Секция В. Физика атмосферы Земли, включая околоземное космическое пространство. БШФФ-2026. С. 241–244.

УДК 550.388.2, 551.510.535
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-241
ORCID: 0000-0002-4342-7907

ЭФФЕКТ РАДИО-БЛЭКАУТА СИГНАЛОВ НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ ВСЛЕДСТВИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ СОЛНЕЧНЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ВСПЫШЕК

Г.А. Загорский, Н.Ф. Благовещенская, А.С. Калишин, И.М. Егоров, С.А. Долгачева

Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия, gazagorskiy@aari.ru

EFFECT OF RADIO BLACKOUT OF OBLIQUE SOUNDING SIGNALS DUE TO SOLAR X-RAY FLARES

G.A. Zagorskiy, N.F. Blagoveshchenskaya, A.S. Kalishin, I.M. Egorov, A.S. Dolgacheva

Arctic and Antarctic Research Institute, Saint Petersburg, Russia gazagorskiy@aari.ru

Аннотация. Исследуется влияние солнечных вспышек рентгеновского диапазона классов M, X, произошедших 21 апреля 2023 и 11 ноября 2025 г. Рентгеновские вспышки приводили к увеличению электронной плотности в E- и F-слоях ионосферы, тем самым вызывая внезапные ионосферные возмущения (ВИВ). Анализ влияния ВИВ на сигналы наклонного зондирования ионосферы (НЗИ) показал ослабление интенсивности сигналов, (а в отдельных случаях и их полное исчезновение), рост наинизшей наблюдаемой частоты (ННЧ) сигналов, отраженных от E слоя и изменение их модовой структуры.

Ключевые слова: высокоширотная ионосфера, внезапные ионосферные возмущения, затухание коротковолнового излучения, блэкаут сигналов

Abstract. The impact of M and X-class solar X-ray flares that occurred on April 21, 2023, and November 11, 2025, is being investigated. These X-ray flares caused an increase in electron density in the E and F layers of the ionosphere, resulting in sudden ionospheric disturbances (SIDs). The influence of SIDs on the signals of the oblique sounding of the ionosphere (OSI) was caused by the attenuation of the signal intensity, the change of the LOF reflected from the E layer and the transformation of the mode structure of the signals.

Keywords: high-latitude ionosphere, sudden ionospheric disturbances, short-wave fadeout, signal blackout

ВВЕДЕНИЕ

В ходе солнечной вспышки рентгеновское и ультрафиолетовое излучение приводит к увеличению плотности электронов в слоях D, E и F ионосферы, вызывая внезапные ионосферные возмущения (ВИВ). Солнечные вспышки оказывают значительное влияние на параметры ионосферы и условия распространения радиоволн, (см., например, [Mitra, 1974; Blagoveshchenskaya, 2001; Rogov et al., 2014]).

В работе [Rogov et al., 2014] детально исследовано влияние поглощения, вызванного рентгеновской солнечной вспышкой, на условия распространения коротковолновых радиоволн на трассе наклонного зондирования ионосферы Кипр — Санкт-Петербург протяженностью ~2800 км. Результаты исследования особенностей распространения радиоволн на длинной субавроральной трассе протяженностью 9000 км во время сильных магнитных бурь показали увеличение минимально наблюдаемых частот (МНЧ) и уменьшение количества мод распространения на ионограммах наклонного зондирования ионосферы (НЗИ) [Blagoveshchenskaya, et al., 1989; Blagoveshchenskaya, 2001].

Экстремальные солнечные события дают возможность изучения влияния солнечных вспышек классов M, X на ионосферу и распространение радиоволн. Вызванные солнечными вспышками такой силы ВИВ могут привести к ряду негативных последствий для современной инфраструктуры, в том числе к временному снижению точности спутниковых систем (GPS), проблемам в работе систем распространения радиоволн и снижению надежности работы космических аппаратов [Baker, 2002].

Целью данной работы был анализ поведения ионосферных параметров и условий распространения радиоволн в западной части российской Арктической зоны во время ВИВ, вызванных солнечными вспышками различных классов. Анализ эффектов проводился на основе данных станций НЗИ и с использованием непрерывного сигнала с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) на сети трасс НЗ.

СХЕМА ПРОВЕДЕНИЯ НАБЛЮДЕНИЙ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА

При анализе последствий вспышек класса классов M, X, произошедших в различные даты, использовались данные, полученные сетью станций в западном секторе российской Арктики, а также исследовательской станцией «Горьковская» ААНИИ (Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт), расположенной недалеко от Санкт-Петербурга. Наклонное зондирование ионосферы проводилось с помощью станций с ЛЧМ [Rogov et al., 2021]. Станция работает в диапазоне частот 2–32 МГц с периодичностью зондирования 15 мин. Пространственная конфигурация сети, выбранная для анализа вспышек показана на рис. 1:

передатчики сигналов НЗИ расположены на станциях Ловозеро, Диксон и на острове Кипр и обозначены красным знаком молнии, приемники — на НИС «Горьковская», станциях в Салехарде, Амдерме, Баренцбурге и Ловозере. Красным цветом обозначены трассы, анализируемые для события 21 апреля 2023 г., оранжевым — для 11 ноября 2025 г. Координаты приемников и передатчиков даны в таблице.

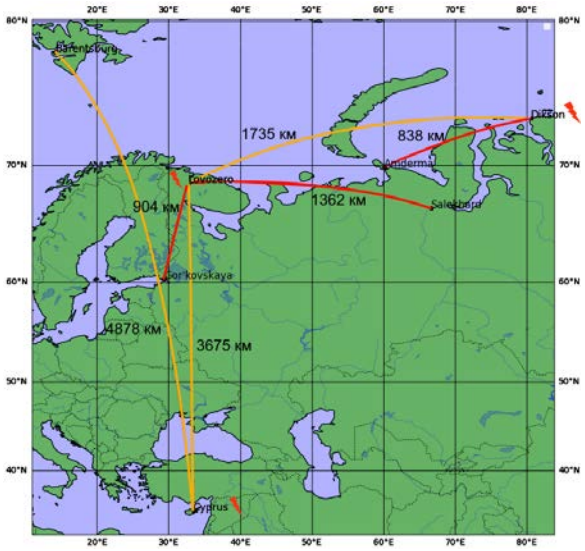

Рис. 1. Карта с радиотрассами НЗИ в западном секторе российской Арктики с указанием их длин

Названия, сокращения, координаты и дистанция между пунктами приема и передачи сигналов НЗИ

Название	Код	Широта	Долгота
Кипр	CP1 (Cyprus)	35.12	33.42
Горьковская	GRK (Gor'kovskay)	60.26	29.37
Салехард	SAH (Salekhard)	66.53	66.63
Ловозеро	LOZ (Lovozero)	68.57	32.76
Амдерма	AMD (Amderma)	69.84	60.1
Диксон	DIK(Dikson)	73.52	80.54
Баренцбург	BBG (Barentsburg)	78.06	14.21

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВСПЫШЕК

Анализ ионограмм НЗИ показывает, что во время ВИВ изменялись модовая картина зондирующих КВ-сигналов в сторону уменьшения их числа, интенсивность сигнала (рис. 2), а также значения максимальных и наинизших наблюдаемых частот (МНЧ и ННЧ). В момент начала солнечных вспышек на всех траекториях наблюдалось увеличение ННЧ, наблюдаемые эффекты согласуются с более ранними наблюдения Южного Федерального университета (ЮФУ) и Научно-исследовательского радиофизического института (НИРФИ) [Вертоградов и др., 2015].

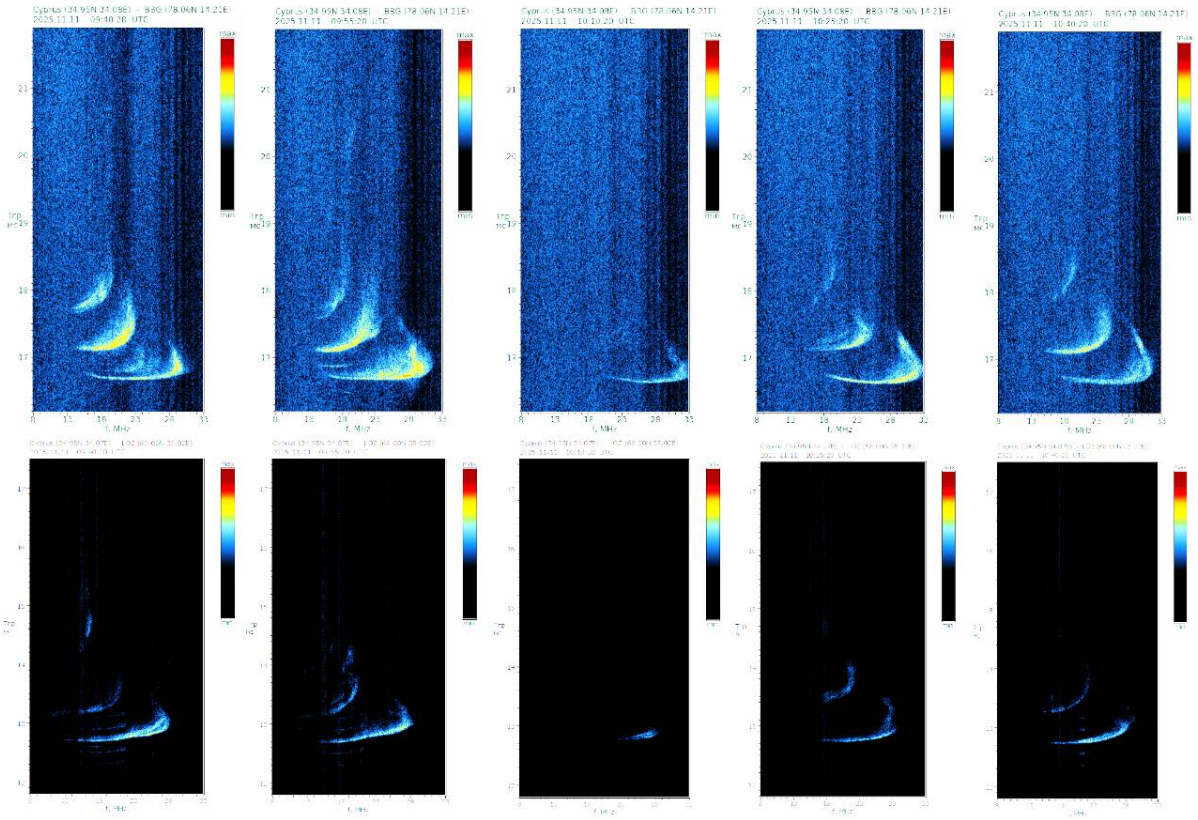

Рис. 2. Динамика изменения сигналов НЗИ на трассах Кипр—Баренцбург (верхняя панель) и Кипр—Ловозеро (нижняя панель). На каждой панели в центре — ионограмма, полученная через 16 мин после максимума вспышки, слева и справа — два сеанса зондирования до и после

Максимальное увеличение ННЧ на 10 МГц (с 12.5 до 22.5 МГц) отмечено на трассе Кипр—Ловозеро (рис. 3). Изменения МНЧ носили более сложный характер. От начала к концу ВИВ в 2023 г. МНЧ E-слоя на трассе Диксон—Амдерма увеличились после прохождения пика вспышки, затем уменьшались. МНЧ F-слоя незначительно увеличились, затем уменьшались. На трассе Ловозеро—Горьковская МНЧ слоев E и F вели себя похоже, слабый рост, затем уменьшение. На трассе Ловозеро—Салехард отмечалось отсутствие сигналов НЗИ, только к концу вспышки наблюдался резкий подъем МНЧ E_s-слоя относительно картины, наблюдавшейся до вспышки. В событии 11 ноября 2025 г. на всех трассах НЗИ отмечалось отсутствие E_s-слоя, ННЧ формировались за счет моды 1 и 2 F1-слоя ионосферы. Поведение ННЧ согласуется с более ранними наблюдениями, на ионограммах отчетливо прослеживается их рост — тем больший, чем ниже по широте находится средняя точка трассы. Так, для самой высокоширотной трассы Диксон—Ловозеро средняя точка расположена в район 71° N, ΔННЧ = 1.5 МГц, для трассы Кипр—Баренцбург — 56.5 ° N и 8 МГц, для трассы Кипр—Ловозеро —51.84° N и 10 МГц. Изменения МНЧ почти не наблюдалось.

После вспышек через ~2–3 ч началось событие поглощения полярной шапки (ППШ). Данное явление характерно только для высокоширотных районов и потому не наблюдалось на среднеширотных трассах. Стоит отметить, что все наблюдения велись при спокойных или слабовозмущенных условиях, K_p-индекс за сутки не превышал 2.77.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Было установлено, что во время воздействия потока солнечного рентгеновского излучения наблюдаются затухания зондирующих КВ-сигналов, а в отдельных случаях — их частичное исчезновение. По данным НЗИ на тех трассах, где присутствует многомодовое распространение сигнала, наблюдалось уменьшение количества мод, что также указывает на усиление поглощения радиоволн в F-слое.

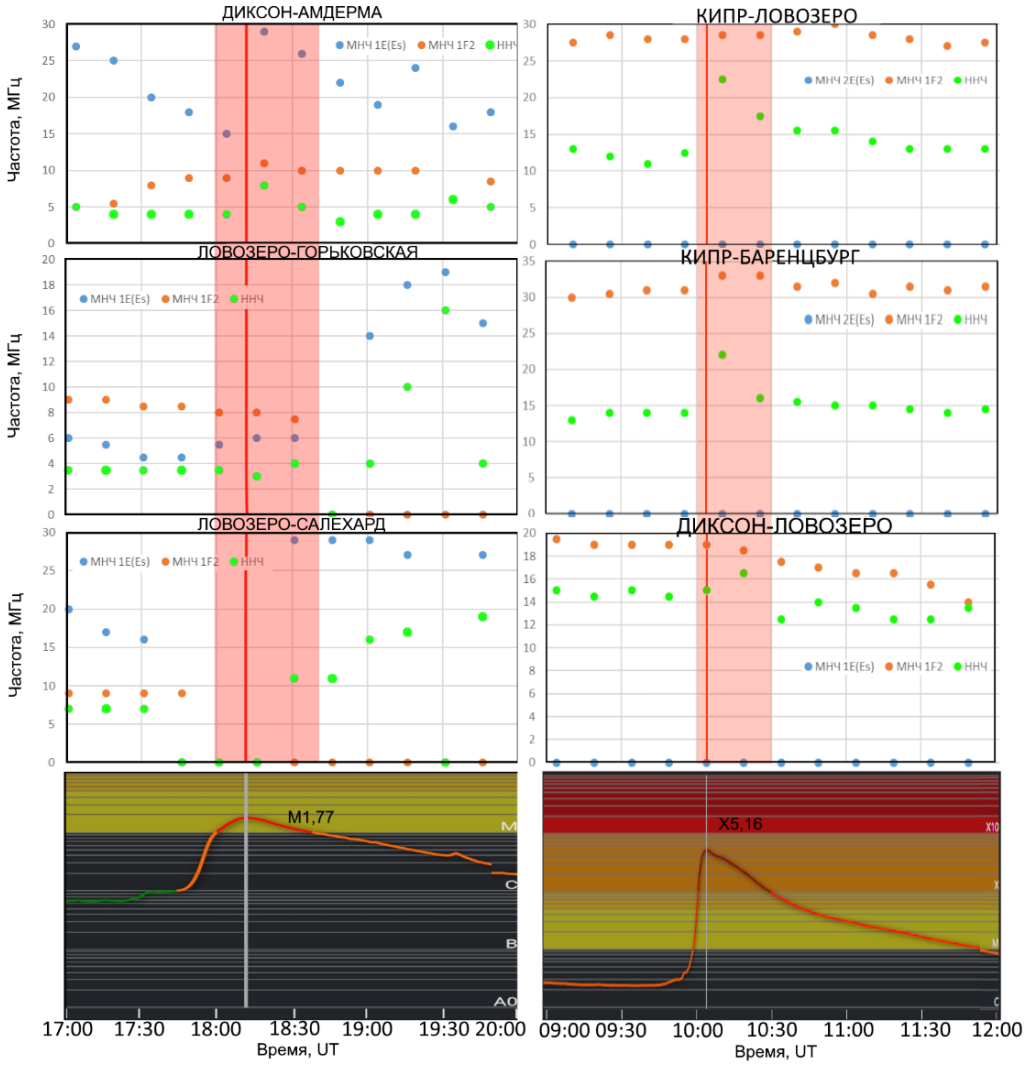

Рис. 3. Результаты проведения НЗИ на различных трассах для событий 2023 (слева) и 2025 г. (справа). Внизу — мощность рентгеновской солнечной вспышки, вызвавшей ВИВ на трассах НЗИ

На всех трассах НЗИ отмечается рост ННЧ, при этом для случая воздействия на ионосферу вспышки М-класса широтного эффекта (чем южнее средняя точка трассы, тем сильнее рост ННЧ) не наблюдалось, либо он был слабо выражен. В то же время, при воздействии вспышки Х-класса широтный эффект ярко выражен.

Можно отметить, что эффект воздействия вспышки наблюдается, начиная с М-класса (21 апреля 2023 г., М1,75). Затухания КВ-сигнала на трассах НЗИ зависят от класса вспышки, но наибольшее влияние на характер поведения сигнала оказывают другие факторы: расположение трасс НЗИ, общий вспышечный фон, параметры самой ионосферы.

Изучение ВИВ представляет не только научный, но и практический интерес. Эти возмущения оказывают существенное влияние на надежность работы космических аппаратов, систем радиосвязи, радионавигации и загоризонтных радаров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Mitra A.P. Ionospheric Effects of Solar Flares. D. Reidel Publishing, Boston–Dordecht, Holland, 1974. https://doi.org/10.1007/978-94-010-2231-6.

Blagoveshchenskaya N.F. Geophysical Effects of Active Influences in Near-Earth Space. Hydrometeoizdat Publ., Saint-Petersburg, 2001.

Rogov D.D., Moskaleva E.V., Zaalov N.Y. Modeling of high frequency radio wave absorption on oblique soundings during a solar X-ray flare // Adv. Space Res. 2014. Vol. 15. https://doi.org/10. 1016/j.asr.2014.11.001.

Blagoveshchenskaya N.F., Bubnov V.A., Ustinovich V.T. Investigation of solar flare effects by oblique-sounding method of ionosphere // Izvestiya Vuzov: Radiofizika. 1989. Vol. 32, No. 1. P. 17–21.

Baker D.N. How to cope with space weather. Science. 2002. Vol. 297(5586). P. 1486–1487. https://doi.org/10.1126/science.1074956.

Rogov D.D., Vystavnoi V.M., Blagoveshchenskaya N.F., Baryshev P.E., Kalishin A.S. Russ. Meteorol. Hydrol. 2021. Vol. 46. No. 4. P. 217–224. https://doi.org/10.52002/0130-2906-2021-4-5-13.

Вертоградов Г.Г. Ионосферные эффекты рентгеновских вспышек 24 сентября 2011 года по данным наклонного зондирования // Изв. вузов. Радиофизика. 2014. Т. 57, № 5. С. 362–373.