

Сравнительный анализ данных о внезапных ионосферных возмущениях

В.И. Нестеров

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

Рассмотрено влияние внезапных ионосферных возмущений на фазу принимаемого сигнала на четырех трассах. Экспериментальные данные получены по приемам фазы сигналов радионавигационной системой «Омега». Трассы практически одинаковой длины. Передатчики расположены в двух точках. Показано, что отклонение фазы принимаемого сигнала подчиняется распределению Пуассона. Необходимо учитывать сезонные вариации электронной плотности.

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. Во время вспышки Солнце представляет собой мощный источник рентгеновского и ультрафиолетового излучений, а также потока частиц с широким спектром энергий, в том числе космических лучей ($E \sim 1$ ГэВ), субрелятивистских протонов с энергиями от 1 до 1000 МэВ, движущихся по спирали вдоль силовых линий геомагнитного поля и достигающих полярных областей за время от 80 мин до 4 ч, и облаков ионов и электронов с меньшими энергиями, которые попадают на Землю через 20–40 ч [1]. Увеличение интенсивности рентгеновского излучения, наблюдаемое во время хромосферных вспышек, немедленно вызывает возрастание электронной концентрации в ионосфере.

Рентгеновское излучение вспышек разделено на два диапазона: низкоэнергетичный – мягкое рентгеновское излучение с длинами волн более 1 \AA и энергиями менее 12 кэВ (этот диапазон представляет наибольший интерес при исследовании внезапных ионосферных возмущений) и высокоэнергетичный – жесткое рентгеновское излучение с $\lambda < 1 \text{ \AA}$ и энергиями выше 12 кэВ. Такое изменение спектра во время вспышки позволяет солнечному излучению глубже проникать

в ионосферу (коэффициент поглощения быстро уменьшается с уменьшением длины волны) и вызывать ионизацию на малых высотах.

При солнечной вспышке происходит выброс солнечной плазмы – увеличение плотности и скорости потока солнечного ветра. Достигая Земли приблизительно через двое суток, частицы плазмы вызывают возмущение магнитосферы – возникает магнитная буря. Во время магнитных бурь и суббурь происходит проникновение энергичных частиц в ионосферу, что вызывает изменение концентрации электронов [2].

Высоты ионосферы 58, 72, 83 и 90 км соответствуют высотам максимального поглощения (следовательно, и скорости ионизации) рентгеновского излучения с длинами волн 0.1, 0.2, 0.4 и 0.6 нм [3].

В данной статье показано, что распределение Пуассона достаточно хорошо описывает распределение отклонения фазы принимаемого сигнала от усредненного хода при внезапных ионосферных возмущениях (ВИВ). В работе [4] отмечается, что модель можно считать завершенной, если она позволяет прогнозировать при изменении каких-либо внешних условий вариации плотности распределения заданных радиофизических параметров.

1. Геометрия трасс

Для сравнительного анализа, связанного с влиянием рентгеновского излучения на распространение радиоволн ОНЧ-диапазона рассма-



Рис. 1. Геометрия трасс распространения

Таблица 1

Основные параметры трасс

Трасса распространения	Длина трассы, км	Азимут, град.	Рабочие частоты, кГц
Гавайи – Inubo	6096	68.9	10.2, 11.05, 13.6
Гавайи – Хабаровск	6573	41.3	10.2, 11.05, 13.6
Ля Реюньон – Хабаровск	11018	272.7	10.2, 11.05, 13.6
Ля Реюньон – Inubo	10967	285.4	10.2, 11.05, 13.6

тривались 4 трассы: две – передатчик радионавигационной системы «Омега» расположен на Хайку (Гавайские острова), две – передатчик расположен на острове Ля Реюньон в Индийском океане. В табл. 1 приведены основные параметры трасс, на которых проводились измерения фазы сигналов радионавигационной системы «Омега». Приемные пункты располагались: один в Хабаровске (Россия), другой в Inubo (Япония). На рис. 1 приведены трассы, на которых проводились исследования распространения сигналов во время внезапных ионосферных возмущений. Расстояние между приемными пунктами – 1502 км.

Угол расхождения между трассами составляет: Ля Реюньон – Хабаровск и Ля Реюньон – Inubo – 13.7° , а между Гавайи – Хабаровск и Гавайи – Inubo – 15.3° , соответственно. Практическое равенство углов означает, что длины трасс приблизительно одинаковы.

2. Методика обработки экспериментальных данных

В работе [5] рассматривались результаты воздействия потока рентгеновского излучения на

фазу принимаемого сигнала для четырех различных трасс распространения и различных частот. Изменение фазы принимаемого сигнала носит сложный характер, т. к. необходимо учитывать значительное число факторов, например, зенитный угол Солнца, географическое расположение трассы, интенсивность вспышечного потока рентгеновского излучения и т. д. Рассмотрено изменение фазы принимаемых сигналов от потока рентгеновского излучения во время вспышки без учета влияния других факторов. Основой для анализа были отклонения фазы принимаемого сигнала при внезапных ионосферных возмущениях, которые проходили одновременно на данной трассе распространения и данной частоте. Необходимо отметить, что уверенный прием происходил только на частоте 10.2 кГц (это, в первую очередь, относится к приемному пункту, расположенному в Хабаровске), что подтверждается числом анализируемых событий за период 1982–1984 гг., которое указано в табл. 2 в скобках. На других частотах (11.05 и 13.6 кГц) часто наблюдалось явление, которое носит название «потеря фазового цикла».

Таблица 2

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

Трасса распространения	10.2 кГц		11.05 кГц		13.6 кГц	
	ненорм.	норм.	ненорм.	норм.	ненорм.	норм.
Ля Реюньон – Хабаровск	-0.18940 (160)	-0.57795	-0.09264 (14)	-0.15739	-0.45116 (76)	-0.64511
Ля Реюньон – Inubo	-0.26345 (160)	-0.59238	-0.67502 (14)	-0.80106	-0.52597 (76)	-0.75839
Гавайи – Хабаровск	-0.49542 (276)	-0.50161	-0.32499 (18)	-0.84161	-0.71584 (143)	-0.69549
Гавайи – Inubo	-0.69540 (276)	-0.70254	-0.44000 (18)	-0.77890	-0.67940 (143)	-0.67852

Таблица 3

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

Трасса распространения	10.2 кГц		11.05 кГц		13.6 кГц	
	ненорм. (сц)	норм. (сц/Мм)	ненорм. (сц)	норм. (сц/Мм)	ненорм. (сц)	норм. (сц/Мм)
Ля Реюньон – Хабаровск	15	1.5	18	2	19	1.5
Ля Реюньон – Inubo	10	1.5	10	1	19	1.5
Гавайи – Хабаровск	18	2.5	12	2	19	2
Гавайи – Inubo	14	2	9	2	14	2.5

Данные для приемного пункта, расположенного в Inubo, взяты из ежемесячного бюллетеня «Ionospheric Data in Japan» [6].

В табл. 2 приведены коэффициенты корреляции между пиковыми значениями потока рентгеновского излучения в диапазоне 0.5–4 Å и соответствующими максимальными значениями отклонения фазы принимаемого сигнала для рассматриваемых трасс распространения. Данные приведены как для непосредственных изменений фазы (ненормированные), так и отнесенные на единицу длины (1 Мм) освещенного участка трассы распространения радиосигналов (нормированные). Условие нормировки является правомерным, т. к. в этом диапазоне частот и на таких расстояниях распространение сигналов носит одномодовый характер [5; 7].

Как видно из табл. 2, значения коэффициента корреляции практически во всех рассматриваемых случаях незначительно увеличиваются. Это говорит о том, что необходимо учитывать

другие факторы, а именно, местное время, геомагнитная широта, сезон, солнечная активность [8].

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).

Как видно из данной таблицы, максимальные отклонения фазы несколько выше для трасс, приемный пункт которых расположен в Хабаровске. Это можно объяснить тем, что длина трасс распространения различная. Однако нормированные значения достаточно хорошо согласуются между собой.

В табл. 4 приведены основные числовые характеристики распределения нормированной фазы принимаемого сигнала. Как известно, асимметрия характеризует несимметричность распределения случайной величины, а эксцесс – ча-

Таблица 4

Основные числовые характеристики распределения нормированной фазы принимаемого сигнала

	Ля Реюньон – Хабаровск			Ля Реюньон – Inubo		
	10.2	11.05	13.6	10.2	11.05	13.6
среднее	2.53206	1.66354	2.08985	2.57884	1.92007	2.33899
дисперсия	1.93579	0.41575	1.72469	2.61501	0.93740	2.38713
асимметрия	1.39315	0.29154	1.38749	1.38243	0.22405	1.57284
эксцесс	2.31777	2.67740	1.51186	2.75504	2.30407	3.33858
	Гавайи – Хабаровск			Гавайи – Inubo		
	10.2	11.05	13.6	10.2	11.05	13.6
среднее	3.91419	3.42355	3.53335	3.1736	3.26429	3.62438
дисперсия	4.57072	4.68097	3.53422	4.20935	4.27384	3.99477
асимметрия	1.25965	1.97728	1.06215	1.42504	1.37273	0.74215
эксцесс	2.31248	4.44913	0.99008	2.96593	1.57904	2.89937

Таблица 5

Сравнительные характеристики экспериментального и теоретического распределения Пуассона для нормированной фазы для рассматриваемых трасс

	Гавайи – Хабаровск			Гавайи – Inubo		
	10.2	11.05	13.6	10.2	11.05	13.6
среднее	3.914194	3.423557	3.333355	3.173621	3.264296	3.624382
λ	3.671128	3.089888	3.097893	2.920036	2.794163	3.244412
	Ля Реюньон – Хабаровск			Ля Реюньон – Inubo		
	10.2	11.05	13.6	10.2	11.05	13.6
среднее	2.532070	1.663544	2.089858	2.578839	1.920078	2.338992
λ	2.424242	1.597445	1.923695	2.079002	2.523836	2.172863

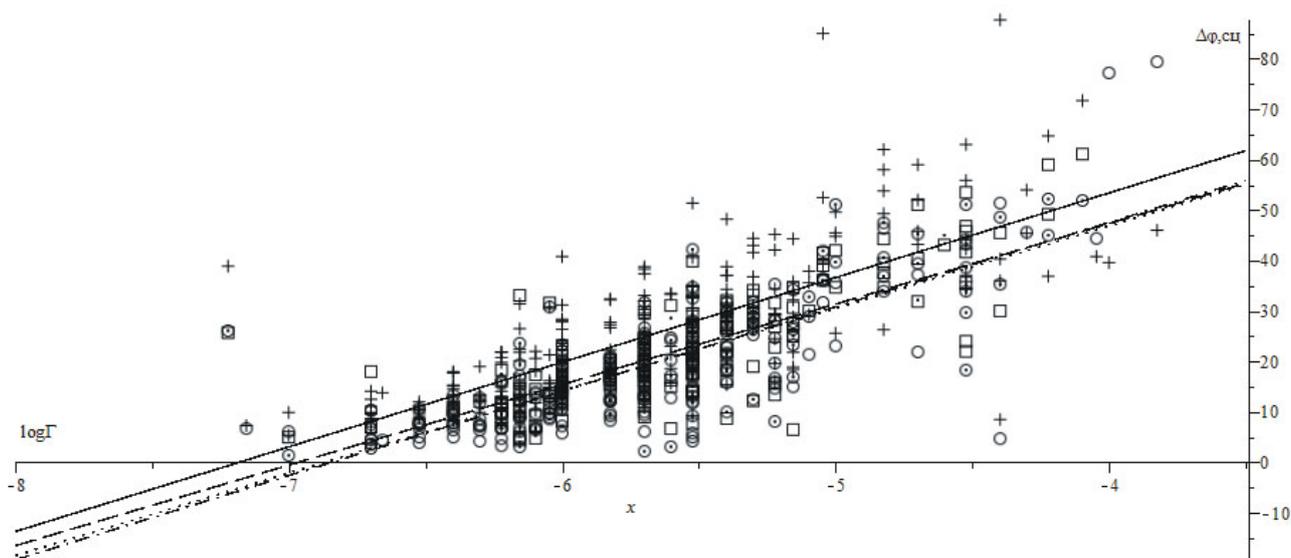


Рис. 2. Зависимость отклонение фазы принимаемого сигнала при ВИВах от $\log \Gamma$ для рассматриваемых трасс распространения. Передатчик расположен на Гавайях: крестик – приемный пункт в Хабаровске, частота 10.2 кГц; окружность – на Inubo, частота 10.2 кГц; прямоугольник – в Хабаровске, частота 13.6 кГц; точка – на Inubo, частота 13.6 кГц. Аппроксимирующие кривые: сплошная – трасса Гавайи – Хабаровск, частота 10.2 кГц; точки – трасса Гавайи – Inubo, частота 10.2 кГц; пунктир – трасса Гавайи – Хабаровск, частота 13.6 кГц; штрихпунктир – трасса Гавайи – Inubo, частота 13.6 кГц

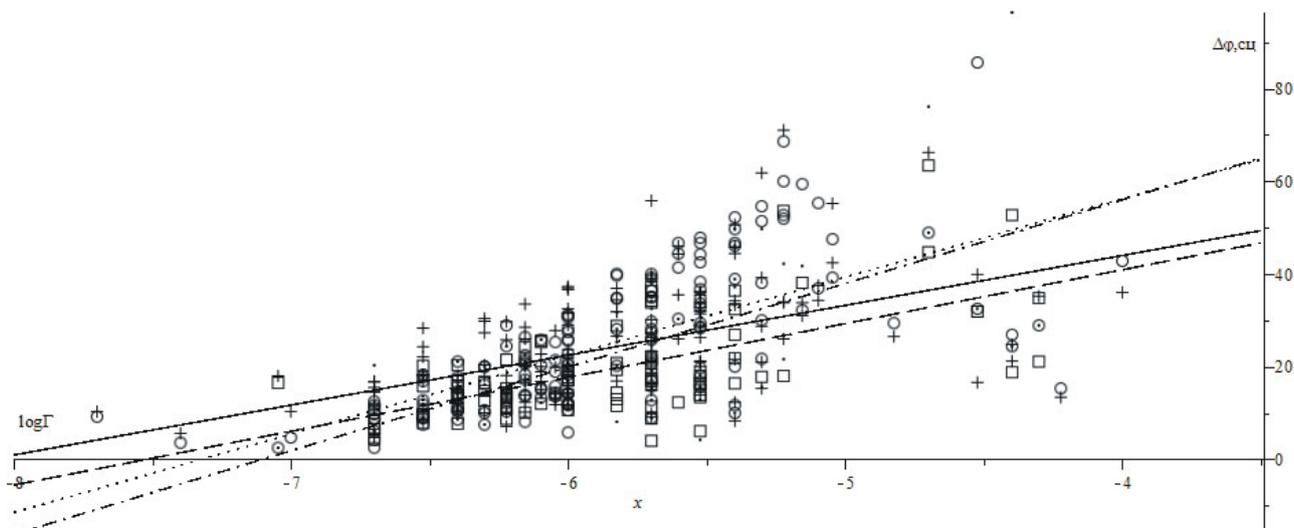


Рис. 3. Зависимость отклонения фазы принимаемого сигнала при ВИБах от $\log \Gamma$ для рассматриваемых трасс распространения. Передатчик расположен в Ля Реюньон. Остальные обозначения как на рис. 2

стоту появления значений, удаленных от среднего значения.

Как видно из таблицы, параметры, которые характеризуют распределение Пуассона, хорошо согласуются между собой. Некоторое несоответствие на частоте 11.05 кГц можно отнести к тому, что число зарегистрированных событий незначительно.

В табл. 5 приведены сравнительные характеристики экспериментального и теоретического распределения Пуассона для нормированной фазы. Известно, что математическое ожидание (среднее значение) случайной величины, подчиняющейся распределению Пуассона, равно параметру λ [9].

Как видно из табл. 5, наблюдается хорошее соответствие между величинами средних значений отклонений фазы с параметром λ , что подтверждает подчинение распределения отклонения фазы во время внезапных ионосферных возмущений распределению Пуассона.

На рис. 2 представлена зависимость отклонения фазы принимаемого сигнала от $\log \Gamma$ (где Γ – поток рентгеновского излучения в диапазоне длин волн 0.5–4 Å) для передатчика, расположенного на Гавайских островах. Статистическая обработка фазовых аномалий ($\Delta\phi$) показала, что аномалия хорошо описывается соотношением

$$\Delta\phi = a + b \log \Gamma,$$

где a , b – коэффициенты аппроксимации, величина которых зависит от частоты сигнала и длины трассы.

Как видно из рис. 2, аппроксимирующие прямые параллельны друг другу, причем для более

короткой трассы они расположены несколько ниже, что можно предполагать.

На рис. 3 показаны отклонение фазы принимаемого сигнала и аппроксимирующие прямые для передатчика, расположенного на острове Ля Реюньон.

В отличие от рис. 2, аппроксимирующие прямые не параллельны друг другу, а имеют точки пересечения. Это можно объяснить разным расположением трасс распространения. Трассы с передатчиком на Гавайских островах расположены в северном полушарии, другая пара трасс – как в северном, так и южном, при этом, проходят через геомагнитный экватор.

Заключение

Показано, что отклонение фазы принимаемого сигнала во время внезапных ионосферных возмущений подчиняется распределению Пуассона на различных трассах распространения с различными точками приема сигнала. Показано, что уравнения регрессии, которые описывают отклонение фазы принимаемого сигнала от потока рентгеновского излучения, зависят от расположения пункта приема. Это означает, что необходимо учитывать сезонную вариацию концентрации электронов, которая зависит от расположения трассы распространения (в северном и южном полушарии).

Список литературы

1. Митра А.П. Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли. М.: Мир, 1977. 370 с.
2. Полетаев А.С., Ченский А.Г., Токмачев Д.А. Мониторинг ионосферных возмущений когерентными сигналами СДВ-

- радиостанций // Сб. трудов международной Байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике и XIII конференция молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом». Иркутск: Институт солнечно-земной физики СО РАН, 2013. С. 198–202.
3. Дорман Л.И., Козин И.Д. Космическое излучение в верхней атмосфере. М.: Наука, 1983. 152 с.
 4. Козлов С.И., Ляхов А.Н., Беккер С.З. Основные принципы построения вероятностно-статистических моделей ионосферы для решения задач распространения радиоволн // Геомагнетизм и аэронавигация. 2014. Т. 54. № 6. С. 767–779.
 5. Нестеров В.И. Статистическое распределение фазы сигнала ОНЧ-диапазона при внезапных ионосферных возмущениях // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2016. Т. 19. № 2. С. 16–22.
 6. Ionospheric Data in Japan. V. 44–46. № 1–12. 1992–1994.
 7. 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. 1970. Вып. X. С. 3–107.
 8. Благовещенский Д.В. Влияние геомагнитных бурь/суббурь на ионосферу. Ч. I (обзор) // Геомагнетизм и аэронавигация. 2013. Т. 53. № 3. С. 291–307.
 9. 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.

Comparative analysis on sudden ionospheric disturbance

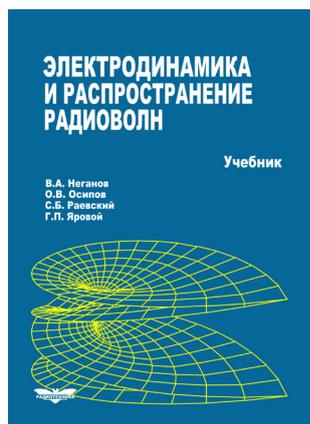
V.I. Nesterov

The effect of sudden ionospheric disturbances on the phase of the received signal on four paths is considered. The experimental data were obtained from the phase of the signals by the radio navigation system Omega. Paths are almost the same length. The transmitters are located at two points. It is shown that the phase deviation of the received signal obeys the Poisson distribution. It is necessary to take into account the seasonal variations of the electron density.

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

Неганов, В.А.

Электродинамика и распространение радиоволн: учебник / В.А. Неганов [и др.]; под ред. В.А. Неганова и С.Б. Раевского. – Изд. 4-е, доп. и перераб. – М.: Радиотехника, 2009. – 744 с.



ISBN 978-5-88070-154-4

УДК 537.87(075.3)
ББК 22.3
Н 41

Книга написана активно работающими в области электродинамики учеными. Излагаются теория электромагнитного поля с акцентом на радиотехническую электродинамику и анализ волновых процессов; рассматриваются отражение и преломление волн, излучение и дифракция; описываются основные закономерности распространения электромагнитных волн в различных безграничных средах (изотропных, анизотропных, диспергирующих, неоднородных), в направляющих и резонансных структурах, в природных условиях. Обсуждаются методы математического моделирования в электродинамике, опирающегося на применение ЭВМ.

Отличительной особенностью книги является обсуждение современных проблем электродинамики: расчет электромагнитных волн в ближних зонах излучающих структур (самосогласованный метод расчета), комплексных волн в волноведущих структурах и др.

Предназначается для студентов радиотехнических и радиофизических специальностей вузов, а также инженеров-радиотехников и радиофизиков.