

УДК 550.388.2

## ИОНОСФЕРНЫЕ ПРЕДВЕСТНИКИ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ. 1. ОБЗОР ПРОБЛЕМЫ

© 2019 г. А. Д. Данилов<sup>1</sup>, \*, А. В. Константинова<sup>1</sup>, \*\*

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

\*e-mail: adanilov99@mail.ru

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

Поступила в редакцию 15.04.2019 г.

После доработки 13.05.2019 г.

Принята к публикации 23.05.2019 г.

Обсуждается проблема появления возмущений параметров ионосферного слоя  $F2$  до начала геомагнитной бури. Показано, что во многих исследованиях обнаружены возмущения (существенные отклонения от спокойных условий) как критической частоты  $foF2$ , так и полного содержания электронов в столбе ионосферы ТЕС за несколько часов, а иногда даже за двое суток до момента SC (внезапного начала бури). Амплитуды указанных возмущений в среднем составляют 30–60%, но в отдельных случаях могут превышать 100%. Возможны отклонения от спокойных условий обоих знаков, но гораздо чаще встречаются положительные предбуревые возмущения  $foF2$  и ТЕС.

DOI: 10.1134/S001679401905002X

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема ионосферных возмущений (бурь), сопровождающих геомагнитные возмущения, хорошо известна и ей посвящены многие десятки работ. Отметим лишь наиболее известные обзоры [Prolls, 1995; Rees, 1995; Buonsanto, 1999; Danilov, 2001; Danilov and Laštovička, 2001]. Информацию о более поздних исследованиях можно найти в обзоре одного из авторов [Danilov, 2013; Данилов, 2013].

В работах по исследованию ионосферных бурь основной акцент делается, как правило, на анализ поведения параметров ионосферного слоя  $F2$  ( $foF2$  и/или  $hmF2$ ) сразу после начала бури (в большинстве случаев – это внезапное начало (sudden commencement, SC)), во время взрывной фазы бури (резкое падение  $Dst$ -индекса) и фазы восстановления (медленный рост указанного индекса). Лишь в некоторых работах по исследованию конкретных геомагнитных бурь обращается внимание на наличие (или отсутствие) заметных возмущений ионосферных параметров в период, предшествующий SC.

В данной работе мы хотим сделать акцент именно на поведении ионосферного слоя  $F2$  в течение двух суток, предшествующих внезапному началу магнитной бури, не отвлекаясь на сложную картину положительных и отрицательных аномалий в поведении этого слоя (так называемых положительных и отрицательных фаз ионо-

сферной бури) в период самой магнитной бури. Эта картина очень сложна и пока понятны лишь некоторые ее детали (за подробностями мы отсылаем читателя к упомянутым выше обзорам), поскольку в формировании положительных и отрицательных фаз участвуют несколько сложных процессов как метеорологического, так и электродинамического характера.

В обзорной работе Данилова [2013], посвященной в основном поведению области  $F2$  во время самих геомагнитных бурь, небольшой параграф был посвящен предбуревым эффектам в ионосфере. Для целостности изложения мы повторяем здесь часть материала указанного параграфа.

### 2. ПРЕДЫСТОРИЯ ПРОБЛЕМЫ

Kane [1973a, b; 1975] был первым, кто указал на то, что иногда наблюдается положительная фаза ионосферной бури до SC магнитной бури. Данилов и Белик [1991] и Danilov and Belik [1992] подчеркнули существование этого эффекта и впервые представили на одном рисунке методом наложенных эпох примеры нескольких бурь с предбуревым эффектом (см. также Danilov [2001]).

В дальнейшем в некоторых работах, посвященных исследованию ионосферных бурь, обращалось внимание на появление положительного или отрицательного возмущения  $foF2$  или  $hmF2$  за несколько часов, или даже за сутки до SC геомаг-

нитной бури, но основное внимание в этих работах уделялось поведению указанных ионосферных параметров непосредственно во время самой геомагнитной бури.

Детальные рассмотрения проблемы положительных ионосферных возмущений, предшествующих магнитным бурям, выполнили Kane [2005] и Buresova and Laštovička [2007]. Некоторые из результатов, полученных в этих работах, будут представлены в следующем параграфе.

Благовещенский и Калишин [2009] провели детальное исследование положительных фаз ионосферных бурь, предшествующих SC. Они представили многочисленные примеры положительных ионосферных возмущений, начинающихся за 6–8 ч до взрывной фазы геомагнитной бури.

Mikhailov and Perrone [2009] критически проанализировали результаты предыдущих публикаций Danilov [2001], Buresova and Laštovička [2007, 2008] и Kane [2005], касающихся проблемы предбуревых увеличений  $foF2$ . Они классифицировали этот эффект как “заблуждение” (delusion) и объяснили наблюдаемые предбуревые возрастания несколькими “нормальными” факторами, такими, как рост авроральной активности, или длительный (несколько дней) рост критической частоты, не связанный с рассматриваемой бурей (так называемые Q-возмущения).

В следующем параграфе мы приведем и обсудим наиболее яркие примеры наличия фаз (как положительных, так и отрицательных) ионосферных бурь до начала геомагнитного возмущения, опубликованных различными исследователями. В двух следующих публикациях этой серии мы планируем привести результаты наших собственных исследований появления ионосферных возмущений до SC геомагнитных бурь и их зависимости как от характеристик последующей геомагнитной бури, так и от различных “внешних” условий (местное время, сезон, широта).

Отметим сразу, что, рассматривая результаты вертикального зондирования (ВЗ) ионосферы, как при анализе публикаций других авторов, так и при собственных исследованиях, мы будем обсуждать только поведение критической частоты  $foF2$ . Хотя в некоторых исследованиях приводятся также и изменения высоты слоя  $F2$ ,  $hmF2$ , мы оставим их без рассмотрения, поскольку определение высоты  $hmF2$  (которую нельзя получить сразу из ионограмм ВЗ, а необходимо пересчитывать из параметра M3000) гораздо менее надежно (особенно во время возмущений, когда может сильно изменяться состояние нижележащего слоя E), чем определение  $foF2$ .

В течение последнего десятилетия появляется все больше работ по исследованию ионосферных эффектов магнитных бурь на основании величин

полного содержания электронов в столбе ионосферы (Total electron content, TEC), получаемых с помощью различных систем позиционирования (GPS, GLONASS и т.д.).

Как это делается в большинстве других работ, мы будем обсуждать изменения критической частоты в терминах величины  $\Delta foF2$ , которая представляет собой относительное отклонение  $foF2$  от спокойных условий (в различных работах берется либо ближайший к буре спокойный день, либо месячная медиана) в процентах:

$$\Delta foF2 = (foF2_{\text{наб}} - foF2_{\text{спок}}) / foF2_{\text{спок}},$$

где  $foF2_{\text{наб}}$  и  $foF2_{\text{спок}}$  – критические частоты, наблюдаемые в анализируемый период и в спокойных условиях.

Аналогичное выражение используется обычно и для изменения TEC:

$$\Delta \text{TEC} = (\text{TEC}_{\text{наб}} - \text{TEC}_{\text{спок}}) / \text{TEC}_{\text{спок}}.$$

Следует отметить, что выводы о поведении TEC нам представляются менее надежными, чем выводы о поведении критической частоты, поскольку измерения последней проводятся в одном месте, непосредственно в ионосфере над станцией ВЗ, тогда как спутниковые измерения проводятся при различных зенитных углах спутника, поэтому наклонные величины TEC приходится пересчитывать в вертикальные, что вносит дополнительные неопределенности в результаты (см., например, Shimeis et al. [2015]). Кроме того, неясно, относятся ли эффекты, регистрируемые в TEC, только к изменениям в области  $F$ , поскольку измерения TEC могут охватывать и внешнюю ионосферу, и даже нижнюю часть плазмосферы. Тем не менее, поскольку в последнее десятилетие многие исследования поведения ионосферы во время магнитных бурь проводились именно на основании измерений TEC, мы во второй части следующего параграфа рассмотрим предбуревые эффекты, зарегистрированные в некоторых из этих измерений.

Различными авторами используется различная терминология при описании интенсивности бурь. Мы будем придерживаться терминологии, принятой в обзоре одного из авторов [Данилов, 2013]: слабые ( $-50 \leq Dst_{\text{min}} \leq -30$  нТл), умеренные ( $-100 \leq Dst_{\text{min}} \leq -50$  нТл) и интенсивные ( $Dst_{\text{min}} < -100$  нТл). Интенсивные бури, в свою очередь, подразделяются на сильные ( $-200 \leq Dst_{\text{min}} \leq -100$  нТл), очень сильные ( $-350 \leq Dst_{\text{min}} \leq -200$  нТл) и выдающиеся ( $Dst_{\text{min}} < -350$  нТл).

