

УДК 551.510.535

## ОТКЛИК ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ НА ЯВЛЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ В ФЕВРАЛЕ – МАРТЕ 2023 ГОДА

© 2024 г. Ф. И. Выборнов<sup>1, 2, \*</sup>, О. А. Шейнер<sup>1, \*\*</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский радиофизический институт Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup> Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

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

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

Поступила в редакцию 15.08.2023 г.

После доработки 09.10.2023 г.

Принята к публикации 17.10.2023 г.

В результате анализа данных вертикального и наклонного зондирования ионосферы в феврале – марте 2023 г. с применением нового ионосферного индекса установлено, что солнечные корональные выбросы массы типа петля приводят к длительному понижению критической частоты  $F$ -слоя ионосферы, тогда как другие типы корональных выбросов массы могут не приводить к значительным изменениям состояния ионосферы. Отмечена возможная роль высокоскоростных потоков солнечного ветра и энергичных протонов в возникновении ионосферных возмущений. Приводятся дистанционно-частотные характеристики трассы Кипр – Нижний Новгород во время геомагнитных возмущений, которые свидетельствуют как о сильной деформации  $F$ -слоя ионосферы, так и появлении  $z$ -образных волновых возмущений, распространявшихся в область меньших высот.

DOI: 10.31857/S0023420624020037, EDN: kzmcga

### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы много внимания уделяется причинам возникновения ионосферных возмущений и динамике их развития. Это связано с широким использованием дальней коротковолновой радиосвязи и загоризонтной радиолокации, необходимостью повышения надежности их функционирования и прогнозируемости параметров ионосферного канала связи [1–3]. Состояние ионосферы влияет на работу спутниковых радионавигационных систем и может ограничивать точность позиционирования наземных объектов [4–6].

Появление большого числа исследовательских спутников и наземных средств диагностики за параметрами космической погоды позволяет получать огромный объем данных, где ионосфера может выступать средой, являющейся чутким индикатором солнечно-земных связей.

Согласно многочисленным исследованиям [7–14], параметры ионосферы сильно зависят от геоэффективных явлений, возникающих на Солнце, таких как корональные выбросы

массы (КВМ) и высокоскоростные потоки солнечного ветра. Регистрация возмущений в ионосфере может проводиться как наземными средствами зондирования (ионозондами вертикального, наклонного и возвратно-наклонного зондирования, риометрами, радаром некогерентного рассеяния и др.), так и с использованием ракет и искусственных спутников Земли (прямые измерения, применение бортовых ионозондов или использование методов транс-ионосферного зондирования сигналами искусственных спутников Земли) [15].

В данной статье рассматривается влияние солнечных геоэффективных возмущений на параметры ионосферы в феврале и марте 2023 г. В качестве параметров ионосферы исследовалось изменение во времени критической частоты  $f_0 F_2$ -слоя ионосферы при вертикальном зондировании и максимально наблюдаемой частоты при наклонном зондировании ионосферы методом линейно-частотно-модулированного (ЛЧМ) сигнала с использованием предложенного нами ранее нового ионосферного индекса [16].

## ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В исследовании использовались данные вертикального и наклонного зондирования ионосферы. Значения критических частот  $F$ -слоя ионосферы приводятся по данным (<https://ulcar.uml.edu/stationlist.html>, <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf/gggm/index.html>) ионосферных станций Тромсё (69.6°N, 19.2°E – географические координаты; 36.26°N, 103.07E – геомагнитные координаты), Варшавы (52.21°N, 21.06°E; 50.48°N, 105.18°E) и Афин (38.0°N, 23.5°E; 36.26°N, 103.07°E). Выбор этих станций определялся их близким расположением к одному меридиану, что позволяет оценить скорость развития ионосферных возмущений от полярного овала к экватору.

Критические частоты  $F$ -слоя ионосферы по данным ионозонда CAD1, расположенного в п. Васильсурск (56.15°N, 46.10°E; 50.77°N, 129.13°E), были получены в ходе специальных измерений. Ионозонд работал в 15-минутном режиме зондирования ионосферы в диапазоне частот 1–12 МГц. Данные максимальных наблюдаемых частот  $F$ -слоя ионосферы приводятся по результатам специальных измерений на трассе Кипр – г. Нижний Новгород. Прием ЛЧМ-сигнала проводился каждые 5 мин в диапазоне 8–33 МГц. Координаты всех станций вертикального зондирования, данные которых использовались в статье, приведены рядом с их названием, а взаимное расположение станций

вертикального зондирования (отмечены красными точками) и трассы наклонного зондирования (показана желтой линией) приведены на рис. 1. Средняя точка трассы Кипр – г. Нижний Новгород (отмечена также красной точкой) имеет координаты 45.6°N, 37.45°E – географические; 41.61°N, 118.15°E – геомагнитные.

