

УДК: 550.388

DOI: 10.26907/rwp29.2025.201-204

ИОНОСФЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ ОТ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ ПО ДАННЫМ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

А.В. Тимченко, И.А. Носиков, В.В. Носикова, М.В. Клименко

Калининградский филиал ИЗМИРАН, 420008, г. Калининград, ул. Пионерская, 61

E-mail: ianosikov@wdizmiran.ru

Аннотация. Максимум солнечной активности 25-го цикла характеризовался серией солнечных вспышек X-класса, что стало причиной экстремально сильных геомагнитных бурь в мае, августе и октябре 2024 г. В данном исследовании представлен анализ наблюдений, проведенных с помощью ионозонда «Парус-А» в обсерватории Калининградского филиала ИЗМИРАН, во время сильных геомагнитных бурь 2024 г. Интерпретация амплитудно-высотных карт позволила выявить основные ионосферные эффекты и аномалии в суточных вариациях ионосферных слоев.

Ключевые слова: радиозондирование, ионосфера, ионозонд, геомагнитная буря.

IONOSPHERIC EFFECTS OF GEOMAGNETIC STORMS FROM VERTICAL SOUNDING DATA AT THE KALININGRAD OBSERVATORY

A.V. Timchenko, I.A. Nosikov, V.V. Nosikova, M.V. Klimenko

Abstract. The peak of Solar Cycle 25 caused a series of powerful and extremely intense geomagnetic storms. X-class solar flares in May, August, and October 2024 triggered a sequence of geomagnetic disturbances. This study presents an analysis of observations obtained using the "Parus-A" ionosonde at the observatory of the West Department of IZMIRAN during the intense geomagnetic storms of 2024. The interpretation of amplitude-height maps revealed key ionospheric effects and anomalies in the diurnal variations of ionospheric layers.

Keywords: radio sounding, ionosphere, ionosonde, geomagnetic storm.

Введение

Одним из способов наглядного представления данных радиозондирования является построение амплитудных, высотных и частотных характеристик сигнала как функций времени наблюдения, а именно А-, Н- и F-карт. Такое представление позволяет анализировать динамику ионосферы, включая эффекты перемещающихся ионосферных возмущений [1]. В данной работе исследуются ионосферные эффекты геомагнитных бурь 10–12 мая (буря «Дня Победы»), 12–13 августа, 10–11 октября 2024 г. на основе данных вертикального зондирования (ВЗ) ионозонда «Парус-А» в обсерватории Калининградского филиала ИЗМИРАН [2]. На рисунке 1 представлены высотные (Н) карты ионосферных слоев Е и F для соответствующих временных промежутков. На высотных картах по оси абсцисс отложено время, с шагом 15 минут, по оси ординат – частота, МГц. Цветом обозначается виртуальная высота принятого сигнала ионозондом в км.

Геомагнитная буря «Дня Победы» 10–12 мая 2024 г.

Мощная геомагнитная буря 10 – 11 мая 2024 г. была вызвана серией солнечных вспышек класса X, включая вспышку X5.8 8 мая и X2.3 9 мая, сопровождавшихся выбросами корональной массы. Пик бури пришелся на 10 мая в 18:00 UT, когда индекс К_p достиг 8, а Dst-индекс опустился до –406 нТл. Это привело к необычно широкому распространению авроральных явлений, которые наблюдались вплоть до экваториальных широт. В обсерватории КФ ИЗМИРАН комплексный мониторинг с использованием ионозонда ВЗ и других приборов позволил детально зафиксировать временную динамику развития геомагнитной бури на всех ее этапах. На рисунке 1 представлены высотно-частотные (Н-) карты ионосферных областей Е и F, полученные в период с 9 по 13 мая 2024 г.

Предштормовой период 9 мая характеризовался типичными суточными вариациями ионосферных слоев. Дневные значения критических частот составляли 3.5 МГц для foE и 9 МГц для foF₂, тогда как ночное значение foF₂ не превышало 6 МГц. Важным предвестником бури стало появление спорадического слоя Es, зарегистрированное 9 мая в 19:00 UT. Начало

геомагнитной бури было зафиксировано ионозондом обсерватории КФ ИЗМИРАН 10 мая в 18:30 UT. В течение первого часа наблюдалось резкое снижение foF2 с 8 до 4 МГц. Одновременно, начиная с 19:00 UT, отмечалось быстрое увеличение электронной концентрации в E-слое, где величина foEs превысила 8 МГц при подъеме виртуальной высоты отражения до 170 км. К 21:00 UT авроральный Es-слой полностью экранировал F-слой, что существенно изменило характер ионосферных отражений.