### 3. АНАЛИЗ КОНКРЕТНЫХ БУРЬ

#### 3.1. Поведение $\Delta foF2$

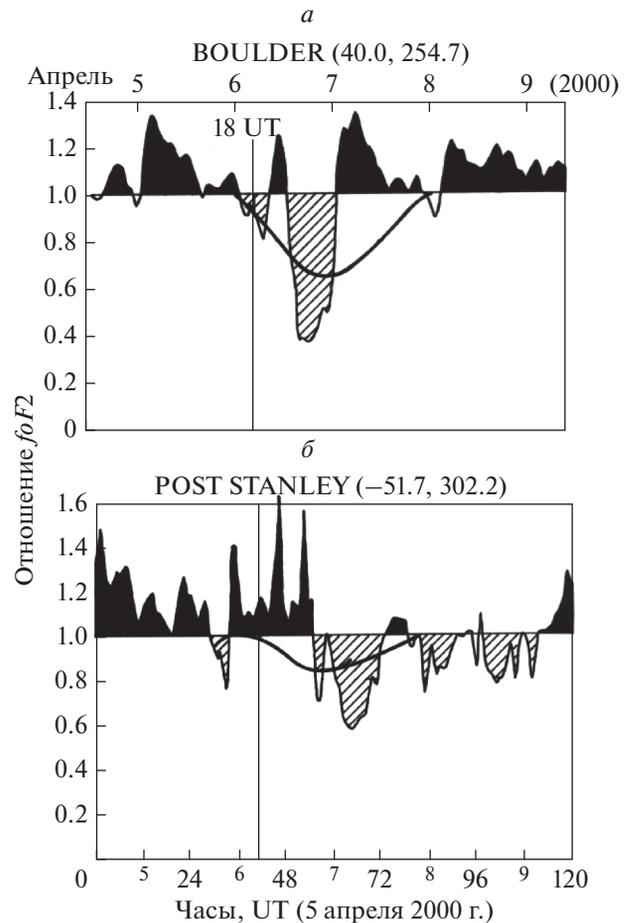
В работе Kane [2005] был представлен прекрасный пример появления положительных возмущений 28 октября 2003 г. в день, предшествующий началу выдающейся магнитной бури. Тот факт, что более или менее похожие (по форме и амплитуде) положительные фазы наблюдались на большинстве ионосферных станций, исключает возможность того, что эффект являлся случайным.

Предбуревое возрастание  $foF2$  видно на рисунках в статье Araujo-Pradere and Fuller-Rowell [2002] (см. рис. 1, взятый из работы Kane [2005]), но сами авторы не обсуждают этого эффекта. Kane [2005] сделал попытку сравнить поведение  $foF2$ , наблюдаемое до и во время сильной бури 6–7 апреля 2000 г. ( $Dst_{min} = -200$  нТл) с предсказаниями эмпирической модели STORM [Araujo-Pradere and Fuller-Rowell, 2002]. Результаты сравнения представлены на рис. 1 (взятом из работы Kane [2005]) и показывают, что модель плохо описывает поведение  $foF2$  после SC и ничего не говорит о сильных положительных фазах до SC, зарегистрированных на обеих станциях.

В работе [Blagoveshchensky et al., 2003] проанализированы 41 геомагнитное возмущение по наблюдениям на ионосферной ст. Sodankylä ( $67^\circ$  N,  $26^\circ$  E). Большинство рассмотренных возмущений представляли собой геомагнитные суббури, однако были и бури с внезапным началом. Авторы указанной работы как один из основных выводов формулируют утверждение, что “возрастание величин  $foF2$  по сравнению с их спокойной медианой начинается за 6–8 часов до момента  $T_0$  начала активной (expansion) фазы магнитной бури”. Затем, по утверждению указанных авторов, величина  $foF2$  достигает своего максимума за 3–4 ч до момента  $T_0$  и падает ниже спокойного уровня к самому моменту  $T_0$ .

Работа [Blagoveshchensky et al., 2017] посвящена реакции ионосферы на возмущения космической погоды до, во время и после возмущения. В этой работе рассматривается широкий круг проблем (различные проявления космической погоды, поведение не только  $foF2$ , но и  $foEs$  и т.д.). Для нашего рассмотрения важны два момента. Во-первых, в работе фактически были подтверждены результаты Blagoveshchensky et al. [2003] на более обширном материале (72 геомагнитных возмущения, ионозонды в широтном интервале  $40^\circ$ – $70^\circ$  N в Европе, Сибири и Северной Америке). Результаты анализа данных всех станций и всех бурь были обобщены в виде очень выразительного рис. 2, взятого из работы [Blagoveshchensky et al., 2017].

Рисунок наглядно иллюстрирует приведенное выше утверждение о положительном возмуще-



**Рис. 1.** Отношение  $foF2_{наб}/foF2_{спок}$  для периода 5–9 апреля 2000 г. (буря произошла 6–7 апреля) для станций Boulder и Port Stanley (взято из работы [Araujo-Pradere and Fuller-Rowell, 2002]). Толстой кривой показано предсказание с помощью их эмпирической модели STORM, а заштрихованной кривой – наблюдения. Положительные отклонения зачернены, а отрицательные – заштрихованы (из работы Kane [2005]).

нии  $foF2$  с максимумом за 3–4 ч до момента  $T_0$  и падением  $foF2$  непосредственно перед этим моментом. На другом рисунке в работе [Blagoveshchensky et al., 2017] приведено поведение  $foF2$  до и во время пяти достаточно сильных магнитных бурь. Рисунок показывает, что положительное ионосферное возмущение наблюдается во всех пяти случаях, хотя амплитуда этого возмущения для различных бурь различна и не коррелирует прямо с интенсивностью бури, характеризуемой в данном случае величиной  $\Sigma Kp$ .

Проанализировав магнитные бури за 2008–2012 гг. по данным ВЗ на ст. Sodankylä, Благовещенский [2014] пришел к выводу, что для всех рассмотренных бурь имеет место так называемый главный эффект (ГЭ). Суть его состоит в том, что за несколько дней до начала активной фазы бури возникает первый максимум в значениях  $foF2$ , за-

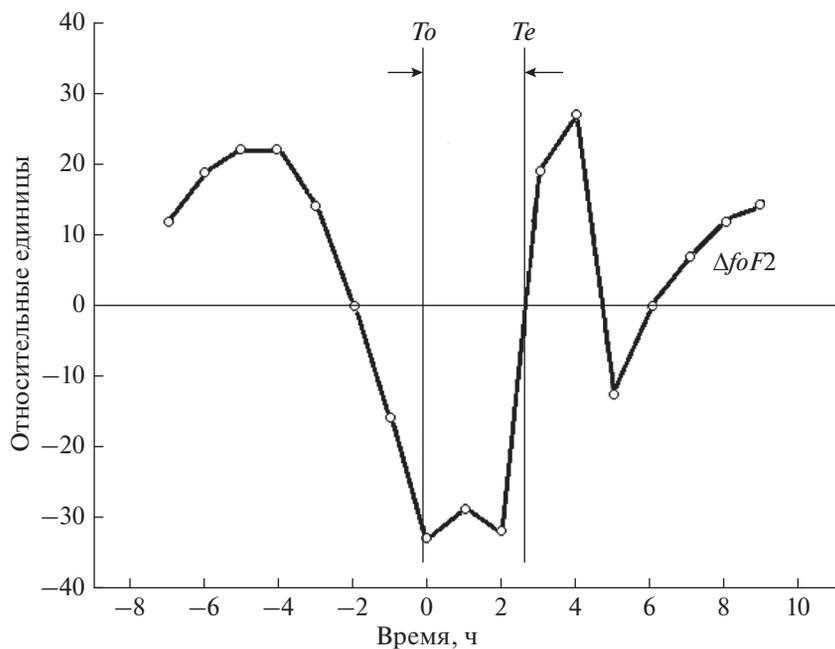


Рис. 2. Вариации величины  $\Delta foF2$ , усредненные по 72 бурям (из работы [Blagoveshchensky et al., 2017]).

тем во время активной фазы имеет место минимум  $foF2$  и далее после активной фазы снова образуется второй максимум. По мнению Благовещенского [2014] у ионосферы имеется “память” (инерционность) от 8–9 ч до 2 сут, предвестником магнитных бурь можно считать появление первого максимума ГЭ и подобный предвестник потенциально может быть использован для прогнозирования начала развития последующей магнитосферной бури.

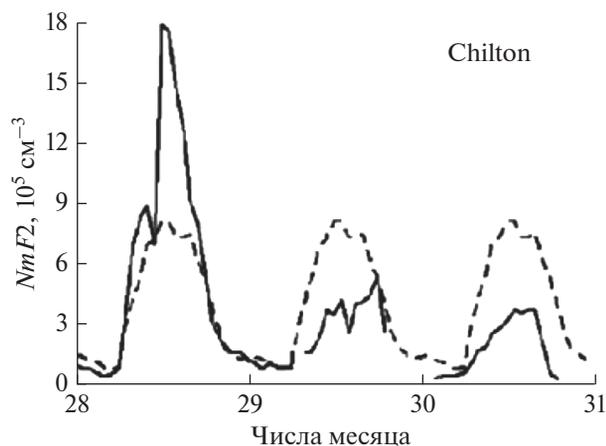
В работе Благовещенского и Калишина [2009], уже упоминавшейся выше, было высказано предположение, что канал проникновения энергии солнечного ветра во время предбуревых возрастных  $foF2$  отличается от канала, действующего во время самой бури. Этот канал обеспечивает перенос энергии через входной слой в магнитосферу и через дневной касп в ионосферу (как предполагалось в работе Danilov and Belik [1992]). Согласно Благовещенскому и Калишину [2009], рост  $foF2$  в предбуревой период может использоваться для предсказания надвигающейся геомагнитной бури.

