

Экспериментальные исследования спектральных характеристик КВ сигналов на дальних и сверхдальних трассах

С. Б. Кашеев, А. В. Колосков, А. В. Зализовский, В. Г. Галушко,
И. И. Пикулик, Ю. М. Ямпольский, В. И. Куркин¹,
Г. И. Литовкин¹, А. И. Орлов¹, П. В. Петько¹

*Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина
E-mail: kascheev@rian.kharkov.ua*

*¹Институт солнечно-земной физики, Сибирское отделение Российской АН,
ул. Лермонтова 126-а, г. Иркутск, 664033, Россия
E-mail: kurkin@iszf.irk.ru*

Статья поступила в редакцию 20 июня 2008 г.

Приведены результаты исследований зависимостей спектральных характеристик КВ сигналов от времени суток и частоты на трассах протяженностью от 3.5 до 19 тыс. км, полученные в разные сезоны. Показано, что изменения амплитуды принятого сигнала и оптимальной рабочей частоты на сверхдальних трассах при отсутствии магнитных возмущений качественно совпадают с прогнозом, полученным в рамках волноводного подхода (метода нормальных волн) к описанию распространения КВ с использованием международной справочной модели ионосферы IRI. Проанализировано влияние на доплеровский сдвиг и амплитуду спектрального максимума принятого сигнала глобальных ионосферных возмущений, обусловленных терминатором и затмением Солнца. Показана возможность доплеровской селекции прямого и обратного сигналов на контрольных радиопутьях средней и большой протяженности.

1. Введение

Ионосферное распространение коротких радиоволн (3 ÷ 30 МГц) по-прежнему широко используется для решения задач радиосвязи и радиовещания. По данным Международного союза по электросвязи (ITU, Швейцария) в этом диапазоне в мире работает около 5000 передающих станций [1]. Из-за близости рабочих частот к плазменным частотам ионосферы параметры отраженных от нее сигналов чутко реагируют на вариации пространственно-временного распределения электронной концентрации [2, 3]. Это обстоятельство позволяет создавать специальные КВ сис-

темы ионосферной диагностики: станции вертикального, наклонного и возвратно-наклонного зондирования. Сотни таких установок действуют сегодня в разных регионах земного шара, включая Арктику и Антарктиду [4, 5]. Большинство из них в качестве зондирующих сигналов используют специальные виды излучения со сложными законами модуляции. Информационными параметрами, позволяющими решать задачу радиодиагностики, являются: частотная зависимость группового времени запаздывания отраженных сигналов, их поляризационные характеристики, сечения обратного рассеяния, углы прихода, доплеровские смещения частоты (ДСЧ). В середине 80-х гг.

прошлого столетия в Радиоастрономическом институте НАН Украины (РИ НАНУ) был разработан метод частотно-углового зондирования ионосферы (ЧУЗИ) [6], отличительной особенностью которого являлось использование в качестве диагностических не специальных сигналов, а уже существующего излучения широкоэмиттерных станций. Основными измеряемыми параметрами были углы прихода отраженных сигналов и ДСЧ на разных несущих частотах. Применение метода ЧУЗИ на коротких односкачковых радиолониях (длиной меньше 1000 км) позволяет воссоздать высотный профиль электронной концентрации [7], восстановить ее горизонтальные градиенты [8], визуализировать волнообразные возмущения [9]. Очевидно, что на многоскачковых протяженных радиотрассах использование ЧУЗИ затруднено из-за интегрального характера вариаций информационных параметров. Тем не менее доплеровские спектры сигналов на сверхдальних радиолониях несут отпечаток нестационарных ионосферных процессов и в рамках моделей пространственно-временного распределения электронной концентрации позволяют отслеживать динамику глобальных неоднородностей, в частности, солнечного терминатора (СТ) [10] и искусственно созданных плазменных образований [11].

Цель настоящей работы – экспериментальное исследование поведения спектральных характеристик КВ сигналов на специальных контрольных радиолониях средней (до 6500 км) и большой протяженности (порядка 19000 км). В качестве излучающих станций использовались исследовательские передатчики Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской АН (ИСЗФ СО РАН), расположенные в Сибири и на Дальнем Востоке. Когерентные приемные системы созданы в РИ НАНУ и располагались в Украине и в Антарктике. Объектами исследования являлись детерминированные ионосферные процессы – СТ и солнечное затмение (СЗ), а также спорадические крупномасштабные плазменные возмущения в экваториальных и полярных областях. Экспериментально оцененные условия распространения КВ сигналов сопоставлены с модель-

ным прогнозом, полученным в ИСЗФ СО РАН в рамках волноводного подхода к описанию сверхдального распространения КВ [12].

2. Методика проведения исследований

Измерения спектральных характеристик коротковолновых сигналов на дальних и сверхдальних трассах были организованы совместно РИ НАНУ и ИСЗФ СО РАН. Всего в 2004 – 2006 гг. в разные сезоны были проведены 4 измерительные кампании общей продолжительностью 20 дней.

Излучение непрерывных либо импульсных пробных сигналов обеспечивали три передающие комплекса Российской сети ЛЧМ зондирования, которые располагались вблизи Иркутска (52.75° с. ш., 103.63° в. д.), Магадана (59.57° с. ш., 150.47° в. д.) и Норильска (69.12° с. ш., 88.17° в. д.). Их основные технические данные приведены в таблице.

Аналого-цифровые приемно-измерительные комплексы (ПИК), разработанные в РИ НАНУ [13], были установлены в двух пунктах. Восьмиканальный когерентный доплеровский приемник был расположен в Харьковской обл. на Радиоастрономической обсерватории (РАО, 49.67° с. ш., 36.83° в. д.), двухканальный ПИК был развернут на Украинской антарктической станции (УАС) “Академик Вернадский” (65.25° ю. ш., 64.27° з. д.). Комплексы отличались между собой не только числом каналов, но и антенно-фидерными системами: на РАО прием производился на широкополос-

Таблица. Основные технические данные передающих комплексов

Диапазон рабочих частот, МГц	5 ÷ 20
Излучаемая мощность, кВт	1 ÷ 2
Относительная нестабильность задающих генераторов передатчиков, не выше	$5 \cdot 10^{-9}$
Длительность излучаемых импульсов, мс	5
Период повторения излучаемых импульсов, мс	25

ный вертикальный вибратор, а на УАС – на горизонтальную антенну [13]. Запись сигналов и спектральная обработка осуществлялась в цифровом виде. Обе приемные системы позволяли измерять доплеровский сдвиг частоты пробных сигналов с разрешением до 0.05 Гц и флуктуации времени прихода импульсов с точностью ± 100 мкс.

На рис. 1 показана карта расположения передающих и приемных пунктов. Пунктирными кривыми нанесены проекции прямых радиотрасс на поверхность Земли. Штрихпунктирной линией показано положение СТ в момент его прохождения через оба приемных пункта (05:15 UT 1 декабря 2006 г). Протяженность контрольных трасс по поверхности Земли составляла от 3.5 до 18.8 тыс. км. Точка антипода для антарктического приемного комплекса находилась вблизи Якутска практически в центре треугольника, образованного передатчиками. Такое размещение приемного и передающих пунктов позволило одновременно исследовать вариации спектральных характеристик пробных сигналов на сверхдаль-

них трассах с различными условиями освещенности.

