Эффекты воздействия магнитных бурь и рентгеновских солнечных вспышек на ионосферу по данным, полученным с помощью программы для интерактивной обработки ионограмм IonoView

С. А. Серебренникова [1], В. А. Иванова [1], А. В. Подлесный [1], М. В. Цедрик [1], А. И. Поддельский [2], А. Ю. Белинская [3]

[1] *Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, 664033, Россия*
E-mail: sova@mail.iszf.irk.ru

[2] *Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Паратунка, Камчатский край, 684034, Россия*
E-mail: podd-igor@yandex.ru

[3] *Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН Новосибирск, 630090, Россия*
E-mail: belinskayaay@ipgg.sbras.ru

В исследовании рассмотрены эффекты воздействия на ионосферу четырёх гелиогеофизических событий: слабой магнитной бури 19 ноября 2023 г., умеренной магнитной бури 20–21 ноября 2023 г. и двух рентгеновских солнечных вспышек, произошедших 6 и 12 февраля 2024 г. В период воздействия на ионосферу магнитных бурь для двух трасс наклонного зондирования: Норильск – Торы и Магадан – Торы — с помощью программы IonoView были получены и проанализированы значения максимально наблюдаемой частоты. Во время главной и восстановительной фазы умеренной магнитной бури 20–21 ноября 2023 г. было зарегистрировано отрицательное ионосферное возмущение продолжительностью более 12 ч, которое проявилось в снижении максимально наблюдаемой частоты ионосферного радиоканала на величину до 5 МГц. Для слабой магнитной бури 19 ноября 2023 г. величина снижения достигала 3 МГц. В период воздействия рентгеновских солнечных вспышек М-класса, произошедших 6 и 12 февраля 2024 г., были получены и проанализированы значения наинизшей наблюдаемой частоты для трасс наклонного зондирования и минимальной частоты (F_{min}) для вертикального зондирования в пос. Торы (Бурятия). Во время действия вспышек наблюдалось увеличение наинизшей наблюдаемой частоты на величину до 4 МГц относительно спокойных условий и увеличение значений F_{min} до 1 МГц.

Ключевые слова: ионограмма, ионозонд, магнитная буря, рентгеновская солнечная вспышка, программа IonoView

Одобрена к печати: 21.07.2025
DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-411-421

Введение

Ионосфера Земли является средой распространения сигналов спутниковых систем, радаров, систем дальней радиосвязи и прочих систем, использующих в своей работе явление распространения радиоволн в околоземной космической среде. Ионосфера обладает существенной динамичностью, оказывающей влияние на радиофизические параметры распространяющихся в ней сигналов. По этой причине необходимо развивать средства диагностики и мониторинга параметров ионосферы. Одним из самых распространённых средств диагностики ионосферы является ионозонд. Исследования ионосферы Земли с помощью ионозондов позволяют получать сведения о текущем состоянии ионосферы и накапливать статистические данные для построения и улучшения моделей прогноза параметров ионосферы.

Первичные данные наблюдений ионозондов представляются в виде ионограмм. Ионограмма или высотно-частотная характеристика — это один из самых распространённых

источников информации об ионосфере, представляющий собой график зависимости действующей высоты от частоты радиосигнала, отражённого от ионосферы. Интересующие исследователей величины действующих высот (обозначаемые как h′E, h′F и h′F2 и т. д.) и критические частоты (обозначаемые как foE, foF1 и foF2 и т. д.) для каждого слоя ионосферы, как правило, определяются из ионограмм в интерактивном режиме с помощью специальных компьютерных программ.

Работа ионозонда в режиме мониторинга подразумевает регулярное получение всех стандартных параметров через промежутки времени, которые равны, как правило, 15 мин. Работа в таком режиме позволяет накапливать длинные комплементарные ряды однородных данных и исследовать процессы с характерными временами протекания более получаса. Алгоритмы обработки ионограмм в таком режиме хорошо стандартизированы и описаны в международных и отечественных руководствах по обработке ионограмм. Программное обеспечение (ПО) таких ионозондов также рассчитано на то, что у оператора имеется несколько минут для обработки каждой из ионограмм. Типичными представителями такого ПО являются, например, комплекс обработки данных ионозондов DPS-4 (*англ*. Digital Portable Sounder) SAO Explorer (Технологии интерактивного масштабирования ионограмм, https://ulcar.uml.edu/SAO), CADI (*англ*. Canadian Advanced Digital Ionosonde) (Канадские передовые технологии цифрового ионозондирования, https://sil.sk.ca/content/cadi) и ионозонда «Парус-А» (Комплекс обработки ионограмм) (https://izmiran.ru/ionosphere/parus/?LANG=ru) (Гивишвили и др., 2015; Литвинов и др., 2022).

Когда возникает необходимость исследовать быстрые динамические процессы, протекающие в ионосфере, интервалы между сеансами зондирования сокращают до минут и даже секунд.

В институте солнечно-земной физики СО РАН (ИСЗФ СО РАН) активно развивается исследовательская сеть ионозондов, использующих сигналы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ-ионозондов). Сеть работает в учащённом режиме, поэтому интервал между ионограммами меньше минуты. Это делает проблему обработки потока ионограмм очень острой, предъявляющей высокие требования к производительности, надёжности и удобству специализированных средств обработки и анализа. Ещё одна проблема состоит в том, что набор стандартных параметров часто не отвечает требованиям проводимых исследований из-за относительно медленной изменчивости этих параметров на коротких промежутках времени, что влечёт за собой необходимость обеспечения возможности получения нестандартных характеристик с ионограммы. Например, такими характеристиками могут быть наличие и длительность существования петлеобразных следов на ионограммах вертикального зондирования (ВЗ), которые исследовались в работе (Куркин и др., 2014).

Учитывая кратное увеличение объёма данных при работе в учащённых режимах, исследователи чаще всего фокусируются на получении временных ходов одного-двух самых важных параметров с каждой из ионограмм. Поэтому ПО, создаваемое специально для обработки данных таких измерений, достаточно сильно отличается по функционалу и алгоритмам работы от программного обеспечения для обработки данных, полученных в мониторинговом режиме.

