

УДК 551.510.535+537.86/.87

ИССЛЕДОВАНИЯ В АНТАРКТИКЕ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЧ СИГНАЛОВ НА СВЕРХДАЛЬНИХ РАДИОЛИНИЯХ

А. В. Зализовский, А. В. Колосков, Ю. М. Ямпольский

Радиоастрономический институт НАН Украины. 4, ул. Червонопрапорна, Харьков, 61002, zaliz@rian.kharkov.ua

Реферат. В работе исследуются фоновые сезонно-суточные вариации характеристик ВЧ сигналов на сверхдальних радиолиниях в частотной и временной областях. Сигналы, излучавшиеся радиостанциями службы точного времени РВМ (частоты 4996, 9996 и 14996 кГц) и СНУ (частоты 3330 и 7850 кГц), принимались на Украинской антарктической станции (УАС) «Академик Вернадский» в мае 2010 – апреле 2011 годов. Приводятся и анализируются среднемесячные суточные спектрограммы сигналов. Импульсная селекция сигналов станции РВМ позволила выделить три различных пути их распространения: по прямой и обратной трассам, лежащим на дуге большого круга, а также по траекториям, не принадлежащим большому кругу, которые формируются путем рассеяния на ионосферных неоднородностях северного полярного овала. Сигналы станции СНУ распространяются на УАС по прямой трассе, а также посредством рассеяния на неоднородностях полярного овала. Показано, какими путями распространяются различные составляющие в спектрах сигналов. Описанные в работе результаты анализа распространения радиосигналов могут быть использованы в целях диагностики ионосферных неоднородностей на сверхдальних радиолиниях.

Дослідження в Антарктиці частотно-часових характеристик ВЧ сигналів на наддовгих радіолініях.

А. В. Залізівський, О. В. Колосков, Ю. М. Ямпольський

Реферат. У роботі досліджуються фонові сезонно-добові варіації характеристик ВЧ сигналів на наддовгих радіолініях в частотній та часовій областях. Сигнали, що випромінювались радіостанціями служби точного часу РВМ (частоти 4996, 9996 й 14996 кГц) і СНУ (частоти 3330 й 7850 кГц), приймалися на Українській антарктичній станції (УАС) «Академік Вернадський» у травні 2010 – квітні 2011 років. Приводяться й аналізуються середньомісячні добові спектрограми сигналів. Імпульсна селекція сигналів станції РВМ дала змогу виділити три різні шляхи їхнього поширення: по прямій і зворотній трасах, що лежать на дузі великого кола, а також по траєкторіях, що не належать великому колу, які формуються шляхом розсіювання на іоносферних неоднорідностях північного полярного овалу. Сигнали станції СНУ поширюються на УАС по прямій трасі, а також за допомогою розсіювання на неоднорідностях полярних овалів. Показано, якими шляхами поширюються різні складові в спектрах сигналів. Описані в роботі результати аналізу поширення радіосигналів можуть бути використані з метою діагностики іоносферних неоднорідностей на наддовгих радіолініях.

Studying in Antarctica the time-frequency characteristics of HF signals at the long radio paths.

A.V. Zalizovski, A.V. Koloskov and Y.M. Yampolski

Abstract. The background seasonal and diurnal variations of characteristics of HF radio signals in frequency and time domains propagated at the long radio paths are studied. The signals transmitted by RWM (frequencies 4996, 9996, and 14996 kHz) and CHU (frequencies 3330, and 7850 kHz) time service radio stations were received at the Ukrainian Antarctic Station (UAS) *Akademik Vernadsky* in May 2010 – April 2011. Average monthly spectrograms of the signals are presented and analyzed. Pulse selection of the RWM signals allowed detecting the three different pathways: the direct and reverse paths, lying on the great circle, and trajectories not belonging to great circle that arisen by scattering

on the ionospheric irregularities of aurora oval. Signals of CHU station propagate to the UAS by direct path and by scattering on ionospheric inhomogeneities of the polar oval. The propagation paths of different components in the signal spectra have been studied. The results of the analyses of the signal propagation described in the paper can be used for diagnostics of ionospheric irregularities at the long radio paths.

Key words: long radio paths, ionospheric irregularities.

1. Введение

Радиоволны высокочастотного (ВЧ) диапазона, отражаясь от ионосферы, способны с малыми потерями распространяться на большие расстояния. Эта особенность коротких волн (КВ) используется в целях глобальной радиосвязи. При сверхдальнем распространении ВЧ сигналы эффективно взаимодействуют с ионосферной плазмой, и поэтому могут использоваться для мониторинга околоземного космического пространства. К традиционным методам диагностики ионосферы, в которых используются КВ, можно отнести вертикальное (Reinish, 1986) и наклонное зондирование. Информационными параметрами таких систем являются частотные зависимости группового времени запаздывания сигналов, отраженных от ионосферы. Эти методы требуют создания специальных передатчиков, излучающих импульсные или частотно-модулированные последовательности (Barry and Fenwick, 1965).

В Радиоастрономическом институте НАН Украины на протяжении нескольких десятилетий развиваются оригинальные методы дистанционного зондирования околоземного космического пространства, в которых не применяются специальные передающие системы, а используется уже существующее электромагнитное излучение естественного и искусственного происхождения (Литвиненко и Ямпольский, 2005). В рамках такого подхода созданы оригинальные методы частотно-углового (Galushko, 1997) и прикаустического зондирования (Galushko and Yampolski, 1996), а также бистатической локации искусственной ионосферной турбулентности (Yampolski et al, 1996) и полярных неоднородностей (Бернгардт и др., 2015). Обоснована и апробирована возможность многопозиционной доплероскопии крупномасштабных ионосферных возмущений (Кашеев и др., 2009 а). Для реализации этих методов весьма эффективным оказалось использование сигналов радиостанции точного времени и частоты РВМ, расположенной в Московской области, РФ (Кашеев и др., 2013). Преимуществами этой станции для задач радиодиагностики перед многочисленными широкоэвещательными передатчиками ВЧ диапазона являются: детерминизм спектра, стабильность и временная синхронизация сигналов, излучаемых одновременно на трех частотах, а также непрерывность работы (24 часа в сутки). Мощность передатчиков РВМ достаточна для того, чтобы принимать сигналы практически в любой точке земного шара, включая Антарктиду.

Основной целью настоящей статьи является разработка и реализация дистанционного метода радиодиагностики глобальных ионосферных неоднородностей с использованием ВЧ сигналов станций точного времени на сверхдальних радиопутьях (длинной более 10 000 км) (Гуревич и Цедилина, 1979). На таких радиотрассах поле в приемном пункте формируется большим числом пространственных мод, взаимодействующих с протяженными областями ионосферы. Спектрально-временные особенности поведения сигналов позволяют исследовать динамику крупномасштабных плазменных неоднородностей, стимулированных солнечным терминатором (Зализовский и др., 2007), солнечными затмениями (Кашеев и др., 2009 б), авроральными возмущениями (Зализовский и др., 2013), нелинейные эффекты в плазме (Yampolski et al., 1997) и др.