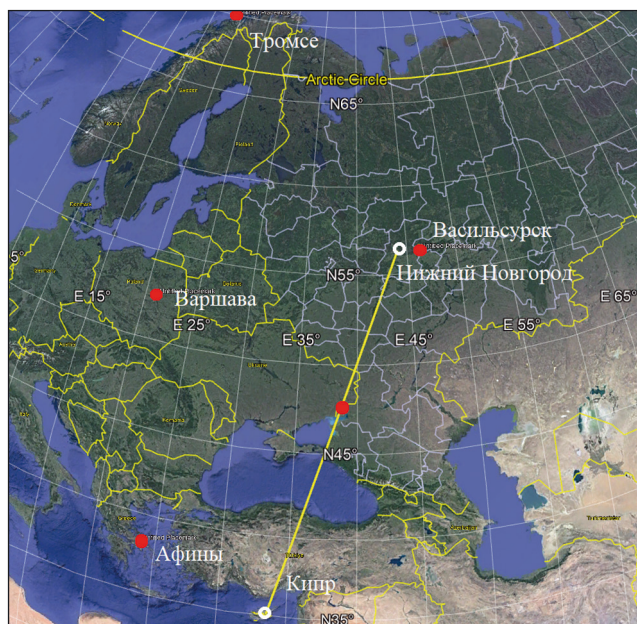
Используемый в данном исследовании новый ионосферный индекс основан на вычислении отклонения текущего значения критической частоты  $\Delta f_0$  (или максимально наблюдаемой частоты) ионосферного слоя  $F_2$  от усредненного суточного профиля за месяц, измеренного с помощью метода вертикального (или наклонного) зондирования ионосферы [16]. Девиация  $\Delta f_0$  в каждый момент регистрации ионограммы (для вертикального зондирования) или дистанционно-частотной характеристики наклонного зондирования определялась как

$$\Delta f_{0jk} = f_{0jk} - \overline{f_{0j}},$$

где

$$\overline{f_{0j}} = \sum_{k=1}^N f_{0jk} / N,$$

$f_{0jk}$  – измеренное значение;  $j$  – номер точки измерения в течение суток;  $k$  – номер суток в месяце;  $N$  – число дней в месяце. Аналогичная процедура могла проводиться и при анализе данных максимально наблюдаемой частоты наклонного зондирования.



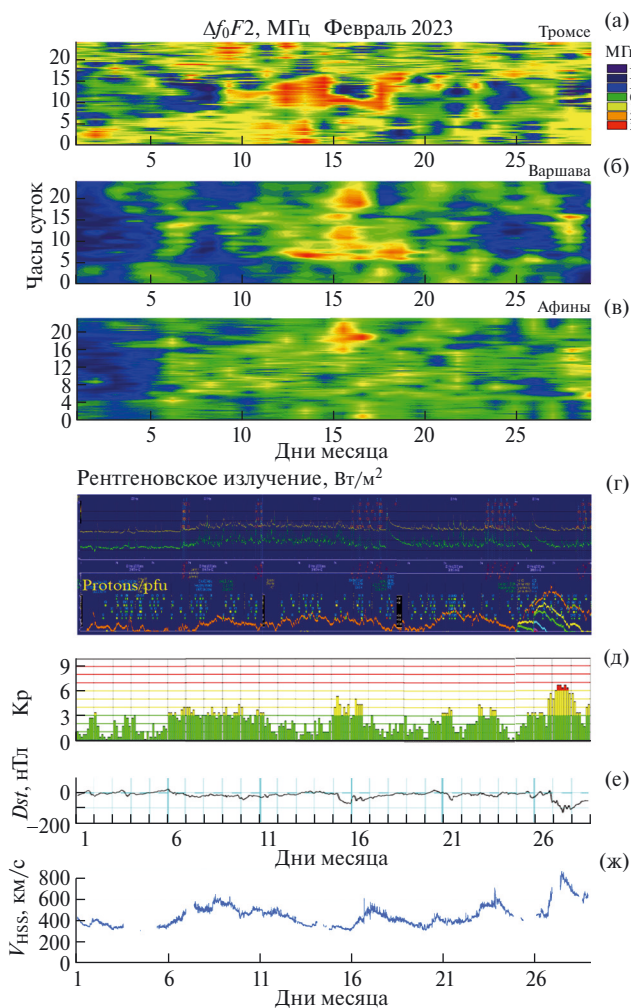
**Рис. 1.** Взаимное расположение станций вертикального (отмечены красными точками) и трассы наклонного зондирования (желтая линия). Средняя точка трассы Кипр – г. Нижний Новгород отмечена красной точкой.

Дифференциальный параметр, предложенный нами для исследования данных вертикального и наклонного зондирования ионосферы, позволяет устранить стационарные зависимости (исключить среднесуточное поведение  $f_0 F_2$  или максимально наблюдаемой частоты), а используемая цветовая гамма — повысить чувствительность определения девиации  $\Delta f_0$  в зависимости от времени суток и дня месяца.

