

## ИОНОСФЕРНЫЕ ПРЕДВЕСТНИКИ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ. 2. АНАЛИЗ ДАННЫХ СТ. SLOUGH

© 2020 г. А. В. Константинова<sup>1</sup>, \*\*, А. Д. Данилов<sup>1</sup>, \*

<sup>1</sup>Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова  
Росгидромета (ИПГ), г. Москва, Россия

\*e-mail: adanilov99@mail.ru

\*\*e-mail: anna@tabulata.ru

Поступила в редакцию 24.10.2019 г.

После доработки 06.11.2019 г.

Принята к публикации 23.01.2020 г.

Проведен анализ поведения критической частоты слоя  $F2$ ,  $foF2$ , в течение трех дней, предшествующих магнитной буре. Рассмотрены 254 бури за период с 1976 по 2010 гг. и найдено 1353 события (отклонения  $foF2$  от спокойных условий). 996 отклонений имели положительный знак и 357 — 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  $F10.7$ ) и от сезона. Вероятность появления указанных отклонений имеет хорошо выраженные максимумы за 4–6, 12–13 и 18–20 ч до момента начала бури (SO). Кроме того, появление указанных отклонений наиболее вероятно, когда момент SO приходится на 8–10 и 19–21 ч местного времени. Полученные результаты позволяют нам считать, что найденные отклонения не являются случайными флуктуациями  $foF2$  (Q-возмущения), но связаны с предстоящей магнитной бурей, т.е. являются ее предвестниками.

DOI: 10.31857/S0016794020030104

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В предыдущей работе авторов (Данилов и Константинова [2019]), был дан обзор публикаций, в которых обращалось внимание на появление значительных отклонений параметров слоя  $F2$  от спокойных условий за несколько часов, или даже суток, до начала магнитной бури. Рассматривались отклонения критической частоты  $foF2$ ,  $\Delta foF2$ , по данным наземного вертикального зондирования на сети ионосферных станций, и количества электронов в столбе ионосферы TЕС,  $\Delta TЕС$ , по данным измерений на приемных пунктах различных систем позиционирования.

Указанный анализ показал, что во многих работах по исследованию ионосферной реакции на геомагнитные возмущения были зарегистрированы значительные величины  $\Delta foF2$  и  $\Delta TЕС$ , имеющие как положительный, так и отрицательный знак. Большинство этих отклонений имело амплитуду 20–40%, однако встречались и очень сильные отклонения, превышающие 60%. Многие авторы прямо называли события с указанными отклонениями  $foF2$  и TЕС ионосферными предвестниками магнитных бурь и даже высказывали предположение, что эти события могут использоваться для прогнозирования наступающей

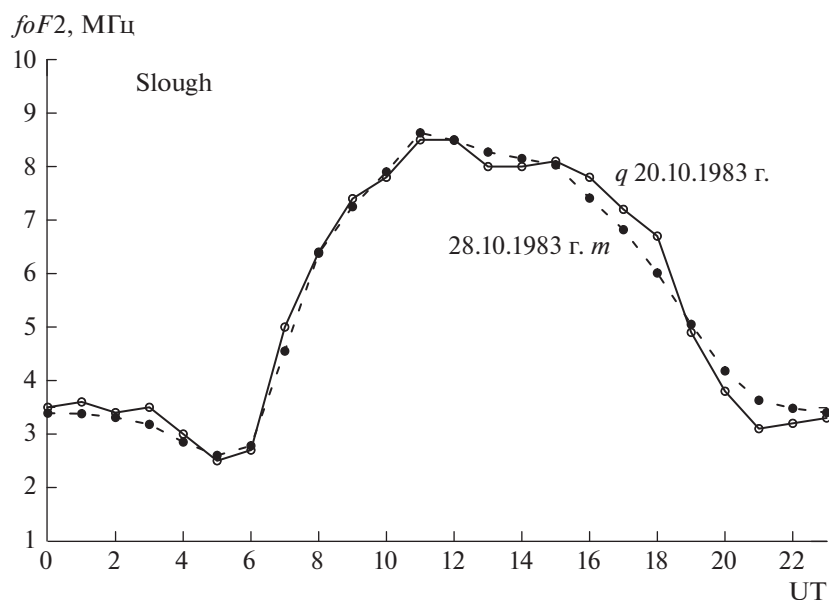
магнитной бури (за подробностями мы отсылаем читателей к указанному выше обзору).