Buresova and Laštovička [2007] проанализировали 65 сильных геомагнитных бурь, наблюдавшихся в период 1995–2005 гг., и искали случаи предбуревых возрастных, используя данные восьми ионосферных станций, расположенных в европейском регионе. Они обнаружили, что примерно в 20–25% случаев геомагнитным бурям предшествовали достаточно сильные предбуревые возрастные  $foF2$  ( $NmF2$ ). Buresova and Laštovička [2007] обнаружили также, что предбуревое возрастание  $foF2$  происходит как днем, так

и ночью, и выявили сезонные вариации частоты появления предбуревых возрастных  $NmF2$ . Эти возрастные имеют тенденцию чаще появляться в летнее полугодие. Однако число рассмотренных событий достаточно мало, поэтому Buresova and Laštovička [2007] предложили рассматривать полученное сезонное распределение предбуревых явлений только как тенденцию. Однако эта сезонная вариация (если она, действительно, существует) может оказаться очень важна для поиска источников предбуревых явлений, поскольку она показывает, что эти явления не связаны с сезонными вариациями появления сильных геомагнитных бурь — большинство геомагнитных бурь происходит в периоды равноденствий. Buresova and Laštovička [2007] не смогли найти какой-нибудь систематической широтной зависимости появления предбуревых возрастных  $foF2$ . Не было обнаружено также соответствующих изменений  $hmF2$ .

На рисунке 3, взятом из работы [Buresova and Laštovička, 2007], приведен типичный пример сильного возрастания  $NmF2$  перед выдающейся бурей 29 октября 2003 г. (минимум  $Dst = -388$  нТл) по данным вертикального зондирования на ст. Chilton. Видно, что примерно за 18 ч до SC (06:11 UT 29 октября) происходит увеличение  $NmF2$  в ~2.5 раза.

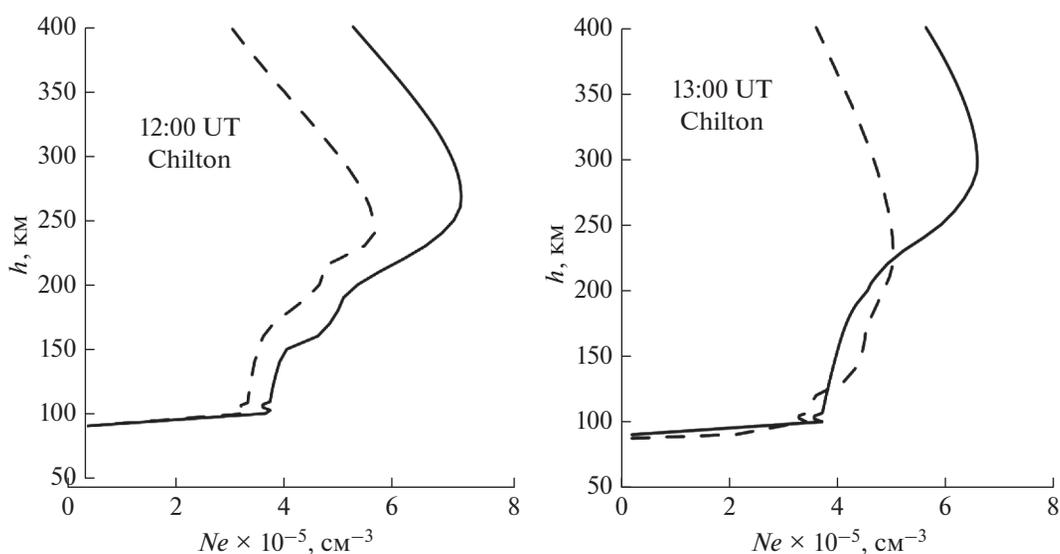
Используя данные 12 ионосферных станций северного полушария, покрывающих весь интервал долгот, Buresova and Laštovička [2008] проанализировали 15 выдающихся бурь за период 1995–2005 гг. Они обнаружили, что все рассмотренные



**Рис. 3.** Эффекты выдающейся геомагнитной бури 29 октября 2003 в  $NmF2$  на ст. Chilton. Приведена реакция  $NmF2$  (ежечасные значения): сплошная кривая соответствует измеренным величинам, штриховая кривая — месячной медиане. (Из работы [Buresova and Laštovička, 2007]).

бури в европейском регионе сопровождалась значительным (>20%) ростом  $foF2$  перед началом бури.

Новым элементом изучения предбуревого эффекта была попытка определить высотный профиль предбуревого возрастания, в частности наличие эффекта в ионосферных слоях  $F1$  и  $E$ . Buresova and Laštovička [2008] не обнаружили систематического эффекта предбуревого возрастания  $Ne$  в слое  $F1$ . Также не было никакого предбуревого возрастания и в области  $E$ . Фактически, Buresova and Laštovička [2008] обнаружили, что предбуревое возрастание ограничено слоем  $F2$ .



**Рис. 4.** Высотное распределение электронной концентрации 22 июля 2004 г. по данным ст. Chilton согласно работе [Buresova and Laštovička, 2008] (см. текст).

Пример высотного распределения  $Ne$  в предбуревой период по данным ст. Chilton согласно работе [Buresova and Laštovička, 2008] приведен на рис. 4. Сплошные линии — наблюдения 22 июля 2004 г. до SC геомагнитной бури (15:00 UT); штриховые линии — месячная медиана. Хорошо видно существенное возрастание перед бурей  $Ne$  в области  $F$  по сравнению со спокойными условиями.

Широтная протяженность предбуревого возрастания была найдена равной  $120^{\circ}$ – $240^{\circ}$  на основе сравнения одновременных измерений  $foF2$  в Европе, Северной Америке и Восточной Азии. Необходимо отметить, что в американском и восточно-азиатском долготных секторах Buresova and Laštovička [2008] обнаружили перед этой бурей лишь слабые предбуревые эффекты.

Согласно Mansilla [2007] перед очень сильной бурей 15 июля 2000 г. ( $Dst_{min} = -300$  нТл) положительные фазы с амплитудой, достигающей 30%, наблюдались на среднеширотных станциях Hobart и Canberra (южное полушарие) и Ленинград и Wallops Island (северное полушарие).

Во время очень сильной бури 24 ноября 2001 г. ( $Dst_{min} = -224$  нТл) Nogueira et al. [2011] обнаружили возрастание параметра  $\Delta foF2$  примерно в 20:00 LT 23 ноября, тогда как буря началась в 04:00 LT 24 ноября. Рисунок 2 в работе Nogueira et al. [2011] показывает, что по крайней мере до полуночи 23/24 ноября все магнитные параметры ( $Dst$ ,  $AE$ ,  $Bz$ ,  $Ey$ ) были на совершенно спокойном уровне.

Анализируя глобальную ионосферную реакцию на умеренную геомагнитную бурю 3 августа 2010 г. ( $Dst_{min} = -90$  нТл) в трех долготных секторах (Азия/Тихий океан, Европа/Африка и Аме-

рика) Mansilla and Zossi [2012] получили, что одним из главных ионосферных эффектов рассматриваемой бури был тот факт, что за 4–5 ч до бури японские, австралийские и американские станции зарегистрировали хорошо выраженный рост  $foF2$  независимо от местного времени.

В более поздних работах Mansilla [2014] и Mansilla and Zossi [2016] рассмотрели наблюдения методом ВЗ на станциях в американском секторе во время еще ряда бурь. Характерно, что до SC наблюдались как отрицательные, так и положительные ионосферные возмущения. Особенно сильная положительная фаза наблюдалась перед SC выдающейся магнитной бури 29 октября 2003 г. (которая анализировалась также в работе Buresova and Laštovička [2008], см. выше). Согласно Mansilla [2014] максимальная величина  $\Delta foF2$  достигала 120% на станциях Jicamarca и Tucuman и 90% на ст. Ascension. Положительное ионосферное возмущение длилось от 6 до 15 ч.

Patowary et al. [2013] провели анализ сорока магнитных бурь 70–80-х гг., анализируя 8 станций ВЗ дальневосточного и австралийского регионов. Основной целью работы было исследование сезонных и широтных различий в ионосферной реакции на магнитные бури во время самих бурь. Однако из приведенных в работе рисунков видно, что до SC на многих станциях наблюдаются положительные ионосферные возмущения. К сожалению, Patowary et al. [2013] приводят абсолютные величины  $\Delta foF2$  в МГц, а не относительные величины в процентах, как большинство исследователей, поэтому из рисунков трудно понять, насколько значительными были эти положительные возмущения. Однако, рис. 3 в этой работе показывает (и на это обращают внимание сами авторы), что перед бурей 26 марта 1976 г. на всех приведенных на рис. 6 станциях наблюдались значительные повышения  $\Delta foF2$  за 3–4 ч до SC.

Liu et al. [2014] анализировали поведение  $foF2$  на станциях дальневосточного и австралийского регионов во время магнитной бури с SC в 00:00 UT 15 июля 2012 г. Они получили, что на станциях Beijing, Wuhan и Sanya за 10–14 ч до SC наблюдались положительные величины  $\Delta foF2$  порядка 20–30%. Такие же по амплитуде, но отрицательные величины  $\Delta foF2$  наблюдались на станциях Darwin, Townsville и Brisbane весь день (по UT) 14 июля.

