



УДК 550.388.2

## ИЗМЕНЕНИЯ В ОБЛАСТИ $F$ ИОНОСФЕРЫ ПЕРЕД МАГНИТНЫМИ БУРЯМИ (СТАТЬИ ПОСЛЕДНИХ ДВУХ ЛЕТ)

А. Д. Данилов<sup>1</sup>, А. В. Константинова<sup>1</sup><sup>1</sup>Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова (ИПГ), Москва, Россия

Приводится обзор опубликованных в течение двух последних лет (2022–2023 гг.) работ, посвященных изменениям ионосферных параметров в дни перед магнитными бурями (так называемых «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 (SC). При этом многие авторы обращают на них внимание, обсуждают их связь с параметрами космической погоды и даже высказывают предположения о возможных механизмах их формирования. Показано, что число таких публикаций в течение последних двух лет заметно возросло. 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 и их возможной роли в предсказании предстоящей магнитной бури.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** магнитная буря, область  $F$ , предбуревые ионосферные возмущения

EDN: JWQDBO

### 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 Благовещенского [Благовещенский, 2012; Blagoveshchensky et al., 2017], Данилова [Danilov, 2013]) и авторов [Данилов и Константинова, 2019].

Со времени написания нашего обзора в литературе появилось много новых публикаций, посвященных реакции ионосферы на ионосферные бури. В данной работе мы приводим обзор таких работ, опубликованных в предыдущие два года (2022–2023 гг.)

В статьях, где приводятся отклонения наблюдаемых величин от спокойных условий, мы приводим отклонения  $\Delta foF2$ ,  $\Delta hmF2$  и  $\Delta TEC$ , 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  $NmF2$ .

Электронная почта авторов для переписки:

Данилов Алексей Дмитриевич, e-mail: [adanilov99@mail.ru](mailto:adanilov99@mail.ru)  
Константинова Анна Владимировна [anna@tabulata.ru](mailto:anna@tabulata.ru)<https://elibrary.ru/jwqdbo>Адрес редакции журнала  
«Гелиогеофизические исследования»:ФГБУ «ИПГ»  
129128; Россия, Москва  
ул. Ростокинская, 9.  
e-mail: [vestnik@ipg.geospace.ru](mailto:vestnik@ipg.geospace.ru)

## 2. АНАЛИЗ КОНКРЕТНЫХ БУРЬ

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 4-х широтных зонах. На рисунок 1 приведена вырезка из рисунка 4 в указанной статье. Всплеск  $\Delta$ TEC примерно за 6 ч. до SC виден в 3-х (из 4-х) широтных зонах. Особенно ярко он выражен для зоны 10 N, где  $\Delta$ TEC превышает +100%. На этом рисунке виден также пик  $\Delta$ TEC с амплитудой около +40% в полдень 23-го августа в зонах 0 N и 5 S.

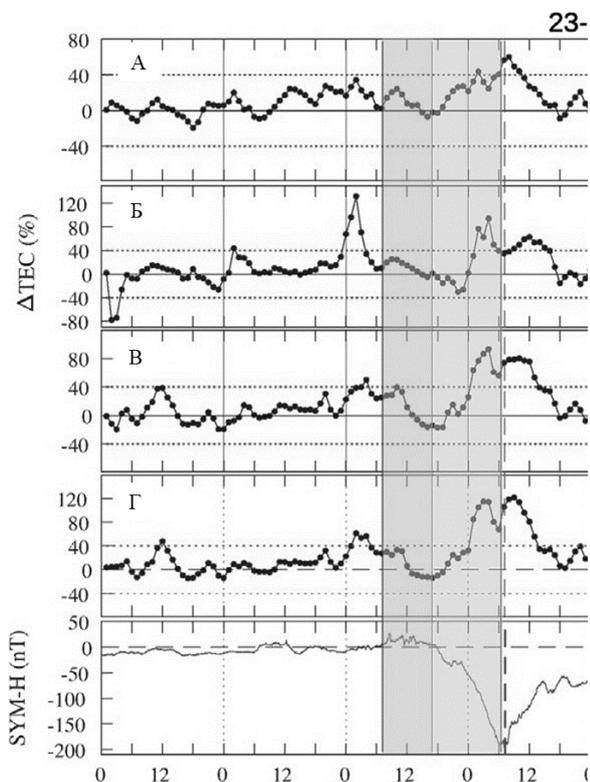


Рис. 1. Изменение  $\Delta$ TEC по измерениям в пунктах 30 N 35 E (А), 10 N 35 E (Б), 0 N 35 E (В) и 5 S 35 E (Г), а также индекса SYM-H (адаптировано из Dugassa et al. [2023])

предбулевой 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 геом) во время 4 умеренных геомагнитных бурь. Во время бурь 13 мая 2015 г. и 6 мая 2016 г. в оба предбулевых дня наблюдается существенное (до 40%) превышение TEC над средним значением за спокойные дни.

