

Адаптация параметров модели внезапных фазовых аномалий ОНЧ сигналов радиостанций на трассах Новосибирск – Якутск и Краснодар – Якутск

В.И. Козлов^{1,2}, А.А. Корсаков¹, Р.Р. Каримов^{1,2}, В.А. Муллаяров^{1,2}

¹*Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН
Якутск, 677980, Россия*

E-mail: vkozlov@ikfia.sbras.ru

²*Северо-Восточный Федеральный университет им. М.К. Аммосова
Физико-технический институт
Якутск, 677000, Россия*

Рассматриваются зарегистрированные в Якутске вариации фазы и внезапные фазовые аномалии (ВФА) сигналов радионавигационных станций Новосибирск и Краснодар на частоте 14,9 кГц для летних и зимних дневных условий распространения в период 2009 – 2013 гг. Для описания зависимости величины внезапных фазовых аномалий от потока интенсивности рентгеновского излучения (0,1 - 0,8 нм) и от зенитного угла Солнца используется эмпирическое аппроксимирующее выражение множественной линейной регрессии. Для трасс Новосибирск – Якутск и Краснодар – Якутск оценены параметры модели в зимний и летний сезоны. Показано, что пороговая чувствительность ВФА по потоку рентгеновского излучения на обеих трассах слабо зависит от сезона. Отклонение фазы при фиксированных значениях потока рентгеновского излучения и зенитного угла Солнца от лета к зиме на рассматриваемых трассах увеличивается. Зависимость ВФА на трассе Новосибирск – Якутск от зенитного угла Солнца отчетливей в летний период. Зависимость ВФА на трассе Краснодар – Якутск от зенитного угла Солнца менее четкая зимой, из-за особых условий распространения (большой интервал по долготе и пересечение высоких широт дугой трассы распространения). Проведено сравнение расчетных значений по модели внезапных фазовых аномалий с экспериментальными данными для рентгеновских вспышек. Возможность описания значений линейным трендом (коэффициент детерминации во всех случаях превышает 0,64), малая стандартная погрешность, не превышающая 1,77°/Мм (сигнал Новосибирск) и 2,5°/Мм (сигнал Краснодар) указывают на адекватность выбранной модели ВФА и полученных оценок ее параметров. Для дневных условий распространения оценен поток рентгеновского излучения по вариациям фазы на основе регистрации в Якутске сигналов ОНЧ радиостанции Новосибирск для отдельных дней. Поток, рассчитанный по модели, близок со вспышечным значением излучения (данные GOES-15). При отсутствии возмущений на трассе модельные данные о потоке рентгеновского излучения и данные со спутника находятся в хорошем соответствии. В ночных условиях распространения радиоволн это соответствие нарушается.

Ключевые слова: солнечная вспышка, распространение радиоволн, D область ионосферы, внезапная фазовая аномалия.

Введение

Во время солнечных вспышек происходит увеличение интенсивности рентгеновского излучения, являющегося основным источником ионизации нижней ионосферы (D область: 60 – 85 км). Этот процесс приводит к повышению электронной концентрации. Такие резкие изменения приводят к внезапным фазовым аномалиям (ВФА) при регистрации электромагнитных сигналов диапазона очень низких частот (ОНЧ: 3 – 30 кГц), способных распространяться на большие расстояния в волноводе земля – ионосфера (Митра, 1977).

Величина фазовых задержек регистрируемых сигналов при ВФА зависит от потока рентгеновского излучения, протяженности трассы распространения, зенитного угла Солнца и широтно-долготного положения передатчика и приемника. При распространении ОНЧ радиосигналов в волноводе земля-ионосфера, на фазовую задержку влияет и интерференция сигнала. Однако, принимая сигналы на частотах ниже 15 кГц с расстояний более 2500 км, эффектом многомодовости можно пренебречь (Орлов, Азарнин, 1970), так как в таких условиях характер фазовых задержек для солнечных вспышек различного класса становится монотонным, что и указывает на преобладание одной моды.

