

УДК 550.388

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНЕЗАПНЫХ ФАЗОВЫХ АНОМАЛИЙ ОНЧ-СИГНАЛОВ ПРИ РЕГИСТРАЦИИ В ЯКУТСКЕ

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

SIMULATION OF SUDDEN PHASE ANOMALIES OF VLF SIGNALS REGISTERED IN YAKUTSK

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

Рассматриваются зарегистрированные в Якутске внезапные фазовые аномалии (ВФА) ОНЧ-сигналов станций Краснодар и Новосибирск (14.9 кГц) отдельно для летних и зимних дневных условий. Пороговая чувствительность ВФА по потоку рентгеновского излучения P (1–8 Å) слабо зависит от сезона. ВФА при фиксированных значениях зенитного угла Солнца X и потока P от лета к зиме на трассе Новосибирск–Якутск увеличиваются, зависимость ВФА от усредненного вдоль трассы распространения косинуса зенитного угла Солнца отчетливой летом. На трассе Краснодар–Якутск ВФА отчетливо зависят от $\text{Cos}(X)$ зимой, что связано с большей протяженностью трассы по долготе и ее расположением в более высоких широтах.

Sudden phase anomalies (SPA) of VLF signals of stations Krasnodar and Novosibirsk (14.9 kHz), registered in Yakutsk, separately for summer and winter daytime conditions are considered. The threshold sensitivity of the SPA by the solar X-ray flux P (1–8 Å) is weakly dependent on the season. The SPA value for fixed solar zenith angle X and P from summer to winter on the path Novosibirsk–Yakutsk increases, the SPA dependence from averaged along the propagation path cosine of the solar zenith angle more distinct in the summer. On the Krasnodar–Yakutsk SPA clearly depends on $\text{Cos}(X)$ in winter, due to the greater interval of the longitude and the path crosses higher latitudes.

Во время солнечных вспышек происходит увеличение интенсивности ультрафиолетового и рентгеновского излучений, которые являются основным источником ионизации нижней ионосферы. Этот процесс влечет повышение электронной концентрации в D- и E-областях ионосферы. Такие резкие изменения приводят к внезапным фазовым аномалиям (ВФА) при регистрации электромагнитных сигналов диапазона очень низких частот (ОНЧ, 3–30 кГц).

На рис. 1 представлен пример ВФА в суточном ходе фазы сигналов краснодарской и новосибирской радиостанций, принятых в Якутске 9 августа 2011 г. на частоте 14.9 кГц. Причинами рассмотренных эффектов явились солнечные вспышки класса M2.5 (максимум потока рентгеновского излучения (1–8 Å) составил $9.3 \cdot 10^{-5}$ Вт/м² в 03:54 UT) и X6.9 (поток $6.9 \cdot 10^{-4}$ Вт/м² в 08:05 UT).

Для описания зависимости величины внезапной фазовой аномалии Φ от потока интенсивности рентгеновского излучения P и от зенитного угла Солнца X в [Беленький и др., 2002] предложено эмпирическое аппроксимирующее выражение

$$\Phi = A + B \cdot \lg(P) + C \cdot \lg(\overline{\text{Cos}X}), \quad (1)$$

где Φ – вариация фазы сигнала, приведенная к единице протяженности трассы (градус/Мм); коэффициенты A , B и C имеют размерность градус/Мм; P – поток интенсивности рентгеновского излучения Солнца в диапазоне 1–8 Å в Вт/м²; $\overline{\text{Cos}X}$ – усредненное вдоль трассы распространения значение косинуса зенитного угла Солнца.

Для дневных условий распространения по данным регистрации в Якутске с 2009 по 2012 г. отобраны ВФА сигналов (14.9 кГц) краснодарской и новосибирской радиостанций. По значениям потока рентгеновского излучения P , зенитному углу Солнца X и приведенным к протяженности трассы максимальным отклонениям фазы сигналов (относительно невозмущенного значения) оценены параметры модели (1) для зимы и лета. Параметры A , B и C получены методом наименьших квадратов и пред-

ставлены в таблице, где также указаны погрешности оценок (стандартные отклонения), среднеквадратичное значение остаточных невязок S (градус/Мм) модельных и экспериментальных значений ВФА. Таким образом проведена адаптация модели (1) к условиям регистрации в Якутске. Данные о дате, времени солнечных вспышек и о потоке рентгеновского излучения взяты из [http://www.thesis.lebedev.ru/sun_flares.html]. Зенитный угол Солнца по заданным координатам на трассах распространения вычислялся с помощью алгоритма, описанного в [<http://stjarnhimlen.se/comp/tutorial.html>].

