

УДК 550.388.2

ИЗМЕНЕНИЯ В ОБЛАСТИ F ИОНОСФЕРЫ ПЕРЕД МАГНИТНЫМИ БУРЯМИ (ОБЗОР)

© 2023 г. А. Д. Данилов¹, *, А. В. Константинова¹

¹Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова Росгидромета (ИПГ),
Москва, Россия

*e-mail: adanilov99@mail.ru

Поступила в редакцию 26.06.2023 г.

После доработки 20.07.2023 г.

Принята к публикации 03.08.2023 г.

Приводится обзор изменений ионосферных параметров в предбуревой период, наблюдаемых при анализе конкретных магнитных бурь (так называемые “case studies”). Показано, что в результатах такого анализа в большинстве случаев видны отклонения этих параметров (прежде всего – $foF2$ и TEC) в дни, предшествующие внезапному началу бури. При этом многие авторы обращают на них внимание, обсуждают их связь с параметрами космической погоды, сезоном, временем суток и пространственным распределением и даже высказывают предположения о возможных механизмах формирования. Показано, что число таких публикаций заметно возросло в течение последних 4–5 лет. Подчеркивается, что изменения состояния ионосферы в предбуревые дни обнаруживаются не только в “классических” параметрах ($foF2$ и TEC), но и в других ионосферных характеристиках. Подробно рассматриваются статьи, посвященные именно проблеме ионосферных предвестников магнитных бурь, их связи с космической погодой и их возможной роли в предсказании предстоящей магнитной бури.

DOI: 10.31857/S0016794023600801, EDN: PWJLWR

1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема изменения в параметрах ионосферы в период, предшествующий магнитной буре, представляет интерес как в плане изучения физики процессов в приземном пространстве при изменениях космической погоды, так и в прикладном плане, если эти изменения могут являться предвестниками предстоящей бури. Сошлемся на обзорные работы [Благовещенский, 2012; Blagoveschensky et al., 2017; Danilov, 2013] и другие публикации [Данилов и Константинова, 2019].

За подробным описанием исследований этой проблемы мы отсылаем читателя к указанным обзорам. Здесь отметим лишь пионерские работы Kane [1973, 1975] и первые попытки обсудить возможные причины предбуревых эффектов в ионосфере [Данилов и др., 1985; Danilov and Belik, 1992]. В дальнейшем наблюдению этих эффектов в различных параметрах ионосферного слоя $F2$ ($foF2$, $hmF2$, $h'F2$, TEC) было посвящено много работ, описанию которых и посвящены указанные обзоры.

Со времени написания обзора [Danilov, 2013] в литературе появилось много новых публикаций, посвященных реакции ионосферы на ионосферные бури. В подавляющем случае это были так на-

зываемые “case studies”, т.е. описания изменения параметров космической погоды и соответствующих вариаций параметров ионосферного слоя $F2$. Поскольку основной целью таких работ было исследование поведения указанных параметров на различных стадиях бури (главная и восстановительная фазы), все внимание в них было направлено на это поведение после начала бури SC. Однако в некоторых работах обсуждалось (где кратко, а где подробнее) изменение ионосферных характеристик и в течение одного-трех дней до SC. И практически во всех работах на соответствующих графиках приводилось это изменение, поэтому, если даже предбуревые дни в тексте какой-то публикации не рассматривались вовсе, можно было оценить отклонения анализируемых параметров от спокойных условий в различные моменты до SC. Все, что можно найти в каждой публикации про поведение ионосферных параметров в предбуревые дни, и составляет основу данного обзора.

Необходимо отметить, что несколько таких публикаций после 2019 г. уже рассматривались в дискуссионной статье Данилова [2022]. Для сохранения единства изложения мы кратко рассматриваем эти публикации и здесь.

Отметим несколько важных моментов. В большинстве случаев приходилось считать величи-

ны ионосферных параметров (f_oF_2 , h_mF_2 , TEC) с рисунков в рассматриваемых работах. В некоторых случаях (маломасштабные рисунки) это было довольно трудно, поэтому приводимые в этом обзоре величины не являются абсолютно точными. Однако, на наш взгляд, это не имеет принципиального значения, поскольку эти величины не используются для каких-либо дальнейших вычислений, а призваны лишь показать наличие тех или иных возмущений.

В статьях, где приводятся отклонения наблюдаемых величин от спокойных условий, мы приводим эти отклонения (Δf_oF_2 , Δh_mF_2 , ΔTEC), указывая, если это сказано в статье, что именно принималось в качестве спокойных величин. Некоторые авторы пересчитывали критические частоты в величины электронной концентрации в максимуме слоя, и приводили величины NmF_2 .

2. КОНКРЕТНЫЕ БУРИ – CASE STUDIES

В большинстве рассматриваемых ниже работ проводились указанные “case studies”, т.е. рассматривалась одна, или несколько, бурь по наблюдениям на нескольких станциях вертикального зондирования (ВЗ) или пунктах различных навигационных систем.

В работе Dugassa et al. [2023] рассматривалось поведение полного содержания электронов (TEC) во время бури 25 августа 2018 г. (SC в 08:45 UT) по измерениям на 14 приемниках системы GNSS в четырех широтных зонах. На рис. 1 приведена вырезка из рис. 4 в указанной статье. “Всплеск” ΔTEC примерно за 6 ч до SC виден в трех (из четырех) широтных зонах. Особенно ярко он выражен для зоны 10° N , где ΔTEC превышает $+100\%$. На этом рисунке виден также пик ΔTEC с амплитудой около $+40\%$ в полдень 23 августа в зонах 0° N и 5° S .

Согласно рис. 6 в той же работе величины ΔTEC по измерениям на ст. Penk (47.8° N), Tubi (40.8° N) и Ramo (30.6° N) в полдень 24 августа превышали $+40\%$.

В работе Sharan [2022] рассматривается реакция слоя F_2 на две умеренных, две сильных и две выдающихся магнитных бури по наблюдениям на трех станциях ВЗ в области Южной Атлантики.

Умеренная буря началась в 06:00 UT 22 ноября 1975 г. На ст. Rarotonga (21.2° S) в 14:00 UT 21 ноября наблюдался “всплеск” виртуальной высоты слоя F_2 примерно на 40% . Авторы отмечают, что по данным той же станции “до SC 22 ноября величина f_oF_2 возросла на 30% по сравнению со спокойными условиями (среднее за 10 спокойных дней)”.

На ст. Port Moresby (9.4° S) 3 марта 1995 г. наблюдался рост $h'F_2$ в 12:00 UT, тогда как SC произошел в 13:00 UT 4 марта. Автор пишет, что при-

мерно с 06:00 UT 4 марта критическая частота f_oF_2 начала уменьшаться и в 09:00 UT достигла минимума в 5.7 МГц , что на 30% меньше, чем спокойное значение, а также, что до начала этой бури с 11:00 UT величина $h'F_2$ была на 26% выше, чем в спокойных условиях. Автор отмечает также, что предбуриевые возмущения наблюдались только для умеренных бурь.

В работе Idosa et al. [2023] анализировались вариации TEC по измерениям на четырех высокоширотных станциях (4 в Северном и 4 в Южном полушариях) во время бури 4 ноября 2021 г. (SC в 08:00 UT). Кроме вариаций самих величин TEC анализировались также их пространственные градиенты в обоих полушариях. Получено, что в предбуриевой день 3 ноября суточный ход TEC в Северном и Южном полушарии резко различался. На рис. 2 (адаптирован из рис. 5 в указанной работе) видно, что в этот день произошло сильное уменьшение градиента TEC около 12:00 UT в Северном полушарии и еще более сильное увеличение примерно в 22:00 UT в обоих полушариях. Наличие этих эффектов в предбуриевой день авторы отмечают и в заключении статьи, высказывая предположение, что они могут иметь метеорологическую природу (см. ниже в Обсуждении).

Sawadogo et al. [2023] анализировали вариации TEC по GPS-измерениям на ст. Koudougou (12.2° N , геомагнитная широта) во время 4 умеренных геомагнитных бурь. Во время бурь 13 мая 2015 г. и 6 мая 2016 г. в оба предбуриевых дня наблюдается существенное (до 40%) превышение TEC над средним значением за спокойные дни.

В работе Naidu et al. [2023] рассматриваются вариации f_oF_2 по измерениям методом ВЗ на 4 станциях Западного полушария во время бурь 16 июля 2017 г. (умеренная) и 28 мая 2017 г. (сильная).

На ст. Hermanus (34.4° S) величина Δf_oF_2 15 июля составляла -30% в 22:00 UT, $+30\%$ в 19:00 UT и $+25\%$ в 17:00 UT. На ст. Millstone Hill (42.6° N) 15 июля зарегистрированы пики Δf_oF_2 с амплитудой $+30\%$ в 07:00 и 09:00 UT. В тот же день на ст. Port Stanley замечены сильные “всплески” Δf_oF_2 до $+60\%$ в 21:00 UT и до $+80\%$ в 18:00 и 22:00 UT.

Во время второй бури величины Δf_oF_2 на ст. San Vito поднимались до $+40\%$ в 09:00 и 10:00 UT 27 мая, а SC было в тот же день в 22:00 UT. На ст. Hermanus отмечено уменьшение Δf_oF_2 до -30% в 05:00 UT.