Для описания зависимости величины внезапной фазовой аномалии от интенсивности потока рентгеновского излучения и от усредненного вдоль трассы распространения косинуса зенитного угла Солнца известны различные эмпирические аппроксимирующие выражения, например, (Демькин, Кишук, 1982). Предложенная зависимость успешно использовалась при обработке данных ВФА для построения модели нижней ионосферы в условиях внезапных ионосферных возмущений (Орлов, Пронин, Уваров, 1998).

Методика

Для описания зависимости величины внезапной фазовой аномалии с разделением влияния потока интенсивности рентгеновского излучения и зенитного угла Солнца (освещенности трассы и поглощение ионизирующего излучения Солнца в верхней части атмосферы) предложено следующее эмпирическое аппроксимирующее выражение (Беленький и др., 2002) :

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

где Φ – вариация фазы ОНЧ сигнала, приведенная к единице протяженности трассы (градус/Мм); P – поток интенсивности рентгеновского излучения Солнца в диапазоне 1 – 8 Å [Вт/м²]; $\cos X$ – усредненное вдоль трассы распространения значение косинуса зенитного угла Солнца (X), вычисляемое усреднением зенитных углов в районе передатчика, приемника и на середине трассы.

В Якутске регистрируются сигналы станций радиотехнической системы дальней навигации РСДН-20 (Альфа). Сигналы принимаются на электрическую штыревую антенну. Привязка к абсолютному времени и высокостабильная частота дискретизации АЦП, необходимые для регистрации фазы радиосигналов и запуска сбора данных в соответствии с режимом работы радиостанций, организованы при помощи GPS часов. Более подробно методика регистрации сигналов РСДН-20 в Якутске описана в (Каринов и др., 2012).

Для условий, когда зенитный угол Солнца не превышает 90° в районе расположения передатчика и приемника (дневные условия распространения), по данным регистрации в г. Якутске с 2009 по 2013 гг. отобраны ВФА сигналов (14,9 кГц) радиостанций Новосибирск и Краснодар для рентгеновских вспышек класса C4 и выше. Протяженность трасс распространения сигналов радиостанций Новосибирск и Краснодар составляет 2,638 Мм и 5,758 Мм, соответственно. 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 (декабрь – февраль) и лета (июнь – август).

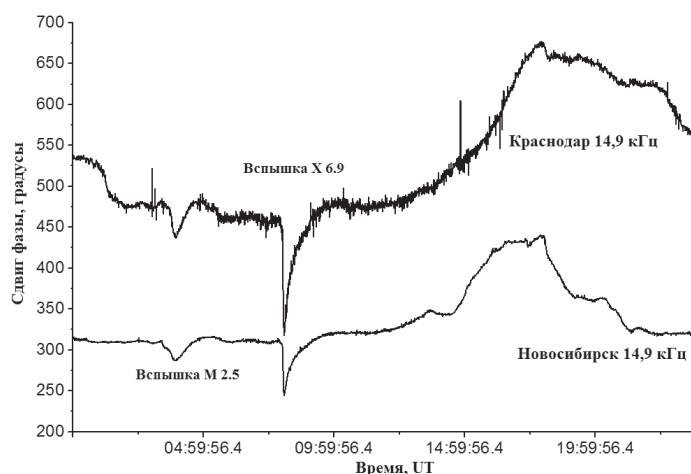


Рис. 1. Внезапные фазовые аномалии в суточном ходе фазы сигналов радиостанций Краснодар и Новосибирск (14,9 кГц), принимаемых в Якутске (солнечные вспышки класса M2.5 03:54 UT и X6.9 08:05 UT 9.08.2011)

Экспериментальные данные и анализ

На рис. 1 представлен пример ВФА в суточном ходе фазы сигналов краснодарской и новосибирской радиостанций, принимаемых в Якутске 9 августа 2011 года на частоте 14,9 кГц. Причинами рассмотренных эффектов явились солнечные вспышки M2.5, (максимум потока рентгеновского излучения [1-8 Å] составил $2,5 \times 10^{-5}$ Вт/м² в 03:54 UT) и X6.9 (поток $6,9 \times 10^{-4}$ Вт/м² в 08:05 UT).

