

УДК 551.510.535

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ПО ПОВЕДЕНИЮ НОВОГО ИОНОСФЕРНОГО ИНДЕКСА

© 2022 г. О. А. Шейнер^{1, *}, Ф. И. Выборнов^{1, 2, **}, А. В. Першин^{1, ***}

¹Научно-исследовательский радиофизический институт Нижегородского государственного университета
им. Н.И. Лобачевского (НИРФИ ННГУ), г. Нижний Новгород, Россия

²Волжский государственный университет водного транспорта (ВГУВТ),
г. Нижний Новгород, Россия

*e-mail: rfj@nirfi.unn.ru

**e-mail: vybornov@nirfi.unn.ru

***e-mail: pershin@rambler.ru

Поступила в редакцию 15.10.2021 г.

После доработки 02.02.2022 г.

Принята к публикации 30.03.2022 г.

Для оценки степени ионосферных возмущений в отдельных событиях 2019 г. по данным вертикального зондирования ионосферы применен предложенный ранее метод обработки ионосферных данных — нестандартный ионосферный индекс. Показано, как солнечные корональные выбросы массы и высокоскоростные потоки солнечного ветра, являющиеся глобальными событиями солнечной активности, влияют на значения параметров, используемых для характеристики ионосферы.

DOI: 10.31857/S0016794022040137

1. ВВЕДЕНИЕ

Совокупность явлений на Солнце, в космическом пространстве и межпланетной среде оказывает воздействие на процессы в околоземном космическом пространстве. Существует причинно-следственная цепочка: всегда есть солнечный источник, откуда происходят возмущения, откуда они распространяются через межпланетное пространство и в конечном итоге взаимодействуют с магнитосферой Земли, вызывая магнитосферные и ионосферные возмущения. Первичным источником возмущений являются вариации солнечного излучения, а перенос возмущений осуществляется волнами и частицами в межпланетной среде, магнитосфере и ионосфере Земли. Прежде всего, эти возмущения сказываются на тех процессах, в которых существенную роль играет установившееся равновесие электрических токов и магнитных полей. Возмущения, нарушающие это равновесие, могут привести к возникновению различных нештатных ситуаций.

Последствия таких возмущений, сильных и, как правило, внезапных, можно заметить, например, в виде полярных сияний, в виде сбоев в работе радионавигационных и телекоммуникационных систем, глобальных информационных сетей, а также сбоев в работе наземных электроэнергетических систем (см., например, [Valtonen, 2005;

Boteler, 2003; Pulkkinen et al., 2017; Gummow, 2002]). В связи с этим возникает вопрос об оценке степени ионосферных возмущений и непосредственных причинах, их вызывающих.

Краткосрочные процессы в ионосфере включают взаимодействие с разнообразными солнечными, межпланетными, магнитосферными и атмосферными явлениями. При сравнении различных типов ионосферного отклика, вызванного разного рода источниками возмущений от солнечной активности и межпланетного солнечного ветра, могут быть поняты более глубоко и всесторонне морфологические изменения и физические процессы, приводящие к ионосферным возмущениям. Это также позволит прогнозировать состояния ионосферных возмущений в зависимости от различных условий солнечного излучения.

Значительное влияние могут иметь эруптивные солнечные события высокой интенсивности: мощные солнечные вспышки, корональные выбросы массы (СМЕ), выбросы высокоэнергичных частиц. Основная задача сводится к тому, чтобы по наблюдениям Солнца и солнечного ветра связать звенья всей цепочки и предсказать время и величину возмущений. Решить математически точно такую задачу в настоящее время не представляется возможным. Поэтому большое значение приобретают упрощенные подходы,

описывающие вместо динамики всей совокупности физических параметров как солнечного излучения, так и ионосферы, последовательность отдельных повторяющихся явлений, проявляющихся в характерном наборе этих параметров.

Солнечные корональные выбросы массы могут быть причиной значительной геомагнитной активности, наблюдаемой в околоземном космическом пространстве и на Земле. Примерами являются возмущения горизонтальной составляющей магнитного поля в экваториальной области Земли (геомагнитные бури), нарушение электроснабжения, вызванное повреждением оборудования электросетей, возбуждение частиц во внутренней магнитосфере, усиление продольных токов, соединяющих магнитосферу и ионосферу, нагрев и расширение верхних слоев атмосферы и многое другое.

Воздействие на Землю “*solar streams*” (мы бы их сейчас назвали корональными выбросами массы и потоками солнечного ветра) еще в 1931 г. привлекло внимание Chapman and Ferraro [1931] при построении теории геомагнитных бурь.

Первые результаты об изменении ионосферных параметров, косвенно связанном с СМЕ, можно отнести к 1935 г., когда авторы [Appleton and Ingram, 1935] классифицировали влияние геомагнитных бурь на F -область ионосферы: чем сильнее буря, тем больше снижается критическая частота слоя, что указывает на пониженное значение максимального электронного содержания. Современный термин для этого выражения — “негативный эффект геомагнитной бури”. Открытие положительных эффектов бури: увеличение электронной плотности во время геомагнитных бурь на более низких широтах [Berkner et al., 1939; Berkner and Seaton, 1940] — тоже можно рассматривать как косвенное проявление другой реакции ионосферы на СМЕ.

Анализу косвенного воздействия корональных выбросов массы на ионосферу посвящены и более поздние работы, например, [Moore et al., 1999; Burns et al., 2007; Balan et al., 2008; Fujiwara et al., 2014; Qiu et al., 2015].

