

МОНИТОРИНГ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ КОГЕРЕНТНЫМИ СИГНАЛАМИ СДВ-РАДИОСТАНЦИЙ

А.С. Полетаев, А.Г. Ченский, Д.А. Токмачев

MONITORING OF IONOSPHERIC DISTURBANCES USING COHERENT SIGNALS OF VLF TRANSMITTERS

A.S. Poletaev, A.G. Chensky, D.A. Tokmachev

Рассмотрены особенности распространения сверхдлинноволновых (СДВ) радиосигналов в сферическом волноводе Земля–ионосфера. Приведены основные параметры трасс распространения сигналов. Разработан цифровой приемник для мониторинга ионосферы в СДВ-диапазоне. Представлены экспериментальные данные долговременных измерений амплитуды СДВ-радиосигналов, рассмотрены основные факторы, влияющие на распространение сверхдлинных волн, такие как ионизирующее излучение Солнца, солнечные вспышки, магнитные бури, высыпание высокоэнергичных частиц.

Peculiarities of very low frequency (VLF) radio wave propagation in the spherical Earth–ionosphere waveguide are considered. The main characteristics of signal propagation paths have been shown. A digital receiver has been designed for monitoring the ionosphere in VLF range. The article also presents experimental data of long-term measuring VLF radio signal amplitudes, and main factors which influence VLF waves propagation such as solar ionizing radiation, solar flares, magnetic storms, precipitation of high-energy particles are discussed.

Поверхность Земли и атмосфера оказывают существенное влияние на формирование электромагнитных волновых процессов. Характер поведения радиоволн также зависит от их частоты, поэтому радиоволны различных диапазонов распространяются в свободном пространстве по-разному. Так, сверхдлинные волны ($\lambda=100\div 10$ км, $f=3\div 30$ кГц) относительно слабо подвержены затуханию в атмосфере и распространяются на многие тысячи километров от передатчика. Сигналы сверхдлинноволнового (СДВ) диапазона передаются с помощью как поверхностной волны, так и пространственной, отражающейся от самых нижних слоев ионосферы. Электромагнитная энергия передается в сферическом волноводе Земля–ионосфера – своеобразной направляющей системе глобального масштаба. Все виды почв и вода являются проводящими средами для сверхдлинных волн, однако они могут проникать в морскую воду на глубину 10–15 м [Никольский, 1989]. Ввиду большой длины волны толщина скин-слоя оказывается достаточной для передачи радиосигналов погруженным на данную глубину объектам. Данные свойства радиоволн СДВ-диапазона обуславливают их применение для радионавигации и передачи сообщений погруженным субмаринам, а также для передачи сигналов эталонных частот и единого времени. Этим объясняется наличие в мире большого количества передающих станций.

Параметры СДВ-радиосигналов находятся в тесной взаимосвязи с параметрами волновода Земля–ионосфера: проводимостью земли (или воды), высотой и проводимостью отражающего слоя ионосферы. На них, в свою очередь, оказывают воздействие процессы на Солнце: основными и существенными являются солнечно-земные связи. Внимание многих исследователей уделяется также наличию литосферно-ионосферных связей и возникновению аномалий в период подготовки землетрясений [Рожной, 2010].

Благодаря отсутствию затрат на создание передатчика и простоте реализации амплитудного при-

емника метод наклонного зондирования СДВ доступен широкому кругу исследователей. В ИрГТУ первые измерения амплитуды СДВ-сигналов начались в 2010 г. Для приема выбрано 10 станций по следующим критериям: соотношение сигнал/шум, протяженность трассы, азимут прихода волны, широта расположения передатчика. Перечень станций и основные характеристики принимаемых сигналов даны в табл. 1.