По отобранным событиям ВФА сигналов (14,9 кГц) радиостанций Новосибирск и Краснодар с 2009 по 2013 гг., значениям потока рентгеновского излучения P , зенитному углу Солнца X методом наименьших квадратов оценены параметры A , B и C модели (1) Коэффициенты A , B и C представлены в табл. 1, где также указаны погрешности их оценок (стандартные отклонения), среднеквадратичное значение остаточных невязок S модельных и экспериментальных значений ВФА. Даты, время солнечных вспышек и величины потока рентгеновского излучения взяты по данным Лаборатории рентгеновской астрономии Солнца ФИРАН (http://www.thesis.lebedev.ru/sun_flares.html). Зенитный угол Солнца по заданным координатам на трассах распространения вычислялся с помощью алгоритма, описанного в (Schlyter, URL: <http://stjarnhimlen.se/comp/tutorial.html>).

Анализ показывает, что пороговая чувствительность ВФА по потоку рентгеновского излучения P (отношение A и B) на обеих трассах слабо зависит от сезона. Отклонение фазы при фиксированных значениях потока P и зенитного угла Солнца X от лета к зиме на рассматриваемых трассах увеличивается ($A_{лето} < A_{зима}$). Действительно, сезонные вариации фазы в дневных условиях наиболее выражены, что связано с повышением эффективности ионизации области D ионосферы от зимы к лету, уменьшению зенитного угла Солнца над трассой распространения сигнала, следствием чего является повышение градиента электронной концентрации нижней ионосферы (Альперт, 1972). Внезапное ионосферное возмущение есть резкое повышение градиента концентрации электронов, поэтому ВФА

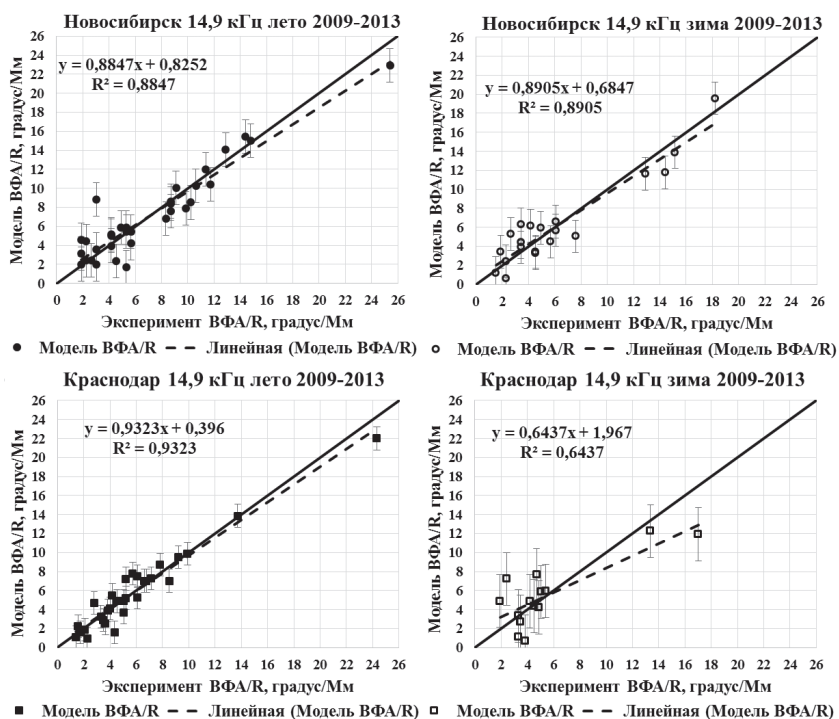


Рис. 2. Проверка на соответствие значений ВФА, рассчитанных по модели с зарегистрированными вариациями фазы при ВФА

