

## СОВРЕМЕННЫЕ АСПЕКТЫ ГЛОБАЛЬНОЙ ВЧ-ДИАГНОСТИКИ ИОНОСФЕРЫ

С.Б. Кашеев, Л.Н. Литвиненко, Ю.М. Ямпольский

## TODAY'S ASPECTS OF THE GLOBAL HF DIAGNOSTICS OF THE IONOSPHERE

S.B. Kashcheyev, L.N. Lytvynenko, Yu.M. Yampolski

Рассмотрены возможности глобальной диагностики ионосферы радиофизическими методами с использованием широкоэмиттерных передатчиков и многопозиционных приемных систем ВЧ-диапазона. Описана Интернет-управляемая сеть цифровых приемников, расположенная в Украине, Антарктике, Северной Скандинавии, на арх. Шпицберген, в Лягосе (Нигерия), Джикамарке (Перу) и в Иркутске (ИСЗФ СО РАН). Система обеспечивает измерения параметров сигналов, используемых при решении задач радиозондирования ионосферы, таких как углы прихода, доплеровские смещения частоты и времена группового запаздывания. Приведены примеры успешной диагностики ряда глобальных ионосферных процессов, выполненные в РИ НАН Украины в содружестве с коллегами из ИСЗФ СО РАН и университета города Тромсё (Норвегия).

The potential of the global diagnostics of the ionosphere using signals from broadcast radios and special-purpose transmitters and multiposition HF receiving systems. At present, an Internet-controllable network of digital receivers located in Ukraine, Antarctica, Northern Scandinavia, at Spitsbergen Archipelago, in Lagos (Nigeria), Jacamars (Peru) and Irkutsk (Russia). This system gives us possibility to measure such main parameters: angles of arrival, Doppler frequency shift and group time delay of the probe signals. Examples are presented of successful diagnostics of a number of global ionospheric processes which have been carried out by the IRA NASU (Kharkov, Ukraine) in cooperation with colleagues from the ISTP SB RAS and University of Tromsø (Norway).

Сравнительно недавно, в начале прошлого века, было обнаружено, что радиоволны распространяются на дальние расстояния за счет отражения от некоего слоя в верхней атмосфере. Этот слой, содержащий заряженные частицы, впоследствии был назван ионосферой. Для обеспечения бесперебойной работы дальних и сверхдальних радиолиний началось активное изучение структуры ионосферы и процессов, которые в ней происходят. В конце прошлого века развитие космических технологий привело к тому, что ионосфера стала средой, в которой проходят орбиты космических аппаратов, что, в свою очередь, потребовало дополнительных усилий по ее диагностике. В настоящее время методы исследования ионосферы подразделяются на две основные группы: контактные, когда приборы, измеряющие параметры плазмы, устанавливаются на космических аппаратах, и дистанционные, когда измерительные устройства различного принципа действия устанавливаются на поверхности Земли. В лекции рассмотрены дистанционные радиофизические методы диагностики ионосферы, когда роль «сенсоров» играют электромагнитные волны, отраженные, рассеянные или преломленные ионосферой.

Ионосфера – неоднородная и нестационарная среда, в ней формируются неоднородности самых различных пространственных и временных масштабов. Наиболее мелкомасштабные порождаются ленгмюровской турбулентностью и составляют единицы и десятки сантиметров в зависимости от плотности и температуры плазмы на разных высотах. Среднемасштабные неоднородности, которые стимулированы атмосферными гравитационными волнами (АГВ), распространяющимися в атмосфере с малым затуханием, модулируют плотность плазмы, являясь транспортным агентом переноса энергии возмущений на разные высоты. В соответствии с принятой классификацией такие неоднородности называются перемещающимися ионосферными возмущениями (ПИВ). Их характеризует квазиперио-

дичность поведения плазменных параметров в пространстве и во времени. Горизонтальные размеры таких неоднородностей составляют десятки и сотни километров, а периоды варьируют от десяти минут до нескольких часов. Наконец, наиболее крупные неоднородности порождаются глобальными возмущениями и носят планетарный характер, продолжительность их существования от нескольких часов и более. Диагностика различных ионосферных неоднородностей, механизмов их генерации и динамики является актуальной задачей для современных исследований геокосмоса. В лекции рассмотрены методы глобальной диагностики ионосферных неоднородностей с использованием сигналов ВЧ-диапазона. Такие методы традиционно разрабатываются и успешно применяются в РИ НАН Украины для исследований ионосферы в различных регионах земного шара.

Наличие ионосферных неоднородностей приводит к вариациям траекторных параметров на прямых радиотрассах распространения ВЧ-сигналов, а также к появлению дополнительных пространственных модов со значительными отклонениями от дуги большого круга. Основными информационными параметрами при решении задач радиозондирования ионосферы являются углы прихода, доплеровские смещения частоты и времена группового запаздывания (для импульсных сигналов). Необходимо подчеркнуть, что основной особенностью проводимых исследований является использование неспециальных источников излучения, таких как вещательные радиостанции или станции службы точного времени, например, РВМ (Россия) и CHU (Канада).