Очевидно, что для восстановления характеристик ионосферной плазмы необходимо решить задачу селекции путей распространения радиосигналов, а также изучить фоновые условия распространения вдоль каждой траектории. Ранее задача пространственной селекции на сверхдальних радиопутьях решалась с помощью остроуправленных антенн (Белей и др., 1987). Сравнительно недавно было показано, что в ряде случаев спектральный анализ позволяет разделять составляющие сигнала, пришедшие, например, по прямой и обратной трассам (Зализовский и др., 2007). В рамках настоящей работы в целях селекции путей распространения радиоволн проводится совместный анализ спектральных характеристик сигналов и вариаций времени их распространения.

Весь экспериментальный материал был накоплен на Украинской антарктической станции (УАС) «Академик Вернадский» (координаты 65°15' ЮШ, 64°16' ЗД). В качестве «пробных» передатчиков использовались две радиостанции точного времени и частоты – РВМ (координаты 55°43' СШ, 38°12' ВД) и CHU (Оттава, Канада, 45°18' СШ, 75°45' ЗД). Ранее в работе Зализовского и др. (2007) были приведены первые результаты селекции путей распространения сигналов на трассе РВМ-УАС, полученные по данным нескольких суток измерений. В настоящей статье рассматри-

ваются сезонно-суточные вариации характеристик сигналов в течение годового периода наблюдений. Анализируются среднемесячные доплеровские спектрограммы сигналов на трассах РВМ-УАС и СЧУ-УАС. Задача пространственной селекции путей распространения сигнала для радиолинии СЧУ-УАС решается спектральным методом. Для трассы РВМ-УАС пространственные компоненты поля фильтруются также и в частотно-временной области. Определяются интервалы времени, в пределах которых сигналы устойчиво распространяются по прямой и обратной трассам, а также по смещенным траекториям, не совпадающим с дугами большого круга.

Во втором разделе работы описана постановка эксперимента, в третьем разделе представлены результаты спектральной обработки сигналов, четвертый раздел посвящен результатам измерений времени распространения импульсных сигналов на трассе РВМ-УАС, в пятом – обсуждаются возможные механизмы формирования аномальных траекторий распространения сигналов на трассах РВМ-УАС и СЧУ-УАС.

2. Постановка эксперимента

Пробные измерения спектральных характеристик ВЧ сигналов на трассе РВМ-УАС (длина прямой трассы 15 930 км) были начаты в 2002 и продолжены в 2004 году (Зализовский и др., 2007). В 2006 году проводились пробные измерения на радиолиниях РВМ-УАС и СЧУ-УАС (длина прямой трассы 12 500 км) с периодичностью один раз в месяц. В результате этих измерений были выявлены существенные суточные и сезонные вариации условий распространения, а также явная зависимость спектральных параметров сигналов от геомагнитной активности. Последний факт позволил сделать вывод о том, что, в принципе, ВЧ сигналы на этих радиолиниях могут быть использованы в задаче диагностики глобального поведения ионосферы. Систематические измерения параметров сигналов на радиолиниях РВМ-УАС и СЧУ-УАС были начаты в мае 2010 г. В данной работе анализируется массив данных, накопленный за первый год измерений с мая 2010 г по апрель 2011 г.

Схема эксперимента приведена на рис. 1. Радиостанция точного времени и частоты РВМ одновременно излучает сигналы на трех частотах: 4996, 9996 и 14996 кГц. Модуляция сигналов изменяется в каждом получасовом цикле следующим образом: с нулевой по 7 минуте 55 секунд излучается непрерывный сигнал, с 10-й по 19-ю минуте 55 секунд – импульсы с частотой повторения 1 Гц, и с 20-й по 29-ю минуте 55 секунд – импульсы с частотой повторения 10 Гц. Радиостанция СЧУ в 2010 – 2011 годах излучала непрерывные немодулированные сигналы на частотах 3330 кГц, 7850 кГц и 14670 кГц (на УАС велся прием сигналов на двух частотах 3330 кГц и 7850 кГц).

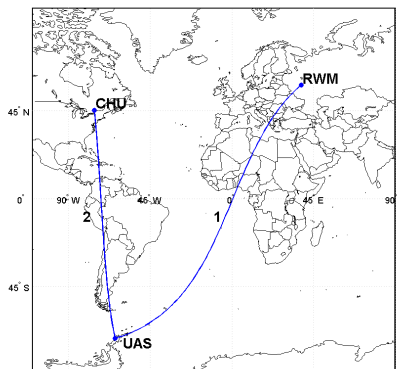


Рис. 1. Схема эксперимента

Приемный ВЧ-комплекс на УАС был оснащен горизонтальной дипольной антенной с резонансной частотой 3 МГц, диаграмма направленности которой ориентирована в направлении север-юг. Регистрация сигналов осуществлялась цифровым приемником фирмы WinRadio G-313. Системы внешней частотно-временной синхронизации, компьютерной регистрации и предварительной обработки данных измерений были разработаны в РИ НАНУ. В качестве внешнего опорного генератора использовалось устройство точного времени и частоты «Навиор» СН-3833, синхронизи-

зируемое сигналами ГНСС. Суточная относительная нестабильность опорной частоты не превышала $1 \cdot 10^{-11}$. Измерения вариаций времени распространения импульсов проводились с точностью не хуже 1 мс за сутки. Перестройка рабочей частоты приемной системы осуществлялась автоматически, программными средствами, в получасовом цикле (табл. 1), который не менялся в течение года измерений. На УАС проводилась спектральная обработка сигналов станции РВМ, принятых в интервале с нулевой минуты по 7 минуте 30 секунд и сигналов станции СНУ, принятых с 10-й по 20-ю минуту. С 20-й по 30-ю минуту оценивались значения огибающей импульсных последовательностей станции РВМ.

Таблица 1.

Пример цикла перестройки частоты настройки приемной системы

Время изменения частоты	Частота, Гц
00:00:00	4996000
00:02:30	9996000
00:05:00	14996000
00:09:00	7850000
00:15:00	3330000
00:19:50	4996000
00:23:20	9996000
00:26:40	14996000

3. Сезонно-суточные вариации спектральных характеристик сигналов

При ионосферном распространении характеристики ВЧ сигнала зависят от состояния и динамики плазмы вдоль лучевой траектории. Доплеровское смещение частоты (ДСЧ) сигналов f_D связано с изменением во времени длины фазового пути следующим образом (Bennett, 1968):

$$f_D = -\frac{f}{c} \frac{dP}{dt} = -\frac{f}{c} \int_L \frac{\partial n(l)}{\partial t} dl, \quad (1)$$

где f — несущая частота сигнала, c — скорость света, P — длина фазового пути, l — лучевая координата вдоль траектории распространения сигнала L , $n(L)$ — коэффициент преломления среды.

Спектральная обработка экспериментальных данных проводилась следующим образом. На первом этапе рассчитывались энергетические спектры сигналов станций РВМ и СНУ по временным реализациям длительностью 4,096 с. Далее такие «текущие» спектры усреднялись на интервалах времени 2–3 минуты в каждом получасовом цикле (табл. 1). После этого полученные таким образом 48 усредненных спектров представлялись в виде суточных спектрограмм, примеры которых для 20, 22 и 24 сентября 2010 года показаны на рис. 2 (здесь и далее используется шкала всемирного времени – UT). Обращает на себя внимание существенная изменчивость спектральных характеристик от суток к суткам, вызванная изменчивостью ионосферных условий вдоль трасс распространения.