отчетливее в зимний период, когда в невозмущенных условиях градиент концентрации невелик. Зависимость вариаций фазы (ВФА) на трассе Новосибирск-Якутск от $\cos(X)$ отчетливей летом ($C_{лето} = 6,06 > C_{зима} = 2,17$). Зависимость ВФА на трассе Краснодар-Якутск от $\cos(X)$ менее четкая зимой, из-за распространения вдоль большого интервала по долготе дуга трассы пересекает высокие широты. В данный период усредненный зенитный угол Солнца на трассе велик, что также отразилось в меньшем объеме выборки и величине дисперсии коэффициента $C_{зима}$.

На рис. 2 представлено сопоставление расчетных значений по модели внезапных фазовых аномалий с экспериментальными данными. Близкое сосредоточение полученных значений около прямой $ВФА(модель) = ВФА(эксперимент)$, возможность описания значений линейным трендом (коэффициент детерминации R^2 во всех случаях превышает 0,64), малая стандартная погрешность, не превышающая 1,77°/Мм (сигнал Новосибирск) и 2,5°/Мм (сигнал Краснодар) позволяют судить об адекватности выбранной модели ВФА и полученных оценок ее параметров.

Таблица 1. Параметры модели ВФА

Трасса	Сезон	Объём выборки	A	B	C	S
Новосибирск-Якутск	лето	33	53,67±3,08	9,26±0,62	6,06±3,02	1,77
	зима	20	60,97±5,03	10,78±0,93	2,17±1,75	1,71
Краснодар-Якутск	лето	30	51,14±2,36	8,87±0,47	5,85±2,23	1,19
	зима	14	64,64±13,31	11,56±2,64	2,45±3,22	2,77

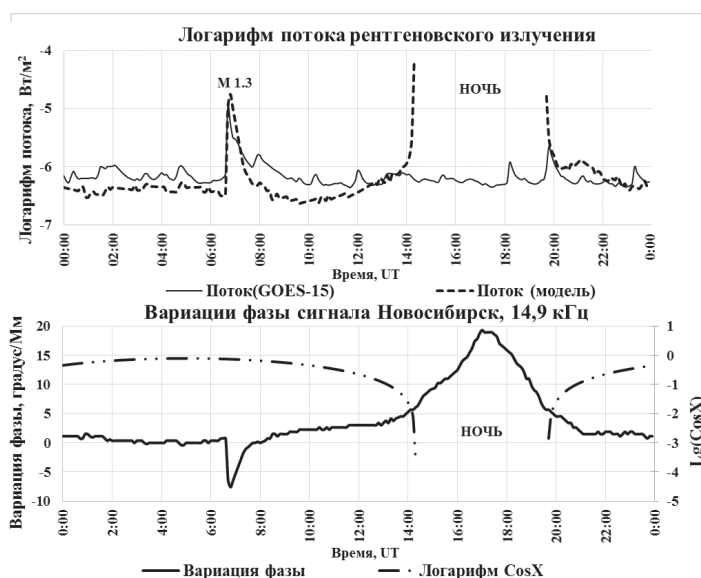


Рис. 3. Сравнение данных о потоке рентгеновского излучения (GOES-15) с потоком, полученным на основе модели по имеющимся вариациям фазы сигнала станции Новосибирск (10 июня 2012 г.)

