

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ МАГНИТНОЙ БУРИ 10–13 МАЯ 2024 ГОДА В АЗИАТСКОМ РЕГИОНЕ РОССИИ ПО ДАННЫМ ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ НЕПРЕРЫВНЫМ ЛЧМ-СИГНАЛОМ

С.Н. Пономарчук<sup>1</sup>, Н.А. Золотухина<sup>1</sup>, В.И. Куркин<sup>1</sup>, А.Ю. Белинская<sup>2</sup>, В.П. Гроздов<sup>1</sup>,  
А.В. Ойнац<sup>1</sup>, А.И. Поддельский<sup>3</sup>, А.В. Подлесный<sup>1</sup>, М.В. Цедрик<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126A  
E-mail: spon@iszf.irk.ru, zolot@iszf.irk.ru, grozov@iszf.irk.ru, kurkin@iszf.irk.ru, oinats@iszf.irk.ru,  
pav@iszf.irk.ru, mark7cedrick@gmail.com

<sup>2</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, г.  
Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3  
E-mail: belinskayaay@ipgg.sbras.ru

<sup>3</sup>Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, 684034  
Камчатский край, Елизовский район, с. Паратунка, ул. Мирная, д.7  
E-mail: podd-igor@yandex.ru

**Аннотация.** Исследованы эффекты экстремальной магнитной бури 10–13 мая 2024 года в азиатском регионе России на основе экспериментальных данных вертикального и наклонного зондирования ионосферы непрерывным ЛЧМ – сигналом. Выявлены особенности ионосферных возмущений, вызванные магнитной бурей: длительное отрицательное ионосферное возмущение, проявившееся в значительном уменьшении критических частот слоя F2 и максимальных наблюдаемых частот радиотрасс; экранировка отражений от F – области ионосферы спорадическим слоем Es и увеличенное поглощение КВ сигналов; появление Es аврорального и косого типов; развитие продолжительного G – эффекта в дневные часы местного времени, при котором критическая частота F1 – слоя превышала критическую частоту F2 – слоя; сумеречный эффект повышения электронной концентрации и высоты максимума слоя F2. Установлена связь вариаций ионосферных параметров и максимальных наблюдаемых частот модов распространения КВ радиоволн с пространственным положением главного ионосферного провала и экваториальной границы зоны диффузных высыпаний электронов.

**Ключевые слова:** магнитная буря; ионосферные возмущения; распространение радиоволн; магнитосфера; высокоширотная ионосфера; зондирование ионосферы; главный ионосферный провал; диффузные высыпания электронов

## INVESTIGATION INTO THE EFFECTS OF MAGNETIC STORM ON MAY 10–13, 2024 IN THE ASIAN REGION OF RUSSIA FROM DATA OF IONOSPHERIC SOUNDING WITH A CONTINUOUS CHIRP SIGNAL

S.N. Ponomarchuk, N.A. Zolotukhina, V.I. Kurkin, A.Yu. Belinskaya, V.P. Grozov, A.V. Oinats,  
A.I. Poddelsky, A.V. Podlesnyi, M.V. Cedrik

**Abstract.** The effects of an extreme magnetic storm on May 10–13, 2024 in the Asian region of Russia were studied on the basis of experimental data from vertical and oblique sounding of the ionosphere with a continuous chirp signal. Features of ionospheric disturbances induced by the magnetic storm were revealed: the long-lasting negative ionospheric disturbance that manifested as a significant decrease in F2-layer critical frequencies and maximum observed frequencies of radio paths; the absence of HF signal reflections from F-region due to sporadic Es-layer and increased absorption of HF signals; occurrence of auroral and oblique Es layers; development of the long-lasting G-effect during local daytime, at which the F1-layer critical frequency exceeded the F2-layer critical frequency; the dusk enhancement of electron density and F2-layer peak height. We found a correlation of variations in ionospheric parameters and the maximum observed frequencies of HF radio wave propagation modes with spatial location of the main ionospheric trough and the equatorial boundary of the diffuse electron precipitation zone.

**Keywords:** magnetic storm; ionospheric disturbances; radio wave propagation; magnetosphere; high latitude ionosphere; ionospheric sounding; main ionospheric trough; diffuse electron precipitation

### Введение

Начавшаяся 10 мая 2024 г. магнитная буря с минимумом Dst = -406 нТл и максимумом Kp=9 является “великой” по критерию Dst ≤ -350 нТл и экстремальной по критерию Kp = 9.

