

Статистическое распределение фазы сигнала ОНЧ-диапазона при внезапных ионосферных возмущениях

В.И. Нестеров

Тихоокеанский государственный университет
680035, Российская Федерация, г. Хабаровск
ул. Тихоокеанская, 136

Рассматривается влияние внезапных ионосферных возмущений на фазу принимаемого сигнала. Экспериментальные данные получены по приемам фазы сигналов радионавигационной системой «Омега» (диапазон частот от 10 до 14 кГц) относительно эталонного генератора вторичного эталона времени и частоты. Трассы различной длины и ориентации. Показано, что отклонение фазы принимаемого сигнала подчиняется распределению Пуассона.

Ключевые слова: ОНЧ-диапазон, частота сигнала, внезапное ионосферное возмущение, распределение Пуассона.

Введение

Исследование распространения радиоволн ОНЧ-диапазона (частоты $5 \div 30$ кГц) важно как в невозмущенных, так и в аномальных условиях, поскольку они широко используются в дальней радиосвязи, в системах навигации. Поле ОНЧ-диапазона сравнительно мало подвержено вариациям от трудно предсказуемых гелиофизических явлений, так как на формирование поля влияет только нижняя часть ионосферы (до $60 \div 90$ км), структура которой обладает относительно высокой стабильностью.

Распространение электромагнитных колебаний ОНЧ-диапазона происходит в волноводном канале Земля – ионосфера, где определяющими параметрами являются концентрация электронов $N(z)$ и эффективная частота соударений электронов с нейтральными молекулами $\nu(z)$. Электрические свойства поверхности Земли при $\sigma_g > (2 \div 5) \cdot 10^{-3}$ мо/м относительно мало влияют на характеристики поля [1; 2]. Модель ионосферы, разработанная на данный момент [3], соответствуют невозмущенным условиям распространения.

Во время бури состояние ионосферы зависит от большего числа переменных, таких как местное время, геомагнитная широта, сезон, солнечная активность, время начала бури, время бури (время, прошедшее с начала бури), интенсивность бури и предбуриевой активности (большие бури редко изолированы) [4]. При сол-

нечных вспышках, в результате увеличения интенсивности жесткого рентгеновского излучения, наблюдается резкое изменение ионизации в нижней ионосфере, сопровождаемое нагревом атмосферы, что может вызвать генерацию акустико-гравитационных волн. Максимальное поглощение энергии рентгеновского излучения при солнечной вспышке происходит на высотах 60–100 км [5].

Для физики верхней атмосферы наибольший интерес представляет рентгеновское излучение с длинами волн короче 8 \AA , которое пренебрежимо мало в спокойных условиях, но является основным источником ионизации в области D во время вспышек [6–8].

В последнее время значительное внимание уделяется анализу данных о распространении радиоволн ОНЧ-диапазона при внезапных ионосферных возмущениях, поскольку точность других методов оценки профилей электронной концентрации на высотах ниже 60–65 км с уменьшением высоты падает [9].

В данной статье приведена доказательная база по подчинению отклонения фазы принимаемого сигнала во время внезапных ионосферных возмущений распределению Пуассона. Как отмечалось в работе [8], модель считается построенной, если позволяет прогнозировать вариации плотности вероятности распределения заданных радиофизических параметров при изменении внешних условий.