Некоторые особенности реакции ионосферы, наблюдавшиеся в экваториальной и среднеширотной областях на две очень сильные геомагнитные бури 19–23 октября 2001 г. и 13–17 мая 2005 г. ( $SUM-H_{min} = -300$  нТл), рассматривались Adekoya et al. [2012a]. Особый упор был сделан на связь предбуревых явлений с поведением ионосферы во время самой бури. Они обнаружили, что умеренные возмущения ионосферного слоя  $F2$  в

предбуревой период могут предвещать сильное ионосферное возмущение в течение главной фазы геомагнитной бури. Реакция ионосферного слоя  $F2$  в низких и средних широтах не отличается существенно в период главной фазы бури и в предбуревой период. Ионосферная реакция в течение предбуревых периодов выглядит удивительной. Adekoya et al. [2012a] обнаружили, что слабые и умеренные отрицательные фазы наблюдались в предбуревой период на всех станциях в низких и средних широтах.

Adekoya et al. [2012b] предприняли исследование умеренной геомагнитной бури 2–6 апреля 2004 г. ( $Dst_{min} = -101$  нТл), используя данные наземных ионозондов на средних широтах. Последние были разбиты на высокие средние и низкие средние широты. Авторы обнаружили, что поведение  $foF2$  в течение главной фазы магнитной бури зависит от поведения  $foF2$  в предбуревой период (различным образом для разных широтных зон). На низко-среднеширотных станциях положительно-отрицательная фаза в поведении  $Ne$  (ПО буря), сформировавшаяся в предбуревой период, предвещает интенсивную отрицательную бурю во время главной фазы магнитной бури. На высоко-средних и низко-средних широтах ПО и ОП ионосферные бури в предбуревой период предвещают сильную отрицательную фазу и интенсивную положительную фазу, соответственно, во время главной фазы магнитной бури.

Подробный анализ предбуревых эффектов в  $foF2$  во время 6 магнитных бурь в 2000–2005 гг. по данным 8 станций ВЗ, расположенных в диапазоне широт от  $33^\circ$  S до  $36^\circ$  N, был выполнен в работе [Adekoya et al., 2013]. Авторы получили, что перед бурей 6 апреля 2000 г. (SC в 12:00 UT) на ст. Darwin ( $13^\circ$  S) максимальное значение  $\Delta foF2$  составляло 55% в 06:00 UT. Это значение превышало 20% в течение 5 ч в первой половине дня 6 апреля. За 2 ч до SC бури 15 июля 2000 г. величина  $\Delta foF2$  на ст. Point Arguello ( $36^\circ$  N) составляла  $-40\%$ .

Согласно Adekoya et al. [2013] во время бури 17 сентября 2000 г. (SC в 13:30 UT) величины  $\Delta foF2$  на ст. Darwin достигали 130% в 06:00 UT 16 и 17 сентября. В общей сложности 16 и 17 сентября (до SC) величина  $\Delta foF2$  превышала 60% в течение 22 часов. Во время той же бури в 19:00 UT 16 сентября на ст. Louisvale ( $29^\circ$  N)  $\Delta foF2$  была отрицательной ( $-50\%$ ).

Перед бурей 30 марта 2000 г. (SC в 23:00 UT) величина  $\Delta foF2$  составляла  $\sim 30\%$  с 07:00 UT до 12:00 UT на ст. Dyess ( $32^\circ$  N) и 20–30% с 02:00 UT до 13:00 UT на ст. Eglin ( $30^\circ$  N), тогда как на ст. Darwin наблюдался пик  $\Delta foF2$  около 75% примерно за 6 ч до SC. Перед бурей 11 апреля 2001 г. (SC в 12:00 UT) на ст. Eglin зарегистрированы пики  $\Delta foF2$ , достигавшие 60% в 07:00 UT 10 апреля и 45% в 05:00 UT 11 апреля. До SC бури 24 августа

2005 г. (00:30 UT) на ст. Puerto Rico (19° N) величина  $\Delta foF2$  в 22:00–23:00 UT 23 августа составляла –60%.

Mahrous [2007] рассмотрел реакцию  $foF2$  на очень сильную бурю 21 октября 1999 г. (SC в 22:00 UT,  $Dst_{min} = -240$  нТл), усреднив наблюдения на 11 станциях ВЗ в диапазоне широт от 60° N до 52° S. Он получил, что по усредненным данным первое возрастание  $\Delta foF2$  началось в 20:00 UT 20 октября и достигло максимума в 30% в 00:00 UT 21 октября, а затем  $\Delta foF2$  уменьшалась в течение 3 часов.

Vakare and Chukwuma [2010] проанализировали данные двух геомагнитных бурь (14 апреля 2006 г. и 24 августа 2005 г.) на ионосферных станциях Американского региона. Они обнаружили положительную фазу ионосферной бури с  $\Delta foF2$  от 20 до 30% с максимумом примерно за 3 ч до SC магнитной бури 14 апреля на всех станциях (Boulder, Dyess, Eglin, и Puerto Rico). Во время бури 24 августа на всех станциях наблюдалась отрицательная фаза с максимумом ~50% примерно за 8 ч до SC. Следует отметить, однако, что оценки наличия или отсутствия ионосферных эффектов до рассматриваемой магнитной бури зависит от того, в какой момент UT принимается SC. Индекс  $Dst$  демонстрировал небольшой рост (до 32 нТл) в интервале с 00:00 UT до 08:00 UT, когда началось его резкое падение. Если, как часто делается, принять за SC момент начала резкого падения  $Dst$ , то приведенные выше изменения критической частоты относятся к периоду до SC и представляют интерес для нашего рассмотрения. Если же принять за SC момент 00:00 UT, то указанные выше величины  $\Delta foF2$  приходятся на сам период бури и к нашему рассмотрению отношения не имеют.

Поведение  $foF2$  во время той же бури 24 августа 2005 г. анализировали Adebesein and Adekoaya [2013]. Они также обнаружили отрицательную фазу примерно за 3 ч до SC с амплитудой 30–40% на станциях Darwin и Puerto Rico, но не обнаружили существенных отклонений  $foF2$  от спокойных величин на станциях Learmonth и Dyess. На ст. Eglin наблюдались положительные величины  $\Delta foF2$  от 20 до 40%. Указанные величины  $\Delta foF2$  относятся к периоду до 00:00 UT, т.е. заведомо до начала магнитной бури.

Adekoaya and Adebesein [2015] анализировали 6 очень сильных бурь 2000–2005 гг. по данным ВЗ на низко- и среднеширотных станциях. Буря 6 апреля 2000 г. ( $Dst_{min} = -288$  нТл) началась в 12:00 UT. Уже утром 5 апреля на ст. Darwin (13° S) в течение нескольких часов наблюдались отрицательные величины  $\Delta foF2$  (–34% в 03:00 UT). Утром 6 апреля было зарегистрировано положительное возмущение  $foF2$  с максимумом  $\Delta foF2 = 54\%$  в 06:00 UT). Во время очень сильной бури

15 июля 2000 г. ( $Dst_{min} = -301$  нТл) на ст. Learmonth (22° S) величина  $\Delta foF2$  поднималась до +42% за 12 ч до SC, на ст. Grahamstown она опускалась до примерно –30% за 9 ч до SC, а на ст. Juliusruh (55° N) она держалась на уровне –30% в период от 5 до 9 ч до SC.

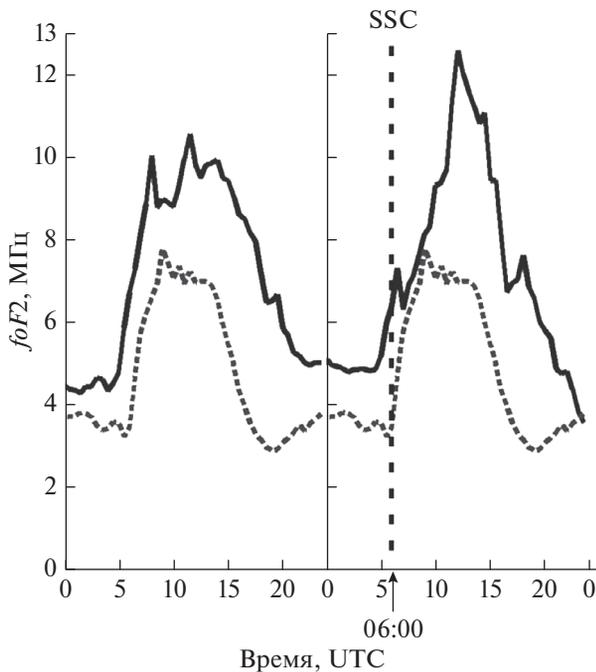
Магнитная буря с  $Dst_{min} = -201$  нТл началась в 13:00 UT 17 сентября 2000 г. на ст. Darwin, и 16 и 17 сентября с 00:00 UT до 12:00 UT наблюдалось очень сильное положительное возмущение с  $\Delta foF2 \sim 170\%$ . Между этими положительными возмущениями величина  $\Delta foF2$  опускалась до –40% в 18:00 UT 16 сентября. На станции Juliusruh наблюдалось отрицательное возмущение ( $\Delta foF2 = -60\%$  за 7 ч до SC).

