

УДК 550.388.2

## ИОНОСФЕРНЫЕ ПРЕДВЕСТНИКИ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ. 3. АНАЛИЗ ДАННЫХ ст. JULIUSRH

© 2021 г. А. В. Константинова<sup>1</sup>, \*, А. Д. Данилов<sup>1</sup>, \*\*<sup>1</sup>Институт прикладной геофизики им. Е.К. Федорова Роскомгидромета (ИПГ), г. Москва, Россия

\*e-mail: anna@tabulata.ru

\*\*e-mail: adanilov99@mail.ru

Поступила в редакцию 11.09.2020 г.

После доработки 26.10.2020 г.

Принята к публикации 28.01.2021 г.

На основании данных станции Juliusruh проведен анализ поведения критической частоты слоя  $F_2$ ,  $foF_2$ , в течение трех дней, предшествующих магнитной буре. Рассмотрены 272 бури за период с 1976 по 2010 гг. и найдено 2682 события (отклонения  $foF_2$  от спокойных условий). 2007 отклонений имели положительный знак и 675 – отрицательный. Получено, что указанные отклонения демонстрируют хорошо выраженную и статистически значимую зависимость от интенсивности магнитной бури (минимальная величина  $Dst$ -индекса), от уровня солнечной активности (индекс  $F_{10.7}$ ) и от сезона. Наибольшая вероятность появления указанных отклонений наблюдается за 4–12 и 22–23 ч до момента начала бури. Кроме того, появление указанных отклонений наиболее вероятно, когда момент начала бури приходится на 4, 7–8, 12–13 и 22 ч местного времени. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами по станции Slough, опубликованными авторами ранее, и позволяют считать, что найденные отклонения не являются случайными флуктуациями  $foF_2$  ( $Q$ -возмущения), но связаны с предстоящей магнитной бурей, т.е. являются ее предвестниками.

DOI: 10.31857/S0016794021030081

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Многие исследователи обращали внимание на то, что в течение двух-трех дней до начала магнитной бури наблюдаются существенные отклонения критической частоты слоя  $F_2$ ,  $foF_2$ , от ее значения в спокойных условиях. Этот вопрос подробно рассмотрен в первой работе данной серии [Данилов и Константинова, 2020]. Во второй работе серии [Константинова и Данилов, 2020] были подробно проанализированы возмущения  $foF_2$  для 254 бурь по данным ст. Slough. В данной работе выполнен аналогичный анализ для данных ст. Juliusruh и приведено сравнение результатов, полученных для двух станций.

### 2. ПРОЦЕДУРА АНАЛИЗА

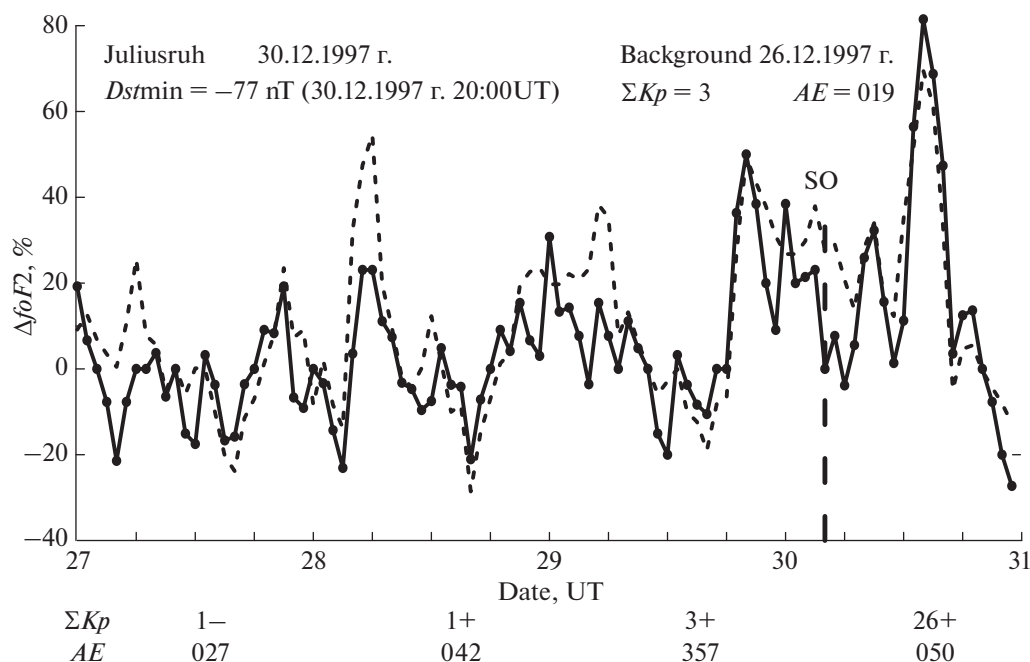
Метод исследования был тем же, что и при анализе данных Slough. Для каждой бури строились графики изменения величины  $\Delta foF_2$  со временем в течение трех дней, предшествовавших моменту начала магнитной бури SO. Рассматривались геомагнитные возмущения, при которых величина  $Dst$ -индекса была меньше  $-30$  nT. Момент начала геомагнитного возмущения выбирался по совокупности поведения  $Dst$ ,  $AE$  и  $\Sigma Kp$  магнитных индексов. В большинстве случаев он

совпадал с моментом SC, приводимым в некоторых бюллетенях магнитной активности (см., например, Geomagnetic Indices Bulletin, NGDC, Boulder, Colorado, USA).

