



ПОВЕДЕНИЕ ИОНОСФЕРНОЙ ОБЛАСТИ $F2$ ПЕРЕД ГЕОМАГНИТНОЙ БУРЕЙ

А.В. Константинова, А.Д. Данилов

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-трое 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. Приводятся некоторые результаты анализа предбуревых эффектов в $foF2$ по данным станции Slough (Chilton).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ГЕОМАГНИТНАЯ БУРЯ, ИОНОСФЕРНАЯ БУРЯ, ИОНОСФЕРНЫЙ СЛОЙ $F2$.

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] а также в недавней публикации [Данилов и Константинова, 2019].

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-трех 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 ионосферной 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 кратко пересказываем здесь основной материал 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. рис. 1, взятый из [Danilov and Belik, 1992]).

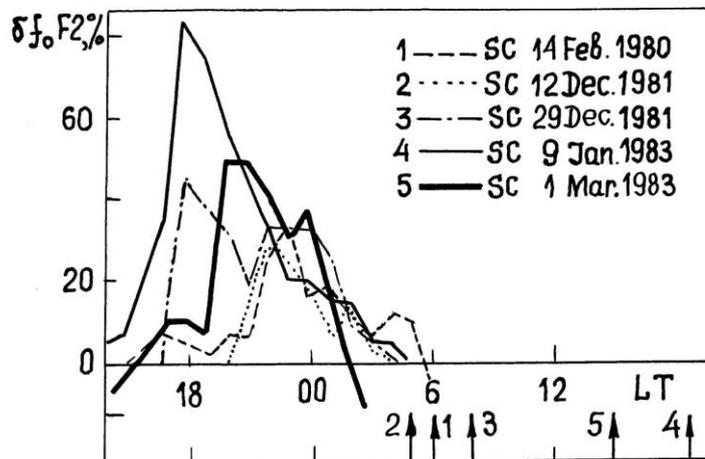


Рис. 1. Пример положительных фаз до SC магнитной бури для нескольких бурь согласно [Danilov and Belik, 1992]. Стрелками указаны соответствующие SC.

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 геомагнитной 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 параграфе 4 будут представлены предварительные результаты наших собственных исследований появления ионосферных возмущений до SC геомагнитных бурь по данным станции Slough (Chilton).

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 анализа величин полного содержания электронов в столбе ионосферы (Total electron content, TEC), получаемых с помощью различных систем позиционирования (GPS, GLONAS 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:

$$\Delta foF2 = (foF2_{\text{наб}} - foF2_{\text{спок}}) / foF2_{\text{спок}} \quad (1)$$

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

Аналогичное выражение используется обычно и для изменения TEC:

$$\Delta \text{TEC} = (\text{TEC}_{\text{наб}} - \text{TEC}_{\text{спок}}) / \text{TEC}_{\text{спок}} \quad (2)$$

Выражения (1) и (2) дают наиболее наглядное представление об отклонении критической частоты и TEC в анализируемый день от спокойных условий. К сожалению, в некоторых публикациях величины $foF2$ и TEC в спокойный (фоновый) день и в анализируемый день приводятся отдельно, и приходится самим оценивать величины $\Delta foF2$ и ΔTEC , сравнивая соответствующие рисунки.

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 ($-50 \leq Dst_{\text{min}} \leq -30$ нТ), умеренные ($-100 \leq Dst_{\text{min}} \leq -50$ нТ) и интенсивные ($Dst_{\text{min}} < -100$ нТ). Интенсивные бури, в свою очередь, подразделяются на сильные ($-200 \leq Dst_{\text{min}} \leq -100$ нТ), очень сильные ($-350 \leq Dst_{\text{min}} \leq -200$ нТ) и выдающиеся ($Dst_{\text{min}} < -350$ нТ).

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], 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. ($Dst_{\text{min}} = -200$ нТ) с предсказаниями эмпирической модели STORM [Araujo-Pradere and Fuller-Rowell, 2002]. Результаты сравнения 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 станции Sodankylä (67° N, 26° 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 часа 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 работы [Blagoveshchensky et al., 2003] на более обширном материале (72 геомагнитных возмущения, ионозонды в широтном интервале 40° – 70° N в Европе, Сибири и Северной Америке). Результаты анализа данных всех станций и всех бурь были обобщены в виде очень выразительного рисунка 2, взятого из работы [Blagoveshchensky et al., 2017].

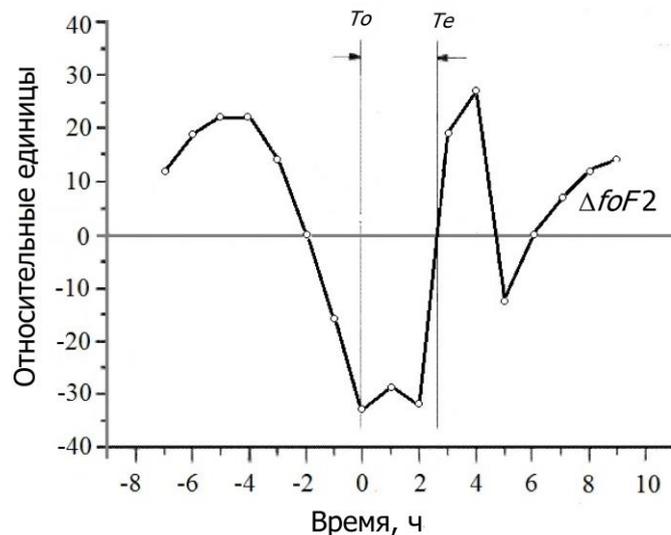


Рис. 2. Вариации величины $\Delta foF2$, усредненные по 72 бурям (из работы Blagoveshchensky et al., [2017])

Рисунок наглядно иллюстрирует приведенное выше утверждение о положительном возмущении $foF2$ с максимумом за 3-4 часа 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 ΣKp .