Перед бурей 31 марта 2001 г. ( $Dst_{min} = -387$  нТл; SC в 00:00 UT) на ст. Darwin также наблюдались сильные положительные возмущения в 17:00 UT (+90% 29 марта и +80% 30 марта). На ст. Grahamstown (33° S) величина  $\Delta foF2$  опускалась до –40% в 23:00 UT 29 марта. В течение двух суток перед бурей 11 апреля 2001 г. ( $Dst_{min} = -271$  нТл; SC в 12:00 UT) на ст. Learmonth и 9, и 10 числа наблюдались отрицательные возмущения с минимумом  $\Delta foF2 = -55\%$  около 22:00 UT. На ст. Juliusruh наблюдалось положительное возмущение с максимумом +55% в 05:00 UT 11 апреля.

Перед бурей 24 августа 2005 г. ( $Dst_{min} = -216$  нТл; SC в 03:00 UT) только на ст. Darwin наблюдались предбуревые эффекты. Величина  $\Delta foF2$  достигала +45% в 12:00 UT 22 августа.

Buresova et al. [2014] рассмотрели слабые геомагнитные бури в период минимума солнечной активности. Во время возмущения 4–9 января 2008 г. они обнаружили на ст. Pruhonice положительное возмущение с  $\Delta foF2$ , достигающим 40%, за несколько часов до начала заметного роста  $Dst$ , которое затем сменилось медленным падением. На станции Grahamstown существенных отклонений  $foF2$  от медианы не наблюдалось. Положительные величины  $\Delta foF2$  с амплитудой от 20 до 40% были зафиксированы примерно в то же время и на станциях американского региона (Millstone Hill и Port Stanley).

Mandrikova et al. [2018] проанализировали поведение  $foF2$  на трех станциях (Паратунка, Wakkanai и Norfolk) во время трех бурь 2015 г. Они применили метод определения отклонения  $foF2$  от спокойных условий, несколько отличающийся от применяемого обычно. Описание метода можно найти в работе [Mandrikova et al., 2015]. Для всех трех бурь на всех трех станциях Mandrikova et al. [2018] получили сильные и длительные положительные возмущения  $foF2$  до SC соответствующей магнитной бури. Длительность этих возмущений составляла ~40 ч для бури 17 марта 2015 г., ~8 ч для бури 19 декабря и 22–24 ч для бури 17 февраля 2015 г.



**Рис. 5.** Изменение  $foF2$  в течение 16–17 марта 2013 г. согласно Verényi et al. [2018]. Сплошная кривая — измерения 16 и 17 марта, штриховая кривая — фоновые значения.

Согласно Verényi et al. [2018] во время сильной бури 12 ноября 2012 г. в течение двух суток, предшествующих SC, величины  $foF2$  на ст. Nagycenk (Венгрия) в дневное время существенно превышали фоновые значения. Определить величины  $\Delta foF2$  не представлялось возможным, поскольку критические частоты выходили за верхний предел чувствительности ионозонда. Во время бури 17 марта 2013 г. по измерениям на той же станции в течение суток, предшествовавших SC, величина  $foF2$  в дневное время была  $\sim 10$  МГц, тогда как фоновое значение  $foF2$  было  $7\text{--}7.5$  МГц (см. рис. 5, взятый из работы Verényi et al. [2018]).

Согласно Ghodpage et al. [2018] измерения методом ВЗ на низкоширотной ст. Tigranelveli показывают увеличение  $foF2$  ночью 17 марта с 05:00 до 07:00 LT (очень сильная магнитная буря с минимальным  $Dst \sim 220$  нТл началась в 09:45 LT 17 марта) по сравнению с ночью 16 марта (спокойные сутки). Согласно рис. 4 в указанной статье в первой половине дня 16 марта наблюдалось уменьшение  $foF2$  с минимумом  $\sim 6$  МГц в 11:00 LT. Хотя поведение  $foF2$  в другой спокойный день в работе не обсуждается, указанный рисунок показывает, что невозмущенная критическая частота должна была в это время быть не ниже 10 МГц.

Grandin et al. [2015] провели статистический анализ методом наложенных эпох 95 событий прихода к Земле высокоскоростных потоков солнечного ветра. Они рассматривали реакцию

ионосферы по измерениям на ионосферой ст. Sodankylä. В качестве начала отсчета (момент 0) был взят момент прихода указанных потоков к магнитопаузе. Как видно из рис. 1 в указанной статье, этот момент практически совпадает с моментом SC, определяемым по  $SYM-H$ -индексу. Результаты анализа показывают, что в течение суток, предшествующих моменту 0, (день  $-1$ ) верхний и нижний квартили отклоняются от медианы примерно на 1 МГц вверх и вниз, соответственно, тогда как в течение предыдущего дня (день  $-2$ ) все три кривые совпадают или отличаются очень мало. Это говорит о том, что в течение суток, предшествующих SC, достаточно часто наблюдаются как положительные, так и отрицательные отклонения  $foF2$  от медианы.

Указанный эффект хорошо выражен для зимних месяцев, тогда как он значительно меньше летом и почти отсутствует в равноденствие.

В работе [Lei et al., 2018] анализировалась магнитная буря с SC в 21:00 UT 7 сентября и минимальным  $Dst$ -индексом, равным 147 нТл, 8 сентября. Материалом для анализа служили наблюдения методом ВЗ на трех ионосферных станциях Китая и измерения TEC (результаты см. в следующем параграфе). Данные ВЗ показали, что на ст. Shaouang ( $27^\circ$  N) в период 03:00–11:00 UT 7 сентября наблюдалось значительное превышение  $NmF2$  над месячной медианой (максимальная величина  $\Delta NmF2$  достигала 120%). На станциях Sanya ( $18^\circ$  N) и Wuhan ( $31^\circ$  N) заметных отклонений  $NmF2$  от медианы не наблюдалось.

Анализируя сильную магнитную бурю 15 мая 2005 г., Galav et al. [2014] привели данные наблюдений методом ВЗ на ст. Алма-Ата. Из этих данных следует (см. рис. 2 в указанной работе), что величины  $foF2$  в течение  $\sim 3$  ч были существенно ниже, чем среднее по спокойным дням месяца значение  $foF2$ , и находились далеко за пределами полосы  $\pm 2\sigma$ . Минимальная величина  $foF2$  составляла в этот период  $\sim 4.2$  МГц примерно за 7 ч до SC магнитной бури.

Zolotukhina et al. [2017] подробно анализировали магнитную бурю 17–19 марта 2015 г. Как следует из рис. 7 этой работы, на ст. Диксон в течение 3 ч до SC (05:00 UT 17 марта) наблюдалось превышение наблюдаемых величин  $foF2$  над фоновыми значениями. Амплитуда этого превышения достигала максимальной величины порядка 30% за час до SC.

Polekh et al. [2017] рассматривали реакцию ионосферы на ту же бурю 17–19 марта 2015 г. по данным TEC и наблюдений методом ВЗ на станциях дальневосточного региона. Хотя основной акцент в указанной работе сделан на период самой бури, из рис. 3 в этой работе следует, что на ст. Жиганск ( $66^\circ$  N) за 5 ч до SC величина  $\Delta NmF2$  составляла 50% и постепенно уменьшалась до ну-

ля к моменту SC. На станции Якутск ( $62^\circ$  N) величина  $\Delta NmF2$  за 5 ч до SC была  $\sim 40\%$  и опустилась до нуля примерно за час до SC. На более южных станциях величины  $\Delta NmF2$  находились в этот период в пределах  $\pm 20\%$ .

### 3.2. Поведение $\Delta TEC$

Yizengaw et al. [2004] анализировали реакцию TEC по наблюдениям в семи приемных пунктах системы GPS в южном полушарии на сильную магнитную бурю 22 сентября 1999 г. Согласно этой работе в течение 12 ч до SC в 4 пунктах с южной широтой более  $35^\circ$  наблюдались отрицательные отклонения TEC от спокойных значений (величины  $\Delta TEC$  составляли от  $-30$  до  $-85\%$ , причем на ст. McMurdo ( $78^\circ$  S) величина  $\Delta TEC$  держалась на уровне около  $-80\%$  в течение 9 ч).

Для выявления поведения предбуревых ионосферных возмущений при низкой магнитной активности в низких широтах Liu et al. [2008a] проанализировали отобранные низкоширотные явления возрастания TEC, используя измерения TEC приемниками GPS глобальной и региональной сети. Они анализировали поведение TEC во время бурь 10 февраля 2004 г. ( $SYM-H_{min} = -100$  нТл), 21 января 2004 г. ( $SYM-H_{min} = -140$  нТл) и 4 марта 2001 г. ( $SYM-H_{min} = -75$  нТл). Они обнаружили, что низкоширотные возрастания TEC при длительном периоде низкой геомагнитной активности до бури наблюдались для всех трех рассмотренных бурь. Увеличение TEC,  $\Delta TEC$ , были  $\sim 20$ – $30$  TECU перед бурей 10 февраля 2004 г. Отклонения TEC от медианы  $\sim 20$ – $30$  TECU наблюдались в течение 1.5 дней перед бурей 21 января 2004 г. и  $\sim 30$ – $40$  TECU перед бурей 4 марта 2001 г.