Одним из примеров такого специального ПО для быстрого получения одной характеристики с каждой из ионограмм в интерактивном режиме представляется просмотрщик CIV (*англ*. Cool Ionogramm Viewer), скриншот интерфейса которого представлен на *рис. 1* (см. с. 413). Программа CIV была разработана в начале 2000-х гг. в ИСЗФ СО РАН для работы с данными ЛЧМ-ионозондов ИСЗФ СО РАН в формате .dat (Ким, Матюшонок, 2006). Основная задача CIV заключается в отображении ионограммы с сопутствующей информацией и предоставление пользователю возможности выгрузить в текстовый файл координаты клика мыши по ионограмме. Разработка CIV остановилась в 2008 г., также был утерян исходный код, поэтому, несмотря на активное использование, программа на данный момент не вполне соответствует многим требованиям научных задач. Как следствие, были инициированы работы по написанию ПО со схожим функционалом для специализированной обработки ионограмм, получаемых на сети ЛЧМ-зондирования ИСЗФ СО РАН.

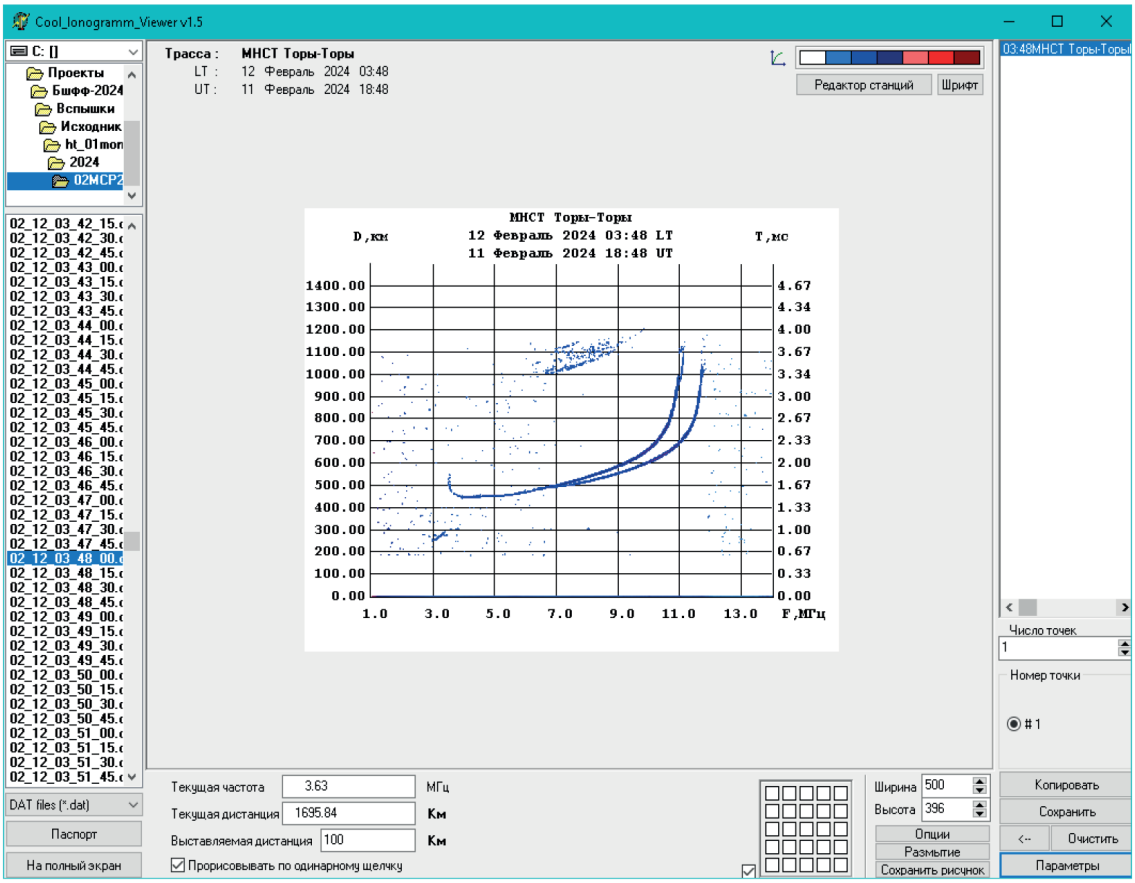

Рис. 1. Скриншот пользовательского интерфейса программы CIV

Цель работы — представление результатов использования нового инструмента интерактивной обработки ионограмм — программы IonoView — на данных, полученных в учащённом режиме в период воздействия на ионосферу различных гелиогеофизических событий.

О программе IonoView

Программа IonoView предназначена для работы с данными сети ЛЧМ-зондирования ИСЗФ СО РАН и представляет собой графический интерфейс отображения и анализа ионограмм в интерактивном режиме путём расстановки меток. Данная программа была разработана на основе опыта, полученного при использовании программы CIV, поэтому базовые функции и компоновка интерфейса у них похожи. Скриншот пользовательского интерфейса программы представлен на *рис. 2* и *3* (см. с. 414).

Главный элемент интерфейса IonoView — изображение ионограммы в рабочем окне в виде двумерной цветовой карты. Параметры изображения, в том числе масштабирование и сдвиг ионограммы, могут настраиваться оператором для более наглядного представления данных и облегчения работы. По горизонтальной оси отложена частота зондирования, по вертикальной — эффективная высота или групповой путь (задержка распространения).

На панели слева сверху находится файловый менеджер, под ним — набор управляющих элементов для настройки параметров визуализации ионограммы. Там же расположена кнопка сохранения изображения ионограммы в файл.

На панели справа сверху отображается информация об открытой ионограмме. Ниже находится текстовое поле для работы с метками. В текстовом поле выводятся настраиваемые параметры меток. Под текстовым полем находится группа кнопок для сохранения, загрузки, удаления и очистки списка меток.