К сожалению, как отмечалось Даниловым и Константиновой [2019], в рассмотренных в указанных работах бурях не обращалось внимания на то, насколько предбуревые дни, в которые регистрировались ионосферные отклонения (предвестники), были спокойными в магнитном отношении. В ряде случаев это заведомо было не так, и зарегистрированные значительные величины  $\Delta foF2$  и  $\Delta TЕС$  могли быть результатом возмущенной магнитной обстановки в сами анализируемые дни.

В описанном ниже исследовании мы приняли все меры, чтобы избежать подобных ситуаций.

### 2. ПРОЦЕДУРА АНАЛИЗА

Мы провели анализ ионосферных возмущений ( $\Delta foF2$ ) по данным наблюдений на ст. Slough/Chilton. Рассматривались геомагнитные возмущения, при которых величина  $Dst$ -индекса была меньше  $-30$  нТл. Момент начала геомагнитного возмущения (SO) выбирался по совокупности поведения  $Dst$ ,  $AE$  и  $\Sigma Kp$  магнитных индексов. В большинстве случаев он совпадал с моментом SC, приводимым в некоторых бюллетенях маг-



**Рис. 1.** Пример хорошего соответствия поведения  $foF2$  в спокойных условиях согласно магнито-спокойному дню 20.10.1983 г. и согласно локальной модели для дня SO магнитной бури 28.10.1983 г.

нитной активности (см., например, Geomagnetic Indices Bulletin, NGDC, Boulder, Colorado, USA).

Мы рассматривали 3 дня, предшествующих дню SO. В анализ включались только спокойные в магнитном отношении дни.  $AE$ - и  $\Sigma Kp$ -индексы должны были быть меньше 120 нТл и 12, соответственно. При этом по картам  $Dst$ -индекса проверялось, что эти дни не попадают на восстановительную фазу предыдущего геомагнитного возмущения.

Для нахождения величин  $\Delta foF2$  и  $\Delta T_{ЕС}$  в работах, рассмотренных в упоминавшемся выше обзоре, использовались либо месячные медианы, либо соответствующие величины, измеренные в ближайший спокойный в геомагнитном отношении день. Мы отказались от использования месячных медиан, поскольку в случае длительных неспокойных в магнитном отношении периодов, они не дают параметров полностью спокойного дня.

Для нахождения  $\Delta foF2$  мы использовали две опции: локальную модель  $foF2$ , 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. Дополнительно мы следили, чтобы выбираемый спокойный день не приходился на предбуревой

период другого магнитного возмущения. В большинстве случаев спокойный ход  $foF2$  в выбранный спокойный день и согласно локальной модели совпадали. Пример приведен на рис. 1. 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. 2–4. 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 ( $AE = 205$  нТл и  $\Sigma Kp = 16$ ) и потому из дальнейшего анализа исключался. Остальные дни на рис. 2–4 соответствовали принятым нами условиям отбора и использовались в дальнейшем анализе.

Мы проанализировали все 254 рисунка типа рис. 2–4. На каждом рисунке мы определяли количество отклонений  $\Delta foF2$  и, в течение суток до SO, также время  $\Delta T$  события до SO. Мы ввели градацию отклонений:  $+(20-30)\%$ ,  $+(30-40)\%$ ,  $>+40\%$ ,  $-(20-30)\%$ ,  $-(30-40)\%$  и  $<-40\%$ .

