

УДК. 621.396.663

ПРИЁМНЫЙ КВ КОМПЛЕКС ДЛЯ ЧАСТОТНО-УГЛОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В АНТАРКТИКЕ

И.И. Пикулик, С.Б. Кашеев, В.Г. Галушко, Ю.М. Ямпольский

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

Реферат. Описана структурная схема и конструктивные особенности разработанного и изготовленного в РИ НАН Украины коротковолнового приёмно-измерительного комплекса частотно-углового зондирования ионосферы. Комплекс установлен на Украинской антарктической станции Академик Вернадский в феврале 2002 г. Он успешно эксплуатировался в течение 12 месяцев в полуавтоматическом режиме мониторинга перемещающихся ионосферных возмущений; с его помощью изучались процессы переноса приповерхностных атмосферных возмущений на высоты ионосферы и геосмоса. В приполярной области такой мониторинг организован впервые, что позволит значительно расширить возможности изучения процессов энергообмена между нижней и верхней атмосферой в Антарктическом регионе и разрабатывать соответствующие физические модели.

Приймальний КХ комплекс для частотно-кутового зондування іоносферних збурень в Антарктиці. І.І. Пікулик, С.Б. Кашеев, В.Г. Галушко, Ю.М. Ямпольський

Реферат. Описана структурна схема і конструктивні особливості розробленого і виготовленого в РІ НАН України короткохвильового приймально-вимірювального комплексу частотно-кутового зондування іоносфери. Комплекс встановлено на Українській антарктичній станції Академік Вернадський у лютому 2002 р. Він успішно експлуатувався протягом 12 місяців в напівавтоматичному режимі моніторингу рухомих іоносферних збурень, за його допомогою вивчалися процеси переносу приземних атмосферних збурень на висоти іоносфери і геосмосу. В приполярній області такий моніторинг організовано вперше, що дозволить значно розширити можливості вивчення процесів енергообміну між нижньою і верхньою атмосферою в Антарктичному регіоні і розробити відповідні фізичні моделі.

HF-receiver Equipment for Frequency-and-Angular Sounding of the Ionosphere in Antarctica. by I. Pikulik, S. Kashcheyev, V. Galushko, Yu. Yampolsky

Abstract. The paper presents the structural diagram and design of the HF data-acquisition complex developed and manufactured at the Institute of Radio Astronomy for frequency-and-angular sounding of the ionosphere. The complex was deployed at the Ukrainian Antarctic station Akademik Vernadsky in February 2002 and has been operated during 12 month in the semi-automatic mode, monitoring traveling ionosphere disturbances. In particular, the processes of disturbance transfer from the near-surface atmospheric layers to the ionosphere and geospace heights were studied. This kind of monitoring has been organized for the first time in the aurora zone. It will greatly expand the possibility for the study of the lower-to-higher atmosphere integration in the Antarctic region and development of appropriate physical models.

Key words: Antarctica, ionosphere, frequency-and-angular sounding, traveling ionosphere disturbances, data acquisition complex.

1. Введение

Исследования динамической реакции околоземной плазмы на возмущения различной природы требуют создания когерентных методов зондирования ионосферы. Одним из таких методов является частотно-угловое зондирование (ЧУЗИ) перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ), разработанное в РИ НАН Украины в 80-х годах (Beley et al., 1995). Отличительной особенностью этого метода является использование в качестве источников пробных сигналов широкоэвещательных коротковолновых радиостанций, а в качестве информационных параметров для восстановления ПИВ – углов прихода и доплеровского смещения частоты радиосигналов, отражённых от возмущенной ионосферы. Как было показано авторами (Кашеев и др., 2000), такой же подход может быть использован и для радиозондирования взволнованной морской поверхности.