Накануне каждой измерительной кампании проводился модельный расчет оптимальных рабочих частот (ОРЧ) и суточных вариаций напряженности электромагнитного поля для времени проведения эксперимента на всех задействованных сверхдальних трассах. Такие оценки были выполнены в ИСЗФ СО РАН в рамках волноводного подхода описания распространения КВ с использованием международной справочной модели ионосферы IRI [12]. Результаты моделирования проверялись в ходе специальных предварительных измерений, предшествовавших основным кампаниям, их продолжительность составляла один – два дня. В это время излучались сигналы расширенного диапазона пробных частот, который заведомо превосходил расчетный диапазон ОРЧ. Передающие пункты включались попарно и излучали непрерывные сигналы на фиксированных частотах сеансами длительностью по 2 мин. В следующие 2 мин происходила циклическая перестройка несущих частот и за-

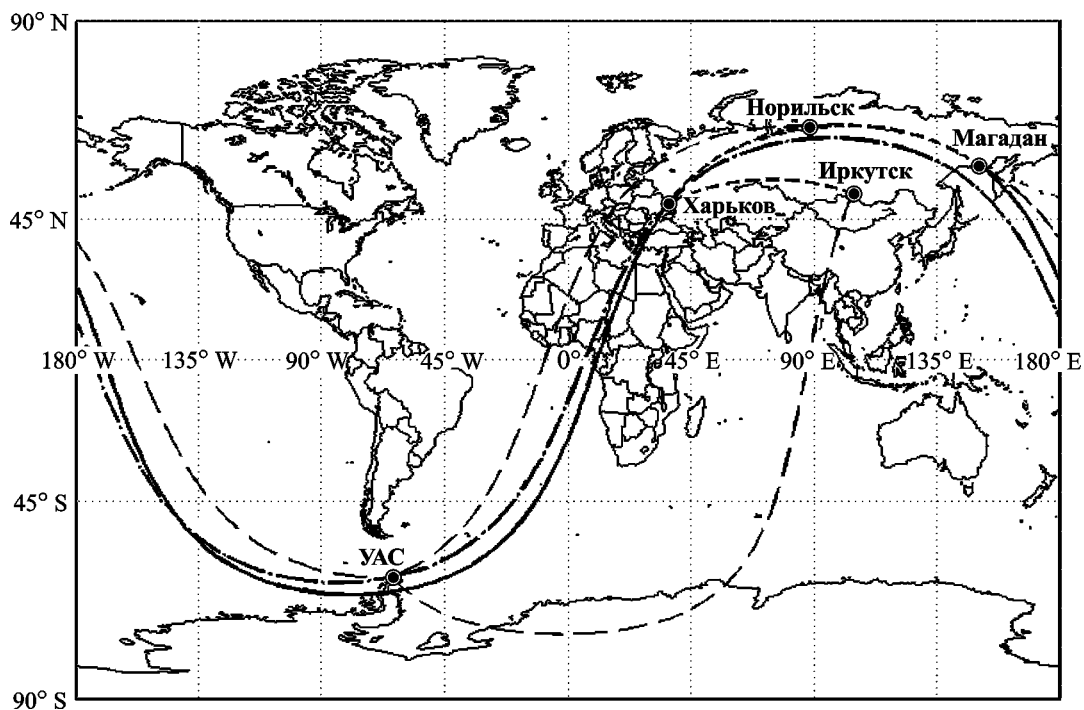


Рис. 1. Карта расположения передающих и приемных пунктов

действовала другая пара передатчиков. Общая продолжительность предварительных измерений составляла $8 \div 14$ ч в сутки. В приемных пунктах осуществлялась синхронная регистрация пробных сигналов, затем с помощью быстрого преобразования Фурье проводилось вычисление их доплеровских спектров. Полоса анализа составляла 10 Гц, спектральное разрешение варьировалось от 0.1 до 0.3 Гц. Полученные за $3 \div 10$ с мгновенные амплитудные спектры усреднялись в течение двух минут (длительность одного сеанса излучения). Такой режим обработки позволял достаточно точно измерять спектральные составляющие на всех рабочих частотах. ОРЧ для радиотрассы в текущий момент времени считалась та, амплитуда сигнала на которой была максимальной.

В качестве примера на рис. 2, а приведены результаты модельных расчетов и измерений суточного хода ОРЧ сигнала на трассе Иркутск – УАС 12 апреля 2004 г. На рис. 2, б показаны расчеты суточного хода амплитуды принятого сигнала на ОРЧ и измеренные значения в относительных единицах. Сплошной кривой в обоих случаях отмечен суточный ход расчетных величин на прямой трассе, а пунктирной – на обратной. Экспериментальные результаты представлены квадратными метками, которые соединены пунктирными линиями. В связи с отсутствием в Антарктиде возможности пространственной селекции [13] данные измерений представляют собой суперпозицию прямого и обратного сигналов. Из приведенных графиков видно хорошее качественное соответствие распространения сигналов прогнозируемых частот и результатов эксперимента, такое же совпадение наблюдалось и при проведении остальных трех измерительных кампаний. Следует отметить, что все измерения, как предварительные, так и основные, были проведены в магнитоспокойные дни.

По итогам предварительных измерений вблизи экспериментально оцененных значений ОРЧ выбирался более узкий частотный диапазон излучения пробных сигналов с минимально возможным уровнем помех от вещательных и коммерческих передатчиков.

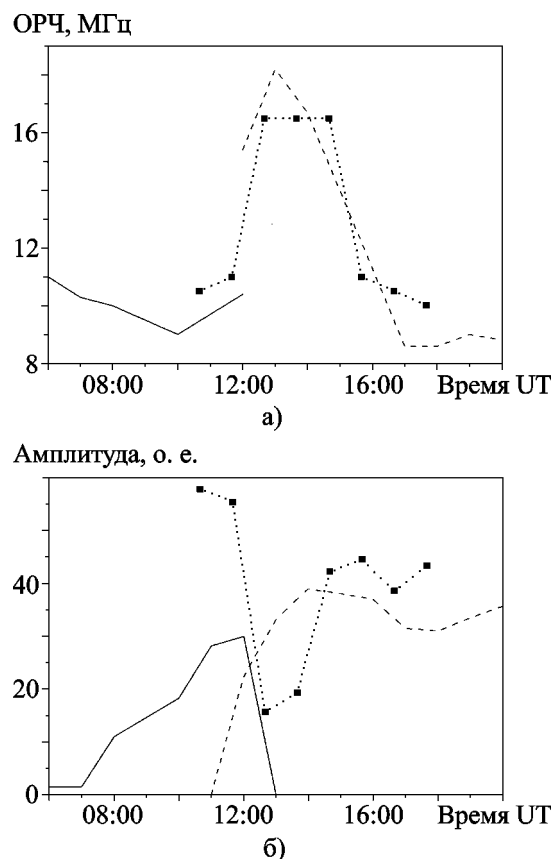


Рис. 2. Сравнение расчетных значений ОРЧ (а) и амплитуды сигнала (б) с результатами экспериментов на трассе Иркутск – УАС 12.04.2002 г.: — — обратная трасса; - - - - прямая трасса; ... ■ ... — эксперимент

3. Результаты измерений спектральных характеристик сигналов

3.1. Влияние солнечного терминатора на характеристики сигналов на сверхдальних трассах

Наилучшие условия распространения пробных радиосигналов (максимально продолжительное превышение уровня сигналов над шумами) наблюдались во время летней (для северного полушария) измерительной кампании с 3 по 7 июля 2006 г. Пробные передатчики располагались вблизи Иркутска и Магадана. Ежедневно с 08:00 до 20:00 UT излучались непрерывные сигналы на шести фиксированных частотах в диапазоне $6777 \div 15333$ кГц.