Очень важный факт, обнаруженный Liu et al. [2008a], состоял в том, что эффект носил региональный характер: вышеуказанные величины  $\Delta TEC$  наблюдались лишь в узкой полосе долгот с центром на  $120^\circ$  E. Этот факт очень важен для исследования природы предбуревых эффектов. Локальный характер увеличения TEC, обнаруженный Liu et al. [2008a], делает более трудной связь этого увеличения с изменениями глобальных параметров космической погоды и указывает на их связь с региональными эффектами, вероятно, типа “воздействия снизу” (например, осцилляций планетарных волн).

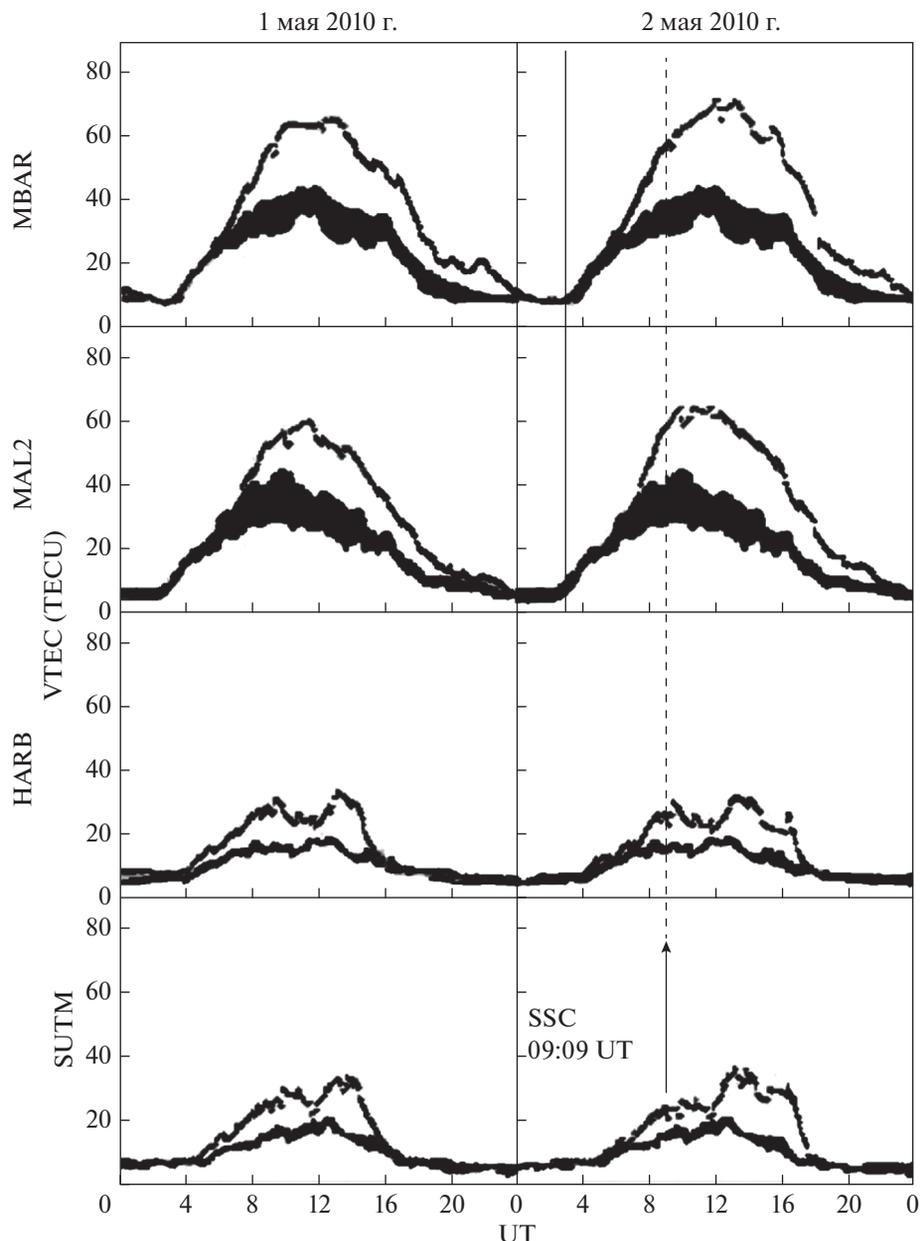
Liu et al. [2008b] исследовали увеличение электронной концентрации перед тремя другими геомагнитными бурями (21 апреля 2001 г. ( $Dst_{min} = -120$  нТл), 29 мая 2003 г. ( $Dst_{min} = -150$  нТл) и 22 сентября 2001 г. ( $Dst_{min} = -60$  нТл)), используя наблюдения с помощью ионозондов и измерения TEC вдоль меридиана  $120^\circ$  E в азиатско-австралийском секторе. Все три события демон-

стрируют совершенно одинаковые особенности. Сильные предбуревые возрастания  $foF2$  и TEC наблюдались одновременно для этих бурь. Возрастания демонстрировали широтную зависимость и имели тенденцию появления в низких широтах с максимумами возле северного и южного горбов экваториальной аномалии ионизации (ЭАИ) и минимумами в области экватора. Авторы утверждают, что широтная зависимость, которую они получили, отличается от результатов, полученных Buresova and Laštovička [2007], которые не нашли широтного эффекта в европейском регионе. Однако различие в широтных и долготных интервалах, рассматривавшихся в обеих статьях, может дать естественное объяснение различию полученных зависимостей.

Существование региональных эффектов в предбуревых возрастаниях  $foF2$  и TEC было также подтверждено Saranya et al. [2011]. Они исследовали предбуревые эффекты над экваториальной станцией Trivandrum и низкоширотной станцией Waltair для 18 бурь с  $Dst_{min} < -100$  нТл в период 2000–2005 гг. Было обнаружено, что обычно наблюдается существенное возрастание  $foF2$  и TEC перед началом бури над станцией Waltair, тогда как над станцией Trivandrum никакого возрастания не наблюдается. Saranya et al. [2011] пришли к выводу, что величина индекса  $Dst$  не влияет на явление предбуревых возрастания. Поскольку предбуревое возрастание наблюдалось как днем, так и ночью, ясно, что солнечные вспышки не могут быть основным двигателем механизма, ответственного за предбуревые эффекты.

В упоминавшейся в параграфе 3.1 статье [Liu et al., 2014] во время бури 15 июля 2012 г. (SC в 00:00 UT) анализировались также величины TEC в дальневосточном, австралийском и американском регионах. Как следует из рис. 2 в указанной статье, на широтах от  $0^\circ$  до  $50^\circ$  N с 12:00 UT 14 июля наблюдались локальные повышения TEC с  $\Delta TEC \sim 20$ – $30\%$ . Из рисунка 6 в той же статье следует, что в американском регионе возрастание  $\Delta TEC$  до  $50$ – $60\%$  началось на широтах  $0^\circ$ – $60^\circ$  N примерно за 5 ч до SC.

В работе [de Abreu et al., 2014] были детально проанализированы вариации величин VTEC (TEC в вертикальном столбе ионосферы), измеренных с помощью четырех спутников системы GPS на сети приемных пунктов южно-американского и африканского регионов во время двух умеренных геомагнитных бурь 2 и 29 мая 2010 г. Наиболее интересный для данной работы результат состоит в том, что de Abreu et al. [2014] обнаружили положительное возмущение VTEC 1 мая 2010 г. (спокойный в геомагнитном отношении день) с максимумом примерно за 17 часов до SC магнитной бури. Как указывают сами авторы (это видно и на рис. 3 в работе [de Abreu et al., 2014]),



**Рис. 6.** Изменение VTEC 1 и 2 мая 2010 г. по данным измерений на 4 пунктах (из работы [de Abreu et al., 2014]). Кривая – реальные наблюдения, полоса – суточный ход VTEC в спокойный день  $\pm$  стандартное отклонение. Коды приемных пунктов GPS: MBAR – Uganda, MAL2 – Kenya, HARB – Pretoria, SUTM – Sutherland.

это положительное возмущение наблюдалось в указанное время на средних и в низких широтах африканского сектора. Амплитуда возмущения уменьшалась с уменьшением широты, и на приемных пунктах экваториальной зоны оно не наблюдалось. Не наблюдалось заметных предбуревых эффектов в VTEC по измерениям на пунктах южно-американского сектора. Во время магнитной бури с постепенным началом 29 мая 2010 г. предбуревых эффектов в VTEC не наблюдалось.

Наиболее наглядный пример изменения VTEC перед бурей 2 мая 2010 г. представлен на рис. 6, взятом из работы [de Abreu et al., 2014]. Хорошо видно (эту цифру приводят и сами авторы), что по измерениям в пунктах MBAR и MAL2 возрастание VTEC 1 мая составляло  $\sim 70\%$  по сравнению со спокойными условиями (т.е.  $\Delta VTEC \sim 70\%$ ).

В работе [Shimeis et al., 2015] рассматривались вариации TEC, измеренные на евро-африканской цепочке приемных станций во время гео-

магнитной бури 5 апреля 2010 г. На рисунке 3 в указанной работе, где приводятся величины ТЕС для ряда приемных станций для периода бури и спокойного дня, можно видеть, что данные по крайней мере четырех станций демонстрируют превышение величин ТЕС в период за 24–18 ч до SC над величинами ТЕС в спокойный день. Амплитуду этих превышений можно визуальным образом оценить в 20–50%.