Такие бури очень редки. Они составляют менее 1% от обнаруженных магнитных бурь. По этой причине исследование возмущений магнитосферно–ионосферной системы во время каждой из них важно как с практической, так и с научной точки зрения для понимания физических процессов в околоземном космическом пространстве во время «великих» бурь. В докладе представлены результаты исследования эффектов магнитной бури 10–13 мая 2024 года в азиатском регионе России на основе анализа данных вертикального и наклонного зондирования ионосферы непрерывным ЛЧМ – сигналом [1] с привлечением эмпирических моделей инвариантных широт дна ГИП [2] и экваториальной границы зоны диффузных высыпаний (ГДВ) электронов с энергией  $\geq 100$  эВ [3], а также напряженности поля магнитосферной конвекции  $E_c$  [4]. Использовались также данные по пространственному распределению полного электронного содержания (ПЭС) и спутниковые данные DMSP.

### Цель работы

Исследование проявления магнитосферно-ионосферного взаимодействия в период «великой» магнитной бури 10–13 мая 2024 года в данных зондирования ионосферы в азиатском регионе России.

### Решаемые задачи

Изучение влияния ионосферных возмущений от экстремальной магнитной бури на условия распространения КВ сигналов на основе данных вертикального и наклонного зондирования ионосферы непрерывным ЛЧМ – сигналом.

### Эксперимент и обработка данных

ИСЗФ СО РАН совместно с ИНГГ СО РАН и ИКИР ДВО РАН организован непрерывный мониторинг состояния ионосферы по данным вертикального, слабонаклонного и наклонного зондирования (ВЗ, СНЗ и НЗ) в азиатском регионе России. Зондирование ионосферы проводится с использованием многофункционального цифрового ионозонда с непрерывным линейно частотно модулированным (ЛЧМ) сигналом, разработанного в ИСЗФ СО РАН [1]. Геометрия трасс наклонного зондирования приведена на рис. 1. Передающие пункты расположены вблизи Иркутска ( $52.88^{\circ}\text{N}$ ,  $103.26^{\circ}\text{E}$ ), Магадана ( $60^{\circ}\text{N}$ ,  $150.7^{\circ}\text{E}$ ), Хабаровска ( $47.6^{\circ}\text{N}$ ,  $134.7^{\circ}\text{E}$ ), Новосибирска ( $55^{\circ}\text{N}$ ,  $83^{\circ}\text{E}$ ) и Норильска ( $69.4^{\circ}\text{N}$ ,  $88.4^{\circ}\text{E}$ ). Приемные пункты: «Иркутск» – в пос. Торы, Бурятия ( $51.8^{\circ}\text{N}$ ,  $103^{\circ}\text{E}$ ); «Новосибирск» – вблизи Новосибирска ( $55^{\circ}\text{N}$ ,  $83^{\circ}\text{E}$ ).

Вертикальное зондирование ионосферы проводилось в пунктах «Иркутск» и «Новосибирск». По результатам обработки и интерпретации ионограмм ВЗ выделялась высотно-частотная характеристика (ВЧХ). По треку ВЧХ производился отсчет параметров ионосферы и рассчитывался высотный профиль плазменной частоты  $f_e(h)$ . На ионограмме ВЗ также выделялся трек спорадического слоя Es и определялись его параметры.

Данные НЗ получены на радиотрассах НЗ: Магадан – Иркутск (протяженность  $D = 3034$  км, долгота средней точки  $\lambda = 124.21^{\circ}\text{E}$ , инвариантная широта  $\Phi = 53.39^{\circ}$ ), Магадан – Новосибирск ( $D = 3901$  км,  $\lambda = 114.2^{\circ}\text{E}$ ,  $\Phi = 57.77^{\circ}$ ) и Новосибирск – Иркутск ( $D = 1372$  км,  $\lambda = 93.4^{\circ}\text{E}$ ,  $\Phi = 50.17^{\circ}$ ). По результатам обработки и интерпретации ионограмм НЗ строились временные зависимости максимальных наблюдаемых частот (МНЧ) модов распространения для сигналов, отраженных от E, F1 и F2 – слоев ионосферы, а также для сигналов, отраженных от слоя Es.

### Геомагнитные возмущения

В геомагнитных индексах (рис. 2) начало «великой» магнитной бури проявилось после 17:00 UT 10 мая 2024 г. в виде увеличения Dst индекса до 66 нТл в интервале 17:00–18:00 UT и Kp индекса до 8- в интервале 15:00–18:00 UT. Сопоставления минутного SYM-H индекса с вариациями Dst, позволяют уточнить время начала бури и продолжительность её начальной фазы. Временные интервалы фаз бури, определенные по изменениям SYM-H (начальная и главная фазы) и Dst (восстановительные фазы) указаны в табл. 1.