Проанализировав магнитные бури за 2008–2012 г. 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 $foF2$, затем 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-х суток, предвестником магнитных бурь можно считать появление первого максимума ГЭ и подобный предвестник потенциально может быть использован для прогнозирования начала развития последующей магнитосферной 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 предбуриевые возрастаниями $foF2$ ($NmF2$). Buresova and Laštovička [2007] обнаружили также, что предбуриевое возрастание $foF2$ происходит как днем, так и ночью, и выявили сезонные вариации частоты появления предбуриевых возрастаний $NmF2$. Эти возрастания имеют тенденцию чаще появляться в летнее полугодие. Число рассмотренных событий достаточно мало, поэтому Buresova and Laštovička (2007) предложили рассматривать полученное сезонное распределение предбуриевых явлений только как тенденцию. Однако эта сезонная вариация (если она, действительно, существует) может оказаться очень важна для поиска источников предбуриевых 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 предбуриевых возрастаний $foF2$. Не было обнаружено также соответствующих изменений $hmF2$.

В работе [Buresova and Laštovička, 2007] приведен типичный пример сильного возрастания $NmF2$ перед выдающейся бурей 29 октября 2003 г. (минимум $Dst = -388$ нТ) по данным вертикального зондирования на ст. Chilton. Обнаружено, что примерно за 18 часов до SC (06:11 UT 29 октября) происходит увеличение $NmF2$ примерно 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 бури в европейском регионе сопровождались значительным (>20%) ростом $foF2$ перед началом бури.

Новым элементом изучения предбуриевых эффектов была попытка определить высотный профиль предбуриевых возрастания, в частности наличие эффекта в ионосферных слоях $F1$ и E . Buresova and Laštovička [2008] не обнаружили систематического эффекта предбуриевых возрастания Ne в слое $F1$. Также не было никакого предбуриевых возрастания и в области E . Фактически, Buresova and Laštovička [2008] обнаружили, что предбуриевое возрастание ограничено слоем $F2$. Пример высотного распределения Ne в предбуриевый период по данным станции Chilton согласно работе [Buresova and Laštovička, 2008] приведен на рис. 3. Сплошные линии – наблюдения 22 июля 2004 г. до SC геомагнитной бури (15:00 UT); штриховые линии – месячная медиана.

Хорошо видно существенное возрастание Ne в области F перед бурей по сравнению со спокойными условиями.

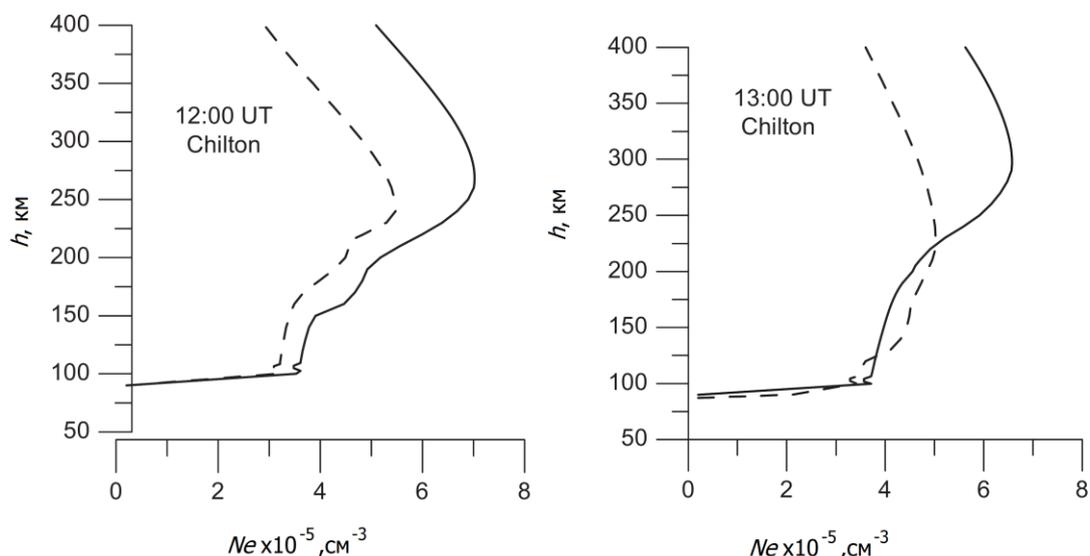


Рис. 3. Высотное распределение электронной концентрации 22 июля 2004 г. по данным ст. Chilton согласно работе [Buresova and Laštovička, 2008] (см. текст).

Широтная протяженность предбуриевых возрастания была найдена равной 120° – 240° 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 предбуриевые эффекты.

Согласно Mansilla [2007] перед очень сильной бурей 15 июля 2000 г. ($Dst_{\min} = -300$ нТ) 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. ($Dst_{\min} = -224$ нТ) 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 , E_y) были на совершенно спокойном уровне.

Анализируя глобальную ионосферную реакцию на умеренную геомагнитную бурю 3 августа 2010 г. ($Dst_{\min} = -90$ нТ) в трех долготных секторах (Азия/Тихий океан, Европа/Африка и Америка) Mansilla and Zossi [2012] получили, что одним из главных ионосферных эффектов рассматриваемой бури был тот факт, что за 4–5 часов 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 [2015] 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 станции Assention. Положительное ионосферное возмущение длилось от 6 до 15 часов.

Patovary et al. [2013] провели анализ сорока магнитных бурь 70–80-х годов, 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, Patovary 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 рисунке 6-ти 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. ($SUM-H_{\min} = -300$ нТ), рассматривались Adekoaya 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. Adekoaya et al. [2012a] обнаружили, что слабые и умеренные отрицательные фазы наблюдались в предбуревой период на всех станциях в низких и средних широтах.

Adekoaya et al. [2012b] предприняли исследование умеренной геомагнитной бури 2–6 апреля 2004 г. ($Dst_{\min} = -101$ нТ), используя данные наземных ионозондов в 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-ти магнитных бурь в 2000–2005 гг. по данным 8-ми станций ВЗ, расположенных в диапазоне широт от 33° S до 36° N, был выполнен в

работе [Adekoysa et al., 2013]. Авторы получили, что перед бурей 6 апреля 2000 г. (SC в 12:00 UT) на станции Darwin (13° S) максимальное значение $\Delta foF2$ составляло 55% в 06:00 UT. Это значение превышало 20% в течение 5 часов в первой половине дня 6 апреля. За 2 ч до SC бури 15 июля 2000 г. величина $\Delta foF2$ на ст. Point Arguello (36° N) составляла –40%.