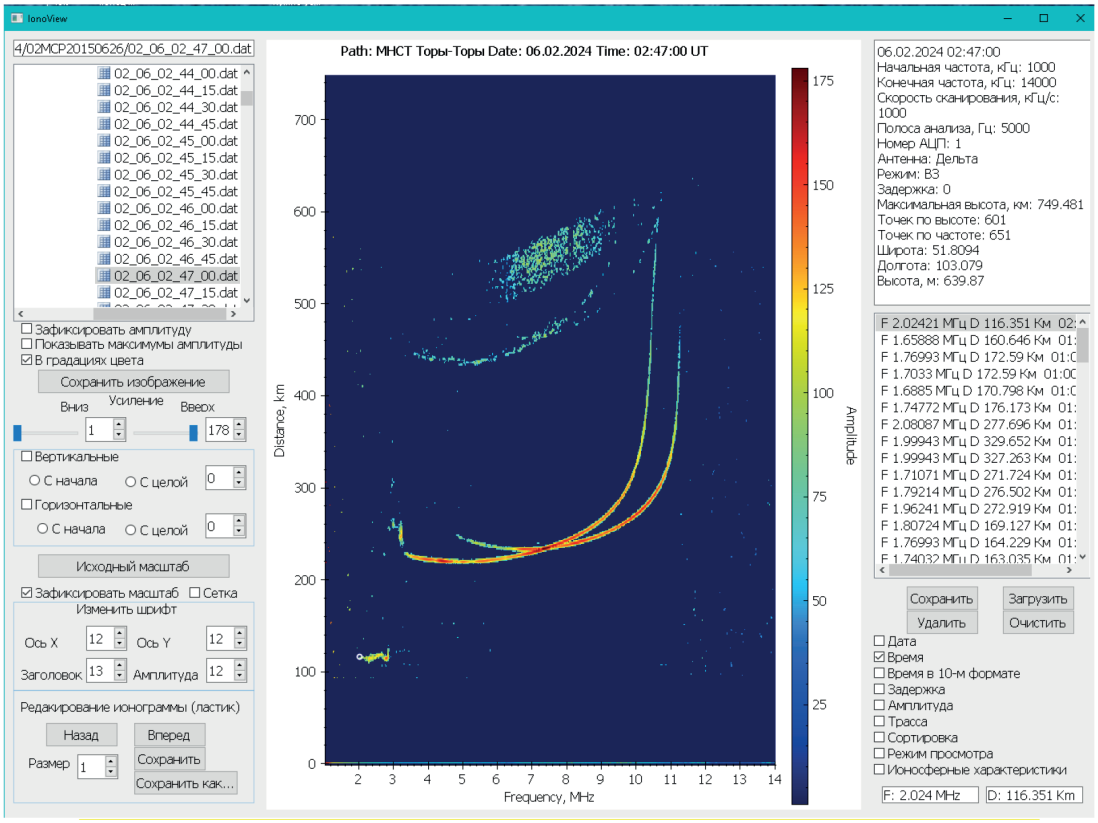

Рис. 2. Скриншот пользовательского интерфейса программы IonoView в режиме вертикального зондирования на трассе Торы – Торы

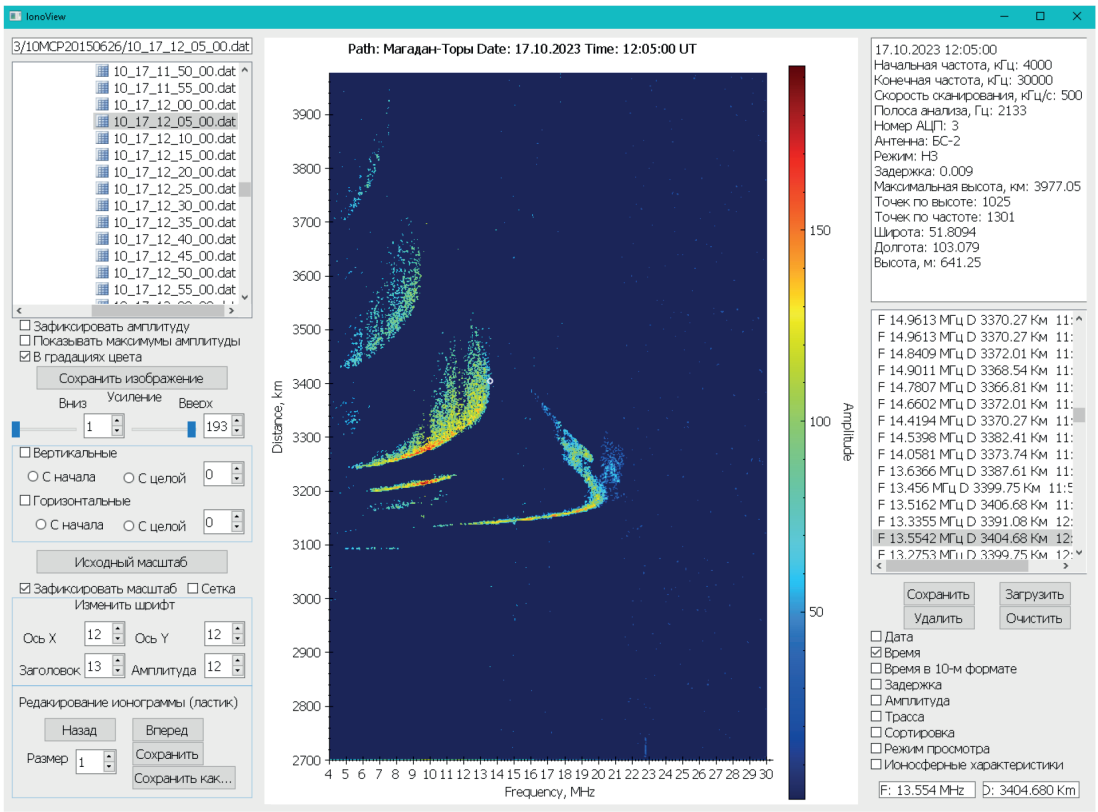

Рис. 3. Скриншот пользовательского интерфейса программы IonoView в режиме наклонного зондирования на трассе Магадан – Торы

Кроме реализации всех базовых функций программы CIV в IonoView было добавлено отображение меток поверх ионограммы, а также возможность не только выгрузить, но и загрузить ранее сохранённые метки из файла. Дополнительно добавлен режим снятия ионосферных характеристик согласно руководству по обработке ионограмм URSI (Piggott, Rawer, 1972) и улучшена совместимость с данными современных цифровых ионозондов из состава сети ЛЧМ-зондирования ИСЗФ СО РАН.