Большинство СДВ-станций для передачи сигналов используют частотную манипуляцию с минимальным сдвигом (MSK). Ширина ΔF главного лепестка спектра MSK-сигнала связана со скоростью передачи данных B , соотношением

$$\Delta F = 1.5 B, \quad (1)$$

Область пространства, существенная для передачи энергии радиоволны, характеризуется зоной Френеля. Проекция первой зоны Френеля [Рожной, 2010]

$$y = \sqrt{\frac{\lambda^2}{4} + \lambda x \left(1 - \frac{x}{D}\right)}, \quad (2)$$

где λ – длина волны, x – координата вдоль трассы, D – расстояние между приемником и передатчиком.

Расчетные параметры трасс распространения сигналов приведены в табл. 2. Для наглядности на рис. 1 трассы нанесены на мировую карту.

На рис. 2 показана структурная схема СДВ-приемника для измерений амплитуды. Прием сигналов осуществляется с помощью треугольной рамочной антенны, высота которой составляет 2 м, основание – 1.5 м, количество витков – около 100.

Вблизи антенны находится предусилитель, реализованный на малошумящем операционном усилителе ОР27. Далее по коаксиальному кабелю сигнал передается на вход полосового фильтра 4-го порядка, выполненного на МАХ275 по типовой схеме. Фильтр выделяет группу принимаемых станций в полосе 10–24 кГц. Затем производится оцифровка

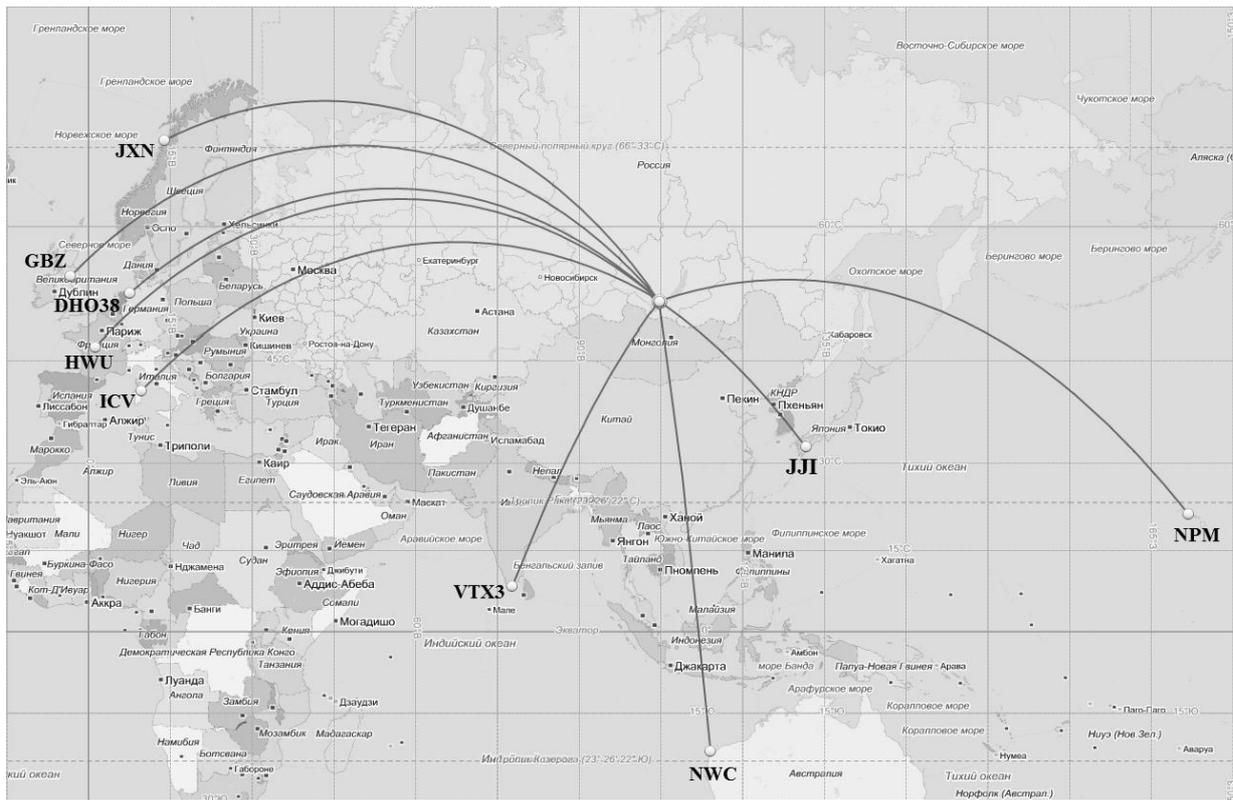


Рис. 1. Расположение трасс распространения принимаемых СДВ-сигналов.