На следующем этапе рассчитывались среднемесячные спектрограммы (табл. 2). В пределах месяца производилось усреднение энергетических спектров для соответствующего времени суток. Полученные усредненные спектры представлялись в виде среднемесячных суточных спектрограмм. Полный массив данных, использовавшихся в спектральной обработке, составил 268 дней. Заметим также то, что для разных месяцев число дней усреднения было не одинаковым. Кратковременные пропуски в регулярных регистрациях сигналов станций точного времени и частоты были вызваны необходимостью использования приемного ВЧ комплекса в других специальных измерительных кампаниях. Приведены усредненные месячные спектрограммы сигналов, начиная с мая 2010 года и заканчивая апрелем 2011 года (табл. 2). Можно видеть, что во всех сигналах отмечаются существенные суточные и сезонные вариации интенсивности и частот спектральных максимумов. Следует отметить, что спектральная обработка позволяет разделить пути распространения сигналов лишь гипотетически.

4. Измерения вариаций времени распространения сигналов на трассе РВМ-УАС

Для достоверной селекции радиотрасс были проведены измерения группового времени распространения сигналов. В 2010–2011 годах на УАС «Академик Вернадский» измерялись вариации времени распространения сигналов станции РВМ. Измерения проводились в последние 10 минут каждого получаса, когда на всех рабочих частотах станция РВМ излучает импульсы длительностью 40 мс и частотой повторения 10 Гц, при этом каждый секундный импульс имеет длительность 40 мс. Такие параметры сигнала удобны для временной селекции путей распространения. Кратчайшее расстояние вдоль дуги большого круга между РВМ и УАС (прямая радиотрасса) составляет 15930 км, длина обратной дуги большого круга равна приблизительно 24100 км. Таким образом, разность длин прямой и обратной трасс – 8170 км. Если пренебречь дисперсией и считать, что сигнал распространяется со скоростью света, то разность задержек между прямой и обратной радиотрассами составляет 27,2 мс. Это позволяет разделить обе траектории во временной области для параметров импульсной последовательности, излучаемой передатчиком РВМ. Импульсные сигналы на частоте 4996 кГц обрабатывались в интервале времени с 21 по 23 минуты каждого получаса, на частоте 9996 кГц – с 24 по 26 минуты, и на частоте 14996 кГц – с 27 по 29 минуты (табл. 1). На первом этапе обработки выделялась огибающая сигнала, затем производилось усреднение секундных огибающих на каждом 2-минутном интервале усреднений.

Пример результатов импульсной обработки данных, а также их использования в задаче селекции путей распространения приведен на рис. 3. На верхней панели показана спектрограмма сигнала станции РВМ на частоте 9996 кГц, принятого на УАС 10.11.2010 в 00:00–10:30 (рис. 3, а). Жирными стрелками под спектрограммой показаны моменты времени, для которых ниже приведены усредненные огибающие принятого импульсного сигнала. Как видно (рис. 3, б), в 4:54 одновременно принималось два импульса: больший по амплитуде приходил раньше, меньший – запаздывал. Отставание составляло величину порядка 27 мс, это соответствует пространственной разности групповых путей прямого и обратного сигналов 8100 км и практически совпадает с оценкой, приведенной выше. Следовательно, первый, больший по уровню импульс, приходил по прямой трассе, а меньший – по обратной трассе. В 5:24 между прямым и обратным импульсами «вклинивается» еще один, третий, в результате чего происходило наложение сигналов (рис. 3, в). В 5:54 прямой импульс уже не выделяется в шумах, регистрируются лишь два других. Причем, как видно (рис. 3, г), передний фронт первого импульса приходит примерно на 15 мс раньше переднего фронта второго импульса, пришедшего по обратному пути, и на 12 мс позже импульса, ранее распространявшегося по прямой трассе (рис. 3, б и 3, в). Отставание этого импульса от прямого, но опережение обратного, говорит о том, что он приходит не по дуге большого круга. Дополнительный, по сравнению с прямым сигналом, групповой путь протяженностью примерно 3600 км позволяет предположить, что такой «аномальный» сигнал распространялся, рефрагируя в высоких широтах на градиентах электронной плотности (Белей и др., 1987) и рассеиваясь на ионосферных неоднородностях в области полярного овала. В данном случае экваториальная граница овала удалена от передающего пункта приблизительно на 1800 км. В 7:24 (рис. 3, г) в огибающей сигнала выделяется только один импульс, распространяющийся обратным путем. По такой же методике обрабатывались сигналы РВМ на частотах 4996 и 14996 кГц. Таким образом, анализ данных в режиме импульсного излучения передающей станции позволил выделить три различных пути распространения сигнала.

Дальнейшая обработка состояла в оценке суточных и сезонных вариаций времени распространения сигналов. На начальном этапе измерялись временные задержки импульсов относительно первой, принятой в течение суток, импульсной последовательности. Конкретный день измерений использовался в дальнейшей обработке только в том случае, если первая импульсная последовательность была зарегистрирована на УАС не позднее 3:00. Такой выбор делался в предположении о том, что с 0 до 3 часов сигналы распространялись по прямой неосвещенной трассе, вдоль которой ионосферные условия стабильные и характеристики распространения сигналов меняются слабо. Изменение времени распространения сигналов, зарегистрированных в последующие получасовые интервалы, определялось по сдвигу максимума взаимной корреляционной функции между усредненными огибающими последовательностей импульсов, принятых в данный момент времени, и первой принятой в течение суток. Если в какой-то момент времени сигнал приходил в приемный пункт одновременно несколькими путями, то в силу выбранного алгоритма измерений определялось время прихода только основной, преимущественной в энергетическом смысле моды сигнала. Полный размер массива данных, отобранных по этим критериям, составил на частоте 4996 кГц – 46 суток, на частоте 9996 кГц – 69 суток. Сигнал РВМ на высшей частоте 14996 кГц в первые три часа суток, как правило, не регистрировался (см. табл. 2), поэтому далее в этом разделе он не рассматривается.