Роль высокоскоростных потоков (HSS) солнечного ветра в возникновении геомагнитных возмущений и влиянии на их уровень активно изучалась в последние годы (см, например, [Mavromichalaki et al., 1988; Watari and Watanabe, 2000; Zhang et al., 2007; Yermolaev et al., 2015; Rodríguez-Zuluaga et al., 2016; Mustajab et al., 2019]). Авторы работы [Turner et al., 2009] показывают, что ионосферные бури, связанные с HSS, сопоставимы и иногда превосходят бури, связанные с СМЕ.

Вариации параметров ионосферы, связанные со слабой или умеренной геомагнитной активно-

стью, вызванной высокоскоростными потоками солнечного ветра — косвенное воздействие HSS на ионосферу — исследовались, например, в работах [Burns et al., 2012; Liu et al., 2012; Verkhoglyadova et al., 2013; Berényi et al., 2018; Grandin et al., 2019; Рубцов и др., 2020].

В то же время трактовка ионосферных возмущений как проявления непосредственной реакции ионосферных параметров на СМЕ и HSS не рассматривалась. К первым работам, рассматривавшим непосредственно роль СМЕ в возникновении ионосферных возмущений, можно отнести [Fridman et al., 2000; Sheiner et al., 2002], а в работе [Rakhlina et al., 2018] показана важность использования для анализа ионосферных возмущений скорости высокоскоростных потоков солнечного ветра.

При поиске возможных корреляций между явлениями, происходящими на Солнце, и процессами, регистрируемыми в ионосфере, обычно используются данные о потоках частиц и рентгеновском излучении, полученные со спутников на геостационарных орбитах, и параметрах, относящихся к верхним слоям атмосферы Земли: в большинстве случаев четко прослеживается связь между вариациями данных об околоземной космической среде и регистрируемыми параметрами верхних слоев атмосферы Земли (см., например, [Hanuise et al., 2006; Куницын и др., 2015]). Геомагнитные индексы (Kp , ap и Dst), рассчитанные на основе наземных наблюдений, также используются для получения информации о характеристиках ионосферных возмущений, вызванных солнечными явлениями.

В то же время изучение влияния солнечной активности на состояние ионосферы можно упростить, если проанализировать характерные отклонения в поведении регулярной ионограммы: в качестве параметра ионосферы обычно рассматривают критическую частоту слоя $F2$ ионосферы. Поскольку отклонение от обычных значений параметров составляет процент от регистрируемых значений, требуется разработка точных методов измерения и анализа.

В работах [Fridman et al., 2000; Sheiner et al., 2002] был разработан метод исследования возмущений в ионосфере по данным вертикального зондирования, основанный на вычислении отклонения критической частоты ионосферного слоя $F2$ от среднемесячных значений. Метод был развит, и предложен нестандартный ионосферный индекс $\Delta f_o F2$, который применен для выяснения причин возникновения ионосферных возмущений в периоды мощных солнечных событий [Sheiner et al., 2020].

В данной работе приведен анализ причин возникновения и степени ионосферных возмуще-

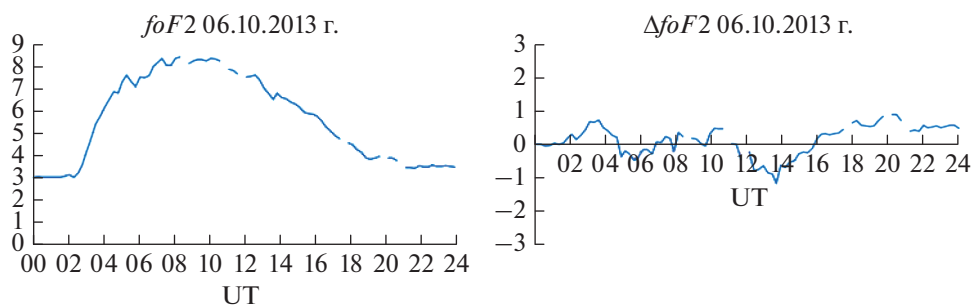


Рис. 1. Пример применения предлагаемого метода анализа. Левая панель — $foF2$, правая панель — $\Delta foF2$. Ось X — время в часах в течение дня (UT), ось Y — частота вертикального зондирования в МГц.

ний во время слабой вспышечной активности и спокойной обстановки на Солнце на примере данных наблюдений за состоянием ионосферы в мае и декабре 2019 г. с применением нестандартного ионосферного индекса.

2. ДАННЫЕ И МЕТОД

В предлагаемом исследовании используются данные вертикального зондирования ионосферы $foF2$, полученные в ходе регулярных наблюдений за состоянием среднеширотной ионосферы на полигоне НИРФИ ННГУ “Васильсурск” (56.15° N, 46.10° E, вблизи г. Нижнего Новгорода).

На полигоне НИРФИ “Васильсурск” установлен современный цифровой ионозонд CADI (www.sil.sk.ca), работающий в режиме патрульных наблюдений со съемом ионограмм раз в 15 мин. Выходная мощность ионозонда составляет 600 Вт, используется режим импульсного кодирования с использованием 13-битного кода Баркера с усреднением по 4 принятым импульсам. Такой режим работы ионозонда позволяет получать качественные ионограммы даже в условиях сильных помех. Точность определения критической частоты — не хуже 50 кГц.