Таблица 1

Характеристики принимаемых сигналов

№	Станция	ID	Частота, кГц	Мощность передатчика, кВт	Координаты передатчика		Скорость передачи данных, бит/с	Ширина главного лепестка спектра, Гц
					Широта	Долгота		
1	Novik, Norway	JXN	16.4	45	66°58'27.67" С	13°52'25.05" В	100	150
2	Vijayanarayanam, India	VTX3	18.2	100	8°23'13.25" С	77°45'9.94" В	200	300
3	Rosnay, France	HWU	18.3	200	46°42'47.26" С	1°14'42.89" В	200	300
4	Anthorn, UK	GBZ	19.58	500	54°54'43.19" С	3°16'46.19" З	100	150
5	North West Cape, Australia	NWC	19.8	1000	21°48'58.76" Ю	114°9'56.11" В	200	300
6	Isola-di-Tavolara, Italy	ICV	20.27	43	40°55'23.26" С	9°43'51.64" В	200	300
7	Sainte-Assise, France	FTA	20.9	23	48°32'40.68" С	2°34'45.94" В	200	300
8	Lualualei, Hawaii, USA	NPM	21.4	566	21°25'12.60" С	158°9'4.10" З	200	300
9	Ebino, Japan	JJI	22.2	200	32° 4'55.50" С	130°49'40.66" В	225	337.5
10	Rhauderfehn, Germany	DHO38	23.4	500	53° 4'44.04" С	7°36'54.00" В	200	300

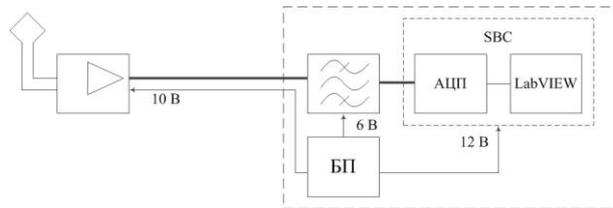


Рис. 2. Аппаратная часть СДВ-приемника.

сигнала с помощью звуковой карты одноплатного компьютера РСМ-9377. Частота дискретизации равна 48 кГц, разрядность АЦП составляет 16 бит. Дальнейшая обработка выполняется программно в среде

LabVIEW. Программа предварительной обработки СДВ-сигналов представляет собой фильтровый приемник, в котором выделение каждой станции осуществляется с помощью цифрового полосового фильтра Баттерворта 4-го порядка в полосе 100 Гц. Для односекундной выборки вычисляется среднеквадратическое значение, которое записывается в текстовый файл [Полетаев, Григорьев, 2012].

Амплитуда СДВ-сигналов претерпевает как регулярные, так и случайные изменения. К первым относятся вариации, связанные с движением терминатора (суточные), а также вращением Земли вокруг Солнца

