  $Dst$ , проводилось разделение анализируемых бурь по сезонам.

Результаты работы показывают, что попытка оказалась успешной (см. параграфы 2 и 3). В подавляющем большинстве случаев наблюдается зависимость (падение) величин  $N$  от  $F10.7$  и  $Dst$ , которая была получена ранее при анализе совокупности всего массива данных без указанного разделения (см. [Константинова и Данилов, 2020, 2021]). Подтверждается и эффект сезонной зависимости — при рассмотрении бурь одного сезона (зимы или равноденствия) зависимость становится лучше выраженной и более значимой статистически.

Анализ поведения интенсивности событий (параграф 4) показала, что имеется хорошо выраженная тенденция увеличения доли анализируе-



мых событий (отклонений  $foF2$ ) с большими амплитудами ( $A \geq 30\%$ ) в общем количестве событий при переходе от более слабых бурь к более сильным. Для бурь с  $Dst > -100$  нТл такая зависимость наблюдается почти всегда.

Таким образом, получено два совершенно определенных вывода: отношение  $N(>30)/N$  растет с ростом интенсивности бури, но падает с ростом солнечной активности. Первый вывод представляется вполне ожидаемым с физической точки зрения. Если анализируемые нами отклонения  $foF2$  действительно являются предвестниками предстоящей магнитной бури, то их интенсивности, естественно, должна быть выше для более сильных бурь.

Второй вывод не так очевиден. Вероятно, падение  $N(>30)/N$  связано с тем же эффектом, который приводит к падению общего количества предвестников с ростом  $F10.7$  (см. Данилов [2022]). Представляется, что в рамках концепции предвестников подобное падение может быть объяснено путем простого предположения. Хорошо известно, что критическая частота  $foF2$  сильно зависит от солнечной активности — она минимальна при низкой активности и максимальна при высокой. Если абсолютная величина возмущений  $foF2$ , которые являются “предчувствием” магнитной бури, зависит главным образом от интенсивности предстоящей бури, очевидно, что эти возмущения будут лучше заметны (т.е. иметь большие амплитуды в процентах) на фоне низких спокойных величин  $foF2$  (т.е. в период низкой солнечной активности), чем на фоне высоких величин в период высокой активности. Это объяснение представляется как простым, так и достаточно наглядным. И оно “льет воду” на концепцию предвестников.

Анализ зависимости количества возмущений  $foF2$  ( $N(q)$  и  $N(m)$ ) 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, Данилов, 2020, 2021; Данилов, Константинова, 2021, 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 [Данилов, Константинова, 2022в]. Указанная интенсивность растет с усилением бури (т.е. с ростом отрицательного значения

$Dst$ ): чем сильнее буря, тем больше величины  $N(>30)/N$  при заданном  $F10.7$ .

Скорость увеличения интенсивности возмущений  $foF2$ , т.е. роста  $N(>30)/N$  с ростом интенсивности бури (величина  $k3$ ) 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 описанные в данной статье результаты дальнейшего детального исследования поведения отклонений  $foF2$  (событий) в дни, предшествующие магнитной буре, подтвердили выводы, полученные ранее, и позволили получить ряд новых данных, которые хорошо укладываются в картину поведения указанных событий как предвестников предстоящего геомагнитного возмущения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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 магнит-

- ными 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. 2022в.
- Данилов А.Д., Константинова А.В. Детальный анализ поведения критической частоты слоя  $F2$  перед магнитными бурями. 9. Зависимость от интенсивности бури для различных предбуревых дней // Гелиогеофизические исследования. Вып. 34. С. 13–25. 2022г.
- Константинова А.В., Данилов А.Д. Ионосферные предвестники геомагнитных бурь. 2. Анализ данных ст. Slough // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 60. № 3. С. 329–336. 2020.
- Константинова А.В., Данилов А.Д. Ионосферные предвестники геомагнитных бурь. 3. Анализ данных ст. Juliusruh // Геомагнетизм и аэрномия. 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 аэрномия. Т. 56. № 6. С. 772–780. 2016.
- 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. № 12. P. 4066–4077. 2021.