На рис. 2 представлено сравнение модельных значений ВФА с экспериментальными данными. Близкое сосредоточение полученных значений около прямой $\text{ВФА(модель)} = \text{ВФА(эксперимент)}$, возможность описания значений линейным трендом ($R^2 > 0.9$), малая стандартная погрешность (не превышает 2.5°) позволяют судить об адекватности выбранной модели ВФА и полученных оценок ее параметров.

Рассмотренные внезапные фазовые аномалии сигналов станций Краснодар и Новосибирск (14.9 кГц) отдельно для летних и зимних дневных условий при регистрации в Якутске показали, что пороговая чувствительность ВФА по потоку P (отношение параметров A и B) слабо зависит от сезона. Значения отклонений фазы сигнала при фиксированных P и X от лета к зиме на рассмотренных радиотрассах увеличиваются. Зависимость ВФА от $\text{Cos}(X)$ на трассе Новосибирск–Якутск отчетливой летом. На трассе Краснодар–Якутск ВФА отчетливо зависят от $\text{Cos}(X)$ зимой, что связано с большей протяженностью трассы по долготе и расположением в более высоких широтах. В [Каримов и др., 2012] показано, что сезонные вариации фазы в дневных спокойных условиях наиболее выражены, что связано с повышением эффективности ионизации области D ионосферы от зимы к лету, уменьшением зенитного угла Солнца над трассой распространения сигнала, следствием чего является повышение градиента электрон-

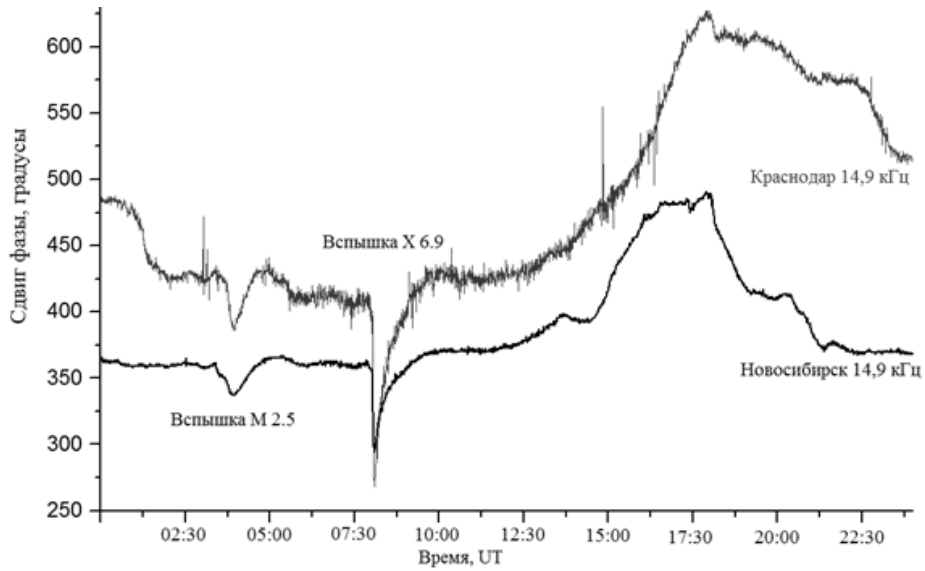


Рис. 1. Внезапные фазовые аномалии в суточном ходе фазы сигналов станций Краснодар и Новосибирск (14,9 кГц) в Якутске (солнечные вспышки класса M2.5 в 03:54 UT и X6.9 в 08:05 UT 9.08.2011 г.).