В работе [Adebiyi et al., 2015] приведены измерения ТЕС в четырех пунктах: два в северном (Hailsham (HERS) and Penc (PENC)) и два в южном (Port aux Francais (KERG) and Sutherland (SUTH)) полушарии во время 4 умеренных геомагнитных бурь. Перед всеми четырьмя бурями до SC наблюдались величины  $\Delta$ ТЕС того или иного знака. Как отмечают сами авторы, наиболее сильные предбуревые эффекты наблюдались перед бурей 11 октября 2010 г. (SC в 06:00 UT). В пункте HERS длительное отклонение  $\Delta$ ТЕС с амплитудой –35% наблюдалось примерно за сутки до SC. Следующее отрицательное отклонение с амплитудой, превышавшей 40%, началось за 8 часов до SC и длилось до начала бури. Аналогичное отрицательное возмущение  $\Delta$ ТЕС наблюдалось в те же часы в пункте PENC. В пункте KERG отрицательное возмущение началось за 14 часов до SC, длилось до начала бури и имело амплитуду, достигавшую 70%. В пункте SUTH с 05:00 UT 10 октября наблюдались “всплески” положительного возмущения длительностью 2–3 часа и амплитудой до 40–60%.

Аналогичные положительные “всплески”  $\Delta$ ТЕС длительностью 2–3 часа и амплитудой от 40 до 80% наблюдались в пункте PENC с 00:00 UT 29 ноября 2006 г. до SC геомагнитной бури в 22:00 UT 29 ноября. В пункте HERS устойчивое положительное возмущение  $\Delta$ ТЕС с амплитудой, достигавшей 40%, наблюдалось с 10:00 UT 29 ноября до самого SC.

Blagoveshchensky and Sergeeva [2019] подробно проанализировали сильную магнитную бурю 7 сентября 2017 г., используя данные как вертикального и наклонного зондирования ионосферы, так и измерений ТЕС. Основной акцент в работе был сделан на влияние указанной бури на условия распространения радиоволн, поэтому обычных данных о поведении  $foF2$  со временем не приводится. Из единственного рисунка, где приводятся данные по  $\Delta$ ТЕС (рис. 9 в указанной работе), можно сделать следующий вывод. По измерениям в пункте Свердловск 6 сентября (более чем за сутки до SC в 20:00 UT 7 сентября) наблюдалось возрастание  $\Delta$ ТЕС до ~30%. Следующее возрастание с максимумом, превышающим 50%, наблюдалось 7 сентября примерно за 8 часов до SC.

В упоминавшейся в предыдущем параграфе работе [Lei et al., 2018] анализировалась магнит-

ная буря с SC в 21:00 UT 7 сентября 2017 г. Данные по ТЕС были получены с 25 приемных пунктов в северном и 6 пунктов в южном полушарии. В приемных пунктах JXNC (29° N), HSKD (31° N) и MNBG (54° N) в период с 03:00 до 09:00 UT 7 сентября наблюдались превышения наблюдаемых величин ТЕС над медианой (величина  $\Delta$ ТЕС составляла 20–30%). На низкоширотных станциях DLTV (12° N) и SYBG (18° N) 6 сентября наблюдались небольшие отрицательные отклонения ТЕС от медианы. Положительные отклонения ТЕС наблюдались в течение 7 сентября на всех пунктах южного полушария.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из сказанного в предыдущих параграфах следует, что изменения критической частоты слоя  $F2$ ,  $foF2$ , и полного содержания электронов в столбе ионосферы, ТЕС, довольно часто регистрируются до начала магнитной бури SC. Эти изменения, отнесенные к поведению  $foF2$  и ТЕС в геомагнитно-спокойные дни ( $\Delta foF2$ ,  $\Delta$ ТЕС), в среднем составляют 30–60%, но в отдельных случаях могут быть значительно выше, превышая 100%. В большинстве случаев эти отклонения имеют положительный знак, однако зарегистрированы случаи и отрицательных отклонений.

Длительность указанных изменений может составлять от 2–3 ч до 6–8 ч. Интервал времени между регистрацией максимальных величин отклонений и моментом SC (начало магнитной бури) в различных случаях различен. Наиболее часто встречаются указания на предбуревые изменения  $foF2$  и ТЕС за 3–4 ч до SC. Однако встречаются случаи, когда рассматриваемые изменения предвещают SC на много часов и даже на сутки. Зарегистрированы случаи, когда заметное изменение  $foF2$  или ТЕС, наблюдавшееся за несколько часов до SC, регистрировалось также и в течение суток, предшествующих дню SC.

Ясности в вопросе о зависимости появления значительных величин  $\Delta foF2$  или  $\Delta$ ТЕС от широты нет. Хотя попытки найти такую зависимость для ряда бурь предпринимались в американском, евро-африканском и в дальневосточном долготных секторах (см. предыдущие параграфы), нарисовать четкую картину такой зависимости не удается.

Вопрос о физических механизмах предбуревых ионосферных эффектов совершенно не ясен. Понятно, что эти эффекты должны быть связаны с какими-то процессами в околоземном космическом пространстве, магнитосфере и ионосфере, но вопрос, с какими именно процессами, остается открытым. Данилов и Белик [1991] обращали внимание на то, что дневной касп начинает свое движение к экватору за несколько часов до появ-

ления других признаков магнитного возмущения. Во многих работах высказывались предположения, что механизмы предбуриевых ионосферных эффектов связаны с электрическими полями. В монографии Благовещенского [2012] подробно рассматриваются различные промежуточные механизмы возможного воздействия на ионосферу так называемых “межпланетных предупредительных областей”.

Очевидно, что вопрос о предбуриевых изменениях в области  $F$  ионосферы требует дальнейшего исследования. В следующей части работы авторы планируют проанализировать предбуриевые изменения  $foF2$  по данным двух европейских станций ВЗ Slough (Chilton) и Juliusruh для большого числа бурь с целью выявления зависимости предбуриевых эффектов от различных внешних факторов (местное время, сезон, солнечная активность и т.п.). Следующим шагом работы планируется сделать анализ предбуриевых эффектов для ограниченного числа специально отобранных магнитных бурь по данным глобальной сети станций ВЗ для выявления широтной и долготной зависимости этих эффектов.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, грант № 18-05-80023.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Благовещенский Д. Космическая погода и ионосферные радиоволны. Saarbrücken –Germany: Palmarium Academic Publishing. 123 p. 2012.
- Благовещенский Д.В. Вариации критической частоты ионосферы за периоды магнитосферных бурь 2008–2012 гг. в авроральных широтах // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 54. № 5. С. 611–618. 2014.
- Благовещенский Д.В., Калишин А.С. Механизм возрастания критической частоты ионосферы до начала суббури // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 49. № 3. С. 213–223. 2009.
- Данилов А.Д. Реакция области  $F$  на геомагнитные возмущения (обзор) // Гелиогеофизические исследования. Вып. 5. С. 1–33. 2013.
- Данилов А.Д., Белик Л.Д. Термосферно-ионосферное взаимодействие во время геомагнитных бурь // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 31. № 2. С. 209–222. 1991.
- Adebisin B.O., Adekoya B.J.  $F2$ -layer response to a storm time disturbance at equatorial/low- and mid-latitude // Sun and Geosphere. V. 8. № 1. P. 33–39. 2013.
- Adebisi S.J., Adimula I.A., Oladipo O.A. Investigation on mid-latitude stations to storm-time variations of GPS-TEC // Adv. Space Res. V. 55. P. 1339–1348. 2015.
- Adekoya B.J., Adebisin B.O. Ionospheric and solar wind variation during magnetic storm onset and main phase at low- and mid-latitudes // Acta Geophys. V. 63. № 4. P. 1150–1180. 2015. <https://doi.org/10.1515/acgeo-2015-0020>
- Adekoya B.J., Chukwuma V.U., Bakare N.O., David T.W. On the effects of geomagnetic storms and pre storm phenomena on low and middle latitude ionospheric  $F2$  // Astrophys. Space Sci. V. 340. № 2. P. 217–235. 2012a.
- Adekoya B.J., Chukwuma V.U., Bakare N.O., David T.W. The effects of geomagnetic storm on middle latitude ionospheric  $F2$  variations during storm of April (2–6), 2004 // Indian J. Radio Space. V. 41. № 6. P. 606–616. 2012b.
- Adekoya B.J., Chukwuma V.U., Salako S.A. On the coexistence of positive and negative ionospheric storm during geomagnetic storms and pre storm phenomena on low and low-mid latitude ionospheric  $F2$  / Book of Proc. of 5th Annual Conf. of the Nigeria Union of Radio Science (NURS) an affiliate of International Union of Radio Science Nigeria (URSI). P. 15–28. ISBN: 978-978-934-657-8. 2013.
- Araujo-Pradere E.A., Fuller-Rowell T.J. STORM: An empirical storm-time ionospheric correction model. 2. Validation // Radio Sci. V. 37. № 5. P. 1071. 2002. <https://doi.org/10.1029/2002RS002620>
- de Abreu A.J., Fagundes P.R., Gende M., Bolaji O.S., de Jesus R., Brunini C. Investigation of ionospheric response to two moderate geomagnetic storms using GPS-TEC measurements in the South American and African sectors during the ascending phase of solar cycle 24 // Adv. Space Res. V. 53. P. 1313–1328. 2014.
- Bakare N.O., Chukwuma V.U. Storm time variation of positive and negative ionospheric effect during the intense geomagnetic storm // Indian J. Radio Space. V. 39. P. 150–155. 2010.
- Berényi K.A., Barta V., Kis Á. Midlatitude ionospheric  $F2$ -layer response to eruptive solar events-caused geomagnetic disturbances over Hungary during the maximum of the solar cycle 24: A case study // Adv. Space Res. V. 61. № 5. P. 1230–1243. 2018.
- Blagoveshchensky D.V., Sergeeva M.A. Impact of geomagnetic storm of September 7–8, 2017 on ionosphere and HF propagation: A multi-instrument study // Adv. Space Res. V. 63. P. 239–256. 2019.
- Blagoveshchensky D.V., Maltseva O.A., Rodger A.S. Ionosphere dynamics over Europe and western Asia during magnetospheric substorms 1998–1999 // Ann. Geophysicae. V. 21. № 5. P. 1141–1151. 2003.
- Blagoveshchensky D.V., Sergeeva M.A., Kozlovsky A. Ionospheric parameters as the precursors of disturbed geomagnetic conditions // Adv. Space Res. V. 60. № 11. P. 2437–2451. 2017.
- Buonsanto M.J. Ionospheric storms – A review // Space Sci. Revs. V. 88. P. 563–601. 1999.
- Buresova D., Laštovička J. Pre-storm enhancements of  $foF2$  above Europe // Adv. Space Res. V. 39. P. 1298–1303. 2007.
- Buresova D., Laštovička J. Pre-storm electron density enhancements at middle latitudes // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 70. doi 2008.01.014. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jastp>
- Buresova D., Laštovička J., Hejda P., Bochnicek J. Ionospheric disturbances under low solar activity conditions // Adv. Space Res. V. 54. P. 185–196. 2014.
- Danilov A.D.  $F2$ -region response to geomagnetic disturbances // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 63. P. 441–449. 2001.