В исследованиях ионосферы активно применяются методы анализа относительных изменений параметров ионосферы, причем, на разных временных интервалах. Так, можно увидеть отношение наблюдаемых и среднемесячных значений критических частот $foF2$ [Araujo-Pradere et al., 2005] и отношение $foF2$ для разных пар моментов времени $T1$ и $T2$ [Данилов и Константинова, 2011], часовые значения девиации $foF2$ между наблюдаемыми величинами и скользящим средним за 13 дней в % [Gordienko et al., 2011], значения разности текущих $foF2$ и 27-дневных скользящих средних [Kutiev et al., 2013; Иванникова и Котонаева, 2021], ежедневную среднюю девиацию $foF2$ между наблюдаемыми величинами и т.н. “синтетическими” в % [Perna and Pezzopane, 2016], деви-

ацию $foF2$, представляющую разность между текущими величинами и в выбранные спокойные дни [Danilov, 2001; Kane, 2005; Danilov and Konstantinova, 2021]. Каждая переменная вводилась для конкретных временных исследований: анализ изменчивости $foF2$ как функции местного времени, широты, сезона и геомагнитной активности, определение долговременных трендов $foF2$, отклик $foF2$ на общее изменение солнечной и геомагнитной активности. Отметим, что в большинстве работ ионосфера исследуется в периоды сильных геомагнитных бурь.

В данном исследовании временной интервал ограничивается месяцем (декабрь и май 2019 г.), и нас интересуют текущие относительные изменения $foF2$ как следствие влияния отдельных мощных солнечных событий.

Предложенный авторами для повышения точности анализа поведения во времени ионосферных параметров нестандартный ионосферный индекс [Sheiner et al., 2020], используемый в данной работе, основан на отклонении критической частоты ионосферного слоя $F2$ от средней за месяц, что, по сути, близко к переменной, используемой в работе [Araujo-Pradere et al., 2005].

При регулярных наблюдениях ионограмм обеспечивается непрерывная временная запись критической частоты $foF2$ в течение дня, каждое измеренное значение отмечается как $foF2_{jk}$, где j — номер точки в течение дня, k — номер дня в месяце.

Девиация $\Delta foF2$ в каждый момент регистрации ионограммы определяется как $\Delta foF2_{jk} = foF2_{jk} - \overline{foF2_j}$, где $\overline{foF2_j} = \sum_{k=1}^N foF2_{jk} / N$, N — число дней в месяце.

Дифференциальный параметр, предлагаемый нами для исследования данных вертикального и наклонного зондирования ионосферы, позволяет повысить чувствительность и устранить стационарные зависимости (например, исключить суточное поведение $foF2$, см. рис. 1).

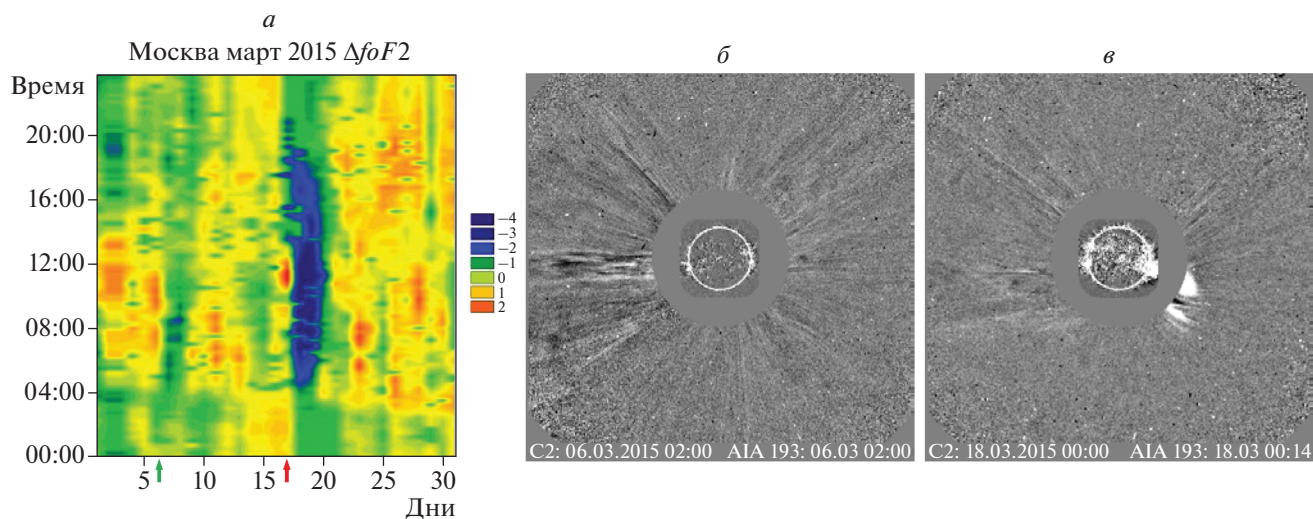


Рис. 2. Иллюстрация совместного анализа ионосферных данных и регистрации CME.

