

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИГНАЛОВ КВ-ДИАПАЗОНА НА ДАЛЬНИХ И СВЕРХДАЛЬНИХ ТРАССАХ В РАЗЛИЧНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

**С.Б. Кашеев, Ю.М. Ямпольский, В.И. Куркин**

**EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF HIGH FREQUENCY SIGNALS OVER LONG AND SUPER-LONG PATHS IN DIFFERENT GEOPHYSICAL CONDITIONS**

**S.B. Kascheev, Yu.M. Yampolsky, V.I. Kurkin**

Исследование характеристик ионосферных сигналов на дальних и сверхдальних трассах, несмотря на многолетнюю историю (см., например, [1–3]) по-прежнему является актуальной задачей. Это обусловлено двумя основными причинами. С одной стороны, согласно данным Международного комитета по радиосвязи, количество вещательных станций в КВ-диапазоне в мире составляет более 5000, и для их надежного функционирования необходимы точное знание и учет характеристик распространения радиосигналов в условиях возрастающих требований к качеству передачи и экономии энергоресурсов. С другой стороны, на сегодняшний день разработаны и широко применяются различные неконтактные радиофизические методы исследования процессов в ионосфере. К ним относятся и измерения характеристик сигналов наклонного зондирования с последующим восстановлением параметров ионосферы [4–7]. Несмотря на определенные достижения в этих исследованиях, решение этой задачи далеко от завершения.

В настоящее время в РИ НАН Украины и ИСЗФ СО РАН проводятся совместные исследования дальнего и сверхдальнего распространения коротких радиоволн в рамках Соглашения о сотрудничестве между СО РАН и НАН Украины. На первом этапе работы, результаты которой представлены ниже, проводилось исследование влияния ионосферных возмущений на параметры регистрируемых сигналов. Трудности исследований обусловлены многообразием факторов, которые влияют на процессы в ионосфере. Это могут быть как детерминированные возмущения, например, движение солнечного терминатора, так и спорадические – вспышки на Солнце, магнитные бури, циклоны, землетрясения, старты космических аппаратов и многие другие. Основное внимание мы уделили детерминированным возмущениям.

Другая проблема, которая возникает при исследовании ионосферного сигнала, – его многомодовый характер. Известно, что даже на радиотрассах протяженностью несколько тысяч километров могут одновременно существовать несколько модов с различными траекториями распространения сигналов. При сверхдальнем распространении картина еще более усложняется, так как на приемный пункт одновременно приходят многомодовые сигналы по прямой и обратной трассам [2, 3, 8]. Возможно и аномальное распространение вне дуги большого круга. Например, сигнал поступает на приемник в результате отражения от главного ионосферного провала, отражения от терминатора и т. п. [9–12].

Известны различные методы селекции модов сигнала. Исторически первыми возникли методы пространственной и временной селекции. Их применение требует либо сложных остронаправленных антенн, либо специальных сигналов [11, 13, 14].

Появление генераторов с высокой стабильностью частоты и особенно развитие вычислительной техники позволили разработать эффективные методы доплеровской селекции. Их преимущества заключаются в следующем: при измерениях можно использовать как специальные сигналы, так и сигналы широковещательных станций, – нет необходимости в применении остронаправленных антенн [15].

В докладе представлены результаты измерений характеристик КВ-сигналов, которые получены с использованием доплеровской фильтрации. При этом были максимально использованы опыт и предыдущие научно-технические разработки двух коллективов, которые давно и успешно занимаются исследованиями в КВ-диапазоне. Сотрудники ИСЗФ прогнозировали оптимальный частотный диапазон и время проведения измерений на основе расчетов по методу нормальных волн [16] с использованием Международной справочной модели ионосферы IRI-2001 [17], обеспечивали излучение сигналов в непрерывном или импульсном режимах. В качестве передающих устройств были использованы модернизированные комплексы российской сети ЛЧМ-зондирования в Иркутске, Норильске и Магадане. Украинские исследователи использовали разработанные приемно-вычислительные комплексы, на которых проводились измерения, запись и первичная обработка принятых сигналов в реальном времени. Прием сигналов осуществлялся на украинской антарктической станции «Академик Вернадский» в Антарктиде, протяженность трасс по поверхности Земли составляла от 18.3 до 18.8 тыс. км (рис. 1). Точка антипода для приемника в Антарктиде находится вблизи Якутска практически в центре треугольника, образованного передатчиками. Это приводит к большому долголетному разному между радиотрассами. Благодаря такому расположению приемно-передающих пунктов измерения удавалось проводить одновременно в различных часовых поясах. Параллельно проводились наблюдения на трассах Норильск–Харьков протяженностью 3500 км, Иркутск–Харьков (4500 км) и Магадан–Харьков (6500 км). Заметим, что дуга большого круга Магадан–Харьков проходит через Норильск, – таким образом, трасса Норильск–Харьков является практически половиной трассы Магадан–Харьков. Ниже приведены основные технические данные приемно-