Как и в большинстве подобных исследований, величина  $\Delta foF_2$  представляет собой разницу между величинами  $foF_2$ , наблюдаемыми в течение трех анализируемых дней, и в спокойных условиях. При этом по картам  $Dst$ -индекса проверялось, что анализируемые дни не попадают на восстановительную фазу предыдущего геомагнитного возмущения.

Как и в предыдущей работе, для нахождения  $\Delta foF_2$  мы использовали две опции спокойных условий: локальную модель  $foF_2$ , построенную для прогностической модели SIMP [Лещинская и Михайлов, 2016] и хорошо зарекомендовавшую себя в работе указанной прогностической модели, и ближайший к рассматриваемой буре спокойный день. На всех последующих рисунках и в тексте эти опции будут обозначаться буквами  $m$  и  $q$ .

Выбор спокойного дня представлял определенные трудности. Мы накладывали на этот выбор такие же ограничения, как и описанные выше ограничения на анализируемые предбуревые дни.



**Рис. 1.** Изменение  $\Delta foF2$  со временем в течение дня бури и трех предбуревых дней для бури 30 декабря 1997 г. (сплошная линия — m-события и штриховая линия — q-события).

Дополнительно мы следили, чтобы выбираемый спокойный день не приходился на предбуревую период или на восстановительную фазу другого магнитного возмущения. В большинстве случаев спокойный ход  $foF2$  в выбранный спокойный день и согласно локальной модели совпадали. Пример приведен на рис. 1 в работе Константиновой и Данилова [2020]. Но в некоторых случаях найти спокойный в геомагнитном отношении день в пределах двух недель от магнитной бури не удавалось. В этом случае мы ограничивались анализом только величин  $\Delta foF2$ , определенных с помощью локальной модели.

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

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

Мы проанализировали все 272 рисунка типа рис. 1 и рис. 2. На каждом рисунке мы определяли количество отклонений  $\Delta foF2$  и, в течение 30 ча-

сов до SO, также время  $\Delta T$  данного отклонения до SO. Мы ввели градацию отклонений:  $+(20-30)\%$ ,  $+(30-40)\%$ ,  $>+40\%$ ,  $-(20-30)\%$ ,  $-(30-40)\%$  и  $<-40\%$ . Детальный анализ этих отклонений планируется в дальнейшем, здесь мы ограничимся рассмотрением всех событий, m- и q-событий, а также положительных и отрицательных отклонений.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Мы рассмотрели зависимость количества интересных нас событий (отклонений  $\Delta foF2$ ) от нескольких параметров: сезон, солнечная активность, интенсивность магнитной бури, местное время начала бури SO и время от события до SO. Ниже приводятся результаты исследования для каждого из параметров.

#### 3.1. Зависимость от сезона

Прежде всего, мы проанализировали вероятность появления интересных нас событий в различные сезоны. Поскольку количество выбранных нами бурь, попавших в тот или другой месяц, могло быть различно, мы строили сезонную зависимость числа событий на одну бурю (делили найденное количество событий на количество бурь, проанализированных в данном месяце), т.е., фактически, вероятности появления события данного типа  $K$ . Результаты приведены на рис. 3. На этом и всех последующих рисунках

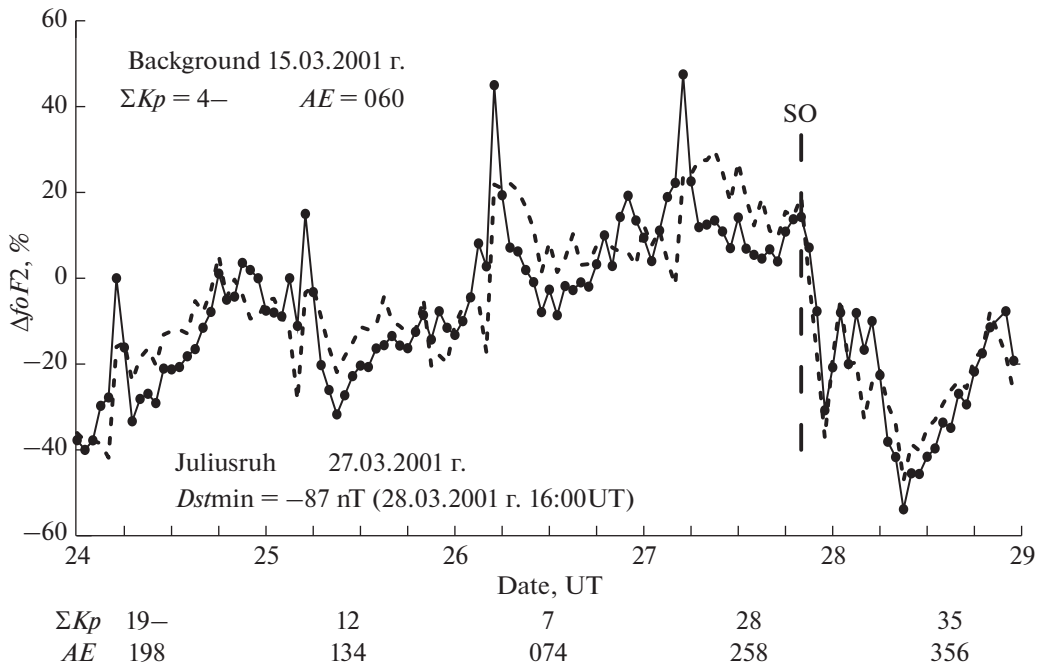


Рис. 2. Изменение  $\Delta foF2$  со временем в течение дня бури и трех предбуревых дней для бури 15 марта 2001 г. (сплошная линия – m-события и штриховая линия – q-события).