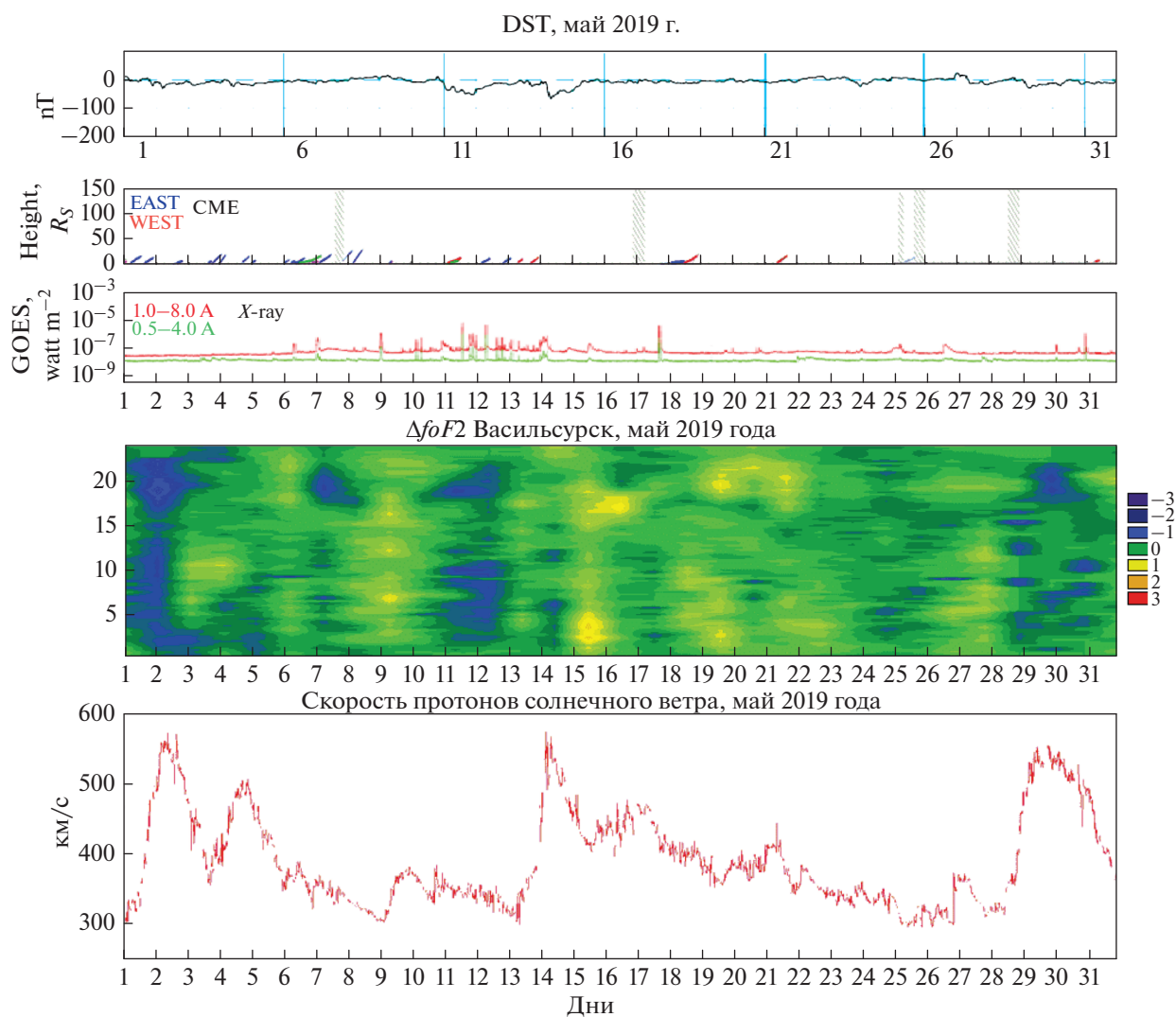


Рис. 3. Результаты совместного анализа $\Delta foF2$, поведения индекса Dst , регистрации CME, X-ray и скорости HSS за май 2019 г. Горизонтальная ось — дни месяца; левая вертикальная ось: для $\Delta foF2$ — время суток (ч, UT), для скорости HSS — значения (км/с).

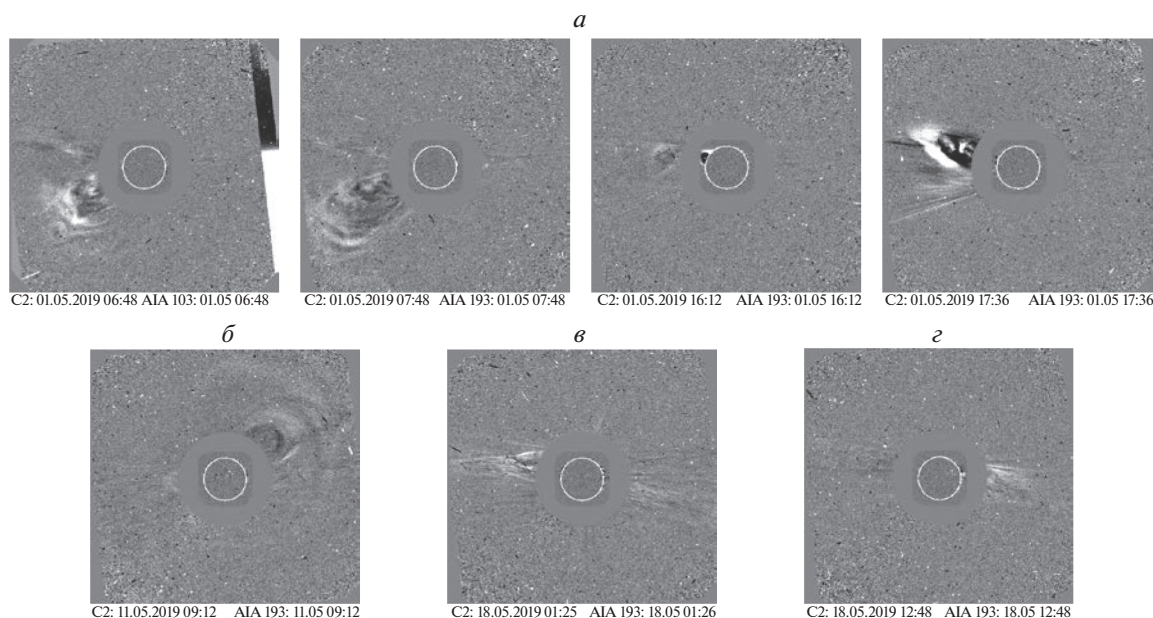


Рис. 4. Разностное изображение корональных выбросов масс (из Каталога CME SOHO LASCO).

