

УДК 550.388.2

#### ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ. ВЫПУСК 33, 12 – 23, 2022

 Поступила в редакцию
 18.01.2022 г.

 Опубликована
 05.04.2022 г.

# ДЕТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ СЛОЯ F2 ПЕРЕД МАГНИТНЫМИ БУРЯМИ. 7. РАЗДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТОВ ИНТЕНСИВНОСТИ БУРИ И СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ (СТ. SLOUGH)

# А. Д Данилов<sup>1</sup>, А. В. Константинова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова, Москва, Россия

Выполнен детальный анализ зависимости количества событий (отклонений критической частоты foF2 по измерениям на ст. Slough в предбуревые дни от спокойных геомагнитных условий) 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. При этом при наличии достаточного количества данных рассматриваются по отдельности зависимости для зимних и равноденственных условий. Получено, что для подавляющего большинства ситуаций наблюдаются зависимости (уменьшение) количества событий и от Dst и от F10.7, полученные в предыдущих публикациях данной серии при рассмотрении всего массива бурь целиком. Приводится сравнение с результатами аналогичного исследования для ст. Juliusruh, опубликованного в предыдущей работе авторов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ГЕОМАГНИТНАЯ БУРЯ, ИОНОСФЕРНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ, ИОНОСФЕРНЫЙ СЛОЙ F2.

DOI 10.5425/2304-7380\_2022\_33\_12

https://elibrary.ru/fiobjy

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

Во многих исследованиях отмечался тот факт, что в течение 2-3 дней перед магнитными бурями наблюдаются возмущения критической частоты слоя F2 ионосферы – отклонения от спокойных условий. Обзор указанных исследований и подробное обсуждение проблемы можно найти в работах авторов [Danilov and Konstantinova, 2019; Данилов и Константинова, 2019]. Авторами был выполнен детальный анализ поведения критической частоты foF2 в течение трех дней, предшествующих магнитной буре, по наблюдениям методом вертикального зондирования на станции Slough (Chilton) [Константинова и Данилов, 2020]. Аналогичный анализ по наблюдениям на станции Juliusruh был опубликован Константиновой и Даниловым [2021]. 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.

Электронная почта авторов для переписки:

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



Адрес редакции журнала «Гелиогеофизические исследования»:

ФГБУ «ИПГ» 129128; Россия, Москва ул. Ростокинская, 9. e-mail: vestnik@ipg.geospace.ru В первых пяти работах данной серии [Данилов и Константинова 2020a, б; 2021 a, б, в] были приведены результаты детального исследования каждой из указанных выше пяти зависимостей по данным обеих станции. Мы использовали один и тот же метод анализа: сравнивали поведение *foF2* в течение трех предбуревых дней с двумя версиями спокойных условий: по фоновой модели, используемой в прогностической программе SIMP [Михайлов и Лещинская, 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 указанной публикации [Константинова и Данилов, 2020].

В предыдущей работе серии [Данилов и Константинова, 2022] мы предприняли попытку разделения наиболее сильных зависимостей количества предвестников – от солнечной активности и интенсивности магнитной бури по данным ст. Juliusruh. В данной статье аналогичный анализ проводится по данным ст. Slough, и приводится сравнение результатов, полученных по двум станциям. Кроме того, проводится сравнение количественных характеристик скорости изменения N (N(q), N(m) и N(tot)) ростом солнечной активности и интенсивности бури.

# 2. ЗАВИСИМОСТЬ ОТ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

В указанных выше работах авторов зависимости от интенсивности бури (*Dst min*) 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, с разными величинами *Dst* и разными значениями  $\Delta T$  и LT SO. Понятно, что желательно попытаться найти зависимость от F10.7, «очищенную» от других зависимостей. По очевидным причинам исключить влияние  $\Delta T$  и LT SO трудно. Но можно попытаться «очистить» зависимость от F10.7 от влияния зависимостей от сезона и *Dst*.