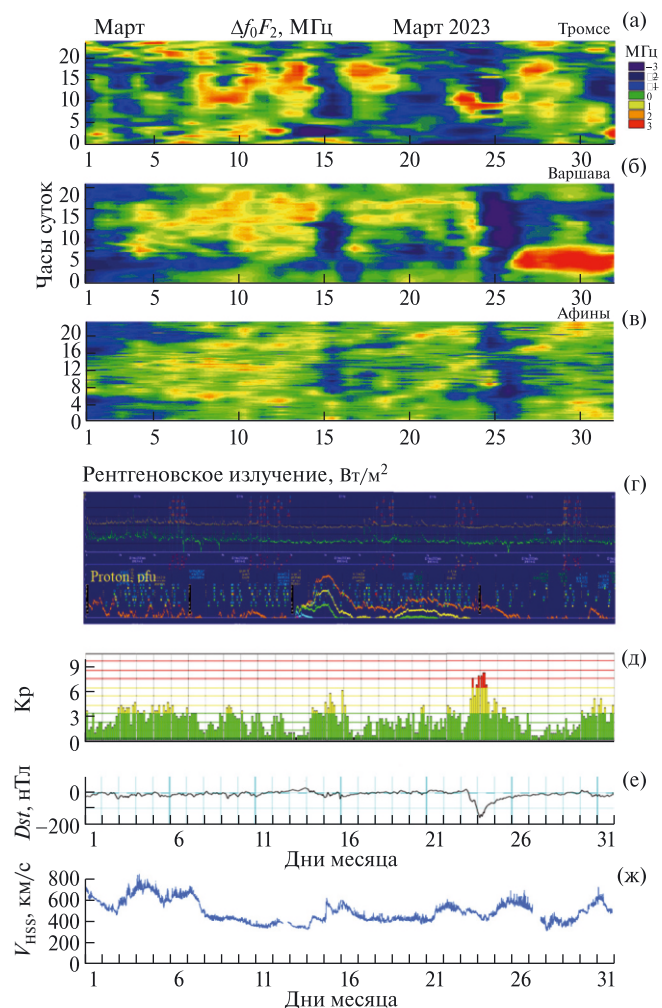
Дополнительно анализировалось влияние повышенной геомагнитной активности на среднеширотную ионосферу. Для этого проводилось сопоставление данных Кр- и  $Dst$ -индексов за февраль и март 2023 г. и ионограмм ионосферной станции п. Васильсурск или

дистанционно-частотной характеристики ионосферы для трассы Кипр — г. Нижний Новгород.

В качестве событий, влияющих на состояние ионосферы Земли, в первую очередь рассматривались КВМ разных типов, включая и залимбовые случаи, зарегистрированные на Солнце в феврале — марте 2023 г.; а также (при необходимости) изменение скорости высокоскоростных потоков солнечного ветра, потоки солнечных протонов разных энергий и динамика изменения коротковолнового (рентгеновского) излучения. Информация о регистрации КВМ доступна в Каталоге SACTus (<http://sidc.be/sactus>). Данные о КВМ вносятся в каталог автоматически с использованием наблюдений



**Рис. 2.** Поведение индекса  $\Delta f_0 F_2$  для 3 ионосферных станций: Афины (v), Варшава (б), Тромсё (а); временной ход рентгеновского излучения и потока протонов (г); индексы Кр (д) и  $Dst$  (е); график скорости высокоскоростных потоков солнечного ветра ( $V_{HSS}$ , км/с) за февраль 2023 г. Горизонтальная ось — дни месяца; левая вертикальная ось: для  $\Delta f_0 F_2$  — время суток (ч, УТ), для всех остальных — значения величин.



**Рис. 3.** Поведение индекса  $\Delta f_0 F_2$  для 3 ионосферных станций: Афины (v), Варшава (б), Тромсё (а); временной ход рентгеновского излучения и потока протонов (г); индексы Кр (д) и  $Dst$  (е); график скорости высокоскоростных потоков солнечного ветра ( $V_{HSS}$ , км/с) за март 2023 г. Горизонтальная ось — дни месяца; левая вертикальная ось: для  $\Delta f_0 F_2$  — время суток (ч, УТ), для всех остальных — значения величин.

LASCO C2/C3. Уточненные данные о регистрации КВМ приводятся в Каталоге SOHO LASCO CME ([https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/)).

Ниже в тексте даты и время приводятся по Гринвичу, но дата и время на используемых для анализа снимках оставлены в том виде, в котором они приводятся на сайтах исходных данных.

Для удобства сопоставления данных по девиации  $\Delta f_0$  в зависимости от времени суток и дня месяца и КВМ центральная часть рис. 2 и 3 (для станции Варшавы) повторяется с отметками зон влияния конкретных КВМ.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Примеры возникающих ионосферных возмущений для наблюдений, проведенных в феврале и марте 2023 г. на 3 станциях Афины, Варшава и Тромсё, показаны соответственно на рис. 2 и 3. Там же приведены данные об индексах Кр, X-ray, Dst, которые свидетельствуют о повышенной геомагнитной активности ([https://tesis.xras.ru/magnetic\\_storms.html](https://tesis.xras.ru/magnetic_storms.html); [https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst\\_realtime/202210/index.html](https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_realtime/202210/index.html)): в конце февраля и марта произошли сильные магнитные бури, и временной ход скорости

высокоскоростных потоков солнечного ветра ( $V_{HSS}$ , км/с) (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov>).