Анализу поведения VTEC во время бури 25 августа 2018 г. (SC в 00:09 UT) на 9 пунктах GPS посвящена работа Imtiaz et al. [2021]. Хотя в работе рассматриваются изменения ΔVTEC только во время бури, приведенные рисунки охватывают также и три предбуриевых дня. Из этих рисунков следует, что на ст. NKLK (0.4° N) величина

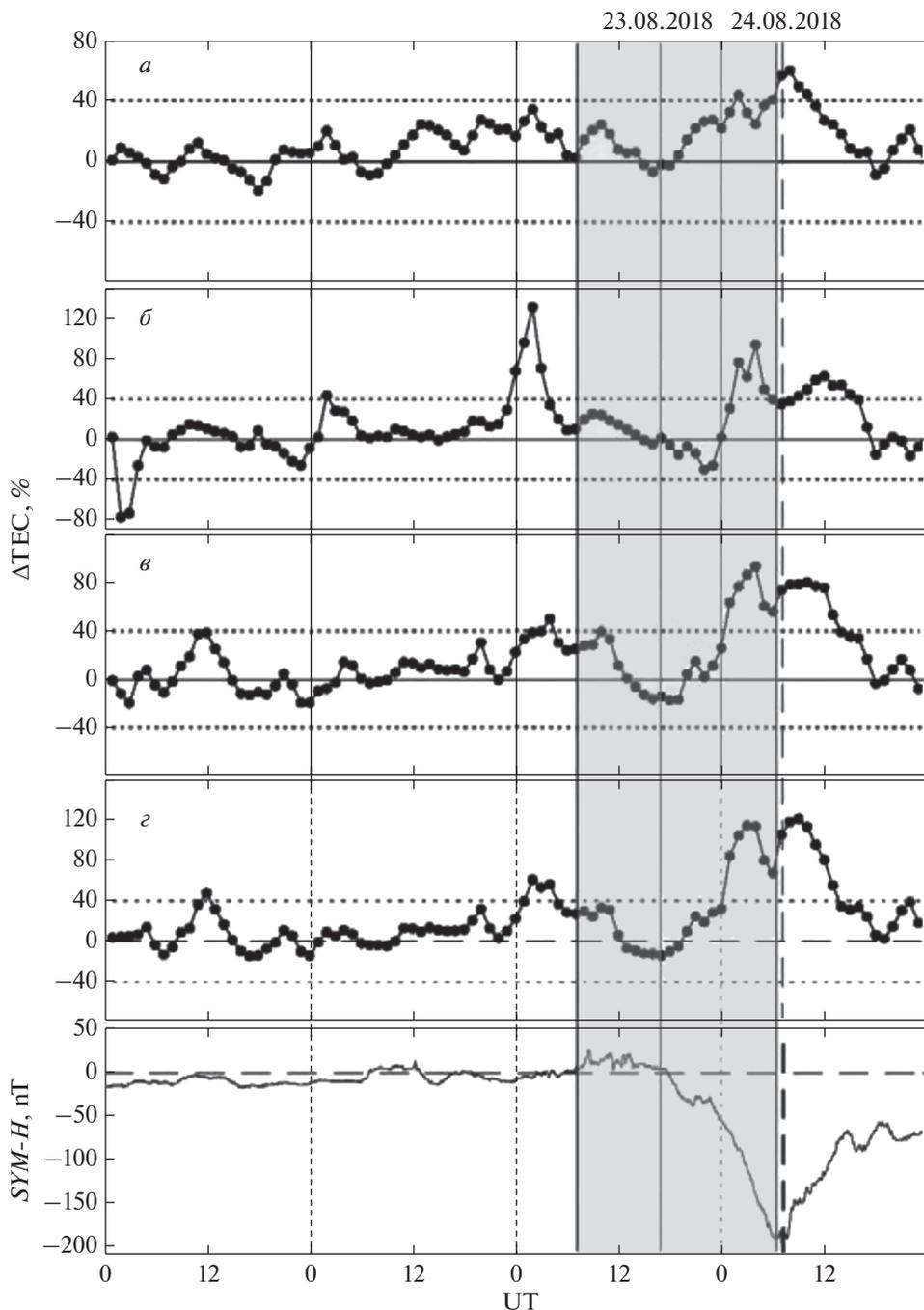


Рис. 1. Изменение ΔTEC по измерениям в пунктах $30^\circ\text{ N } 35^\circ\text{ E}$ (а), $10^\circ\text{ N } 35^\circ\text{ E}$ (б), $0^\circ\text{ N } 35^\circ\text{ E}$ (в) и $5^\circ\text{ S } 35^\circ\text{ E}$ (г), а также индекса SYM-H (адаптировано из Dugassa et al. [2023]).

ΔVTEC опустилась до -40% в $12:00\text{ UT}$ 22 августа и в $14:00\text{ UT}$ 24 августа. На ст. DAKR (14.7° N) эта величина составляла -30% в $16:00\text{ UT}$ 24 августа.

В работе Singh et al. [2021] анализировались вариации TEC во время 4 магнитных бурь по измерениям на двух индийских станциях. На ст. Bangalore (13.0° N) было зарегистрировано увеличение ΔVTEC до $+50\%$ в $06:00\text{ UT}$ 26 сентября 2011 г.

Начало падения Dst приходится в этот день на $17:00\text{ UT}$.

На ст. Varanasi (25.2° N) в предбуревой день было зарегистрировано несколько отрицательных отклонений VTEC от величин в спокойных условиях: 18 февраля 2014 г. $\Delta\text{VTEC} = -25\%$ в $12:00\text{ UT}$ при SC в $14:00\text{ UT}$; 15 июля 2012 г. $\Delta\text{VTEC} = -30\%$ в $10:00\text{ UT}$ при SC в $12:00\text{ UT}$;

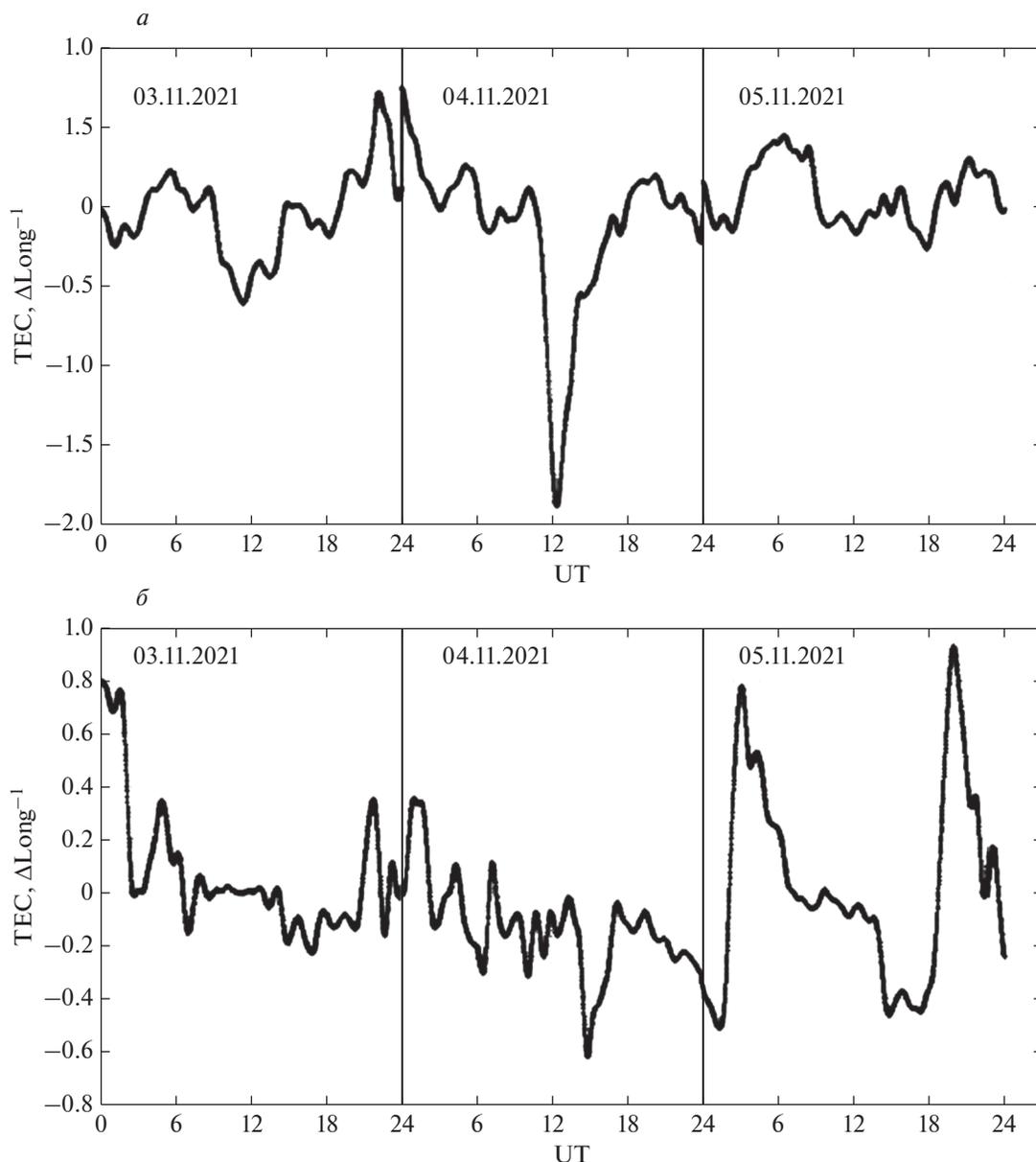


Рис. 2. Вариации долготного градиента TEC 3–5 ноября 2021 г. в Северном (а) и Южном полушариях (б) (адаптировано из Idosa et al. [2023]).

19 декабря 2015 г. $\Delta VTEC = -30\%$ в 13:00 UT при SC в 17:00 UT.

В работе Adebessin and Vakare [2023] представлены результаты анализа изменения параметров области F во время магнитной бури 12 октября 2016 г. (SC в 22:00 UT) по наблюдениям на шести европейских станциях ВЗ.

Отличие этой работы от многих других case-study исследований состоит в том, что исследуются не только “классические” параметры слоя $F2$ ($foF2$ и $hmF2$), но также и высота однородной атмосферы (H), толщина слоя ($B0$) и форма слоя ($B1$).

В течение двух суток, предшествующих SC, по данным ст. Rome (42.8° N) наблюдались положительные возмущения электронной концентрации. Величина $\Delta NmF2$ достигала $+80\%$ и $+40\%$ в 15:00 UT и 05:00 UT, соответственно, 12 октября и 80% в 15:00–16:00 UT 11 октября. Очень сильные “всплески” $\Delta NmF2$ до 400% в 09:00 UT 12 октября и $>100\%$ в 08:00–10:00 UT 11 октября зарегистрированы на ст. San Vito (40.6° N) и Athens (38.0° N) (см. вырезку из соответствующего рисунка на рис. 3). В высоте слоя $F2$ и 11 и 12 октября наблюдались отрицательные отклонения от спокойных величин, достигавшие 25%.