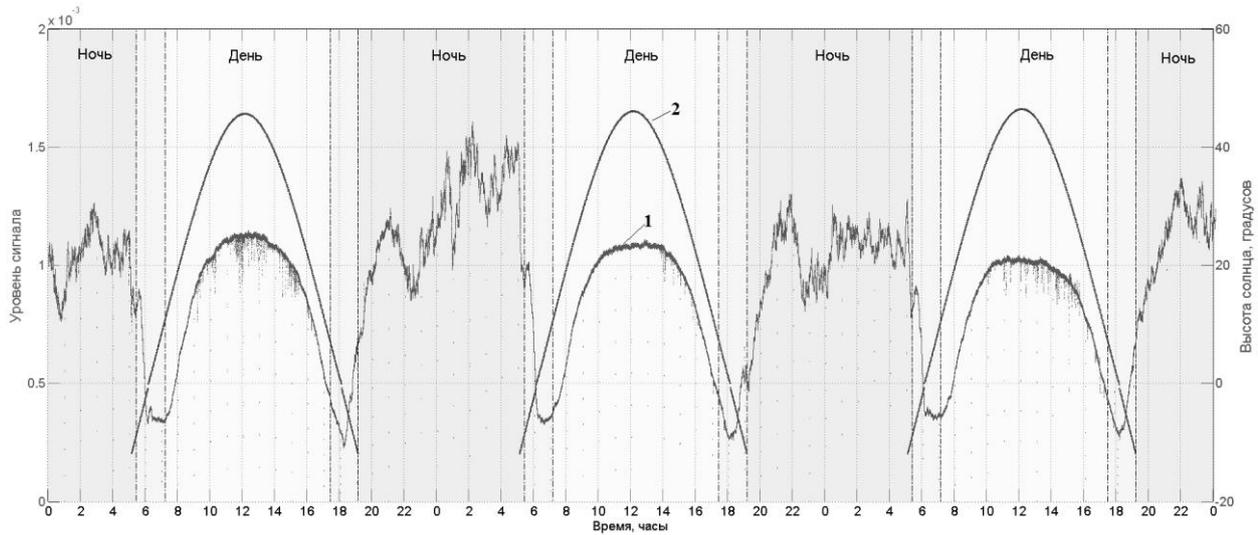


Рис. 3. Суточные изменения амплитуды: 1 – амплитуда сигнала станции JJ 17–19 марта 2011 г. (время UTC+8); 2 – изменение высоты Солнца в точке на середине трассы.