ФЕВРАЛЬ 2023 ГОДА

Примеры сопоставлений зарегистрированных КВМ и наблюдаемых ионосферных возмущений в феврале 2023 г. показаны на рис. 4 на примере ионосферных данных Варшавы. С учетом Кр- и Dst-индексов такое сопоставление позволяет идентифицировать возможный источник влияния на критические частоты F-слоя ионосферы и рассматривать КВМ как источник ионосферных возмущений.

Примеры КВМ на рис. 4, 7 показаны как разностные изображения солнечной короны, полученные в белом свете с помощью коронографа LASCO/C2. Белым цветом на изображении отмечены границы зарегистрированных КВМ. КВМ видны как яркие блики.

Понижение критических частот (хорошо видно по данным станции Варшава) за первую декаду февраля было связано с петлеобразными КВМ 03.ИИ.2023 в 10:00 UT, 09.ИИ.2023 в 06:12 UT и 10.ИИ.2023 в 09:24 UT, которые были зафиксированы LASCO-C2 (<http://sidc.be/cactus>).

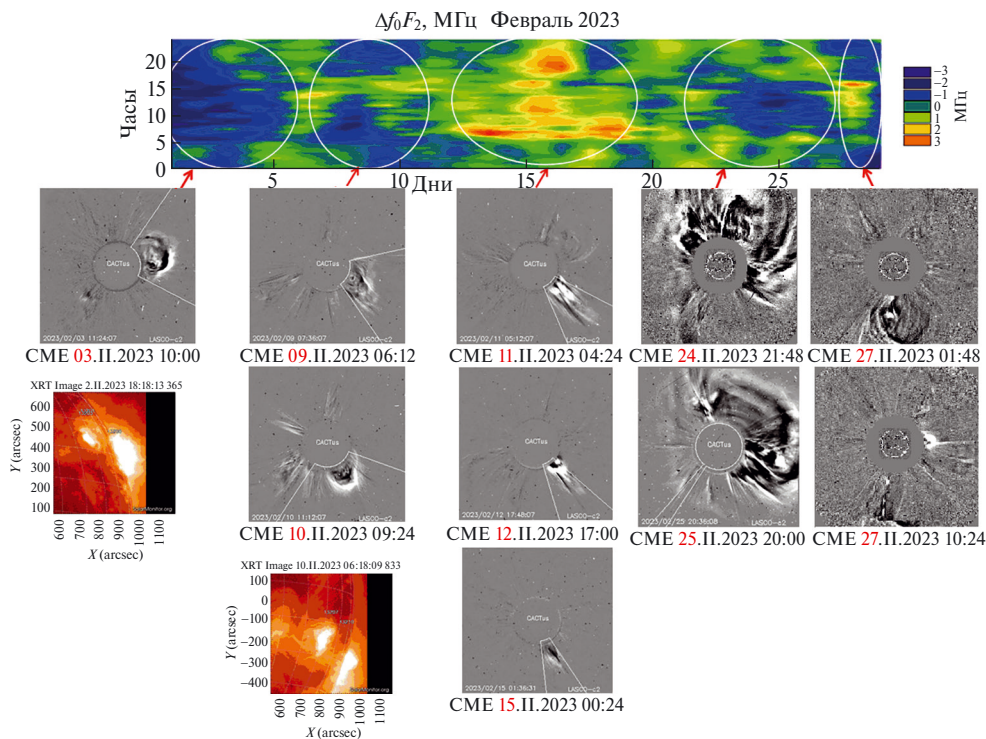


Рис. 4. Иллюстрация совместного анализа поведения индекса  $\Delta f_0 F_2$  по данным ионосферной станции Варшава и регистрации КВМ в феврале 2023 г.

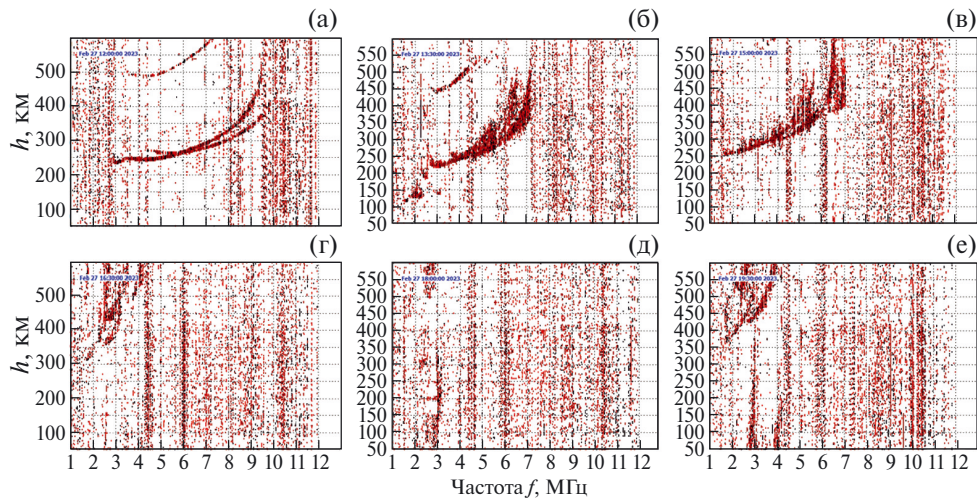


Рис. 5. Ионограммы вертикального зондирования, полученные на ионосферной станции п. Васильсурск 27.11.2023: 12:00 (а), 13:30 (б), 15:00 (в), 16:30 (г), 18:00 (д), 19:30 UT (е).