Эффекты воздействия на ионосферу магнитных бурь

Для исследования влияния магнитных бурь на условия прохождения коротковолнового диапазона радиоволн с помощью программы IonoView были получены ряды значений максимальной наблюдаемой частоты (МНЧ) на двух трассах наклонного зондирования (НЗ). Обработка ионограмм производилась в соответствии с руководством по ионосферным, магнитным и гелиогеофизическим наблюдениям (http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/img-16688.pdf).

Были обработаны данные двух трасс НЗ Норильск – Торы и Магадан – Торы за период с 17 по 22 октября 2023 г. Координаты станции Норильск — 69,2° с. ш., 88° в. д.; координаты станции Торы — 51,8° с. ш., 103° в. д.; протяжённость трассы Норильск – Торы 2200 км. Координаты станции Магадан — 60° с. ш., 150,7° в. д.; протяжённость трассы Магадан – Торы 3200 км. Зондирование на данных трассах проводилось в диапазоне частот 4–30 МГц со скважностью 5 мин. В рассматриваемый период наблюдались две магнитные бури: 19.10.2023 произошла слабая магнитная буря, во время главной фазы которой индекс DST (*англ.* Disturbance Storm Time) понижался до значения –38 нТ; 21.10.2023 — умеренная магнитная буря, во время главной фазы которой индекс DST опускался до значения –88 нТ.

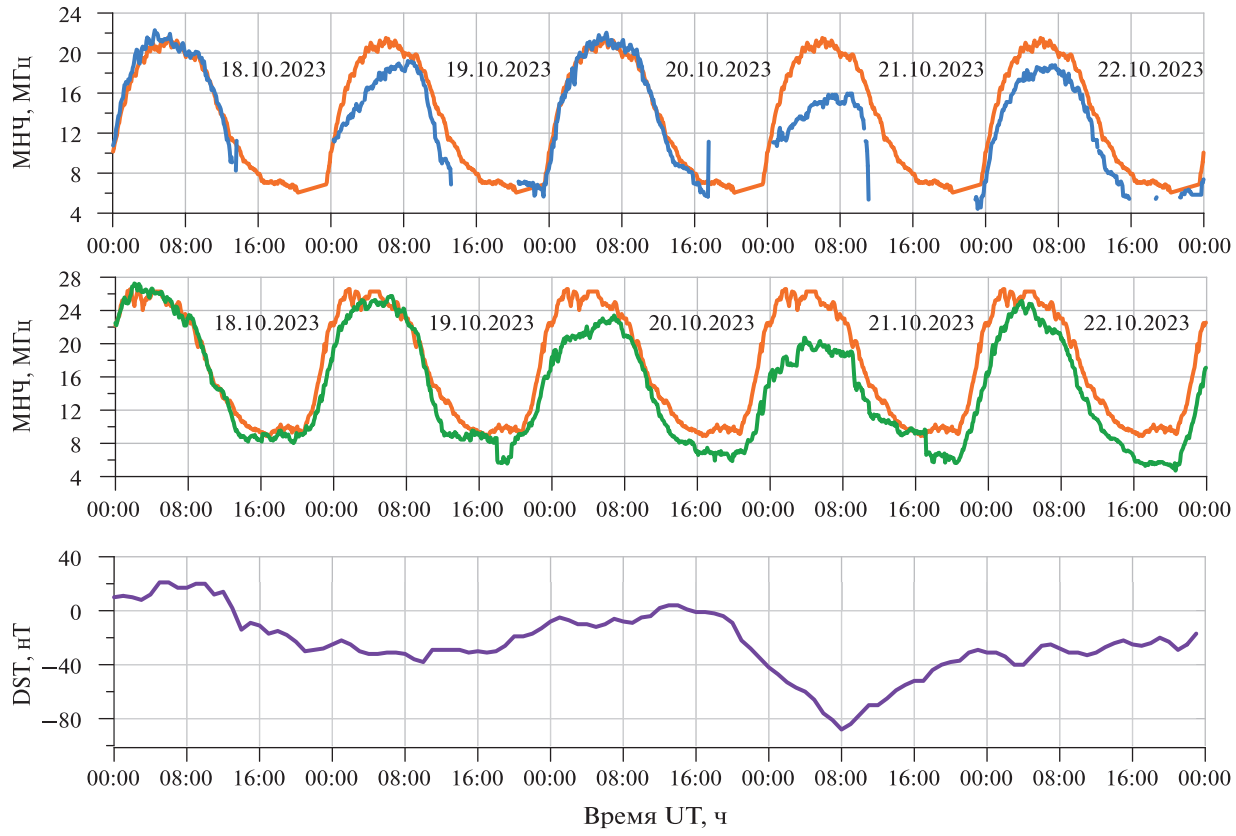

Рис. 4. Значения МНЧ на трассах радиозондирования Норильск – Торы (синий цвет) и Магадан – Торы (зелёный) с 18 по 22 октября 2023 г. Значения МНЧ в магнитоспокойный день 17.10.2023 нанесены оранжевым цветом. На нижнем графике приведены вариации индекса DST с 18 по 22 октября 2023 г.

Классификация типа бурь здесь приводится в соответствии с публикацией (Gonzalez et al., 1994). Аналогичные бури рассматривались в других работах (например, (Иванова и др., 2011; Куркин и др., 2008)). Отклики на экстремальную магнитную бурю с 10 по 19 мая 2024 г. по данным гелиогеофизического комплекса ИСЗФ СО РАН, в том числе с использованием данных ЛЧМ-зондирования, рассматривались в исследовании (Yasyukevich et al., 2025).

На *рис. 4* (см. с. 415) приведены МНЧ, полученная по результатам обработки, и DST-индекс (Мировой центр данных в Киото, Япония, http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jpl). Для облегчения визуальной оценки параметров возмущений, вызванных бурей, поверх графиков МНЧ за период с 18 по 22 октября были наложены значения МНЧ, полученные в магнитоспокойный день 17.10.2023.

Во время магнитной бури изменяется состав термосферы и системы циркуляции нейтральных ветров (Данилов, Морозова, 1985). За положительной фазой ионосферной бури следует отрицательная фаза, которая характеризуется понижением электронной концентрации в области F2 относительно медианных значений (Дёминов, 2008).

Видно, что во время слабой магнитной бури 19.10.2023 значения МНЧ были ниже значений спокойного дня 17.09.2023 на величину порядка 2 МГц, а во время умеренной магнитной бури 21.10.2023 МНЧ была ниже значений спокойного дня 17.09.2023 на величину порядка 5 МГц.