Согласно Adekoysa et al. [2013] во время бури 17 сентября 2000 г. (SC в 13:30 UT) величины $\Delta foF2$ на ст. Darwin достигала 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 величина $\Delta foF2$ на ст. Louisvale (29° N) была отрицательной (–50%).

Перед бурей 30 марта 2000 г. (SC в 23:00 UT) величина $\Delta foF2$ составляла около 30% с 07:00 UT до 12:00 UT на ст. Dyess (32° N) и 20–30% с 02:00 UT до 13:00 UT на ст. Eglin (30° N), тогда как на станции 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, $Dst_{\min} = -240$ нТ), усреднив наблюдения на 11-ти 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-х часов.

Bakare 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 часа 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 около 50% примерно за 8 часов до SC. Следует отметить, однако, что оценки наличия или отсутствия ионосферных эффектов до рассматриваемой магнитной бури зависят от того, в какой момент UT принимается SC. Индекс Dst демонстрировал небольшой рост (до 32 нТ) 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 Adebessin and Adekoysa [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.

Adekoysa and Adebessin [2015] анализировали 6 очень сильных бурь 2000–2005 г по данным ВЗ на низко- и среднеширотных станциях. Буря 6 апреля 2000 г. ($Dst_{\min} = -288$ нТ) 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-го апреля было зарегистрировано положительное возмущение $foF2$ с максимумом $\Delta foF2 = 54\%$ в 06:00 UT). Во время очень сильной бури 15 июля 2000 г. ($Dst_{\min} = -301$ нТ) 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 часов до SC.

Магнитная буря с $Dst_{\min} = -201$ нТ 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 ст. Juliusruh наблюдалось отрицательное возмущение ($\Delta foF2 = -60\%$ за 7 ч до SC).

Перед бурей 31 марта 2001 г. ($Dst_{\min} = -387$ нТ; 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. ($Dst_{\min} = -271$ нТ; 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 $+0.55\%$ в 05:00 UT 11 апреля.

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

Buresova and Lastovicka [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 ст. Grahamstone 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 около 40 ч для бури 17 марта 2015 г., около 8 ч. для бури 19 декабря и 22–24 ч для бури 17 февраля 2015 г.

Согласно Verenui et al. [2018] во время сильной бури 12 ноября 2012 г. в течение двух суток, предшествующих SC, величины $foF2$ на станции 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 около 10 МГц, тогда как фоновое значение $foF2$ было 7–7.5 МГц (см. рис. 4, взятый из работы Verenui et al. [2018]).

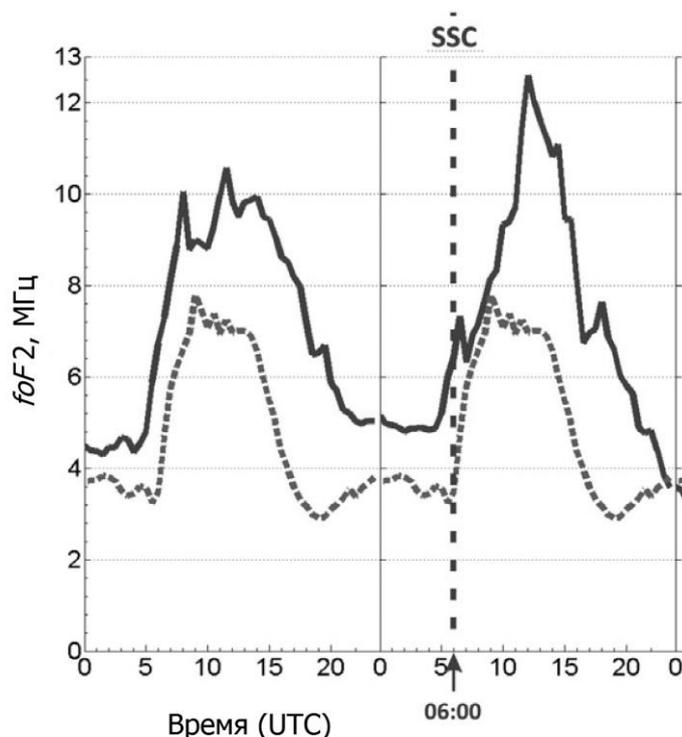


Рис. 4. Изменение $foF2$ в течение 16–17 марта 2013 г. согласно Verenui et al. [2018]. Сплошная кривая – измерения 16 и 17 марта, штриховая кривая – фоновые значения.

Согласно Ghodpage et al. [2018] измерения методом ВЗ на низкоширотной станции Tirunelveli показывают увеличение $foF2$ ночью 17-го марта с 05:00 до 07:00 LT (очень сильная магнитная буря с минимальным $Dst \sim 220$ нТ 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 примерно 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-ти событий прихода к Земле высокоскоростных потоков солнечного ветра. Они рассматривали реакцию ионосферы по измерениям на ионосферой станции 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 нТ, 8 сентября. Материалом для анализа служили наблюдения методом ВЗ на трех ионосферных станциях Китая и измерения ТЕС (результаты см. в следующем параграфе). Данные ВЗ показали, что на станции Shaouang (27° 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° N) и Wuhan (31° 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 примерно 3-х часов 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 около 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-х часов 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 ТЕС 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° N) за 5 часов до SC величина $\Delta NmF2$ составляла 50% и постепенно уменьшалась до нуля к моменту SC. На ст. Якутск (62° N) величина $\Delta NmF2$ за 5 часов до SC была около 40% и опустилась до нуля примерно за час до SC. На более южных станциях величины $\Delta NmF2$ лежали в этот период в пределах $\pm 20\%$.