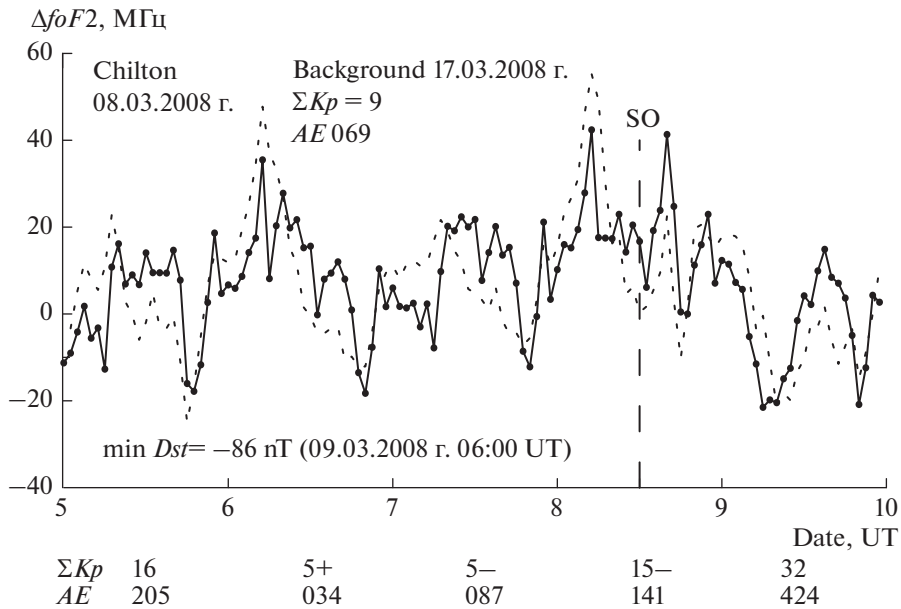


Рис. 2. Пример изменения  $\Delta foF2$  для случая бури 8 марта 2008 г. (штриховая и сплошная линии соответствуют  $m$  и  $q$  опциям).

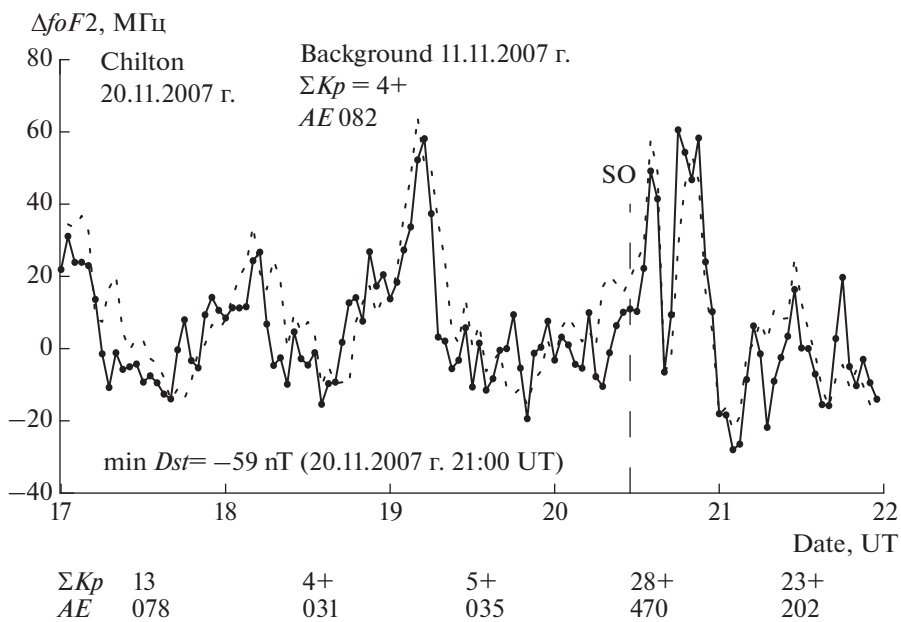


Рис. 3. Пример изменения  $\Delta foF2$  для случая бури 20 ноября 2007 г. (штриховая и сплошная линии соответствуют  $m$  и  $q$  опциям).

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Прежде всего, мы проанализировали вероятность появления интересующих 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. 5.

Как следует из рис. 5, при анализе всех событий получается хорошо выраженная зависимость числа событий на одну бурю  $K$  с достаточно высо-