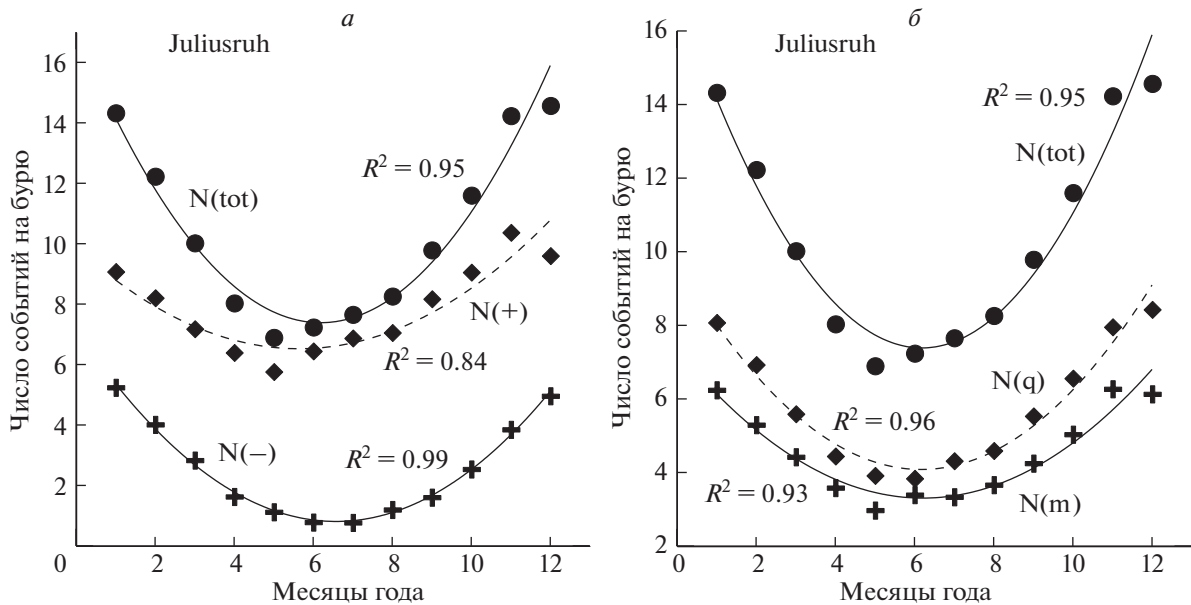


Рис. 3. Зависимость числа событий на бурю от месяца года для ст. Juliusruh.

приведены точки, полученные сглаживанием по трем исходным значениям.

На рисунке приведено изменение величины  $K$  в зависимости от месяца года для всех событий, а также для всех положительных и отрицательных отклонений (рис. 3а) и для всех m- и q-событий (рис. 3б). Видно, что для всех данных наблюдает-

ся хорошо выраженная и статистически значимая зависимость от сезона: величина  $K$  в зимний период существенно выше, чем в летний.

Этот вывод полностью согласуется с результатом анализа для ст. Slough [Константинова и Данилов, 2020]. Пример сравнения сезонного хода для m-событий по данным двух станций приве-

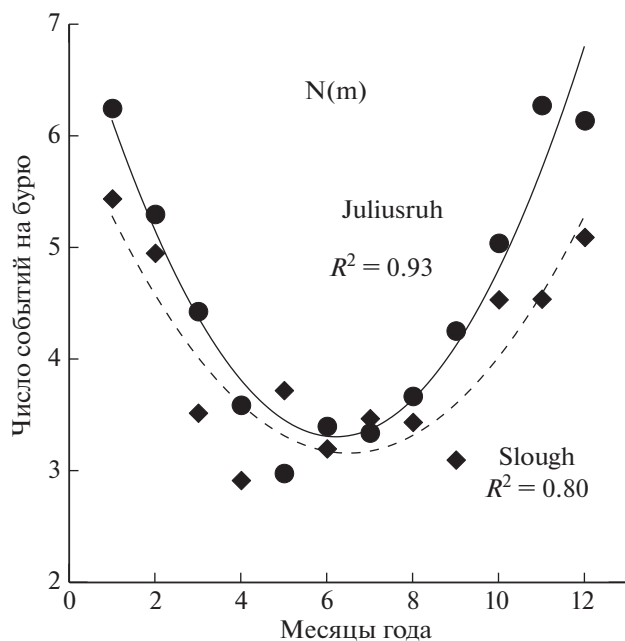


Рис. 4. Зависимость числа событий на одну бурю от месяца года для станций Juliusruh (кружки) и Slough (ромбы).

ден на рис. 4. Видно, что наблюдается хорошее согласие, как по характеру сезонного хода, так и по абсолютным величинам числа событий.