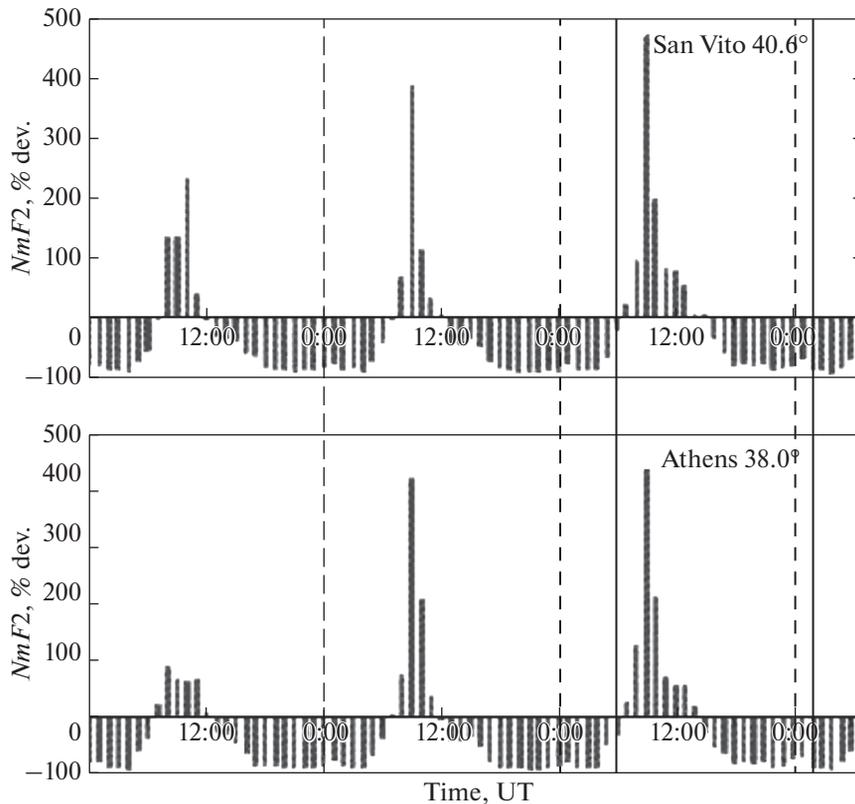


Рис. 3. Вариации $\Delta NmF2$ по измерениям на двух станциях ВЗ 10–12 октября 2016 г. (адаптировано из Adebisin and Vakare [2023]).

В работе Mishra et al. [2020] анализировались измерения TEC на 12 пунктах GPS в четырех регионах (австралийский, бразильский, индийский и южноафриканский) во время трех бурь 2015 г.: 17 марта (SC в 05:00 UT), 22 июня (SC в 19:00 UT) и 19 декабря 2015 г. (SC в 23:00 UT).

В бразильском регионе по данным всех трех пунктов видно уменьшение VTEC примерно вдвое в 15:00 UT 16 марта. В индийском регионе в 13:00 UT 16 марта наблюдается рост VTEC на 45% на ст. Lucknow (26.9° N). Эти высокие величины отмечаются авторами и в тексте статьи. В двух других пунктах региона существенных отклонений VTEC от спокойных условий не зарегистрировано. Ни в южноафриканском, ни в австралийском регионах существенных отклонений VTEC в предбуревые дни также не зарегистрировано.

22 июня в индийском секторе по данным ст. Lucknow с 12:00 до 18:00 UT наблюдалось отрицательное отклонение VTEC примерно на 40%. На всех трех станциях бразильского региона в 10:00–16:00 UT 21 июня наблюдалось длительное уменьшение VTEC примерно вдвое с максимумом около 14:00 UT.

19 декабря с 12:00 до 20:00 UT величина VTEC на той же станции в индийском секторе была ниже спокойных значений на 50%. В бразильском

секторе отклонение величины VTEC от спокойных условий составляло +60% в 18:00 UT на ст. Brasilia (16.0° S) и +50% в 16:00 UT на ст. Salvador (12.9° S).

В работе de Abreu et al. [2023] анализируются 70 бурь в 1999–2018 гг. по измерениям TEC в антарктическом и аргентинско-чилийском секторах. На приведенных в работе для примера рисунках видны отклонения TEC в предбуревые дни от спокойных значений, которые приводятся вместе с возможным разбросом ($q + \sigma$).

Например, за три часа перед бурей 22 сентября 1999 г. (SC в 19 UT) в 16:00 UT на ст. Punta Arenas (53.1° S) величина VTEC была примерно на 65% выше среднего спокойного значения ($q + \sigma$). То же справедливо и для 05:00 UT того же дня. 21 сентября в 16:00 UT указанное превышение составляло 60%.

За два часа до SC перед бурей 14 декабря 2006 г. (SC в 21:00 UT) на ст. Palmer Station (64.8° S) VTEC = 23 TECU (единица измерения TEC), а среднее ($q + \sigma$) = 8 TECU, причем рост VTEC начинается с 16:00 UT. Вырезка из соответствующих рисунков приведена на рис. 4.

Перед бурей 7 октября 2015 г. (SC в 02:00 UT) 6 октября в 06:00–10:00 UT величина $\Delta VTEC$ на

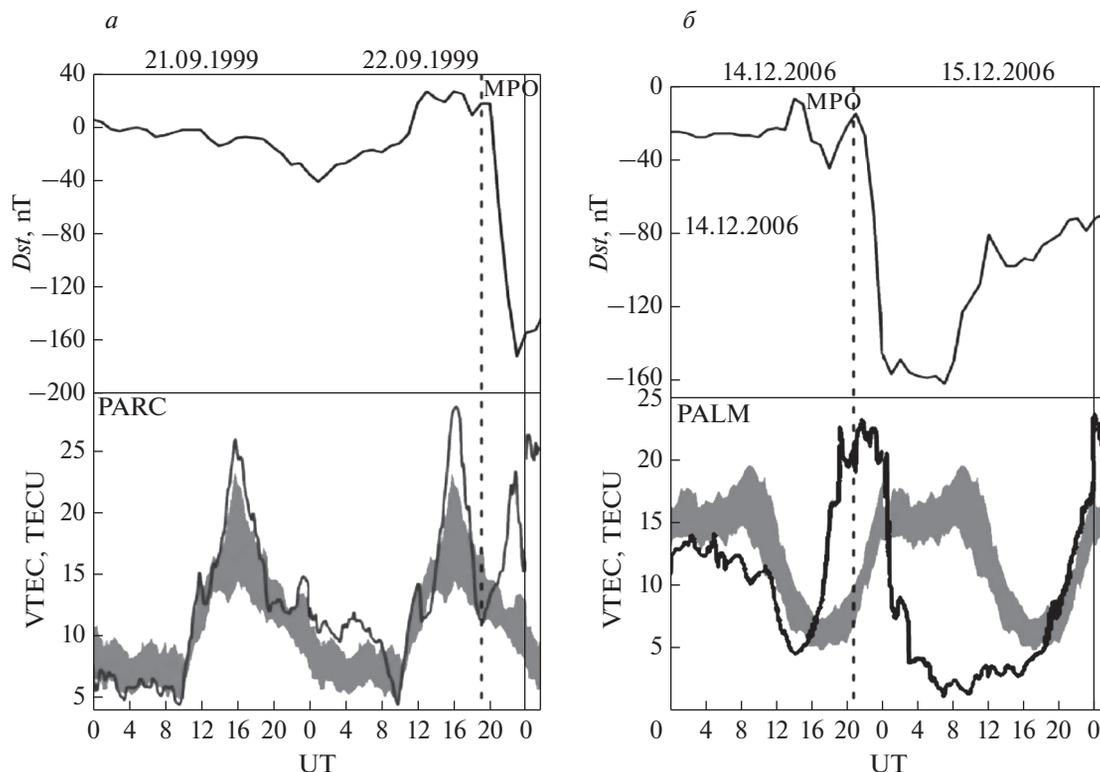


Рис. 4. Вариации Dst и $VTEC$ по данным станции Punta Arenas 21 и 22 сентября 1999 г. (а) и по данным ст. Palmer Station 14 и 15 декабря 2006 г. (б) (адаптировано из Abreu et al. [2023]). Вертикальные штриховые линии – момент SC. Заливкой показаны спокойные величины $VTEC \pm$ стандартное отклонение.

ст. Palmer Station составляла примерно -40% . В 21:00–22:00 UT того же дня наблюдаемые величины $VTEC > 17$ TECU, а среднее ($\mu + \sigma$) < 10 TECU.

В работе Picanço et al. [2021] обсуждается поведение $foF2$ и TEC на двух бразильских станциях Sao Paulo ($2.6^\circ S$) и Cachoeira Paulista ($22.7^\circ S$) во время двух бурь: 22 июня 2015 г. (SC в 18:00 UT) и 17 марта 2015 г. (SC в 05:00 UT).

По измерениям на ст. Sao Paulo 21 июня в 15:00 и 19:00 UT величины $\Delta foF2$ составляли -50% и -40% соответственно. На той же станции 6 марта в 20:00–24:00 UT величина $\Delta foF2$ составляла -50% .

Все эти эффекты в $foF2$ заметны также и в изменениях как $VTEC$, так и индекса DIX (Disturbance Ionospheric Index), вычисляемого по совокупности наблюдательных данных. Авторы отмечают, что предбуревые возмущения привели к тому, что этот индекс достигал величины 2.

Детальное исследование бури 26 августа 2018 г. (SC в 19:00 UT) по наблюдениям на пяти станциях ВЗ было выполнено Mansilla and Zossi [2022]. В качестве спокойного фона использовались наблюдения в самый спокойный день августа (6 августа).

За 2 часа до SC на ст. Jacamarca ($2.3^\circ S$) зарегистрирован “всплеск” $\Delta foF2$ до $+40\%$

На ст. Sao Luis ($2.6^\circ S$) в 13:00 UT наблюдалось падение $hmF2$ с 380 до 260 км, в 15:00 UT падение с 330 до 270 км и в 16:00 UT падение с 350 до 270 км. На ст. Jacamarca ($12.0^\circ S$) с 11:00 до 16:00 UT наблюдались пики с $\Delta hmF2 = +40-50\%$.

Авторы вычислили также по данным ВЗ величины TEC и получили: на ст. Sao Luis с 11:00 UT до момента SC 12–15 TECU при спокойном фоне в 3–8 TECU и на ст. Port Stanley ($51.7^\circ S$) в 14:00 UT 22 TECU при спокойном фоне в 8 TECU.

Те же авторы [Mansilla and Zossi, 2023] анализировали наблюдения на пяти южноамериканских станциях ВЗ, а также величины TEC , пересчитанные из ионограм ВЗ, во время бури 21 июня 2015 г. На рисунках видно, что на ст. Fortaleza ($3.9^\circ S$) за 16 ч до SC происходит падение $foF2$ на 50%. На ст. Cachoeira ($13.9^\circ S$) за два часа до SC наблюдался рост $foF2$ на 70%, а на ст. Boa Vista ($12.3^\circ N$) за два часа до SC виден рост $foF2$ на 30%. По данным ст. Fortaleza зарегистрировано падение TEC на 50% за два часа до SC.

Анализу четырех магнитных бурь в июне и июле 2012 г. а также марте и декабре 2015 г. по наблюдениям TEC посвящена работа Swarnalingam

et al. [2022]. Анализировался очень большой материал спутниковых и наземных измерений ТЕС и N_e .

В работе не приводятся вариаций ионосферных параметров по измерениям в конкретном пункте, но приводятся карты ТЕС. Не приводятся и величин ТЕС в спокойный день. Однако, поскольку в статье подробно представлены данные измерений ТЕС и N_e в течение предбуриевых дней и нескольких дней после начала бури, приведенные материалы позволяют сделать некоторые выводы, относящиеся к обсуждаемой в данной статье проблеме.