В последующие дни бури (11–12 мая) отражения от F-слоя практически отсутствовали, а в редких случаях регистрации foF2 не превышала 4 МГц на высотах выше 400 км. Процесс восстановления ионосферы и возврата к типичным суточным вариациям слоев E и F начался 12 мая после 10:00 UT. Последствие бури проявилось в виде серии интенсивных спорадических слоев Es, с максимальными значениями foEs, достигавшими 8 МГц 13 мая и рекордных 10 МГц 21 мая, что значительно превышает фоновые значения для данного периода.

Геомагнитная буря 12–13 августа 2024 г.

Геомагнитной буре 12–13 августа 2024 г. предшествовала серия мощных солнечных вспышек класса X, включая экстремальную вспышку X9.3, зарегистрированную 10 августа, и последующие вспышки X2.7 и X1.4 11 августа. Пик геомагнитной активности пришелся на 12 августа в 14:00 UT, вызвав геомагнитную бурю с индексом Kp = 8+ и падением Dst-индекса до значения –188 нТл.

H-карты в предбуревой период (11 августа) характеризовались наличием спорадического слоя Es со значением foEs выше 10 МГц (см. рисунок 16). Начало и развитие геомагнитной бури сопровождалось общим снижением foF2 до 6–7 МГц и ростом высоты отражения в вечерние и ночные часы до 500 км. Восстановление суточного хода параметров ионосферы началось 13 августа около 6:00 UT. Следует отметить последствие геомагнитной бури, проявившееся 14 августа в виде уменьшения электронной концентрации в F-области.

Геомагнитная буря 10–11 октября 2024 г.

Геомагнитная буря 10–11 октября 2024 г. была вызвана солнечной вспышкой X1.8 и связанных с ней скоростных корональных выбросов. Главная фаза бури протекала в ночь с 10 на 11 октября, когда значение Dst-индекса достигло минимального значения –333 нТл, а индекс Kp достиг значения 8+.

На рисунке 1в представлены H-карты ионосферных слоев E и F за период с 10 по 12 октября. Анализ H-карт позволяет выявить следующие особенности: (1) нарушение типичного суточного хода критической частоты F2-слоя, начиная с 18:00 UT 10 октября; (2) формирование аврорального спорадического E-слоя, который частично или полностью экранировал вышележащие слои; (3) периодическую полную экранировку ВЗ в ночные часы (10–11 октября) на высотах ниже действующих высот зондирования ионозонда. Можно предположить, что в это время авроральный овал достиг широт расположения магнитно-ионосферной обсерватории КФ ИЗМИРАН, вследствие чего взаимодействия с возросшим количеством высыпающихся частиц увеличилась электронная концентрация на высотах ниже E-слоя. Нарушение суточного хода критических частот E и F слоев наблюдается вплоть до 18 часов 11 октября. Из H-карты F-слоя видно, что критическая частота сильно ниже (от 2 до 6 МГц), чем в другие дни и достигает максимума ~ в 17:00 UT.

Заключение

Анализ данных наблюдений выявил ряд ионосферных эффектов, вызванных геомагнитными бурями 2024 г. В течение всех рассматриваемых периодов наблюдалось появление спорадических и авроральных слоев Es с значениями foEs превышающими foF2. Значительные изменения были зарегистрированы в F-слое ионосферы, которые выражались в уменьшении электронной плотности и росте высоты максимума. Стоит отметить, что полное экранирование сигнала ВЗ во время геомагнитной бури предположительно связано с увеличением ионизации ниже E-слоя, переотражением и ростом поглощения сигнала.