В работе Naidu et al. [2023] рассматриваются вариации  $foF2$  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  $\Delta foF2$  15 июля составляла -30% в 22:00 UT, +30% в 19:00 UT и +25% в 17:00 UT. На ст. Millstone Hills (42.6° N) 15 июля зарегистрированы пики  $\Delta foF2$  с амплитудой +30% в 07:00 и 09:00 UT. В тот же день на ст. Port Stanley замечены сильные «всплески»  $\Delta foF2$  до +60% в 21:00 UT и до +80% в 18:00 и 22:00 UT.

Согласно рисунку 6 в той же работе величины  $\Delta$ TEC 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  $F2$  на две умеренных, два 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  $F2$  примерно на 40%. Авторы отмечают, что по данным той же станции «до SC 22 ноября величина  $foF2$  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  $h'F2$  в 12:00 UT, тогда как SC произошел в 13:00 UT 4 марта.

В работе Idosa et al. [2023] анализировались вариации TEC по измерениям на 4-х высокоширотных станциях (4-х в северном и 4-х в южном полушариях) во время бури 4 ноября 2021 г. (SC в 08:00 UT). Получено, что в предбулевой день 3 ноября суточный ход TEC в северном и южном полушарии резко различался. На рисунке 2 (адаптирован из рисунка 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

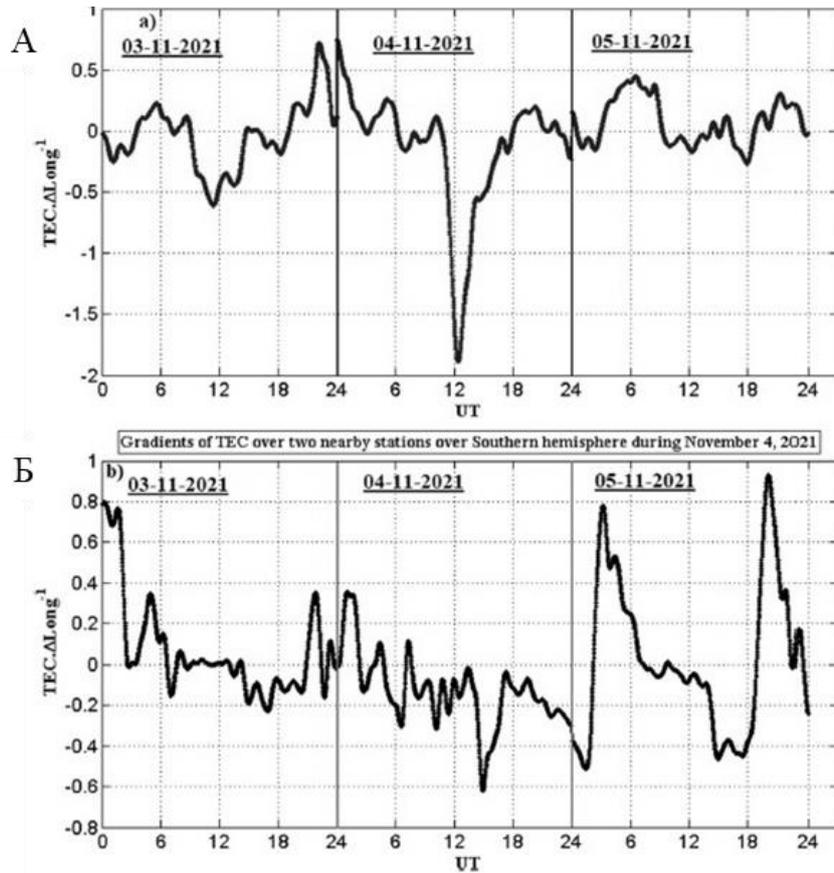


Рис. 2. Вариации долготного градиента ТЕС 3-5 ноября 2021 г. в северном (А) и южном полушариях (Б) (адаптировано из Idosa et al. [2023])

Во время второй бури величины  $\Delta foF2$  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  $\Delta foF2$  до -30% в 05:00 UT.

В работе Bakare and Adebisin [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 предыдущих суток по данным ст. Rome ( $42.8^\circ$  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 ( $40.6^\circ$  N) и Athens ( $38.0^\circ$  N) (см. вырезку из соответствующего рисунка приведена на рисунке 3). В высоте слоя  $F2$  и 11 и 12 октября наблюдались отрицательные отклонения от спокойных величин, достигавшие 25%.