Полный цикл излучения длился 30 мин. Циклограмма измерений задавалась следующим образом: с “нулевой” минуты каждого получаса на двухминутном интервале работал иркутский передатчик на первой пробной частоте, затем на этой же частоте на 2 мин включался передатчик в Магадане. После его выключения опять “стартовал” иркутский пункт на следующей, более высокой, частоте и т. д. В конце полного цикла излучения следовала шестиминутная пауза.

На приемном пункте в Антарктиде осуществлялся спектральный анализ пробных сигналов в полосе 10 Гц. В реальном времени регистрировались мгновенные спектры с разрешением 0.3 Гц, которые затем усреднялись в течение двух минут. Оптимальные рабочие частоты оценивались по максимумам на спектральных зависимостях. На следующем этапе обработки значения амплитуд спектральных максимумов, полученные в одно и то же время суток, усреднялись за пять дней измерений. Результаты такой обработки приведены на рис. 3, а, б для трасс Иркутск – УАС и Магадан – УАС соответственно. (На рисунке показаны усредненные частотные зависимости амплитуды принятого сигнала для тех пробных частот, на которых наблюдалось наименьшее затухание.) В соответствии с теоретическими прогнозами на обеих трассах в суточном ходе имелось два ярко выраженных максимума. Первый из них совпадал со временем прохождения вечернего терминатора через передающий пункт, второй соответствовал времени прохождения СТ через приемный пункт. Временной интервал между первыми максимумами на разных трассах соответствует разному расстоянию передающих пунктов по долготе. На трассе Иркутск – УАС в течение всего времени суток оптимальной являлась частота 9.3 МГц. На трассе Магадан – УАС в утренние часы оптимальной была частота 6.8 МГц, в дневные – 8.3 МГц.

Особенности поведения спектрального состава сигналов на разных несущих частотах и их изменения во времени показаны на рис. 4. На нем приведены усредненные в течение двух минут спектры, полученные во время измерений 04.07.2006 г. Здесь же для соответствующи-

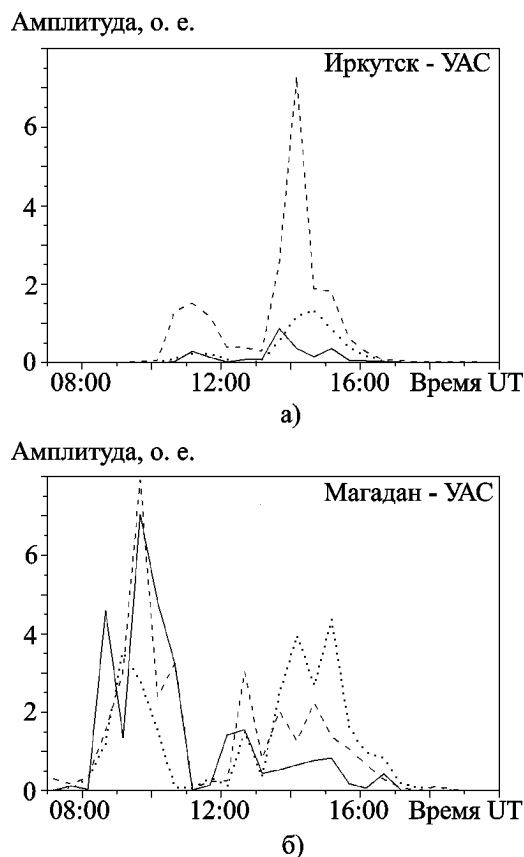


Рис. 3. Усредненные временные зависимости амплитуды спектральных максимумов на разных рабочих частотах во время измерительной кампании 3–7.07.2006 г.: а) – для трассы Иркутск – УАС (— — 6.8 МГц; --- — 9.3 МГц; — 11 МГц); б) – для трассы Магадан – УАС (— — 6.8 МГц; --- — 8.3 МГц; — 9.3 МГц)

щих моментов измерений отмечены положения линии СТ на поверхности Земли (левая колонка). Из приведенных зависимостей видно, что спектры носят изменчивый характер. Во время некоторых сеансов в спектрах отчетливо проявлялись два максимума с разностью в несколько герц. Ранее нами было показано, что двухмодовый спектр порожден суперпозицией прямого и обратного сигналов, распространяющихся в разных полушариях вблизи “восходного” и “заходного” терминаторов [10]. Убывающие и нарастающие пространственно-временные градиенты электронной концентрации на прямой и обратной ра-