Учитывая, что одним из основных научных направлений антарктических исследований, проводимых на станции Академик Вернадский, является изучение процессов переноса приповерхностных атмосферных возмущений на высоты ионосферы и геокосмоса, для их изучения в РИ НАН Украины был разработан и изготовлен специальный трёхканальный когерентный приёмный комплекс. Аprobация системы проведена в ходе морской части 7-ой Антарктической экспедиции, после чего комплекс был установлен на УАС и успешно эксплуатировался в течение зимовки 2002 - 2003 гг.

Целью данной статьи является описание тактико-технических, функциональных и конструктивных особенностей приёмной установки ЧУЗИ. Экспериментальные данные по диагностике возмущенной ионосферы, исследованию рассеянных взволнованной морской поверхностью радиосигналов носят иллюстративный характер, их интерпретация будет представлена в отдельных работах.

2. Этапы создания комплекса ЧУЗИ

Метод ЧУЗИ основан на синхронных измерениях углов прихода (УП) и доплеровского смещения частоты (ДСЧ) коротковолновых (КВ) сигналов на одноканальных среднеширотных радиотрассах. Такие измерения проводились на радиоастрономической обсерватории РИ НАН Украины в пос. Граково, Харьковской обл. и на обсерватории Хейстек (США) с использованием цифрового ионозонда DPS – 4. Основной объём экспериментального материала был получен на радиоастрономической обсерватории РИ НАН Украины. При этом методика определения УП состояла в регистрации угломестных и азимутальных зависимостей уровней сигналов.

В качестве пеленгующего устройства применялась многоканальная антенная система крупнейшего декаметрового радиотелескопа УТР-2 с высоким угловым разрешением (Брауде и др., 1978). В приёмных каналах использовались связные супергетеродинные приёмники декаметрового диапазона отечественного производства Р-399А с высокостабильными гетеродинами. Время измерения УП определялось темпом сканирования положениями диаграммы направленности антенны УТР-2 и менялось от 1 до 5 минут. На таких же интервалах времени проводится отсчёт ДСЧ (Белей и др., 1991).

В дальнейшем для измерения УП применялся метод фазовой пеленгации с доплеровской фильтрацией. Для этого была создана антенная система из трёх вертикальных пространственно-разнесенных штыревых антенн высотой $h = 4$ м ($h = \lambda/4$ на частоте 18 МГц, λ - рабочая длина волны). Антенны установлены в вершинах равнобедренного треугольника. Длина стороны треугольника равна 60 м. Каждая антенна имеет широкополосный антенный усилитель. На базе трёх приёмников Р-399А реализованы три приёмных канала. Для компенсации нестабильности разностно-фазовых характеристик приёмных трактов, обусловленных частотно-избирательными цепями приёмников, через эфир или непосредственно на входы приёмников (экспериментальным путём установлено, что оба варианта эквивалентны) параллельно с принимаемым сигналом вводился компенсационный (калибровочный) сигнал от высокостабильного синтезатора частоты с расстройкой в несколько герц относительно принимаемого полезного сигнала. Это несколько снижало динамический диапазон приёмников, но позволяло довести аппаратную нестабильность разности фаз любых двух приёмных каналов до требуемого значения, составляющего десятые доли градуса. В качестве генератора опорной частоты 5 МГц для синтеза напряжения гетеродинов приёмников применялся рубидиевый стандарт частоты и времени, имеющий относительную нестабильность частоты 10^{-11} . В таком составе комплекс ЧУЗИ доказал свою работоспособность, в частности, при выполнении проекта УНТЦ № 827.

Однако наличие большого количества основной и вспомогательной аппаратуры усложняет техническое обслуживание и эксплуатацию комплекса, лишает его мобильности. В такой конфигурации он не мог быть установлен на УАС Академик Вернадский и на НИС "Горизонт" во время морской части 7-ой Антарктической экспедиции. Поэтому был изготовлен новый трёхканальный приёмно-измерительный комплекс, имеющий аналогичные технические

характеристики, но обладающий рядом конструктивных особенностей, позволивших значительно уменьшить его вес и энергопотребление. Структурная схема комплекса приведена на рис. 1. Она включает в себя антенно-фидерную систему (АФС), трехканальное приёмное устройство (ПУ) и систему обработки и визуализации данных (СОВ). Особенности схемных и конструктивных решений отдельных аппаратурных узлов изложены ниже.