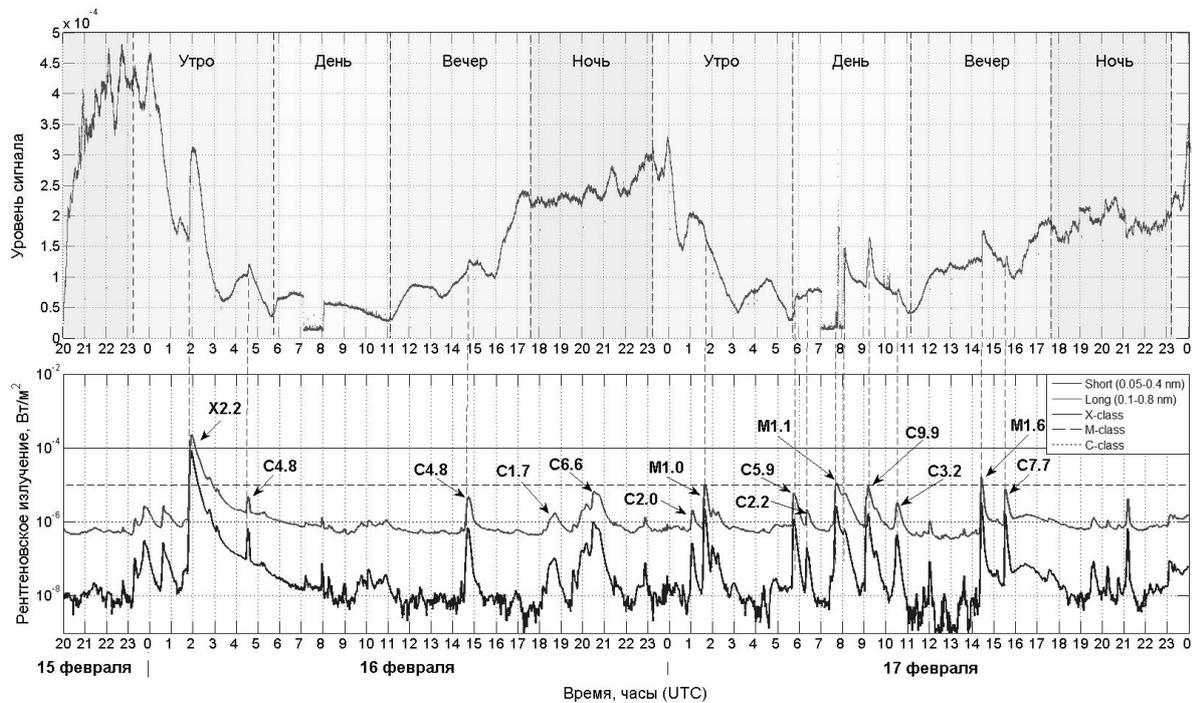


Рис. 4. Влияние солнечных вспышек на амплитуду СДВ-сигналов: верхняя панель – уровень сигнала от станции DHO38 16–17 февраля 2011 г. (время UTC); нижняя панель – изменение мощности потока рентгеновского излучения Солнца.

(сезонные). На рис. 3 показан суточный ход амплитуды сигнала станции JJ в течение трех суток (кривая 1).

Отчетливо видны ночные интервалы, когда трасса полностью находится в тени, а отражение при этом происходит от E-слоя ионосферы. В утренние часы под воздействием ионизирующего излучения Солнца начинается процесс образования D-слоя, однако электронная концентрация развивающегося слоя все еще мала. Это приводит к поглощению энергии радиоволны и, как следствие, амплитуда сигнала уменьшается. Дальнейшее увеличение концентрации ионов в D-слое приводит к улучшению его отражательных свойств – амплитуда растет. Максимум амплитуды днем приходится на момент време-

ни, когда Солнце находится в зените в точке на середине трассы (кривая 2). Это хорошо согласуется с модовым представлением распространения сигнала: днем доминирует одна мода (отражение от середины трассы), ночью основная часть энергии передается двумя модами [Kumar, 2009]. В утренние и вечерние часы при изменении высоты отражения сигнала хорошо видны максимумы и минимумы межмодового интерференционного взаимодействия. Это особенно заметно на длинных трассах (протяженностью более 6 000 км).

Уменьшение угла падения ионизирующего излучения и рекомбинационные процессы приводят к снижению электронной концентрации D-слоя и умень-

