

УДК: 537.87

DOI: 10.26907/rwp29.2025.135-138

## ВАРИАЦИИ ФАЗЫ НЧ-СИГНАЛА РАДИОПЕРЕДАТЧИКА JJY40 ПРИ РЕГИСТРАЦИИ В ЯКУТСКЕ В ТЕЧЕНИЕ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ БУРИ 10–12 МАЯ 2024 Г.

А.А. Корсаков, В.И. Козлов, Р.Р. Каримов

*Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера Сибирского отделения  
Российской академии наук, 677027, г. Якутск, просп. Ленина, 31**E-mail: korsakova@ikfia.ysn.ru, vkozlov@ikfia.ysn.ru, karimov@ikfia.ysn.ru*

**Аннотация.** Во время экстремально сильной магнитной бури 10–12 мая 2024 г (индексы Dst = -413 нТл,  $K_p = 9$ , AE > 2000 нТл) в ночных условиях распространения в г. Якутске (62.02 N, 129.70 E) зарегистрированы понижения фазовой задержки НЧ-радиосигнала JJY40 (37.4 N, 140.84 E, частота сигнала 40 кГц). 11 мая в 16 UT понижение фазовой задержки радиосигнала составило 90°. В суточном ходе амплитуды эффект магнитной бури на фоне флуктуаций не выделен. Понижение фазовой задержки радиосигнала можно объяснить понижением эффективной высоты волновода Земля-ионосфера. На фазе восстановления магнитной бури, ночью значимым дополнительным источником ионизации могли стать выпадения заряженных частиц. Над радиотрассой на участке средних широт (область 52 – 42 N, 106 – 141 E) отмечено повышение интегрального потока электронов в диапазоне энергий 20.4 – 30.0 кэВ на 840% (данные спутников серии DMSP). На освещенной Солнцем трассе JJY40 – Якутск эффект магнитной бури не выделен. В мае 2024 г. в вариациях фазы радиосигнала JJY40 выделено более 122 эффектов солнечных вспышек (класса C3.6 и выше). Проведена адаптация параметров модели для оценки интенсивности потока рентгеновского излучения Солнца по внезапным фазовым аномалиям НЧ-радиосигнала, индексу F10.7 и усредненному вдоль радиотрассы косинусу зенитного угла Солнца во время вспышек. По вариациям фазы сигнала JJY40 наземным методом проведена оценка интенсивности вспышечного потока рентгеновского излучения Солнца. Интенсивность потока, рассчитанная по модели на основе наземных измерений, близка со вспышечными значениями, полученными со спутника GOES-18.

**Ключевые слова:** нижняя ионосфера; вариации фазы НЧ-радиосигнала; геомагнитная буря; солнечная вспышка; внезапная фазовая аномалия

## EFFECTS OF AN EXTREMELY STRONG MAGNETIC STORM ON MAY 10–12, 2024 BY LF SIGNAL PHASE VARIATIONS OF THE JJY40 TRANSMITTER REGISTERED IN YAKUTSK

A. A. Korsakov, V. I. Kozlov, R. R. Karimov

**Abstract.** During the extremely strong magnetic storm on May 10 – 12, 2024 (Dst is -413 nT,  $K_p$  is 9, AE is more than 2000 nT) in nighttime propagation in Yakutsk (62.02 N, 129.70 E) decreases in the phase delay of the LF radio signal JJY40 (37.4 N, 140.84 E, signal frequency 40 kHz) detected. On May 11 at 16 UT, the phase delay decrease was 90°. In the daily amplitude variation, the effect of a magnetic storm against the background of fluctuations is not detected. The phase delay decrease of the radio signal can be explained by a decrease in the effective height of the Earth-ionosphere waveguide. During the recovery phase of the magnetic storm, at night, a significant additional source of ionization could be precipitation of charged particles. Over the radio path in the area of mid-latitudes (region 52 – 42 N, 106 – 141 E), an increase in the integral electron flux in the energy range of 20.4 – 30.0 keV by 840% was noted (data from the DMSP series satellites). The effect of the magnetic storm was not detected on the sunlit JJY40 – Yakutsk path. On May 2024 more than 122 solar flare effects (class C3.6 and higher) detected in the JJY40 radio signal phase variations. The model parameters adapted for estimating the intensity of the solar X-ray flux based on sudden phase anomalies of the LF radio signal and the cosine of the solar zenith angle averaged along the radio path during flares. In May 2024, more than 122 solar flare effects (class C3.6 and higher) detected in the JJY40 radio signal phase variations. The model parameters were adapted for estimating the solar X-ray flux intensity based on sudden phase anomalies of the LF radio signal, the F10.7 index and the cosine of the solar zenith angle averaged along the radio path during flares. Based on the JJY40 signal phase variations, the intensity of the solar flare X-ray flux was estimated using a ground-based method. The flux intensity calculated by the model based on ground-based measurements is close to the values obtained from the GOES-18 satellite.

**Keywords:** lower ionosphere; LF radio signal phase variations; geomagnetic storm; solar flare; sudden phase anomaly

**Введение**

Радиоволны очень низких и низких частот (ОНЧ: 3-30 кГц, НЧ: 30-300 кГц) способны распространяться на большие расстояния в волноводе Земля – ионосфера. Регистрация параметров ОНЧ-НЧ-сигналов от сети радиопередатчиков позволяет дистанционно исследовать проявления космической погоды на геосфере [1, 2]. Чувствительность ОНЧ-НЧ-радиоволн к гелиогеофизическим проявлениям зависит от сезона, географического расположения излучателя и приемника, направления распространения сигнала (относительно магнитного поля Земли), его частоты, протяженности радиотрассы [3]. Целью работы является исследование вариаций фазы НЧ-радиосигнала при распространении вдоль меридиана в течение экстремальной магнитной бури 10-12 мая 2024 г. при сопутствующей вспышечной активности на Солнце.

**Методика регистрации и экспериментальные данные**

В г. Якутске (62.02 N, 129.70 E) Институтом космофизических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН (ИКФИА СО РАН) организована регистрация ОНЧ-НЧ-сигналов радиопередатчиков [4]. Рассмотрены вариации фазы сигнала передатчика JJY40 (Япония, 37.4 N, 140.84 E, частота сигнала 40 кГц). Протяженность радиотрассы JJY40 – Якутск составляет 2.85 Мм, ориентирована вдоль меридиана. На рис. 1 представлены вариации фазы радиосигнала JJY40 при регистрации в Якутске за период 9 – 15 мая 2024 г., интегральный поток электронов  $J$  в диапазоне энергий 20.4 – 30.0 кэВ (на участке средних широт 52 – 42 N, 106 – 141 E над радиотрассой, данные спутников DMSP) а также интенсивность потока рентгеновского излучения Солнца  $P$  [1 – 8 Å]. Во время экстремально сильной магнитной бури 10 – 12 мая 2024 г (индексы Dst = -413 нТл, Kp = 9, AE > 2000 нТл) в ночных условиях распространения зарегистрированы уменьшения фазовой задержки радиосигнала JJY40. 11 мая в 16 UT уменьшение фазовой задержки радиосигнала достигло 90° (см. рис. 1). Уменьшение фазовой задержки НЧ-радиосигнала может быть объяснено понижением эффективной высоты волновода Земля-ионосфера вследствие появления дополнительного источника ионизации. В суточном ходе амплитуды JJY40 эффект магнитной бури на фоне флуктуаций не выделен. На фазе восстановления магнитной бури, ночью значимым дополнительным источником ионизации могли стать высыпания заряженных частиц. По данным спутников f16-f18 серии DMSP (данные SSJ 09-13.05.2024 предоставлены в открытом доступе) [5] над радиотрассой JJY40 – Якутск на участке средних широт (область 52 – 42 N, 106 – 141 E) отмечено повышение интегрального потока электронов в диапазоне энергий 20.4 – 30.0 кэВ на 840% (данные). Интегральный поток электронов увеличился с  $566 \cdot 10^3$  электрон/см<sup>2</sup>·с·ср (9 мая 2024 г. 06:53 UT) до  $5311 \cdot 10^3$  электрон/см<sup>2</sup>·с·ср (12 мая 2024 г. 08:15 UT) (см. рис. 1). Днем на освещенной Солнцем трассе JJY40 – Якутск эффект магнитной бури не выделен. В мае 2024 г. выделено более 122 солнечных рентгеновских вспышек (класса C3.6 и выше) [6]. Эффекты вспышек проявились в виде уменьшения фазовой задержки НЧ-радиосигнала – внезапных фазовых аномалий. Предложена модель оценки логарифма интенсивности потока рентгеновского излучения Солнца  $LgP$ :

$$LgP = A + B \cdot \Phi + C \cdot Lg(\cos X) + D \cdot Lg(F10.7), \quad (1)$$

где  $P$  – интенсивность потока рентгеновского излучения Солнца в диапазоне [1 – 8 Å] в максимуме вспышки, Вт/м<sup>2</sup>;  $\Phi$  – изменение фазы радиосигнала, приведенное к протяженности радиотрассы, градус/Мм;  $\cos X$  – усредненный вдоль радиотрассы косинус зенитного угла Солнца во время вспышки;  $F10.7$  – поток радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см, с.е.п.

Значения зенитного угла Солнца  $X$  вдоль трасс распространения по координатам с разрешением 200 км рассчитаны по алгоритму [7]. Поток радиоизлучения  $F10.7$  измеряется наземной обсерваторией Канады [8]. Параметры модели (1), полученные на основе регрессионного анализа, представлены в табл. 1.

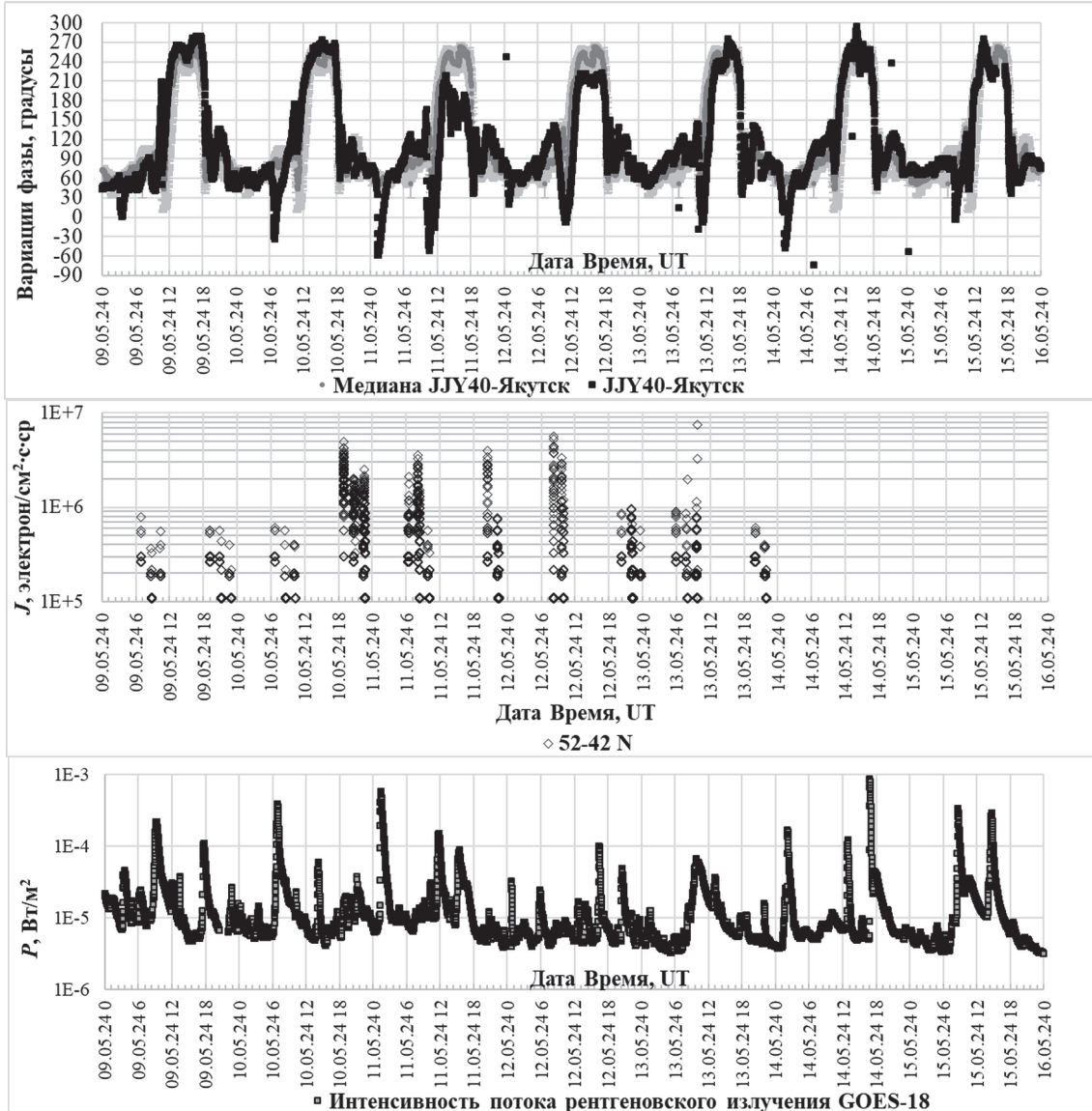


Рис. 1. Вариации фазы радиосигнала JJY40 при регистрации в Якутске (верхняя панель) период 9–15 мая 2024 г., интегральный поток электронов  $J$  (средняя панель) в диапазоне энергий 20.4 – 30.0 кэВ (на участке 52 – 42 N, 106 – 141 E, данные спутников DMSP), интенсивность потока рентгеновского излучения Солнца  $P$  (нижняя панель)

Таблица 1. Параметры зависимости  $LgP$  от внезапных фазовых аномалий НЧ-радиосигнала и усредненного вдоль радиотрассы косинуса зенитного угла Солнца во время вспышек

| Объем выборки | $A$                   | $B$                  | $C$                  | $D$                  | Коэффициент детерминации $R^2$ | СКО остаточных невязок $S$ |
|---------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------------------------|----------------------------|
| 122           | -7.777<br>$\pm 0.680$ | 0.048<br>$\pm 0.002$ | 0.099<br>$\pm 0.083$ | 1.046<br>$\pm 0.298$ | 0.788                          | 0.198                      |

По вариациям фазы сигнала JJY40 наземным методом проведена оценка интенсивности вспышечного потока рентгеновского излучения 8 солнечных вспышек класса X (см. табл. 2). Оценки интенсивности потока рентгеновского излучения Солнца, полученные на основе наземных измерений, близки со вспышечными значениями, полученными по данным спутника GOES-18.

Таблица 2. Сравнение интенсивности потока рентгеновского излучения солнечных вспышек с оценкой по модели (1)

| Дата       | Время,<br>UT | Класс<br>вспышки | LgP<br>GOES-18 | LgP<br>модель | невязка |
|------------|--------------|------------------|----------------|---------------|---------|
| 08.05.2024 | 01:41        | X1.0             | -4.0           | -4.122        | 0.122   |
| 08.05.2024 | 05:09        | X1.0             | -4.0           | -3.966        | -0.034  |
| 08.05.2024 | 21:40        | X1.0             | -4.0           | -4.271        | 0.271   |
| 09.05.2024 | 09:13        | X2.2             | -3.658         | -4.376        | 0.718   |
| 10.05.2024 | 06:54        | X3.9             | -3.409         | -3.455        | 0.046   |
| 11.05.2024 | 01:23        | X5.8             | -3.237         | -3.292        | 0.055   |
| 14.05.2024 | 02:09        | X1.7             | -3.770         | -3.516        | -0.254  |
| 15.05.2024 | 08:37        | X3.5             | -3.456         | -3.829        | 0.373   |

### Заключение

При геомагнитных возмущениях ночью значимым дополнительным источником ионизации на высотах нижней ионосферы средних широт являются высыпания заряженных частиц из радиационных поясов Земли. Днем основным источником ионизации нижней ионосферы является излучение Солнца в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах.

Проведена адаптация параметров модели для оценки интенсивности потока рентгеновского излучения Солнца по внезапным фазовым аномалиям НЧ-радиосигнала, индексу F10.7 и усредненному вдоль радиотрассы косинусу зенитного угла Солнца во время вспышек. Интенсивность потока, рассчитанная по модели на основе наземных измерений, близка со вспышечными значениями, полученными со спутника GOES-18.

### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ на выполнение Государственного задания ИКФИА СО РАН.

### Список литературы

1. Silber I., Price C. On the use of VLF narrowband measurements to study the lower ionosphere and the mesosphere–lower thermosphere // *Surveys in Geophysics*. – 2017. – Vol. 38, № 2. – P. 407–441.
2. Гаврилов Б.Г., Ряховский И.А., Поклад Ю.В. Воздействие солнечного рентгеновского излучения и протонных высыпаний на амплитуду ОНЧ сигналов // *Динамические процессы в геосферах*. – 2023. – Т. 15. – № 2. – С. 81–88.
3. Альперт Я.Л. Распространение электромагнитных волн и ионосфера. – 2-е изд, перераб. и доп. – М.: Наука, 1972. – 564 с.
4. Korsakov A.A., Kozlov V.I., Karimov R.R. Amplitude and phase changes of the LF radio signal of the transmitter JJY40 registered in Yakutsk and Tixie Bay during the solar eclipse on June 10, 2021 // *Proc. SPIE, 28th Int. Symp. on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. 2022. – Vol. 12341. – P. 123417E. doi: 10.1117/12.2644844.
5. NOAA. – URL: <https://www.ncei.noaa.gov/data/dmsp-space-weather-sensors/access> (дата обращения: 17.04.2025).
6. NOAA. Space Weather Prediction Center. XRS 1-minute Averages. – URL: [https://data.ngdc.noaa.gov/platforms/solar-space-observing-satellites/goes/goes18/12/data/xrsf-l2-avg1m\\_science/2024/05/](https://data.ngdc.noaa.gov/platforms/solar-space-observing-satellites/goes/goes18/12/data/xrsf-l2-avg1m_science/2024/05/) (дата обращения: 17.07.2024).
7. Schlyter P. Computing planetary positions – a tutorial with worked examples 2003. – URL: <http://stjarnhimlen.se/comp/tutorial.html> (Дата обращения: 15.04.2025).
8. National Research Council and Natural Resources Canada. Solar radio flux - archive of measurements. – URL: [https://www.spaceweather.gc.ca/solar\\_flux\\_data/daily\\_flux\\_values/fluxtable.txt](https://www.spaceweather.gc.ca/solar_flux_data/daily_flux_values/fluxtable.txt) (дата обращения: 15.04.2025).