3.2 ПОВЕДЕНИЕ $\Delta TЕС$

Yisengaw et al. [2004] анализировали реакцию ТЕС 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-х пунктах с южной широтой более 35° наблюдались отрицательные отклонения ТЕС от спокойных значений (величины $\Delta TЕС$ составляли от -30 до -85% , причем на ст. McMerdo (78° S) величина $\Delta TЕС$ держалась на уровне около -80% в течение 9 часов).

Аналогичный анализ был выполнен Yisengaw et al. [2005] для бури 31 марта 2001 г. (SC в 00:52 UT, $Dst_{min} = -321$ нТ). Использовалась цепочка из 9 GPS приемных пунктов вдоль меридиана 150° E от экваториальных широт до области дневного каспа. В день, предшествовавший началу бури, во всех пунктах наблюдались положительные величины $\Delta TЕС$, превышавшие 20%. Длительность и амплитуда этих положительных возмущений изменялась от станции к станции. Общая тенденция была такова, что наиболее слабые возмущения наблюдались в экваториальных широтах, а наиболее сильные – в полярной области. Эта тенденция хорошо видна на рис. 5, взятом из работы [Yisengaw et al., 2005]. Как следует из этого рисунка, величина $\Delta TЕС$ около 1800 UT 30 марта составляла на станциях Macquarie Island (55° S) и McMerdo (78° S) примерно 170% и 160%, соответственно.

Существенно, что Yisengaw et al. [2005] отмечают, что 30 марта было относительно спокойным днем (ΣKp была меньше 21).

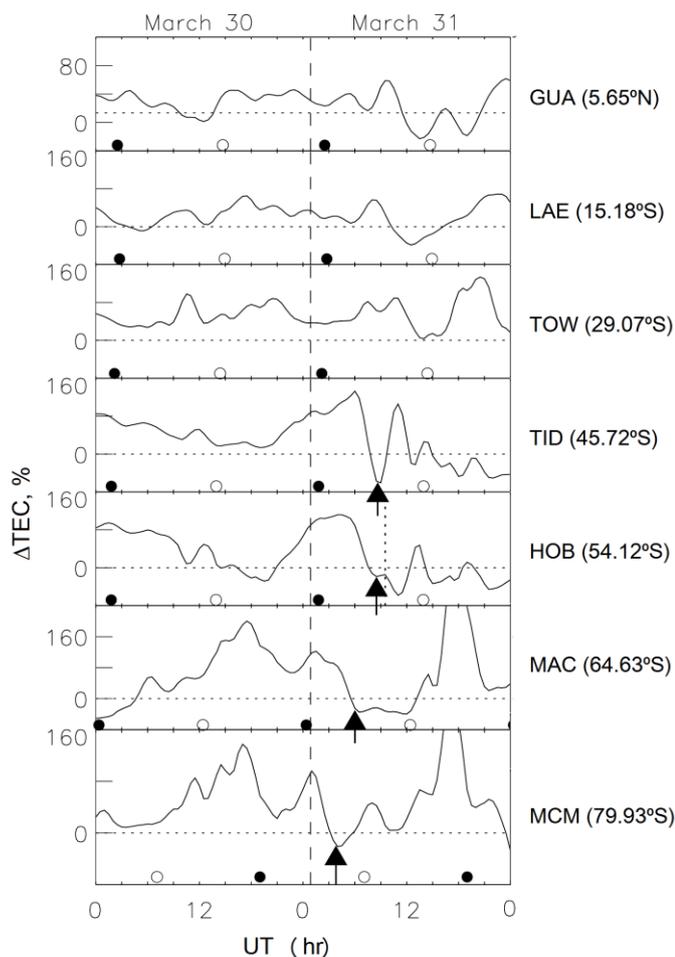


Рис. 5. Изменение величины ΔTEC по измерениям в пунктах с различной геомагнитной широтой (приведена в скобках) во время магнитной бури 31 марта 2001 г. согласно Yisengaw et al. [2005].

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

Важный факт, обнаруженный Liu et al. [2008a] состоял в том, что эффект носил региональный характер: вышеуказанные величины ΔTEC наблюдались лишь в узкой полосе долгот с центром на 120° Е. Этот факт очень важен для исследования природы предбуревых эффектов. Если локальный характер увеличения ТЕС, обнаруженный Liu et al. [2008a], действительно существует, то это делает более трудной связь этого увеличения с изменениями глобальных параметров космической погоды и указывает на его 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. ($Dst_{\min} = -120$ нТ), 29 мая 2003 г. ($Dst_{\min} = -150$ нТ) и 22 сентября 2001 г. ($Dst_{\min} = -60$ нТ)), используя наблюдения с помощью ионозондов и измерения ТЕС вдоль меридиана 120° Е в азиатско-австралийском секторе. Все три события демонстрируют совершенно одинаковые особенности. Сильные предбуревые возрастания $foF2$ и ТЕС перед этими

бурями наблюдались одновременно. 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 ТЕС было также подтверждено Saranya et al. [2011]. Они исследовали предбуревые эффекты над экваториальной станцией Trivandrum и низкоширотной станцией Waltair для 18 бурь с $Dst_{min} < -100$ nT в период 2000–2005 гг. Было обнаружено, что обычно наблюдается существенное возрастание $foF2$ и ТЕС 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 предбуревого возрастания. Поскольку предбуревое возрастание наблюдалось как днем, так и ночью, ясно, что солнечные вспышки не могут быть основным двигателем механизма, ответственного за предбуревой эффект.

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 ТЕС в дальневосточном, австралийском и американском регионах. Как следует из рис. 2 в указанной статье, на широтах от 0 до 50° N с 12:00 UT 14 июля наблюдались локальные повышения ТЕС с $\Delta TЕС \sim 20\text{--}30\%$. Из рисунка 6 в той же статье следует, что в американском регионе возрастание $\Delta TЕС$ до 50–60% началось на широтах 0–60° N примерно за 5 ч до SC.