Таким образом, предложенный для исследования нестандартный ионосферный индекс ($\Delta foF2$), основанный на отклонении временных изменений частот отражения радиосигнала от среднемесячных значений, измеренных с помощью станции вертикального зондирования, характеризует особенности поведения критической частоты слоя $F2$.

Анализ временного поведения ионосферного индекса и сравнение с данными регистрации корональных выбросов масс дает нам возможность понять, как CME влияет на критическую частоту слоя $F2$ ионосферы. В частности, установлено [Sheiner et al., 2020], что ионосферные возмущения $\Delta foF2$ зависят от величины скорости CME: большие амплитуды отклонений наблюдаются для CME со скоростями $100 < V < 700$ км/с, а CME с большими и меньшими скоростями оказывают меньшее влияние. Кроме того, наблюдается продолжительное снижение значений $\Delta foF2$ после начала CME типа *Loop*, тогда как после обнаружения других типов CME значительных изменений не наблюдается (см. рис. 2).

Рисунок 2а — временное поведение $\Delta foF2$ за март 2015 г., ст. Москва; горизонтальная ось — дни месяца; левая вертикальная ось — время суток (UT). Правая стрелка указывает время регистрации CME типа *Loop*, левая — типа *Jet*. Две правые панели рисунка — разностное изображение CME типа *Loop* (рис. 2в) и типа *Jet* (рис. 2б) из Каталога CME SOHO LASCO (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/). Детальный анализ временного поведения отклонения $\Delta foF2$ показывает, что после

начала CME типа *Loop* наблюдается длительное снижение значений $\Delta foF2$ (рис. 2а, в), и никаких изменений не наблюдается после начала CME типа *Jet* (рис. 2а, б). Заметим, предел применимости нестандартного ионосферного индекса при выяснении причин возникновения ионосферных возмущений оценивается по минимальной реакции индекса на воздействие. Согласно ранее использованным данным [Sheiner et al., 2020], величина предела применимости индекса составляет ~ 0.1 при установлении реакции корональных выбросов массы на критическую частоту слоя $F2$ ионосферы.

3. АНАЛИЗ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Остановимся подробно на данных солнечных и ионосферных наблюдений.

3.1. Наблюдения в мае 2019 г.

Наблюдается очень слабая солнечная активность: в рентгеновском излучении зарегистрированы вспышки в начале месяца, в основном, класса C1, C7, одна вспышка класса M1 (<https://www.solarmonitor.org>).

На рисунке 3 приведено временное поведение ионосферного индекса, полученного по данным вертикального зондирования ионосферы $foF2$ на полигоне НИРФИ ННГУ “Васильсурск”. Здесь же представлены данные о поведении индекса Dst (http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_provisional/), регистрации CME (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_