### 3.2. Зависимость от солнечной активности

Для анализа зависимости количества событий (отклонений  $\Delta foF2$ ) от солнечной активности мы

использовали сглаженный месячный индекс  $F10.7sm12$ . Так же, как и при анализе сезонной зависимости, мы анализировали число событий на одну бурю  $K$ . Результаты анализа представлены на рис. 5. Для оценки статистической значимости получаемых зависимостей мы использовали коэффициент определенности  $R^2$  согласно F-тесту Фишера, приведенный на этом и ряде следующих рисунков.

Рисунок 5а показывает, что и для всех событий, и для q-событий наблюдается хорошо выраженная зависимость  $K$  от  $F10.7$  (величины  $R^2$  равны, соответственно, 0.77 и 0.82). Для m-событий также эта зависимость видна, но по непонятным пока причинам статистическая значимость значительно меньше:  $R^2 = 0.27$ . Полученная зависимость и для всех событий, и для q-событий хорошо согласуется с результатами для ст. Slough. Пример приведен на рис. 5б. Таким образом, как и в нашей предыдущей публикации, мы получили, что количество отклонений  $foF2$  в предбуревые дни от спокойных значений уменьшается с ростом солнечной активности.

### 3.3. Зависимость от интенсивности магнитной бури

Для того, чтобы понять, как количество событий зависит от интенсивности предстоящей магнитной бури, мы сравнивали количество событий на одну бурю  $K$  с наименьшим значением  $Dst$ -индекса в каждой буре. Мы разбили весь диапазон изменения  $Dst \min$  на интервалы по 10 nT каждый

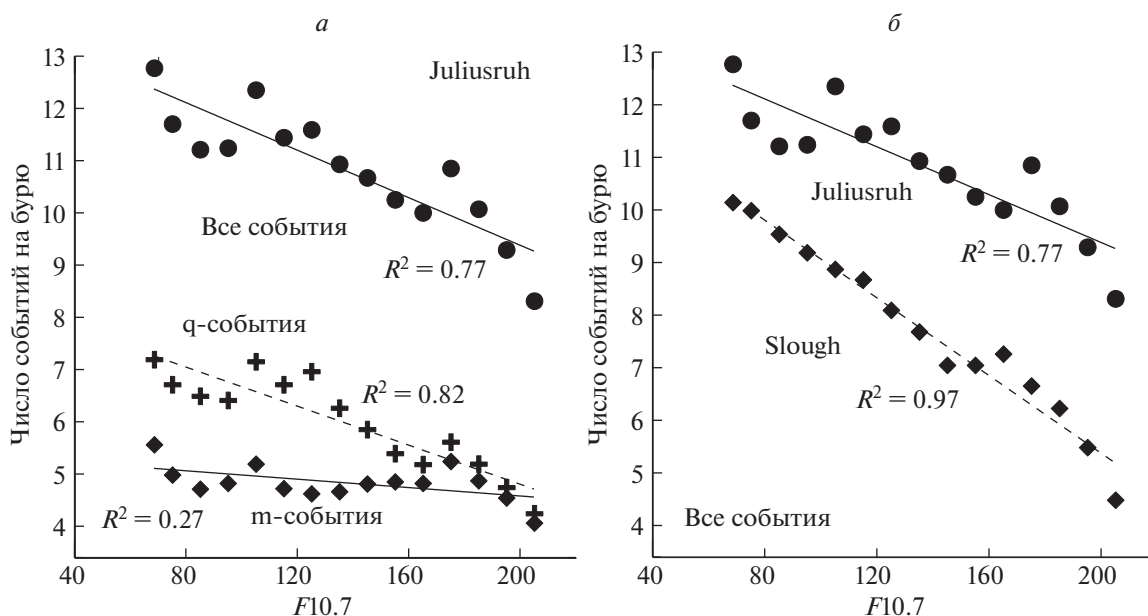


Рис. 5. Зависимость числа всех событий  $N$ , а также  $N(m)$  и  $N(q)$  от  $F10.7$  для ст. Juliusruh (а); и зависимость  $N$  от  $F10.7$  для станций Juliusruh и Slough (б).