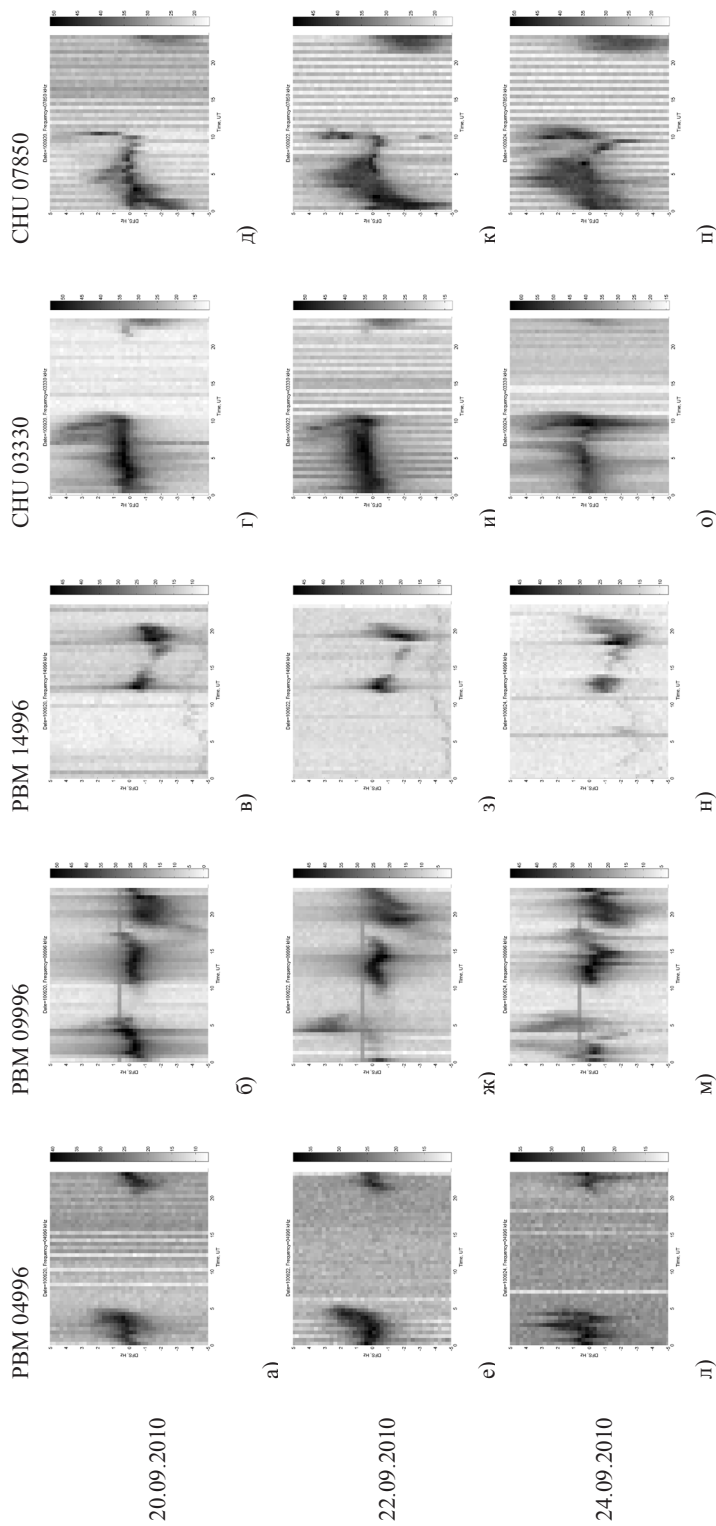
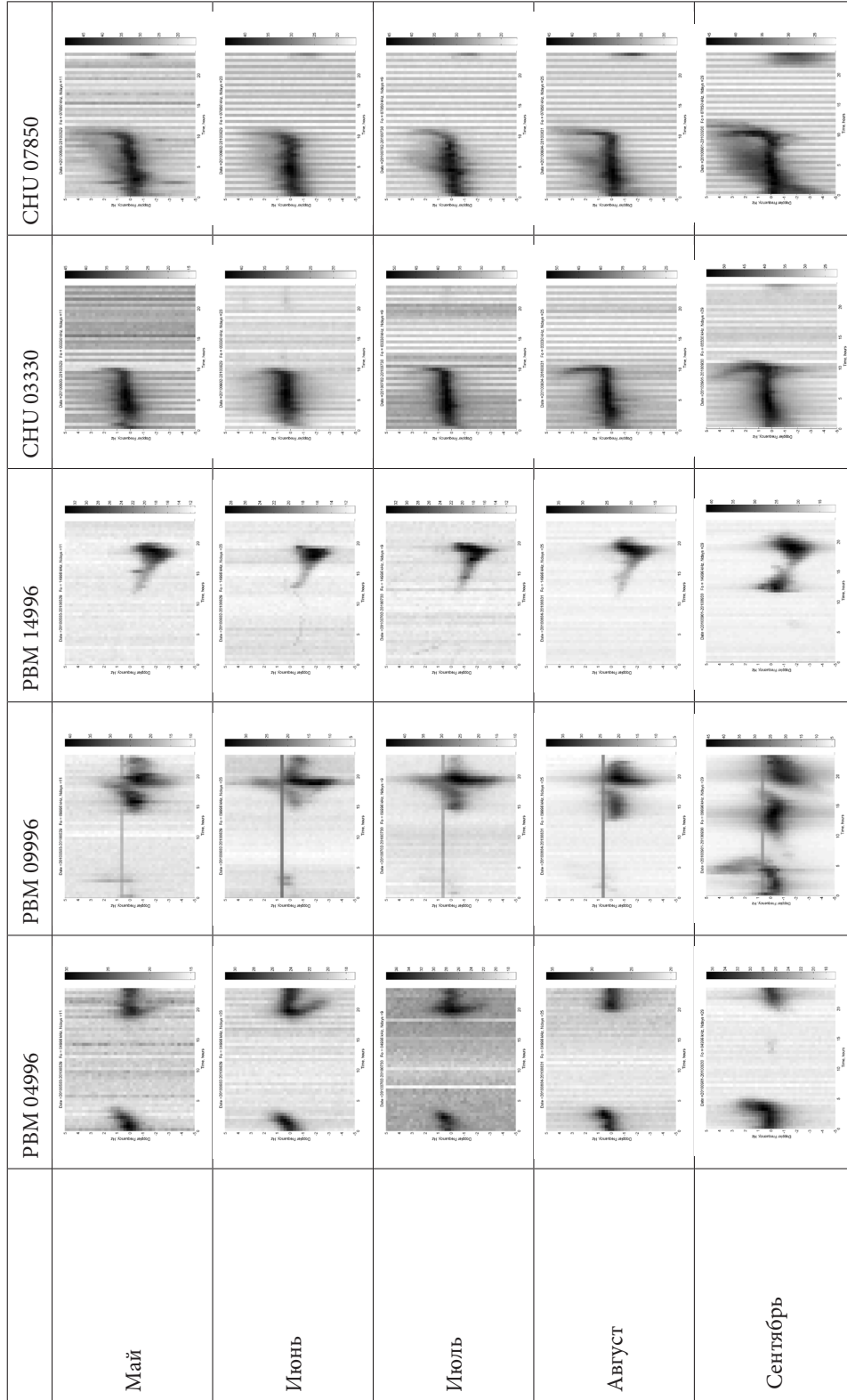