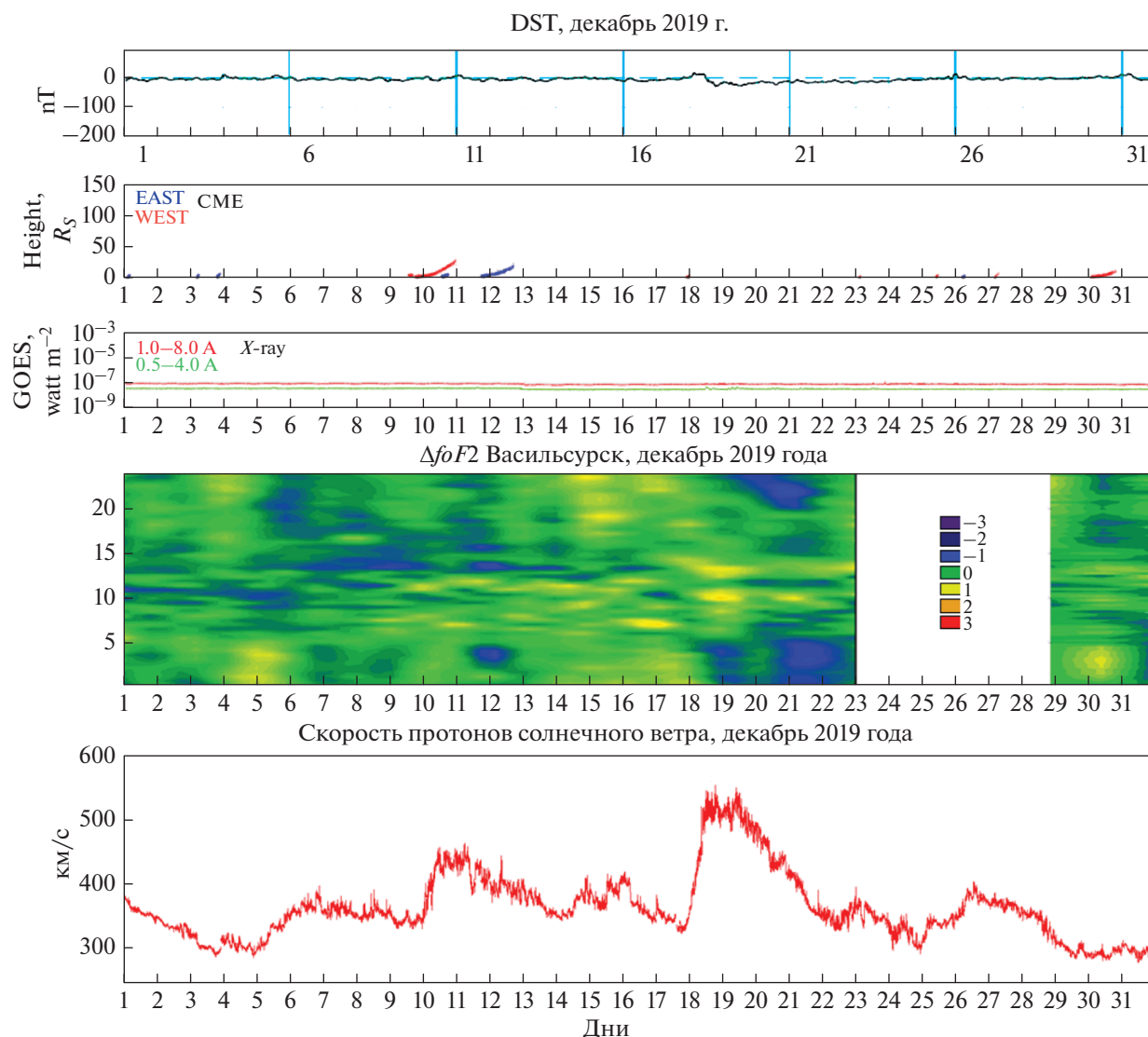


Рис. 5. Результаты совместного анализа $\Delta foF2$, поведения индекса Dst , регистрации CME, X-гау и скорости HSS за декабрь 2019 г. Горизонтальная ось — дни месяца; левая вертикальная ось: для $\Delta foF2$ — время суток (ч, UT), для скорости HSS — значения (км/с).

list/), рентгеновского излучения Солнца (<https://www.solarmonitor.org>) и о скорости протонов в солнечном ветре со спутника ACE RTSW (<http://www.srl.caltech.edu/ACE>) за май 2019 г.

Как видно из рис. 3, степень ионосферных возмущений различна в течение месяца. 02 мая регистрируется достаточно сильное уменьшение $\Delta foF2$ (до -1.5 МГц), что может быть связано с последствием нескольких CME типа *Loop*, зарегистрированных 01 мая со скоростями 328, 175 и 338 км/с (рис. 4а). В то же время зарождение CME на обратной стороне Солнца и направление распространения CME в сторону от Земли позволяет предположить определяющую роль HSS в появив-

шихся ионосферных возмущениях из-за их высокой скорости распространения: больше 550 км/с.

Уменьшение $\Delta foF2$ в конце дня 07 мая (до -0.8 МГц) может быть связано с регистрацией CME со скоростью 338 км/с утром 07 мая. Небольшая величина амплитуды может быть обусловлена направлением распространения выброса.

Анализируя аналогичное уменьшение $\Delta foF2$ 12 мая (до -0.8 МГц), приходим к выводу, что причиной такого возмущения можно считать CME типа *Loop* 11 мая, распространяющегося с меньшей скоростью (191 км/с), но в направлении большего воздействия на Землю (рис. 4б).

Слабое отрицательное ионосферное возмущение 14 мая (до -0.5 МГц), также как и небольшое

положительное (до +1.4 МГц) 15 мая, можно связать с реакцией ионосферы на прохождение высокоскоростного потока солнечного ветра со скоростью ~550 км/с.

Отметим, что оба СМЕ не петельного типа 18 мая (рис. 4в, г) не вызвали отрицательного ионосферного возмущения — уменьшения ионосферного индекса $\Delta foF2$. В то же время небольшие положительные значения $\Delta foF2$ (до +0.7 МГц) можно связать с реакцией ионосферы на упомянутые СМЕ.

Слабые отрицательные ионосферные возмущения (до -0.7 МГц), зарегистрированные в конце месяца, могут быть проявлением реакции ионосферы на высокоскоростной поток солнечного ветра со скоростью ~500 км/с.

3.2. Наблюдения в декабре 2019 г.

Период декабря 2019 г. на Солнце можно рассматривать, как спокойный: до 25 декабря не наблюдалось ни одной активной области (АО), в появившихся двух АО никаких даже слабых вспышек не зарегистрировано.

На рисунке 5 приведено временное поведение ионосферного индекса, полученного по данным вертикального зондирования ионосферы $foF2$ на полигоне НИРФИ ННГУ “Васильсурск”. Здесь же представлены данные о поведении индекса Dst (http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_provisional/), регистрации СМЕ (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/), рентгеновского излучения Солнца (<https://www.solarmonitor.org>) и о скорости протонов в солнечном ветре со спутника ACE RTSW (<http://www.srl.caltech.edu/ACE>) за декабрь 2019 г.

В записи солнечного рентгеновского излучения отсутствуют какие-либо изменения, характеризующие вспышечную активность. Поэтому причины возникающих ионосферных возмущений нужно искать в других ее проявлениях.