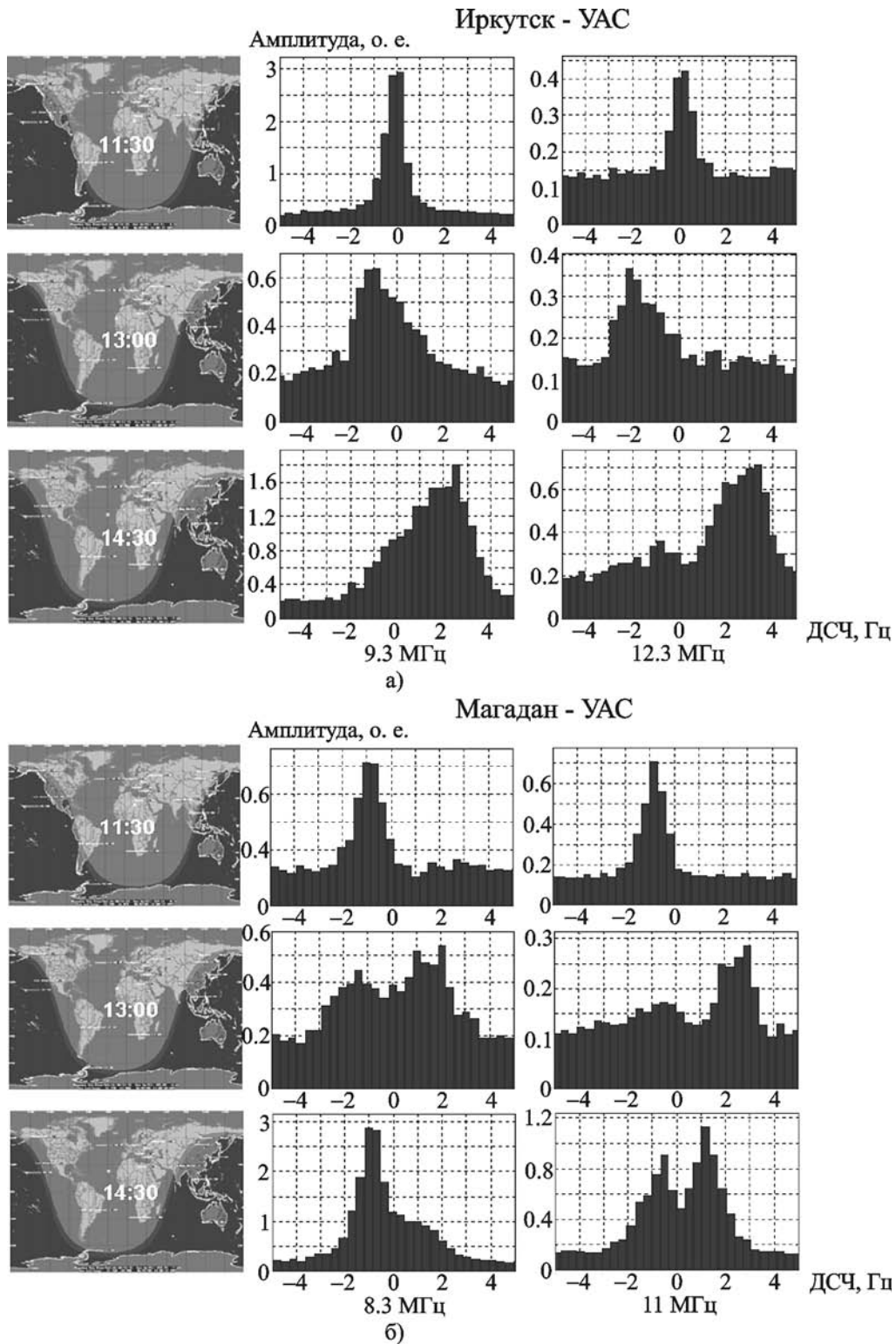


Рис. 4. Изменения спектров сигналов во времени на разных частотах на сверхдальних трассах Иркутск – УАС (а) и Магадан – УАС (б) 04.07.2006 г. и положение линии СТ на момент проведения измерений

диотрассах приводят к доплеровским сдвигам “прямого” и “обратного” сигналов разных знаков относительно несущей частоты.

Нулевые значения ДСЧ и сравнительно узкий спектр сигналов из Иркутска в 11:30 (рис. 4, а) соответствовали распространению по прямой трассе. Практически вся она в это время была освещена Солнцем, возмущений в ионосфере во время проведения измерений не было. Сигналы с отрицательными сдвигами частоты, которые наблюдались в 13:00, объяснялись прохождением вечернего терминатора через прямую трассу. Его движение сопровождалось уменьшением плотности плазмы в ионосфере (переход к ночным условиям), ростом высоты отражения, увеличением эффективного пути радиоволны и как следствие отрицательным доплеровским смещением сигнала. Спектральное расширение вызвано, скорее всего, нестационарными ионосферными условиями и как следствие существенной частотной модуляцией сигнала. По мере наступления ночных условий на прямой радиотрассе возрастал вклад обратной радиолинии. В 14:30 знак ДСЧ стал положительным. Это обусловлено преимущественным распространением сигналов вдоль обратной трассы, значительная часть которой в это время проходила через область утреннего терминатора. В ионосфере происходил процесс нарастания электронной концентрации, в соответствии с которым уменьшались высота отражения и эффективная фазовая длина траектории. Такие изменения сопровождалось положительным смещением частоты сигнала. На более высокой рабочей частоте в это же время отчетливо проявлялся второй спектральный максимум; эта мода сигнала соответствовала распространению через ночную ионосферу (по прямой трассе). Небольшой отрицательный сдвиг связан с медленным уменьшением плотности плазмы ночью. Отличие отношений амплитуд сигналов на прямой и обратной трассах на разных несущих частотах свидетельствовало о существенной частотной зависимости эффективного ионосферного поглощения.

В 11:30 UT сигнал из Магадана приходил по прямой трассе над Тихим океаном. Неболь-

шие отрицательные значения ДСЧ (рис. 4, б) обусловлены ночным временем и медленным уменьшением плотности плазмы вдоль трассы распространения. Существование в 13:00 двух мод, каждой из которых соответствовал свой спектральный максимум, объясняется одновременным распространением по прямой и обратной трассе. Сравнительно невысокий уровень сигналов свидетельствовал о больших потерях при распространении в это время суток (см. рис. 3). В 14:30 спектральные максимумы с отрицательными ДСЧ на обеих частотах обусловлены преимущественным распространением сигналов по обратной трассе через зону вечернего терминатора. Максимум с положительным ДСЧ на более высокой рабочей частоте соответствовал прямой трассе и утреннему терминатору вблизи приемного пункта. Различная форма спектров и непропорциональность ДСЧ излучаемым частотам для большинства сеансов измерений иллюстрировали сложные режимы распространения сигналов. По-видимому, одновременно реализовывались условия “скачкового” и “волноводного” механизмов распространения.

3.2. Суточные зависимости характеристик сигналов на трассах средней протяженности

Наиболее продолжительная измерительная кампания была проведена 25.11–02.12 2006 г. В ней было задействовано три передающих и два приемных пункта (см. рис. 1), которые работали ежедневно с 21:00 до 11:00 UT. Во время измерений передатчики включались попарно и излучали сигналы на фиксированных частотах сеансами длительностью 2 мин. В следующие 2 мин происходила циклическая перестройка несущих частот и задействовалась другая пара передатчиков. Первые два дня осуществлялись пробные эксперименты, излучение велось на 8 рабочих частотах в диапазоне 5.8 ÷ 19.3 МГц. Для основного цикла измерений было выбрано три из них (7.4, 9.3 и 11 МГц), что позволило получать данные на всех рабочих частотах с темпом шесть отсчетов в час. Измерения с передатчиками в Иркутске и Норильске проводились как в непрерывном, так и в импульсном режимах.

Передатчик в Магадане все время работал в режиме излучения несущей частоты.

Основное внимание во время этой кампании было уделено спектральным характеристикам пробных сигналов на линиях средней протяженности: Норильск – Харьков длиной 3.5 тыс. км, Иркутск – Харьков (4.6 тыс. км) и Магадан – Харьков (6.5 тыс. км). Обработка пробных сигналов проводилась по той же методике, что и для сверхдальних радиолиний. Сначала осуществлялся спектральный анализ в полосе 10 Гц с разрешением по частоте 0.3 Гц, затем мгновенные спектры усреднялись в течение двух минут, далее значения амплитуд и доплеровских сдвигов спектральных максимумов, полученные в одно и то же время суток, усреднялись за четыре дня основных измерений.