Такая попытка была предпринята в предыдущей работе [Данилов и Константинова, 2022] по данным ст. Juliusruh. В данной статье приводится аналогичный анализ для ст. Slough и проводится сравнение результатов для двух станций. Подчеркнем, что построение двух параграфов (2 и 3) данной статьи и форма изложения результатов в значительной мере аналогичны этим характеристикам в предыдущей статье. Этим мы пытаемся проиллюстрировать наглядно схожесть полученных для двух станций результатов.

Рассматривалась зависимость N(q), N(m) и N(tot) от F10.7 для интервалов Dstmin = -(30-49) нТл, -(50-69) нТл, -(70-89) нТл, -(90-109) нТл, -(110-129) нТл, u < -130 нТл. Результаты для ст. Slough приведены в таблице 1.

В этой таблице для каждого из указанных интервалов *Dst* приведены: интервал F10.7, в котором наблюдается зависимость от F10.7, количество точек в этом интервале *P* и величина коэффициента определенности по F-тесту Фишера  $R^2$ , которая позволяет определить статистическую значимость *S* полученной зависимости. При этом рассматриваются данные за все сезоны и данные отдельно только для зимних месяцев и только для месяцев равноденствия (см. ниже). В данных за все сезоны указывается зависимость для всех имеющихся значений F10.7 (если она имеется) и (если имеется) лучше выраженная зависимость для какого-то интервала F10.7. Более подробный анализ таблицы 1 приводится ниже.

Прежде всего необходимо отметить, что во многих случаях при анализе всех сезонов наблюдается хорошо выраженная зависимость рассматриваемых величин N от F10.7 для всех имеющихся в данном интервале *Dst* точек. Примеры таких зависимостей приведены на рис. 1.

На рисунке 1 обращает на себя внимание тот факт, что разброс точек существенно больше, чем на графиках соответствующих зависимостей в работе Данилова и Константиновой (2021б). Это вполне понятно. В указанной работе каждая точка на рисунке представляла собой усредненное значение многих (2-3 десятка) точек в соответствующем интервале F10.7 шириной в 10 единиц. На рисунке 1 точки приведены для каждой бури без усреднения. Поскольку каждой буре соответствуют свои значения  $\Delta T$ , LT SO и *Dst* внутри рассматриваемого интервала *Dst*, разброс точек неизбежен. Важно, что рис. 1 дает ту же зависимость N(q) и N(tot), что была получена в работе Данилова и Константиновой (2021б), т. е. падение величин N с ростом *F*10.7.

	Все сезоны					Зима	Pa	Равноденствие					
	Зависимость для			Зависимость для									
	всех значений			выбранных интервалов			3						
	F10.7	Ν	$R^2$	F10.7	Ν	$R^2$	F10.7	N	$R^2$	F10.7	Ν	$R^2$	
<i>Dst</i> = -30-49 нТл													
N(q)	60-220	45	0.19	130-220	16	0.83	60-210	14	0.46				
N(m)	60-220	45	0.19	140-220	15	0.67	60-210	14	0.46				
N(tot)	60-220	45	0.22	130-220	16	0.78	60-210	33	0.52				
Dst = -50-69 нТл													
N(q)	60-210	71	0.20				60-210	20	0.64				
N(m)	60-160	71	0.07				60-210	20	0.11	60-210	40	0.16	
N(tot)	60-210	71	0.14				60-210	20	0.48	60-210	40	0.13	
						Dst = -	70-89 нТл						
N(q)	60-210	55	0.58				60-210	12	0.31	60-210	32	0.61	
N(m)	60-210	55	0.21				60-210	12	0.16	60-210	32	0.06	
N(tot)	60-210	55	0.41				60-210	12	0.33	60-210	32	0.35	
						Dst = -9	0-109 нТл						
N(q)	60-200	26	0.17	80-200	20	0.70							
N(m)	60-200	27	0.41										
N(tot)	60-200	26	0.36										
Dst = -110-129 нТл													
N(q)	60-210	26	0.14										
N(m)	60-210	26	0.32										
N(tot)	70-210	26	0.26										
<i>Dst</i> > -130 нТл													
N(q)	60-220	26	0.12	60-140	10	0.84							
N(m)	60-220	26	0.34	60-140	10	0.29							
N(tot)	60-220	26	0.32	60-140	10	0.86							