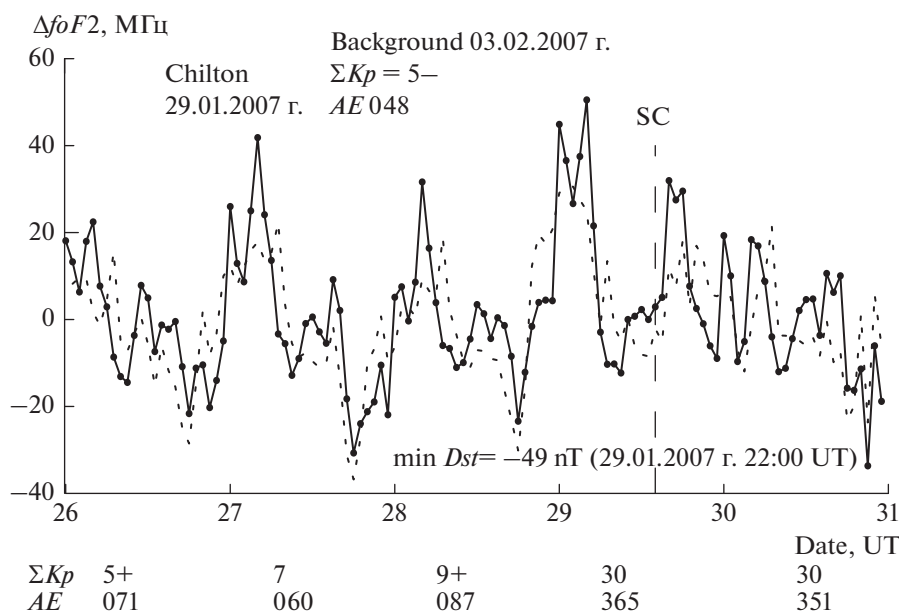


Рис. 4. Пример изменения  $\Delta foF2$  для случая бури 29 января 2007 г. (штриховая и сплошная линии соответствуют  $m$  и  $q$  опциям).

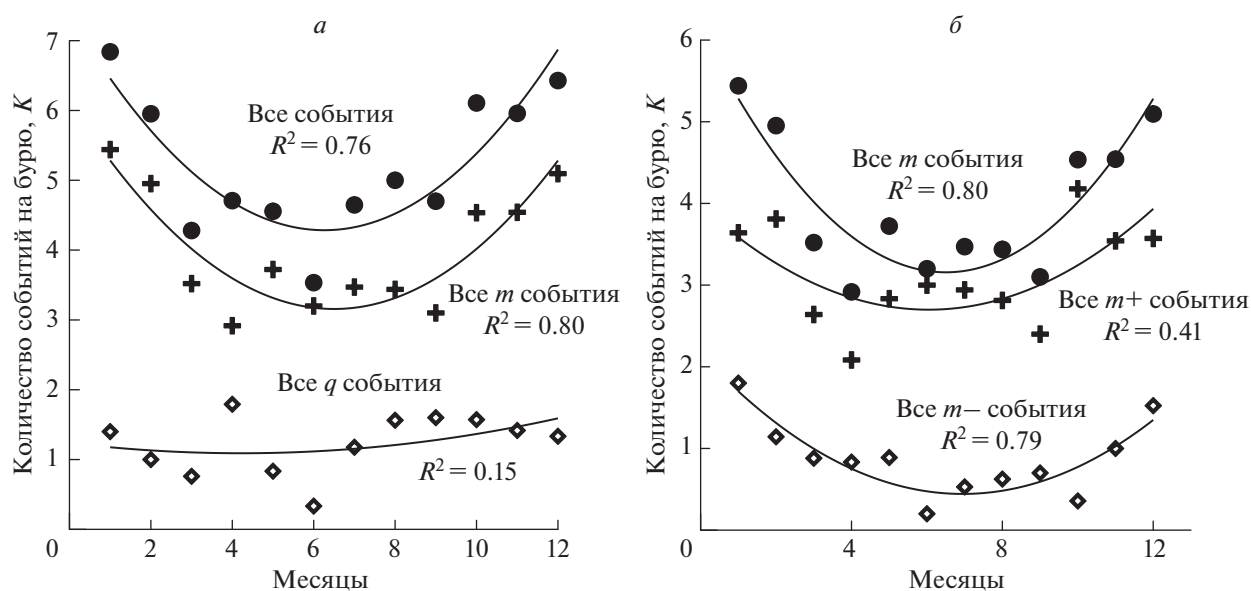


Рис. 5. Зависимость вероятности появления событий различной амплитуды, различного знака и опций  $m$  и  $q$  от сезона.

ким коэффициентом определенности по  $F$ -тесту Фишера ( $R^2 = 0.76$ ). Рисунок 5а показывает, что основной вклад в эту зависимость вносят  $m$  возмущения ( $R^2 = 0.80$ ), тогда как  $q$  возмущения значимой зависимости от сезона не демонстрируют ( $R^2 = 0.15$ ). Рисунок 5б показывает вклад положительных и отрицательных возмущений в общую зависимость  $m$  возмущений от сезона. Резюмируя, можно утверждать, что существует хорошо

выраженная зависимость интересующих нас отклонений  $\Delta foF2$  в предбуревые дни от сезона — вероятность появления таких отклонений в зимние месяцы (ноябрь—январь) существенно (примерно в полтора раза) выше, чем в летние месяцы (июнь—июль).