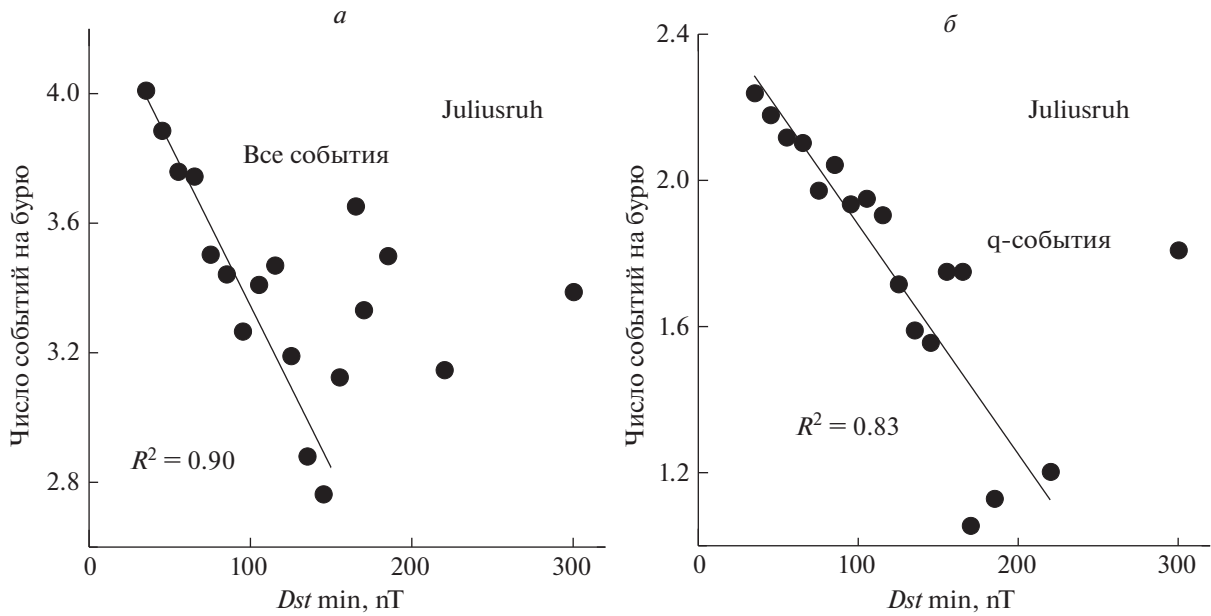


Рис. 6. Зависимость числа событий на одну бурю  $K$  от минимального значения  $Dst\ min$ .

и анализировали изменение величины  $K$ , взятой для каждого интервала.

На рисунке 6 приведена зависимость  $K$  от интенсивности предстоящей магнитной бури ( $Dst\ min$ ). Видно, что для всех событий (рис. 6а) эта зависимость хорошо выражена и статистически значима ( $R^2 = 0.90$ ) для  $Dst\ min \leq 150\ nT$ . Для сильных бурь ( $Dst\ min \geq 150\ nT$ ) эта зависимость нарушается и в правой части рис. 6а наблюдается разброс точек. Рисунок 6б показывает, что для q-событий достаточно хорошо выраженная ( $R^2 = 0.83$ ) зависимость  $K$  от  $Dst\ min$  наблюдается на всем интервале  $Dst\ min$  до 220 nT. Самая правая точка основана на данных о двух очень сильных бурях. Весьма вероятно, что процессы “подготовки” ионосферы к таким сильным бурям отличаются от таковых перед слабыми, умеренными и умеренно сильными бурями. Для m-событий картина напоминает таковую для всех событий. Выраженное уменьшение  $K$  с ростом  $Dst\ min$  наблюдается до 160 nT, при этом  $R^2 = 0.70$ .

Полученные результаты для ст. Juliusruh в целом согласуются с таковыми для ст. Slough. Для последней также было получено хорошо выраженное и статистически значимое ( $R^2 = 0.82$ ) падение  $K$  с  $Dst\ min$  до 250 nT. Сравнение скорости уменьшения  $K$  с ростом  $Dst\ min$  (наклона аппроксимирующей прямой  $j$ ) для всех событий показывает, что величины  $j$  для обеих станций близки: 0.010 (Juliusruh) и 0.014 (Slough).

Таким образом, полученные здесь результаты подтверждают вывод, полученный Константиновой и Даниловым [2020] о том, что количество со-

бытий (отклонений  $foF2$  от спокойных условий) максимально для слабых бурь и уменьшается к умеренным и умеренно сильным бурям. Этот вывод важен для подтверждения того факта, что мы действительно анализируем события, связанные с предстоящей магнитной бурей (предвестники), поскольку очевидно, что случайные отклонения  $foF2$  (скажем, Q-возмущения) не могут продемонстрировать значимую зависимость от интенсивности бури.

### 3.4. Зависимость от местного времени начала магнитной бури

Многими исследователями отмечалось (см. обзор Данилова и Константиновой [2019]), что реакция ионосферы как в буревые, так и в предбуревые дни различна для близких по характеру магнитных бурь, но начинающихся в разные моменты суток. Поэтому мы провели анализ величин  $K$  от местного времени начала бури (LT SO).

Результаты анализа приведены на рис. 7. Из рисунка 7а следует, что имеются преимущественные интервалы LT SO, для которых величина  $K$  (т.е. вероятность появления отклонений  $foF2$ ) выше, чем в соседних интервалах. Особенно хорошо выражен максимум  $K$  для LT SO = 22 ч. Видно также, что это вероятность высока для SO, происходящих в интервале 04:00–13:00 LT. В то же время, бури, которые начинаются в интервале 15:00–19:00 LT, обладают наименьшим количеством предбуревых отклонений  $foF2$ . Рисунок 7а показывает также, что эта закономерность распределения  $K$  по всему интервалу LT SO сохраняется и