Таблица 1. Зависимость N(q), N(m) и N(tot) от F10.7 для ст. Slough

При имеющемся количестве точек и величинах  $R^2$  зависимости на рис. 1 обладают высокой статистической значимостью больше 0.99. По причинам, описанным выше, в других случаях разброс точек сильнее и соответствующие величины  $R^2$  существенно меньше. Но даже для самых маленьких величин  $R^2 = 0.07, 0.12, и 0.14$  при анализе всех сезонов и всех имеющихся точек (см. таблицу 1) величина S за счет большого количества точек составляет около 0.99.

Как видно в таблице 1, при рассмотрении всех сезонов выраженная зависимость для всех точек получается не всегда. Это связано с тем, что в какой-то интервал F10.7 попадают точки (бури), которые сильно отклоняются от общей зависимости. Причины таких отклонений указывались выше, но не исключено также и попадание в предбуревые дни отклонений *foF2*, не связанных с предстоящей бурей (возможно, так называемые Q-возмущения, см. работу Данилова [2022]).

Даже когда выраженной зависимости соответствующей величины N от F10.7 не удается получить для всех точек, часто эта зависимость существует и статистически значима для ограниченного интервала F10.7. Наиболее яркий пример – интервал Dst = -(30-49) нТл (см. таблицу 1). Для всех точек F10.7 = 60-210 величины  $R^2$  невелики (очевидно, из-за того, что в область малых величин F10.7 попали «плохие» бури). Однако, для F10.7 > 130 и для N(q) и для N(m), и для N(tot) зависимость с высокими величинами  $R^2 = 67-83$  и, соответственно, высокой статистической значимостью (S >> 0.99) хорошо выражена.

Поскольку существует зависимость величин N от сезона, подробно рассмотренная Даниловым и Константиновой [2020а], мы постарались, насколько это возможно, избавиться от этой зависимости. С этой целью мы рассмотрели зависимости только для зимних месяцев (декабрь, январь, февраль) и для месяцев равноденствия (март, апрель, май, сентябрь, октябрь, ноябрь). Естественно, количество точек в рассматриваемом интервале *Dst* при этом уменьшалось. Для половины рассмотренных интервалов *Dst* количество точек оказывалось слишком мало для анализа зависимостей для отдельных

<sup>14</sup> 

сезонов, но для интервалов Dst = -(30-49) нТл, -(50-69) нТл и -(70-89) нТл такую зависимость получить удалось. Приведенные в таблице 1 результаты показывают, 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 приведен на рис. 2. Видно, что при использовании всех точек (рис. 2а) наблюдается заметный разброс точек и величина  $R^2$  невелика. Однако, за счет большого числа точек (74) обеспечивается высокое значение статистической значимости *S*. Количество бурь для зимних месяцев значительно меньше (19), но зависимость выражена гораздо лучше и величина  $R^2 = 0.69$ , что обеспечивает высокую статистическую значимость (S > 0.99).



Рис. 1. Примеры зависимости N(q) и N(m) от F10.7 для разных интервалов Dst



Рис. 2. Изменение характера зависимости N(q) от F10.7 при переходе ото всех точек в заданном интервале Dst (а) к только зимним точкам (б)



Рис. 3. Примеры зависимости N(q) (a) и N(tot) (б) от F10.7 при использовании только равноденственных бурь

Примеры зависимостей N(q) и N(tot) при анализе в интервале Dst = -(70-89) нТл бурь только для равноденственных месяцев приведен на рис. 3. Здесь также видно, что зависимость хорошо выражена и величина  $R^2$  достаточно велика, что обеспечивает высокую величину S>99%.

