

## СЕЗОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВНЕЗАПНЫХ ФАЗОВЫХ АНОМАЛИЙ ОНЧ-СИГНАЛОВ РАДИОСТАНЦИЙ ПРИ РЕГИСТРАЦИИ В ЯКУТСКЕ

А.А. Корсаков, В.И. Козлов, С.Е. Кобякова

Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия  
korsakov84@yandex.ru

## SEASONAL VARIATIONS IN SUDDEN PHASE ANOMALIES OF VLF RADIO SIGNALS RECORDED IN YAKUTSK

A.A. Korsakov, V.I. Kozlov, S.Ye. Kobyakova

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy, Yakutsk, Russia

**Аннотация.** На основе непрерывной регистрации в г. Якутске ( $62^\circ$  N,  $129.7^\circ$  E) сигналов навигационных станций Новосибирск, Краснодар (14.9 кГц) и Хабаровск (11.9 кГц) в период 2009–2016 гг. отобраны события внезапных фазовых аномалий (ВФА). На основе регрессионного анализа, отдельно для летних и зимних условий, определены параметры линейной зависимости величины ВФА от логарифма произведения интенсивности потока рентгеновского излучения (0.1–0.8 нм) на косинус зенитного угла Солнца, усредненного на освещенной части радиотрассы. Сигнал Новосибирск: наклон линейной модели равен 9.99 и 9.46, начальное смещение равно 61.51 и 55.62 для зимы и лета соответственно. Сигнал Хабаровск: наклон равен 14.54 (зима) и 8.89 (лето), смещение равно 90.31 (зима) и 55.13 (лето). Сигнал Краснодар (обладает большими флуктуациями фазы): наклон равен 7.02 (зима) и 7.57 (лето), смещение равно 44.12 (зима) и 44.87 (лето). Зимой нижняя ионосфера более чувствительна к воздействию солнечных вспышек.

**Ключевые слова:** волновод Земля–ионосфера, внезапная фазовая аномалия, солнечная вспышка.

**Abstract.** Sudden phase anomalies (SPA) of the VLF radio signal (3–30 kHz) in single-mode propagation is well described by a linear function of the logarithm of multiplication the X-ray flux intensity (0.1–0.8 nm) and the cosine of the zenith angle of the sun averaged over the illuminated part of the propagation path. During 2009–2016 the SPA events are selected based on continuous registration in Yakutsk ( $62^\circ$  N,  $129.7^\circ$  E) signals of navigation stations Novosibirsk, Krasnodar (14.9 kHz) and Khabarovsk (11.9 kHz). Based on the regression analysis, the parameters of the linear model are determined for summer and winter. The signal Novosibirsk: the linear model slope is 9.99 and 9.46, the initial offset is 61.51 and 55.62 for winter and summer respectively. Khabarovsk signal: the slope is 14.54 (winter) and 8.89 (summer), the offset is 90.31 (winter) and 55.13 (summer). The signal Krasnodar (large phase fluctuations): the slope is 7.02 (winter) and 7.57 (summer), the offset is 44.12 (winter) and 44.87 (summer). In winter the lower ionosphere is more sensitive to solar flares effects.

**Keywords:** Earth–ionosphere waveguide, sudden phase anomaly, solar flare.

### Введение

Во время солнечных вспышек происходит резкое увеличение интенсивности рентгеновского излучения. Этот процесс приводит повышению электронной концентрации в ионосфере, особенно в нижней ее части (Д область: 60–90 км). Такие резкие изменения приводят к внезапным фазовым (ВФА) при регистрации электромагнитных сигналов диапазона очень низких частот (ОНЧ: 3–30 кГц), распространяющихся на большие расстояния в волноводе земля – ионосфера [Митра, 1977]. Отклик изменения фазы ОНЧ радиосигнала на рентгеновские солнечные вспышки может зависеть от состояния в 11-летнем цикле активности Солнца [Pacini, Raulin 2006].

### Методика

В г. Якутске ( $62^\circ$  N,  $129.7^\circ$  E) с 2009 г. проводится регистрация ОНЧ сигналов радионавигационной системы РСДН – 20 [Каримов и др., 2012]. Передатчики расположены в окрестности Новосибирска ( $55.75^\circ$  N,  $82.45^\circ$  E), Краснодара ( $45.4^\circ$  N,  $38.15^\circ$  E) и Хабаровска ( $50^\circ$  N,  $136.6^\circ$  E).