На рисунке 6 приведена зависимость  $K$  от солнечной активности. Использован сглаженный индекс  $F10.7$ , который мы используем при ана-

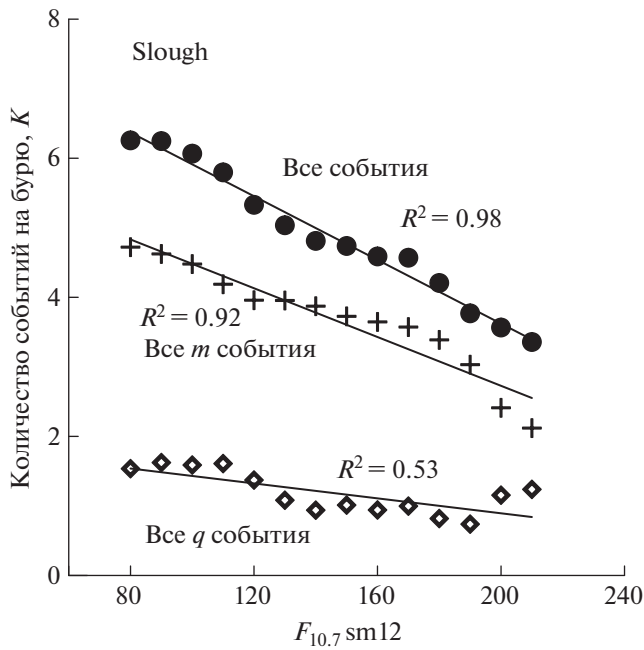


Рис. 6. Зависимость вероятности появления событий  $K$  (все события,  $q$  и  $m$ ) от индекса солнечной активности (сглажено по трем точкам).

лизе долговременных трендов  $foF2$  (подробнее см. Данилов и Константинова [2016]). Хорошо видно, что при анализе всех событий получается зависимость  $K$  от  $F10.7$  с очень высокой статистической значимостью ( $R^2 = 0.98$ ). Наибольший

вклад в эту зависимость вносят  $m$  события, тогда как вклад событий  $q$  мал.

На рисунке 7 приведена зависимость  $K$  от солнечной активности для событий  $m$  различного знака и интенсивности. Из рис. 7а следует, что высокая статистическая значимость зависимости  $K$  от  $F10.7$  ( $R^2 = 0.92$ ) обеспечивается, в основном, положительными  $m$  событиями. Среди последних наибольший вклад, как следует из рис. 7б, вносят события с амплитудой, превышающей 30% ( $R^2 = 0.89$ ).

На рисунке 8 приведена зависимость  $K$  от интенсивности предстоящей магнитной бури ( $Dst \text{ min}$ ). Видно, что эта зависимость выражена несколько хуже, чем зависимость от  $F10.7$ . Тем не менее, она статистически значима и показывает, что основной вклад в нее обеспечивается событиями  $m$  и положительными событиями.

Рисунок 9 показывает, что вероятность появления рассматриваемых нами событий существенно зависит от того, в какой момент местных суток начинается магнитная буря. Видно, что имеются два интервала (7–9 и 20–22 LT) начала магнитной бури, при которых появление ионосферных возмущений в предбуревые дни наиболее вероятно.

На наш взгляд, очень интересен рис. 10. Он показывает, что наиболее вероятно появление ионосферных событий за 4–6 и 18–20 ч до начала предстоящего магнитного возмущения. При этом видно, что одинаковая картина наблюдается и для всех событий, и для всех  $m$  событий, и для по-