#### Кипр—Нижний Новгород

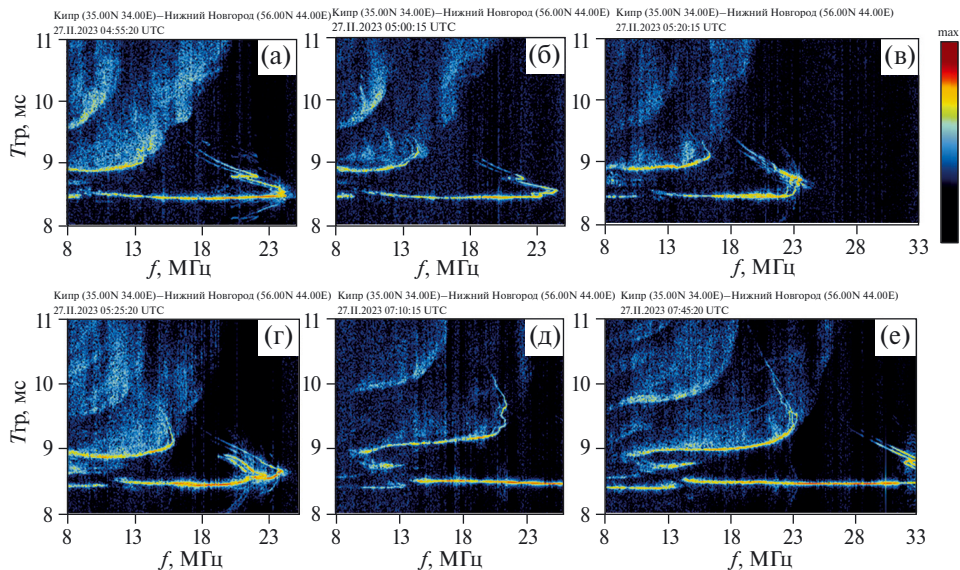


Рис. 6. Дистанционно-частотная характеристика ЛЧМ-сигнала на трассе зондирования Кипр – г. Нижний Новгород 27.11.2023: 04:55 (а), 05:00 (б), 05:20 (в), 12:00 (г), 05:25 (д), 07:10 (е).

Увеличение критических частот в середине месяца было вызвано радиальными КВМ 11.11.2023 в 04:24 UT, 12.11.2023 в 17:00 UT, 15.11.2023 в 00:24 UT, которые также были зафиксированы LASCO-C2 (<http://sidc.be/cactus>).

Повторное понижение критических частот по данным станции Варшава 24–25 февраля было связано с КВМ типа Гало 24.11.2023 в 20:36 UT и 25.11.2023 в 19:24 UT ([https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/)).

Увеличение скорости высокоскоростных потоков солнечного ветра с 400 до 800 км/с

26 февраля (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov>) и КВМ 24.11.2023 в 20:36 UT и 25.11.2023 в 19:24 UT ([https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/)) привели к сильной магнитной буре, которая началась вечером 26.11.2023 и продолжалась 27.11.2023. При этом резко изменились критические частоты *F*-слоя ионосферы. По уточненным данным Каталога ([https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/)), это могло быть откликом на КВМ 27.11.2023, зарегистрированные на C2 в 01:48 и 10:24 UT.

На среднеширотную ионосферу центрального региона России магнитная буря 27.11.2023

оказала существенное влияние. По данным станции вертикального зондирования п. Васильсурск наблюдались сильные возмущения критических частот, диффузные отражения (*F*-spread), наличие множественных отражений. На рис. 5 приведены ионограммы, где в 12:00 UT (рис. 5а) наблюдался профиль невозмущенной ионосферы с критической частотой *F*-слоя около 9.5 МГц. Резкое изменение вида ионограмм началось в 12:45 UT. В 13:30 UT (рис. 5б) критическая частота *F*-слоя ионосферы уменьшилась до 6 МГц, наблюдалась сильная диффузность (до 3 баллов). В дальнейшем продолжалось уменьшение критической частоты *F*-слоя ионосферы, наблюдалось расслоение в области критических частот (рис. 5в–е), отраженный сигнал от слоев *E* и *F*<sub>1</sub> перестал регистрироваться. Только в 6:00 UT 28.И.2023 ионосфера полностью восстановилась. Необходимо отметить, что в ночь с 26.И.2023 на 27.И.2023 наблюдалась очень сильная диффузность *F*-слоя ионосферы.