Для описания зависимости ВФА от потока рентгеновского излучения и зенитного угла Солнца предложено эмпирическое выражение:

$$\Phi = A + B \lg(P \cos X), \quad (1)$$

где  $\Phi$  — изменение фазы сигнала (относительно невозмущенного значения), приведенное к единице протяженности радиотрассы (градус/Мм). Протяженность радиотрасс Новосибирск–Якутск: 2.64 Мм, Хабаровск–Якутск: 1.4 Мм, Краснодар–Якутск: 5.76 Мм. Значение  $P$  — поток рентгеновского излучения в диапазоне 0.1–0.8 нм;  $\cos X$  — косинус зенитного угла Солнца, усредненный вдоль освещенной части трассы распространения радиосигнала.

По данным регистрации сигналов Новосибирск, Краснодар (14.9 кГц) и Хабаровск (11.9 кГц) в Якутске в дневных условиях распространения 2009–2016 гг. отобраны события ВФА. Оцениваются параметры модели (1) отдельно для зимы и лета. Значения зенитного угла Солнца на освещенных участках вдоль радиотрасс по координатам с разрешением 200 км, рассчитываются по алгоритму [<http://stjarnhimlen.se/comp/tutorial.html>]. Информа-

ция о солнечных вспышках [ftp://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/new\_avg/].

### Экспериментальные данные

На рис. 1 представлены зарегистрированные в Якутске в зимние и летние сезоны (2009–2016 гг.) внезапные фазовые аномалии сигнала Новосибирск в зависимости от потока рентгеновского излучения Солнца. На основе регрессионного анализа, отдельно для летних и зимних условий, определены параметры линейной модели (1). Для сигнала Новосибирск наклон линейной модели составляет 9.99 и 9.46, начальное смещение равно 61.51 и 55.62 для зимы и лета соответственно. Из анализа были исключены значения ВФА, не превышающие пороговый уровень потока рентгеновского излучения (условия малой освещенности радиотрассы, не гарантирующие преобладание моды низшего порядка). Флуктуации представлены разностью квартилей 25 % и 75 % от медианных значений. Флуктуации фазы регистрируемого сигнала Новосибирск (14.881 кГц) составляют 1.14 и 0.76 градус/Мм для зимы и лета соответственно.

На рис. 2 представлены ВФА сигнала Хабаровск, как функция потока рентгеновского излучения Солнца. Для сигнала Хабаровск наклон линейной модели составляет 14.54 и 8.89, начальное смещение равно 90.31 и 55.13 для зимы и лета соответственно. Из анализа также исключены значения ВФА, не превышающие пороговый уровень потока рентгеновского излучения. Флуктуации фазы сигнала Хабаровск (11.904 кГц) составляют 2.14 и 1.43 градус/Мм для зимы и лета соответственно.

На рис. 3 представлены зарегистрированные в Якутске в зимние и летние сезоны (2009–2016 гг.) ВФА сигнала Краснодар в зависимости от потока рентгеновского излучения Солнца. Для сигнала Краснодар наклон линейной модели составляет 7.02 и 7.57, начальное смещение равно 44.12 и 44.87 для зимы и лета соответственно. Из анализа исключены значения ВФА, не превышающие пороговый уровень