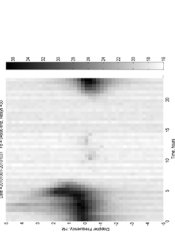
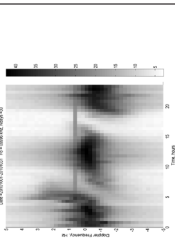
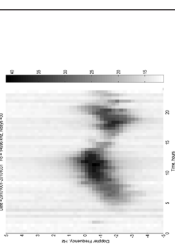
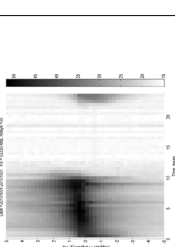
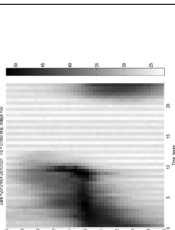
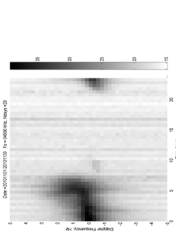
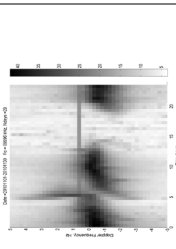
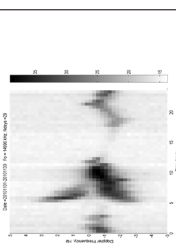
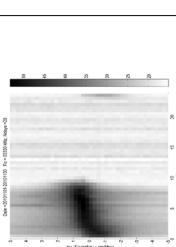
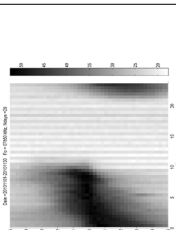
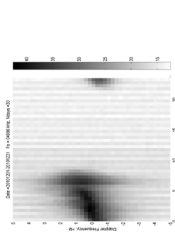
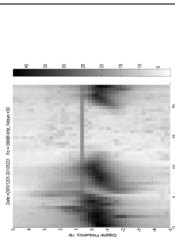
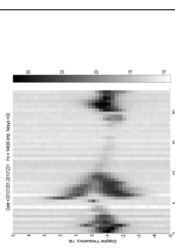
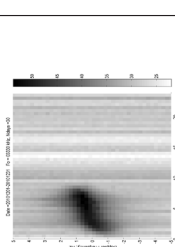
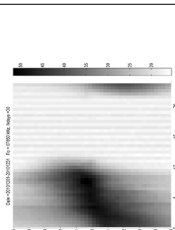
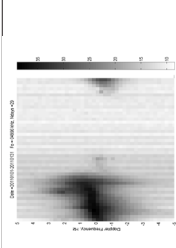
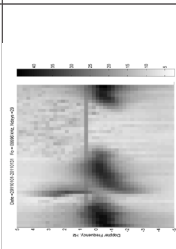
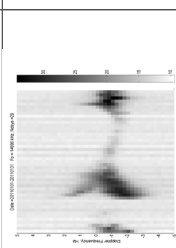
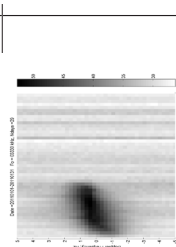
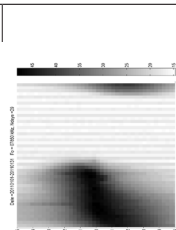
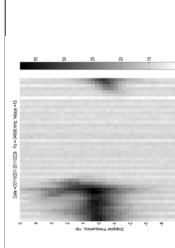
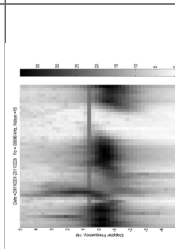
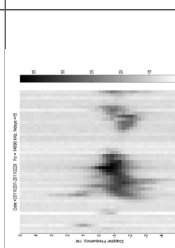
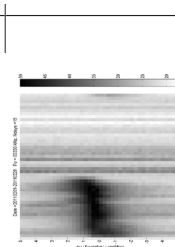
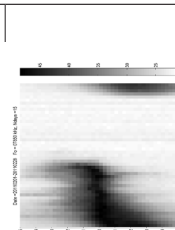
Рис. 2. Суточные спектрограммы, полученные 20.09.2010 (а-д), 22.09.2010 (е-к) и 24.09.2010 (л-п).
 а), е), л) РВМ 04996 кГц; б), ж), м) РВМ 09996 кГц; в), з), н) РВМ 14996 кГц; г), и), о) СЧУ 03330 кГц,
 д), к), п) СЧУ 07850 кГц.

Таблица 2

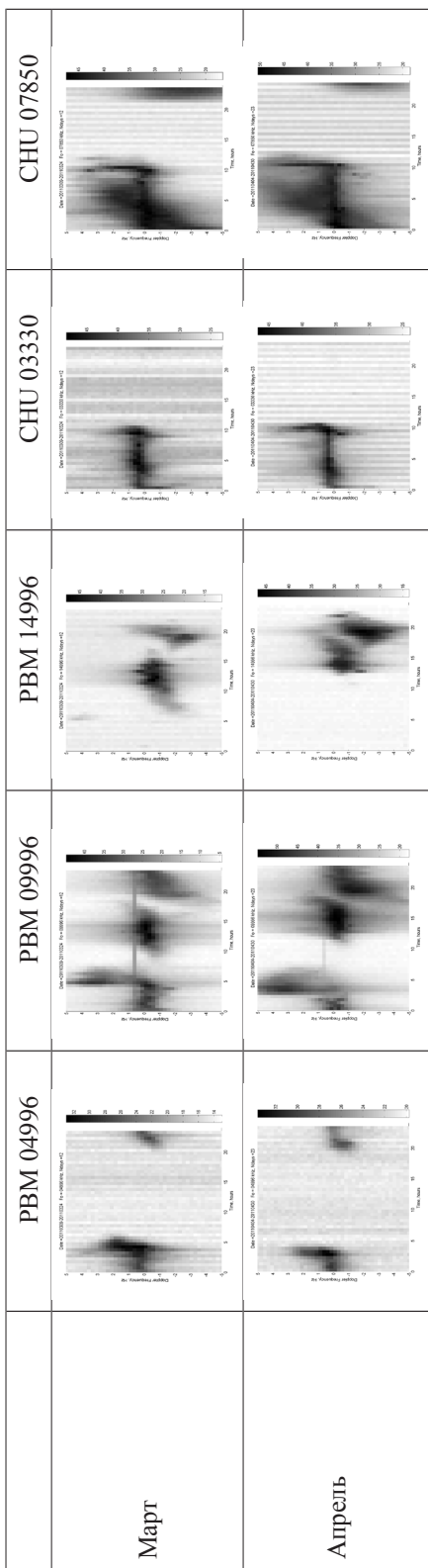
Среднемесячные спектрограммы сигналов на трассе РВМ-УАС (1–3 колонки) и СЧУ-УАС (4–5 колонки) на частотах (по номерам столбцов):
 1. 4996 кГц, 2. 9996 кГц, 3. 14996 кГц, 4. 3330 кГц, 5. 7850 кГц.



Продолжение таблицы 2

	PBM 04996	PBM 09996	PBM 14996	CHU 03330	CHU 07850
Октябрь					
Ноябрь					
Декабрь					
Январь					
Февраль					

Окончание таблицы 2



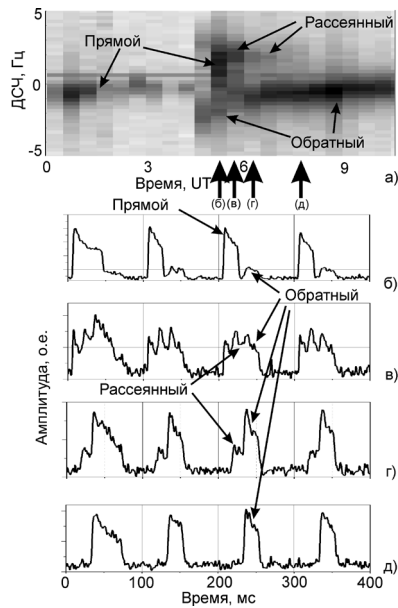


Рис. 3. а) Спектрограмма сигнала РВМ на частоте 09996 кГц в 00:00-10:30, обгибающие импульсов, принятых на УАС в 4:54 (б), 5:24 (в), 5:54 (г) и 7:24 (д).