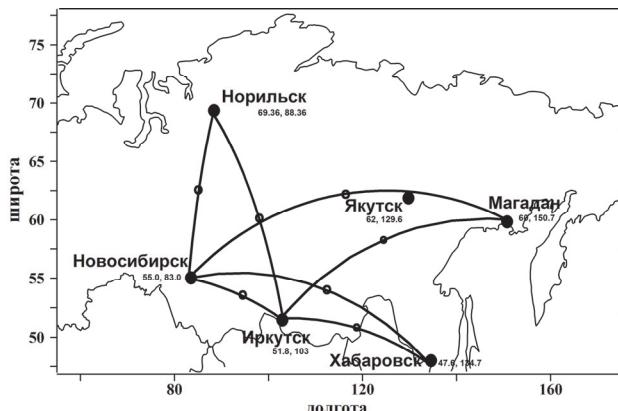


Рис. 1. Трассы НЗ в азиатском регионе России

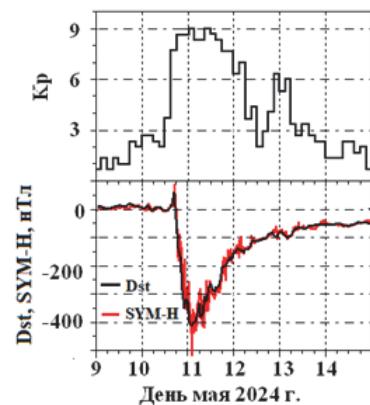


Рис. 2. Изменения Kp, Dst и Sym-H индексов

Таблица 1. Интервалы развития фаз бури 10–13 мая 2024 г.

Фаза	Начало	Конец
начальная	10.05.24 17:06 UT	10.05.24 17:53 UT
главная	10.05.24 17:54 UT	11.05.24 02:14 UT
ранняя восстановительная	11.05.24 02:30 UT	12.05.24 02:30 UT
поздняя восстановительная	12.05.24 02:30 UT	13.05.24 18:30 UT

### Ионосферные возмущения по данным ВЗ

В главную и восстановительную фазы бури наблюдалось длительное отрицательное ионосферное возмущение, проявившееся в значительном уменьшении критических частот слоя F2 (рис. 3). В это время станции ВЗ находились в зоне ГИП, или вблизи него.

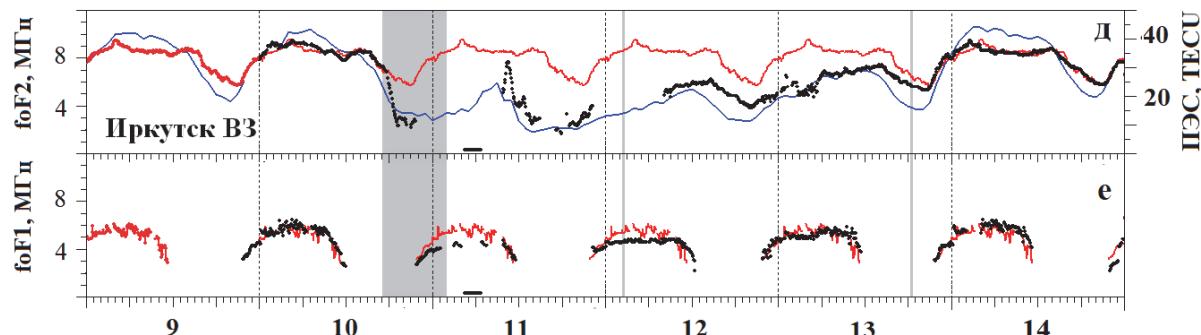


Рис. 3. Вариации  $f_oF2$  и  $f_oF1$  в возмущенных (черная линия) и спокойных (красная линия) условиях и ПЭС (синяя линия) в Иркутске для 9–14 мая 2024 г.

Наблюдались интервалы отсутствия отражений от F – области ионосферы, вследствие экранировки таких отражений спорадическим слоем Es и увеличенного поглощения на низких частотах, близких к гирочастоте электронов. В Новосибирске регистрировались Es аврорального типа и протяженные «косые» Es, обусловленные высapsulationием электронов на внутренней границе плазменного слоя. 11 мая и 12 мая наблюдался G – эффект в дневные часы местного времени, когда критическая частота F1 – слоя превышала критическую частоту F2 – слоя. Непрерывный интервал наблюдения G – эффекта в Иркутске составил 10 часов 12 мая. В Новосибирске непрерывный интервал наблюдения G – эффекта составил 8 часов 12 мая. Около 10 UT 11 мая на заходе Солнца на ионограммах ВЗ зарегистрирован сумеречный эффект повышения электронной концентрации и высоты максимума слоя F2 (Dusk Effect).