В работе [Abreu et al. 2014] были детально проанализированы вариации величин VTEC (ТЕС 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 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 [Abreu et al., 2014]), это положительное возмущение наблюдалось в указанное время на средних и 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 [Abreu et al. 2014]. Хорошо видно (эту цифру приводят и сами авторы), что по измерениям в пунктах MVAR и MAL2 возрастание VTEC 1 мая составляло около 70% по сравнению со спокойными условиями (т. е. $\Delta VTEC \sim 70\%$).

В работе [Shimeis et al., 2015] рассматривались вариации ТЕС, измеренные на евро-африканской цепочке приемных станций во время геомагнитной 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 [Adebisi 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-х умеренных геомагнитных бурь. Перед всеми четырьмя бурями до SC наблюдались значительные величины $\Delta TЕС$ 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 $\Delta TЕС$ с амплитудой -35% наблюдалось примерно за сутки до SC. Следующее отрицательное отклонение с амплитудой, превышавшей 40%, началось за 8 ч до SC и длилось до начала бури. Аналогичное отрицательное возмущение $\Delta TЕС$ 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 ч. и амплитудой до 40–60%.

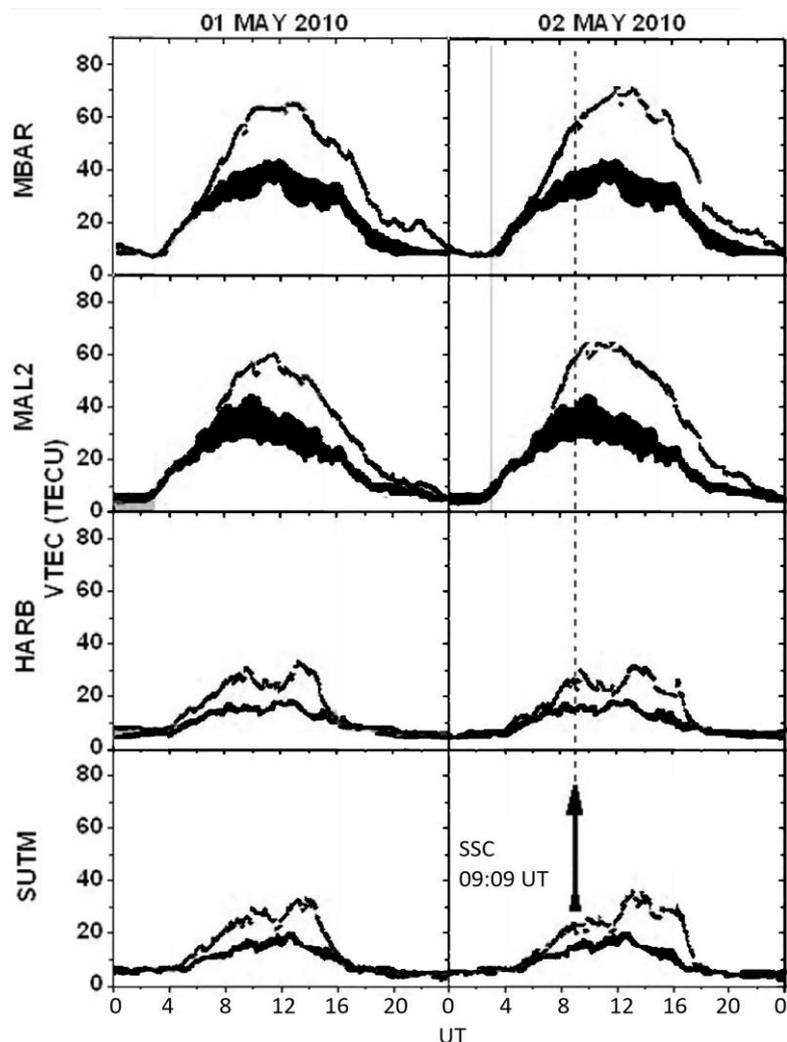


Рис. 6. Изменение VTEC 1 и 2 мая 2010 г. по данным измерений в 4-х пунктах (из работы [de Abreu et al., 2014]). Кривая – реальные наблюдения, полоса – суточный ход VTEC в спокойный день \pm стандартное отклонение. Коды приемных пунктов GPS: MBAR – Uganda, MAL2 – Kenya, HARB – Pretoria, SUTM – Sutherland

Аналогичные положительные «всплески» Δ TEC длительностью 2–3 ч 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 Δ TEC 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 TEC. Основной акцент в работе был сделан на влияние указанной бури на условия распространения радиоволн, поэтому обычных данных о поведении f_oF2 со временем не приводится. Из единственного рисунка, где приводятся данные по Δ TEC (рис. 9 в указанной работе), можно сделать следующий вывод. По измерениям в пункте Свердловск 6-го сентября (более, чем за сутки до SC в 20:00 UT 7 сентября) наблюдалось возрастание Δ TEC до примерно 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 магнитная буря с SC в 21:00 UT 7 сентября 2017 г. Данные по TEC были получены с 25 приёмных пунктов в северном и 6 пунктов в южном полушарии. В приёмных 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 TEC над медианой (величина Δ TEC составляла 20–30%). На низкоширотных станциях DLTV (12° N) и SYBG (18° N) 6 сентября наблюдались небольшие отрицательные отклонения TEC от

медианы. Положительные отклонения TEC наблюдались в течение 7 сентября на всех пунктах южного полушария.

4 АНАЛИЗ ДАННЫХ СТАНЦИИ SLOUGH

Мы провели анализ ионосферных бурь в течение последней четверти прошлого века, используя наблюдения на ионосферной станции Slough. Мы проанализировали поведение индекса Dst за этот период и рассматривали все геомагнитные возмущения (бури), при которых величина этого индекса опускалась ниже -30 нТл. При этом для поиска ионосферных предвестников выбирались только те бури, для которых, как минимум день, предшествующий началу бури, был достаточно спокойным в геомагнитном плане (суммарный индекс ΣKp был меньше 15, а индекс AE был меньше 120 нТл). Если два дня, или все три дня, предшествующих началу бури, были спокойными по указанному критерию, то анализировалось наличие ионосферных предвестников в течение этих дней.