В работе de Abreu et al. [2023] анализируются 70 бурь в 1999–2018 гг. по измерениям ТЕС в антарктическом и Аргентино-Чилийском секторах. На приведенных в работе для примера рисунках видны отклонения ТЕС 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 19:00 UT) в 16:00 UT на ст. Punta Arenas ( $53.1^\circ$  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%.

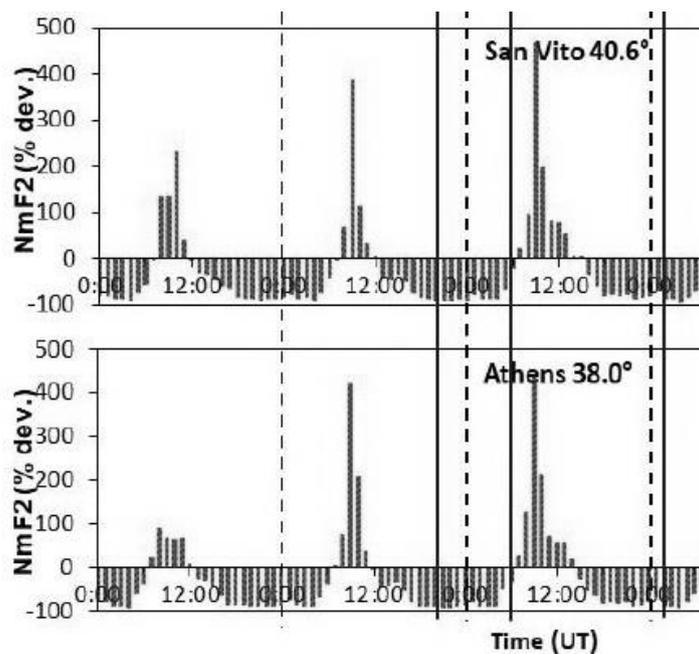


Рис. 3. Вариации  $\Delta NmF2$  по измерениям на двух станциях ВЗ 10–12 октября 2016 г. (адаптировано из Vakare and Adebisin [2023])