На основе модели (1) для дневных условий распространения вариации фазы сигнала на частоте 14,9 кГц радиостанции Новосибирск (с усреднением 6 минут) были сопоставлены с потоком (также с усреднением 6 минут) рентгеновского излучения (NOAA National geophysical data center. Solar-Terrestrial Physics. URL: http://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/new_full/) и усредненного вдоль трассы распространения косинуса зенитного угла солнца. В каждом анализируемом сутках вариации фазы отсчитывались относительно значения, соответствующего времени минимального зенитного угла солнца на середине трассы, с последующим приведением к протяженности трассы распространения (протяженность трассы Новосибирск – Якутск составляет 2,638 Мм). Анализируемые данные были разделены на летний (июнь-август) и зимний (декабрь-февраль) сезоны. На основе регрессионного анализа по методу наименьших квадратов были получены усредненные для сезонов коэффициенты $A1$, $B1$ и $C1$. Параметры модели (1) представлены в табл. 2, где также указаны стандартные отклонения регрессионных коэффициентов, среднеквадратичные значения остаточных невязок $S1$ модельных и экспериментальных значений приведенных вариаций фазы.

По представленным в табл. 2 коэффициентам модели (1) решалась обратная задача: по вариациям фазы на основе регистрации сигналов ОНЧ радиостанции Новосибирск в Якутске для отдельных суток оценивался поток рентгеновского излучения.

Таблица 2. Параметры модели вариаций фазы

Трасса	Сезон	Объём выборки	$A1$	$B1$	$C1$	$S1$
Новосибирск-Якутск	лето	820	$-31,10 \pm 0,92$	$-4,81 \pm 0,15$	$-4,83 \pm 0,32$	1,60
	зима	322	$-21,67 \pm 1,43$	$-3,03 \pm 0,20$	$-5,08 \pm 0,53$	1,59

На *рис. 3* представлен пример оценки потока рентгеновского излучения, полученного по вариациям фазы сигнала 10 июня 2012 года и сравнение с данными о потоке, полученными со спутника GOES-15. Поток, рассчитанный по модели, близок со вспышечным значением излучения, полученным со спутника (вспышка класса M1.3, проявившаяся в вариациях фазы радиосигнала в 06:42 UT). Модель хорошо описывает фронт и спад вспышечного потока. Как видно из *рис. 3*, при освещенной солнцем трассе, даже во время отсутствия возмущений, совпадение модельных данных о потоке с данными со спутника имеет удовлетворительную оценку. Как следовало ожидать, в период 14 – 20 UT, когда солнце не освещало трассу Новосибирск – Якутск (ночные условия распространения радиоволн) соответствие оценки потока излучения со спутниковыми данными нарушается.

Заключение

При рассмотрении зарегистрированных в Якутске вариаций фазы и внезапных фазовых аномалий (ВФА) сигналов радионавигационных станций Новосибирск и Краснодар (14,9 кГц) для летних и зимних дневных условий распространения 2009-2013 гг. проведена оценка параметров модели (регрессионные коэффициенты) для зимы и лета для трасс Новосибирск – Якутск и Краснодар – Якутск. Показано, что пороговая чувствительность ВФА по потоку рентгеновского излучения P на обеих трассах слабо зависит от сезона. Отклонение фазы при фиксированных значениях потока P и зенитного угла Солнца X от лета к зиме на рассматриваемых трассах увеличивается. Зависимость ВФА на трассе Новосибирск-Якутск от зенитного угла Солнца X отчетливей в летний период. Зависимость ВФА на трассе Краснодар-Якутск от зенитного угла Солнца X менее четкая зимой из-за особых условий на трассе распространения (большой интервал по долготе и пересечение дуги трассы высоких широт).

Проведено сравнение расчетных значений по модели ВФА с экспериментальными данными для отдельных рентгеновских вспышек. Возможность описания значений линейным трендом (коэффициент детерминации R^2 во всех случаях превышает 0,64), малая стандартная погрешность, не превышающая $1,77^\circ/\text{Мм}$ (сигнал Новосибирск) и $2,5^\circ/\text{Мм}$ (сигнал Краснодар), позволяет судить об адекватности выбранной модели ВФА и полученных оценок ее параметров.