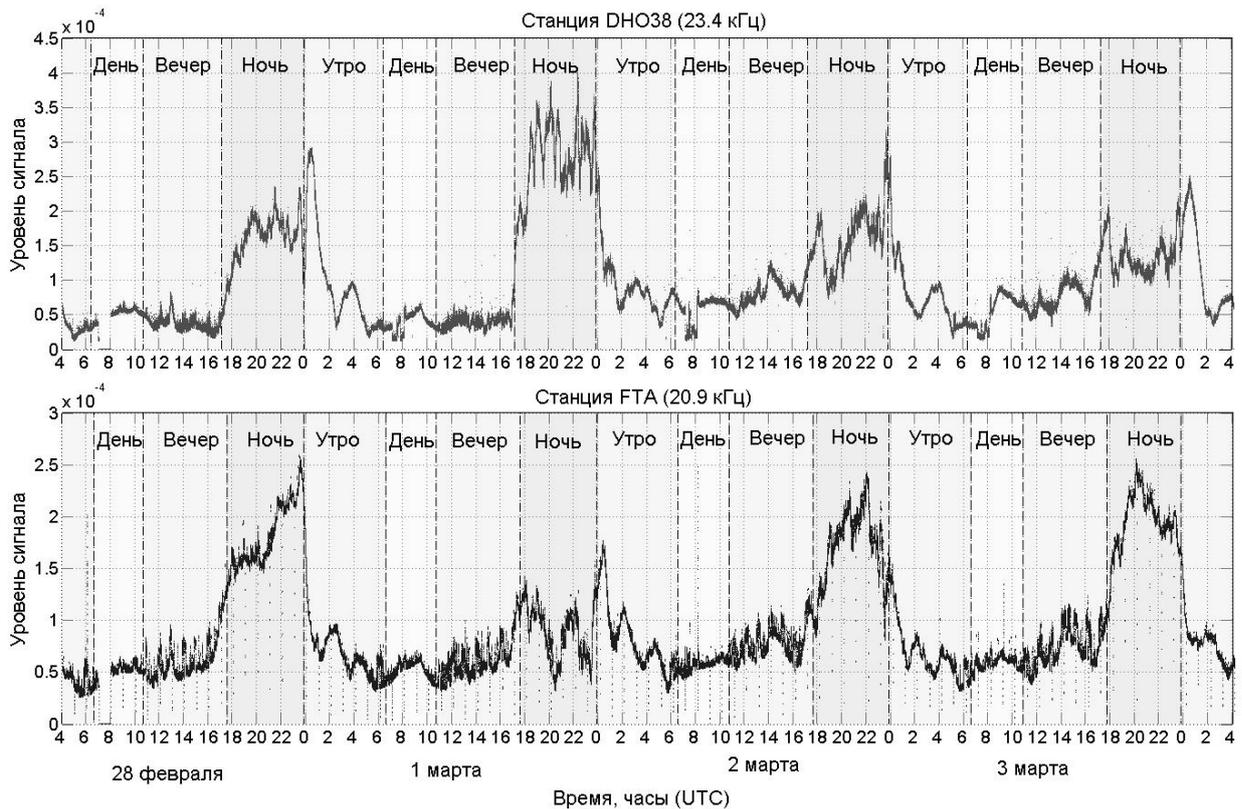


Рис. 5. Нарушение хода амплитуды во время магнитных бурь и высыпания частиц: верхняя панель – сигнал станции ДНО38; нижняя панель – сигнал станции ФТА.

Таблица 2

Параметры трасс распространения сигналов

№	ID	Длина волны, км	Длина трассы по большому кругу, км	Азимут прихода волны в пункте приема, град.	Максимальный радиус первой зоны Френеля, км	Координаты середины трассы	
						Широта	Долгота
1	JXN	18.3	4 859.74	325	149.3	67°9'7.02" С	71°49'47.71" В
2	VTX3	16.5	5 448.81	216	150.0	31°2'11.64" С	88°0'27.28" В
3	NWU	16.4	6 850.27	311	167.7	62°3'33.21" С	48°51'3.72" В
4	GBZ	15.3	6 402.64	320	156.7	66°32'44.27" С	53°8'29.44" В
5	NWC	15.1	8 260.80	171	177.0	15°20'19.44" С	110°23'57.65" В
6	ICV	14.8	6 849.25	301	159.3	57°15'25.64" С	50°41'33.04" В
7	ФТА	14.3	6 633.31	311	154.4	62°30'48.43" С	50°50'40.28" В
8	NPM	14.0	8 621.12	71	173.9	47°50'6.19" С	166°23'59.39" В
9	ЛЛ	13.5	3 081.41	126	102.2	42°55'28.23" С	119°53'45.18" В
10	ДНО38	12.8	6 028.42	312	139.1	63°13'11.90" С	56°44'10.91" В

шению амплитуды. После захода Солнца в точке на середине трассы наблюдается рост амплитуды. Вариации угла падения ионизирующего излучения и продолжительности дневных и ночных интервалов на протяжении года создают сезонные зависимости изменения амплитуды средних и высоких широт [Полетаев, Ченский, 2012].

Случайные изменения амплитуды СДВ-сигналов возникают, к примеру, вследствие солнечных вспышек. На рис. 4 соотнесены амплитуда сигнала станции ДНО38 и уровень рентгеновского излучения Солнца. Во время серий вспышек заметен существенный прирост амплитуды. Воздействие оказывают как мощные и средние вспышки X- и M-класса, так и самые слабые вспышки C (хорошо видны скачки амплитуды при вспышке C1.5 и мощнее). Отметим, что ежедневно в период с 7 до 8 ч UTC

данная станция отключается – уровень сигнала падает до уровня шумов. Во время такого перерыва 17 февраля 2011 г. (рис. 4) произошла вспышка M1.1. Уровень шумов при этом существенно возрос на непродолжительное время.

Солнечные вспышки характеризуются не только быстрым увеличением мощности рентгеновского излучения. Происходит также 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 электронной концентрации D-слоя. При этом наблюдается поглощение волны в этой области [Нестеров, 2009].