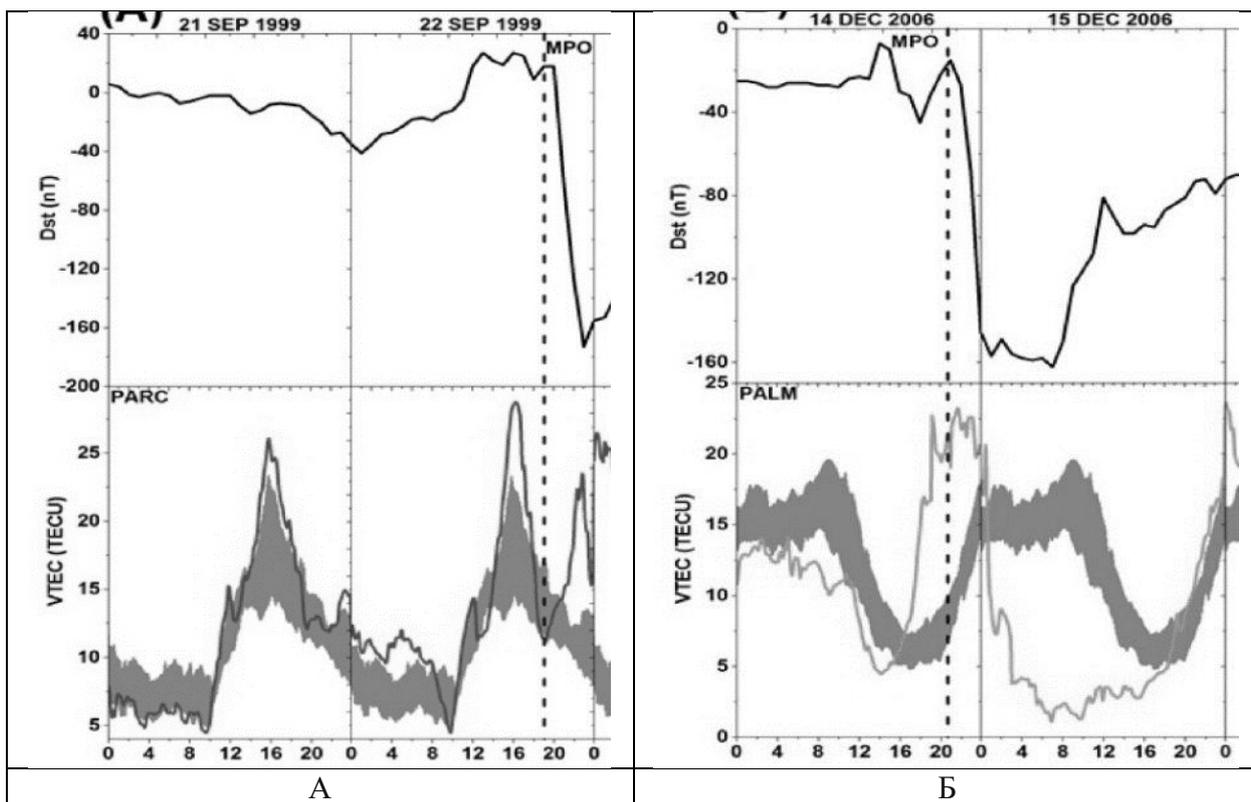


Рис. 4. Вариации  $Dst$  и  $VTEC$  по данным станции Punta Arenas 21 и 22 сентября 1999 г. (А) и по данным ст. Palmer Station 14 и 15 декабря 2006 г. (Б) (адаптировано из Abreu et al. [2023]). Вертикальные штриховые линии – момент SC. Отмывкой показаны спокойные величины  $VTEC \pm$  стандартное отклонение

За 2 ч. до SC перед бурей 14 декабря 2006 г. (SC в 21:00 UT) на ст. Palmer Station (64.8° S) VTEC=23 TECU, а среднее ( $q+\sigma$ )=8 TECU, причем рост VTEC начинается с 16:00 UT. Вырезка из соответствующих рисунков приведена на рисунке 4.

Перед бурей 7 октября 2015 г. (SC в 02:00 UT) 6 октября в 06:00-10:00 UT величина  $\Delta$ VTEC на ст. Palmer Station составляла примерно –40%. В 21:00-22:00 UT того же дня наблюдаемые величины VTEC>17 TECU, а среднее ( $q+\sigma$ ) < 10 TECU.

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-го).

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

На ст. Sao Luis (2.6° 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° 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° 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 ионограмм ВЗ, во время бури 21 июня 2015 г. На рисунках видно, что на ст. Fortaleza (3.9° S) за 16 ч до SC происходит падение  $foF2$  на 50%. На ст. Cachoeira (13.9 S) за 2 часа до SC наблюдался рост  $foF2$  на 70%, а на ст. Boa Vista (12.3° N) за 2 ч до SC виден рост  $foF2$  на 30%. По данным ст. Fortaleza зарегистрировано падение TEC на 50% за 2 ч 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 TEC и  $N_e$ .

В работе не приводятся вариаций ионосферных параметров по измерениям в конкретном пункте, но приводятся карты TEC. Не приводятся и величин TEC в спокойный день. Однако, поскольку в статье подробно представлены данные измерений TEC и  $N_e$  в течение предбуревых 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 TEC (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 TEC в течение трех предбуревых дней и 6 дней после начала бури 14 июля 2012 г. Хорошо видно, что в течение предбуревых дней в широтном поясе  $\pm(30-40)^\circ$  имеются три интервала времени, когда величина TEC составляет 10 TECU (единица измерения TEC) 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 TEC не превышает 6–7 TECU.

Еще более сильные эффекты видны по данным COSMIC-1 на рисунке 8 для бури 17 июня.

Здесь величины TEC много раз за три предбуревых дня (абсолютно спокойные согласно многим магнитным индексам) поднимаются значительно выше 10 TECU, тогда как, начиная с третьего дня после SO, величина TEC не превышает 4–6 TECU. Увеличение TEC 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 TEC в предбуревые дни захватывала и средние широты.

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

Согласно рисунку 13 в указанной работе, в течение трех дней перед SC бури 17 марта 2015 г. в районе полудня наблюдаются всплески TEC, 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 рисунка 6 указанной статьи). На высотах слоя F2 в течение 18 часов до SO величины  $N_e$  составляют  $(4-5) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ , тогда как, начиная со второго дня после SO, величина  $N_e$  на этих высотах равна  $(2-3) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ . Обратим внимание на то, что обе рассмотренные бури летние.

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 4-х широтных зонах. Приводятся вариации этого отношения как в периоды самих бурь, так и в течение двух предбуревых дней. Только в одном случае получено заметное отклонение от спокойных условий:  $\Delta([O]/[N_2]) = -35\%$  за 8 ч. 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  $10^\circ$  S) и CAJ2M (около  $22^\circ$  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 предбуревых возмущений 3 ноября не учитывается.

Однако, на рисунке 6 в указанной статье виден пик  $NmF2 = 24 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$  в 17:00-18:00 UT (16:00-17:00 LT) на ст. AS00Q, тогда как в местный полдень (13:00 UT)  $NmF2 = 15 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ . Похожий рост с  $15 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$  в местный полдень до  $(19-23) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$  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 буревое 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 ( $50^\circ$  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 ( $40^\circ$  N) 2 августа в 06:00 UT и в 07:00 UT  $\Delta NmF2 = +104\%$  и  $+80\%$ , соответственно.