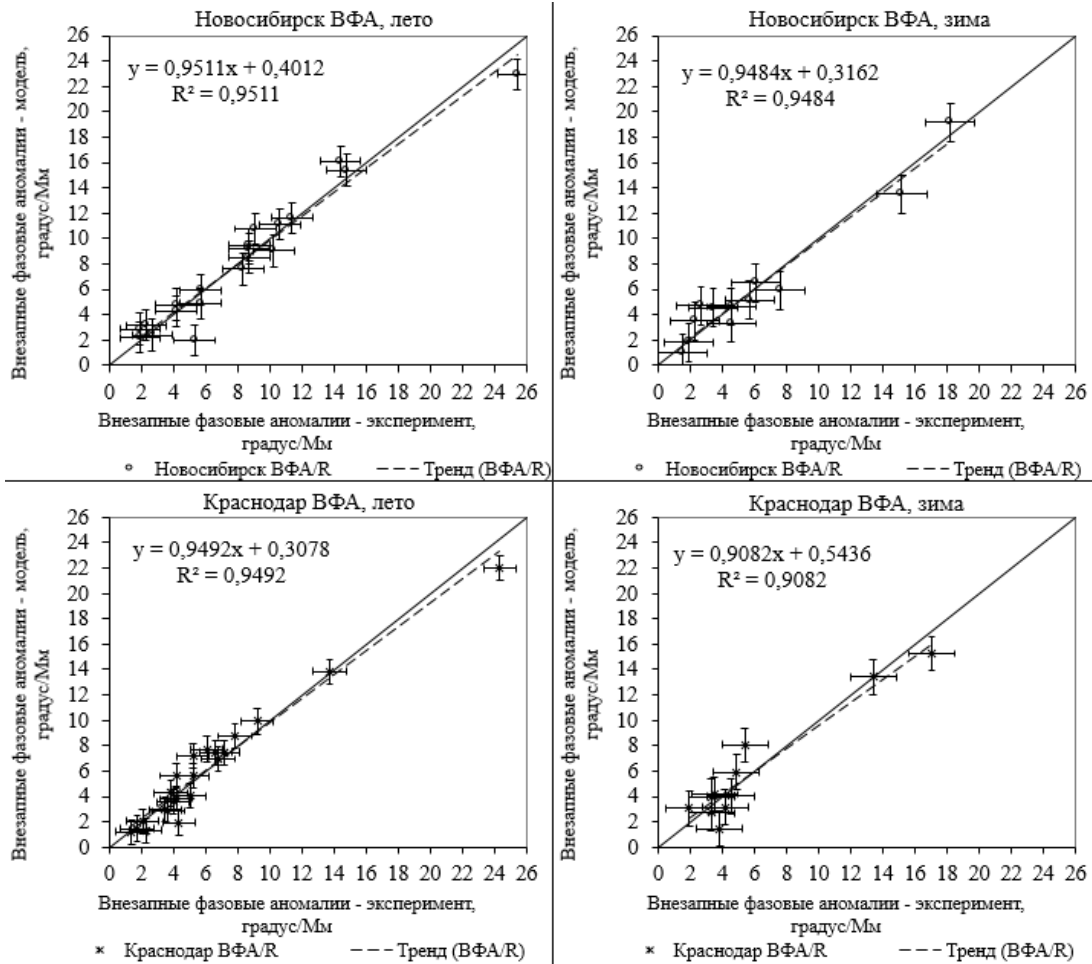


Рис. 2. Сравнение модельных значений внезапных фазовых аномалий с экспериментальными данными.

Трасса	Сезон	Объем выборки	A	B	C	S
Новосибирск–Якутск	лето	20	54.58±2.58	9.12±0.53	11.29±2.57	1.31
	зима	12	68.83±6.47	11.35±0.96	9.01±3.41	1.33
Краснодар–Якутск	лето	23	50.92±2.33	8.69±0.46	8.08±1.25	1.14
	зима	11	77.38±8.14	11.82±1,60	19.47±5.69	1.61

ной концентрации нижней ионосферы. Внезапное ионосферное возмущение есть резкое повышение градиента концентрации электронов, поэтому ВФА отчетливее в зимний период, когда в невозмущенных условиях градиент концентрации невелик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Беленький М.И., Орлов А.Б., Пронин А.Е., Уваров А.Н. О зависимости величины ВФА СДВ от зенитного угла Солнца на протяженных трассах в различных широтах // Труды VIII региональной конференции по распространению радиоволн. Санкт-Петербург, 2002. С. 25.

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

Лаборатория рентгеновской астрономии Солнца, ФИАН [Электронный ресурс]. URL: http://www.thesis.lebedev.ru/sun_flares.html (дата обращения 19.04.2013).

Schlyter P. Computing planetary positions – a tutorial with worked examples [Электронный ресурс]. URL: <http://stjarnhimlen.se/comp/tutorial.html> (дата обращения 19.04.2013).

Институт космических исследований и астрономии им. Ю.Г. Шафара СО РАН, Якутск, Россия