Вопрос о моменте начала магнитной бури является достаточно деликатным. Как следует из предыдущих параграфов, в большинстве работ по анализу ионосферных предвестников использовалось понятие внезапного начала бури (sudden storm commencement SSC (или SC)). В бюллетене ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/Publications/Geomagnetic_Indices_Bulletin/ дается следующее определение SC: «Внезапное начало бури (SSC) рассматривается как резкий положительный пик в Dst до того момента, как основная фаза глобальной бури вызовет большие отрицательные значения Dst ». Мы использовали это определение для нахождения момента начала магнитной бури в нашем исследовании. Как правило, этот момент совпадал с моментом SC, приводимом в указанном бюллетене, однако в ряде случаев для конкретных бурь там дается другой момент SC, а в некоторых случаях момент SC не дается вовсе, хотя в поведении со временем Dst индекса имеются все характерные особенности, отвечающие указанному выше определению. В свете этого, мы предпочитаем использовать термин «начало бури» (storm onset), избегая использования термина SC, как это делалось, например, и в ряде работ группы Благовещенского (см. выше в параграфе 2).

Все исследования мы проводили, используя величину $\Delta foF2$ в соответствии с формулой (1). Для определения этой величины необходимы, кроме величин $foF2$ в анализируемые дни перед магнитной бурей, также фоновые величины $foF2$. В работах, рассмотренных в предыдущих параграфах, в качестве фоновых значений использовались месячная медиана $foF2$, суточный ход $foF2$ в ближайший к буре магнито-спокойный день, или среднее значение $foF2$ за нескольких спокойных дней данного месяца.

Мы отказались от использования месячной медианы, поскольку при наличии в течение месяца значительного количества возмущенных дней она уже не отражает хода $foF2$ в спокойный день. В качестве фоновых значение $foF2_{\text{спок}}$ мы использовали локальную модель $foF2$ для ст. Slough, разработанную для создания прогностической модели ионосферы SIMP (Лещинская и Михайлов, 2016). Эта модель дает величины $foF2$ для заданного дня на основании анализа наблюдаемых значений $foF2$ в течение двух недель до и двух недель после этого дня. По оценкам разработчиков модели SIMP локальная модель дает в среднем величины $foF2$, соответствующие спокойным условиям ($\Sigma Kp \sim 2$).

Хотя мы считали основным источником информации о величине $foF2_{\text{спок}}$ именно указанную модель, мы проводили расчеты $\Delta foF2$ для предбуревых дней также, используя величины $foF2$, измеренные в ближайший к буре спокойный день. Выбор такого дня далеко не всегда был прост. Величины ΣKp и AE индексов в такой день должны были быть ниже 15 и 120 нТл, соответственно. Этот день не должен был следовать за днями с высокими значениями ΣKp или AE . В результате за период с 1976 по 1990 гг. было отобрано для анализа 203 магнитных бури, соответствующих указанным критериям. В случае 16 событий не удалось найти подходящего спокойного дня, поэтому величины $\Delta foF2$ определялись только с использованием локальной модели. Для остальных 287 дней для определения $\Delta foF2$ использовались и локальная модель, и спокойный день. Мы использовали следующую нумерацию анализируемых дней: день SO – 0, день предшествующий SO – 1, два предыдущих дня – 2 и 3.

Более подробное описание выбора бурь, подходящих для анализа, определения момента начала бури, выбора спокойных условий для сравнения и других ограничений, налагаемых на выбор данных для анализа требует отдельного рассмотрения и будет сделано в отдельной статье.

Для каждой из отображенных бурь были построены рисунки, демонстрирующие поведение $\Delta foF2$ в течение дня 0 (день SO) и трех предшествующих дней. Примеры таких рисунков представлены на Рис. 7 и 8.

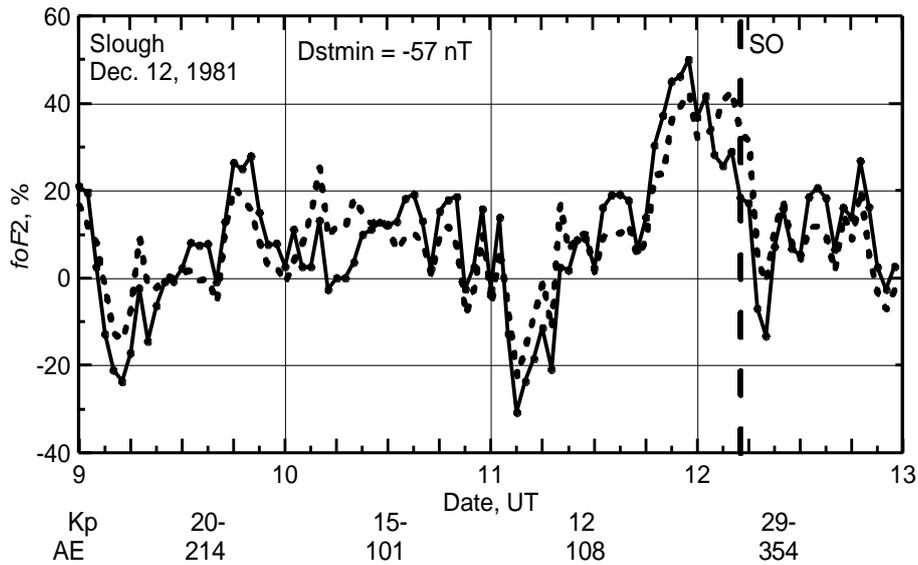


Рис. 7. Поведение $\Delta foF2$ в течение дней, предшествующих магнитной буре 12 декабря 1981 г. Пунктирная и сплошная линии соответствуют $foF2_{\text{спок}}$ согласно локальной модели и спокойному дню 7 декабря 1981 г. ($\Sigma Kp = 6+$; $AE = 82$).