Рисунок 4 в указанной статье показывает, что величины ТЕС (и по данным COSMIC-1, и по наземным измерениям) в течение двух дней перед бурей 14 июля 2012 г. были много выше, чем 21 июля. На верхней панели этого рисунка приведены измеренные абсолютные величины ТЕС в течение трех предбуриевых дней и шести дней после начала бури 14 июля 2012 г. Хорошо видно, что в течение предбуриевых дней в широтном поясе $\pm(30-40)^\circ$ имеются три интервала времени, когда величина ТЕС составляет 10 TECU и более. В то же время 21 июля, когда, судя по приведенным на этом же рисунке данным магнитных измерений, восстановительная фаза бури уже давно закончилась, величина ТЕС не превышает 6–7 TECU.

Еще более сильные эффекты видны по данным COSMIC-1 на рис. 8 (Swarnalingam et al. [2022]) для бури 17 июня. Здесь величины ТЕС много раз за три предбуриевых дня (абсолютно спокойные согласно многим магнитным индексам) поднимаются значительно выше 10 TECU, тогда как, начиная с третьего дня после SO, величина ТЕС не превышает 4–6 TECU. Увеличение ТЕС 15 и 16 июня (по сравнению с 21 июня, который можно условно считать спокойным фоном) было даже сильнее, чем во время главной фазы бури 17 июня, причем область положительных возмущений ТЕС в предбуриевые дни захватывала и средние широты.

Абсолютно то же справедливо и для 18 декабря 2015 г. и предбуриевых часов 19 декабря. Примерно за 2 ч до SC в большом широтном интервале от 20° N до 20° S наблюдается сильное повышение ТЕС, которого не видно ни в одном из последующих дней.

Согласно рис. 13 в указанной работе, в течение трех дней перед SC бури 17 марта 2015 г. в районе полудня наблюдаются “всплески” ТЕС, которых не видно 21 марта, когда, судя по поведению Dst -индекса, восстановительная фаза бури уже закончилась.

Эффект возрастания электронной концентрации перед бурей 14 июля 2015 г. можно видеть и на высотных профилях N_e на широте 60° N (верхняя панель рис. 6 указанной статьи). На высотах слоя

F_2 в течение 18 ч до SC величины N_e составляют $(4-5) \times 10^{11} \text{ м}^{-3}$, тогда как, начиная со второго дня после SC, величина N_e на этих высотах равна $(2-3) \times 10^{11} \text{ м}^{-3}$. Обратим внимание на то, что обе рассмотренные бури летние.

Akinyemi et al. [2021] рассмотрели реакцию ионосферы на бурю 24 октября 2011 г. по данным ТЕС, измеренным на трех станциях GPS в Нигерии. Из приведенных в работе рисунков видно, что на двух пунктах из трех наблюдается рост ТЕС на 30% примерно за 6 ч до SC.

В работе [Astafyeva et al., 2021] анализируется буря 25 августа 2018 г. по спутниковым (ГЛОНАСС) и наземным (GPS) измерениям ТЕС. Анализируемым параметром является ТЕС-slips — число внезапных скачков ТЕС по отношению к общему числу наблюдений. За два часа до SC наблюдался очень сильный скачок ТЕС-slips в высоких широтах. Он был сильным в низких широтах и отсутствовал на средних.

Данные спутниковых наблюдений N_e в области F во время бури 25 августа 2018 г. (SC в 12:00 UT) подробно рассматриваются в работе Spogli et al. [2021]. Карты пространственного распределения N_e в экваториальной области показывают, что 24 августа это распределение отличалось от такового в спокойный день 10 августа — пик экваториальной аномалии был на 10° сдвинут к северу. Авторы отмечают, что “отклонение в предбуриевых условиях от спокойного поведения является удивительной особенностью бури”.

Данные ВЗ показывают, что на ст. Ст. Sao Luis (2.5° S) за 6–8 ч до SC произошло сильное падение hmF_2 . Есть также падения hmF_2 на этой станции в 04:00 и 12:00 UT 24 августа.

Yonas et al. [2022] анализировали вариации отношения $[O]/[N_2]$ на высоте 625 км по измерениям аппаратурой GUVI на спутнике TIMED во время четырех бурь: 23 апреля 2012 г., 17 марта 2013 г., 17 марта 2015 г. и 25 августа 2018 г. в четырех широтных зонах. Приводятся вариации этого отношения как в периоды самих бурь, так и в течение двух предбуриевых дней. Только в одном случае получено заметное отклонение от спокойных условий: $\Delta([O]/[N_2]) = -35\%$ за восемь часов до SC в буре 2013 г.

В работе Zhai et al. [2023a] рассмотрена реакция ионосферы на бурю 4 ноября 2021 г. (SC в 00:00 UT) по данным ВЗ на станциях AS00Q (около 10° S) и CAJ2M (около 22° S). В работе приводятся результаты наблюдений за три дня — 3–5 ноября. При этом 3 ноября считается спокойным днем, с которым сравниваются два возмущенных дня. Возможность предбуриевых возмущений 3 ноября не учитывается.

Однако, на рис. 6 в указанной статье виден пик $NmF_2 = 24 \times 10^{11} \text{ м}^{-3}$ в 17:00–18:00 UT (16:00–

17:00 LT) на ст. AS00Q, тогда как в местный полдень (13:00 UT) $NmF2 = 15 \times 10^{11} \text{ м}^{-3}$. Похожий рост с $15 \times 10^{11} \text{ м}^{-3}$ в местный полдень до (19–23) $\times 10^{11} \text{ м}^{-3}$ в 17:00–18:00 UT виден и для ст. CAJ2M. Но последняя на 2 ч западнее первой, поэтому указанный рост Ne приходится на двух станциях на один момент UT, но разные моменты LT. Это может быть важно для анализа процессов, вызывающих предбуревые возмущения.

Детальному анализу поведения области F по данным ВЗ на четырех станциях Северного полушария во время трех бурь 2010 г. (28 марта (SC в 18:00 UT), 28 мая (SC в 20:00 UT) и 3 августа (SC в 17:00 UT) посвящена статья Joshua et al. [2021a].

На соответствующих рисунках в этой статье приведены отклонения наблюдаемых величин $NmF2$ от фоновых значений, которые построены по наблюдениям в 10 самых спокойных дней каждого месяца. На этих рисунках видно, что и в предбуревой день и в часы до SC буревого дня наблюдается много как положительных, так и отрицательных величин $\Delta NmF2$ с амплитудой больше 40%. Мы ограничимся здесь лишь наиболее яркими примерами.

На ст. Pruhonice (50° N) 27 и 28 марта в 08:00 UT $\Delta NmF2 = -80\%$. 28 мая в 08:00 UT $\Delta NmF2 = +80\%$.

На ст. San Vito (40° N) 2 августа в 06:00 UT и в 07:00 UT $\Delta NmF2 = +104\%$ и $+80\%$ соответственно.

На ст. Hermanus (34° N) 3 августа в 04:00 UT $\Delta NmF2 = +80\%$.

На ст. Porin (8.5° N) 3 августа в 02:00 и 06:00 UT $\Delta NmF2 = 70-80\%$.

Авторы обсуждают поведение $\Delta NmF2$ в период перед каждой бурей. В частности, они подчеркивают, что 27 мая возмущения $NmF2$ пришлись на совершенно спокойный в геомагнитном плане период ($Dst = 0$ нТл and $Kp = 13$). Они отмечают также отрицательные возмущения $NmF2$ на ст. Porin и Hermanus 3 августа и сильный “всплеск” $NmF2$ на ст. San Vito 2 августа.

Работа Joshua et al. [2021b] посвящена исследованию именно предбуревых эффектов (pre-magnetic storm signatures, PMS). Авторы проанализировали критические частоты $foF2$, измеренные на 12 ионосферных станциях, расположенных в широком диапазоне широт и долгот. Были рассмотрены 17 магнитных бурь 2010–2012 гг. Использовался обычный метод пересчета $foF2$ в $NmF2$ и вычисления возмущенных величин $\Delta NmF2$ путем сравнения наблюдаемых в предбуревые дни значений со значениями в магнитноспокойные дни. При этом в качестве PMS рассматривались только события с $\Delta NmF2$, превышающими по абсолютной величине 44%. Чтобы избежать влияния предшествующих магнитных возмущений, рас-

сматривалось поведение нескольких магнитных индексов в течение шести предыдущих дней.

Основные выводы Joshua et al. [2021a] состоят в том, что

1. PMS наблюдаются при спокойном кольцевом токе ($Dst > -25$ нТл).
2. PMS наблюдаются при умеренной авроральной активности ($AE > 100$ нТл).
3. PMS наблюдаются при слабой геомагнитной активности ($Ap < 7$; $Kp < 3$).
4. В среднем на экваториальных и низкоширотных станциях отклонения $NmF2$ от спокойных условий сильнее, чем на среднеширотных.

Главный для обсуждаемой в данной работе проблемы результат Joshua et al. [2021a] состоит в том, что явления PMS в ионосфере не являются результатом более ранних геомагнитных бурь, а являются независимыми событиями, которые прокладывают дорогу (pave way) последующей геомагнитной буре. Мы вернемся к выводам этой работы в Обсуждении.

Valodis et al. [2023] рассмотрели реакцию ионосферы на бурю 17 марта 2015 г., анализируя влияние этой бури на точность определения местоположения с помощью Global Navigation Satellite Systems (GNSS). Анализировались наблюдения на европейских станциях системы GNSS. Анализируемым параметром была точность определения местоположения, выраженная как “облака ошибок точности” (positioning discrepancy clouds). Авторы отмечают (и это вынесено в резюме статьи), что в течение предбуревое дня 16 марта отмечались изменения наблюдаемых параметров, которые свидетельствуют о том, что происходили существенные ионосферные сцинтилляции.

Nabyarimana et al. [2023] рассмотрели поведение TEC во время бурь 17 марта в 2013 г. (SC в 06:00 UT) и 17 марта 2015 г. (SC в 05:00 UT) по измерениям в двух пунктах. Анализировалось отклонение ΔTEC наблюдаемых величин TEC от соответствующих величин TEC в спокойных условиях. На рисунках в статье видно, что в предбуревой день 16 марта 2013 г. величина ΔTEC на ст. Mbarara (0.6° S) составляла $+40\%$ в 17:00 и 20:00 UT. Такое же отклонение TEC наблюдалось на ст. Addis Ababa (9.0° N) в 19:00 UT. Авторы подчеркивают, что предбуревые возрастания ΔTEC на обеих станциях имели примерно одинаковую амплитуду.