Устойчивые отрицательные возмущения $\Delta foF2$ величиной около -0.5 МГц, зарегистрированные 7–9 декабря в середине дня, по-видимому, не связаны с реакцией на солнечные явления: вспышки и СМЕ отсутствуют, а скорость HSS не превышает 400 км/с. Тогда как локальные отрицательные возмущения 12 декабря с амплитудой -1 МГц могут быть вызваны корональным выбросом масс 10 декабря (скорость 103 км/с). Отрицательные возмущения ионосферного индекса $\Delta foF2$, зарегистрированные 21–22 декабря такой же амплитуды (около -1 МГц), могут быть вызваны прохождением высокоскоростного потока солнечного ветра со скоростью ~550 км/с. А незначительные (амплитудой около -0.5 МГц) возмущения в конце дня 30 декабря обусловлены двумя, следующими друг за другом, корональными

выбросами 30 декабря со скоростями 56 и 103 км/с.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование ионосферных возмущений по результатам вертикального зондирования ионосферы на полигоне НИРФИ ННГУ “Васильсурск” в мае и декабре 2019 г. с использованием нестандартного ионосферного индекса $\Delta foF2$. Рассмотрены причины возникновения и характер возмущений в ионосфере в периоды слабой вспышечной активности и спокойного Солнца.

Подтверждено наличие закономерностей во влиянии корональных выбросов массы на критическую частоту ионосферы:

- наблюдается продолжительное снижение значений $\Delta foF2$ после начала СМЕ типа *Loop*, тогда как после обнаружения других типов СМЕ значительных изменений не наблюдается;

- степень ионосферных возмущений (величина $\Delta foF2$) зависит от величины скорости СМЕ: амплитуда отклонения $\Delta foF2$ мала для низкой ($V \sim 100$ км/с) скорости СМЕ.

Отмечена возможная роль высокоскоростных потоков солнечного ветра в возникновении ионосферных возмущений.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования выполнены по проекту № 0729-2020-0057 в рамках базовой части Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Данилов А.Д., Константинова А.В. Поведение критической частоты $foF2$ в различные моменты суток: 1. Зависимость от солнечной активности // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 51. № 2. С. 237–249. 2011.
- Иванникова А.Г., Котонаева Н.Г. Сравнительный анализ вариаций критической частоты слоя $F2$ ионосферы на станциях вертикального радиозондирования ионосферы различной широты при спокойных гелиогеофизических условиях / 19-я Международная конференция “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”. Москва. ИКИ РАН. 15–19 ноября 2021 г. XIX I.113. <http://conf.rse.geosmis.ru/>.
- Куницын В.Е., Назаренко М.О., Нестеров И.А., Падохин А.М. Влияние солнечных вспышек на ионизацию верхней атмосферы. Анализ ряда значительных событий 23-го и 24-го солнечных циклов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физика. Астрономия. № 4. С. 95–101. 2015.
- Рубцов А.В., Малецкий Б.М., Данильчук Е.И., Смотров Е.Е., Шелков А.Д., Ясюкевич А.С. Возмущения ионосферы над Восточной Сибирью во время геомагнит-