На рисунке 7 приведен пример пары из отрицательных и положительных возмущений $\Delta foF2$ в течение дня начала бури (день 0). Оба возмущения хорошо видны в величинах $\Delta foF2$, основанных как на локальной модели, так и на спокойном дне. Положительное возмущение предшествовало моменту SO на 5-6 ч, что типично для положительных ионосферных предвестников (см. выше параграф 3).

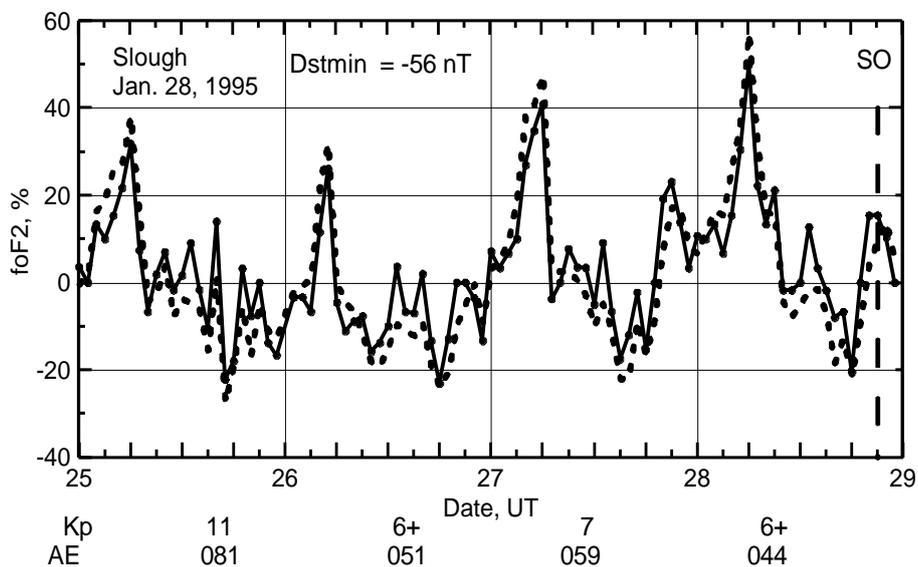


Рис. 8. Поведение $\Delta foF2$ в течение дней, предшествующих магнитной буре 28 января 1995 г. Пунктирная и сплошная линии соответствуют $foF2_{\text{спок}}$ согласно локальной модели и спокойному дню 24 января 1995 г. ($\Sigma Kp = 8-$; $AE = 62$).

Рисунок 8 демонстрирует пример хорошо выраженного положительного возмущения $foF2$ в день начала бури и во все три предшествующих дня. Возмущение в день 0 предвещало момент SO на 15 ч и имело амплитуду около 50%. Каждое положительное возмущение сопровождалось отрицательным возмущением с амплитудой, достигающей 20%.

В результате анализа было найдено 726 ионосферных возмущений в течение дня SO и трех предшествующих ему дней. Сведения об этих возмущениях приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Общее количество ионосферных возмущений с различными величинами $\Delta foF2$, зарегистрированных в предбуревые дни.

$\Delta foF2$	+(20-30) %	+(30-40) %	>+40%	-(20-30) %	-(30-40) %	<-40%
0 день до SO	66	23	22	9	3	1
1 день	128	40	30	38	5	0
2 и 3 дни	158	72	29	93	8	1

Как следует из Таблицы 1, общее количество зарегистрированных положительных возмущений (568) существенно превышает общее количество отрицательных возмущений (158). Это согласуется с выводами исследований, рассмотренных в двух предыдущих параграфах, о том, что в предбуревые дни наиболее часто наблюдаются положительные ионосферные возмущения. Наиболее часто наблюдаются положительные возмущения с амплитудой 20-30%.

Во время 203 проанализированных бурь в день 0 было зарегистрировано 131 ионосферное возмущение и только 12 из них были отрицательными. Из 203 проанализированных бурь 84 начинались после полудня в день 0. Подавляющее количество этих возмущений были зарегистрированы в случае бурь, начинающихся после местного полудня, хотя некоторые наблюдались и в случае SO, приходящихся на первую половину дня 0. Только в случае 27 магнитных бурь, которые начинались после местного полудня, не зарегистрировано ни положительных, ни отрицательных ионосферных возмущений. Таким образом, в 68 % бурь, начинающихся после местного полудня, в день 0 наблюдается ионосферное возмущение (ионосферный предвестник), в подавляющем числе случаев – положительное). Среди этих положительных возмущений 68%, 23% и 9% имели амплитуду $\Delta foF2$ равную, соответственно, 20-30%, 30-40% и >40%.

Поскольку момент SO приходится на различные моменты времени дня 0, более наглядным является представление зависимости найденных ионосферных возмущений от времени их регистрации до момента SO. Такая зависимость для всех зарегистрированных возмущений представлена на рис. 9. Как следует из этого рисунка, имеются два хорошо выраженных максимума времени появления ионосферных возмущений – за 5 и за 20 часов до момента SO. Третий максимум также прослеживается (~ 20 ч), но он меньше по амплитуде.

Детальный анализ всей совокупности полученных данных будет опубликован в отдельной статье.

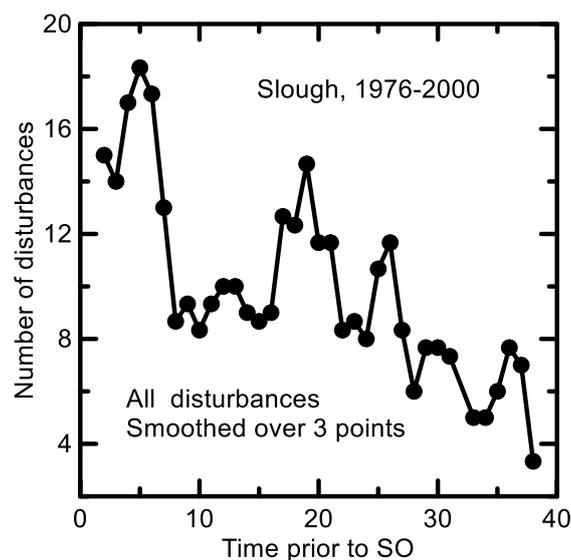


Рис. 9. Распределение ионосферных возмущений по времени, предшествующему SO.