Перед бурей 2015 г. на ст. Addis Ababa наблюдались величины ΔTEC в -40% в 00:00 UT 17 и $+40\%$ в 03:00 UT 16 марта. На ст. Mbarara был зарегистрирован очень сильный “всплеск” $\Delta \text{TEC} \sim +80\%$ в 02:00 UT 16-го, а в 19:00 UT 16-го и в 02:00 UT 17-го ΔTEC было $+35\%$. Авторы отмечают указанный сильный “всплеск” и относят его к предбуревым эффектам в низкоширотной ионо-

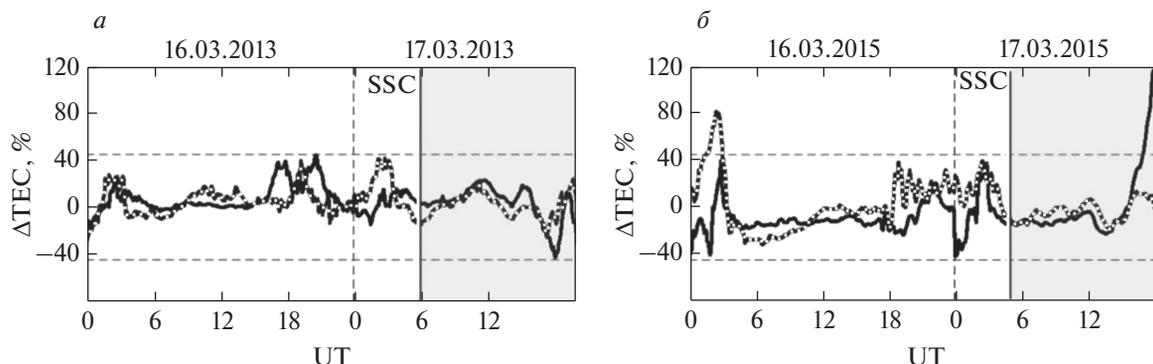


Рис. 5. Изменения ΔTEC перед бурей 17 марта 2013 г. (а) и 17 марта 2015 г. (б). Сплошная и штриховая линии соответствуют ст. Addis Ababa и Mbarara соответственно (адаптировано из [Nabyarimana et al., 2023]).

сфере (см. рис. 5, адаптированный из двух рисунков в работе [Nabyarimana et al., 2023]).

В работе Verényi et al. [2023] рассматривалось поведение параметров области F во время двух сильных бурь 12 ноября 2012 г. (SC в 23:00 UT) и 17 марта 2015 г. (SC в 05:00 UT) по наблюдениям на пяти европейских станциях ВЗ.

Авторы отмечают, что в предбуревый период (11–12 ноября, $Kp = 1+$) наблюдались положительные отклонения $foF2$ и TEC от спокойных величин. На рисунках в статье видно, что по измерениям на ст. Athens величина $\Delta foF2$ 11 ноября в 10:00 UT и 12 ноября в 11:00 UT составляла +25%. На всех пяти станциях виден рост ΔTEC на 20–30% в оба дня с максимумом около полудня. Авторы не обнаружили существенных эффектов ни в $foF2$, ни в TEC в предбуревый день 16 марта 2015 г.

В работе Zhai et al. [2023b] исследовалась реакция TEC в североамериканском и южноамериканском регионах на бурю 25 августа 2018 г. Авторы сосредоточили внимание на поведении TEC во время различных фаз бури. Но из карты на рис. 2 в этой статье для 16:00 UT видно, что величина ΔTEC на широтах (46–48)° N была 3–4 TECU или около +40%. Это возрастание TEC авторы отмечают и в тексте. Начало падения индекса Dst приходится на 18:00 UT. В это же время начался и заметный рост индексов Kp и AE , так что этот момент можно считать моментом SC.

Большое внимание проблеме ионосферных предвестников уделено в работе Kumar and Parkinson [2017]. Общие суждения авторов по поводу этой проблемы будут приведены ниже в Обсуждении. Здесь приведем лишь конкретные результаты. Анализировались изменения $NmF2$ по измерениям на 132 ионозондах ВЗ до, во время и после 967 геомагнитных бурь в период с 1965 до 2015 г.

Как пример приведена буря 01 марта 1981 г. (SC в 13:00 UT) по данным ст. Canberra. Согласно рис. 3 в указанной статье в 17:00 UT 28 февраля

$\Delta NmF2 = +22\%$. Следует подчеркнуть, что особенно тщательно строился спокойный фон для сравнения: усреднялись все спокойные дни в интервале ± 45 дней от бури. На рис. 4 в указанной статье видно, что выше примерно 40° N есть среднее увеличение $\Delta NmF2$ (усредненное по 967 магнитным бурям) на 6–10%.

Авторы формулируют несколько общих закономерностей поведения предбуревых возмущений. Они отмечают, что рост электронной концентрации в предбуревой период начинается в высоких широтах и затем двигается на средние и в низкие широты. Согласно их результатам предбуревые возмущения наблюдаются чаще всего во время равноденственных бурь и реже всего – зимой, а также чаще днем, чем ночью.

Поведению ионосферы по данным ВЗ и некогерентного рассеяния в Харькове во время бури 18 декабря 2019 г. (SC в 11:00 UT) была посвящена статья Katsko and Emelyanov [2023]. Буря была очень слабой – минимальное значение индекса Dst было всего –28 нТл. 16 декабря рассматривалось как эталонный спокойный день, и измерения в последующие дни сравнивались с ним. В предбуревый день 17 декабря наблюдались три отклонения $foF2$ с амплитудой около 20%: положительные в 09:00 и 15:00 UT и отрицательное в 12:00 UT. Наличие этих отклонений авторы отмечают в тексте статьи.

К сожалению, в работе не приводятся данных некогерентного рассеяния за эталонный спокойный день. Однако изменение N_e на высоте 300 км 17 декабря явно носит необычный характер – видны 2 хорошо выраженных пика в 08:00 и 13:00 UT. Это отличается от хорошо известного типичного суточного хода $NmF2$.

Timuçin [2019] применил необычный метод к анализу реакции $foF2$ на геомагнитные возмущения. Он рассматривал как возмущение момент, когда индекс Kp составлял 4+. В большинстве случаев это соответствует слабой магнитной бурей.

Анализировались наблюдения методом ВЗ на ст. Manila (14.7° N) в течение одного года (1991). Рассматривалось отклонение $\delta foF2$ критической частоты в данный час от ее среднего значения за год. Методом наложенных эпох строилось изменение $\delta foF2$ в течение 50 ч до и после указанного момента. Отдельно рассматривались дневные (06:00–18:00 LT) и ночные (19:00–05:00 LT) часы суток. Результаты применения указанного метода показывают, что заметное отклонение $\delta foF2$ от нулевых значений начинается примерно за 20 ч до указанного момента, причем в дневные часы это отклонение имеет положительный знак, а в ночные – отрицательный.

Статья [Vojilova and Mukhtarov, 2023] посвящена реакции ионосферы на бурю 3 февраля 2022 г. (SC в 00:00 UT). Анализировались величины TEC из банка CODE и строилось пространственное распределение отклонения ΔTEC наблюдаемых величин от спокойных условий. Согласно рис. 3 в указанной статье 2 февраля в 20:00 UT $\Delta\text{TEC} = -25\%$ в пункте (70° N 00° E). В 17:00 UT в пункте (70° N, 180° E) $\Delta\text{TEC} = +20\%$.

Поведение ионосферы во время бури 25 августа 2018 г. (падение Dst с 18:00 UT) исследовалось в работе Lissa et al. [2020]. Анализировались вариации TEC по данным нескольких приемных пунктов. В пункте Lucknow (26.9° N) в 09:00 UT 25 августа величина $\Delta\text{TEC} = -60\%$. В пункте Waltair (17.7° N) в этот же день в 13:00 UT $\Delta\text{TEC} = +60\%$ и 24 августа в 12:00 UT $\Delta\text{TEC} = +40\%$.

В работе Giri et al. [2023] для рассмотрения поведения $foF2$ во время магнитовозмущенных условий был применен метод вейвлет-анализа. Исходными данными были наблюдения методом ВЗ на ст. Boulder (40° N) во время очень сильной бури 17 марта 2015 г. и слабой бури 27 января 2022 г. Авторы заключили (и это вынесено даже в резюме), что $foF2$ увеличивалось в течение двух дней перед сильной бурей, тогда как перед слабой бурей такого увеличения не наблюдалось и что увеличения или уменьшения $foF2$ могут использоваться как предвестники магнитной бури.

Работа Younas et al. [2022] посвящена вариациям отношения $[O]/[N_2]$ по спутниковым измерениям на высотах области F во время четырех бурь. Известно, что при неизменном потоке ионизирующей радиации это отношение определяет равновесную концентрацию электронов в максимуме слоя $F2$. Авторы обнаружили, что в течение трех бурь из четырех по измерениям в средних широтах Северного полушария наблюдается уменьшение $[O]/[N_2]$ на 20–25% за 4–6 ч до SC.

Mandrikova et al. [2021] разработали новый метод анализа и моделирования ионосферных параметров. Они применили этот метод, в частности, к анализу измерений $foF2$ во время магнитных

бурь 25 августа 2018 г. и 10 мая 2019 г. на двух станциях ВЗ.

Авторы получили, что наблюдаются “положительные ионосферные аномалии ... с максимальной интенсивностью 24 августа примерно в 10:00 UT на ст. Паратунка и примерно в 16:00 UT на ст. Москва”. Эта интенсивность превысила пороговую величину (которая определяется в методе как сложный параметр, связанный с доверительной вероятностью) в 09:00 UT на ст. Паратунка и на семь часов позже на ст. Москва.

Они отмечают также, что за несколько часов до начала бури 10 мая 2019 г. по данным ст. Паратунка наблюдалась положительная аномалия средней интенсивности. Максимум аномалии пришелся на 11:00 UT 10 мая, причем за 7 ч до SC величина $foF2$ превысила пороговую величину.

Chernigovskaya et al. [2021] проанализировали реакцию области F на бури 17 марта 2015 г. SC в 06:00 UT) и 22 июня 2015 г. по наблюдениям на восьми станциях ВЗ примерно на одной широте на разных долготах Северного полушария и на 28 пунктах системы ГЛОНАСС на средних широтах Северного полушария.