Как видно из таблицы 1, для сильных бурь (Dst < -90 нТл) количество точек в каждом интервале Dst меньше, чем для слабых и умеренных бурь (-30 > Dst > -90 нТл). Это вполне понятно – более сильные бури бывают реже, чем слабые и умеренные. Однако, обращает на себя внимание тот факт, что при использовании всех точек интервала Dst зависимость от F10.7 для сильных бурь выражена лучше (величины  $R^2$  больше), чем для слабых и умеренных бурь. Этот же эффект отмечался нами и для данных станции Juliusruh [Данилов и Константинова, 2022].

Подводя итоги данного параграфа, можно отметить, что анализ зависимости количества событий (предвестников) от солнечной активности показывает, что эта зависимость (уменьшение N с ростом F10.7) так же, как и в случае ст. Juliusruh, в целом хорошо выражена и статистически значима при анализе данных в узком интервале величин *Dst* (чтобы по возможности 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 подтверждение существования сезонного хода, проанализированного для всего массива бурь в работе Данилова и Константиновой [2020а]. При анализе бурь в заданном интервале Dst, относящихся к одному конкретному сезону, зависимость от F10.7 становится лучше выраженной (см. рис. 2 и 3).

### 3. ЗАВИСИМОСТЬ ОТ ИНТЕНСИВНОСТИ БУРИ

Зависимость параметров предбуревых отклонений foF2 от интенсивности предстоящей магнитной бури представляет первостепенный интерес, поскольку она является одним из трех основных аргументов в пользу того, что эти отклонения являются предвестниками этой бури (см. Данилов [2022]). В предыдущей работе этой серии [Данилов и Константинова, 2022] был проведен анализ зависимости количества событий от интенсивности бури (минимального значения индекса *Dst*) для фиксированных интервалов индекса *F*10.7.

Препарирование зависимости от солнечной активности, аналогичное описанному выше для Juliusruh, было проведено в данной работе для Slough. Сводка результатов приведена в табл. 2.

Таблица 2 построена так же, как таблица 1. Рассматриваются следующие интервалы F10.7: 65-79, 80-99, 100-119, 120-139, 140-159, 160-179 и 180-207. Первые три столбца слева дают количество точек и величины коэффициента определенности  $R^2$  для зависимости по всем точкам в данном интервале F10.7 при анализе данных за все сезоны. Если при этом есть лучше выраженная зависимость для ограниченного интервала F10.7, ее характеристики даются в следующих трех столбцах. Для тех

16

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

интервалов F10.7, для которых точек достаточно, чтобы отдельно рассмотреть зависимости для зимы и равноденствия, результаты приводятся в правой части таблицы.

Таблица 2 показывает, что для интервала F10.7 = 65-79 при рассмотрении совместно данных за все сезоны значимую зависимость от *Dst* удается получить только для N(q). Видимо, в интервал Dst = -(85-115) нТл попадают «ошибочные» m-точки, которые нарушают зависимость для N(m) и, следовательно, для N(tot) при использовании всех точек в данном интервале F10.7. Интересно, что точно такой же эффект наблюдается и в соответствующей таблице в предыдущей работе для ст. Juliusruh. Поскольку трудно предположить совершенно одинаковые ошибки при обработке данных для двух станций, представляется вероятным, что в указанный интервал *Dst* попадает буря (более вероятно – несколько бурь) для которых поведение m-событий с изменением *F*10.7 отличается от обычного.

При переходе к анализу только зимних точек в этом интервале F10.7, и для N(m) и для N(tot) получаются зависимости с величинами  $R^2$ , обеспечивающими высокую статистическую значимость S = 95-99%.

Для интервала F10.7 = 80-99 ситуация очень наглядна. При анализе всех точек в этом интервале разброс точек достаточно сильный, и величины  $R^2$  для N(m) и N(tot) невелики. Но и они обеспечивают статистически значимую зависимость N от *Dst* (*S*~95%). Для N(q) при анализе всех точек значимой зависимости получить не удается. При переходе же к только зимним величина  $R^2$  заметно возрастает, и величина *S* приближается к 99%.