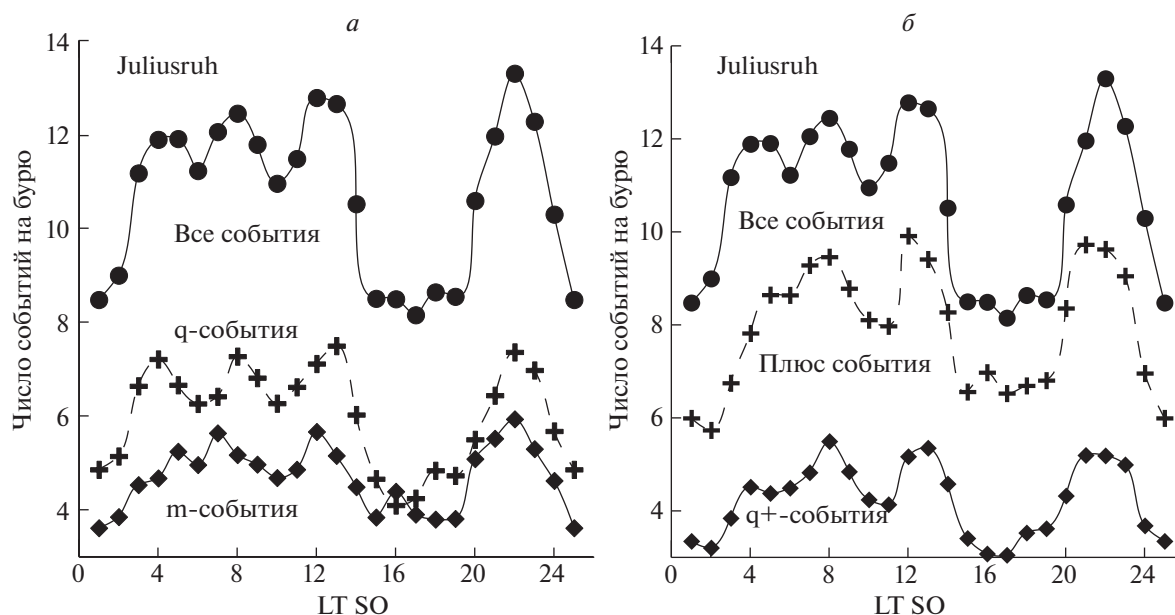


Рис. 7. Зависимость числа событий на одну бурю от местного времени начала бури SO.

при раздельном рассмотрении q- и m-событий. При этом вклад обоих типов событий в общее количество событий примерно одинаков.

Рисунок 7б показывает, что основной вклад в изменение числа всех событий вносят “положительные” события (положительные отклонения  $foF2$ ). Величины  $K$  для “отрицательных” событий (не показаны) малы, а их характер изменения с LT SO носит хаотичный характер. В то же время из рис. 7б следует, что q+-события демонстрируют такой же ход с LT SO, как и все события и “положительные” события. Полученный результат очень важен для нашего рассмотрения, поскольку сводка событий каждого типа представляет собой совершенно независимый банк данных, потому подобие зависимости от LT SO для разных типов событий подтверждает правильность получаемых выводов.

Этот вывод (также, как и вывод о зависимости  $K$  от  $Dst \min$ ) важен для подтверждения того факта, что мы действительно анализируем события, связанные с предстоящей магнитной бурей (предвестники), поскольку очевидно, что случайные отклонения  $foF2$  (скажем, Q-возмущения) не могут демонстрировать выраженную зависимость от времени начала предстоящей бури.

Сравнение аналогичных рисунков (m-события) для ст. Juliusruh и ст. Slough приводит к интересным результатам. Во-первых, как показывает рис. 8а, изменение  $K$  для обеих станций очень близко по характеру. В обоих случаях наблюдается пик  $K$  на 22:00–23:00 LT и интервал высоких  $K$  от 05:00–06:00 до 12:00–13:00 LT. Во-вторых, заметен небольшой сдвиг по горизонтальной оси

данных Slough относительно данных Juliusruh. Если сдвинуть данные Slough на один час вправо, то получится картина, представленная на рис. 8б. Видно, что при этом два пика (в 12:00 и 22:00 LT) полностью совпадают, а левый пик сдвинут только на один час.

Природа обнаруженного сдвига (если он реален) пока не понятна. Однако его наличие может оказаться важным при дальнейшем анализе процессов, приводящих к возникновению анализируемых событий (предвестников) до начала магнитной бури.

### 3.5. Зависимость от времени до начала магнитной бури

Для каждого события мы брали время от этого события до начала магнитной бури (SO)  $\Delta T$  в часах и строили зависимость количества событий от  $\Delta T$ . По очевидным причинам мы в данном случае (в отличие от величин  $K$ , проанализированных в четырех предыдущих случаях) оперировали числом событий  $N$  для каждой величины  $\Delta T$ . Результаты представлены на рис. 9.

На этом рисунке приводится изменение величины  $N$  с  $\Delta T$  для всех событий и для m (рис. 9а) и q (рис. 9б) событий. Из этих рисунков следует ряд выводов. Во-первых, видно, что имеется общая тенденция уменьшения  $N$  с увеличением  $\Delta T$ , если рассматривать все события. Во-вторых, видны хорошо выраженные пики  $N$  при определенных  $\Delta T$  (7, 13, 22 и 28 ч). В-третьих, ход  $N$  как для m-, так и для q-событий практически совпадает с таким ходом для всех событий (в обоих случаях ко-