На рис. 4 показаны сезонно-суточные вариации времени распространения сигналов РВМ 4996 кГц и 9996 кГц. Нормированные гистограммы времен запаздывания в различные моменты суток для всего массива данных приведены на рисунках 5 а–б. Значения каждого отсчета гистограммы показаны в оттенках серого цвета (см. шкалу справа). Для выделения основных путей распространения сигналов на рис. 5. в–г в координатах «дополнительный групповой путь – время суток» выделены интервалы времени, в пределах которых сигнал с групповым путем данной длины был наиболее интенсивным в течение трех и более суток.

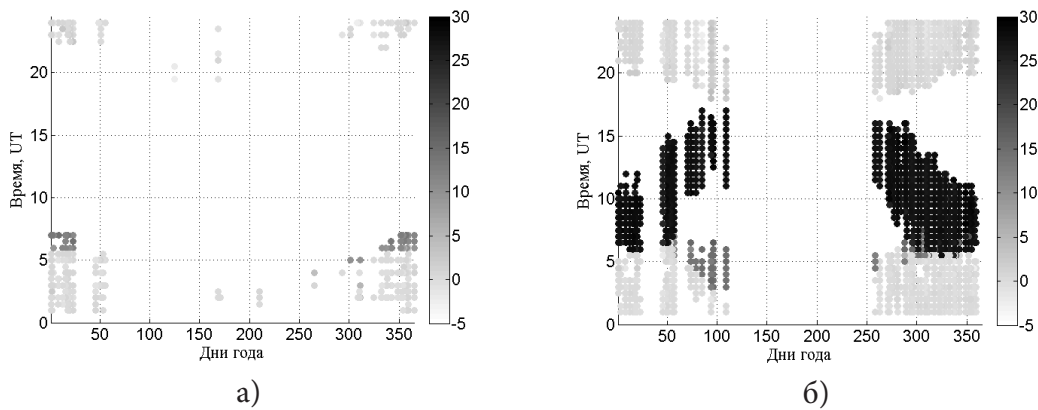


Рис. 4. Сезонно-суточные вариации времени распространения сигналов на трассе РВМ-УАС относительно времени распространения первого в течение суток принятого сигнала (показаны в оттенках серого, шкала в справа от рисунков в миллисекундах): а) частота 4996 кГц, б) частота 9996 кГц.

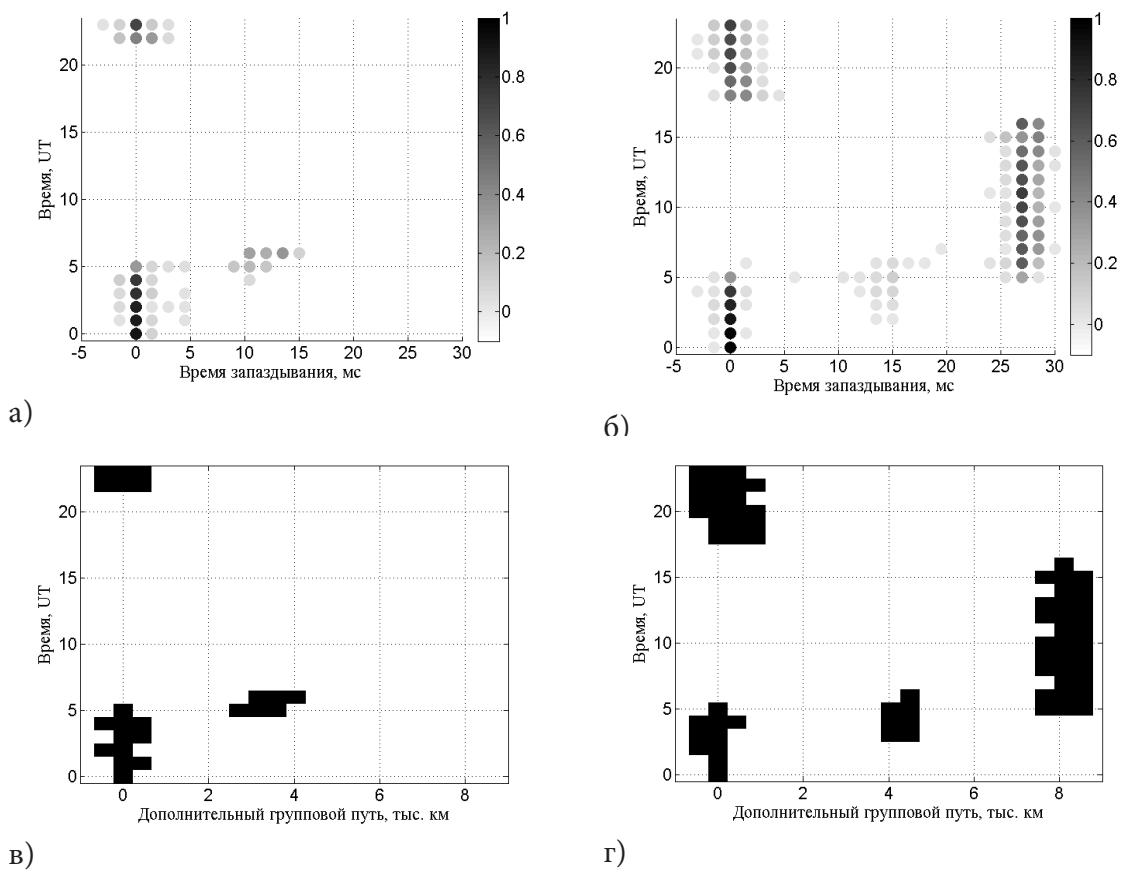


Рис. 5. Суточные вариации гистограмм распределения времени задержек (а, б), и дополнительные (к длине прямой трассы) длины групповых путей распространения сигналов (в, г) на трассе РВМ-УАС: а), в) частота 4996 кГц, б), г) частота 9996 кГц.

Анализируя полученные результаты, можно отметить, что во временном интервале 4–7 часов на обеих частотах выделяются сигналы, время распространения которых увеличивается на 9–17 мс по сравнению с прямой трассой, что соответствует дополнительному групповому пути в 2,5–5 тысяч километров (рис. 4, 5). Столь большие задержки вряд ли можно объяснить вариациями ионосферных условий вдоль прямой трассы, они могут быть связаны только с распространением сигналов путями, лежащими вдалеке от дуги большого круга. Весьма вероятно, этот дополнительный путь (как и в случае 10.11.2010, рис. 3) появляется в результате распространения сигнала путем рассеяния на ионосферных неоднородностях в области полярного овала. Такие «аномальные» сигналы наблюдаются только с сентября по апрель. Во всех случаях появления этого эффекта северный полярный овал, расположенный к северу северо-западу от РВМ, находился в неосвещенной части ионосферы, тогда как южный овал, лежащий к югу юго-востоку от УАС, зачастую находился в дневном секторе. Как известно, авроральные высыпания частиц из плазменного слоя, приводящие к росту интенсивности ионосферных неоднородностей, более интенсивны в ночной части овалов (см. например, результаты измерений на сайте <http://www.swpc.noaa.gov/pmap/pmapS.html>). Кроме того, трасса, проходящая через северный полярный овал, лежит существенно западнее трассы, проходящая через южный овал. Это приводит к тому, что в утренние часы (4–7 часов) освещенность трассы, лежащей западнее, меньше, чем трассы, лежащей восточнее. Поскольку с увеличением освещенности возрастает затухание ВЧ сигналов, можно заключить, что в интервале 4–7 часов на УАС принимался сигнал РВМ, рассеянный на неоднородностях именно северного полярного овала.