На рис. 5, а-в представлены полученные таким образом временные зависимости амплитуд максимумов сигналов на трех трассах на всех рабочих частотах. (Разрывы на графиках отвечают тем моментам времени, когда сигнал не превышал внешний шум ни в один из дней проведения измерений.) Временная зависимость амплитуды сигнала на трассе Иркутск – Харьков (рис. 5, а) достаточно хорошо соответствует режиму двукратного отражения от ионосферы (двухскачковому распространению). В ночное время уровень сигналов на всех пробных частотах был близок к уровню внешних шумов, что объяснялось низким значением критических частот вдоль всей трассы и как следствие отсутствием в принятом сигнале зеркальной компоненты. В ранние утренние часы наблюдался переход частоты пробного сигнала через максимально применимую частоту (МПЧ) для первого скачка (восточной половины трассы) протяженностью порядка 2300 км, что вызывало резкое возрастание уровня сигнала. Время перехода зависело от частоты сигнала и совпадало с прогнозируемым [14]. На западной половине трассы в это время еще продолжалось предутреннее снижение электронной концентрации в ионосфере, что приводило к уменьшению амплитуды сигнала, особенно заметному на более высоких частотах. Через $1.5 \div 3$ ч происходил переход через МПЧ для второго

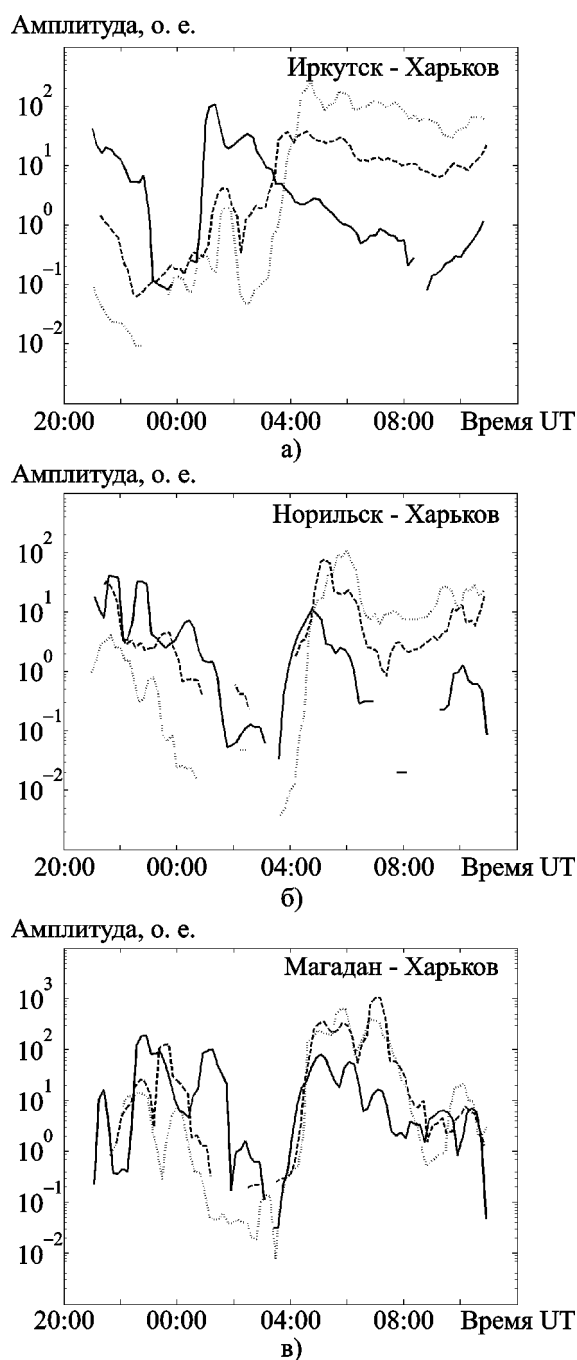


Рис. 5. Усредненные временные зависимости амплитуды спектральных максимумов сигналов на дальних трассах Иркутск – Харьков (а), Норильск – Харьков (б) и Магадан – Харьков (в) в период измерительной кампании 28.11–02.12 2006 г.: — – 7.4 МГц; --- – 9.3 МГц; – 11 МГц

скачка (западной половины трассы), и уровень сигнала снова заметно возрастал. Заметим, что угловое расстояние между расчетными точками отражения при двухскачковом распространении на этой трассе составляло примерно 32° по долготе, соответственно терминатор проходил западную точку отражения на 2.13 ч позднее, чем восточную. В дневные часы происходило плавное снижение уровня сигнала, обусловленное увеличением поглощения в нижних слоях ионосферы D и E; оно особенно ярко проявлялось на нижней рабочей частоте. На ней же хорошо виден вечерний подъем уровня сигнала при уменьшении ионизации в поглощающих слоях. Ночью следовало резкое уменьшение уровней сигналов для всех пробных частот, соответствовавшее превышению МПЧ на всех участках радиолиний.

Зависимости амплитуды сигналов от времени и частоты на трассе Норильск – Харьков (рис. 5, б) отвечали модели односкачкового распространения и отличались от рассмотренных выше отсутствием второго максимума сигналов в утренние часы. На суточном изменении амплитуды сигналов на линии Магадан – Харьков (рис. 5, в) на всех рабочих частотах просматривалось три синхронных максимума, причем первый из них, который следовал непосредственно после низкого ночного уровня, совпадал с максимумом на норильской трассе. Такое соответствие объяснялось тем, что основное влияние на энергетические характеристики оказывали ионосферные условия на участке Норильск – Харьков. Из карты, приведенной на рис. 1, видно, что обе трассы на этом участке практически совпадали. Сравнительно слабое влияние первой части магаданской трассы на суточный ход амплитуды обусловлено тем, что взаимодействие радиосигналов с ионосферной плазмой происходило значительно севернее, в области полярной ночи. В этом регионе суточный ход критических частот слоев F и E для зимних условий практически отсутствует [14].

Рассмотрим результаты измерений доплеровских сдвигов спектральных максимумов. Их усредненные за 4 дня зимней кампании значения приведены на рис. 6, а-в. В верхней