Bc	е сезоны	Зима	Равноденствие					
Зависимость для	Зависимость для							
всех значений	выбранных интервалов							
	выоранных интервалов							
<i>Dst</i> , нТл N <i>R</i> <sup>2</sup>	<i>Dst</i> , нТл N <i>R</i> <sup>2</sup>	<i>Dst</i> , нТл N <i>R</i> <sup>2</sup>	$Dst$ , нТл $P R^2$					
<i>F</i> 10.7 = 65-79								
N(q) -(30-120) 40 0.17		-(30-130) 10 0.52						
N(m)		-(30-320) 12 0.28						
N(tot)	-(30-120) 40 0.07	-(30-160) 11 0.56						
	F10.7	=80-99						
N(q)	-(57-95) 17 0.33	-(55-120) 8 0.42						
N(m) -(30-130) 50 0.05	-(56-130) 17 0.32	-(55-120) 7 0.86	-(55-110) 17 0.71					
N(tot) -(30-100) 48 0.06	-(57-130) 18 0.33	-(55-120) 7 0.76						
	F10.7 =	100-119						
N(q) -(30-130) 31 0.24			-(30-170) 15 0.60					
N(m)	-(90-130) 17 0.76		-(50-170) 12 0.68					
N(tot)	-(90-130) 10 0.82		-(30-170) 15 0.32					
	F10.7 =	120-139						
N(g) -(30-150) 31 0.13			-(30-80) 11 0.89					
N(m)	-(110-150) 7 0.80		-(30-80) 11 0.61					
N(tot)	-(80-150) 12 0.38		-(30-80) 11 0.50					
F10 7 =140-159								
N(a) -(30-220) 18 0.20								
N(m)								
N(tot) -(30-240) = 18 - 0.13								
F10.7 =160-179								
N(a)	-(70-240) 15 0.19							
N(m) -(30-240) 27 0.34	, , 10 0.10							
N(tot) -(30-240) = 27 - 0.24								
F10.7 = 180.207								
N(a)	-(50-100) 35 0.24	-(60-100) 6 0.68	-(40-110) 12 0.61					
N(m) -(30-250) 44 0.16	-(50-110) 25 0.77	-(60-100) 6 0.84	-(40-200) 19 0.69					
N(tot)	-(50-110) 25 0.73	-(60-100) 6 0.77	-(40-200) 19 0.34					

Таблица 2. Зависимость N(q), N(m) и N(tot) от Dst для ст. Slough

Для интервалов F10.7 = 100-119 и 120-139 анализ точек только для равноденствия приводит к хорошо выраженным зависимостям N(q), N(m) и N(tot) с величинами  $R^2$  от 0.32 до 0.89 (см. таблицу 1), тогда как при анализе точек для всех сезонов зависимости не удается получить вовсе, за исключением N(q). Пример «улучшения» зависимости N(q) для интервала F10.7 = 100-119 при переходе от анализа всех точек к анализу только точек для равноденствия приведен на рис. 4.

Для интервалов F10.7 = 140-159 и 160-179 точек недостаточно, чтобы строить зависимости отдельно по сезонам. Но при анализе всех точек каждого из этих интервалов наблюдается уменьшение величин N при увеличении отрицательной амплитуды *Dst* с достаточно высокой статистической значимостью либо для всех точек, либо для достаточно широкого интервала *Dst* =-70-240 нТл.