На рис. 5 показано поведение амплитуды сигналов станций ДНО38 и FTA 1 марта 2011 г. во время магнитной бури класса G2. Для станции FTA (20.9 кГц) отчетливо прослеживается аномальное изменение амплитуды в ночные часы (для сравнения показан ход амплитуды в предыдущий и два последующих дня).

В период с 11 по 17 часов UTC 1 марта прослеживается отсутствие интерференционных минимумов и максимумов станции ДНО38 (23.4 кГц), что свидетельствует о слабом изменении высоты отражающего слоя ионосферы. Однако ночью наблюдается аномальный прирост амплитуды сигнала данной станции вместо ожидаемого ослабления.

Такой эффект усиления сигнала 23.4 кГц и ослабления сигнала 20.9 кГц заметен на фоне повышенного рентгеновского излучения Солнца во время магнитных бурь класса G2 1 и 12 марта 2011 г., 6 апреля 2011 г., а также при сравнительно невысоком уровне рентгеновского излучения (10^{-7} Вт/м²) во время мощной бури класса G3 5–7 апреля 2010 г. [Полетаев, Ченский, 2012]. При этом отметим, что ночное поглощение проявилось для станции ICV (20.27 кГц), а ночная амплитуда сигнала станции НВУ (18.3) была заметно выше, чем в другие дни. Для станций JXN и GBZ эффекта замечено не было из-за низкого соотношения сигнал/шум. Для сигналов станций NPM, NWC, JJI, VTX3, середины трасс которых южнее 60°, аномального изменения амплитуды в указанные дни не наблюдается.

Таким образом, метод наклонного зондирования ионосферы в СДВ-диапазоне является эффективным способом мониторинга состояния нижней ионосферы. Измерение амплитуды СДВ-сигналов достаточно просто реализуется с помощью обычного компьютера и позволяет «увидеть» основные закономерности изменения состояния волновода Земля–ионосфера. Однако более информативным параметром сигналов для диагностики ионосферы является фаза. Измерение дрейфа фазы в канале является более сложной задачей. Это обусловлено необходимостью высокой стабильности опорного генератора и разработки методов устранения изме-

нения фазы, обусловленного минимальной частотной манипуляцией (MSK) СДВ-радиосигналов. Требуется также применение системы синхронизации, необходимой в случае развертывания сети приемных станций. Такой подход позволит проводить оценку пространственно-временной локализации неоднородностей нижней ионосферы. Именно такой измерительный комплекс и разрабатывается в ИрГТУ в настоящее время.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Нестеров В.И. Основные направления исследования распространения радиоволн СДВ-диапазона в Дальневосточном регионе // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2009. Т. 12, №1. С. 91–98.

Никольский В.В., Никольская Т.И. Электродинамика и распространение радиоволн: Учеб. пособие для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. 544 с.

Полетаев А.С., Григорьев К.А. Мониторинг нижней ионосферы в СДВ-диапазоне с помощью виртуального приемника в LabVIEW // Инженерные и научные приложения на базе технологий National Instruments – 2012. Сборник трудов XI Международной научно-практической конференции. М.: ДМК-пресс, 2012. 504 с.

Полетаев А.С., Ченский А.Г., Григорьев К.А. Мониторинг нижней ионосферы методом наклонного зондирования СДВ-радиосигналами // Вестник ИрГТУ. 2012. № 10 (69). С. 203–211.

Рожной А.А., Соловьева М.С., Молчанов О.А. и др. ОНЧ/НЧ мониторинг ионосферных возмущений сейсмического происхождения в Курило-Камчатском регионе // Сборник докладов Международной конференции «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России». Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2010. С. 225–230.

Sushil Kumar. Waveguide parameters of 19.8 kHz signal propagating over a long path // Hindawi Corporation Res. Lett. Phys. 2009. Article ID 216373. P. 1–3.

Национальный исследовательский Иркутский государственный технический университет, Иркутск, Россия