Работа направлена на выяснение долготных эффектов поведения слоя $F2$ во время главной и восстановительной фаз магнитной бури, поэтому предбуревые дни не рассматриваются. Однако на рисунках приводятся данные как для двух предбуревых дней (15 и 16 марта 2015 г.), так и для восьми дней после начала бури (до 25 марта). Это позволяет провести оценки отклонений $foF2$ в предбуревые дни, сравнивая их с 25 марта, когда с большой вероятностью восстановительная фаза бури уже закончилась, и этот день можно считать спокойным в геомагнитном отношении. Так, на рис. 5 в рассматриваемой статье ясно видно, что в долготном интервале 120°–160° как 15, так и 16 марта есть периоды времени, в течение которых $foF2$ превосходит 10 МГц, тогда как в эти же периоды 25 марта величины $foF2$ составляют 7–8 МГц. Такая же картина наблюдается для TEC в долготном интервале 140°–160°: в первой половине 15 и 16 марта величины TEC составляют 24–26 TECU, а в первой половине 25 марта – 18–20 TECU. Из рис. 3 в рассматриваемой работе следует, что дни 15 и 16 марта были абсолютно магнитоспокойными: Dst - и Ap -индексы были близки к нулю, а Kp -индекс не превышал 3+.

Еще более убедительная картина видна на рис. 6. Во всем рассмотренном долготном интервале 0°–160° в течение ~35 ч перед SC магнитной бури в 18:00 UT 22 июня 2015 г. величины TEC много больше, чем 30 июня–2 июля (эти дни можно условно принять в качестве спокойных). Рис. 3 показывает, что предбуревые дни 20 и 21 июня были магнитоспокойными.

Согласно рис. 7 наблюдаются понижения $hmF2$ в течение предбуревого дня 16 марта. Аналогичные понижения видны и для 22 июня.

Работа Ye et al. [2023] посвящена реакции ионосферы на бурю 16 июля 2003 г. (SC в 03:00 UT). Хотя в работе анализируются в основном ионосферные неоднородности, на рис. 3 приведено изменение $foF2$ в течение 16–18 июля по измерениям на четырех станциях ВЗ.

На ст. Wakkanai (45.0° N) в 13:00 UT 15 июля наблюдался рост на 20% величины $foF2$ по сравнению со спокойным значением, которое получено методом скользящего среднего за 27 дней.

На ст. Kokobunji (35.7° N) в то же время (13:00 UT) также наблюдалось возрастание $foF2$ на 20%. Аналогичное возрастание зарегистрировано в тот же день и в 08:00 UT.

В данных ст. Yamagawa (31.2° N) видно возрастание $foF2$ на 25% в 13:00 UT и уменьшение на 25% в 18:00 UT.

На ст. Okinawa (26.6° N) наблюдается рост $foF2$ на 30% в 13:00 UT и падение на 30% в 18:00 UT.

В работе Фетисовой и Мандриковой [2022] представлен оригинальный метод моделирования и анализа параметров слоя $F2$ в периоды магнитных бурь. Приводятся наблюдения методом ВЗ на ст. Паратунка. Перед бурей 16 апреля 2021 г. (SC в 00:00 UT) 14 и 15 числа в первые часы суток наблюдалось уменьшение $foF2$ по сравнению со спокойными условиями (27-дневная медиана).

Авторы пишут, что “Накануне события на фоне слабо возмущенного геомагнитного поля в ионосфере наблюдались колебательные процессы. В начале суток 15 апреля началось плавное повышение электронной концентрации, которое привело к формированию положительного ионосферного возмущения слабой интенсивности. Эта положительная аномалия сформировалась за 18 ч до SC магнитной бури”.

Фетисова и Мандрикова [2022] отмечают появление колебательных процессов и накануне бури 12 мая 2021 г. Они пишут, что 11 мая “...за 6 ч до начала бури сформировалась положительная ионосферная аномалия умеренной интенсивности...общей длительностью около 20 ч”. При этом авторы специально подчеркивают, что наличие этой аномалии подтверждается и результатами их моделирования.

Аналогичный эффект положительной аномалии $foF2$, начавшейся до SC, зарегистрирован и перед магнитной бурей 27 мая 2017 г. Резюмируя результаты своего исследования, авторы указывают, что “...за несколько часов до начала умеренных и сильных бурь наблюдается эффект повышения электронной концентрации в ионосфере”.

В статье большой группы авторов [Mosna et al., 2020] подробно исследовалось поведение ионо-

сферы во время магнитной бури 8 сентября 2017 г. по наблюдениям методами ВЗ (ст. Pruhonice) и НЗ (сеть трасс). Хотя основной акцент в работе сделан на анализ динамических процессов непосредственно в дни магнитной бури, авторы упоминают и состояние ионосферы до начала бури (6 и 7 сентября). Авторы отмечают, что во второй половине 6 сентября и днем 7 сентября наблюдались увеличения $foF2$ по сравнению со спокойной медианой для ст. Pruhonice. На рис. 4 в указанной работе хорошо видно, что 6 сентября величина $foF2$ на несколько часов поднималась выше 6 МГц и достигала 6.5 МГц, тогда как спокойная медиана составляла 5.5 МГц. 7 сентября превышение наблюдаемых величин $foF2$ (7 МГц и выше) над медианой (5.5 МГц) было еще сильнее и длилось дольше.

Mosna et al. [2020] подчеркивают, что характер изменения $foF2$ был очень близок к характеру изменений ТЕС по наблюдениям на сети трасс в северной части России во время этой же бури. Поскольку широта ст. Pruhonice равна 50° N, а указанные измерения ТЕС проводились в широтном интервале 57° – 67° N, очевидно, что обнаруженные изменения $foF2$ и ТЕС в предбуревые дни рассмотренной бури охватывали большую территорию.

В статье Adekoya et al. [2023] подробно рассматриваются ионосферные эффекты магнитных бурь 13 октября 2016 г. и 8 сентября 2017 г. по наблюдениям на 32 ионосферных станциях в двух географических секторах. На многочисленных рисунках в статье хорошо видны отклонения (как положительные, так и отрицательные) наблюдаемых величин $NmF2$ в два предбуревых дня обеих бурь от спокойных величин (усреднение за шесть спокойных дней). Авторы подчеркивают, что предбуревые эффекты были лучше выражены в американском секторе, чем в азиатско-австралийском.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Целью предыдущего параграфа было показать, что в большинстве публикаций по изучению реакции ионосферной области $F2$ на геомагнитные бури есть указание на наличие в предбуревые дни (за несколько часов, или даже десятков часов до SC бури) отклонений основных параметров ($foF2$, $hmF2$, ТЕС) от их величин в спокойных условиях. Во многих работах сами авторы отмечают случаи таких необычных отклонений в предбуревые дни и высказывают предположения об их физической природе. Отметим, что число таких работ заметно возросло именно в последние годы, что показывает, что проблема предбуревых вариаций становится актуальной.

Отметим несколько моментов в рассмотренных в предыдущем параграфе статьях, которые

могут иметь отношение к обсуждению природы предбуравных эффектов. Прежде всего, важно, что предбуравные эффекты в ионосфере находят не только в изменениях “классических” параметров (f_oF2 , TEC), но и высоте слоя $F2$ ($h'F2$, $hmF2$), в ошибках навигационных систем (Katsko and Emelyanov [2023]) и в ионосферных сцинтилляциях (Balodis et al. [2023]).

Обнаружив заметные возрастания ΔTEC в предбуравные дни 9 и 10 сентября 2015 г., Swadogo et al. [2023] предположили, что они объясняются вариациями Dst . Но этот индекс в предбуравные дни был и положительным, и отрицательным, и кривые для этих дней не отличаются от кривых для спокойных дней.

Picanço et al. [2021] отмечают, что обнаруженные ими отклонения параметров в низкоширотной ионосфере в предбуравные дни могут быть предвестниками геомагнитных бурь.

Отмечая наличие отрицательных отклонений ионосферных параметров в предбуравные дни от их регулярного поведения, Astafyeva et al. [2021] высказывают предположение, что эти отклонения могут быть вызваны флуктуациями межпланетного электрического, или магнитного поля (IEF/Bz), которые индуцируют электрические поля быстрого проникновения (PPEF). Но никаких указаний на существование таких полей в предбуравные дни не обнаружено.

Анализируя свои результаты по вариациям отношения $[O]/[N_2]$ в течение четырех бурь, Yonas et al. [2022] отмечают, что только в одном случае в предбуравные дни наблюдалось заметное (на 35%) уменьшение этого отношения. В остальных случаях оно не отличалось от фонового. Это заставляет с осторожностью относиться к предположению о том, что предбуравные эффекты в f_oF2 связаны именно с изменением состава термосферы на высотах слоя $F2$. Liu et al. [2008] получили, что возрастания f_oF2 не сопровождаются заметными изменениями $hmF2$ в предбуравной период.

Nabyarimana et al. [2023] отметили, что во время бури 17 марта в 2013 г. по измерениям в двух пунктах Mbarara ($0.6^\circ S$) и Addis Ababa ($9.0^\circ N$) предбуравные возрастания ΔTEC на обеих станциях имели примерно одинаковую амплитуду. Это позволяет составить представление о географических масштабах явления. К выводу о том, что изменения f_oF2 и TEC в предбуравные дни охватывали большую территорию, пришли и Mosna et al. (2020). Это является, по их мнению, еще одним аргументом против метеорологической природы этих явлений.

Важен обнаруженный в работах Zhai et al. [2023a, b] факт, что рост $NmF2$ перед бурей 21 ноября 2021 г. приходится на двух станциях на один момент UT, но разные моменты LT (у станций

разные долготы). Это может быть указанием на то, что предбуравные эффекты контролируются скорее мировым временем, чем местным, а это может быть важно для анализа процессов, вызывающих эти эффекты.

Большое внимание проблеме ионосферных предвестников уделено в работе Kumar and Parkinson [2017]. Авторы подчеркивают, что их исследование показывает возрастания ионосферных параметров перед SC магнитной бури, а в некоторых случаях почти за день до него. Авторы считают, что есть “...сильные доказательства того, что эти возрастания совершенно определенно реальны и начинаются в среднем за 60 ч до реального начала бури..., хотя и трудно себе представить, как ионосфера “узнает” о предстоящей буре”.

По их данным возрастание электронной концентрации сначала происходит в предбуравной период в высоких широтах и затем постепенно опускается по широтам, достигая экватора во время главной фазы бури. Они отмечают также, что высокоширотные предбуравные возрастания N_e более интенсивны в Северном полушарии, чем в Южном.

Как видно из рисунков в работе Ye et al. [2023], отрицательные отклонения f_oF2 появляются в предбуравной период только в низких широтах.

Kumar and Parkinson [2017] повторили свой анализ (см. предыдущий параграф), усилив ограничение на спокойные условия в предбуравной день. Бурь стало меньше, но картина не изменилась. Они заключают, что дело не в возмущенных условиях предбуравных дней и что предбуравные возрастания могут “иметь корни” в области дневного каспа, как это было предположено в работе [Danilov and Belik, 1992]. Авторы высказывают также надежду, что предбуравные эффекты в ионосфере важны для проблемы прогнозирования космической погоды.