По вариациям фазы ОНЧ сигналов радиостанции Новосибирск для отдельных суток оценен поток рентгеновского излучения. Поток, рассчитанный по модели, близок со вспышечным значением излучения, полученным со спутника GOES-15. При освещенной солнцем трассе, даже во время отсутствия возмущений, совпадение модельных данных о потоке с данными со спутника имеет хорошее соответствие. В ночных условиях распространения радиоволн соответствие оценки потока излучения со спутниковыми данными нарушается, что говорит о работоспособности модели только для освещенной Солнцем трассы.

Проведена адаптация параметров зависимости вариаций фазы ОНЧ сигналов от потока рентгеновского излучения и зенитного угла Солнца на трассе Краснодар – Якутск во время внезапных фазовых аномалий, а также на трассе Новосибирск – Якутск как во время внезапных фазовых аномалий, так и в спокойных условиях.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проекты № 15-45-05005-р_восток_a, № 15-45-05017-р_восток_a, № 14-05-31056 мол_a, а также гранта «Научно-образовательный фонд поддержки молодых ученых Республики Саха (Якутия)» № 2014-01-0015.

Литература

1. Альперт Я. Л. Распространение электромагнитных волн и ионосфера. Изд. 2-е, переработанное и дополненное. М.: Наука, 1972. 564 с.
2. 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.
3. Демькин С.М., Кищук В.П. // Тезисы докладов VIII межведомственного семинара по распространению километровых и более длинных волн. Омск. 1982. С. 17.
4. 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.
5. Лаборатория рентгеновской астрономии Солнца, ФИАН [Электронный ресурс]. URL: http://www.thesis.lebedev.ru/sun_flares.html (дата обращения 12.03.2014).
6. Митра А. Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли. М.: Мир. 1977. 370 с.
7. Орлов А.Б., Азарнин Г.В. Основные закономерности распространения сигналов СДВ-диапазона в волноводном канале Земля – ионосфера // Проблемы дифракции и распространения волн: сб. ст. Л.: Изд-во ЛГУ, 1970. Вып. X. С. 3–107.
8. Орлов А.Б., Пронин А.Е., Уваров А.Н. Широтная зависимость эффективного коэффициента потерь электронов в дневной нижней ионосфере по данным о вариациях фазы СДВ-полей и риометрического поглощения при ВИБ // Геомагнетизм и аэронавигация. 1998. Т. 38. № 3. с.102-110.
9. NOAA National geophysical data center. Solar-Terrestrial Physics [Электронный ресурс]. URL: http://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/new_full/ (дата обращения 12.03.2014).
10. Schlyter P. Computing planetary positions - a tutorial with worked examples [Электронный ресурс]. URL: <http://stjarnhimlen.se/comp/tutorial.html> (дата обращения 19.04.2013).

Sudden phase anomalies adapting of VLF signals of radio stations on the Novosibirsk – Yakutsk and Krasnodar – Yakutsk propagation paths

V.I. Kozlov^{1,2}, A.A. Korsakov¹, R.R. Karimov^{1,2}, V.A. Mullayarov^{1,2}

¹*Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS
Yakutsk 677980, Russia*

E-mail: vkozlov@ikfia.sbras.ru

²*Physical-Technical Institute of M.K. Ammosov North-Eastern Federal University
Yakutsk 677000, Russia*

The phase variations and sudden phase anomalies (SPA) of signals (14.9 kHz) of Novosibirsk and Krasnodar radio navigation stations registered in Yakutsk in 2009 – 2013 for summer and winter daytime propagation conditions are considered. To describe the dependence of the sudden phase anomalies on X-ray flux intensity (0.1 - 0.8 nm) and the solar zenith angle empirical approximated expression of multiple linear regression is used. The model parameters for paths Novosibirsk - Yakutsk and Krasnodar - Yakutsk for winter and summer are estimated. It is shown that the threshold sensitivity of SPA by X-ray flux on both paths is weakly dependent on the season. The phase deviation for fixed values of the X-ray flux and solar zenith angle from summer to winter on the paths increases. For the path Novosibirsk – Yakutsk, SPA dependence on the solar zenith angle is clear in summer. For the path Krasnodar – Yakutsk, SPA dependence on