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

На ст. Porin ( $8.5^\circ$  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  $NmF2$  пришлось 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. [2021 b] 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 магнито-спокойные дни. При этом в качестве PMS рассматривались только события с  $\Delta NmF2$ , превышающими по абсолютной величине 44%. Чтобы избежать влияния предшествующих магнитных возмущений, рассматривалось поведение нескольких магнитных индексов в течение 6 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.

Balodis 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 предбуревую 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  $\Delta\text{TEC}$  наблюдаемых величин TEC от соответствующих величин TEC в спокойных условиях. На рисунках в статье видно, что в предбуревую день 16 марта 2013 г. величина  $\Delta\text{TEC}$  на ст. Mbarara ( $0.6^\circ\text{ S}$ ) составляла +40% в 17:00 и 20:00 UT. Такое же отклонение TEC наблюдалось на ст. Addis Ababa ( $9.0^\circ\text{ N}$ ) в 19:00 UT. Авторы подчеркивают, что предбуревые возрастания  $\Delta\text{TEC}$  на обеих станциях имели примерно одинаковую амплитуду.

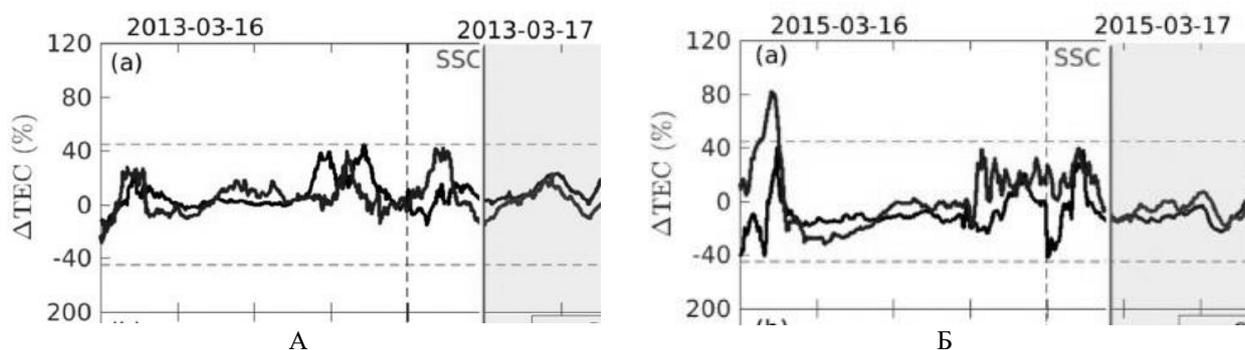


Рис. 5. Изменения  $\Delta\text{TEC}$  перед бурей 17 марта 2013 г. (А) и 17 марта 2015 г. (Б). Сплошная и штриховая линии соответствуют ст. Addis Ababa и Mbarara, соответственно (адаптировано из [Nabyarimana et al., 2023])

Перед бурей 2015 г. на ст. Addis Ababa наблюдались величины  $\Delta\text{TEC}$  в  $-40\%$  в 00:00 UT 17-го и  $+40\%$  в 03:00 UT 16-го. 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  $\Delta\text{TEC}$  было  $+35\%$ . Авторы отмечают указанный сильный всплеск и относят его к предбуревым эффектам в низкоширотное ионосфере.

В работе Berényi 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 станций ВЗ.

Авторы отмечают, что в предбуревый период (11–12 ноября,  $Kp = 1+$ ) наблюдались положительные отклонения  $f_oF2$  и TEC от спокойных величин. На рисунках в статье видно, что по измерениям на ст. Athens величина  $\Delta f_oF2$  11 ноября в 10:00 UT и 12 ноября в 11:00 UT составляла  $+25\%$ . На всех пяти станциях виден рост  $\Delta\text{TEC}$  на 20–30% в оба дня с максимумом около полудня. Авторы не обнаружили существенных эффектов ни в  $f_oF2$  ни в TEC в предбуревую 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 рисунке 2 в этой статье для 16:00 UT видно, что величина  $\Delta\text{TEC}$  на широтах ( $46\text{--}48^\circ\text{ N}$ ) 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.

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 предбуревую день 17 декабря наблюдались три отклонения  $f_oF2$  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  $NmF2$ .