Как отмечалось в предыдущем параграфе, результаты наблюдений в работе Chernigovskaya et al. [2021] указывают на увеличение f_oF2 и уменьшение $hmF2$ в предбуравные дни. Этот факт дает некий ключ к процессам, ответственным за наблюдаемые эффекты. Если бы рост f_oF2 был связан с составом термосферы (отношение $[O]/[N_2]$), то при понижении максимума слоя $F2$ в слое с более низким отношением, величина f_oF2 тоже должна была бы уменьшаться. Очевидно, “работает” какой-то другой процесс.

Idosa et al. [2023] считает, что предбуравные возмущения ионосферных параметров могут быть рекомендованы как предвестники магнитных бурь. По их мнению, положительные возмущения непосредственно перед SC могут иметь метеорологическую природу, тогда как метеорологическое происхождение возмущений за десятки часов до SC маловероятно. Поскольку механизм

возникновения предбуриевых эффектов до сих пор неизвестен, можно предположить, что “работают” несколько механизмов по-разному в разные бури.

Mikhailov and Perrone [2009, 2021] категорически отрицают концепцию предбуриевых ионосферных возмущений. В недавней работе Данилова [2022] была представлена критика позиции указанных авторов и приведены результаты многих исследований в поддержку этой концепции. Работы последних лет, рассмотренные в данном обзоре, на наш взгляд, дают дополнительные аргументы в пользу этой концепции, поэтому здесь мы не будем возвращаться к работам [Mikhailov and Perrone, 2009, 2021].

В 2020 и 2021 гг. была опубликована серия работ [Данилов и Константинова, 2020а, б; 2021а, б, в; Константинова и Данилов, 2020, 2021; Danilov and Konstantinova, 2021] с результатами детального анализа характеристик предбуриевых отклонений $foF2$ по данным ст. Slough (254 бури) и ст. Juliusruh (272 бури). В этих работах были получены зависимости характеристик таких отклонений от различных внешних параметров (солнечная активность, интенсивность бури, сезон и т.д.). Сжатое описание полученных в этих работах результатов можно найти также в работе Данилова [2022].

По данным ст. Slough были рассмотрены 254 бури за период с 1976 по 2010 гг. и найдено 1353 события (отклонения $foF2$ от спокойных условий). 996 отклонений имели положительный знак и 357 – отрицательный. По данным ст. Juliusruh были рассмотрены 272 бури за тот же период и найдено 2682 события (отклонения $foF2$ от спокойных условий). 2007 отклонений имели положительный знак и 675 – отрицательный.

В работах Joshua et al. [2021a, b], посвященных исследованию именно предбуриевых эффектов в ионосфере (PMS, см выше), было обнаружено, что явления PMS часто наблюдаются при южной компоненте межпланетного магнитного поля и иногда при умеренной авроральной активности. Это, по их мнению, может указывать на то, что эти явления (хотя они и наблюдаются в спокойные в магнитном отношении дни) могут быть связаны с давлением солнечного ветра. А вот метеорологический источник PMS по мнению Joshua et al. [2021a] маловероятен, хотя и не может быть исключен полностью.

Возвращаясь к проблеме PMS как предвестников, Joshua et al. [2021b] высказывают предположение, что комбинация изменений нескольких параметров солнечного ветра, ММП и магнитосферы может приводить к ситуации, когда магнитная буря еще не наступила, а определенные изменения в ионосфере уже наблюдаются, предвещающая магнитную бурю. Авторы полагают, что “PMS, если их правильно понять, весьма вероят-

но могут служить как указатель (pointer) появления магнитной бури”. Авторы подчеркивают важность этой проблемы с учетом важности предсказания явлений космической погоды и, прежде всего, магнитных бурь.

Возражая выводам Mikhailov and Perrone [2009, 2020], которые объясняют предбуриевые эффекты Q -возмущениями, Joshua et al. [2021b] заявляют: “очевидно, что после каждого PMS геомагнитная буря начинается либо немедленно, либо в пределах 24–48 ч”. Понятно, что в случае Q -возмущений это не так.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа направлена, прежде всего на то, чтобы показать, что проблема ионосферных возмущений в период перед магнитными бурями существует и привлекает все большее внимание специалистов. Стоит подчеркнуть, что после выхода в свет нашего обзора в 2019 г. и даже после относительно недавней статьи Данилова [2022] появилось много публикаций, дающих подтверждение наличия таких возмущений. Обзору этих публикаций и посвящена основная часть данного обзора.

Из приведенного материала, на наш взгляд, следует, что многие исследователи обращают внимание на предбуриевые возмущения параметров области F (прежде всего, $foF2$ и TEC) и даже высказывают некие суждения об их возможной физической природе. Сам факт существования таких возмущений не вызывает сомнения. И, как считают многие авторы, они являются предвестниками магнитных бурь. Если это так, то важность их исследования по очевидным причинам огромна.

Очевидно, что нужны дальнейшие исследования поведения ионосферных параметров именно в дни, предшествующие магнитным бурям. Такие исследования должны базироваться на анализе многих бурь и измерениях во многих пунктах. Целью этих исследований должно быть получение как можно более полной картины зависимости как положительных, так и отрицательных отклонений ионосферных параметров в предбуриевой период от их величин в абсолютно спокойных условиях от различных внешних факторов, прежде всего – от параметров космической погоды (солнечная активность, геомагнитные индексы, параметры солнечного ветра и межпланетного магнитного поля), а также от сезона, местного времени начала бури и других параметров.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Благовещенский Д.В.* Космическая погода и ионосферные радиоволны. Saarbrücken – Germany: Palmarium Academic Publishing. 123 p. 2012.
- *Данилов А.Д.* Обсуждение проблемы ионосферных предвестников магнитных бурь // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 62. № 1. С. 97–105. 2022. <https://doi.org/10.31857/S0016794022010047>
- *Данилов А.Д., Константинова А.В.* Ионосферные предвестники геомагнитных бурь. 1. Обзор проблемы // Геомагнетизм и аэрномия Т. 59. № 5. С. 594–606. 2019. <https://doi.org/10.1134/S001679401905002X>
- *Данилов А.Д., Константинова А.В.* Детальный анализ поведения критической частоты слоя F_2 перед магнитными бурями. 1. Сезонные вариации // Гелиогеофизические исследования. Вып. 28. С. 3–12. 2020а.
- *Данилов А.Д., Константинова А.В.* Детальный анализ поведения критической частоты слоя F_2 перед магнитными бурями 2. Зависимость от времени до начала бури // Гелиогеофизические исследования. Вып. 28. С. 13–21. 2020б.
- *Данилов А.Д., Константинова А.В.* Детальный анализ поведения критической частоты слоя F_2 перед магнитными бурями. 4. Зависимость от солнечной активности // Гелиогеофизические исследования. Вып. 30. С. 3–8. 2021а. https://doi.org/10.54252/2304-7380_2021_30_3
- *Данилов А.Д., Константинова А.В.* Детальный анализ поведения критической частоты слоя F_2 перед магнитными бурями. 5. Зависимость от местного времени начала бури // Гелиогеофизические исследования. Вып. 30. С. 14–20. 2021б. https://doi.org/10.54252/2304-7380_2021_30_14
- *Данилов А.Д., Константинова А.В.* Детальный анализ поведения критической частоты слоя F_2 перед магнитными бурями. 3. Зависимость от интенсивности бури // Гелиогеофизические исследования. Вып. 29. С. 24–29. 2021в. https://doi.org/10.54252/2304-7380_2021_29_24
- *Данилов А.Д., Морозова Л.Д., Мирмович Э.Г.* О возможной природе положительной фазы ионосферных бурь // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 25. № 5. С. 768–772. 1985.
- *Константинова А.В., Данилов А.Д.* Ионосферные предвестники геомагнитных бурь. 2. Анализ данных ст. Slough // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 60. № 3. С. 329–336. 2020. <https://doi.org/10.31857/S0016794020030104>
- *Константинова А.В., Данилов А.Д.* Ионосферные предвестники геомагнитных бурь. 3. Анализ данных ст. Juliusruh // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 61. № 3. С. 327–335. 2021. <https://doi.org/10.31857/S0016794021030081>
- *Фетисова Н.В., Мандрикова О.В.* Моделирование и анализ параметров ионосферы на основе обобщенной многокомпонентной модели // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. Т. 41. № 4. С. 89–106. 2022. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2022-41-4-89-106>
- *Adebesin B.O., Bakare Nurudeen.* Mid-latitude ionospheric response and plasma distribution associated with the geomagnetic storm of 12–14 October 2016 in the European sector. 2023. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4179677> or <https://doi.org/10.2139/ssrn.4179677>
- *Adekoya B.J., Chukwuma V.U., Adebiji S.J., Adebesin B.O., Ikubanni S.O., Bolaji O.S., Oladunjoye H.T., Bisuga O.O.* Ionospheric storm effects in the EIA region in the American and Asian-Australian sectors during geomagnetic storms of October 2016 and September 2017 // Adv. Space Res. V. 72. № 4. P. 1237–1265. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.04.016>
- *Akinyemi G.A., Kolawole L.B., Dairo O.F., Willoughby A.A., Abdulrahim R.B., Rabiou A.B.* The response of the equatorial ionosphere over Nigeria to a geomagnetic storm event // Geomagn. Aeron. V. 61. № 4. P. 647–657. 2021. <https://doi.org/10.1134/S0016793221040022>
- *Astafyeva E., Yasyukevich Y.V., Maletkii B., Oinats A., Vesnin A., Yasyukevich A.S., Syrovatskii S., Guendouz N.* Ionospheric disturbances and irregularities during the 25–26 August 2018 geomagnetic storm // J. Geophys. Res. – Space. V. 127. № 1. ID e2021JA029843. 2021. <https://doi.org/10.1029/2021JA029843>
- *Balodis J., Normand M., Zarins A.* The movement of the GPS positioning discrepancy clouds at a mid-latitude region in March 2015 // Remote Sensing. V. 15. № 8. ID 2032. 2023. <https://doi.org/10.3390/rs15082032>
- *Berényi K.A., Heilig B., Urbář J., Kouba D., Kis Á., Barta V.* Comprehensive analysis of the ionospheric response to the largest geomagnetic storms from solar cycle 24 over Europe // Frontiers in Astronomy and Space Science. V. 10. ID 1092850. 2023. <https://doi.org/10.3389/fspas.2023>
- *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. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.09.013>
- *Bojilova R., Mukhtarov P.* Comparative analysis of global and regional ionospheric responses during two geomagnetic storms on 3 and 4 February 2022 // Remote Sensing. V. 15. № 7. ID 1739. 2023. <https://doi.org/10.3390/rs15071739>
- *Chernigovskaya M.A., Shpynev B.G., Yasyukevich A.S. et al.* Longitudinal variations of geomagnetic and ionospheric parameters in the Northern Hemisphere during magnetic storms according to multi-instrument observations // Adv. Space Res. V. 67. № 2. P. 762–776. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.10.028>
- *Danilov A.* Ionospheric F_2 -region response to geomagnetic disturbances // Adv. Space Res. V. 52. № 3. P. 343–366. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.04.019>
- *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. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(92\)90475-D](https://doi.org/10.1016/0273-1177(92)90475-D)
- *Danilov A.D., Konstantinova A.V.* Behavior of foF_2 prior to geomagnetic storms according to Slough and Juliusruh data // Adv. Space Res. V. 67. № 12. P. 4066–4077. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.02.016>
- *de Abreu A.J., Correia E., de Jesus R., Venkatesh K., Macho E.P., Roberto M., Fagundes P.R., Gende M.* Statistical analysis on the ionospheric response over South American