Магнитная буря проявилась и на трассе ЛЧМ-зондирования Кипр – г. Нижний Новгород. На дистанционно-частотной характеристике ЛЧМ-сигнала наблюдались *z*-образные возмущения (следствие перемещающихся ионосферных возмущений (рис. 6а–г, е), диффузность, появился сильный *Es*-слой (рис. 6д, е). Наблюдалась сильная искажения треков отражения. Искаженными на дистанционно-частотной характеристике оказались треки не только одно-, но и двух-, трехкачковых трасс. Наблюдалось сильное возвратно-наклонное рассеяние.

МАРТ 2023 ГОДА

На рис. 7 приводятся графики  $\Delta f_0 F2$  за март 2023 г. для данных станции Варшава, которые с учетом *Kp*- и *Dst*-индексов позволяют идентифицировать возможный источник влияния на критические частоты *F*-слоя ионосферы.

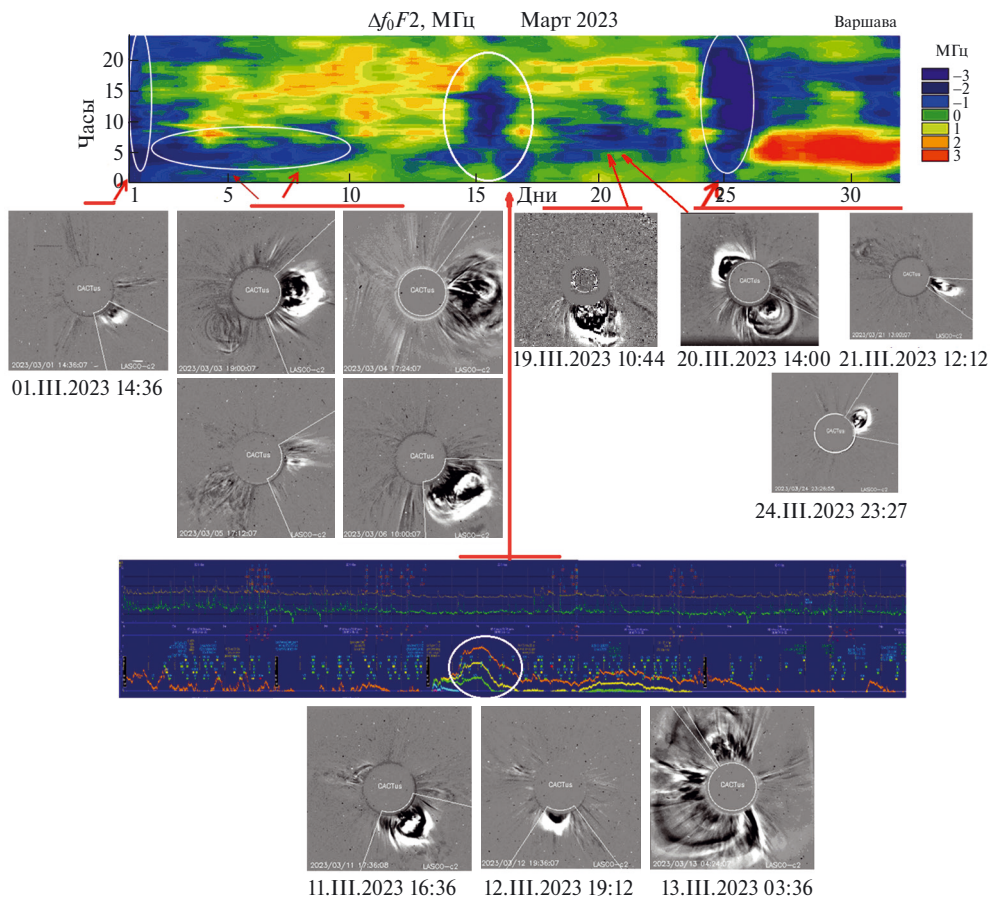
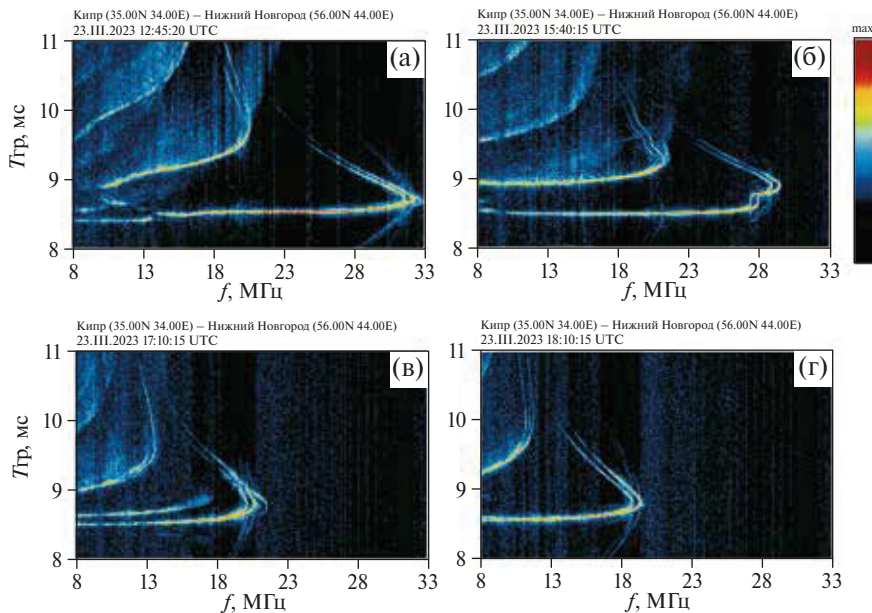


Рис. 7. Иллюстрация совместного анализа поведения индекса  $\Delta f_0 F2$  по данным ионосферной станции Варшава и регистрации КВМ в марте 2023 г.