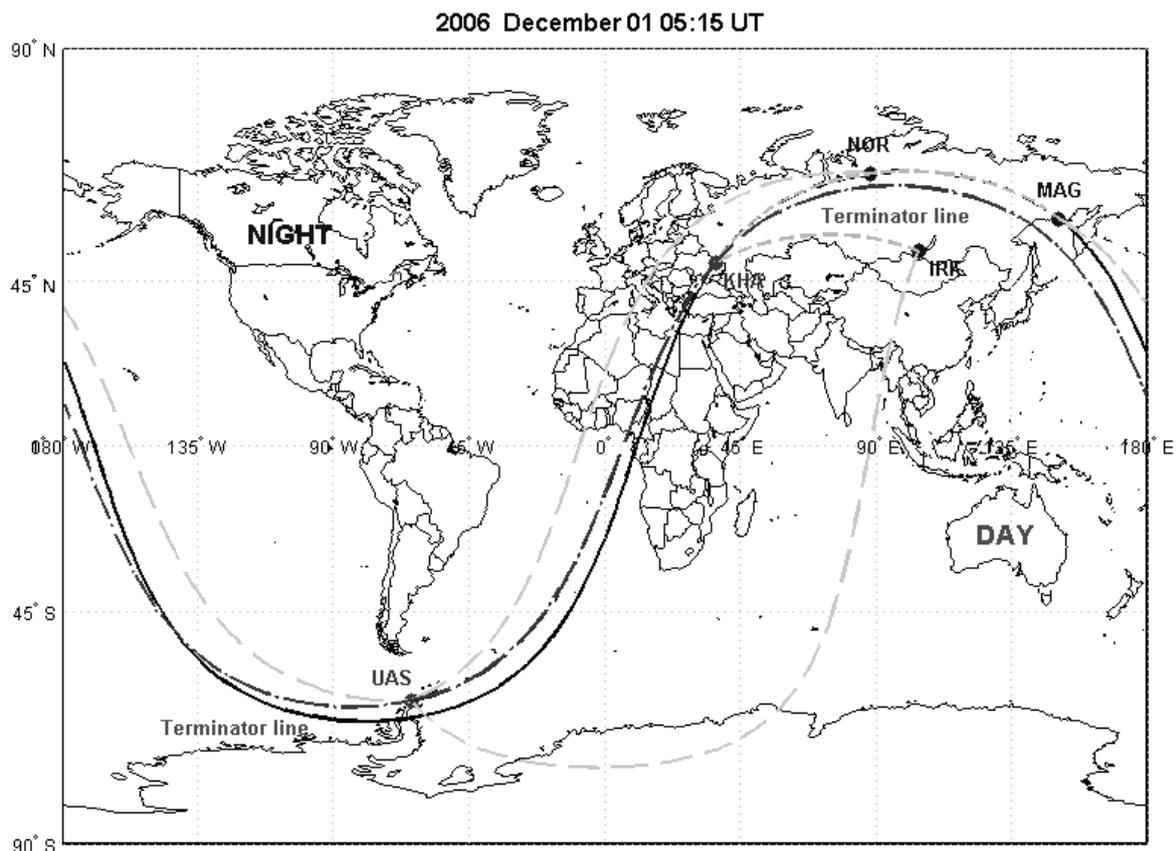


Рис. 1. Расположение передающих и приемных пунктов, проекции трасс на поверхность Земли.

передающих комплексов:

- диапазон частот 5–20 МГц;
- излучаемая мощность до 2 кВт;
- динамический диапазон приемника 78 дБ;
- разрешение по частоте 0.05 Гц;
- точность измерения времени распространения  $\pm 100$  мкс;
- точность измерения группового пути  $\pm 30$  км;
- период повторения импульсов 25 мс;
- длительность импульсов 5 мс.

При проведении измерений большое внимание было уделено выбору конкретных рабочих частот. Учитывая наличие в КВ-диапазоне большого числа широкоэмиттерных станций мощностью от 100 кВт до 1 МВт, не всегда удавалось найти такую частоту, чтобы работать на фоне атмосферных или космических шумов, особенно на приемном пункте в Харькове. В ряде случаев это приводило к уменьшению отношения сигнал/шум, что, в свою очередь, могло увеличить ошибки измерений.