- ных бурь 12–15 апреля 2016 г. // Солнечно-земная физика. № 1. С. 75–85. 2020.
- Appleton E.V., Ingram L.J. Magnetic storms and upper atmosphere ionization // *Nature*. V. 136. P. 548–549. 1935.
- Araujo-Pradere E.A., Fuller-Rowell T.J., Codrescu M.V., Bilitza D. Characteristics of the ionospheric variability as a function of season, latitude, local time, and geomagnetic activity // *Radio Sci.* V. 40. RS5009. 2005.
- Balan N., Alleyne H., Walker S., Reme H., McCrea I., Aylward A. Magnetosphere-ionosphere coupling during the CME events of 07–12 November 2004 // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* V. 70. № 17. P. 2101–2111. 2008.
- Berényi K.A., Barta V., Kis A'. Midlatitude ionospheric F2-layer response to eruptive solar events – caused geomagnetic disturbances over Hungary during the maximum of the solar cycle 24: A case study // *Adv. Space Res.* V. 61. № 5. P. 1230–1243. 2018.
- Berkner L.V., Seaton S.L. Systematic ionospheric changes associated with magnetic disturbances. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*. V. 45. № 4. P. 419–423. 1940.
- Berkner L.V., Wells H.W., Seaton S.L. Ionospheric effects associated with magnetic disturbances. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*. V. 44. № 3. P. 283–311. 1939.
- Boteler D.H. Geomagnetic Hazards to Conducting Networks // *Nat. Hazards*. V. 28. № 2–3. P. 537–561. 2003.
- Burns A.G., Solomon S.C., Qian L.Y., Wang W., Emery B.A., Wiltberger M., Weimer D.R. The effects of co-rotating interaction region/high speed stream storms on the thermosphere and ionosphere during the last solar minimum // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* V. 83. P. 79–87. 2012.
- Burns A.G., Solomon S.C., Wang W., Killeen T.L. The ionospheric and thermospheric response to CMEs: Challenges and successes // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* V. 69. P. 77–85. 2007.
- Chapman S., Ferraro V.C.A. A new theory of magnetic storms // *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*. V. 40. № 4. P. 349–370. 1931.
- Danilov A.D. F2-region response to geomagnetic disturbances // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* V. 63. № 5. P. 441–449. 2001.
- Danilov A.D., Konstantinova A.V. Behavior of f_oF_2 prior to geomagnetic storms according to Slough and Juliusruh data // *Adv. Space Res.* V. 67. P. 4066–4077. 2021.
- Fridman V., Sheiner O., Krupenya N., Mityakova E., Rakhlin A. CME effects on ionospheric condition // Abstracts of First SRAMP Conference. Session S5 “Solar Wind Effects on Ionospheric Convection”. Sapporo, October 2–6, 2000. P. 126. 2000.
- Fujiwara H., Nozawa S., Ogawa Y. Extreme ion heating in the dayside ionosphere in response to the arrival of a Coronal Mass Ejection on 12 March 2012 // *Ann. Geophysicae*. V. 32. № 7. P. 831–839. 2014.
- Gordienko G.I., Vodyannikov V.V., Yakovets A.F. Geomagnetic storm effects in the ionospheric E- and F-regions // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* V. 73. P. 1818–1830. 2011.
- Grandin M., Aikio A.T., Kozlovsky A. Properties and geoeffectiveness of solar wind high-speed streams and stream interaction regions during solar cycles 23 and 24 // *J. Geophys. Res. Space*. V. 124. № 6. P. 3871–3892. 2019.
- Gummow R.A. GIC-effects on pipeline corrosion and corrosion control system // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* V. 64. № 16. P. 1755–1764. 2002.
- Hanuise C., Cerisier J.C., Auchère F. et al. From the Sun to the Earth: impact of the 27–28 May 2003 solar proton events on the magnetosphere, ionosphere and thermosphere // *Ann. Geophysicae*. V. 24. № 1. P. 129–151. 2006.
- Kane R.P. Ionospheric f_oF_2 anomalies during some intense geomagnetic storms // *Ann.-Geophysicae*. V. 23. № 7. P. 2487–2499. 2005.
- Kutiev I., Tsagouri I., Perrone L. et al. Solar activity impact on the Earth's upper atmosphere // *J. Space Weather Space Clim.* V. 3. A06. 2013.
- Liu J., Liu L., Zhao B., Wei Y., Hu L., Xiong B. High-speed stream impacts on the equatorial ionization anomaly region during the deep solar minimum year 2008 // *J. Geophys. Res.* V. 117. A10304. 2012.
- Mavromichalaki H., Vassilaki A., Marmatsouri E. A catalogue of high-speed solar-wind streams: Further evidence of their relationship to A_p -index // *Sol. Phys.* V. 115. P. 345–365. 1988.
- Moore T.E., Peterson W.K., Russell C.T. et al. Ionospheric mass ejection in response to a CME // *Geophys. Res. Lett.* V. 26. № 15. P. 2339–2342. 1999.
- Mustajab F., Badruddin, Asiri H. Study of the relative geoeffectiveness of high-speed solar wind streams of different speed and different durations // *Adv. Space Res.* V. 64. № 9. P. 1740–1750. 2019.
- Perna L., Pezzopane M. f_oF_2 vs solar indices for the Rome station: Looking for the best general relation which is able to describe the anomalous minimum between cycles 23 and 24 // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* V. 148. P. 13–21. 2016.
- Pulkkinen A., Bernabeu E., Thomson A. et al. Geomagnetically induced currents: Science, engineering, and applications readiness // *Space Weather*. V. 15. № 7. P. 828–856. 2017.
- Qiu N., Chen Y.H., Wang W.B., Gong J.C., Liu S.Q. Statistical analysis of the ionosphere response to the CIR and CME in Mid-latitude regions // *Chinese J. Geophys. CH.* V. 58. P. 2250–2262. 2015.
- Rakhlin A., Sheiner O., Vybornov F., Pershin A. About factors of solar radiation influenced on the ionosphere // Proceedings IAU Symposium 335 “Space Weather on the Heliosphere: Processes and Forecasts”. P. 171–174. 2018.
- Rodríguez-Zuluaga J., Radicella S.M., Nava B., Amory-Mazaudier C., Mora-Páez H., Alazo-Cuartas K. Distinct responses of the low-latitude ionosphere to CME and HSSWS: The role of the IMF Bz oscillation frequency // *J. Geophys. Res. Space*. V. 121. P. 11528–11548. 2016.
- Sheiner O.A., Fridman V.M., Krupenya N.D., Mityakova E.E., Rakhlin A.V. Effect of solar activity on the Earth's environment // Proc. Euroconference ESA SP-477. “Second Solar Cycle and Space Weather”. Ed. Huguette Sawaya-Lacoste. P. 479–481. 2002.
- Sheiner O., Rakhlin A., Fridman V., Vybornov F. New ionospheric index for Space Weather service // *Adv. Space Res.* V. 66. № 6. P. 1415–1426. 2020.
- Turner N.E., Cramer W.D., Earle S.K., Emer B.A. Geoeffectiveness and energy partitioning in CIR-driven and CME-driven storms // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* V. 71. P. 1023–1031. 2009.

- *Valtonen E.* Space Weather Effects on Technology / Space Weather / Lecture Notes in Physics, V. 656. Ed. Scherer K., Fichtner H., Heber B., Mall U. Berlin. Heidelberg: Springer. P. 241–273. 2005.
- *Verkhoglyadova O.P., Tsurutani B.T., Mannucci A.J., Mlynczak M.G., Hunt L.A., Runge T.* Variability of ionospheric TEC during solar and geomagnetic minima (2008 and 2009): external high speed stream drivers // *Ann. Geophysicae*. V. 31. № 2. P. 263–276. 2013.
- *Watari S., Watanabe T.* High-speed streams from coronal holes and coronal mass ejections around the solar minimum of cycle 22 // *Adv. Space Res.* V. 25. № 9. P. 1863–1866. 2000.
- *Yermolaev Y.I., Lodkina I.G., Nikolaeva N.S., Yermolaev M.Yu.* Dynamics of large-scale solar wind streams obtained by the double superposed epoch analysis // *J. Geophys. Res. Space*. V. 120. № 9. P. 7094–7106. 2015.
- *Zhang J., Richardson I.G., Webb D.F. et al.* Solar and interplanetary sources of major geomagnetic storms ($Dst > 100$ nT) during 1996–2005 // *J. Geophys. Res.* V. 112. A10102. 2007.