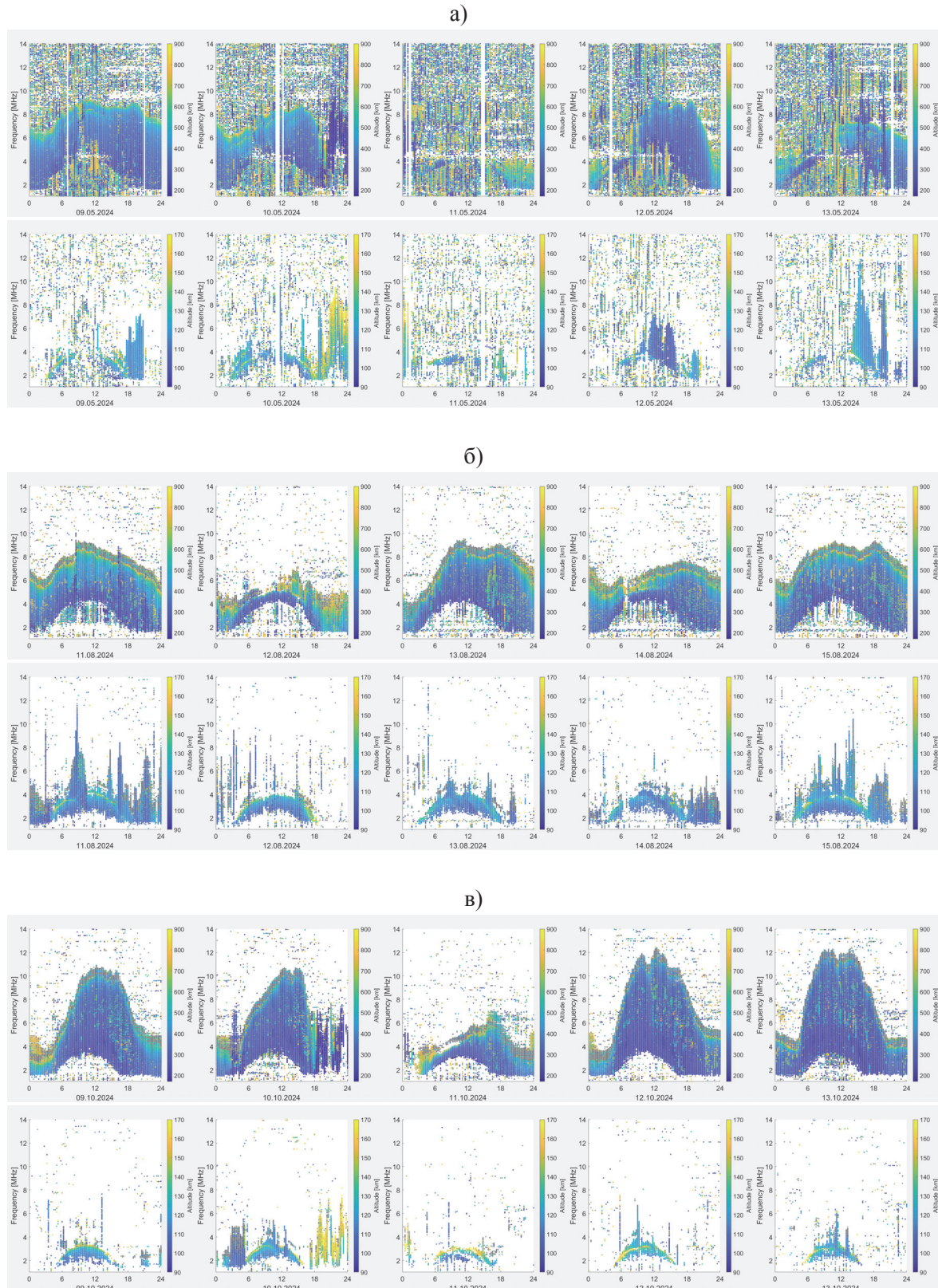


Рис. 1. Высотно-частотные (H) карты для E- и F- области ионосферы в периоды геомагнитных бурь 10 – 12 мая (а), 12 – 13 августа (б) и 10 – 11 октября (в) 2024 г. по данным ионозонда Парус-А в магнитно-ионосферной обсерватории Калининградского филиала ИЗМИРАН (54° с.ш., 20° в.д.).

Данные эффекты согласуются с общепринятыми представлениями о механизмах поведения ионосферной плазмы в возмущенных условиях. Снижение электронной концентрации в F-слое ионосферы объясняется следующими факторами: вертикальным дрейфом плазмы, изменением химического состава под воздействием выпадающих частиц из магнитосферы, перераспределением плазмы ветровыми потоками. В указанные периоды наблюдались «отрицательные ионосферные бури», для которых характерны пониженная электронная концентрация на высотах F-области, свечение верхней атмосферы и ухудшение условий радиосвязи.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-77-10004, <https://rscf.ru/project/23-77-10004/>.

Список литературы

1. Yusupov K. M. et al. Amplitude variations of the reflected signal during vertical sounding of the ionosphere at middle latitudes // Solar-Terrestrial Physics. – 2020. – Vol. 6. – No 3. – P. 72–80. DOI: 10.12737/stp-63202010.
2. Chernyshov A. A., et al. Effects in the upper atmosphere and ionosphere in the subauroral region during Victory Day 2024 Geomagnetic Storm (May 10-12, 2024) // Advances in Space Research. – 2025. DOI: 10.1016/j.asr.2025.02.015.
3. Danilchuk E. et al. Impact of the May 2024 Extreme Geomagnetic Storm on the Ionosphere and GNSS Positioning // Remote Sensing. – 2025. – Vol. 17. – No. 9. – P. 1492.