1. Техническое обеспечение эксперимента

Основой для измерения фазы сигналов радионавигационной системы «Омега» относительно вторичного эталона времени и частоты является аппаратура, разработанная автором [10]. Эта аппаратура использовалась не только в метрологии для привязки эталонов времени и частоты, но также для исследования характеристик дальнего и ближнего полей радиоволн ОНЧ-диапазона. В табл. 1 приведены основные параметры трасс, на которых проводились измерения фазы сигналов радионавигационной системы «Омега». Такое расположение трасс позволяет фиксировать внезапные ионосферные возмущения в продолжительном интервале времени в течение суток. В данном случае, если рассматривать только две трассы: Гавайи – Хабаровск и Ля Реюньон – Хабаровск, то они охватывают значительную часть поверхности земного шара ($50^\circ \text{ E} - 150^\circ \text{ W}$) и в летнее время можно контролировать влияние рентгеновского излучения во время солнечных вспышек продолжительное время в течение суток т. к. угол между направлением распространения и линией терминатора (линия перехода день-ночь) близок к прямому. Трасса разбивалась на участки по 100 километров, определялся зенитный угол Солнца в каждой реперной точке и, если зенитный угол Солнца не превышал 95° (с учетом отражающего озонового слоя, что соответствует освещенной части трассы на высоте верхней стенки волновода порядка 60 км), тогда и выбирался освещенный участок трассы.

Изменения фазы принимаемого сигнала исследовано за период с 1981 г. по 1984 г., что соответствует 21 солнечному циклу, который начался в июне 1976 г. и закончился в сентябре 1986 г. Анализ проведен на значительном числе событий (от 50 до 500). Для выявления суточных, а также сезонных зависимостей фазы от различных факторов проведена обработка экспериментального материала. Результаты фазо-

вых измерений рассматривались как функция времени. Суточная фазовая кривая была принята за некоторая случайная одну реализацию случайной функции. Совместно обрабатывалось по 10 реализаций (изменение фазы принимаемого сигнала на суточном интервале). При этом отбрасывались явные аномалии фазы принимаемого сигнала. Затем совместно обрабатывалось по десять реализаций (декада), вычислялось отклонение фазы на суточном интервале от среднедекадного значения, которое соответствует спокойным условиям распространения. Аномальное значение отклонения фазы идентифицировалось в зависимости от вида возмущения.

2. Методика обработки экспериментальных данных

В работе [11] рассматривается гистограмма распределения отклонения фазы во время внезапных ионосферных возмущений на трассе GBR – Nairobi (длина трассы 6900 км, принимаемая частота – 16 кГц). Отмечается, что максимальное отклонение фазы достигает величины $\sim 250^\circ$ (что соответствует 69.4 сантицикла), а максимальное число отклонений фазы принимаемого сигнала приходится на 20° (~ 5.5 сц). При расчете полей на такое расстояние и для данной частоты необходимо учитывать многомодовый характер распространения сигналов.

Изменения фазы принимаемого сигнала носит сложный характер. Необходимо учитывать значительное число факторов, например, зенитный угол Солнца, географическое расположение трассы, интенсивность вспышечного потока рентгеновского излучения и т. д. В нашем случае мы рассматриваем только изменение фазы принимаемых сигналов от потока рентгеновского излучения во время вспышки без разделения зависимости от отдельных факторов.

В табл. 2 приведены коэффициенты корреляции между пиковыми значениями потока рентгеновского излучения в диапазоне 0.5–4 Å и соответствующими максимальными значени-

Таблица 1
Основные параметры трасс

Трасса распространения	Длина трассы, км	Азимут, град.	Рабочие частоты, кГц
Хабаровск – Япония	1600	14.9	10.2, 11.05, 13.6
Хабаровск – Гавайи	11000	41.3	10.2, 11.05, 13.6
Хабаровск – Ля Реюньон	6600	272.7	10.2, 11.05, 13.6
Хабаровск – Австралия	9700	352.2	10.2, 11.05, 13.6

Таблица 2

Коэффициент корреляции между пиковым значением потока рентгеновского излучения и величиной фазовой аномалии (ненормированные и нормированные значения)

Радиостанция	10.2 кГц		11.05 кГц		13.6 кГц	
	ненорм.	норм.	ненорм.	норм.	ненорм.	норм.
Япония	-0.56264	-0.56264	-0.57377	-0.57377	-0.39551	-0.38958
Австралия	-0.47470	-0.49774	-0.43945	-0.46548	-0.62088	-0.52206
Гавайи	-0.48991	-0.48427	-0.32338	-0.76180	-0.46907	-0.55011
Ля Реюньон	-0.27914	-0.44794	-0.33030	-0.33803	-0.40958	-0.52820