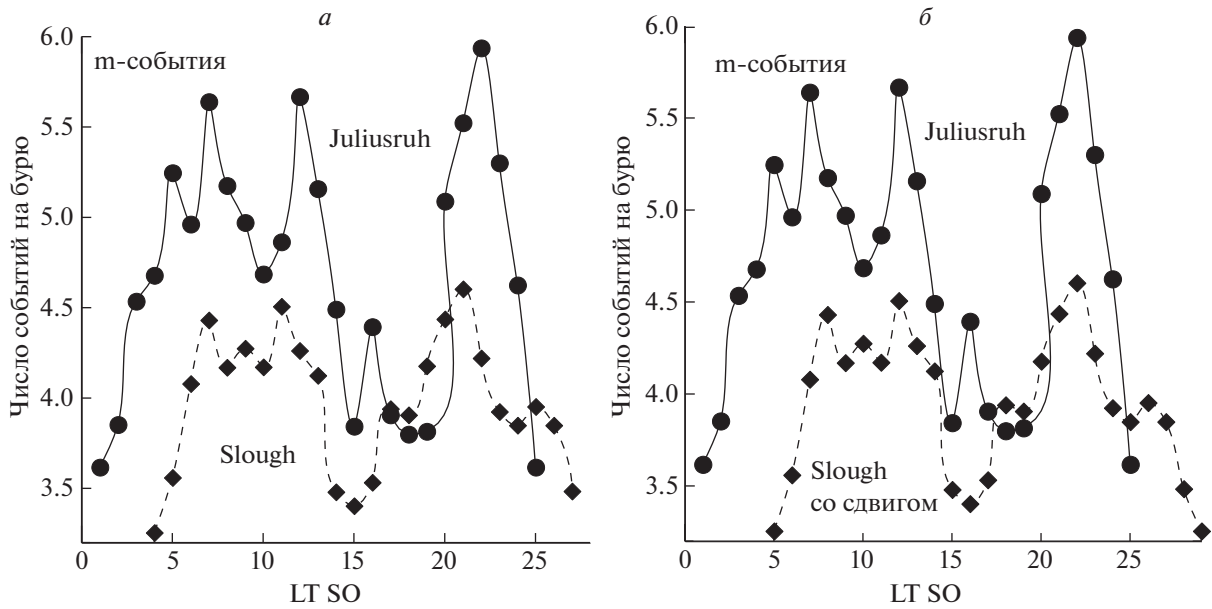


Рис. 8. Зависимость числа событий на одну бурю от местного времени начала бури SO для двух станций.

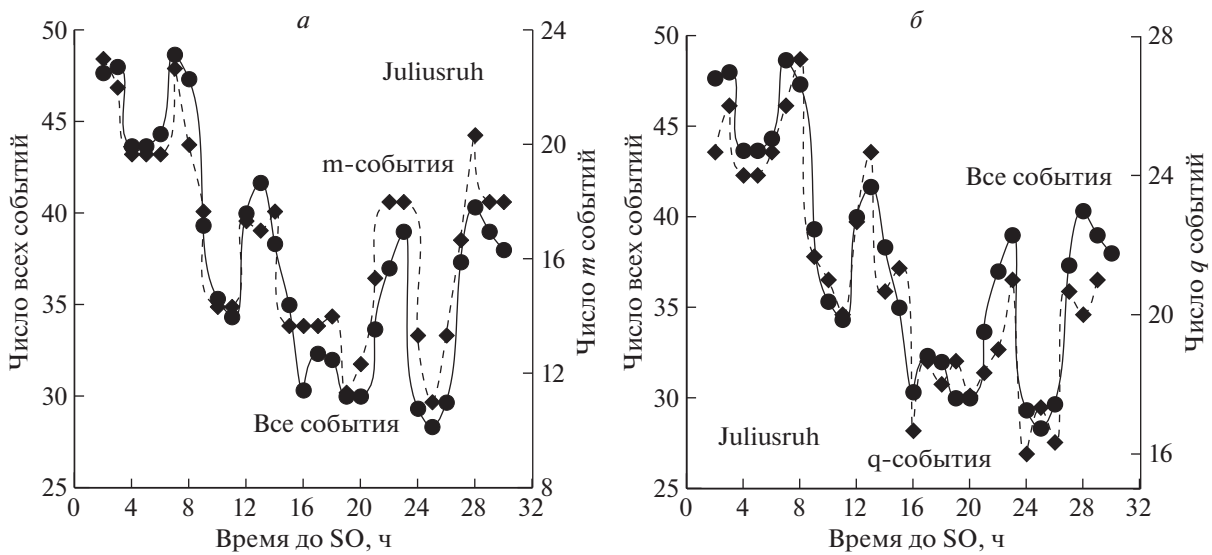


Рис. 9. Зависимость числа событий  $N$  от времени  $\Delta T$  от события до начала магнитной бури SO для ст. Juliusruh.

эффицент корреляции между двумя кривыми равен 0.95). Для большей наглядности сравнения для m- и q-событий выбран иной масштаб (правые оси на рисунках), чем для всех событий (левые оси).

На рисунке 10а приведено сравнение зависимостей  $N$  от  $\Delta T$ , полученных для ст. Juliusruh в данной работе и для ст. Slough в работе Константиновой и Данилова [2020]. Видно, что характер изменения  $N$  с  $\Delta T$  близок для обеих станций. Хорошо выражена общая тенденция уменьшения количества событий по мере удаления от SO. Видно также, что имеются увеличения  $N$  (пики на

кривых) при определенных значениях  $\Delta T$ . Как и в случае с зависимостью от LT SO, рассмотренной выше, наблюдается сдвиг кривых для двух станций. На рисунке 10б приведены те же данные, но со сдвигом кривой для Slough вправо на 2 ч. Как видно из этого рисунка, при введении сдвига получается гораздо лучшее согласие между двумя кривыми.