Исследования проводились циклами по несколько дней подряд. Всего состоялись четыре измерительные кампании в разные сезоны года при разной освещенности трасс Солнцем. Общая продолжительность измерений составила 20 дней. Каждому циклу измерений предшествовал прогноз, выполненный в ИСЗФ для сверхдальних трасс с использованием модели ионосферы IRI-2001. Рассчитывался суточный ход оптимальной рабочей частоты и амплитуды принятого сигнала на оптимальной частоте на прямой и обратной трассах. После этого следовало пробное включение с излучением в широком диапа-

зоне частот для адаптации условий эксперимента. На рис. 2, а сплошной кривой приведен прогноз временного хода амплитуды сигнала на прямой трассе Иркутск–УАС (Украинская антарктическая станция) для 12 апреля 2004 г., а штриховой – для обратной трассы. На рис. 2, б приведены соответствующие прогнозы для оптимальной частоты. Штрихпунктирными кривыми с выделенными точками на обоих графиках приведены результаты эксперимента. Можно видеть хорошее качественное совпадение результатов.

Во время основных измерений на приемных пунктах измерялся суточный ход мощности сигнала, отношения сигнал/шум, доплеровского сдвига частоты (ДСЧ). Также измерялись ширина спектра на различных рабочих частотах и количество максимумов в спектре. На рис. 3 приведены результаты летних измерений 2006 г на трассах Иркутск–УАС (а) и Магадан–УАС (б). Это усредненный за пять дней измерений временной ход амплитуды принятого сигнала на трех разных рабочих частотах в относительных единицах. В соответствии с теоретическими предпосылками на обеих трассах во временном ходе имеется два максимума. Один наблюдается вблизи времени прохождения вечернего терминатора через передающий пункт, а другой – вблизи времени прохождения терминатора через приемный пункт. Временной интервал между первыми максимумами на разных трассах соответствует разному передатчиков по долготе. На трассе Иркутск–УАС в течение всего времени суток оптимальной является частота 9.3 МГц. На трассе Магадан–УАС в утренние часы оптимальна частота 6.8 МГц, а в дневные – 8.3 МГц.

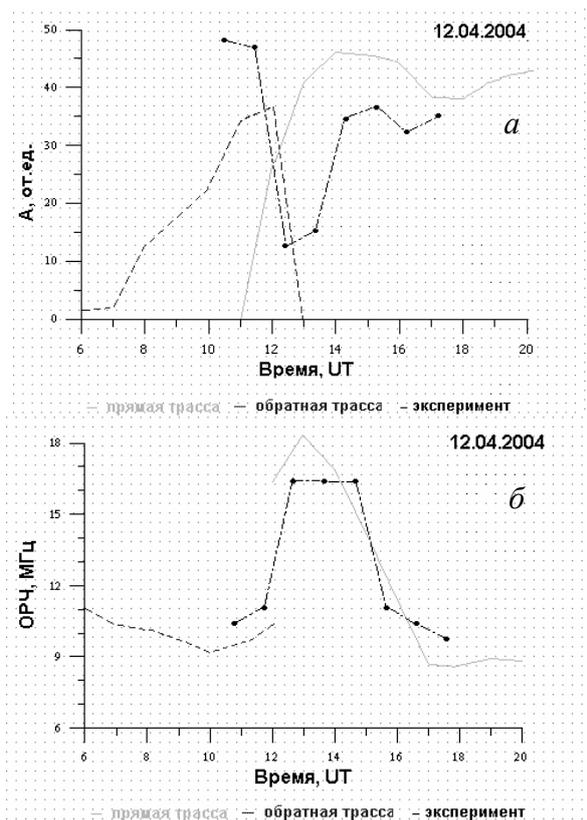


Рис. 2. Сравнение прогнозируемых и экспериментальных данных на трассе Иркутск–УАС.