В интервале наблюдений с 5 до 17 часов сигнал РВМ на частоте 9996 кГц распространялся вдоль обратной радиолинии (рис. 4, 5), причем после 7 часов обратная трасса для этой частоты становится единственно возможной. В конце суток, после 18 часов, сигналы РВМ на обеих частотах вновь распространяются только прямой радиолинией.

5. Обсуждение экспериментальных результатов

Для идентификации путей распространения основных составляющих в спектрах сигналов проведем сопоставление результатов измерения времени их распространения (рис. 4–5) со средне-месячными спектрограммами (табл. 2). Так сигналы станции РВМ 4996 кГц распространяются преимущественно вдоль прямой трассы в ночное и сумеречное время во все сезоны года. Дополнительная пространственная мода, групповой путь которой на 2,5–5 тыс. км превышает длину прямой трассы, появляется после 3 часов, а в 5–7 часов эта мода становится преобладающей. Она связана, как было показано выше, с рассеянием на ионосферных неоднородностях северного полярного овала. В спектрах этой моде соответствует широкополосная (рассеянная) составляющая, которая наблюдается в усредненных спектрограммах с октября по апрель (табл. 2). Преобладание интенсивности рассеянного сигнала над прямым объясняется, вероятнее всего, тем, что прямая радиолиния в это время становится освещенной, что приводит к росту поглощения радиоволн в ионосфере. В то же время, траектория распространения сигнала через северный полярный овал расположена западнее прямой радиолинии и находится в ночных условиях, поэтому затухание вдоль нее остается сравнительно небольшим. Отметим, что за все время наблюдений (май 2010 – март 2011) ни разу не был зарегистрирован сигнал РВМ 4996 кГц, пришедший по обратной трассе. Это позволяет предположить, что приведенная в работе Зализовского и др. (2007) интерпретация раздвоение спектра сигнала 4996 кГц на трассе РВМ-РАО, наблюдавшаяся 17.11.2002, распространением вдоль прямой и обратной дуг большого круга, была ошибочной. Заметим, что в том эксперименте временная селекция пространственных компонент сигнала не использовалась. Скорее всего, второй максимум в спектрах сигнала РВМ 4996 кГц 17.11.2002 появлялся вследствие рассеяния сигнала на неоднородностях северного полярного овала.

Наиболее сложная картина наблюдается в спектрограммах сигнала РВМ на частоте 9996 кГц (табл. 2). С мая по август сигнал распространяется только в вечерние часы вдоль линии терминатора, проходящего одновременно через передающую и приемную позиции. Сначала в спектрограммах появляется ветвь обратного сигнала (табл. 2). В 18–20 часов одновременно наблюдаются быстро нарастающий прямой сигнал, появляющийся с отрицательным ДСЧ, и убывающий обратный сигнал с растущим ДСЧ. В 20–24 часа регистрируется только убывающий по мощности сигнал с прямой радиолинии. В сентябре–марте сигнал РВМ 9996 кГц наблюдается практически в течение всех суток. Так в 0–4 часа сигнал всегда распространяется прямой радиолинией. В 4–7 часов существенная часть энергии приходит путем рассеяния от северного полярного овала (в спектрограммах сентября–апреля – это положительный «сателлит», его ДСЧ составляет 2–5 Гц). Примерно в это же время начинает регистрироваться сигнал, пришедший обратной трассой с отрицательными значениями ДСЧ. Зачастую в октябре–феврале все три сигнала приходят в приемный пункт одновременно (см. табл. 2, рис. 3). Далее с 7 до 18 часов сигнал 9996 кГц распространяется только обратной радиолинией, причем в сентябре–октябре и марте мощность именно этого сигнала максимальна в течение всех суток. После 19 часов сигнал вновь приходит в приемный пункт по прямому пути.

В сигнале РВМ на частоте 14996 кГц с помощью импульсной селекции были выделены спектральные составляющие, распространяющиеся только прямой и обратной трассами, при этом боковые пути распространения обнаружены не были. Условия распространения сигнала этой частоты в мае–августе в целом похожи на те, что наблюдаются на частоте 9996 кГц: до 17–18 часов иногда выделяется слабый сигнал с обратной трассы, с 17 до 21 регистрируется достаточно мощный сигнал, пришедший прямым путем. Сигнал с обратной радиолинии устойчиво наблюдается в сентябре в 12–16, и далее, в октябре этот сигнал регистрируется с 5 до 16, в ноябре – с 5 до 12, в декабре – примерно с 6 до 10. Начиная с января, ситуация развивается противоположно, и в марте сигнал РВМ частоты 14996 кГц, пришедший обратной трассой, принимается с 6 до 16 часов. Отметим также, что сигнал, пришедший по прямой трассе, пусть и на низком уровне, регистрируется в ноябре–январе в течение дневного времени. Таким образом, сигнал станции на высшей частоте является единственным из всех рассмотренных, который иногда достигает приемного пункта по полностью освещенной трассе.

Анализируя поведение сигналов станции CHU на обеих частотах (3330 кГц и 7850 кГц), можно отметить, что они, как и сигнал RVM частотой 4996 кГц, уверенно регистрируются на УАС только в ночное и сумеречное время. В мае–июле спектр сигналов CHU узкий, что вероятно объясняется его «зеркальным» отражением от ионосферы и многоскачковым механизмом распространением вдоль прямой трассы. В августе и последующих месяцах в спектрах все более отчетливо проявляется широкополосная компонента, которая в ноябре–феврале становится преобладающей. На частоте 7850 кГц этот эффект заметен лучше, но он присутствует и на частоте 3330 кГц. Поведение широкополосной компоненты соответствует эффекту рассеяния волны на ионосферных неоднородностях. «Тело» широкополосной части спектра в сигнале CHU на частоте 7850 кГц изо дня в день дрейфует от отрицательных значений ДСЧ (порядка $-3 \dots -4$ Гц) в вечернее время до таких же по величине положительных значений в утренние часы. Следует также отметить, что в мае, июле и августе лучше просматривается утренняя, положительно смещенная компонента, тогда как в ноябре–феврале вечерняя часть рассеянной ветви выделяется не хуже утренней. Весьма вероятно, что, как и в сигналах RVM на частотах 4996 и 9996 кГц, широкополосная ветвь в спектрограммах сигналов CHU связана с рассеянием сигналов на ионосферных неоднородностях северного полярного овала. В июне рассеяния практически нет, поскольку северный овал все время расположен в дневных условиях и поэтому выражен слабо. Начиная с августа, он начинает попадать в ночные условия, где интенсивность высипаний, а следовательно, и ионосферных неоднородностей, возрастает, что приводит к усилению рассеяния, которое постепенно становится основным механизмом распространения сигналов на трассе CHU-УАС. Можно предположить, что отмеченное поведение ДСЧ рассеянной части сигнала станции CHU вероятнее всего связано с конвекцией плазмы внутри области овала, в той его части, где выполняются ракурсные условия рассеяния сигнала в направлении УАС (Безродный и др., 2011; Галушко и др., 2012).

По всей видимости, подобные измерения спектральных особенностей поведения сигналов, рассеянных в полярных областях, позволяют оценивать скорости дрейфа плазменных неоднородностей и, возможно, восстанавливать вариации электрических полей на ионосферных высотах во время авроральных активаций.

6. Заключение

В настоящей работе предложена методика частотно-временной селекции пространственных компонент ВЧ-сигналов, распространяющихся на сверхдальних радиолиниях. Отличительной особенностью проведенных экспериментальных исследований является то, что в качестве «пробных» сигналов использовано уже существующее излучение ВЧ-радиостанций службы точного времени, расположенных в северном полушарии, а систематический прием был организован в Антарктиде на УАС «Академик Вернадский».

В статье проанализирован годовой массив измерений параметров ВЧ сигналов на радиотрассе RVM-УАС на трех частотах и CHU-УАС на двух частотах. Построены и интерпретированы усредненные месячные спектрограммы сигналов, исследованы сезонные и суточные вариации групповых путей распространения различных спектральных составляющих принятых волновых полей. Проведена селекция пространственных мод сигналов, соответствующих различным участкам спектрограмм. Выделены сигналы, распространяющиеся вдоль прямой и обратной трасс. Обнаружены устойчивые «аномальные» сигналы, траектории которых сильно отклоняются от дуг большого круга. Предложена качественная физическая модель возникновения таких каналов распространения. Формирование «аномальных» сигналов возникает в областях полярных овалов за счет рассеяния радиоволн на интенсивных авроральных неоднородностях. Исследование доплеровских спектров рассеянных сигналов позволяют оценивать динамику высокоширотной плазмы и отслеживать авроральные активации.

В настоящее время измерения параметров сигналов радиостанций RVM и CHU на станции «Академик Вернадский» продолжаются в непрерывном мониторинговом режиме.

Благодарности. Авторы выражают признательность сотрудникам отдела радиофизики геокосмоса С. Б. Кашееву, В. Г. Галушко и А. С. Кашееву за помощь в проведении исследований, а также полезные советы и замечания в процессе обсуждения результатов. Мы также благодарны администрации НАНЦ МОН Украины за поддержку этих исследований на УАС «Академик Вернадский». Работа выполнена в соответствии с Государственной целевой научно-технической программой проведения исследований в Антарктике на 2011–2020 годы по научному направлению «Геокосмические исследования». Обработка и интерпретация экспериментальных данных проведены при финансовой поддержке ведомственной НИР «Ятаган-2» (номер госрегистрации 0011U000063) и конкурсных НИР «Лирус» (номер госрегистрации 0115U004086) и «Шпицберген» (номер госрегистрации 0115U004079).

Список литературы

1. **Безродный В. Г.** Ракурсное рассеяние ВЧ радиоволн на магнитоориентированных неоднородностях плоскостной ионосферы. / В. Г. Безродный, В. Г. Галушко, Б. Райниш // Радиофизика и Радиоастрономия. – 2011. – Т. 16, № 1. – С. 33.
2. **Белей В. С.** Влияние главного ионосферного провала на дальнейшее распространение. / В. С. Белей, О. Б. Вейцман, В. Г. Галушко, и др. – В кн. «Дифракция и распространение волн в неоднородных средах». – М.: МФТИ, 1987. С. 116 – 121.
3. **Бернгард О. И.** Двухпозиционная локация высокоширотных ионосферных неоднородностей с использованием декаметрового радара ЕКВ и радиотелескопа УТР-2: первые результаты / О. И. Бернгард, К. А. Кутелев, В. И. Куркин, и др. // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2015. – Т. 58, № 6. – С. 433 – 453.
4. **Галушко В. Г.** О Возможном механизме «саморассеяния» мощных ВЧ сигналов в ионосфере / В. Г. Галушко, В. Г. Безродный, А. В. Колосков, А. В. Зализовский // Радиофизика и радиоастрономия, 2012. т. 17, № 2, принята в печать.
5. **Гуревич А. В.** Сверхдальнее распространение коротких радиоволн / А. В. Гуревич, Е. Е. Цедина. – М.: Наука, 1979. – 250 с.
6. **Зализовский А. В.** Доплеровская селекция КВ-радиосигналов на сверхдальних трассах. / А. В. Зализовский, В. Г. Галушко, А. С. Кашеев, и др. // Геомагнетизм и Аэрономия. – 2007. – Т. 47, № 5. – С. 674–684.
7. **Зализовский А. В.** Эффекты рассеяния ВЧ сигналов на плазменных неоднородностях полярных овалов / А. В. Зализовский, С. Б. Кашеев, И. И. Пикулик, и др. // Remote Radio Sounding of the Ionosphere (ION 2013): International School-Conference, September, 30 – October, 4, 2013: Book of Abstracts. – Maly Mayak (Big Alushta), Crimea, Ukraine, 2013. – P. 31.
8. **Кашеев С. Б.** Экспериментальные исследования спектральных характеристик КВ сигналов на дальних и сверхдальних трассах. / С. Б. Кашеев, А. В. Колосков, А.В. Зализовский, и др. // Радиофизика и Радиоастрономия. – 2009. – Т. 14, №1. – С. 12 – 25.
9. **Кашеев С.Б.** Вариации частоты КВ сигналов на протяженных трассах во время солнечного затмения. / С.Б. Кашеев, А.В. Зализовский, А.В. Колосков, и др. // Радиофизика и Радиоастрономия. – 2009. – Т. 14, № 4. – С. 353 – 366.
10. **Литвиненко Л. Н.** Электромагнитные проявления геофизических эффектов в Антарктиде. / Под ред. Л. Н. Литвиненко, Ю. М. Ямпольского. – Харьков: Радиоастрономический ин-т НАН Украины. 2005. – 331 с.
11. **Barry G. H.** Extraterrestrial and ionospheric sounding with synthesized frequency sweeps. / G.H. Barry and R.B. Fenwick // Hewlett-Packard J. – 1965. – 16. – P. 8 – 12.
12. **Bennett J. A.** The ray theory of Doppler frequency shifts / J. A. Bennett // Australian journal of physics. – 1968. – Vol. 21. – P. 259–272.
13. **Galushko V. G.** Ionospheric diagnostics using wave field diffraction near the caustic / V.G. Galushko, and Y.M. Yampolski // Radio Science. – 1996. – 31, N 5. – P. 1109–1118.
14. **Galushko V. G.** Frequency-and-angular sounding of the ionosphere. / V.G. Galushko // Telecommunications and radio engineering. – 1997. – V. 51, N 6–7. – P. 1–6.
15. **Reinish, B. W.** New techniques in ground-based ionospheric sounding and studies. / B.W. Reinish // Radio Sci. – 1986. – V. 21:3. – P. 331–346.
16. **Yampolski Y. M.** Non-linear interaction between Schumann resonances and HF Signals / Y. M. Yampolski, P. V. Bliokh, V. S. Beley, et al. // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics – 1997. – V. 59, N 3. – P. 335–342.