Кроме того, на трассе Норильск – Торы в период действия бурь в ночное время имеются большие разрывы в данных, что свидетельствует о значительном ухудшении условий прохождения коротковолновых радиоволн.

Эффекты воздействия на ионосферу рентгеновской солнечной вспышки 06.02.2024

Для исследования влияния на ионосферу повышенных значений потока излучения, обусловленных рентгеновской солнечной вспышкой 06.02.2024 класса M4.2, с помощью программы IonoView были получены ряды наинизшей наблюдаемой частоты (ННЧ) на трассе НЗ Магадан – Торы и минимальной частоты ионосферных отражений (F_{min}) при ВЗ в пос. Торы. Влияние солнечных вспышек на ионосферу анализировалось, например, в работах (Barta et al., 2019; Vertogradov et al., 2014).

Были обработаны данные НЗ Магадан – Торы и ВЗ в пос. Торы за период 01:00–07:00 UTC (*англ.* Coordinated Universal Time) 06.02.2024. Наклонное зондирование проводилось в диапазоне частот 4–30 МГц со скважностью 5 мин, ВЗ — в диапазоне 1–14 МГц со скважностью 15 с.

На *рис. 5* представлены полученные по результатам обработки значения ННЧ на трассе НЗ Магадан – Торы с наложенными на них значениями потока рентгеновского излучения Солнца по данным спутника GOES-16 (https://www.noaa.gov/jetstream/goes_east). Быстрые вариации ННЧ с периодами 10–30 мин связаны с воздействием перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ). В период 02:30–05:00 UT (*англ.* Universal Time) ход ННЧ повторяет ход потока рентгеновского излучения, которое вызывает рост поглощения в слое D за счёт повышения ионизации среды.

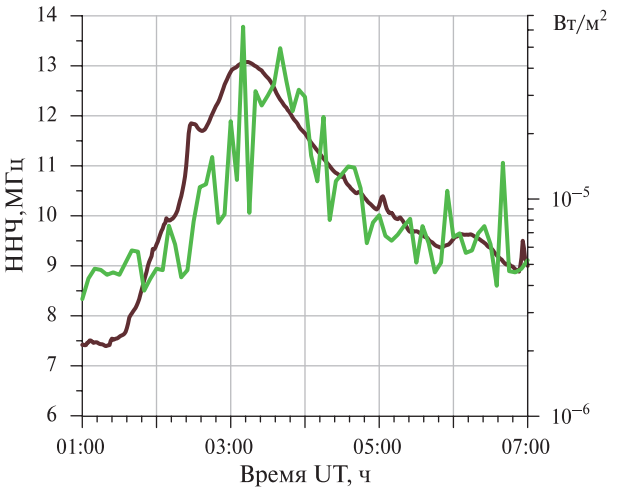

Рис. 5. Значения ННЧ на трассе НЗ Магадан – Торы (зелёный цвет) во время солнечной вспышки 6 февраля 2024 г. Бурый цвет — поток рентгеновского излучения Солнца по данным спутника GOES-16

Максимуму потока рентгеновского излучения Солнца соответствует увеличение ННЧ на 4 МГц относительно ННЧ до вспышки. Влияние вспышек на ионосферу протекает согласованно с описанной динамикой (Митра, 1977).

Отметим, что за счёт высокой скорости рекомбинации в D-слое ионосферы эффект от повышения потока рентгеновского излучения должен наблюдаться только в дневное время. Максимум потока рентгеновского излучения, вызванного вспышкой класса M4.2 06.02.2024, приходился на 03:12 UT, что соответствует 11:12 LT (*англ.* Local Time) в пос. Торы, где находится приёмник, 12:12 LT для средней точки трассы Магадан – Торы и 14:12 LT для Магадана, где находится передатчик.

Аналогичный эффект наблюдается для значений F_{min}, полученных в результате обработки данных ВЗ (пос. Торы), где также отчётливо виден рост F_{min} под воздействием вспышки. Для наглядности на *рис. 6* сопоставлены графики F_{min} и потока рентгеновского излучения Солнца. Видно, что ход графика рентгеновского излучения хорошо коррелирует с ходом значений F_{min}. Изменение поглощения в слое D вследствие воздействия потока рентгеновского излучения Солнца на нижнюю ионосферу рассматривалось, например, в работе (Иванова и др., 2013).

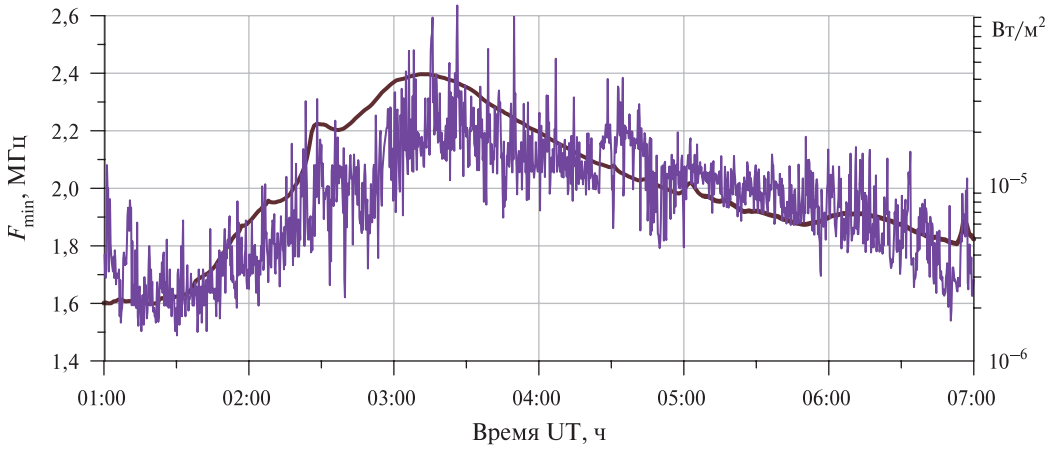

Рис. 6. Значения F_{min} по данным ВЗ пос. Торы (сиреневый цвет) 6 февраля 2024 г. Бурый цвет — поток рентгеновского излучения Солнца по данным GOES-16

Эффекты воздействия на ионосферу рентгеновской солнечной вспышки 12.02.2024

Для исследования влияния на ионосферу повышенного потока излучения, обусловленного рентгеновской солнечной вспышкой 12.02.2024 класса M6.5, с помощью программы IonoView были получены ряды ННЧ на трассах НЗ Норильск – Торы, Магадан – Торы и Новосибирск – Торы и минимальной частоты F_{min} при ВЗ в пос. Торы. Координаты станции Новосибирск — 54,85° с. ш., 83,23° в. д.; протяжённость трассы Новосибирск – Торы 1360 км.