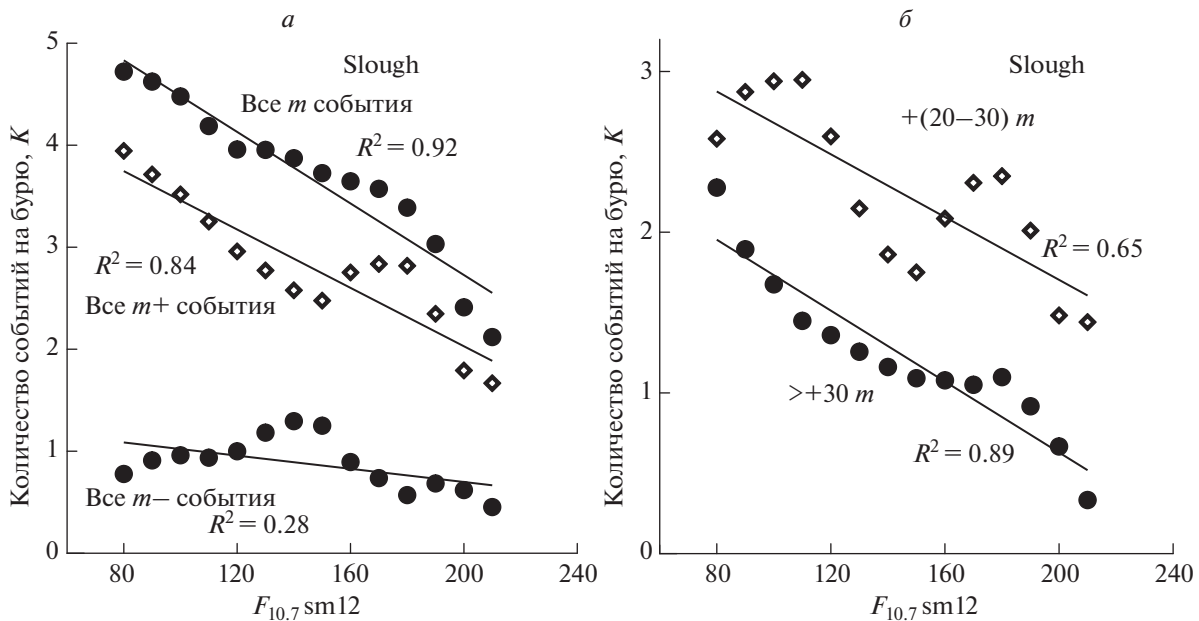


Рис. 7. Зависимость величины  $K$  от индекса солнечной активности для  $m$  событий различного знака и интенсивности (сглажено по трем точкам).

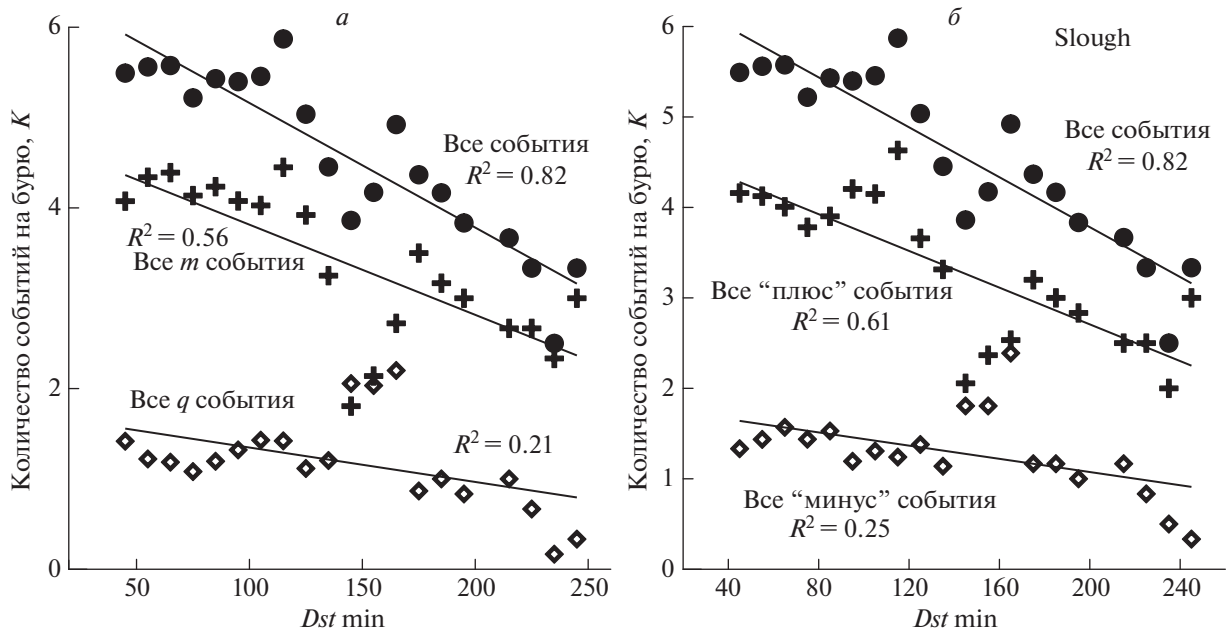


Рис. 8. Зависимость  $K$  от интенсивности магнитной бури ( $Dst$  min) для всех событий и отдельно для  $m$  и  $q$  событий (8а) и событий разного знака (8б) (сглажено по трем точкам).

ложительных  $m$  событий. Необходимо отметить, что, в отличие от предыдущих рисунков, на рис. 10 по очевидным причинам приводится количество событий, которые наблюдались за конкретный интервал  $\Delta T$  до SO, а не количество событий на одну бурю.