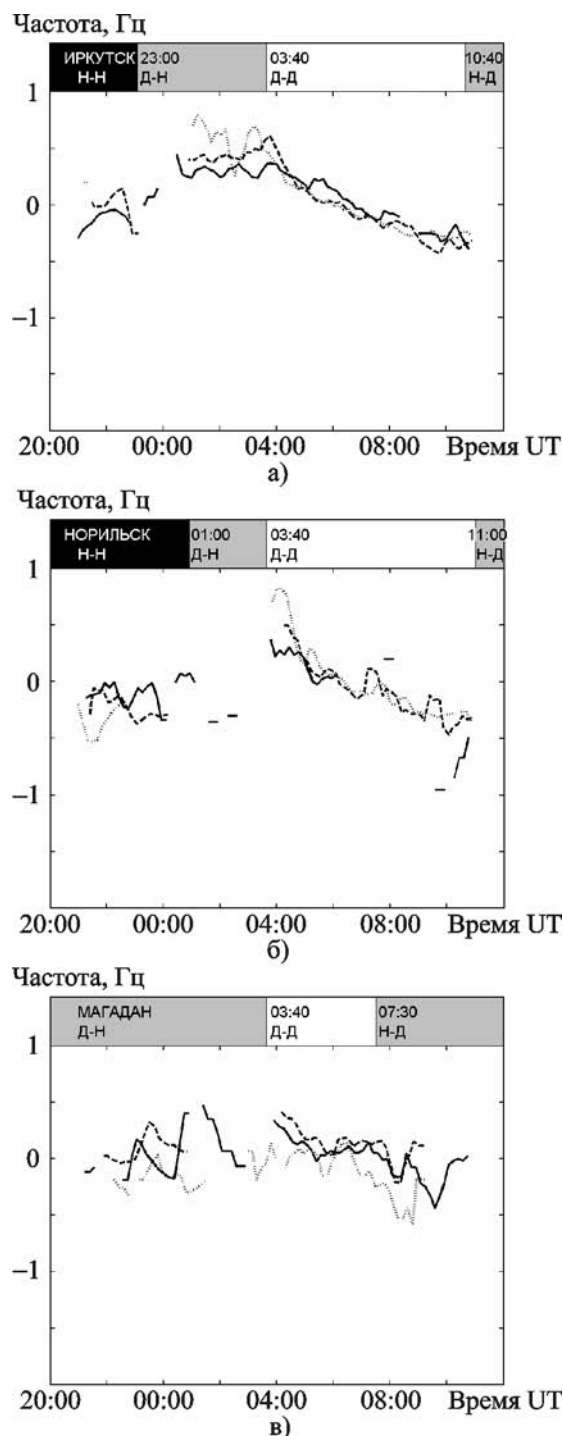


Рис. 6. Усредненные временные зависимости доплеровского сдвига частоты спектрального максимума сигналов на дальних трассах Иркутск – Харьков (а), Норильск – Харьков (б) и Магадан – Харьков (в) в период измерительной кампании 28.11–02.12 2006 г.: — – 7.4 МГц; --- – 9.3 МГц; – 11 МГц

части рисунков заштрихованными прямоугольниками показаны условия освещенности. Сокращение “Д-Д” – обозначает дневное время суток, “Н-Н” – ночное, “Д-Н” и “Н-Д” – соответствуют переходным условиям освещенности (наличию на трассе восходного или заходного терминаторов на высоте 250 км над поверхностью Земли). Приведенные зависимости подобны на иркутской и норильской трассах: в ночные часы доплеровский сдвиг колебался вблизи нулевых значений, при этом он не имел ярко выраженных временной и частотной зависимостей. После возрастания уровня сигналов в утренние часы практически синхронно на всех рабочих частотах наблюдались максимальные положительные ДСЧ величиной до 1 Гц. Вблизи полудня местного времени сдвиг монотонно спадал до нуля синхронно на разных частотах, а позднее, в вечерние часы, становился отрицательным. Коэффициент корреляции между временными зависимостями ДСЧ для разных частот с 01:00 до 11:00 UT на иркутской трассе был высоким и составлял $0.86 \div 0.94$. Для норильской радиолинии с 04:00 по 11:00 UT он изменялся в пределах $0.75 \div 0.9$. Как и на сверхдальних трассах, обращала на себя внимание непропорциональность ДСЧ рабочим частотам. Этот эффект являлся следствием отражения сигналов на различных высотах, на которых отличались вертикальные составляющие скорости движений ионосферной плазмы и/или скорости изменения ее плотности. Временная зависимость ДСЧ сигнала от магаданского передатчика имела некоторые отличия. У нее не был ярко выражен регулярный временной ход, меньшими были максимальные значения как положительного, так и отрицательного сдвига на всех рабочих частотах. По всей вероятности, этот эффект объяснялся большим угловым разносом приемного и передающего пунктов по долготе (114°) и соответственно более продолжительным существованием переходных условий освещенности вдоль трассы. Корреляция между вариациями ДСЧ на разных частотах с 04:00 до 11:00 UT не превышала уровень 0.6, что свидетельствовало о большей зависимости условий распро-

странения от несущей частоты на протяженных трассах.

Во время работы передатчиков в Иркутске и Норильске в импульсном режиме были измерены времена задержки прямых сигналов. Значения их соответствовали расчетным длинам трасс, флуктуации были незначительными, ± 200 мкс, что сравнимо с аппаратной точностью. Регулярно, в одно и то же время суток во все дни импульсной работы на частотах 9.3 и 11 МГц регистрировались две последовательности приходящих импульсов с разными задержками. У второй последовательности задержка соответствовала времени прихода сигнала обратного эха (СОЭ). Флуктуация задержки второй последовательности была значительно больше и достигала величины ± 0.8 мс, что совпадает с модельными расчетами, выполненным в ИСЗФ СО РАН. В режиме импульсного излучения были измерены спектры прямого сигнала и СОЭ. Анализ показал, что примерно в 70 % случаев сигналы имели различный доплеровский сдвиг спектрального максимума. На магаданской трассе работа велась только в непрерывном режиме, однако на ней также наблюдались СОЭ. Они были идентифицированы по двум максимумам в спектре принятого сигнала; частота одного практически совпадала с несущей, а у второго имела отрицательный ДСЧ до 3 Гц. Интервалы наблюдения такого двухмодового сигнала совпадали со временем приема на УАС сигналов из Магадана с большим отрицательным сдвигом, который был обусловлен прохождением вечернего терминатора через юго-восточную часть Тихого океана. (Обратная трасса Магадан – Харьков показана на рис. 1 сплошной кривой, ее значительный участок близок к прямой трассе Магадан – УАС.) Таким образом, проведенный спектральный анализ подтверждает возможность разделения прямого и обратного сигналов с помощью доплеровской селекции при изменении условий освещенности на контрольных радиолиниях средней и большой протяженности.

Особое место в проведенных исследованиях занимают шесть сеансов импульсного излучения из Норильска с 06:16 до 07:18 UT 2 декабря 2006 г., зарегистрированного на РАО

вблизи Харькова (длина прямой радиолинии 3.5 тыс. км). На несущей частоте 7433 кГц были приняты аномальные сигналы со средним временем задержки 18.1 мс, что соответствовало расстоянию 5430 км, причем сигналы со “стандартными” задержками, пропорциональными длинам прямой и обратной трасс, в это время не наблюдались. Флуктуации времени прихода были довольно значительными и варьировались от 17.4 до 18.85 мс (± 220 км относительно среднего значения). Очевидно, что такие аномальные задержки могут быть объяснены только наличием траекторий со значительным отклонением от дуги большого круга. Используя анализ глобальной ионосферной обстановки во время эксперимента по картам полного электронного содержания, мы рассмотрели две возможности возникновения таких радиотрасс. Первая связана с отражением (или рассеянием) пробного сигнала от сильных ионосферных градиентов и плазменных неоднородностей в области полярного овала (ПО). Геометрические оценки показывают, что длина такой гипотетической радиолинии Норильск – южная граница ПО – РАО составляет примерно 5.5 тыс. км. Спектры аномальных сигналов носили широкополосный характер, их средняя ширина составляла несколько герц, что характерно для эффектов ионосферного рассеяния на быстро движущихся ионосферных неоднородностях [11]. Альтернативная возможность формирования таких сигналов была обусловлена значительными ионосферными градиентами, которые во время эксперимента формировались над Центрально-Азиатским горным массивом в районе с координатами 45° с. ш. и 70° в. д. Для преимущественного выбора одного из рассмотренных вариантов необходимы угломерные (в азимутальной плоскости) измерения, которые в рамках проведенных кампаний не были реализованы. Несмотря на неоднозначность выбора подходящих аномальных траекторий, такие эксперименты в будущем возможно будет использовать для двухпозиционной диагностики областей ионосферы со значительными горизонтальными градиентами спорадического происхождения.