### Ионосферные возмущения по данным НЗ

В главную и восстановительную фазы бури длительное отрицательное ионосферное возмущение вызывает уменьшение максимальных наблюдаемых частот радиотрасс относительно их уровня в спокойных условиях и увеличение поглощения радиоволн, что в совокупности приводит к ослаблению сигналов и длительным интервалам "blackout" (рис.4).

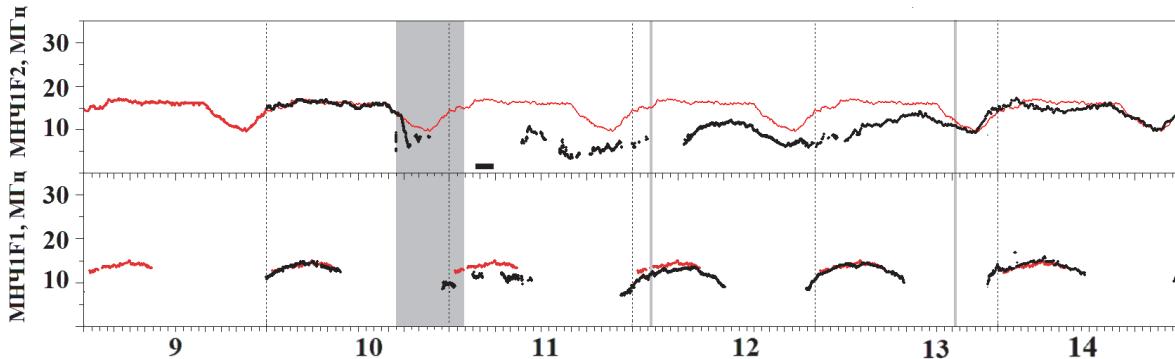


Рис. 4. Вариации экспериментальных значений МНЧ модов распространения 1F2 и 1F1 в возмущенных (черная линия) и спокойных условиях (красная линия) на трассе Новосибирск – Иркутск для 9–14 мая 2024 г.

Усиление поля магнитосферной конвекции приводит к смещению ГИП и ГДВ на широты отражающих областей радиотрасс и условия распространения радиоволн приближаются к субавроральным [5]. Изменения характеристик распространения радиоволн на радиотрассах определяются боковыми отражениями от полярной стенки ГИП и рассеянием на ионосферных неоднородностях в зоне диффузных высыпаний электронов. Периоды проявления G – эффекта в ионосфере ( $f_o F1 > f_o F2$ ) согласуются с интервалами регистрации сигналов, отраженных только от слоя F1, при вертикальном зондировании. На трассе Новосибирск – Иркутск в данных НЗ около 10:30 UT 11 мая было зарегистрировано проявление сумеречного эффекта в виде увеличения МНЧ мода 1F2 относительно отрицательного возмущения.

### Заключение

Исследованы эффекты «великой» магнитной бури 10–13 мая 2024 года, проявившиеся в ионосферных возмущениях, изменивших условия распространения КВ радиоволн. Выявлены особенности проявления магнитосферно-ионосферного взаимодействия в данных вертикального и наклонного зондирования ионосферы непрерывным ЛЧМ – сигналом в азиатском регионе России.

### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (субсидия №075-Г3/Ц3569/278). Экспериментальные данные получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>.

### Список литературы

- Подлесный А.В., Брынько И.Г., Куркин В.И. и др. Многофункциональный ЛЧМ-ионозонд для мониторинга ионосферы // Гелиогеофизические исследования. – 2013. – Вып. 4. – С. 24–31.
- Деминов М.Г., Шубин В.Н. Эмпирическая модель положения главного ионосферного провала // Геомагнетизм и аэрономия. – 2018. – Т. 58. – № 3. – С. 366–373.
- Kamide Y., Winningham J. D. A statistical study of the ‘instantaneous’ nightside auroral oval: The equatorward boundary of electron precipitation as observed by the Isis 1 and 2 satellites // J. Geophys. Res. – 1977. – Vol. 82. – Iss. 35. – P. 5573–5588.
- Burke W.J., Huang C.Y., Marcos F.A., Wise J.O. Interplanetary control of thermospheric densities during large magnetic storms // J. Atmosph. Solar-Terr. Phys. – 2007. – Vol. 69. – Iss. 3. – P. 279–287.
- Пономарчук С.Н., Золотухина Н.А. Возмущения ионосферного радиоканала во время магнитных бурь в ноябре–декабре 2023 г. // Солнечно-земная физика. – 2024. – Т. 10. – № 4. – С. 91–105.