3. Аппаратура. Устройство, размещение, характеристики

3.1. Антенно-фидерная система

Приёмные антенны комплекса выполнены в виде коротких симметричных горизонтальных и несимметричных вертикальных вибраторов, что позволяет принимать радиоволны двух видов поляризации. Поверхность земли вокруг вертикальных вибраторов "металлизирована" с помощью уложенных радиально медных проводов.

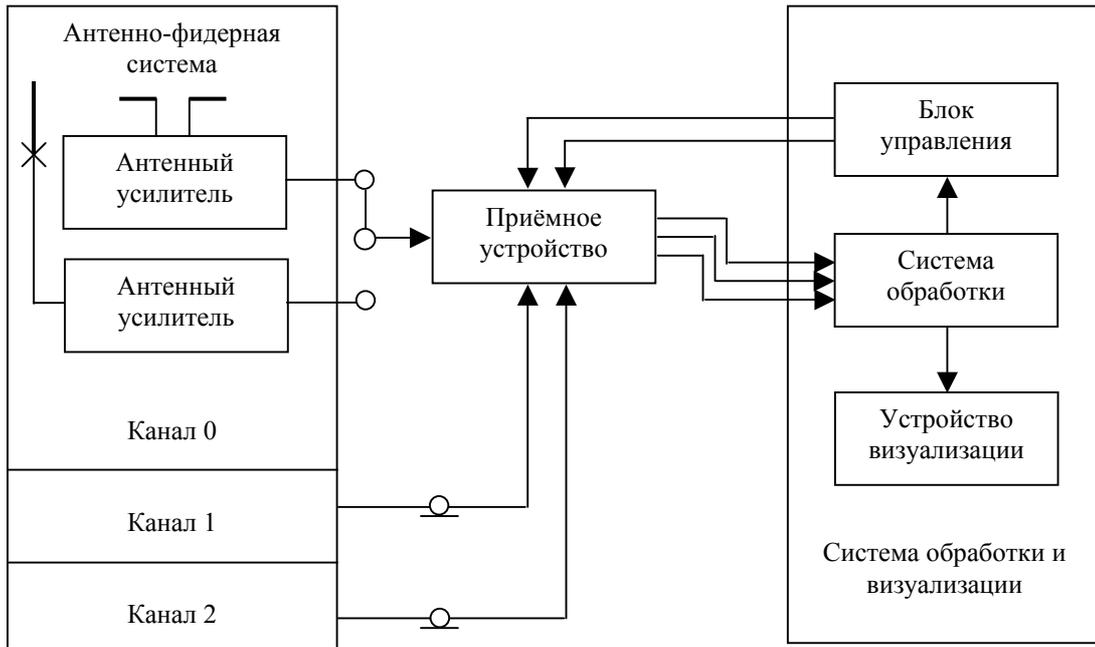


Рис. 1. Структурная схема приёмно-измерительного комплекса.



Рис. 2 Внешний вид антенны.

Для увеличения механической прочности геометрические размеры антенн и, соответственно, их действующие высоты выбирались минимально возможными, исходя из уровней напряжённости электрического поля, создаваемого излучением радиовещательных станций Чили, Аргентины и Уругвая, удалённых от УАС на расстояния более 2,5 тыс. км.