3.3. Девииации частоты сигналов на сверхдальней радиолинии во время СЗ

В апреле 2004 г. было исследовано влияние крупномасштабного детерминированного ионосферного возмущения на характеристики КВ сигналов на трассе Иркутск – УАС. Возмущение было обусловлено СЗ, которое наблюдалось в южном полушарии 19 апреля 2004 г. с 11:30 до 14:38 UT. В процессе затмения существенным образом изменялись ионосферные характеристики на протяженном участке прямой сверхдальней радиолинии Иркутск – УАС. По результатам модельного прогноза и пробных измерений, проведенных 12 апреля (см. рис. 2), были выбраны две рабочие частоты. Более высокая частота (14.3 МГц) с меньшими потерями распространялась по прямой трассе, а более низкая (10.3 МГц) была близка к ОРЧ для обратной радиолинии. Методически одинаковые измерения проводились 18 – 20 апреля с 10:00 до 18:00 UT. Передатчик в Иркутске работал 10-минутными сеансами (8 мин продолжалось излучение, 2 мин – пауза). Каждый нечетный сеанс излучалась частота 10.3 МГц, каждый четный – 14.3 МГц. На УАС осуществлялся синхронный прием и спектральный анализ в полосе 10 Гц с разрешением 0.15 Гц и последующим некогерентным усреднением мгновенных спектров на интервале 1 мин. На рис. 7 точками показаны временные зависимости положения максимумов спектров принятых сигналов в частотной области (ДСЧ), зарегистрированные в течение трех дней наблюдений с 18 по 20 апреля. Серый цвет соответствовал сигналу на частоте 14.3 МГц, черный – 10.3 МГц. Для увеличения наглядности изображения на рисунке показано частотное поведение только основных энергонесущих составляющих спектра.

Зависимость изменения ДСЧ сигналов от времени была объяснена следующим образом. В невозмущенные дни 18 и 20 апреля сдвиги частоты, вызванные прохождением восходного и заходного терминаторов и изменением условий освещенности на прямой и обратной трассах, начинались в одно и то же время около 13:00 UT. (Этот момент выделен на рис. 7 вертикальными линиями.) На большей части

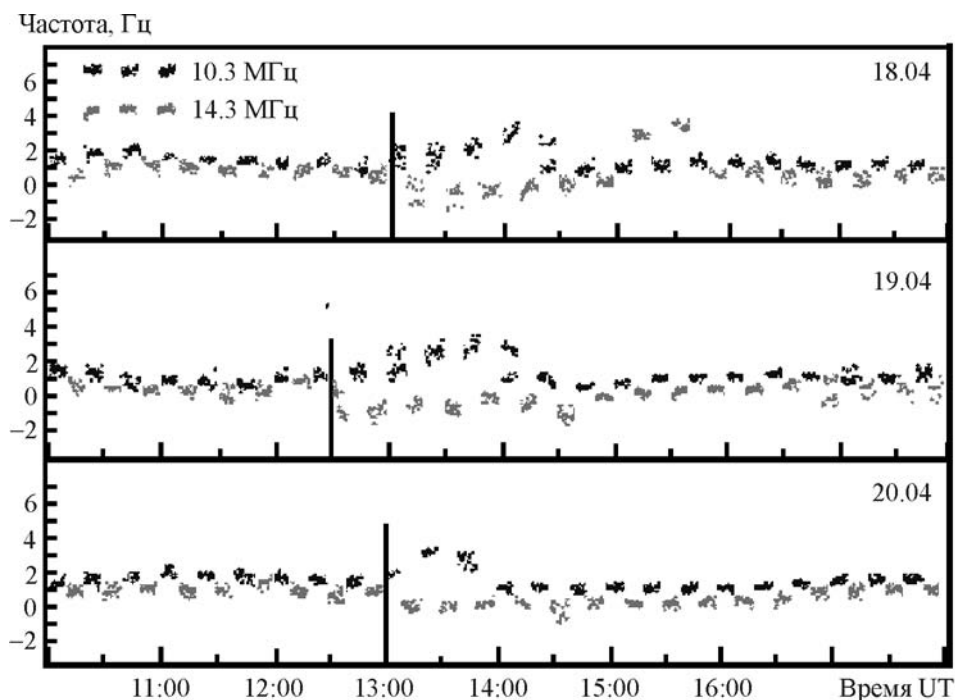


Рис. 7. Временные зависимости частотного сдвига спектральных максимумов сигналов, связанных с СЗ, на трассе Иркутск – УАС 18-20.04.2004 г.

прямой трассы в этот момент наступала ночь, концентрация электронов уменьшалась, действующая высота отражений увеличивалась, и ДСЧ верхней частоты становился отрицательным. На большей части обратной трассы в это время наступал день, наблюдались обратные процессы: электронная концентрация увеличивалась, а действующая высота отражений уменьшалась, и ДСЧ на нижней частоте приобретало положительное значение. В день СЗ 19 апреля на частоте 14.3 МГц (прямая трасса) наблюдалось заметное отличие в регулярной вариации ДСЧ. Сигнал приобрел отрицательный частотный сдвиг порядка 2 Гц в 12:30, соответствовавший начальной фазе СЗ. Сдвиг вызван более ранним уменьшением ионизации на части прямой трассы, чем в невозмущенные дни, и как следствие увеличением высоты отражения сигнала (эффективным удлинением трассы). Вариаций средней мощности принятого сигнала в возмущенных и невозмущенных условиях на фоне флуктуаций и внешних шумов выявлено не было. По-

ведение спектральных максимумов сигнала, распространяющегося по обратной трассе, на которой затмение не наблюдалось, 19 апреля оставалось таким же, как в невозмущенные дни, и положительное ДСЧ наблюдалось с 13:00 UT.

Выводы

В результате проведения нескольких измерительных кампаний на контрольных радиолиниях средней и большой протяженности можно сформулировать ряд выводов.

1. Исследования спектральных характеристик пробных КВ сигналов в диапазоне 5 ÷ 20 МГц показали, что зависимости амплитуды принятых сигналов на сверхдальних трассах Иркутск, Магадан, Норильск – УАС от времени суток и частоты при отсутствии магнитных возмущений качественно совпадают с модельным прогнозом, полученным в ИСЗФ СО РАН в рамках волноводного описания распространения КВ с использованием международной справочной модели ионосферы IRI. В сред-

нем знаки и величины ДСЧ сигналов на всех радиоперелиниях определялись временем суток и движением СТ.