Таблица 3

Максимальные отклонения фазы принимаемых сигналов во время внезапных ионосферных возмущений для различных трасс и частот как ненормированных, так и нормированных значений

Радиостанция	10.2 кГц		11.05 кГц		13.6 кГц	
	ненорм. (сц)	норм. (сц/Мм)	ненорм. (сц)	норм. (сц/Мм)	ненорм. (сц)	норм. (сц/Мм)
Япония	5 (435)	3	3 (171)	2	8 (488)	5
Австралия	15 (141)	2	15-16 (109)	3	15 (205)	2
Гавайи	11 (363)	2	10 (48)	2	12 (313)	2
Ля Реюньон	14 (309)	2	17 (62)	2	14 (219)	1-2

ями отклонения фазы принимаемого сигнала для различных частот и трасс распространения. Данные приведены как для непосредственных изменений фазы (ненормированные), так и отнесенные на единицу длины (1 Мм) освещенного участка трассы распространения радиосигналов (нормированные). Знак минус у коэффициентов корреляции показывает, что при внезапных ионосферных возмущениях происходит опережение фазы, а сами значения коэффициентов корреляции малы. Если учитывать условия освещенности трассы (нормированные значения) значения коэффициентов корреляции увеличиваются, но незначительно. Условие нормировки является правомерным, т. к. в этом диапазоне частот и на таких расстояниях распространение сигналов носит одномодовый характер [1].

Для обеспечения чистоты исследования рассмотрено влияние протяженности трассы на величину принимаемого сигнала. Расположение трасс (табл. 1) предполагает, что событие может происходить, когда трасса освещена не полностью. В процентном отношении число случаев, когда трасса освещена частично к полному числу событий для разных трасс и частот составляет: трасса Австралия – Хабаровск – частота 10.2 кГц – 3.5 %, частота 11.05 кГц – 3.7 %, частота 13.6 кГц – 3.4 %; трасса Гавайи – Хаба-

ровск – 10.2 кГц – 19.0 %, 11.05 кГц – 25.0 %, 13.6 кГц – 14.4 %; трасса Ля Реюньон – Хабаровск – 10.2 кГц – 41.4 %, 11.05 кГц – 32.2 %, 13.6 кГц – 38.8 %. Высокий процент для трассы Гавайи – Хабаровск и Ля Реюньон – Хабаровск объясним географическим расположением этих трасс. В первом случае распространение сигналов происходит практически с востока на запад, во втором – с запада на восток, поэтому значительную часть суток на трассах наблюдаются условия переходного периода (переход день – ночь, либо ночь – день).

В табл. 3 приведены данные о максимальных отклонениях фазы принимаемых сигналов во время внезапных ионосферных возмущений для различных трасс и частоты, как ненормированных значений, так и нормированных (данные приведены для ненормированных в сантициклах (сц), для нормированных – сц/Мм). В скобках указано число анализируемых событий за 1981–1984 гг. на определенной частоте и трассе. Как следует из таблицы, нормированные значения имеют одну и ту же величину, что еще раз подтверждает необходимость проведения процедуры нормировки.

Распределение нормированных отклонений фазы во время внезапных ионосферных возмущений для различных трасс приведено на рис. 1.