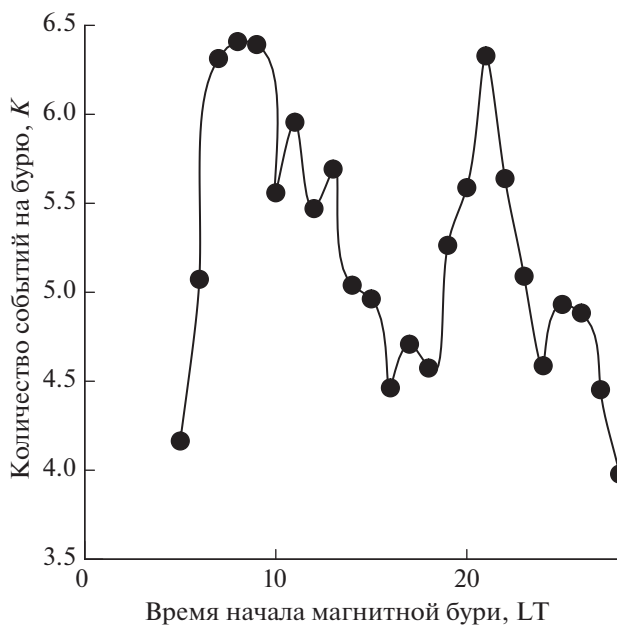


Рис. 9. Зависимость величины  $K$  от местного времени начала магнитной бури (SO) (сглажено по трем точкам).

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенный в предыдущем параграфе анализ позволяет сделать следующие заключения.

1. Вероятность появления ионосферных возмущений в дни, предшествующие магнитной бу-

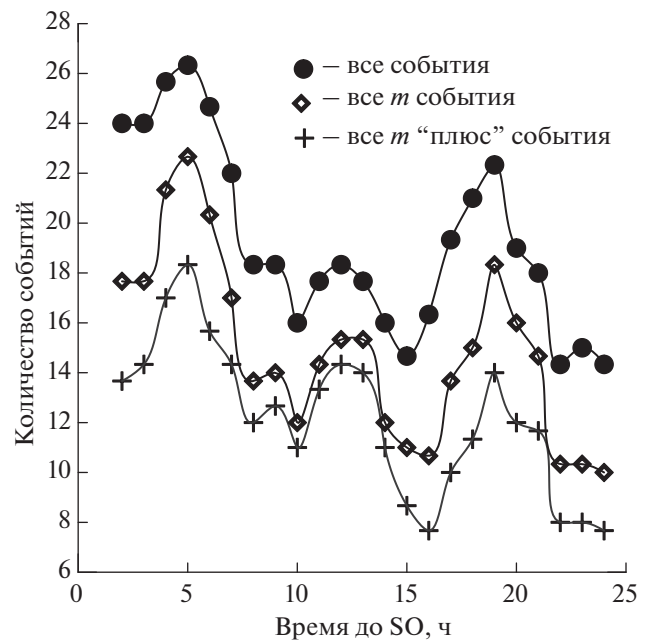


Рис. 10. Зависимость числа наблюдаемых событий от времени до начала предстоящей магнитной бури (SO).

ре, имеет хорошо выраженный сезонный ход — зимой она примерно в 1.5 раза выше, чем летом.

2. Имеется хорошо выраженная зависимость вероятности появления указанных возмущений от солнечной активности. При низкой солнечной активности эта вероятность выше, чем при высокой.

3. Имеется статистически значимая ( $R^2 = 0.82$ ) зависимость вероятности появления указанных возмущений от интенсивности последующей магнитной бури. Эта вероятность наибольшая для слабых и умеренных бурь.

4. Вероятность появления указанных возмущений зависит от местного времени начала магнитной бури (SO). Эта вероятность максимальна, когда SO происходит в 08:00–10:00 LT и 20:00–22:00 LT.

5. Появление указанных возмущений наиболее вероятно за 4–6, 11–13 и 19–21 ч до начала магнитной бури (SO).

Наличие хорошо выраженной зависимости рассматриваемых событий от интенсивности бури ( $Dst\ min$ ), момента SO по местному времени и времени  $\Delta T$  от появления события до момента SO показывает, что эти события не являются случайными отклонениями от спокойных условий (Q-возмущения), но тесно связаны с предстоящей магнитной бурей. Это позволяет нам считать их **ионосферными предвестниками** такой бури, как это делалось во многих исследованиях, рассмотренных в первой части данной работы (Данилов и Константинова [2019]).