2. Зависимости амплитуд сигналов от времени и частоты на трассах средней протяженности Иркутск, Магадан, Норильск – Харьков качественно хорошо объяснялись моделью скачкового распространения КВ сигналов. Частотный сдвиг сигналов положителен во время роста электронной плотности на высотах точки (точек) отражения и отрицателен во время ее уменьшения.

3. В среднем наблюдалась высокая корреляция временных зависимостей ДСЧ на разных частотах в светлое время суток на экспериментальных трассах (значения варьировались от 0.6 до 0.94). В то же время была отмечена непропорциональность ДСЧ частоте пробного сигнала, что свидетельствовало о различных механизмах распространения сигналов на разнесенных частотах.

4. Регулярно регистрировалось прохождение сигналов по обратным трассам; эти сигналы были идентифицированы как во временной, так и в частотной областях. Время задержки импульсных сигналов и его флуктуации на обратных трассах близки к результатам модельных расчетов, выполненных в ИСЗФ СО РАН в рамках волноводного описания распространения КВ.

5. Исследовано поведение ДСЧ на сверхдальней радиоперелинии Иркутск – УАС во время СЗ 19.04.2004 г. Зарегистрировано и объяснено отрицательное смещение частоты зондирующего сигнала.

6. На трассе средней протяженности Норильск – Харьков зарегистрированы аномальные сигналы со значительным отклонением от дуги большого круга. Предложено две гипотетические возможности формирования таких сигналов: отражением от границ северного ПО или зоной повышенных ионосферных градиентов над горным массивом Центральной Азии.

Исследования проведены в рамках НИР “Антипод”, которая поддержана специальным грантом НАН Украины и СО РАН (постановление Президиума НАН Украины № 160 от 21.03.2006 г.).

Литература

1. CD-disk. HFBC Schedule. International Telecommunication Union. Radio communication Bureau.
2. Davies K. Ionospheric Radio. – London (UK): P. Peregrinus Ltd., 1989. – 580 p.
3. Budden K. G. The propagation of radio waves. – Cambridge (UK): Cambridge University Press, 1985. – 542 p.
4. Modern Ionosondes / Reinisch B. W. / Modern Ionospheric Science. Eds. H. Kohl, R. Ruster, K. Schlegel – Katlenburg-Lindau (FRG): EGS, 1996. – P. 440-458.
5. Goodman John M. Space Weather & Telecommunications. – New York: Springer, 2005.
6. Галушко В. Г. О возможности частотно-углового зондирования ионосферы // Изв. вузов. Радиофизика. – 1991. – Т. 34, №7. – С. 850-853.
7. Galushko V. G. Frequency-and-angular sounding of the Ionosphere // Telecommunications and Radio Engineering. – 1997. – Vol. 51, No.6-7. – P. 1-6.
8. Галушко В. Г., Литвиненко Г. В. Восстановление трехмерно-неоднородной структуры электронной концентрации ионосферы методом частотно-углового зондирования // Радиофизика и радиоастрономия. – 2001. – Т. 6, №3. – С. 222-229.
9. Beley V. S., Galushko V. G. and Yampolski Y. M. Traveling ionospheric disturbances diagnostics using HF signal trajectory parameter variations // Radio Science. – 1995. – Vol. 30, No. 6. – P. 1739-1752.
10. Zalozovski A. V., Galushko V. G., Kashcheyev A. S. et al. Doppler Selection of HF Radio signals on Long Paths // Geomagnetism and Aeronomy. – 2007. – Vol. 47, No. 5. – P. 636-646.
11. Зализовский А. В., Кашеев С. Б., Ямпольский Ю. М., Галушко В. Г., Белей В. С., Айшем Б., Ритвелд М. Т., Ла Хоз С., Брекке А., Благовещенская Н. Ф., Корниенко В. А. Спектральные особенности КВ сигнала нагревного стенда EISCAT в Европе и Антарктике // Радиофизика и радиоастрономия. – 2004. – Т. 9, №3. – С. 261-273.
12. Алтынцева В. И., Ильин Н. В., Куркин В. И. и др. Моделирование декаметрового радиоканала на основе метода нормальных волн // Техника средств связи. Серия СС. – М.: ЭкоС. – 1987, Вып. 5. – С. 28-34.
13. Пикулик И. И., Кашеев С. Б., Галушко В. Г., Ямпольский Ю. М. Приемный КВ комплекс для частотно-углового зондирования ионосферных возмущений в Антарктиде. // Український антарктичний журнал. – 2003. №1. – С. 61-69.
14. Месячный прогноз максимальных применимых частот (МПЧ). Декабрь 2006. – М: Гидрометеиздат, 2006. – 48 с.

**Експериментальні дослідження
спектральних характеристик КХ
сигналів на довгих та наддовгих трасах**

**С. Б. Кашеев, О. В. Колосков,
А. В. Залізівський, В. Г. Галушко,
І. І. Пікулик, Ю. М. Ямпольський,
В. І. Куркін, Г. І. Литовкін, О. І. Орлов,
П. В. Петко**

Наводяться результати досліджень залежностей спектральних характеристик КХ сигналів від часу доби та частоти на трасах довжиною від 3,5 до 19 тис. км, одержані у різні сезони. Показано, що зміни амплітуди отриманого сигналу та оптимальної робочої частоти на наддовгих трасах за відсутності магнітних збурень якісно збігаються з прогнозом, отриманим у межах хвильового підходу (методу нормальних хвиль) до опису поширення КХ з використанням міжнародної довідкової моделі іоносфери IRI. Проаналізовано вплив глобальних іоносферних збурень, зумовлених термінатором та затемненням Сонця, на доплерівський зсув і амплітуду спектральних максимумів прийнятого сигналу. Показано можливість доплерівської селекції прямого та зворотного сигналів на контрольних радіолініях середньої та великої довжини.

**Experimental Investigation
of Spectral Characteristics
of HF Signals at Long-
and Ultra-Long-Range Radio Paths**

**S. B. Kascheev, A. V. Koloskov,
A. V. Zalizovski, V. G. Galushko,
I. I. Pikulik, Y. M. Yampolski,
V. I. Kurkin, G. I. Litovkin, A. I. Orlov,
and P. V. Petko**

The research results of the time of the day on frequency dependencies of the spectral characteristics of HF signals at radio paths from 3,500 to 19,000 km are presented for different seasons of the year. It is shown that the amplitude and optimum working frequency dependencies at ultra-long-range radio paths are in compliance with the predicted results for quiet geomagnetic conditions. The predictions are made in terms of the wave theory of HF wave propagation (modal-analysis method) using the IRI model. The influence of the global ionospheric irregularities induced by solar terminator and solar eclipse on the Doppler frequency and the amplitude of the spectral peak is analyzed. The possibility of direct and return signal's discrimination using the Doppler technique for long- and ultra-long-range radio paths is shown.