- mid-and near high-latitudes during 70 intense geomagnetic storms occurred in the period of two decades // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* V. 245. ID 106060. 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2023.106060>
- *Dugassa T., Mezgebe N., Habarulema J.B., Habyarimana V., Oljira A.* Ionospheric response to the 23–31 August 2018 geomagnetic storm in the Europe–African longitude sector using multi-instrument observations // *Adv. Space Res.* V. 71. № 5. P. 2269–2287. 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.10.063>
- *Giri A., Adhikari B., Shrestha B., Rimal S.* Wavelet coherence analysis foF2 over Boulder station during different geomagnetic activity // *The Himalayan Physics.* V. 10. № 1. P. 66–77. 2023.
- *Habyarimana V., Habarulema J.B., Dugassa T.* Analysis of ionospheric stormtime effects over the East African sector during the 17 March 2013 and 2015 geomagnetic storms // *Earth Planets Space.* V. 75. ID 58. 2023.
<https://doi.org/10.1186/s40623-023-01812-9>
- *Idosa C., Adhikari B., Shogile K.* Features of ionospheric total electron content over high latitude regions during geomagnetic storm of November 04, 2021 variations of TEC over high latitude regions during geomagnetic storm of November 04, 2021 // *Indian J. Phys.* 2023.
<https://doi.org/10.1007/s12648-023-02746-4>
- *Imtiaz N., Ali O.H., Rizvi H.* Impact of the intense geomagnetic storm of August 2018 on the equatorial and low latitude ionosphere // *Astrophys. Space Sci.* V. 366. № 11. ID 106. 2021.
<https://doi.org/10.1007/s10509-021-04009-2>
- *Joshua B.W., Adeniyi J.O., Olawepo A., Rabiou B., Daniel O., Adebisi S.J., Adebisin B.O., Ikubanni S.O., Abdurahim B.* Latitudinal dependence of ionospheric responses to some geomagnetic storms during low solar activity // *Geomag. Aeron.* V. 61. № 3. P. 418–437. 2021a.
<https://doi.org/10.1134/S0016793221030063>
- *Joshua B.W., Adeniyi J.O., Amory-Mazaudier C., Adebisi S.J.* On the pre-magnetic storm signatures in NmF2 in some equatorial, low and mid-latitude stations // *J. Geophys. Res. – Space.* V. 126. № 8. ID e2021JA029459. 2021b.
<https://doi.org/10.1029/2021JA029459>
- *Kane R.P.* Global evolution of F2-region storms // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 35. № 11. P. 1953–1966. 1973.
[https://doi.org/10.1016/0021-9169\(73\)90112-8](https://doi.org/10.1016/0021-9169(73)90112-8)
- *Kane R.P.* Global evolution of the ionospheric electron content during some geomagnetic storms // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 37. № 4. P. 601–611. 1975.
[https://doi.org/10.1016/0021-9169\(75\)90055-0](https://doi.org/10.1016/0021-9169(75)90055-0)
- *Katsko S.V., Emelyanov L.Ya.* Variations in the mid-latitude ionosphere parameters over Ukraine during the very moderate magnetic storm on December 18, 2019 // *Kinemat. Phys. Celest.* V. 39. № 2. P. 78–89. 2023.
<https://doi.org/10.3103/S0884591323020034>
- *Kumar V.V., Parkinson M.L.* A global scale picture of ionospheric peak electron density changes during geomagnetic storms // *Space Weather.* V. 15. № 4. P. 637–652. 2017.
<https://doi.org/10.1002/2016SW001573>
- *Lissa D., Srinivasu V.K.D., Prasad D.S.V.V.D., Niranjan K.* Ionospheric response to the 26 August 2018 geomagnetic storm using GPS-TEC observations along 80° E and 120° E longitudes in the Asian sector // *Adv. Space Res.* V. 66. № 6. P. 1427–1440. 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.05.025>
- *Liu L., Wan W., Zhang M.-L., Zhao B., Ning B.* Prestorm enhancements in NmF2 and total electron content at low latitudes // *J. Geophys. Res. – Space.* V. 113. № 2. ID A02311. 2008.
<https://doi.org/10.1029/2007JA012832>
- *Mandrikova O.V., Fetisova N.V., Polozov Yu.A.* Method for modeling of ionospheric parameters and detection of ionospheric disturbances // *Comp. Math. Math. Phys.* V. 61. № 7. P. 1094–1105. 2021.
<https://doi.org/10.1134/S0965542521070137>
- *Mansilla G.A., Zossi M.M.* Ionospheric response to the 26 August 2018 geomagnetic storm along 280° E and 316° E in the South American sector // *Adv. Space Res.* V. 69. № 1. P. 48–58. 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.08.002>
- *Mansilla G.A., Zossi M.M.* Response of the South American equatorial ionization anomaly to an intense geomagnetic storm // *Adv. Space Res. AISR-D-22-00608.* 2023.
- *Mikhailov A.V., Perrone L.* Pre-storm NmF2 enhancements at middle latitudes: Delusion or reality? // *Ann. Geophysicae.* V. 27. № 3. P. 1321–1330. 2009.
<https://doi.org/10.5194/angeo-27-1321-2009>
- *Mikhailov A.V., Perrone L.* Pre-storm F2-layer Q-disturbances at middle latitudes: Do they exist? // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* V. 213. ID 105473. 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105473>
- *Mishra R.K., Adhikari B., Chapagain N.G., Baral R., Das P.K., Klausner V., Sharma M.* Variation on solar wind parameters and Total Electron Content over middle-low latitude regions during intense geomagnetic storms // *Radio Sci.* V. 55. № 11. ID e2020RS007129. 2020.
<https://doi.org/10.1029/2020RS007129>
- *Mosna Z., Kouba D., Knizova P.K., Buresova D., Chum J., Sindelarova T., Urbar J., Boska J., Saxonbergova–Jankovicova D.* Ionospheric storm of September 2017 observed at ionospheric station Pruhonice, the Czech Republic // *Adv. Space Res.* V. 65. № 1. P. 115–128. 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.09.024>
- *Naidu P.P., Latha T.M., Devi M. I.* Hemispheric asymmetry in ionospheric response to geomagnetic storms at mid-latitudes – comparison with IRI model predictions // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. JASTP-D-22-00272.* 2023.
- *Picanço G.A.S., Denardini C.M., Nogueira P.A.B. et al.* Equatorial ionospheric response to storm-time electric fields during two intense geomagnetic storms over the Brazilian region using a Disturbance Ionosphere index // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* V. 223. ID 105734. 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105734>
- *Sawadogo S., Gnabahou D.A., Sandwidi S.A., Ouattara F.* Koudougou (Burkina Faso, Africa), GPS-TEC response to recurrent geomagnetic storms during solar cycle 24 declining phase // *International Journal of Geophysics.* V. 2023. ID 4181389. 2023.
<https://doi.org/10.1155/2023/4181389>
- *Sharan A.* Analysing the effect of geomagnetic storms on the F2-region ionosphere in South Pacific region // *Geomagn. Aeron.* V. 62. № 6. P. 802–814. 2022.
<https://doi.org/10.1134/S0016793222060147>
- *Singh A., Rathore V.S., Kumar S., Rao S.S., Singh S.S., Singh A.K.* Effect of intense geomagnetic storms on low-lat-

- itude TEC during the ascending phase of the solar cycle 24 // *J. Astrophys. Astr.* V. 42. № 2. ID 99. 2021. <https://doi.org/10.1007/s12036-021-09774-8>
- *Spogli L., Sabbagh D., Regi M. et al.* Ionospheric response over Brazil to the August 2018 geomagnetic storm as probed by CSES-01 and Swarm Satellites and by local ground-based Observations // *J. Geophys. Res. – Space*. V. 126. № 2. ID e2020JA028368. 2020. <https://doi.org/10.1029/2020JA028368>
- *Swarnalingam N., Wu D.L., Gopalswamy N.* Interhemispheric asymmetries in ionospheric electron density responses during geomagnetic storms: A study using space-based and ground-based GNSS and AMPERE observations // *J. Geophys. Res. – Space*. V. 127. № 5. ID e2021JA030247. 2022. <https://doi.org/10.1029/2021JA030247>
- *Timoçin E.* The Effect of geomagnetic storms on foF2 values over low latitude ionosonde station // *Sakarya University Journal of Science* V. 23. № 6. P. 1237–1241. 2019. <https://doi.org/10.16984/saufenbilder.559334>
- *Ye H., Yi W., Zhou B. et al.* Multi-instrumental observations of midlatitude plasma irregularities over Eastern Asia during a moderate magnetic storm 3 on 16 July 2003 // *Remote Sensing*. V. 15. № 4. ID 1160. 2023. <https://doi.org/10.3390/rs15041160>
- *Younas W., Khan M., Amory-Mazaudier C., Amaechi P.O., Fleury R.* Middle and low latitudes hemispheric asymmetries in $\Sigma O/N_2$ and TEC during intense magnetic storms of solar cycle 24 // *Adv Space Res.* V. 69. № 1. P. 220–235. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.10.027>
- *Zhai C., Tang S., Peng P., Cheng X., Zheng D.* Driver of the positive ionospheric storm over the South American sector during 4 November 2021 geomagnetic storm // *Remote Sensing*. V. 15. № 1. ID 111. 2023a. <https://doi.org/10.3390/rs15010111>
- *Zhai C., Chen Y., Cheng X., Yin X.* Spatiotemporal evolution and drivers of the four ionospheric storms over the American sector during the August 2018 geomagnetic storm // *Atmosphere*. V. 14. № 2. ID 335. 2023b. <https://doi.org/10.3390/atmos14020335>