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

В следующей статье Vojilova and Mukhtarov [2023b] рассматривают реакцию ионосферы на магнитную бурю 26 февраля 2023 г. по наблюдениям методом ВЗ и измерениях ТЕС на Европейских станциях. На приводимых в этой статье рисунках видно, что в течение всего дня 26 февраля (SC 11.30 UT) наблюдались как положительные, так и отрицательные отклонения критической частоты  $foF2$  от спокойных условий, достигавшие 30%. Авторы подчеркивают, что наблюдаемые до момента SC отклонения  $foF2$  от спокойных условий часто рассматриваются как предвестники магнитных бурь.

В работе Giri et al. [2023] для рассмотрения поведения  $foF2$  во время магнитно-возмущенных условий был применен метод вейвлет-анализа. Исходными данными были наблюдения методом ВЗ на ст. Boulder ( $40^\circ\text{ N}$ ) 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 часов часа до SC.

Работа Ye et al. [2022] 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 4-х станциях ВЗ.

На ст. Wakkanai ( $45.2^\circ\text{ N}$ ) в 13:00 UT 15 июля наблюдалось увеличение на 20% величины  $foF2$  по сравнению со спокойным значением, которое получено методом скользящего среднего за 27 дней.

На ст. Kokubunji ( $35.7^\circ\text{ N}$ ) 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 ( $31.2^\circ\text{ N}$ ) видно возрастание  $foF2$  на 25% в 13:00 UT и уменьшение на 25% в 18:00 UT.

На ст. Okinawa ( $26.7^\circ\text{ N}$ ) наблюдается рост  $foF2$  на 30% в 13:00 UT и падение на 30% в 18:00 UT.

Gordiyenko [2023] анализировала поведение  $foF2$  по данным ВЗ на пяти станциях Средней Азии во время бури 25 мая 1967 г. (SC в 12:10 UT). В работе не приводятся величин  $\Delta foF2$ , но согласно приведенным в работе рисункам, величины  $foF2$  в течение первой половины дня (по UT) 25 мая были на 20–30% выше, чем 30–31 мая, а эти дни были магнито-спокойными.

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-го 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-и дневная медиана).

Авторы пишут, что «Накануне события на фоне слабо возмущенного геомагнитного поля в ионосфере наблюдались колебательные процессы. В начале суток 15-го 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».

Они 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 часов». 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 работе Adekoya et al. (2023) анализировалось поведение  $foF2$  во время бурь 13 октября 2016 г. и 8 сентября 2017 г. в Американском и Азиатском долготных секторах на основании глобальных карт распределения  $foF2$  по наблюдениям методом ВЗ.

За 10–15 ч. до SC первой бури на карте для Азиатского сектора хорошо видны области значительных повышений  $\Delta foF2$ . За 12–14 ч. до SC эта величина на широтах 17–20° N превышала 60%. В Американском секторе наибольшие величины  $\Delta foF2$  наблюдались во время этой бури на широтах около 50 N за 10–20 ч до SC и достигали +80%.

Еще более сильные предбуревые эффекты наблюдались в Американском секторе на тех же широтах в течение 1–5 ч. до SC второй бури. Величины  $\Delta foF2$  в отдельные моменты превышали +100%.

В целом Adekoya et al. (2023) отмечают, что предбуревые эффекты в ионосфере были лучше выражены в Американском секторе, чем в Азиатском.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ

Целью предыдущего параграфа было показать, что в течение последних двух лет (2022-2023 гг.) появилось несколько публикаций по изучению реакции ионосферной области  $F2$  на геомагнитные бури и есть указания на наличие в предбуревые дни (за несколько часов, или даже десятков часов до SC бури) отклонений основных параметров ( $foF2$ ,  $hmF2$ , TEC) 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 предбуревых эффектов. Прежде всего, важно, что предбуревые эффекты в ионосфере находят не только в изменениях «классических» параметров ( $foF2$ , 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  $\Delta\text{TEC}$  в предбуревые дни 9 и 10 сентября 2015 г., Swadogo et al. [2023] предположили, что они объясняется вариациями  $Dst$ . Но этот индекс в предбуревые дни был и положительным, и отрицательным, и кривые для этих дней не отличаются от кривых для спокойных дней.

Pisanco et al. [2023] отмечают, что обнаруженные ими отклонения параметров в низкоширотной ионосфере в предбуревые дни могут быть предвестниками геомагнитных бурь.

Анализируя свои результаты по вариациям отношение  $[O]/[N_2]$  в течение четырех бурь, Yonas et al. [2022] от отмечают, что только в одном случае в предбуревые 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 предбуревые эффекты в  $foF2$  связаны именно с изменением состава термосферы на высотах слоя  $F2$ . Liu et al. [2008] получили, что возрастания  $foF2$  не сопровождаются заметными изменениями  $hmF2$  в предбуревой период.