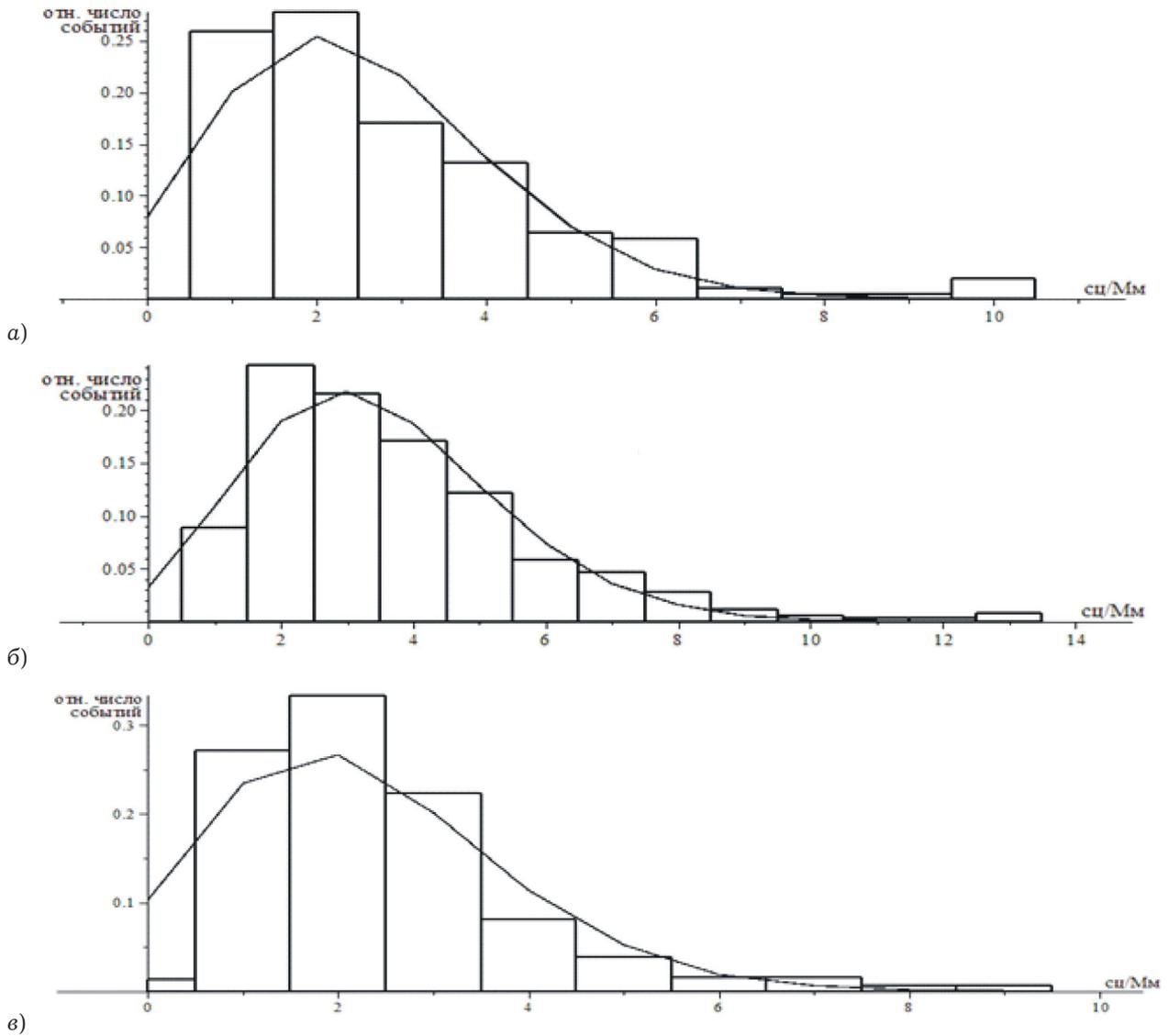


Рис. 1. Гистограммы распределения нормированных отклонений фазы для различных трасс: а) трасса Австралия – Хабаровск, частота 13.6 кГц; б) трасса Гавайи – Хабаровск, частота 10.2 кГц; в) трасса Ля Реюньон – Хабаровск, частота 10.2 кГц. Сплошная линия – распределение Пуассона