Были обработаны данные НЗ за период 02:00–05:30 UTC и данные ВЗ за 03:30–05:00 UTC 12.02.2024. Наклонное зондирование проводилось в диапазоне частот 4–30 МГц со скважностью 5 мин, ВЗ — в диапазоне 1–14 МГц со скважностью 15 с.

Причинами возникновения вариаций ННЧ и F_{min} могут быть как изменение поглощения в нижних слоях ионосферы за счёт увеличения потока рентгеновского излучения, так и прохождение ПИВ. При этом поток солнечного рентгеновского излучения влияет одновременно на всю освещённую часть ионосферы, в то время как ПИВ, приводящие к вариациям значений ННЧ, оказывают преимущественно локальное воздействие. Поэтому вариации, вызванные рентгеновскими солнечными вспышками, проявляются на всех трассах одновременно, а вызванные прохождением ПИВ, напротив, имеют несогласованный характер.

Данный тезис хорошо иллюстрирует *рис. 7*, на котором значения ННЧ по данным НЗ наложены на значения потока рентгеновского излучения Солнца по данным спутника GOES-16. Всплеск потока рентгеновского излучения приходится на период 03:40–04:30 UT, что соответствует периоду одновременного повышения ННЧ на всех трёх трассах НЗ. Было зарегистрировано возрастание ННЧ порядка 3 МГц относительно значений до солнечной вспышки.

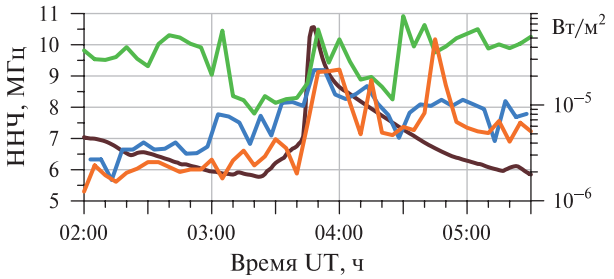

Рис. 7. Значения ННЧ на трассах НЗ Норильск – Торы (синий цвет), Магадан – Торы (зелёный) и Новосибирск – Торы (оранжевый) во время солнечной вспышки 12 февраля 2024 г. Бурый цвет — поток рентгеновского излучения Солнца по данным GOES-16

Глобальность эффектов воздействия рентгеновских солнечных вспышек на ионосферу также прослеживается и в данных ВЗ в пос. Торы. На *рис. 8* приведена F_{min} по данным ВЗ в пос. Торы во время вспышки 12.02.2024 с наложением поверх них значений потока рентгеновского излучения Солнца по данным спутника GOES-16. Данные ВЗ получены с шагом по времени в 15 с, данные по потоку рентгеновского излучения приведены с минутным интервалом. Здесь мы также наблюдаем резкий рост значений F_{min} на величину до 1 МГц под воздействием всплеска потока рентгеновского излучения Солнца и постепенный последующий спад вместе с плавным снижением значений потока рентгеновского излучения.

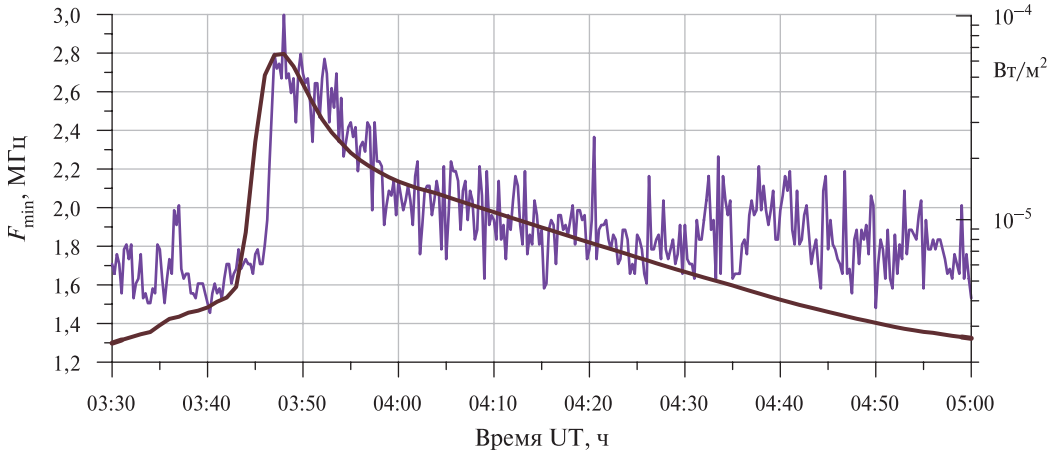

Рис. 8. Рентгеновская солнечная вспышка 12.02.2024. Значения F_{min} по данным ВЗ пос. Торы показаны сиреневым цветом. Бурый цвет — поток рентгеновского излучения Солнца по данным GOES-16

Заключение

С помощью программы IonoView в интерактивном режиме были получены значения МНЧ и ННЧ для трасс НЗ Норильск – Торы, Магадан – Торы и Новосибирск – Торы и F_{min} для ВЗ в пос. Торы. В полученных рядах данных отчётливо видны отклики ионосферы на гелиогеофизические события в виде вариаций ННЧ и МНЧ на трассах НЗ и F_{min} для ВЗ.

Амплитуда вариаций МНЧ в случае слабой магнитной бури 19.10.2023 составляла 3 МГц, умеренной магнитной бури 21.10.2023 — 5 МГц. Значения ННЧ во время рассмотренных рентгеновских солнечных вспышек увеличивались на 4 МГц, а значения F_{min} возрастали на 1 МГц.