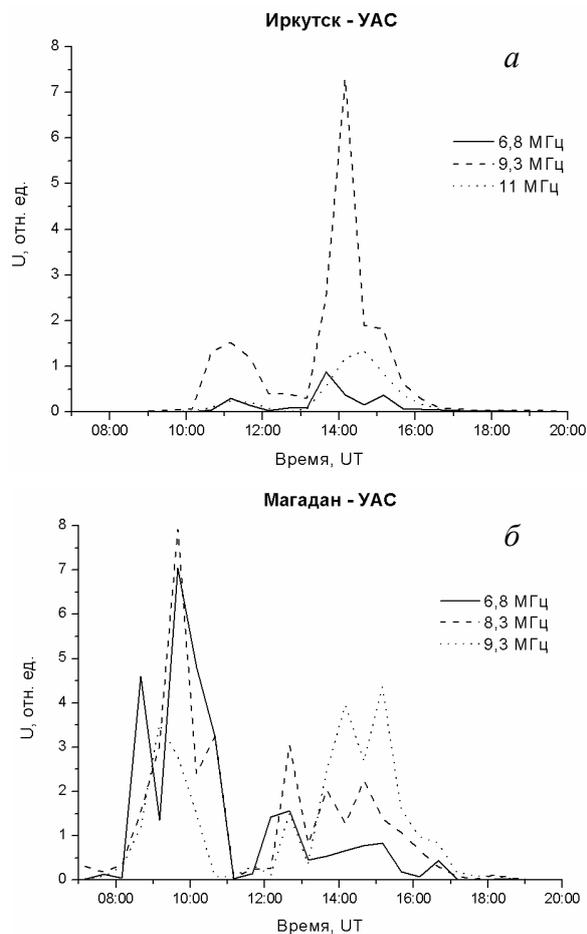


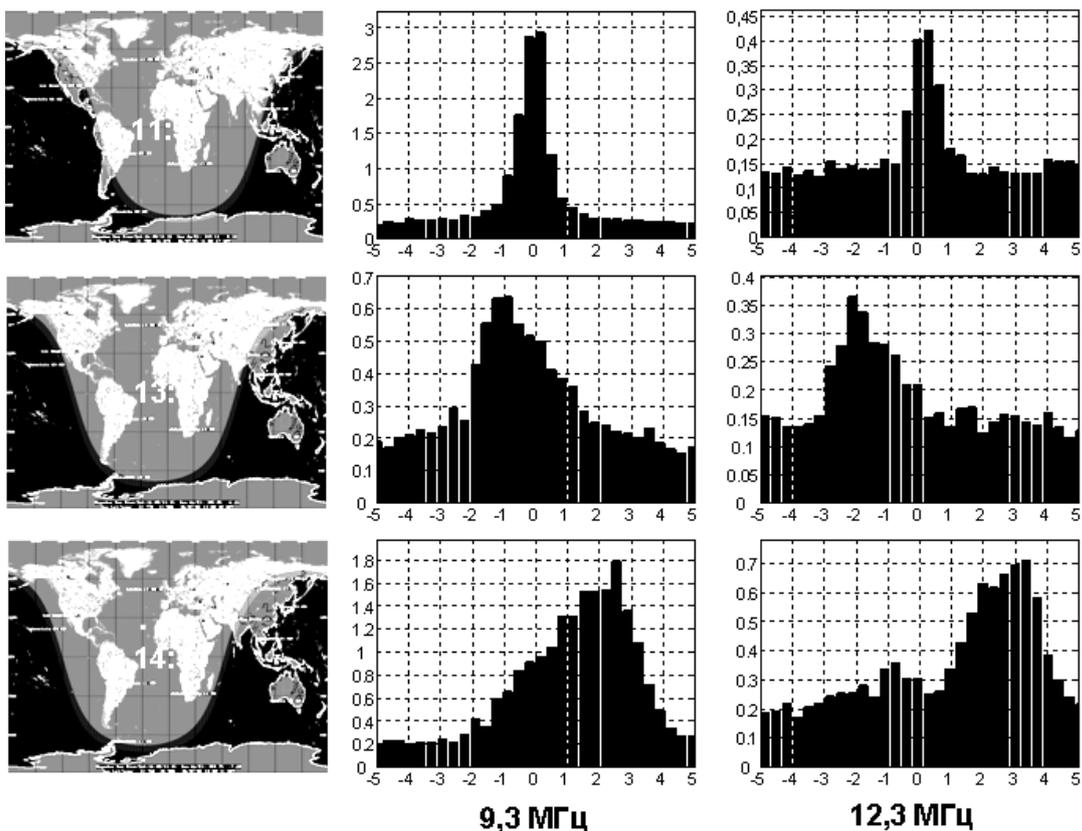
Рис. 3. Амплитуда принятого сигнала, усредненная за 03–07.07.2006 г.