Проблема Q-возмущений подробно обсуждалась в публикациях Mikhailov and Perrone [2009]. Эти возмущения могут происходить в спокойных геомагнитных условиях и давать такие же отклонения  $foF2$  от спокойных условий, как и рассмотренные нами ионосферные предвестники. Однако, настоящие (т.е. свободные от влияния геомагнитных возмущений) Q-возмущения случаются относительно редко. Вероятность их попадания в короткие (3 дня и меньше) интервалы времени, которые мы рассматриваем в данной работе, мала. Как указано в предыдущем параграфе, полученные нами зависимости величин  $\Delta foF2$  от параметров последующего геомагнитного возмущения (магнитной бури) позволяют нам считать их предвестниками этого возмущения. Мы отдаем себе отчет в том, что какое-то количество реальных Q-возмущений может оказаться среди рассмотренных нами событий и там самым в какой-то мере повлиять на получаемые статистические выводы. Но высокая статистическая значимость полученных зависимостей (высокие величины  $R^2$ , см. выше в предыдущем параграфе) позволяет нам считать, что вклад от “загрязнения” возмущениями, не связанными с последующей магнитной бурей, мал, и мы, действительно, имеем

дело с ионосферными предвестниками надвигающейся бури.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В первой части работы [Данилов и Константинова, 2019] было показано, что во многих исследованиях поведения ионосферного слоя  $F2$  во время геомагнитных бурь были отмечены появления существенных отклонений критической частоты  $foF2$  от спокойных условий за несколько часов или даже за 1–2 дня до начала бури (SO). Ряд исследователей считают, что эти отклонения  $foF2$  являются предвестниками магнитного возмущения и даже могут использоваться для его предсказания.

К сожалению, в указанных исследованиях не всегда уделялось должное внимание геомагнитной ситуации в сами предбуревые дни. Иногда зарегистрированные отклонения  $foF2$  или TEC могли быть результатом геомагнитных возмущений в сами эти дни и не быть связаны с предстоящей магнитной бурей.

Мы поставили своей целью обработать большой массив измерений критической частоты  $foF2$  Slough за 1976–2010 гг. и проанализировать поведение  $foF2$  в течение трех дней до дня начала бури (SO). При этом мы наложили жесткие ограничения на геомагнитную обстановку в анализируемые дни, описанные выше. Мы проводили анализ отклонения наблюдаемых в эти дни величин  $foF2$ ,  $\Delta foF2$ , от спокойных условий, используя для контроля две опции: локальная модель и ближайший спокойный в геомагнитном отношении день.

Результаты анализа 254 отобранных геомагнитных бурь показал, что в предбуревые дни, действительно, наблюдаются значительные отклонения от медианы в соответствии с результатами, полученными из обзора большого количества публикаций [Данилов и Константинова, 2019]. Также в соответствии с указанными результатами было получено, что в предбуревые дни преобладают положительные возмущения  $foF2$  и что наиболее часто они происходят за 4–8 ч до момента SO.

Ряд полученных в данной работе зависимостей возмущений  $foF2$  в предбуревые дни от параметров предстоящей магнитной бури позволяет нам считать, что эти возмущения действительно могут рассматриваться как ионосферные предвестники этой бури.

На следующем этапе работы планируется провести аналогичный анализ измерений  $foF2$  на ст. Juliusruh для сравнения результатов и увеличения статистики.

## 6. БЛАГОДАРНОСТИ

Данные по критическим частотам  $f_oF2$  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. Мы благодарны также проф. А.В. Михайлову за предоставленные материалы по отклонениям  $f_oF2$  для ст. Juliusruh.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа была поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 18-05-80023).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Данилов А.Д., Константинова А.В. Изменение связи между  $f_oF2$  и  $hmF2$  со временем // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 56. № 5. С. 612–619. 2016.
- Данилов А.Д., Константинова А.В. Ионосферные предвестники геомагнитных бурь. 1. Обзор проблемы // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 59. № 5. С. 594–606. 2019.
- Лещинская Т.Ю., Михайлов В.В. Модель SIMP-1: картирование месячных медиан  $f_oF2$  по северному полушарию // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 56. № 6. С. 772–780. 2016.
- Mikhailov A.V., Perrone L. Pre-storm  $NmF2$  enhancements at mid latitudes: Delusion or reality? // Ann. Geophysicae. V. 27. № 3. 1321–1330. 2009.