the solar zenith angle is less clear in winter, due to specific propagation conditions (large range of longitude and high-latitude VLF propagation). A comparison of the calculated values of SPA model with experimental data for X-ray flares is presented. The possibility of describing the values of the linear trend (the coefficient of determination greater than 0.64), low standard error not exceeding $1.77^\circ/\text{Mm}$ (Novosibirsk) and $2.5^\circ/\text{Mm}$ (Krasnodar) indicate the adequacy of the SPA model and the obtained estimates of the model parameters. For daytime VLF propagation, the X-ray flux variations based on phase of Novosibirsk signals registered in Yakutsk for individual days are estimated. The X-ray flux calculated by the model is close to the value of the flare radiation (GOES-15 data). For unperturbed conditions, model X-ray flux data agree well with satellite data. For nighttime propagation conditions, this correspondence is broken.

Keywords: solar flare, radio wave propagation, ionosphere D region, sudden phase anomalies.

References

1. Al'pert Ya. L., *Rasprostraneniye elektromagnitnykh voln i ionosfera* (Electromagnetic waves propagation and the ionosphere), Moscow: Nauka, 1972, 564 p.
2. Belen'kii M.I., Orlov A.B., Pronin A.E., Uvarov A.N., O zavisimosti velichiny VFA SDV ot zenitnogo ugla Solntsa na protyazhennykh trassakh v razlichnykh shirotakh (SPA dependence on the Solar zenith angle on great VLF propagation paths in different latitudes), *VIII regional'naya konferentsiya po rasprostraneniyu radiovoln* (VIII Regional Conference on Radiowave Propagation), Proc. Conf., Saint-Petersburg, 2002, p. 25.
3. Demykin S.M., Kishchuk V.P., *VIII mezhdomeystvennyi seminar po rasprostraneniyu kilometrovyykh i bolee dlinnykh voln* (Interagency Workshop on Kilometer and Longer Wavelengths Propagation), Abstracts of Papers, Omsk, 1982, p. 17.
4. Karimov R.R., Kozlov V.I., Korsakov A.A., Mullayarov V.A., Mel'chinov V.P., Variatsii parametrov signalov radionavigatsionnykh stantsii, registriruemykh v Yakutske v diapazone ochen' nizkikh chastot (Variations of very low frequency signal parameters of radio navigation stations, registered in Yakutsk), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 4, pp. 57-62.
5. http://www.thesis.lebedev.ru/sun_flares.html.
6. Mitra A., *Vozdeistvie solnechnykh vspyshek na ionosferu Zemli* (Ionospheric effects of Solar flares), Moscow: Mir, 1977, 370 p.
7. Orlov A.B., Azarnin G.V., Osnovnyye zakonomernosti rasprostraneniya signalov SDV-diapazona v volnovodnom kanale Zemlya – ionosfera (Basic consistent pattern of VLF signal propagation in the Earth - Ionosphere waveguide), *Problemy diffraksii i rasprostraneniya voln* (Problems of Diffraction and Wave Propagation): Book of articles, Leningrad: Izd-vo LGU, 1970, Issue X, pp. 3–107.
8. Orlov A.B., Pronin A.E., Uvarov A.N., Shirot'naya zavisimost' effektivnogo koeffitsienta poter' elektronov v dnevnoi nizhnei ionosfere po dannym o variatsiyakh fazy SDV-polei i riometricheskogo pogloshcheniya pri VIV (Latitude dependence of the effective electron loss coefficient in the daytime lower ionosphere from the data on variations in the phase of VLF fields and riometer absorption during SID), *Geomagnetizm i aeronomiya*, 1998, Vol. 38, No. 3, pp. 102-110.
9. http://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/new_full/.
10. Schlyter P., Computing planetary positions - a tutorial with worked examples, available at: <http://stjarnhimlen.se/comp/tutorial.html>.