В целом, магнитные бури часто приводят к уменьшению значений МНЧ, а рентгеновские солнечные вспышки — к увеличению значений ННЧ и F_{min}. Оба этих эффекта уменьшают доступный рабочий диапазон частот для систем связи, поэтому магнитные бури и рентгеновские солнечные вспышки являются одной из причин ухудшения условий распространения радиоволн коротковолнового диапазона, нарушая работу различных систем и вынуждая либо изменять рабочую частоту, либо увеличивать мощность передатчика.

Таким образом, использование нового инструмента интерактивной обработки ионограмм — программы IonoView — предоставляет возможность сфокусироваться на получении одной какой-либо величины (например, МНЧ, ННЧ и т. п.), что упрощает анализ данных с ионограмм НЗ и ВЗ, полученных в учащённом режиме. При этом наличие гибких настроек визуализации делает работу оператора с данными более комфортной и эффективной.

На программу IonoView получено свидетельство № 2024618431 о государственной регистрации программы для ЭВМ от 11 апреля 2024 г.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (субсидия N075-ГЗ/Ц3569/278 (ИСЗФ СО РАН)). Благодарности за предоставление данных по проекту FWZZ-2022-0019 (ИНГГ СО РАН) и всемирному центру обработки данных по геомагнетизму, расположенному в Киото (wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp).

Литература

1. *Гивишвили Г. В.*, *Крашенинников И. В.*, *Лещенко Л. Н.* Ионозонд Парус-А: новый измерительный комплекс ИЗМИРАН // Электромагнитные и плазменные процессы от недр Солнца до недр Земли. М.: ИЗМИРАН, 2015. С. 150–159.
2. *Данилов А. Д.*, *Морозова А. Д.* Ионосферные бури в области F2. Морфология и физика // Геомагнетизм и аэрономия. 1985. Т. 25. № 5. С. 705–721.
3. *Дёминов М. Г.* Ионосфера Земли // Плазменная гелиогеофизика / под ред. Л. М. Зеленого, И. С. Веселовского. Т. 2. М.: Физматлит, 2008. С. 92–163.
4. *Иванова В. А.*, *Полех Н. И.*, *Ратовский К. Г.*, *Иванов Д. В.* Исследование ионосферных откликов на магнитные бури в зависимости от местного времени начала главной фазы бури // Солнечно-земная физика. 2011. Вып. 18. Т. 2. С. 146–149.
5. *Иванова В. А.*, *Полех Н. И.*, *Куркин В. И.*, *Чистякова Л. В.*, *Пежемская М. Д.*, *Брынько И. Г.*, *Орлов А. И.*, *Подлесный А. В.*, *Думбрава З. Ф.*, *Поддельский И. Н.* Отклик характеристик распространения КВ-радиоволн на вариации рентгеновского излучения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 4. С. 154–160.
6. *Ким А. Г.*, *Матюшонок С. М.* Структура и формат данных Иркутского ЛЧМ-ионозонда // Солнечно-земная физика: сб. науч. тр. Вып. 9. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. С. 16–20.
7. *Куркин В. И.*, *Полех Н. И.*, *Пирог О. М.*, *Мошкова В. А.*, *Поддельский И. Н.* Ионосферные возмущения в годы минимума солнечной активности и их влияние на распространение КВ-радиоволн // Солнечно-земная физика. 2008. Вып. 12. Т. 2. С. 242–245.
8. *Куркин В. И.*, *Ларюнин О. А.*, *Подлесный А. В.*, *Пежемская М. Д.*, *Чистякова Л. В.* Морфологические особенности признаков перемещающихся ионосферных неоднородностей по данным слабонаклонного зондирования ионосферы // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 2. С. 158–163.
9. *Литвинов С. В.*, *Глинкин И. А.*, *Власов Ю. М.* Приемник ионозонда Парус-А: принцип работы и возможные пути модернизации // Материалы Всероссийской открытой науч. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн». Всероссийские открытые Армандовские чтения. 2022. С. 437–446. DOI: 10.24412/2304-0297-2022-1-437-446.
10. *Митра А.* Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли: учеб. для вузов. М.: Мир, 1977. 370 с.
11. *Barta V.*, *Sátori G.*, *Berényi K. A. et al.* Effects of solar flares on the ionosphere as shown by the dynamics of ionograms recorded in Europe and South Africa // Annales Geophysicae. 2019. V. 37. No. 4. P. 747–761. DOI: 10.5194/angeo-37-747-2019.
12. *Gonzalez W. D.*, *Joselyn J. A.*, *Kamide Y. et al.* What is geomagnetic storm? // J. Geophysical Research: Space Physics. 1994. V. 99. No. A4. P. 5771–5792. DOI: 10.1029/93ja02867.
13. *Piggott W. R.*, *Rawer K.* U. R. S. I. handbook of ionogram interpretation and reduction. Warsaw, Poland: World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics, 1972. 155 p.

14. *Vertogradov V. V.*, *Vertogradova E. G.*, *Uryadov V. P.* Ionospheric effects of the X-ray flares of September 24, 2011 according to oblique sounding data // Radiophysics and Quantum Electronics. 2014. V. 57. No. 5. P. 326–335. DOI: 10.1007/s11141-014-9516-7.
15. *Yasyukevich Yu. V.*, *Vasiliev R. V.*, *Rubtsov A. V. et al.* Extreme magnetic storm of May 10–19, 2024: Coupling between neutral and charged components of the upper atmosphere and the effect on radio systems // Doklady Earth Science. 2025. V. 520. Article 33. DOI: 10.1134/S1028334X24604978.