На рис. 4 для этой же измерительной кампании приведены спектры сигналов на трассах Иркутск–УАС (а) и Магадан–УАС (б) на разных частотах и положение линии терминатора на поверхности Земли в момент проведения измерений. Разрешение по частоте 0.3 Гц, время некогерентного усреднения 2 минуты. Разработанная на основании экспериментальных измерений модель [15] позволяет объяснить полученные ДСЧ и расщепление спектра принятого сигнала. Нулевые значения ДСЧ в сигналах из Иркутска в 11:30 соответствуют прямой трассе над Индийским океаном, дневным условиям над всей трассой, стабильному состоянию ионосферы. Более широкополосные сигналы и заметные отрицательные сдвиги частоты, которые наблюдаются в 13:00 UT, объясняются прохождением вечернего терминатора над частью прямой трассы. В этой области наблюдается быстрое уменьшение плотности плазмы, растет высота отражения и увеличивается эффективная длина трассы. В 14:30 UT наблюдается возрастание сигнала, спектр которого является широкополосным с положительным ДСЧ. Это соответствует обратной трассе, которая проходит через область утреннего терминатора. Здесь происходит обратный процесс: быстро увеличивается плотность плазмы, понижается высота отражения и уменьшается эффективная длина трассы. На верхней рабочей частоте просматривается слабый сигнал, который распространяется по прямой трассе ночью и имеет небольшой отрицательный ДСЧ. В 11:30 UT сигнал на УАС из Магадана приходил по прямой трассе через Тихий океан. Небольшие отрицательные значения ДСЧ соответствуют ночному времени в районе распространения. Существующие затем две моды обусловлены одновременным распространением по прямой и обратной трассам. Малое отношение сигнал/шум свидетельствует о больших потерях при распространении (см. рис. 3). В 14:30 UT отрицательные моды на обеих частотах обусловлены распространением по обратной трассе через зону вечернего терминатора. Положительный мод на верхней рабочей частоте соответствует прямой трассе и утреннему терминатору на юге Тихого океана. Два последних спектра иллюстрируют значительные различия в условиях распространения сигналов разных частот в этот момент времени.

Во время основных измерений зимой 2006 г. было использовано всего 3 рабочих частоты, что позволило измерять характеристики сигнала на каждой трассе через 10 мин. На рис. 5 представлены результаты измерений ДСЧ на трассе Магадан–УАС. Каждая точка на графиках получена в результате двухминутного усреднения мгновенных спектров, полученных с разрешением 0.3 Гц. Отметим, что расщепление спектра в это время года не наблюдалось и сигнал на приемном пункте практически постоянно был одномодовым. На графиках видны характерные особенности, которые присутствуют на протяжении двух дней измерений: в ночные и дневные часы ДСЧ близки нулю. С 4 до 6 часов наблюдался отрицательный доплеровский сдвиг. Он объясняется прохождением в это время через трассу