Nabyarimana et al. [2023] отметили, что во время бури 17 марта в 2013 г. по измерениям в двух пунктах Mbaraga (0.6° S) и Addis Ababa (9.0° N) предбуревые возрастания  $\Delta\text{TEC}$  на обеих станциях имели примерно одинаковую амплитуду. Это позволяет составить представление о географических масштабах явления и является, по нашему мнению, еще одним аргументом против метеорологической природы этих явлений.

Обнаруженный в работе Zhai et al. [2023] 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 предбуревые эффекты контролируются скорее местным временем, чем мировым, а это может быть важно для анализа процессов, вызывающих эти эффекты.

Необходимо отметить, что большое внимание проблеме ионосферных предвестников уделено в более ранней работе Kumar and Parkinson [2017]. Авторы подчеркивают, что их исследования показывают 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 ионосферы «знает» о предстоящей буре».

Kumar and Parkinson [2017] формулируют несколько общих закономерностей поведения предбуревых возмущений. Они отмечают, что рост электронной концентрации в предбуревой период начинается в высоких широтах и затем двигается в средние и низкие широты. Согласно их результатам предбуревые возмущения наблюдаются чаще всего во время равноденственных бурь и реже всего – зимой, а также чаще днем, чем ночью.

Как видно из рисунков в работе Ye et al. (2022), отрицательные отклонения  $foF2$  появляются в предбуревой период только в низких широтах.

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

Indosa [2023] считает, что предбуревые 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 на десятки часов до SC маловероятно. Поскольку механизм возникновения предбуревых эффектов до сих пор неизвестен, можно предположить, что «работают» несколько механизмов по-разному в разные бури

Mikhailov and Perrone [2009; 2020] категорически отрицают концепцию предбуревых ионосферных возмущений. В работе Данилова [2022] была представлена критика позиции указанных авторов и приведены результаты многих исследователей в поддержку этой концепции. Работы последних лет, рассмотренные в данной статье, на наш взгляд, дают дополнительные аргументы в пользу этой концепции, поэтому здесь мы не будем возвращаться к работам [Mikhailov and Perrone, 2009; 2020].

В работах Joshua et al. [2021a, b], посвященных исследованию именно предбуревых 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, предвещая магнитную бурю. Авторы полагают, что «PMS, если их правильно понять, весьма вероятно 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 предбуревые эффекты Q-возмущениями, Joshua et al. [2021b] заявляют: «очевидно, что после каждого PMS геомагнитная буря начинается либо немедленно, либо в пределах 24 – 48 часов». 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. В течение последних лет (2022–2023 гг.) число таких публикаций заметно возросло. Их обзору и обсуждению и посвящена данная статья.

Из приведенного материала, на наш взгляд, следует, что многие исследователи обращают внимание на предбуревые 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 предбуревой 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. Работа выполнена в соответствии с планом работ по программе НИТР Росгидромета 2020-2024 гг. по теме «Развитие и модернизация технологий мониторинга геофизической обстановки над территорией Российской Федерации Арктики».

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках НИТР Росгидромета 2020–2024 гг. (тема 6.1).  
Регистрационный номер АААА-А20-1200112390082-9