5 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 ($\Delta foF2$, Δ 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 часов до 6–8 часов. 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 часа 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, предшествовавших дню SC.

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

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 появления других признаков магнитного возмущения. Во многих работах высказывались предположения, что механизмы предбуревых ионосферных эффектов связаны с электрическими полями. Mansilla [2007] считает, что предбуревые эффекты в ионосфере могут быть вызваны высыпанием в высоких широтах мягких частиц, поскольку «в это время еще нет ни вызванной бурей циркуляции, ни изменений состава».

В монографии Благовещенского [2012] подробно рассматриваются различные промежуточные механизмы возможного воздействия на ионосферу так называемых «межпланетных предударных областей». 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] отвергли несколько потенциально возможных механизмов предбуревого возрастания NmF2, но не смогли найти механизма, который был бы основной причиной наблюдаемых предбуревых возрастных изменений. Они высказали предположение, что, возможно, нет одного доминирующего механизма, и в каждом конкретном событии может быть свой главный механизм. Согласно Kane [2005] предбуревые эффекты могут частично иметь метеорологическую природу. Насколько известно авторам данной статьи, с тех пор эта мысль не получила дальнейшего развития, или подтверждения.

Очевидно, что вопрос о предбуревых изменениях в области F ионосферы требует дальнейшего исследования. В параграфе 4 приведены первые результаты выполненного авторами анализа предбуревых изменений $foF2$ по данным станции V3 Slough (Chilton) для большого числа бурь. Эти результаты подтверждают результаты работ, рассмотренных в параграфе 3. Дальнейший анализ должен быть направлен на выявление зависимости предбуревых эффектов от различных внешних факторов (местное время, сезон, солнечная активность и т. п.). Затем планируется сделать анализ предбуревых эффектов для ограниченного числа специально отобранных магнитных бурь по данным глобальной сети станций V3 для выявления широтной и долготной зависимости этих эффектов.

ЛИТЕРАТУРА

- *Благовещенский Д.* Космическая погода и ионосферные радиоволны. –Palmarium Academic Publishing. – Saarbrucken. –Germany. –123 p. 2012.
- *Благовещенский Д.В.* Вариации критической частоты ионосферы за периоды магнитосферных бурь 2008–2012 гг. в авроральных широтах // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 54 № 5. С. 611–618. 2014.
- *Благовещенский Д.В., Калишин А.С.* Механизм возрастания критической частоты ионосферы до начала суббури // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 49. № 3. С. 213–223. 2009.
- *Данилов А.Д.* Реакция области F на геомагнитные возмущения (обзор) // Гелиогеофизические исследования. Выпуск 5. С. 1–33. 2013.
- *Данилов А.Д., Белик Л.Д.* Термосферно-ионосферное взаимодействие во время геомагнитных бурь // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 31. № 2. С. 209–222. 1991.
- *Adebesin 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.
- *Adebiyi 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., Adebesin B.O.* Ionospheric and Solar Wind Variation during Magnetic Storm Onset and Main Phase at Low- and Mid-latitudes // Acta Geophysica V. 63. № 4. P. 1150–1180. 2015. doi: 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 $F2$ // Astrophysics and 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. Rad. Sci. Space Phys. 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 $F2$. In: Book of Proceedings of 5th Annual Conference of the Nigeria Union of Radio Science (NURS) an affiliate of International Union of Radio Science Nigeria (URSI), pp. 15–28, 2013. ISBN: 978-978-934-657-8.
- *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. doi: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 Phys. 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. № 4. 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 Science Reviews. 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. 2008. doi:10.1016/j.jastp.2008.01.014.

- Buresova D., Lastovicka 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 Physics.* V. 119, P. 5020–5031. 2014. doi: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 Physics.* V. 120. P. 10,669–10,687. 2015. doi:10.1002/2015JA021785.
- Kane R.P. Storm-time variations of F2 // *Ann. Geophysicae.* V. 29. 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. P. 2487–2499. 2005.
- Lei J., Huang F., Chen X., Zhong J. 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 Physics.* T. 123. P. 3217–3232. 2018. 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. 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 Physics* (1978–2012). V. 113. № A2. 2008b. doi: 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 Physics.* V. 119. P. 7716–7731. 2014. doi: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. 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 // *Studia Geophys. Geodet.* 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. 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, in *Handbook of Atmospheric Electrodynamics, Vol 2* (ed. by H. Volland), CRC Press/ Boca Raton, pp. 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., Niranjana 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. P. 2765–2773. 2004.
- *Yizengaw, E., Dyson, P. L., Essex, E. A., Moldwin, M. B.,* 2005 Ionosphere dynamics over the southern hemisphere during the 31 march 2001 severe magnetic storm using multi-instrument measurement data. *Ann. Geophysicae* 23, 707–721.
- *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 Physics.* V. 122. P. 2484–2504. 2017. doi:10.1002/2016JA023180.

BEHAVIOR OF THE IONOSPHERIC AREA OF F2 BEFORE GEOMAGNETIC STORMS

Konstantinova A.V., Danilov A.D.

The problem of occurrences of ionospheric *F2*-layer parameters disturbances prior to the geomagnetic storm beginning is discussed. It is shown that disturbances (substantial deviations from quiet conditions) of both critical frequency *foF2* and total electron content in the atmospheric column (TEC) a few hours, and sometimes one-two days, prior to the SC (sudden commencement) moment are found in many studies. The amplitudes of the above disturbances are on the average 30-60%, but in some cases could exceed 100%. Deviations from quiet conditions of both signs are possible, however positive disturbances of *foF2* and TEC are met much more often. Some results of the analysis of pre-storm effects in *foF2* based on the Slough (Chilton) station data are presented.

KEYWORDS: GEOMAGNETIC STORMS, IONOSPHERIC STORMS, IONOSPHERIC *F2* LAYER.