Трасса: Иркутск – УАС, 04.07.2006

а



Трасса: Магадан – УАС, 04.07.2006

б

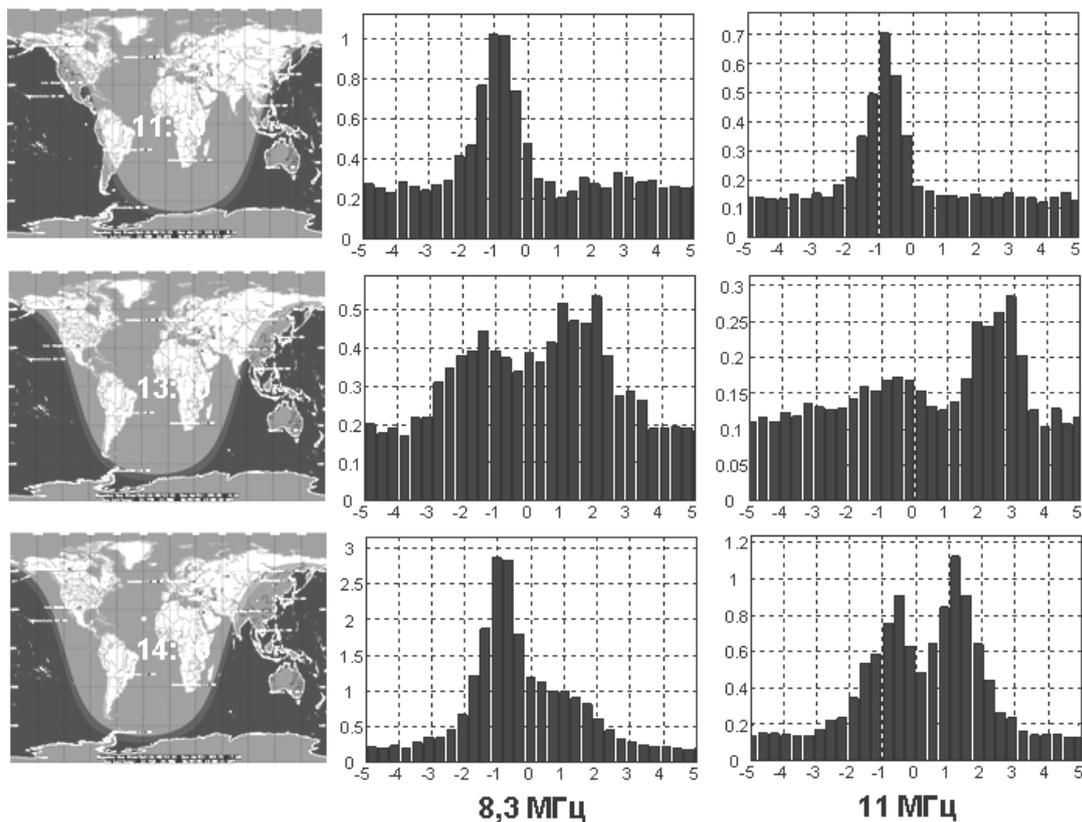


Рис. 4. Спектры сигналов и положение терминатора на момент проведения измерений.

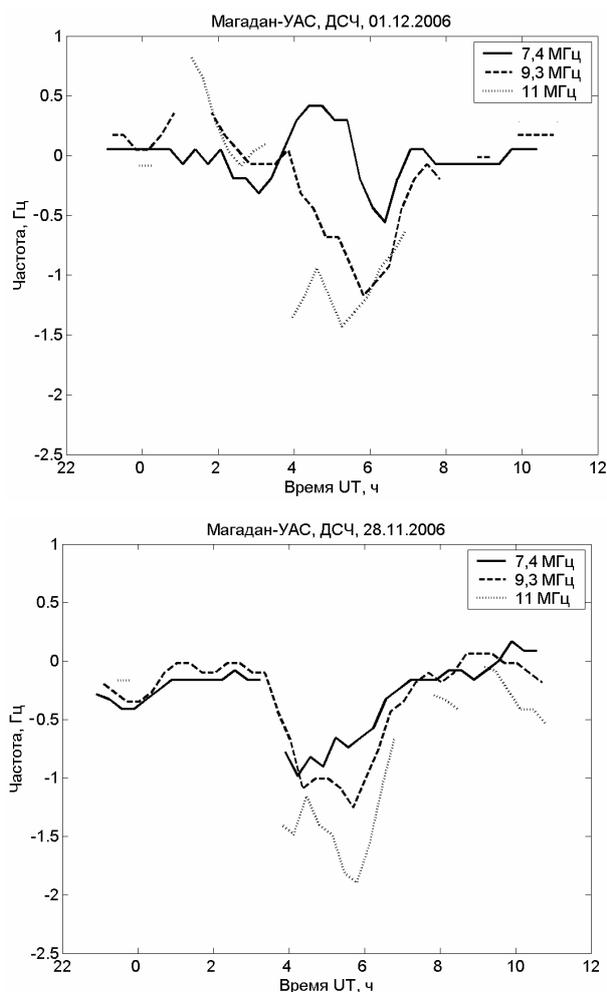


Рис. 5. Доплеровский сдвиг частоты на трассе Магадан–УАС.

распространения вечернего терминатора. В то же время ото дня ко дню наблюдаются значительные отличия: сдвиги на разных частотах 29 ноября похожи друг на друга (коэффициент корреляции составляет 0.8–0.9), хотя и не прямо пропорциональны рабочей частоте, 2 декабря ДСЧ не только не пропорциональны, но и не похожи друг на друга. Сравнение двух дней демонстрирует многообразие факторов, влияющих на характеристики сигнала и изменчивость характеристик ото дня ко дню. Сравнение временного хода ДСЧ 2 декабря на разных частотах также показывает, что распространение сигналов происходит в ионосфере по сильно отличающимся траекториям.