Таблица 4

Основные числовые характеристики распределения нормированной фазы принимаемого сигнала

	Япония			Гавайи		
	10.2	11.05	13.6	10.2	11.05	13.6
среднее	0.72116	0.75183	0.70276	0.73377	0.65742	0.70433
дисперсия	0.12531	0.10250	0.13136	0.11548	0.12480	0.11802
асимметрия	-0.070477	-1.31442	-0.90429	-1.13767	-0.78117	-0.99285
эксцесс	2.56724	3.42438	2.22443	2.77734	2.08441	2.49462
	Ля Реюньон			Австралия		
	10.2	11.05	13.6	10.2	11.05	13.6
среднее	0.75534	0.67473	0.73573	0.65091	0.62516	0.73925
дисперсия	0.10976	0.13706	0.11037	0.12363	0.13199	0.10373
асимметрия	-0.28787	-0.82858	-1.22363	-0.76381	-0.63111	-1.22395
эксцесс	3.16123	2.12853	3.02119	2.07135	1.85647	3.13407

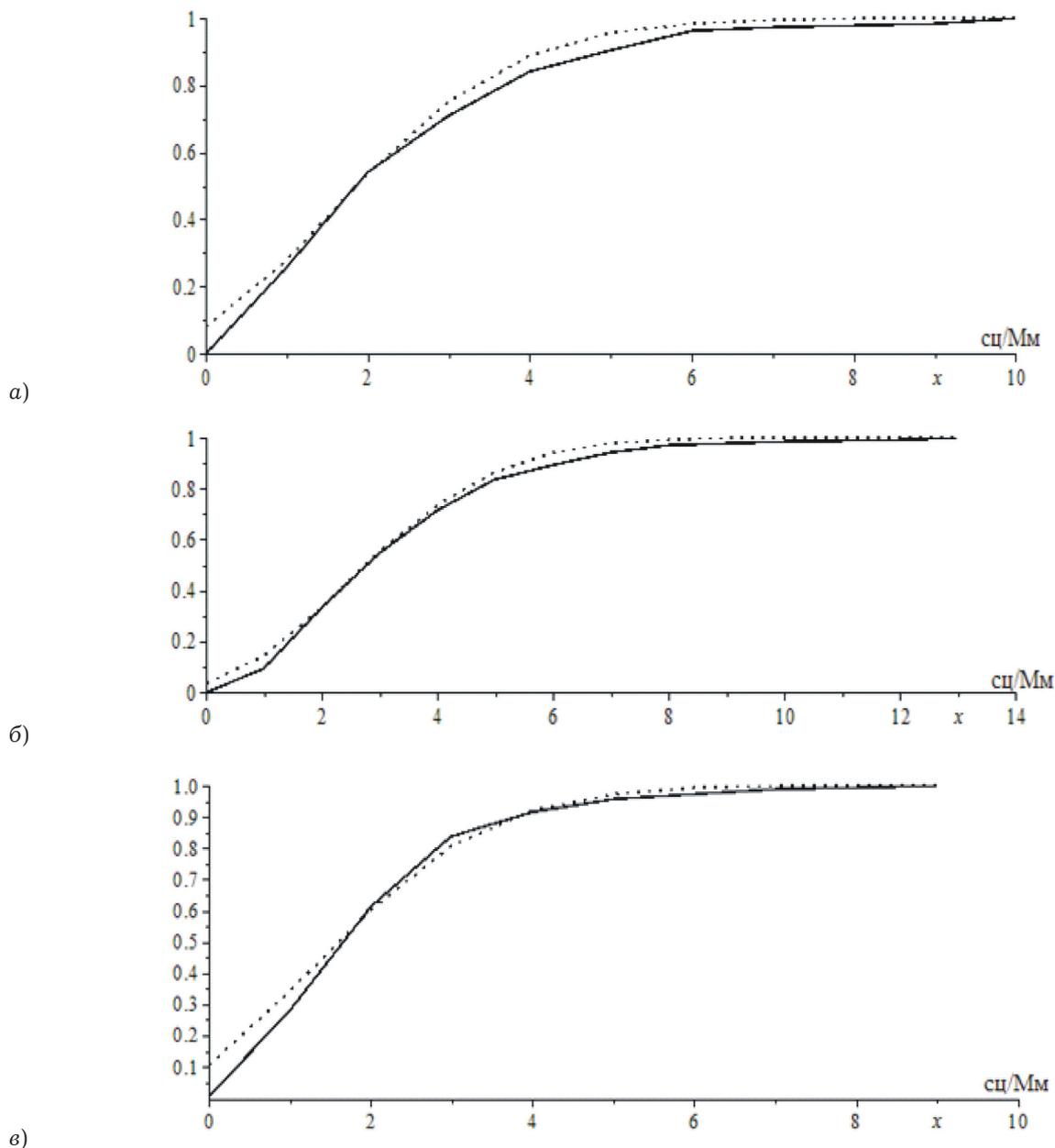


Рис. 2. Графики функции распределения Пуассона для трасс, как на рис. 1. Линия – теория, точки – эксперимент

Наблюдается хорошее соответствие между полученными гистограммами и распределением Пуассона, которое на рисунке показано сплошной линией.

В табл. 4 приведены основные числовые характеристики распределения нормированной фазы принимаемого сигнала. Как известно, асимметрия характеризует несимметричность распределения случайной величины, а эксцесс – частоту появления значений, удаленных от среднего значения. Из таблицы видно, что основные параметры дискретного распределения (среднее значение, дисперсия, асимметрия и эксцесс), если рассматривать каждую трассу в отдельности, хорошо согласуются между собой. Однако

необходимо отметить что, если рассматривать эти же параметры распределения от трассы к трассе, то появляется значительный разброс. Он проявляется в асимметрии и, особенно, в эксцессе, (изменяется от 1.856472 – для трассы Австралия – Хабаровск, до 3.424378 – для трассы Япония – Хабаровск). В обоих случаях частота принимаемого сигнала составляет 11.05 кГц. Обе трассы распространения проходят практически с юга на север. Различия в этих данных можно объяснить большей протяженностью трассы Австралия – Хабаровск и прохождением ее через геомагнитный экватор.