- *Danilov A.* Ionospheric F2-region response to geomagnetic disturbances // *Adv. Space Res.* V. 52. P. 343–366. 2013.
- *Danilov A.D., Belik L.D.* Thermospheric composition and the positive phase of an ionospheric storm // *Adv. Space Res.* V. 12. № 10. P. 257–260. 1992.
- *Danilov A.D., Laštovička J.* Effects of geomagnetic storms on the ionosphere and atmosphere // *Int. J. Geomag. Aeron.* V. 2. P. 209–224. 2001.
- *Galav P., Rao S.S., Sharma S., Gordiyenko G., Pandey R.* Ionospheric response to the geomagnetic storm of 15 May 2005 over midlatitudes in the day and night sectors simultaneously // *J. Geophys. Res. – Space.* V. 119. P. 5020–5031. 2014.  
<https://doi.org/10.1002/2013JA019679>
- *Ghodpage R.N., Patil P.T., Gurav O.B., Gurubaran S., Sharma A.K.* Ionospheric response to major storm of 17th March 2015 using multi-instrument data over low latitude station Kolhapur (16.8° N, 74.2° E, 10.6° dip. Lat.) // *Adv. Space Res.* V. 62. № 3. P. 624–637. 2018.
- *Grandin M., Aikio A.T., Kozlovsky A., Ulich T., Raita T.* Effects of solar wind high-speed streams on the high-latitude ionosphere: Superposed epoch study // *J. Geophys. Res. – Space.* V. 120. P. 10,669–10,687. 2015.  
<https://doi.org/10.1002/2015JA021785>
- *Kane R.P.* Storm-time variations of F2 // *Ann. Geophys.* V. 29. № 1. P. 25–42. 1973a.
- *Kane R.P.* Global evolution of F2-region storms // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 35. P. 1953–1966. 1973b.
- *Kane R.P.* Global evolution of the ionospheric electron content during some geomagnetic storms // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 37. P. 601–611. 1975.
- *Kane R.P.* Ionospheric foF2 anomalies during some intense geomagnetic storms // *Ann. Geophysicae.* V. 23. № 7. P. 2487–2499. 2005.
- *Lei J., Huang F., Chen X. et al.* Was magnetic storm the only driver of the long-duration enhancements of daytime total electron content in the Asian-Australian sector between 7 and 12 September 2017? // *J. Geophys. Res.–Space.* V. 123. № 4. P. 3217–3232. 2018.  
<https://doi.org/10.1029/2017JA025166>
- *Liu L., Wan W., Zhang M.-L., Zhao B.* Case study on total electron content enhancements at low latitudes during low geomagnetic activities before the storms // *Ann. Geophysicae.* V. 26. № 4. P. 893–903. 2008a.
- *Liu L., Wan W., Zhang M.-L., Zhao B., Ning B.* Pre-storm enhancements in NmF2 and total electron content at low latitudes // *J. Geophys. Res. – Space.* (1978–2012). V. 113. № A2. 2008b.  
<https://doi.org/10.1029/2007JA012832>
- *Liu J., Liu L., Nakamura T., Zhao B., Ning B., Yoshikawa A.* A case study of ionospheric storm effects during long-lasting southward IMF Bz-driven geomagnetic storm // *J. Geophys. Res. – Space.* V. 119. P. 7716–7731. 2014.  
<https://doi.org/10.1002/2014JA020273>
- *Mahrous A.* Global ionospheric response to the magnetic storm of 21 October 1999 // *Australian Journal of Basic and Applied Sciences.* V. 1. № 4. P. 678–686. 2007.
- *Mandrikova O.V., Fetisova N.V., Polozov Y.A., Solovov I.S., Kupriyanov M.S.* Method for modeling of the components of ionospheric parameter time variations and detection of anomalies in the ionosphere // *Earth Planets Space.* V. 67. P. 131. 2015.  
<https://doi.org/10.1186/s40623-015-0301-4>
- *Mandrikova O., Polozov Yu., Fetisova N., Zalyaev T.* Analysis of the dynamics of ionospheric parameters during periods of increased solar activity and magnetic storms // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 181. P. 116–126. 2018.
- *Mansilla G.A.* Ionospheric effects of an intense geomagnetic storm // *Stud. Geophys. Geod.* V. 51. № 4. P. 563–574. 2007.
- *Mansilla G.A.* Some ionospheric storm effects at equatorial and low latitudes // *Adv. Space Res.* V. 53. P. 1329–1336. 2014.
- *Mansilla G.A., Zossi M.M.* Ionospheric response to the 3 August 2010 geomagnetic storm at mid and mid-high latitudes // *Adv. Space Res.* V. 51. № 1. P. 50–60. 2012.
- *Mansilla G.A., Zossi M.M.* Some ionospheric storm effects at an antarctic station // *Adv. Space Res.* V. 57. P. 1319–1327. 2016.
- *Mikhailov A.V., Perrone L.* Pre-storm NmF2 enhancements at mid latitudes: Delusion or reality? // *Ann. Geophysicae.* V. 27. № 3. P. 1321–1330. 2009.
- *Nogueira P.A.B., Abdu M.A., Batista I.S., deSiqueira P.M.* Equatorial ionization anomaly and the atmospheric meridional winds during two major storms over Brazilian low latitudes // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 73. P. 1535–1543. 2011.
- *Polekh N., Zolotukhina N., Kurkin V. et al.* Dynamics of ionospheric disturbances during the 17–19 March 2015 geomagnetic storm over East Asia // *Adv. Space Res.* V. 60. № 11. P. 2464–2476. 2017.
- *Patowary R., Singh S.B., Bhuyan K.* Latitudinal variation of F2-region response to geomagnetic disturbance // *Adv. Space Res.* V. 52. P. 367–374. 2013.
- *Prolls G.* Ionospheric F-region storms / *Handbook of Atmospheric Electrodynamics.* V. 2. Ed. *H. Volland.* Boca Raton : CRC Press. P. 195–248. 1995.
- *Rees D.* Observations and modeling of ionospheric and thermospheric disturbances during major geomagnetic storms: A review // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 57. P. 1433. 1995.
- *Saranya P.L., Venkatesh K., Prasad D.S.V.V., Rama Rao P.V.S., Niranjan K.* Pre-storm behavior of NmF2 and TEC (GPS) over equatorial and low latitude stations in the Indian sector // *Adv. Space Res.* V. 48. № 2. P. 207–217. 2011.
- *Shimeis A., Borries C., Amory-Mazaudier C. et al.* TEC variations along an East Euro African chain during 5th April 2010 geomagnetic storm // *Adv. Space Res.* V. 55. P. 2239–2247. 2015.
- *Yizengaw E., Essex E.A., Birsa R.* The Southern Hemisphere and equatorial region ionization response for a 22 September 1999 severe magnetic storm // *Ann. Geophysicae.* V. 22. № 8. P. 2765–2773. 2004.
- *Zolotukhina N., Polekh N., Kurkin V. et al.* Ionospheric effects of St. Patrick's storm over Asian Russia: 17–19 March 2015 // *J. Geophys. Res.–Space.* V. 122. P. 2484–2504. 2017.  
<https://doi.org/10.1002/2016JA023180>