Рассмотрим теперь результаты измерений характеристик сигналов, принятых в Харькове. На рис. 6 приведены в логарифмическом масштабе усредненные за четыре дня измерений зависимости от времени мощности принятого сигнала на разных рабочих частотах для трех трасс. На временном ходе мощности сигнала из Иркутска хорошо наблюдается переход частоты зондирующего сигнала через МПЧ. В ночные часы излучаемые частоты становятся выше МПЧ и уровень принятого сигнала резко уменьшается. Утром наблюдается обратная картина: частоты зондирующих сигналов последовательно становятся ниже МПЧ и напряжение на выходе приемника

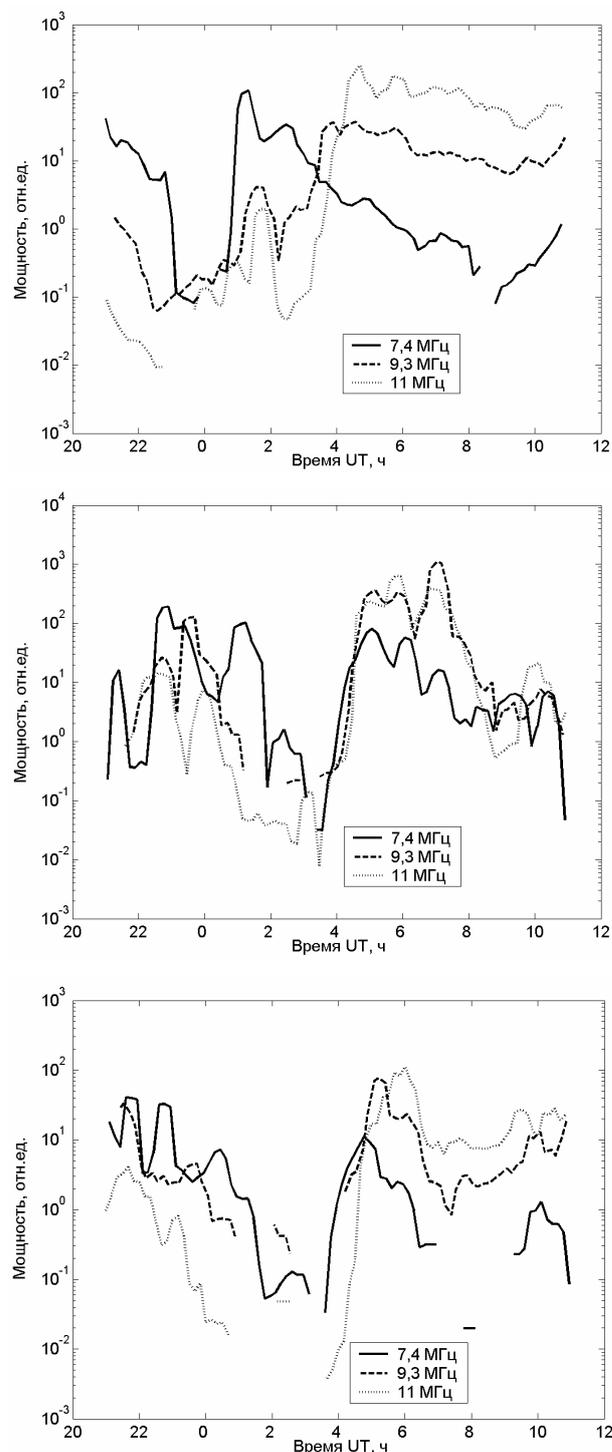


Рис. 6. Временной ход мощности принятого сигнала, усредненный за 28.11 – 02.12.2006 г.

резко возрастает. Несколько позже на зависимостях появляется второй максимум, соответствующий прохождению пробных частот через МПЧ в районе второй точки отражения. Последующее дневное снижение уровня сигнала обусловлено увеличением потерь при распространении в нижних слоях ионосферы D и E; снижение особенно заметно на самой низкой рабочей частоте 7433 кГц. На ней же хорошо виден подъем уровня сигнала ближе к вечеру.

Зависимости мощности принятого сигнала от времени и частоты на трассах Норильск–Харьков и Магадан–Харьков имеют аналогичный временной

ход, в котором также наблюдаются переходы частот зондирующих сигналов через МПЧ. Зависимости весьма похожи друг на друга, хотя трассы отличаются по протяженности почти в два раза. Это означает, что энергетические характеристики сигналов на трассе Магадан–Харьков обусловлены в основном второй точкой отражения. Этого следовало ожидать, так как первая точка отражения находится в полярной области, где плотность электронов в это время года слабо зависит от времени суток.

В декабре 2006 г. нами был апробирован импульсный режим работы. Импульсы излучались передатчиками в Иркутске и Норильске. Измерения времени задержки прямых сигналов показали их соответствие расчетам. Регулярно, т. е. в одно и то же время суток в течение всех дней проведения импульсных измерений, на приемник поступала вторая последовательность. Ее задержка соответствовала времени прихода сигнала обратного эха (СОЭ), флуктуация времени задержки достигала величины  $\pm 0,8$  мс. Были вычислены спектры прямого сигнала и СОЭ. Нами показано, что в 70 % случаев доплеровская селекция позволяла разделять прямой и обратный сигналы и на этих трассах. На магаданской трассе работа велась только в непрерывном режиме, однако на ней также наблюдались сигналы, распространяющиеся вдоль большей части дуги большого круга. Идентифицированы они были по значительному (до 3 Гц) отрицательному ДСЧ сигнала, время наблюдения которого совпадало со временем пересечения обратной трассы вечерним терминатором.