На рис. 2 представлены графики функции распределения Пуассона для различных трасс, как

Таблица 5

Сравнительные характеристики экспериментального и теоретического распределения Пуассона для нормированной фазы

	Япония			Гавайи		
	10.2	11.05	13.6	10.2	11.05	13.6
среднее	3.747204	3.968849	5.333723	3.7313789	3.060530	3.371843
λ	4.339230	3.398278	5.179768	3.440337	3.036912	2.995806
	Ля Реюньон			Австралия		
	10.2	11.05	13.6	10.2	11.05	13.6
среднее	2.491210	1.912448	2.149803	3.191484	2.671709	2.860739
λ	2.270007	1.936483	1.925193	2.938296	2.523836	2.538071

для экспериментальных данных, так и для теоретического распределения (трассы и частоты соответствуют рис. 1). Видно довольно хорошее соответствие между этими данными. Аналогичные данные получаются также для остальных трасс распространения и принимаемых частот.

Распределение Пуассона играет важную роль в ряде вопросов физики, теории связи, где в течение определенного времени может происходить случайное число каких-то событий. Распределение фазы подвержено распределению Пуассона, где функция вероятности задается следующим выражением [12]

$$P(k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}, \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

Одним из свойств этого распределения является то, что математическое ожидание (среднее значение) равно параметру λ . Поэтому представляет большой интерес рассмотрение сравнения параметра λ со средним значением отклонения фазы при внезапных ионосферных возмущениях, которое приведено в табл. 5 (данные приведены для нормированных значений). Критерием выбора параметра λ взята минимизация стандартного отклонения между функциями эмпирического распределения Пуассона (составленного из экспериментальных данных) и теоретическим распределением Пуассона (рис. 2). Как видно из табл. 5 величины средних значений отклонений фазы практически совпадают с параметром λ , что подтверждает нашу гипотезу о подчинении распределения Пуассона.

Заключение

Показано, что с помощью распределения Пуассона можно описать некоторые статистические модели нижней ионосферы, без разделения множества факторов, которые оказывают влияние

на распространение радиоволн ОНЧ-диапазона. Кроме того, статистические задачи вполне могут подходить для решения некоторых проблем, в первую очередь для уточнения модели распределения плотности электронов с высотой во время внезапных ионосферных возмущений.

Список литературы

1. Орлов А.Б., Азарнин Г.И. Основные закономерности распространения сигналов СДВ-диапазона в волноводном канале Земля – ионосфера // Проблемы дифракции и распространения волн: сб. научных статей. Вып. X. Л.: ЛГУ, 1970. С. 3–107.
2. Wait J.R., Spies K.P. Influence of finite ground conductivity on the propagation of VLF radiowaves // J. Res. NBS. 1965. Vol. 69D. № 10. P. 1359–1375.
3. ГОСТ Р 25645.157-94. Ионосфера Земли нижняя. Модель глобального распределения концентрации и эффективной частоты соударений электронов для прогнозирования низкочастотных радиополей. М.: Изд-во стандартов, 1995. 380 с.
4. Благовещенский Д.В. Влияние геомагнитных бурь/суббурь на ионосферу. Ч. I. (Обзор) // Геомагнетизм и аэронаука. 2013. Т. 53. № 3. С. 291–307.
5. Дорман Л.И., Козин И.Д. Космическое излучение в верхней атмосфере. М.: Наука, 1983. 152 с.
6. Митра А.П. Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли. М.: Мир, 1977. 370 с.
7. Смирнов В.М., Смирнова Е.В. Временные вариации ионосферы во время солнечной вспышки 28 октября 2003 г. по данным сети GPS // Геомагнетизм и аэронаука. 2005. Т. 45. № 1. С. 127–134.
8. Козлов С.И., Ляхов А.Н., Беккер С.З. Основные принципы построения вероятностно-статистических моделей ионосферы для решения задач распространения радиоволн // Геомагнетизм и аэронаука. 2014. Т. 54. № 6. С. 767–779.
9. Орлов А.Б., Уваров А.Н. Модель нижней ионосферы для полуденных спокойных условиях и условий внезапных

-
- ионосферных возмущений по данным о распространении СДВ // Геомагнетизм и аэрономия. 2011. Т. 51. № 1. С. 80–89.
10. Нестеров В.И. Исследование и диагностика геофизических возмущений по данным приема дальнего СДВ-поля. Хабаровск: ТОГУ, 2013. 155 с.
11. Burgess B., Jones T.B. Solar flare effects and VLF radio wave observations of the lower ionosphere // Radio Science. 1967. Vol. 2. № 6. P. 619–626.
12. Тюрин Ю.Н., Макаров А.А. Анализ данных на компьютере. Изд 3-е, перераб. и доп. / под ред. В.Э. Фигурнова. М.: Инфра-М, 2002. 528 с.
-

Statistical distribution of the signal phase of VLF-range at sudden ionospheric disturbances

V.I. Nesterov

Influence of sudden ionospheric disturbances on the phase of the accepted signal is considered. Experimental data are obtained on receptions of signal phases by the radio navigational system «Omega» (frequency range from 10 to 14 kHz) with respect to a reference generator of a secondary standard of time and frequency. Routes of various length and orientation. It is shown that the deviation of the phase of the accepted signal obeys to Poisson's distribution.

Keywords: VLF-range, signal frequency, sudden ionospheric disturbances, Poisson's distribution.