Рис. 4. Зависимость N(q) от *Dst* в интервале *F*10.7=100-119 для всех сезонов (а) и только для равноденствия (б)



Рис. 5. Пример зависимости N(m) от *Dst* для *F*10.7= 180-207 при анализе точек для всех сезонов (а) и только для равноденствия (б)

Для интервала F10.7 = 180-207 вновь имеется достаточно точек для анализа отдельно зимних и равноденственных условий. Как видно из таблицы 2, и зимой и в равноденствие есть интервалы *Dst*, для которых зависимости N выражены хорошо с высокими величинами  $R^2$ . Соответствующий пример перехода от анализа всех сезонов к анализу только равноденственных точек представлен на рис. 5. Правая часть этого рисунка интересна также в том отношении, что она показывает, как формируются анализируемые нами зависимости. Из рис. 56 видно, что для 19 слабых, умеренных и сильных бурь (*Dst* > -200 нTл) наблюдается достаточно хорошо выраженная зависимость с  $R^2 = 0.69$ . В то же время, две точки для выдающихся бурь (*Dst* < -200 нTл) выпадают из общей зависимости, поэтому величина  $R^2$  при формальном анализе всех бурь оказывается значительно ниже ( $R^2 = 0.33$ ).

Таким образом, резюмируя результаты этого параграфа, основанного на данных ст. Slough, можно утверждать следующее. Анализ зависимости величин N от интенсивности предстоящей магнитной бури для узких фиксированных интервалов *F*10.7 подтверждает уменьшение N(q), N(m) и N(tot) с увеличением абсолютной величины отрицательного *Dst*, как это и было получено в предыдущих публикациях (Константинова и Данилов 2021; Данилов и Константинова 2021а).

В тех случаях, где в выбранном интервале F10.7 имеется достаточное количество точек, чтобы рассмотреть отдельно зависимость в различные сезоны, зависимость N от *Dst* становится лучше выраженной и более значимой статистически (см. рис. 4). Это подтверждает существование сезонной зависимости количества предвестников, подробно проанализированной в работе Данилова и Константиновой [2020а].

В целом результаты данного параграфа полностью согласуются с результатами соответствующего параграфа в недавней публикации Данилова и Константиновой [2022], где аналогичный анализ проводился для данных ст. Juliusruh.

# 4. НАКЛОН ЗАВИСИМОСТЕЙ

В двух предыдущих параграфах, равно как и в соответствующих параграфах предыдущей статьи [Данилов и Константинова, 2022], зависимость величин N от F10.7 и Dst анализировалась в плане ее существования и статистической обоснованности. Основной целью было обнаружить 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  $\Delta$ F10.7 и  $\Delta$ Dst) и, наоборот, для разных станций в одинаковых условиях. Очевидно, что величины k будут необходимы в дальнейшем при попытках аналитического описания зависимости числа предвестников от внешних параметров.

Результаты определения наклона k1 зависимости N(q) и N(m) от F10.7 для тех же интервалов *Dst*, что и в таблице 1, приведены в таблице 3. Видно, 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 удалось получить значимой величины k1 и принято k1 = 0. 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.

Для полноты картины мы приводим в таблице 3 также величины k для интервалов F10.7, в которых были получены хорошо выраженные зависимости с высокими величинами  $R^2$  (см. таблицу 1 и соответствующую таблицу в статье Данилова и Константиновой [2022]). Естественно, для таких случаев величины k1 значительно выше.

Представляет интерес вопрос о том, как меняются приведенные в таблице 3 величины наклона k1 для зависимости N от F10.7 для различных интервалов *Dst*. Рисунок 6 дает наглядный ответ на этот вопрос. Хорошо видно, что для обеих станций получен четко выраженный рост абсолютной величины k1 с ростом *Dst*. Величины *Dst* на горизонтальных осях рис. 6 представляет собой середину интервала *Dst* в таблице 3, которому соответствует данная точка (значение k1).