Опоры антенн Т-образные деревянные с распорками, придающими жёсткость конструкции (рис. 2). Высота опоры над поверхностью земли в точке установки составляет 3 м, размах перекладины также 3 м. На горизонтальной части опоры закреплён симметричный вибратор, на вертикальной – несимметричный. Вибраторы выполнены из медного многожильного провода сечением 3 мм². Горизонтальная антенна ориентирована вдоль направления запад-восток, максимум её азимутальной диаграммы направленности совпадает с направлением север-юг. Вертикальная антенна имеет круговую диаграмму направленности по азимуту. Схема расположения антенной системы изображена на рис. 3. Точки 0, 1, 2 размещены на природных скальных возвышенностях, которые не заметаются снегом в зимний период. Для последующего восстановления абсолютных значений углов прихода радиосигнала, координаты точек 0, 1, 2 определялись с помощью прецизионной GPS аппаратуры фирмы Trimble с точностью до 10 см.

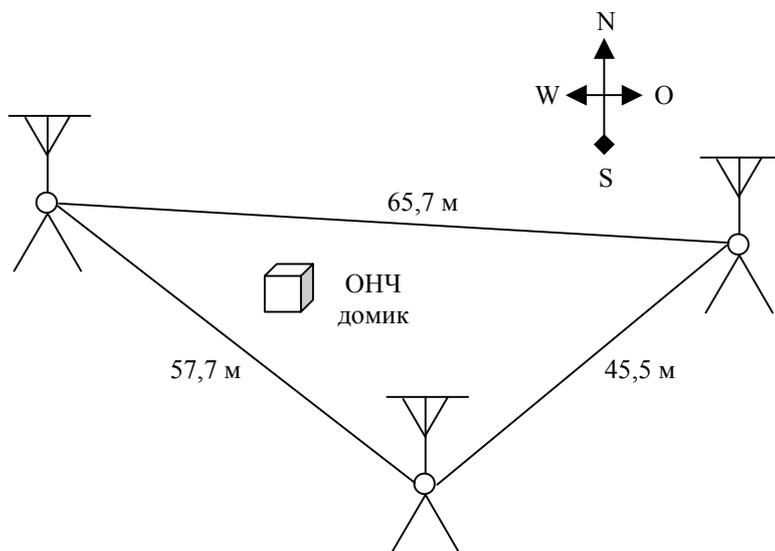


Рис. 3. Схема расположения приёмных антенн на УАС Академик Вернадский.

Поскольку геометрические размеры антенны в сравнении с длинами радиоволн весьма малы, для повышения отдаваемой в фидер мощности и для компенсации в нём потерь каждая антенна нагружена на широкополосный антенный усилитель. Специальная схема усилителя позволяет частично компенсировать уменьшение эффективности антенны на нижних частотах рабочего диапазона волн. Выходное сопротивление усилителя согласовано с волновым сопротивлением фидера.

Фидерный тракт подключается к одной или другой антенне оператором и представляет собой коаксиальный радиочастотный кабель с волновым сопротивлением $W = 75 \text{ Ом}$, по нему же подаётся напряжение питания на усилитель. Физическая длина кабеля около 180 м, а разность электрической длины трёх кабелей на частоте 20 МГц не превышает 1°.

3.2. Приёмное устройство

Структурная схема трёхканального приёмника приведена на рис. 4. На примере описания работы одного канала будет объяснен принцип построения и отличительные особен-

ности данного устройства.

Каждый приёмный канал представляет собой гетеродинный приёмник прямого преобразования. Принимаемый сигнал частоты f_0 с выхода АФС поступает через attenuator на смеситель. На другой вход смесителя подаются колебания местного гетеродина, общего для трёх приёмных каналов. Частота гетеродина f_g выбирается близкой к частоте сигнала f_0 . На выходе смесителя включен полосовой фильтр, выделяющий разностную частоту F .

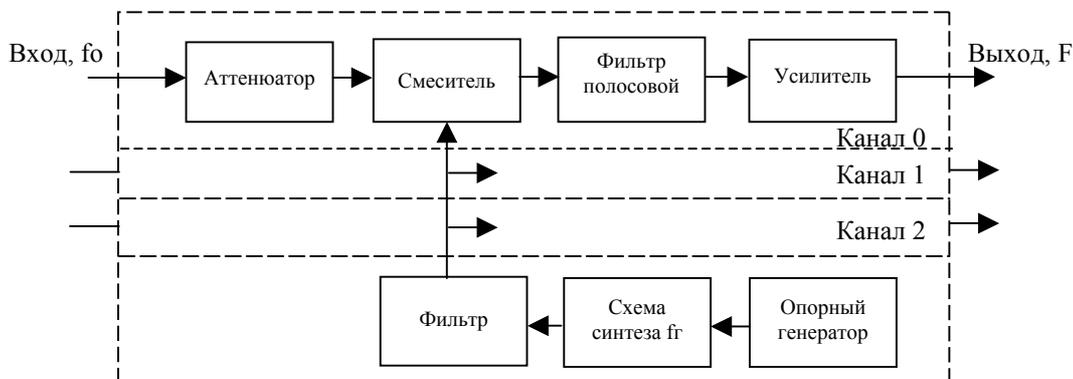


Рис. 4. Структурная схема приёмного устройства.

Отфильтрованный таким образом от модуляционных частот, сигнал несущей частоты радиовещательной станции усиливается и поступает на вход аналого-цифрового преобразователя системы обработки и визуализации данных, построенной на базе ЭВМ.

Аттенуатор 0-40 дБ со ступенчатым переключением обеспечивает оптимальный уровень сигнала на входе смесителя синхронно по всем каналам. Его входное сопротивление согласовано с волновым сопротивлением фидера и составляет 75 Ом. Частотный диапазон устройства 0-32 МГц, погрешность не более 0,4 дБ.

Смеситель приёмника собран по двойной балансной схеме. Это обеспечивает высокую степень развязки цепей сигнала и гетеродина, а также уменьшает эффект прямого детектирования мощных сигналов мешающих станций, что, в конечном счёте, снижает уровень шума на выходе смесителя и увеличивает динамический диапазон.

Гетеродин приёмника создан на базе синтезатора частоты приёмника Р-399А, который работает в диапазоне 35,785 - 66,785 МГц с шагом перестройки один герц. Используя сигнал синтезатора и дополнительное преобразование с фильтрацией, частота гетеродина формируется в диапазоне 1,0 ... 31,99 МГц, сохраняя шаг перестройки, стабильность и чистоту спектра синтезатора.

Полосовой фильтр построен на основе активных RC-фильтров второго порядка. В качестве активных элементов фильтров используются операционные усилители специального назначения с пониженным уровнем собственных шумов фирмы Analog Devices (США). Полоса пропускания составляет 15-30 Гц.

Управление настройкой приёмника на заданную частоту и входным attenuatorом может производиться как непосредственно оператором с помощью элементов настройки, так и программно от СОВ.

Отличительной особенностью приёмника является отсутствие избирательных входных цепей. Такое упрощение стало возможным благодаря применению на входе двойного балансного смесителя на основе аналогового перемножителя с большим динамическим диапазоном, а также сравнительно "тихой" помеховой обстановке в Антарктике. В результате в корпусе одного приёмника Р-399А было размещено три приёмных канала, т. е. значительно уменьшены габариты устройства и потребляемая им мощность.

Испытания, проведенные в течение двух месяцев на НИС "Горизонт" по пути следования от Севастополя до УАС, показали надёжную работу ПУ и соответствие его реальных параметров расчётным.

Основные характеристики и параметры приёмника приведены в Таблице.

Таблица. Основные характеристики приёмника

Параметр или характеристика	Значение
Предельная чувствительность в полосе $\Delta f = 15$ Гц, мкВ	0,7
Полоса пропускания по уровню -3 дБ, Гц	15,0
Динамический диапазон, дБ	60
Максимальное выходное напряжение на нагрузке $R_n = 200$ Ом, В	8
Шаг перестройки, Гц	1,0
Диапазон принимаемых частот, МГц	1,0 ... 32,0
Время перестройки, мс	50
Нестабильность разности фаз двух любых приёмных каналов при $U_c / U_{ш} = 40$ дБ за три часа, град.	$\pm 0,2$

3.3. Система обработки и визуализации

Система обработки и визуализации является окончательным устройством комплекса. С её помощью осуществляется управление приёмным устройством, производится оцифровка данных наблюдений, вычисляются в реальном времени УП и ДСЧ пробных сигналов. СОВ обеспечивает визуализацию и архивацию результатов измерений. Она создана на базе компьютера Pentium III и сопряжённого с ним аналого-цифрового преобразователя L-1250.

Обработка сигналов производится в автоматическом режиме при помощи специального пакета прикладных программ. Инструкция по пользованию и подробное описание пакета изложено в отчёте по когерентным коротковолновым и широкополосным магнитным измерениям во время зимовки 2002 – 2003 гг.

4. Экспериментальные результаты диагностики ионосферы и взволнованной морской поверхности

Как уже отмечалось, приёмный декаметровый комплекс прошёл испытания в морской части 7-й УАЭ. С 23 декабря 2001 г. по 2 февраля 2002 г. комплекс работал в режиме мониторинга состояния ионосферы. Работа велась по радиовещательным станциям Европы, Африки и Южной Америки на одноканальных трассах. Было развёрнуто три антенны; две на верхней палубе НИС "Горизонт" и одна антенна на корме судна. В общей сложности проведено более 300 часов измерений. В качестве иллюстративного материала на рис. 5 изображены динамические спектры принимаемых сигналов в координатах доплеровская частота - время. На рис. 5а приведен случай спокойной ионосферы с одномодовым сигналом и малыми изменениями доплеровского смещения частоты. Рис. 5б демонстрирует случай наблюдения радиозахода, когда существует двухмодовое распространение по различным траекториям, так называемые верхний и нижний лучи. Данные, представленные на рис. 5в, соответствуют

возмущённой ионосфере. Видно, что средний период вариаций ДСЧ составляет около 25 минут. Такое поведение сигнала свидетельствует о пересечении радиотрассы перемещающимися ионосферными возмущениями. Запись сигнала, приведенная на рис. 5г, сделана на стоянке в открытом океане и использовалась для получения океанографической информации.

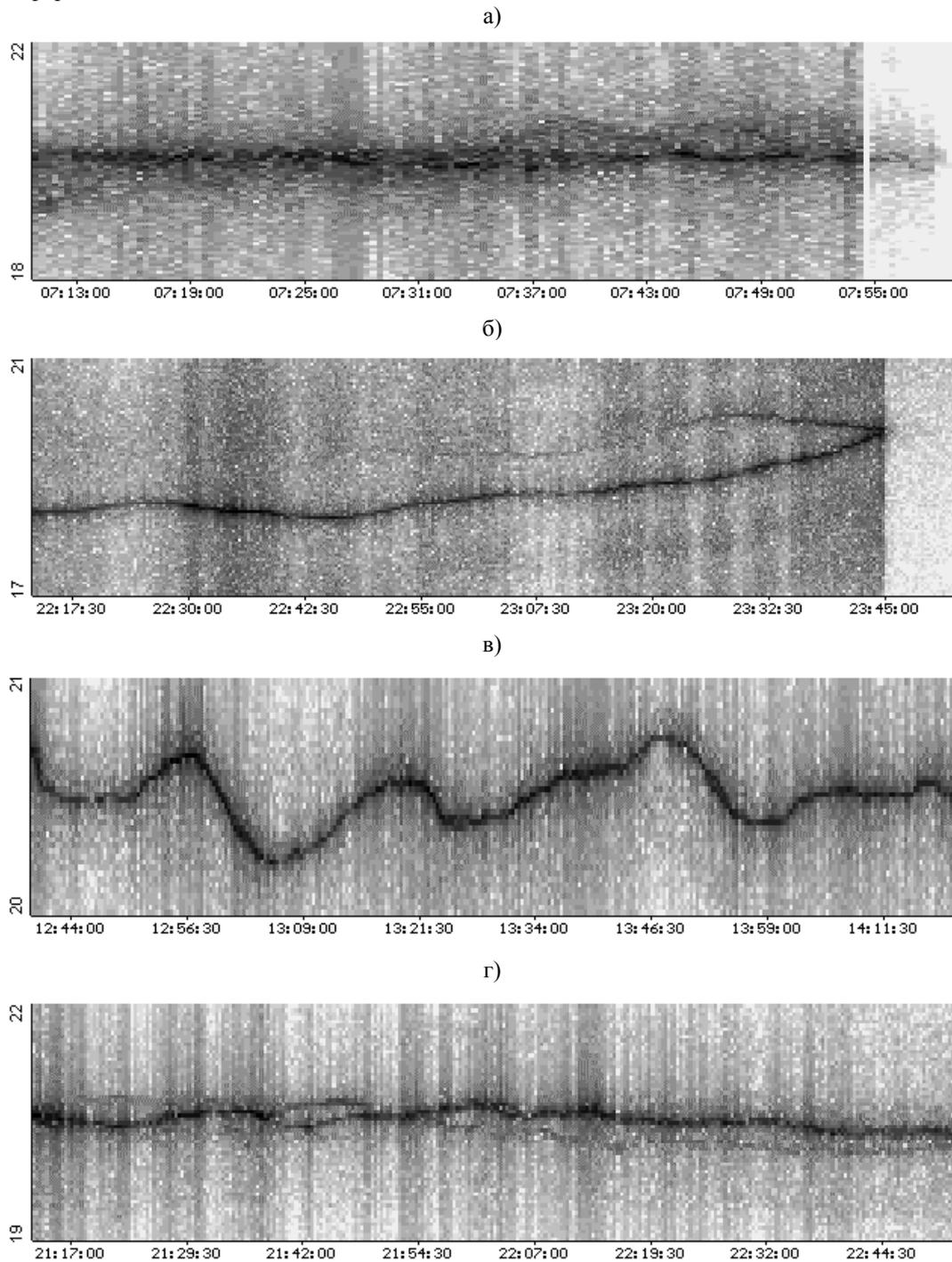
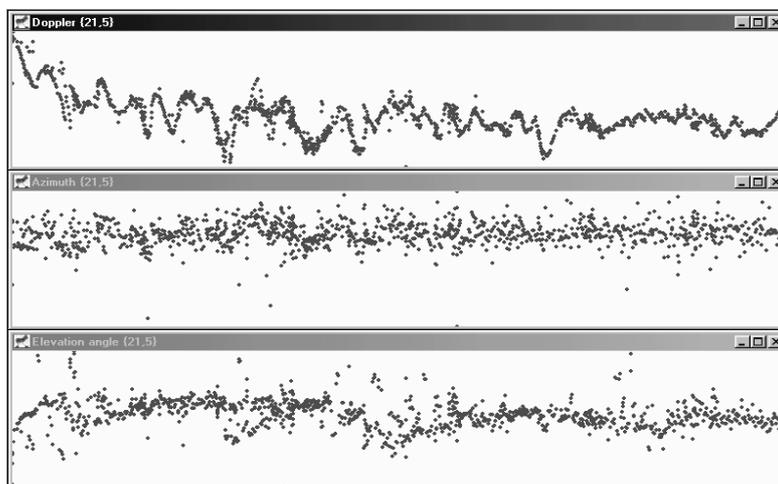


Рис. 5. Динамические спектры ионосферных сигналов.

На рис. 6 представлены результаты измерения ДСЧ и УП сигналов радиовещательной станции SGO (Чили), проведенные на УАС Академик Вернадский в 2002 г. на частоте 21,5 МГц. На рис. 6а явно прослеживаются только вариации ДСЧ. На рис. 6б наблюдаются как вариации ДСЧ, так и УП, по таким временным зависимостям возможно восстановление параметров ПИВ.

а)



б)

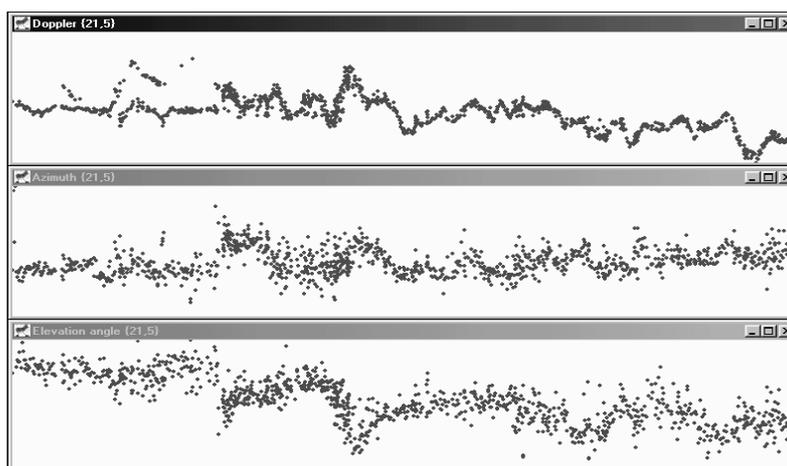


Рис. 6. Регистрация УП и ДСЧ сигнала радиостанции SGO на УАС.

5. Выводы

На Украинской антарктической станции был установлен и в течение 2002 - 2003 гг. успешно эксплуатируется приёмный коротковолновый комплекс для частотно-углового зондирования ионосферных возмущений, использующий в качестве пробных сигналов излучение широковещательных станций Южноамериканского континента. Комплекс предназначен для долговременного мониторинга ПИВ по наблюдениям временных вариаций траекторных параметров пробных сигналов. В отличие от подобных измерений в средних широтах северного полушария, в приполярной области такой мониторинг организован впервые. Это позволяет значительно расширить возможности изучения процессов

энергообмена между нижней и верхней атмосферой в Антарктическом регионе и даёт экспериментальный материал для разработки соответствующих физических моделей.

Благодарность. В заключение авторы выражают благодарность директору УАЦ В.А. Литвинову и зам. директора УАЦ Г.П. Милиневскому за содействие при проведении работ по установке на УАС приёмно-измерительного комплекса; начальнику экспедиции Крашенинникову Б.М. и команде НИС "Горизонт" за обеспечение успешного проведения измерительного цикла в морской части 7-й УАЭ; участникам 6-й УАЭ А.И. Лозе, К.П. Гармашу, О.В. Буданову, В.И. Омельченко, В.И. Яндюку за помощь в установке комплекса ЧУЗИ во время проведения сезонных работ в феврале 2002 г.

Литература

Белей В.С., Галушко В.Г., Фукс И.М., Ямпольский Ю.М. Восстановление параметров ПИВ в модели идеально отражающей поверхности. // Препринт. АН УССР. Радионастрономический институт, N 48. – Харьков, - 1991. - 40с.

Брауде С. Я., Мень А.В., Содин Л.Г.. Радиотелескоп декаметрового диапазона волн УТР-2. // Антенны. - М.: Связь. - вып. 26. - 1978.

Кащеев С.Б., Ямпольский Ю.М., Зализовский А.В.. Зондирование морской поверхности сигналами коротковолновых радиовещательных станций. // Радиофизика и радиоастрономия. - 2000. –Т. 6. - №1. - С.79-88.

Beley V.S., Galushko V.G., Yampolski Yu.M. Traveling ionosphere disturbances diagnostics using HF signal trajectory parameter variations. // Radio Sci. -1995. - Vol. 30, № 6. - P.1739-1752.