Подводя итоги, можно сказать, что наши институты располагают уникальными приемно-передающими системами, которые позволяют диагностировать глобальные ионосферные возмущения. Развитием этих работ может являться дальнейшее увеличение количества приемных пунктов. В 2007 г. украинскими участниками проекта организован автоматический приемный пункт на архипелаге Шпицберген в Арктике. Параметры его задаются по Интернету, и возможно получение данных измерений в реальном времени. Наши институты готовы к дальнейшему сотрудничеству со всеми желающими организовать подобный мониторинг в различных регионах.

В заключение следует отметить, что данные исследования проведены в рамках НИР «Антипод» и интеграционного проекта 3.24, которые поддерживаются специальными грантами НАНУ и СО РАН.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fenwick R.B. Round-the-World High-Frequency Propagation // Tech. Rep., Radio Sci. Lab. Stanford University, 1963. N 71. 106 p.

2. Шлионский Ш.Г. Дальнее распространение радиоволн в ионосфере. М.: Наука, 1979. 152 с.
3. Гуревич А.В., Цедилина Е.Е. Сверхдальнее распространение коротких радиоволн. М.: Наука, 1979. 248 с.
4. Крашенинников И.В., Лобачевский Л.А., Лянной Б.Е. и др. Оценка высотного распределения электронной концентрации по ионограмме наклонного зондирования ионосферы // Геомагнетизм и аэронавигация. 1983. Т. 23, № 5. С. 727–732.
5. Beley V.S., Galushko V.G., Yampolski Y.M. Traveling ionospheric disturbances diagnostics using HF signal trajectory parameter variations // Radio Science, 1995. V. 30, N 6. P. 1739–1752.
6. Пахотин В.А., Конюшенко С.М., Борисов И.А., Пахотина С.В. Пространственные вариации минимума критической частоты F2-области ионосферы по результатам измерений характеристик кругосветных сигналов (КС) // Геомагнетизм и аэронавигация, 1997. Т. 37, № 3. С. 146–151.
7. Куркин В.И., Пономарчук С.Н., Потехин А.П., Чистякова Л.В. О связи характеристик кругосветных сигналов с проявлением экваториальной аномалии // Исследования по геомагнетизму, аэронавигации и физике Солнца. Иркутск: Наука, 1998. Вып. 109(1), С. 157–160.
8. Голян С.Ф. Об оптимальных условиях сверхдальнего распространения коротких радиоволн // Изв. вузов. Радиофизика, 1975. Т. 18, № 9, С. 1370–1382.
9. Hunsucker R.D., Bates H.F. Survey of polar and auroral region effects on HF propagation // Radio Science. 1969. V. 14, N 4. P. 347–365.
10. Жулина Е.М. Высокоширотная ионосфера и ее влияние на распространение радиоволн // Траекторные характеристики коротких радиоволн. М.: ИЗМИРАН. 1978. С. 68–90.
11. Белей В.С., Вейцман О.Б., Галушко В.Г. и др. Влияние главного ионосферного провала на дальнее распространение коротких радиоволн / В сб. «Дифракция и распространение радиоволн в неоднородных средах». М.: МФТИ, 1987. С. 116–122.
12. Урядов В.П., Куркин В.И., Вертоградов Г.Г. и др. Особенности распространения КВ-сигналов на среднеширотных трассах в условиях геомагнитных возмущений // Известия вузов. Радиофизика. 2004. Т. 47, № 12. С. 1041–1056.
13. Афраймович Э.Л. Интерференционные методы радиозондирования ионосферы. М.: Наука, 1982. 198 с.
14. Galushko V.G., Yampolski Y.M. Wave field diffraction near the caustic and ionospheric diagnostics // Radio Science, 1996. V. 31, N 5. P. 1109–1118.
15. Zalizovski A.V., Galushko V.G., Kashcheyev A.S., et al. Doppler selection of HF radio signals on long paths // Geomagnetic and Aeronomy, V.47, N 5. P. 636–646.
16. 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.
17. Bilitza D. International reference ionosphere // Radio Sci. 2001. V. 36, N 2. P. 262–275.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск