

УДК 621.371:550.388.2

СУТОЧНЫЕ ВАРИАЦИИ СДВ РАДИОВОЛН В НЕОДНОРОДНЫХ ИМПЕДАНСНЫХ КАНАЛАХ

Башкуев Ю.Б., Буянова Д.Г., Адвокатов В.Р., Нагуслаева И.Б.

ФБГУН «Институт физического материаловедения СО РАН», Улан-Удэ, e-mail: buddich@mail.ru

Проведен анализ суточных вариаций амплитуды и дополнительной фазы СДВ радиоволн в волноводе «Земля – ионосфера» в зимнее – весеннее и летнее время на длинных трассах широтного и меридионального простираения по данным инструментальных радиофизических наблюдений. Выявлены особенности суточных вариаций амплитуды и дополнительной фазы сигнала РНС «Альфа» в зимнее – весеннее и летнее время на трассе «Новосибирск – Улан-Удэ», проходящей над сейсмоактивной Байкальской рифтовой зоной. Определены дневные и ночные уровни амплитуды и фазы радиосигнала. Создан банк данных непрерывных измерений ОНЧ импульсного потока естественного электромагнитного поля Земли (ЕЭМПЗ) на юге Сибири. Суточные вариации интенсивности ОНЧ импульсного потока устойчивы для каждого сезона года. Эффект солнечных затмений на распространение СДВ радиоволн проявляется в вариациях фазы сигнала.

Ключевые слова: суточные вариации, СДВ радиоволны, импедансный канал

DIURNAL VARIATIONS OF VLF RADIO WAVES IN INHOMOGENEOUS IMPEDANCE CHANNELS

Bashkuev Yu.B., Buyanova D.G., Advokatov V.R., Naguslaeva I.B.

Institute of Physical Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, e-mail: buddich@mail.ru

The analysis of diurnal variations of the amplitude and additional phase of the VLF radiowaves in the waveguide «Earth-ionosphere» in winter-spring and summer times on the long paths of east-west and north-south strikes based on data of instrumental radiophysical monitoring was carried out. The specific features of diurnal variations of the amplitude and additional phase of the «Alpha» radio positioning system in the winter-spring and summer times on the «Novosibirsk-Ulan-Ude» path running over the seismoactive Baikal rift zone were exposed. The daytime and nocturnal levels of the amplitude and additional phase of the radio signal were determined. The data bank of continuous measurements of the VLF pulse stream of the natural electromagnetic field of the Earth in the south of Siberia was created. The diurnal variations of the intensity of the VLF pulse stream are stable for each season of the year. The effect of solar eclipses on the propagation of the VLF radiowaves is manifested in the variations of the signal phase.

Keywords: diurnal variations, VLF radio waves, the impedance channel

Цель исследований – анализ суточных вариаций амплитуды и дополнительной фазы СДВ радиоволн в волноводе «Земля – ионосфера» в зимнее – весеннее и летнее время на длинных трассах широтного и меридионального простираения по данным инструментальных радиофизических наблюдений.

Материалы и методы исследования

С лета 2012 г. совместно с ИКФИА СО РАН проводятся мониторинговые измерения суточных вариаций амплитуды и фазы радионавигационной системы «Альфа» (РСДН-20) и ряда других СДВ передатчиков. Три передатчика системы «Альфа» расположены в районе Новосибирска (55°45'22" с.ш., 84°26'52" в.д.), Краснодара (45°24'12" с.ш., 38°09'30" в.д.) и Комсомольска – на Амуре (50°04'21" с.ш., 136°36'34" в.д.). Эти передатчики излучают последовательности радиоимпульсов с длительностью кадра 3,6 с на основной частоте $F_1 = 16 \text{ МГц}/1344 = 11,904 \text{ кГц}$ и дополнительных частотах: $F_2 = 17 \text{ МГц}/1344 = 12,649 \text{ кГц}$ и $F_3 = 20 \text{ МГц}/1344 = 14,881 \text{ кГц}$. Для синхронизации временной диаграммы излучающих станций с диаграммой работы всей импульсно-фазовой системы излучается сигнал на частоте $F_{3п} = F_3 + 5/36 \text{ Гц}$ станцией Новосибирск [1]. В пригороде Улан-Удэ на опытно-экспериментальной базе «Верхняя Бе-

резовка» (51°51'23" с.ш., 107°39'06" в.д.) сигналы РНС «Альфа» принимаются на магнитную рамочную антенну по направлению «восток – запад». Цифровой измерительный комплекс имеет опорный стандарт частоты на основе GPS приемника Trimble Thunderbolt-B с суточной нестабильностью частоты 10^{-12} . Обработка результатов измерений проведена с использованием пакета программ MATLAB.

Результаты исследования и их обсуждение

Трасса «Новосибирск-Улан-Удэ»

Проведем анализ условий распространения СДВ радиоволн на частоте 14.88 кГц на трассе «Новосибирск – Улан-Удэ» длиной 1578 км, проходящей над сейсмоактивной Байкальской рифтовой зоной. На рис. 1, а, б представлены суточные вариации амплитуды и дополнительной фазы принимаемого СДВ сигнала с 1 по 15 марта 2014 года, когда в средних широтах день примерно равен ночи. Четко разделяются дневные и ночные уровни амплитуды и фазы радиосигнала. Дневной уровень амплитуды сигнала в первой половине марта стабильный, в среднем от 1 до 2,2 условных единиц. В ночное

время сигнал в среднем в 2,5–4 раза выше и изменяется от 3 до 6 условных единиц. Дополнительная фаза $\varphi_{\text{доп}}$ имеет также закономерные регулярные суточные вариации в пределах от 50° до 100° . Уверенно разделяются дневные и ночные средние уровни фазы $\varphi_{\text{доп}}$. Для дневных условий $\varphi_{\text{доп}} = 55^\circ$, для ночных условий $\varphi_{\text{доп}} = 80^\circ$. На графиках $\varphi_{\text{доп}}$ (рис. 1, б) при заходе и восходе Солнца видны области кратковременной потери фазовой однозначности («потеря фазы»), связанные, вероятно, с резкими изменениями уровня поля при прохождении линии терминатора, а также из-за воздействия хаотических импульсных помех естественного или техногенного происхождения. Дневные уровни дополнительной фазы с 9 по 15 марта имеют области сильных неоднократных кратковременных выбросов (скачков) фазы до 240-250 градусов. В ночное время эти выбросы наблюдаются только ночью 12 марта и достигают 360 градусов. Суточные вариации плотности потока ОНЧ естественного импульсного электромагнитного поля Земли (ЕИЭМПЗ) за 1-15 марта 2014 г. представлены на рис. 2. Величина «шумовой дорожки» на амплитуде сигнала днем и ночью заметно различается (рис. 1, а). Регистрируемый сигнал представляет аддитивную смесь флуктуационной и хаотической импульсной помехи и полезного СДВ сигнала. Днем «шумовая дорожка» меньше, чем ночью и четко коррелирует с уровнем ОНЧ импульсного потока (рис. 2). В марте плотность ОНЧ импульсного потока по направлению «запад-восток» достигает в ночное время 800-1000 импульсов в час. В дневное время плотность ОНЧ импульсного потока по направлению «запад-восток» существенно ниже, чем ночью и не превышает 100-150 импульсов в час. Отчетливо видимые в дневное время значительные кратковременные «выбросы» фазы поля не коррелированы с уровнем суточного ОНЧ импульсного потока. Они могут определяться большой амплитудой редких дневных импульсов. На рис. 3 представлены

суточные вариации амплитуды и дополнительной фазы сигнала РНС «Альфа» в летнее время (18-21 июня 2013 г., $f = 14.88$ кГц). В летнее время также четко выделяются дневные и ночные уровни амплитуды и фазы радиосигнала. Дневной уровень амплитуды сигнала в это время стабильный, он выше мартовского (зимнего) уровня и в среднем выше 2 условных единиц. В ночное время сигнал в 2,5–3 раза выше и изменяется от 4 до 6 условных единиц. Дополнительная фаза $\varphi_{\text{доп}}$ имеет закономерные регулярные суточные вариации в пределах от 25° до 120° . На графиках $\varphi_{\text{доп}}$ (рис. 1, б, рис. 3) видны области потери фазовой однозначности («потеря фазы») из-за воздействия хаотических импульсных помех. Дневные уровни амплитуды и фазы сильно «зашумлены» атмосфериками и техногенными помехами. Величина «шумовой дорожки» зимой и летом заметно различается. Отчетливо видны значительные по амплитуде импульсные «выбросы» уровня поля. Они коррелируют с уровнем ОНЧ импульсного потока. Если в марте плотность ОНЧ импульсного потока составляет 100-350 импульсов в час, то в июне она достигает 5000-15000 импульсов в час, т.е. увеличивается в 50 и более раз.

Сравнение амплитуд сигналов на трассах «Новосибирск – Улан-Удэ» и «Краснодар – Улан-Удэ»

На рис. 4 представлены суточные вариации амплитуды сигнала с 19 по 31 марта 2015 г. на трассах «Новосибирск – Улан-Удэ» и «Краснодар – Улан-Удэ». Длина трасс распространения, вычисленная по формуле [2]:

$$d = \arccos [\sin\varphi_j \sin\varphi + \cos\varphi_j \cos\varphi \cos(\lambda_j - \lambda)]$$

составляет: «Новосибирск – Улан-Удэ» $d = 14,174^\circ$ (~ 1578 км), «Краснодар – Улан-Удэ» – $d = 44,6095^\circ$ (~ 4966 км). Уровни принимаемого сигнала от более близкого излучателя в Новосибирске в 5-6 раз выше уровней сигнала из Краснодара.

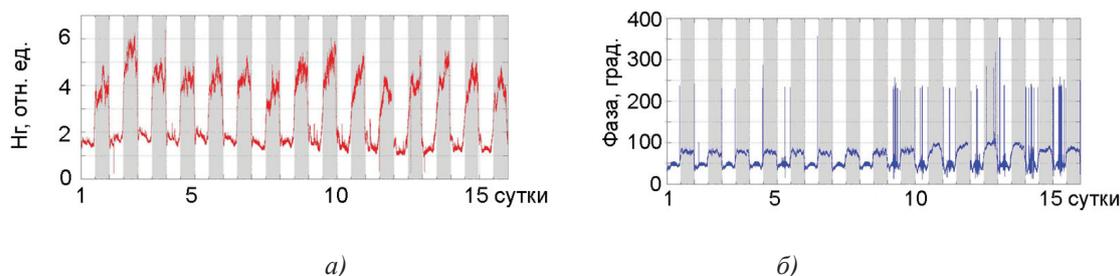


Рис. 1. Суточные вариации амплитуды (а) и дополнительной фазы (б) сигнала РНС «Альфа» на трассе «Новосибирск – Улан-Удэ» 1-15 марта 2014 года (ночное время – серый цвет)

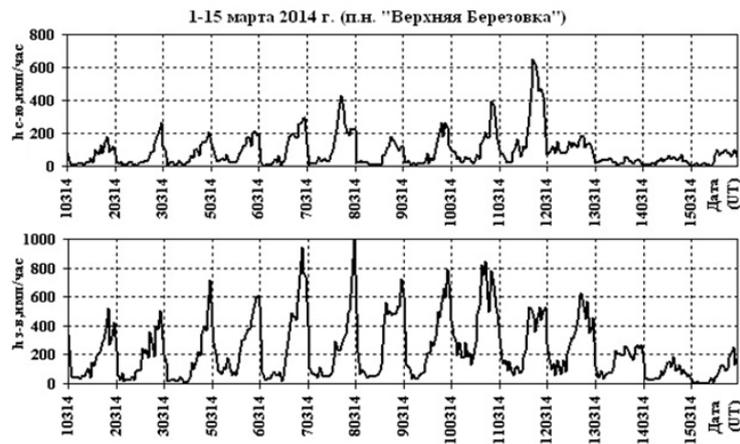
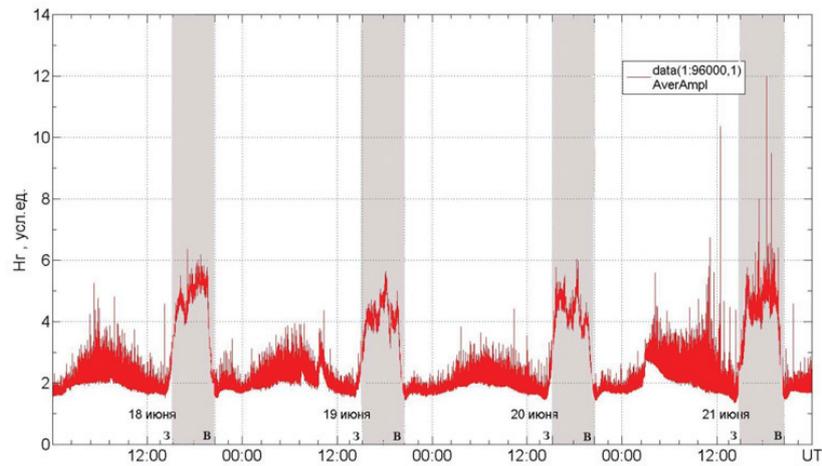
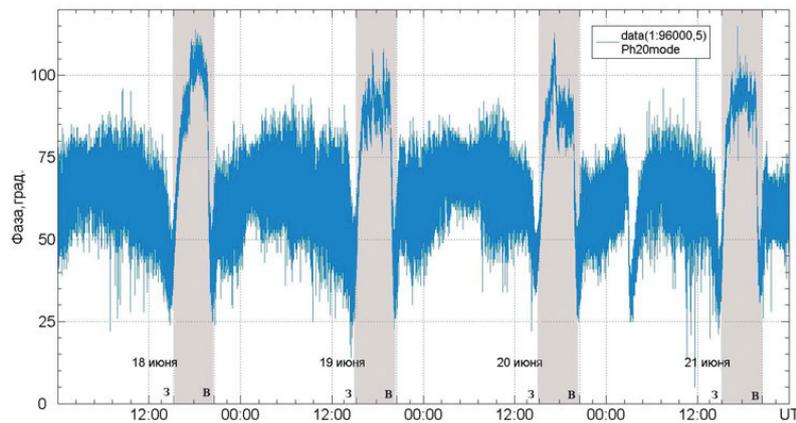


Рис. 2. Суточные вариации ОНЧ импульсного потока магнитной компоненты ЕЭМПЗ на стационаре «Верхняя Березовка» за 1–15 марта 2014 года



а)



б)

Рис. 3. Суточные вариации амплитуды и дополнительной фазы сигнала РНС «Альфа» на трассе «Новосибирск – Улан-Удэ» в летнее время (18-21 июня, $f = 14.88$ кГц)

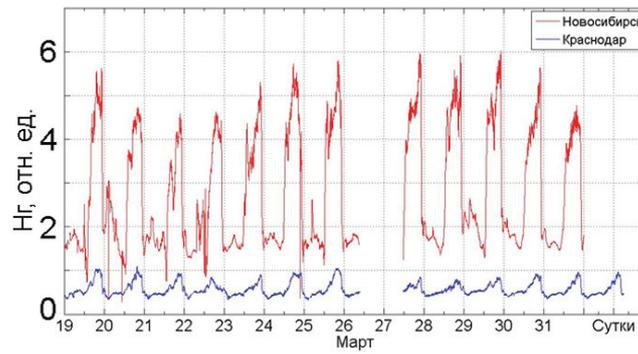
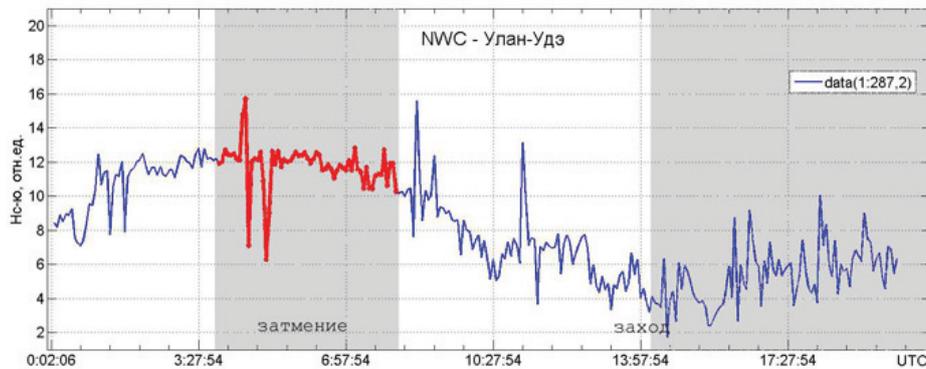
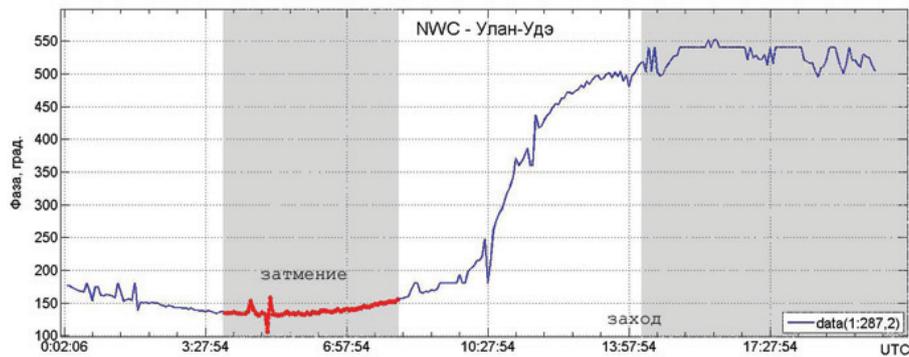


Рис. 4. Суточные вариации амплитуды сигнала 19 – 31 марта 2015 г. на трассах «Новосибирск – Улан-Удэ» и «Краснодар – Улан-Удэ»



а)



б)

Рис. 5. Суточный ход относительной амплитуды магнитной компоненты и дополнительной фазы радиосигнала NWC в период солнечного затмения на трассе «NWC – Улан-Удэ» 29 апреля 2014 года, частота 19,8 кГц

*Вариации СДВ сигналов
во время солнечных затмений*

Приемно-регистрирующий комплекс СДВ сигналов изменил ориентацию пло-

скости рамочной антенны на направление «север-юг» и перестроил приемник на частоту 19,8 кГц (радиостанция NWC). Получены вариации амплитуды и фазы радиосигналов в период солнечного зат-

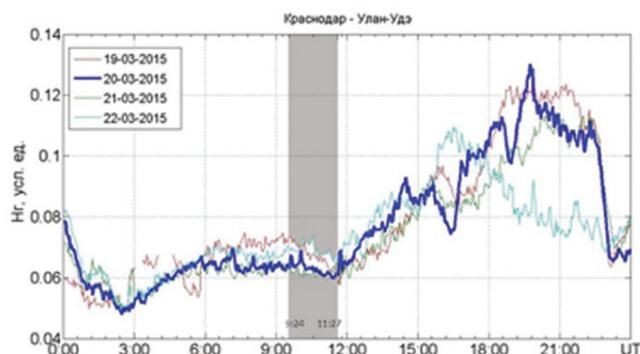
мения в Антарктиде и Австралии 29 апреля 2014 года. На рис. 5 показан суточный ход относительной амплитуды магнитной компоненты и дополнительной фазы радиосигнала австралийской станции NWC в период солнечного затмения на трассе «NWC – Улан-Удэ». В начальный период затмения наблюдаются значительные вариации амплитуды и фазы из-за возможного воздействия на полезный сигнал изменений свойств волновода «Земля – ионосфера». Отчетливо видна восходно – заходная часть суточного хода дополнительной фазы сигнала и влияние естественных ОНЧ – излучений на трассе распространения, пересекающей Азиатский континент с юга на север почти по меридиану. На рис. 5 темной полосой показана общая продолжительность затмения: 03:52:38 – 08:14:28 UT (длительность – 4 часа 22 минуты).

На рис. 6, а, б представлены суточные вариации амплитуды и дополнительной фазы сигналов на трассе «Краснодар-Улан-Удэ» за 19-22 марта 2015 г. Магнитная рамочная антенна была ориентирована по направлению

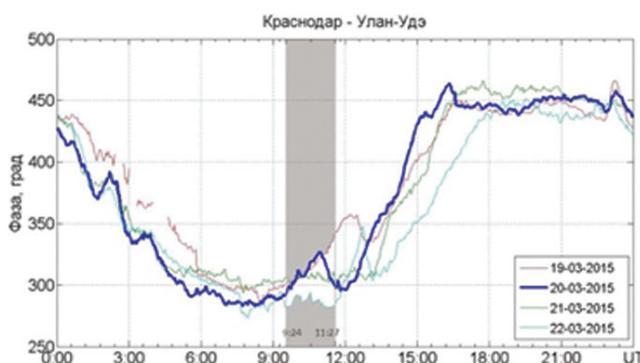
«восток – запад». Полное солнечное затмение 20 марта 2015 г. произошло на севере Атлантического океана, фаза затмения в Краснодаре составляла – 0,45, в Новосибирске – 0,39. Эффект затмения на распространение радиоволн проявился в увеличении фазы сигнала станции Краснодар в период затмения (09:24-11:27 UT), что свидетельствует в пользу того, что на фазу радиоволны влияют вариации ионизации и высоты отражения во время затмения. Во время прохождения затмения над Новосибирском (10:12-11:49 UT) наблюдались срывы фазы сигнала.

Заключение

1. В результате проведения мониторинговых СДВ радиоволновых измерений и анализа данных в разные сезоны года выявлены особенности суточных вариаций амплитуды и дополнительной фазы сигнала РНС «Альфа» в зимнее – весеннее и летнее время на трассе «Новосибирск – Улан-Удэ», проходящей над сейсмоактивной Байкальской рифтовой зоной. Определены дневные и ночные уровни амплитуды и фазы радиосигнала.



а)



б)

Рис. 6. Суточный ход относительной амплитуды (а) и дополнительной фазы (б) сигнала РНС «Альфа» на трассе «Краснодар-Улан-Удэ» 19-22 марта 2015 г. и в день затмения 20 марта 2015 г. (темная линия)

2. Создан банк данных непрерывных измерений ОНЧ импульсного потока естественного электромагнитного поля Земли (ЕЭМПЗ) на юге Сибири. Анализ показал, что суточные вариации интенсивности ОНЧ импульсного потока устойчивы для каждого сезона года. Сравнение сигналов искусственного электромагнитного поля РНС «Альфа» и естественного и техногенного электромагнитного фона позволяет дать оценку отношения «сигнал-шум» для СДВ диапазона.

3. Эффект солнечных затмений на распространение СДВ радиоволн проявляется в вариациях фазы сигнала, в частности в ее увеличении для сигналов от станции Краснодар.

4. С целью получения электродинамической модели канала распространения необходимо сравнить результаты экспериментов с расчетными данными распространения СДВ радиоволн в волноводе «Земля-ионосфера» при учете реальных электрических параметров стенок волновода.

Список литературы

1. Козлов В.И. Анализ вариаций ОНЧ-НЧ-СЧ-ВЧ электромагнитного поля на севере республики Саха (Якутия) в районе поселка Тикси в разные сезоны года: Отчет о научно-исследовательской работе – Якутск: ИКФИА СО РАН, 2015. – 126 с.

2. Кинкулькин И.Е., Рубцов В.Д., Фабрик М.А. Фазовый метод определения координат. – М.: Сов. радио, 1979. – 280 с.