Кипр—Нижний Новгород  
23.ИИ.2023

**Рис. 8.** Дистанционно-частотная характеристика ЛЧМ-сигнала на трассе зондирования Кипр – г. Нижний Новгород 23.ИИ.2023: 12:45 (а), 15:40 (б), 17:10 (в), 18:10 UT (г).

Понижение критических частот в начале месяца может быть следствием солнечной активности в конце февраля, в то же время и дополнительно отклик на КВМ 01.ИИ.2023. Длительное понижение критических частот 02–10.ИИ.2023 может быть откликом на КВМ 03–06.ИИ.2023 из АО на западном лимбе.

Особенность возникших 13–17.ИИ.2023 ионосферных возмущений – это то, что они совпадают с КВМ, зарегистрированным 13.ИИ.2023, очень большой мощности на обратной от Земли стороне Солнца, который стал и источником потока солнечных протонов. Подтверждением этому служит отсутствие солнечной вспышки, с которой можно ассоциировать начало события. Дополнительный вклад в возмущения ионосферы могут внести КВМ типа Гало 11–12.ИИ.2023 ([https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/)).

Кратковременные возмущения ионосферы 20–21 марта, скорее всего, связаны с откликом на КВМ 19.ИИ.2023 и залимбового 20.ИИ.2023 ([https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/)).

Возмущения в ионосфере 24–25.ИИ.2023 вызваны КВМ на обратной от Земли стороне Солнца, в этот период солнечных вспышек не было зарегистрировано. Отклик наблюдается с большой задержкой, поскольку КВМ идет из-за лимба (20.ИИ.2023 типа Гало, [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/)).

[gov/CME\\_list/](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/)). В то же время дополнительный вклад в реакцию ионосферы могут внести КВМ 21–24.ИИ.2023 ([https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/)).

На рис. 8 приведены дистанционно-частотные характеристики ЛЧМ-сигнала на трассе ЛЧМ-зондирования Кипр – г. Нижний Новгород, полученные 23.ИИ.2023. Дистанционно-частотные характеристики, полученные в 15:40 и 17:10 UT, свидетельствуют о сильной возмущенности ионосферы. Присутствуют сильные искажения формы треков одно- и двухскачковых трасс. Явно присутствуют  $z$ -образные возмущения (рис. 8б, в). Дистанционно-частотные характеристики, полученные в 12:45 и 18:10 UT, свидетельствуют об отсутствии сильных возмущений в ионосфере в области отражения. Сравнивая реакцию ионосферы на геомагнитные возмущения 26–27 февраля и 23 марта 2023 г., необходимо отметить, что первые проявились значительно сильнее.

Сравнивая рис. 2а–в и рис. 3а–в, можно заметить, что вариации критических частот ионосферы по данным станций, расположенных близко к одной долготе, сильно отличаются. Наиболее слабо они проявляются для низкоширотной ионосферы и сильно (до  $\pm 3$  МГц) – для высокоширотной. Не получилось идентифицировать источник возмущения 26–31.ИИ.2023 для станции Варшава (на рис. 3б. выделено красным цветом). По нашему

мнению, это результат неправильного определения критической частоты при использовании компьютерной обработки ионосферных данных.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований степени ионосферных возмущений в зависимости от кратковременных вариаций солнечной активности (регистрации КВМ и высокоскоростных потоков солнечного ветра) по результатам вертикального и наклонного зондирования ионосферы в феврале и марте 2023 г. и использования нового ионосферного индекса подтверждено наличие закономерности во влиянии КВМ на параметры ионосферы: наблюдается продолжительное снижение значений  $\Delta f_0 F_2$  после начала КВМ (типа петля), тогда как после обнаружения других типов КВМ значительных изменений не наблюдается. Отмечена возможная роль высокоскоростных потоков солнечного ветра и энергичных протонов в возникновении ионосферных возмущений.

Приведены ионограммы станции п. Васильсурск вертикального зондирования ионосферы, где отмечалось сильное поглощение отраженного сигнала во время геомагнитной бури в феврале 2023 г. На дистанционно-частотных характеристиках трассы Кипр – Нижний Новгород во время геомагнитных возмущений в феврале – марте 2023 г. наблюдались искажения формы  $F$ -слоя ионосферы, отмечалось регулярное появление  $z$ -образных волновых возмущений, распространявшихся в область меньших высот.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект FSWR-2023-0038.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куркин В.И., Полех Н.М., Золотухина Н.А. Влияние слабых магнитных бурь на характеристики распространения КВ-радиоволн // Геомагнетизм и аэронавигация. 2022. Т. 62. № 2. С. 245–256. <https://doi.org/10.31857/S0016794022020110>

2. Фабрицио Д.А. Высокочастотный загоризонтный радар: основополагающие принципы, обработка сигналов и практическое применение. Москва: Техносфера, 2018. 936 с. (*Fabrizio Giuseppe Aureliano*. High frequency over the horizon radar: fundamental principles, signal processing and practical applications. New York: McGraw-Hill Education, 2013.)
3. Урядов В.П., Выборнов Ф.И., Першин А.В. Вариации диапазона частот прохождения коротковолновых сигналов на субавропольной трассе во время магнитно-ионосферной возмущенности в октябре 2016 года // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2021. Т. 64. № 2. С. 83–94. [https://doi.org/10.52452/00213462\\_2021\\_64\\_02\\_83](https://doi.org/10.52452/00213462_2021_64_02_83) (Uryadov V.P., Vybornov F.I., Pershin A.V. Variations of the Frequency Range of HF Signals on the Subauroral Path During Magnetic-Ionospheric Disturbances in October 2016. // Radiophysics and Quantum Electronics. 2021. V. 64. Iss. 2. P. 77–87. <https://doi.org/10.1007/s11141-021-10113-8>.)
4. Демьянов В.В., Ясюкевич Ю.В. Механизмы воздействия нерегулярных геофизических факторов на функционирование спутниковых радионавигационных систем. Иркутск: ИГУ, 2014. 349 с.
5. Афраймович Э.Л., Гаврилюк Н.С., Демьянов В.В. и др. Сбои функционирования спутниковых навигационных систем GPS-ГЛОНАСС, обусловленные мощным радиоизлучением Солнца во время солнечных вспышек 6, 13 декабря 2006 г. и 28 октября 2003 г. // Косм. исслед. 2009. Т. 47. № 2. С. 146–157.
6. Захаров В.И., Чернышов А.А., Милох В. и др. Влияние ионосферы на параметры навигационных сигналов GPS во время геомагнитной суббури // Геомагнетизм и аэронавигация. 2020. Т. 60. № 6. С. 769–782. <https://doi.org/10.31857/S0016794020060152>
7. Жеребцов Г.А., Shi Jiankui, Перевалова Н.П. и др. Ионосферные возмущения в Восточно-Азиатском регионе. Москва: ГЕОС, 2021. 338 с. <https://doi.org/10.34756/GOES.2021.16.37867>
8. Balan N., Alleyne H., Walker S. et al. Magnetosphere-ionosphere coupling during the CME events of 07–12 November 2004 // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2008. V. 70. Iss. 17. P. 2101–2111.
9. Berényi K.A., Barta V., Kis Á. Midlatitude ionospheric F2-layer response to eruptive solar events – caused geomagnetic disturbances over Hungary during the maximum of the solar cycle 24: A case study // Adv. Space Res. 2018. V. 61. Iss. 5. P. 1230–1243. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.12.021>
10. Burns A.G., Solomon S.C., Wang W. et al. The ionospheric and thermospheric response to CMEs: Challenges and successes // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2007. V. 69. P. 77–85.
11. Qiu N., Chen Y.H., Wang W.B. et al. Statistical analysis of the ionosphere response to the CIR and CME in



- Mid-latitude regions // Chinese J. Geophysics- Chinese Edition. 2015. V. 58. Iss. 7. P. 2250–2262.
12. Рубцов А.В., Малецкий Б.М., Данильчук Е.И. и др. Возмущения ионосферы над Восточной Сибирью во время геомагнитных бурь 12–15 апреля 2016 г. // Солнечно-земная физика. 2020. № 1. С. 75–85.
  13. Sheiner O.A., Fridman V.M., Krupenya N.D. et al. Effect of solar activity on the Earth' environment // Proc. Second Solar Cycle and Space Weather Euroconference. ESA SP-477. 24–29 September 2001. Vico Equense, Italy. Huguetta Sawaya-Lacoste (ed.). 2002. P. 479–481.
  14. Vybornov F.I., Sheiner O.A. Coronal mass ejections and high-speed solar wind streams effect on HF ionospheric communication channel // J. Physics: Conf. Series. 2021. V. 2131. Iss. 5. Art.ID. 052096. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/5/052096>
  15. Урядов В.П., Вертоградов Г.Г., Выборнов Ф.И. Пассивная загоризонтная КВ-радиолокация с использованием ЛЧМ-ионозондов различной конфигурации для обнаружения и позиционирования ионосферных неоднородностей // Научные технологии. 2022. Т. 23. № 5. С. 25–33. <https://doi.org/10.18127/j19998465-202205-04>
  16. Sheiner O., Rakhlin A., Fridman V. et al. New Ionospheric Index for Space Weather Services // Advances in Space Research. 2020. V. 66. Iss. 6. P. 1415–1426. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.05.022>