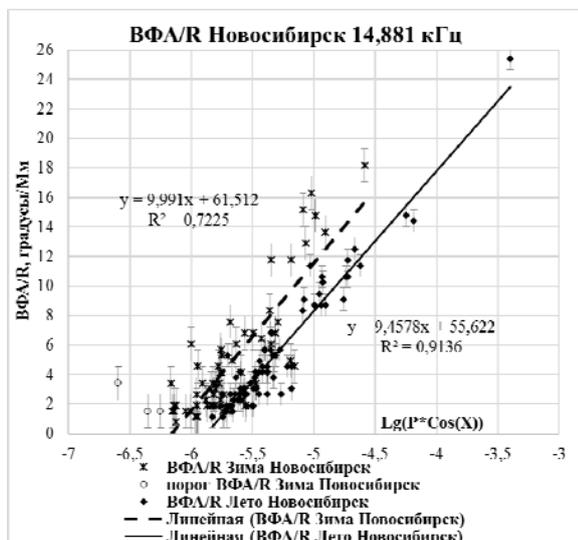


Рис. 1. Внезапные фазовые аномалии сигнала Новосибирск

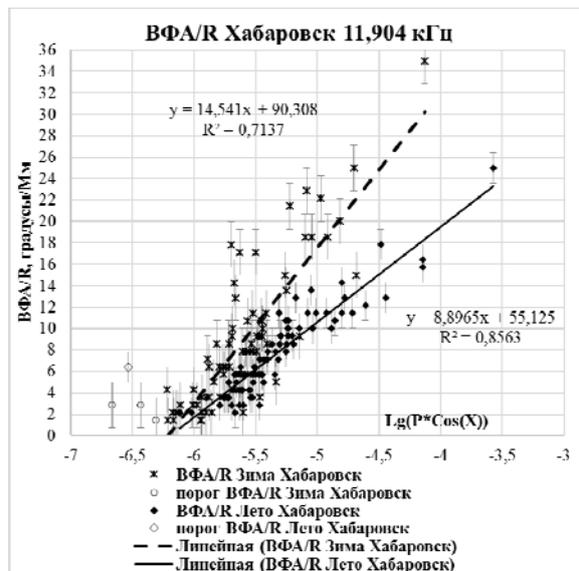


Рис. 2. Внезапные фазовые аномалии сигнала Хабаровск

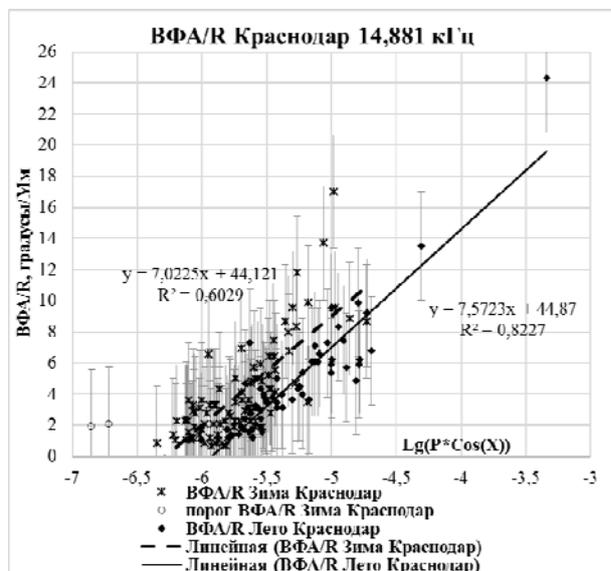


Рис. 3. Внезапные фазовые аномалии сигнала Краснодар

потока рентгеновского излучения. Флуктуации фазы сигнала Краснодар (14.881 кГц) составляют 3.65 и 3.47 градус/Мм для зимы и лета соответственно.

### Заключение

Данные о регистрации в Якутске внезапных фазовых аномалий ОНЧ сигналов радиостанций указывают на сезонную зависимость отклика нижней ионосферы на воздействие рентгеновских солнечных вспышек. Зимой нижняя ионосфера более чувствительна к воздействию всплещенного потока рентгеновского излучения. В работе [Данилов, Симонов, 1981] указывается на сезонные вариации параметров нижней ионосферы: понижение эффективного коэффициента рекомбинации от лета к зиме. Различия обусловлены сезонными вариациями метеорологических параметров мезосферы. Для эф-

фехтов ВФА в работе [Данилов и др., 1983] зимой также отмечается большая чувствительность относительно лета.

Работа поддержана РФФИ № 15-05-05005 р\_восток\_a.

### **Список литературы**

Данилов А.Д., Орлов А.Б., Морозова Л.П., Кищук В.П. Сезонные различия эффектов внезапных ионосферных возмущений в D-области // Геомагнетизм и аэронавигация, 1983. Т. 23, № 2. С. 311–313.

Данилов А.Д., Симонов А.Г. Вариации коэффициента рекомбинации и фотохимия области D // Ионосферные иссл. 1981. № 34. С. 54–72.

Каримов Р.Р., Козлов В.И., Корсаков А.А., Муллаяров В.А., Мельчинов В.П. Вариации параметров сигналов радионавигационных станций, регистрируемых в Якутске в диапазоне очень низких частот // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 4. С. 57–62.

Митра А. Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли. М.: Мир. 1977. 370 с.

Pacini A.A., Raulin J.-P. Solar X-ray flares and ionospheric sudden phase anomalies relation-ship: A solar cycle phase dependence // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. A09301. DOI: 10.1029/2006JA011613.

Schlyter P. Computing planetary positions — a tutorial with worked examples [Электронный ресурс]. URL: <http://stjarnhimlen.se/comp/tutorial.html> (дата обращения 02.03.2017).

NOAA National geophysical data center. Solar-Terrestrial Physics [Электронный ресурс]. [ftp://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/new\\_avg/](ftp://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/new_avg/) (дата обращения 12.02.2017).