Указанный сдвиг на 2 ч происходит для данных ст. Slough в ту же сторону, что и сдвиг на 1 ч, обнаруженный в данных для зависимости от LT SO (см. выше). Природа сдвига пока непонятна. Но, как уже указывалось, это явление может ока-

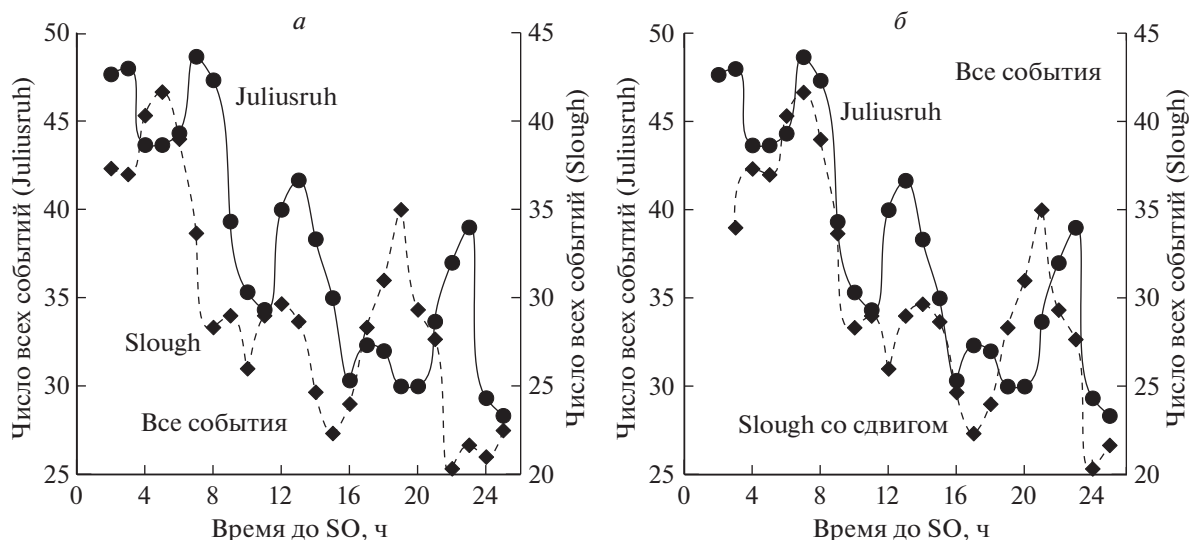


Рис. 10. Зависимость числа событий  $N$  от времени  $\Delta T$  от события до начала магнитной бури SO для двух станций.

заться важным для понимания физических процессов формирования рассматриваемых отклонений  $foF2$  (предвестников).

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эта работа продолжает серию работ, направленных на изучение явления возрастаний и падений критической частоты  $foF2$  перед началом магнитной бури. В первой работе серии [Данилов и Константинова, 2019] на основании анализа большого числа публикаций, посвященных поведению ионосферы перед магнитными возмущениями, были отмечены основные особенности этого явления, в частности преобладание положительных отклонений  $foF2$  от спокойных условий.

По нашему мнению, недостатком многих исследований предбуриевых эффектов в ионосфере было то, что не обращалось внимания на степень возмущенности самих анализируемых предбуриевых дней. В то же время, рассматривать отклонения  $foF2$  в эти дни как предвестники предстоящей бури можно только если эти дни являются спокойными в геомагнитном плане.

Во второй работе данной серии [Константинова и Данилов, 2020] мы приняли специальные меры, чтобы анализировать только спокойные в геомагнитном плане предбуриевые дни. На большом статистическом материале измерений на ст. Slough были подтверждены некоторые закономерности, опубликованные в других исследованиях, и получен ряд выводов о зависимости вероятности появления указанных отклонений от различных параметров (сезон, солнечная активность, интенсивность бури, местное время начала

бури и интервал времени до начала магнитной бури).

В данной работе аналогичный анализ был проведен для данных ст. Juliusruh. Мы использовали тот же метод анализа и получили результаты, которые оказались, на наш взгляд, в очень хорошем согласии с результатами для ст. Slough. Это согласие очень важно для всей проблемы, поскольку данные двух станций представляют собой два совершенно независимых банка данных. Полученные результаты, на наш взгляд, подтверждают концепцию ионосферных предвестников магнитных бурь, высказывавшуюся рядом авторов и нами в наших предыдущих работах.

Дальнейший анализ, по нашему мнению, должен быть направлен на дальнейшее изучение найденных закономерностей на основании большей статистики и на выявление возможных различий между результатами для разных станций. Все это в дальнейшем должно привести к пониманию закономерностей появления ионосферных предвестников и физических процессов, которые за это ответственны.

#### 5. БЛАГОДАРНОСТИ

Данные по критическим частотам  $foF2$  были взяты с сайта Space Weather Services, Sydney, Australia и с сайта банка данных SPIDR. Авторы выражают глубокую благодарность В.В. Михайлову за предоставленную программу расчетов спокойных условий по локальной модели, созданной для прогностической модели SIMP.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Данилов А.Д., Константинова А.В. Ионосферные предвестники геомагнитных бурь. 1. Обзор проблемы // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 59. № 5. С. 594–606. 2019.
- Константинова А.В., Данилов А.Д. Ионосферные предвестники геомагнитных бурь. 2. Анализ данных ст. Slough // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 60. № 3. С. 329–336. 2020.
- Лещинская Т.Ю., Михайлов В.В. Модель SIMP-1: картирование месячных медиан  $f_oF2$  по северному полушарию // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 56. № 6. С. 772–780. 2016.