Effects of magnetic storms and X-ray solar flares on the ionosphere, according to data obtained using the IonoView program for interactive ionogram processing

S. A. Serebrennikova [1], V. A. Ivanova [1], A. V. Podlesnyi [1], M. V. Cedrik [1], A. I. Poddelsky [2], A. Yu. Belinskaya [3]

[1] *Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk 664033, Russia*
E-mail: sova@mail.iszf.irk.ru
[2] *Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS Paratunka, Kamchatka Krai 684034, Russia*
E-mail: podd-igor@yandex.ru
[3] *Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS Novosibirsk 630090, Russia*
E-mail: belinskayaay@ipgg.sbras.ru

This study examines the effects of four heliogeophysical events on the ionosphere: a weak magnetic storm on November 19, 2023, a moderate magnetic storm on November 20–21, 2023, and two X-ray solar flares on February 6 and 12, 2024, illustrated by the results obtained using the IonoView chirp ionosonde network interactive data processing program. The IonoView program is designed to work with data from the chirp sensing network and has a graphical interface for displaying, analyzing and processing ionograms interactively by placing labels. During the period of exposure of the ionosphere to the magnetic storms, the values of maximum observed frequency (MOF) were obtained and analyzed using the IonoView program for two oblique incidence sounding (OIS) paths: Norilsk–Tory and Magadan–Tory. During the main phase of the storm and the recovery phase of the moderate magnetic storm on November 20–21, 2023, a negative ionospheric disturbance lasting more than 12 hours was recorded, which manifested itself in a decrease in the MOF by up to 5 and up to 3 MHz in the case of a weak magnetic storm on November 19, 2023. During the period of exposure to X-ray solar flares of the M class on February 6 and 12, 2024, the values of the lowest observed frequency (LOF) for the OIS paths and the minimum frequency (F_{min}) for vertical sounding (VS) in the point were obtained and analyzed in Tory (Buryatia). During the action of the flares, there was an increase in LOF by up to 4 MHz relative to quiet conditions and an increase in F_{min} values by up to 1 MHz.

Keywords: ionogram, ionosonde, magnetic storm, X-ray solar flare, IonoView program

The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (subsidy N075-GZ/Ts3569/278 (ISSF SB RAS)). Thanks for providing data under the FWZZ-2022-0019 project (INGG SB RAS) and World Data Center for Geomagnetism in Kyoto.

Accepted: 21.07.2025
DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-411-421

References

1. Givishvili G. V., Krasheninnikov I. V., Leschenko L. N., Ionosonde Parus-A: New ionospheric metering complex IZMIRAN, In: *Ehlektromagnitnye i plazmennye protsessy ot nedr Solntsa do nedr Zemli* (Electromagnetic and plasma processes from the depths of the Sun to the depths of the Earth), Moscow: IZMIRAN, 2015, pp. 150–159 (in Russian).
2. Danilov A. D., Morozova A. D., Ionospheric storms in the F2 region. Morphology and physics, *Geomagnetism and aeronomy*, 1985, V. 25, No. 5, pp. 705–721 (in Russian).
3. Deminov M. G., Ionosphere of the Earth, In: *Plazmennaya geliogeofizika* (Plasma heliogeophysics), L. M. Zeleny, I. S. Veselovsky (eds.), V. 2, Moscow: Fizmatlit, 2008, pp. 92–163 (in Russian).
4. Ivanova V. A., Polekh N. M., Ratovsky K. G., Ivanov D. V., Studying ionospheric responses to magnetic storms depending on the local time of the storm main phase onset, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2011, V. 51, pp. 1105–1108, DOI: 10.1134/S0016793211080202.
5. Ivanova V. A., Polekh N. M., Kurkin V. I., Chistyakova L. V., Pezhemskaya M. D., Brynko I. G., Orlov A. I., Podlesny A. V., Dumbrava Z. P., Poddelsky I. N., Response of the HF radio wave propagation characteristics to the X-ray flux variations, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, V. 10, No. 4, pp. 154–160 (in Russian).
6. Kim A. G., Matyushonok S. M., Structure and format of Irkutsk FMCW-ionosonde data, In: *Solnechno-zemnaya fizika: sbornik nauchnykh trudov*, Iss. 9, Novosibirsk: Izd. SB RAS, 2006, pp. 16–20 (in Russian).
7. Kurkin V. I., Polekh N. I., Pirog O. M. et al., Ionospheric disturbances in the years of solar activity minimum and their influence on HF radiowave propagation, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2010, V. 49, pp. 1249–1253, DOI: 10.1134/S0016793209080428.
8. Kurkin V. I., Laryunin O. A., Podlesny A. V., Pezhemskaya M. D., Chistyakova L. V., Studying morphological characteristics of travelling ionospheric disturbances with the use of near-vertical ionospheric sounding data, *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2014, V. 27, pp. 303–309.
9. Litvinov S. V., Glinkin I. A., Vlasov Yu. M., Receiver of the ionosonde Parus-A: The principle of operation and the possibility of modernization, *Materialy Vserossiiskoi otkrytoi nauchnoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya*, *radiolokatsii*, *rasprostraneniya i difraktsii voln"*, *Vserossiiskie otkrytye Armandovskie chteniya* (Proc. All-Russia Open Scientific Conf. "Current Problems of Remote Sensing, Radar, Wave Propagation and Diffraction". All-Russia Open Armandov Readings), 2022, pp. 437–446 (in Russian), DOI: 10.24412/2304-0297-2022-1-437-446.
10. Mitra A. P., *Vozdeistvie solnechnykh vspyshek na ionosferu Zemli: ucheb. dlya vuzov* (Ionospheric effects of solar flares: textbook for universities), Moscow: Mir, 1977, 370 p. (in Russian).
11. Barta V., Sátori G., Berényi K. A. et al., Effects of solar flares on the ionosphere as shown by the dynamics of ionograms recorded in Europe and South Africa, *Annales Geophysicae*, 2019, V. 37, No. 4, pp. 747–761, DOI: 10.5194/angeo-37-747-2019.
12. Gonzalez W. D., Joselyn J. A., Kamide Y. et al., What is geomagnetic storm?, *J. Geophysical Research: Space Physics*, 1994, V. 99, No. A4, pp. 5771–5792, DOI: 10.1029/93ja02867.
13. Piggott W. R., Rawer K., *U. R. S. I. handbook of ionogram interpretation and reduction*, Warsaw, Poland: World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics, 1972, 155 p.
14. Vertogradov V. V., Vertogradova E. G., Uryadov V. P., Ionospheric effects of the X-ray flares of September 24, 2011 according to oblique sounding data, *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2014, V. 57, No. 5, pp. 326–335, DOI: 10.1007/s11141-014-9516-7.
15. Yasyukevich Yu. V., Vasiliev R. V., Rubtsov A. V. et al., Extreme magnetic storm of May 10–19, 2024: Coupling between neutral and charged components of the upper atmosphere and the effect on radio systems, *Doklady Earth Science*, 2025, V. 520, Article 33, DOI: 10.1134/S1028334X24604978.