## ЛИТЕРАТУРА

- *Благовецкий Д.* Космическая погода и ионосферные радиоволны. Saarbrucken –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.
- *Данилов А. Д., Константинова А. В.* Ионосферные предвестники геомагнитных бурь. 1. Обзор проблемы. // Геомагнетизм и аэрномия Т. 59. №5. 594–606. 2019.
- *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. DOI: 10.26117/2079–6641–2022–41–4–89–106.
- *Adekoya B.J., Chukwuma V.U., Adebisi S.J., Adebisin 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. P. 1237–1265. 2023. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.04.016>.
- *Bakare N. O. Adebisin B. O.* Mid-Latitude Ionospheric Response and Plasma Distribution associated with the geomagnetic storm of 12-14 October 2016 in the European sector. // Adv. Space Res. 2023. <https://ssrn.com/abstract=4179677> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4179677>.
- *Balodis J., Normand M., Zarins A.* The movement of the GPS positioning discrepancy clouds in March 2015. // Remote Sens. V. 15. No. 8. P. 2032. 2023; <https://doi.org/10.3390/rs15082032>.
- *Berényi K. A., Heilig B., Urbár J., Kouba D., Kis Á., Barta V.* Comprehensive analysis of the ionospheric response to the largest geomagnetic storms from solar cycle 24 over Europe. // Front. Astron. Space Sci. 10:1092850. doi: 10.3389/fspas.2023.109285.
- *Blagoveshchensky D.V., Sergeeva M.A., Kozlovsky A.* Ionospheric parameters as the precursors of disturbed geomagnetic conditions // Adv. Space Res. V. 60. N 11. P. 2437–2451. 2017.
- *Bojilova R. Mukhtarov P.* Comparative Analysis of Global and Regional Ionospheric Responses during Two Geomagnetic Storms on 3 and 4 February 2022. // Remote Sens. V. 15. P. 1739. 2023. <https://doi.org/10.3390/rs15071739>.
- *Bojilova R., Mukhtarov P.* Analysis of the Ionospheric Response to Sudden Stratospheric Warming and Geomagnetic Forcing over Europe during February and March 2023 // Universe, V. 9. P. 351. 2023. <https://doi.org/10.3390/universe9080351>.
- *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. N 10. P. 257–260. 1992.
- Danilov A.D., Konstantinova A.V. Behavior of *foF2* prior to geomagnetic storms according to Slough and Juliusruh data // *Adv. Space Res.* V. 67. N 12. P. 4066–4077. 2021.
- 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. Atm. Sol-Terr. Phys.* 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.* 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. // *Him. Phys.* V. 10. No. 1. P. 66-77. 2023.
- Gordiyenko G. Ionospheric response over the Middle Asian region to the May 1967 geomagnetic storm // *J Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 253. 106151. 2023. [www.elsevier.com/locate/jastp](http://www.elsevier.com/locate/jastp).
- Habyarimana V., Habarulema J. B., Dugassa T. Analysis of ionospheric storm-time effects over the East African sector during the 17 March 2013 and 2015 geomagnetic storms. // *Earth, Planets and Space.* 2023. 75:58 <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 Journal of Physics.* · May 2023 DOI: 10.1007/s12648-023-02746-4.
- Joshua B. W., Adeniyi J. O., Olawepo A. O. et al. Latitudinal Dependence of Ionospheric Responses to Some Geomagnetic Storms during Low Solar Activity. // *Geomag. Aeron.*, V. 61, No. 3, P. 418–437. 2021a.
- 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 Phys.* 126, e2021JA029459://doi.org/10.1029/2021JA029459. 2021b.
- 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. // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, V. 39, No. 2, P. 78–89. 2023.
- Kumar V. V., Parkinson M. L. A global scale picture of ionospheric peak electron density changes during geomagnetic storms // *Space Weather.* V. 15. N 4. P. 637–652. 2017. <https://doi.org/10.1002/2016SW001573>.
- 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. 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.* 2023.
- Mikhailov A.V., L. Perrone L. Pre-storm NmF2 enhancements at middle latitudes: Delusion or reality? // *Ann. Geophysicae.* V. 27. N 3. P. 1321–1330. 2009.
- Mikhailov A.V., Perrone L. Pre-storm F2-layer Q-disturbances at middle latitudes: Do they exist? // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* doi: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105473>. 2020.
- Naidu P. P., Latha T. M., Devi M. I. Hemispheric asymmetry in ionospheric response to geomagnetic storms at midlatitudes – comparison with IRI model predictions // *J. Atm. Sol-Terr. Phys.* JASTP-D-22-00272. 2023.
- 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, Article ID 4181389. <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, No. 6, P. 802-814. 2022. DOI: 10.1134/S0016793222060147.

- 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 Physics*. V. 127. 2022. e2021JA030247. DOI: 10.1029/2021JA030247.
- 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. P. 220–235. 2022.
- 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 Sens*. 2022, <https://doi.org/10.3390/xxxxx>.
- 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. 2022.
- 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 Sens*. 2023a, V. 15. P. 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. P. 335. 2023b. <https://doi.org/10.3390/atmos14020335>.

## CHANGES IN THE IONOSPHERIC F REGION PRIOR TO MAGNETIC STORMS (PAPERS OF THE RECENT TWO YEARS)

Danilov A. D., Konstantinova A. V.

A review of the papers published during two recent years (2022–2023) on changes in the ionospheric parameters prior to geomagnetic storms (the so-called «case studies») is presented. It is shown that, as a result of such analysis, deviations of these parameters (first of all,  $foF_2$  and TEC) in the days preceding sudden commencement of a storm (SC) are seen in the majority of cases. At the same time, many authors draw attention to them, discuss their relation to the space weather, and even suggest possible mechanisms of their formation. It is shown that number of such publications increases substantially during recent two years. It is emphasized that changes in the ionospheric state on the prestorm days is detected not only in the “classical” parameters ( $foF_2$  and TEC) but in other ionospheric characteristics as well. The papers devoted namely to the problem of ionospheric precursors and their possible role in prediction of the coming magnetic storm are considered in detail.

**KEYWORDS:** MAGNETIC STORMS, IONOSPHERIC F-REGION, PRESTORM IONOSPHERIC DISTURBANCES