	Juli	usruh		Slough							
N(	q)	N(1	n)	N(	q)	N(m)					
F10	F10 -k1		-k1	F10	-k1	F10	-k1				
Dst = -30-49 нТл											
все	0.010	все	0.013	все	0.015	все	0.013				
120-203	0.041			125-213	0.059	140-213	0.059				
70-115	0.085	70-115	0.087								
Dst = -50-69 нТл											
все	0.022	все	0.013	все	0.013	все	0.009				
120-204	0.046					70-260	0.027				
	Dst = -70-89 нТл										
все	0.010	все	0	все	0.029	все	0.008				
120-201	0.075	165-201	0.110								
	Dst = -90-109 нТл										
все	0.041	все	0.015	все	0.016	все	0.022				
				80-190	0.034						
Dst = -110-129 нТл											
все	0.053	все	0	все	0.010	BCe	0.019				
200	0.000	185-205	0.012	110-207	0.033	200	0.010				
 Dst > -130 нТл											
BLE 90.120	0.031	все 140.207	0.011	72 145	0.000	все 72 1 4 2	0.011				
80-130	0.180	140-207	0.032	/3-145	0.041	73-143	0.029				

Таблица 3. Величины наклона k1 для зависимости N(q) и N(m) от F10.7



Рис. 6. Зависимость от *Dst* величины наклона *k*1 зависимости N(q) для ст. Juliusruh (a) и N(m) для ст. Slough (б) от солнечной активности

© Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова



Рис. 7. Зависимость от F10.7 величины наклона k1 зависимости N(tot) для ст. Juliusruh (a) и N(tot) для ст. Slough (б) от *Dst* индекса

### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, рис. 6 показывает, что при увеличении интенсивности бурь падение N(q) и N(m) с ростом солнечной активности становится более резким (отрицательная величина *k* увеличивается).

Очевидно, что представляет не меньший интерес и поведение наклона  $k^2$  зависимости N от интенсивности бури при изменении солнечной активности. Чтобы не перегружать статью, мы не приводим для величины  $k^2$  таблицы, аналогичной таблице 3. Отметим просто, что для обеих станций зависимость N от интенсивности бури (индекса *Dst*) рассматривалась для тех же интервалов  $\Delta F10.7$ , для которых анализировались зависимости N от *Dst* в таблице 2.

Результаты этого рассмотрения приведены на рис. 7 для N(tot) на обеих станциях. Как и в случае рис. 6, 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 7 содержит еще один важный и неожиданный результат. Наклон j аппроксимирующих линий на рис. 7 оказывается поразительно близким для обеих станций: 6.46  $10^{-5}$  для Slough и 9.58  $10^{-5}$  для Juliusruh. Учитывая неоднократно отмечавшийся факт, что величины foF2 для двух станций представляют собой совершенно независимые массивы данных, а также длинную цепочку расчетов, которая приводит к оценке величин j, близость этих величин на рис 7a и 76 представляется еще одним подтверждением того, что мы действительно анализируем реальные события (отклонения foF2), связанные с предстоящей бурей, а не случайные отклонения foF2, например Q-возмущения (см. Данилов [2022]).

Основная цель данной работы – повторить для данных ст. Slough анализ, выполненный в предыдущей работе авторов [Данилов и Константинова, 2022] для данных ст. Juliusruh. А именно, попытаться 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 нам представляются успешными. Как следует из таблиц 1 и 2, в подавляющем большинстве случаев для ст. Slough наблюдаются зависимости (падение) величин N от F10.7 и Dst, которые были получены ранее при анализе совокупности всего массива данных без указанного разделения (см. предыдущие работы данной серии). Подтверждается и эффект сезонной зависимости – при рассмотрении бурь одного сезона (зимы, или равноденствия) зависимость становится лучше выраженной и более значимой статистически. Все эти результаты близки к

результатам, полученным в ходе совершенно такого же рассмотрения по данным ст. Juliusruh в предыдущей работе серии [Данилов и Константинова, 2022].

Следует подчеркнуть еще раз важный момент. В указанной серии работ [Данилов и Константинова 2020a, б; 2021a, б, в] каждая точка на рисунке представляла собой усреднение данных в некотором интервале. Например, при построении зависимости N от *Dst* каждая точка на рисунке представляла собой усреднение по всем бурям в интервале *Dst* шириной в 10 нТл. При этом автоматически усреднялась зависимость N от других параметров, а именно: солнечной активности, сезона, местного времени начала бури LT SO и времени  $\Delta T$  от события (предвестника) до SO. Именно поэтому большинство зависимостей в предыдущих работах серии имеет более «гладкий» характер. На всех рисунках, представленных в данной работе, такого усреднения не происходит, поскольку каждая точка соответствует одной конкретной буре. Естественно поэтому, что разброс точек становится более сильным именно за счет влияния других параметров. Исключить влияние  $\Delta T$  и LT SO невозможно. Но удалось, в тех случаях, когда имелось достаточное количество точек в данном интервале  $\Delta Dst$  или *F*10.7, показать, что выбор точек для фиксированного сезона дает более выраженную зависимость с более высокой статистической значимостью (см. рис. 2, 3 и 4).

Во всех исследованиях зависимости количества событий (предвестников) от солнечной активности и сезона, опубликованных в предыдущих работах авторов и представленных в параграфах 2 и 3 данной стать, анализировались сам характер зависимости (уменьшение N с увеличением Dst и F10.7) и ее статистическая значимость (с помощью коэффициента определенности  $R^2$ ). В четвертом параграфе данной работы мы предприняли попытку проанализировать количественные характеристики полученных зависимостей, а именно – наклон линий, аппроксимирующих экспериментальные точки.

Результаты этого исследования оказались неожиданными и, как нам представляется, интересными. Получено, что при увеличении интенсивности бурь падение N(q) и N(m) с ростом солнечной активности становится более резким (отрицательная величина k1 увеличивается). В то же время, рост солнечной активности ведет к уменьшению скорости падения величин N с ростом интенсивности бури (увеличение максимальной отрицательной величины Dst). Иначе говоря, при более высокой солнечной активности количество предвестников уменьшается для сильных бурь медленнее, чем при низкой активности. Важно, что на рис. 6 результаты получились качественно одинаковыми для обеих станций. А на рис. 7 они почти совпали и количественно.

В заключение выскажем предположение, что получаемые аналитические аппроксимации зависимостей N от *Dst* и F10.7 могут помочь в дальнейшем при попытках как понять физическую картину явления, так и построить алгоритмы прогнозирования предстоящей бури на основании наблюдаемых отклонений *foF2* (предвестников) в предбуревые дни.

#### ЛИТЕРАТУРА

- *Данилов А. Д.* Обсуждение проблемы ионосферных предвестников магнитных 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.
   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.

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

- 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. 2022.
- 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.
- Лещинская Т. Ю., Михайлов В. В. Модель SIMP-1: картирование месячных медиан foF2 по северному полушарию // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 56. № 6. С. 772–780. 2016.
- 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.

### DETAILED ANALYSIS OF THE BEHAVIOR OF THE F2-LAYER CRITICAL FREQUENCY PRIOR TO MAGNETIC STORMS. 7. SEPARATION OF THE EFFECTS OF STORM INTENSITY AND SOLAR ACTIVITY (SLOUGH STATION)

Danilov A. D., Konstantinova A. V.

A detailed analysis of the dependence of the number of events (deviations of the foF2 critical frequency on the prestorm days from quiet geomagnetic conditions) on the intensity of the coming storm and solar activity according to the measurements at Slough station is performed. In order to separate the effects of the dependence on different parameters, the dependence on solar activity is considered for narrow intervals of the *Dst* index that characterizes the storm intensity, whereas the dependence on the storm intensity is analyzed for narrow intervals of the *F*10.7 index that characterizes solar activity. At the same time, if there is sufficient amount of the data, the dependencies for the winter and equinox conditions are considered separately. For the vast majority of situations, the dependencies (decreases) of the number of events both on *Dst* and *F*10.7, obtained in the previous publications of this series at consideration of the entire massif of storms are obtained. The results of a comparison with the similar study for Juliusruh station published in the previous work of the authors are presented.

**Keywords**: Geomagnetic Storm, Ionospheric Disturbances, Ionospheric F2 Layer.