В РИ НАНУ на базе цифрового приемника WR-313i фирмы Winradio создан современный измерительный комплекс ВЧ-диапазона, который состоит из антенно-фидерной системы и персонального компьютера, непосредственно в котором установлена плата приемника [Кашеев и др., 2012]. Небольшие габариты комплекса и малое энергопо-

требление делают его достаточно мобильным и позволяют устанавливать в самых различных точках Земли, включая Антарктиду и Арктику. Характерной особенностью комплекса является его автономность. Для дистанционного управления разработано специальное программное обеспечение, которое позволяет изменять режим работы приемника, считывать и архивировать данные, а также обеспечивает первичную обработку и визуализацию. Текущая информация в реальном времени по сети Интернет поступает на сервер института и представлена для пользователей на сайте [<http://ri.kharkov.ua/geospace/data.html>]. На сегодняшний день приемные комплексы расположены и успешно работают в Украине, Норвегии, Нигерии, Антарктиде и на архипелаге Шпицберген. Комплексы, изготовленные по аналогии с нашим, установлены в России в Иркутске (ИСЗФ СО РАН) и Москве (ИЗМИРАН), а также в Джикамарке (Перу). В настоящее время еще один двухканальный приемный комплекс создается по нашей технологии в Мурманске (МГПУ). Размещение приемных пунктов по всему земному шару позволяет изучать динамические процессы в ионосфере в планетарном масштабе.

Рассмотрим некоторые результаты зондирования ионосферы ВЧ-сигналами.

Исследования ионосферных образований глобального масштаба проводятся с помощью измерений спектральных и временных характеристик ВЧ-сигналов на сверхдальних трассах. С 2010 г. на Украинской антарктической станции «Академик Вернадский» (УАС) систематически проводятся эксперименты на двух радиопереходах протяженностью 16 и 12.3 тыс. км. В качестве источников пробных сигналов используются станции точного времени РВМ (Россия) и CHU (Канада). На рис. 1 показано расположение корреспондирующих пунктов, а также проекции прямых трасс на поверхность Земли.

Длительный период измерений позволяет анализировать средние суточные и сезонные особенности поведения характеристик сигналов и на их фоне выде-

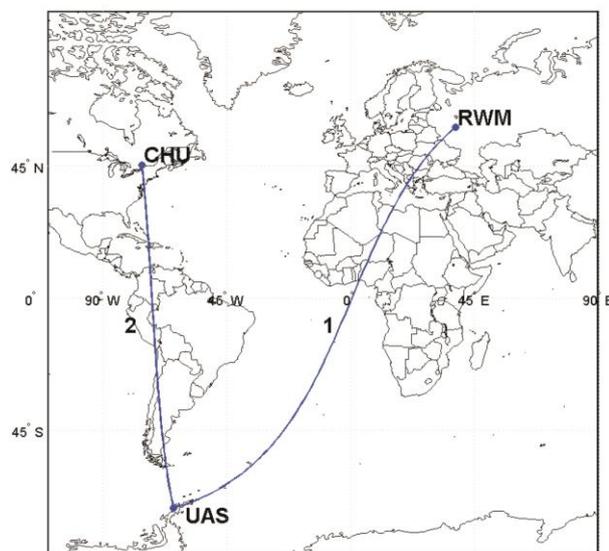


Рис. 1. Схема проведения измерений на сверхдальних радиопереходах.

лять вариации в отдельные дни. На рис. 2 в качестве примера представлены усредненные за месяц суточные спектрограммы сигналов, полученные в разные сезоны года. Измерения временных характеристик сигналов, проведенные в импульсном режиме излучения станции РВМ, позволили различить траектории распространения. В частности, удалось разделить сигналы, распространяющиеся по прямой и обратной трассе. Кроме этого, идентифицированы сигналы, которые приходят в приемный пункт за счет рассеяния на плазменных неоднородностях, формирующихся на границе полярного овала. Как правило, эффекты рассеяния приводят к расширению спектральных функций. Показано, что сигнал станции РВМ на частоте 4996 кГц в течение года распространяется как вдоль прямой трассы, так и с большим отклонением от дуги большого круга за счет рассеяния на северном полярном овале. На частоте 9996 кГц кроме двух упомянутых траекторий устойчиво формируется сигнал по обратной трассе. Сигнал на частоте 14996 кГц наблюдается только на прямой и обратной радиопереходах (см. стрелки на рис. 2). Сигналы станции CHU регистрируются в Антарктиде преимущественно в сумеречное и ночное время, они распространяются по прямой трассе и рассеиваются на неоднородностях полярного овала.

Изменения средних за месяц спектральных характеристик сигналов, вызванные ростом солнечной активности, показаны на рис. 3. Видно, что в 2011 г. по сравнению с 2010 г. увеличивается продолжительность регистрации обратных сигналов станции РВМ. Кроме того, растет интенсивность сигналов, принятых на УАС за счет рассеяния на неоднородностях полярного овала. Девиация частоты рассеянных сигналов также увеличивается. Эти эффекты можно объяснить увеличением средней интенсивности ионосферных неоднородностей и усилением конвекции плазмы в район полярного овала с ростом активности Солнца.

Следующая группа экспериментов посвящена исследованиям влияния солнечного затмения на изменения плотности электронной плазмы. Такие исследования проводятся многими учеными в разных странах, но в большинстве случаев при этом применяется метод зондирования ионосферы. Мы применили методы спектральной диагностики на наклонных радиопереходах, схема эксперимента представлена на рис. 4 [Кащеев и др., 2009]. В качестве источников излучения были использованы пробные передатчики ИСЗФ СО РАН, которые расположены вблизи Иркутска, Норильска и Магадана. Приемные пункты РИ НАНУ были размещены на о. Свалбард, а также вблизи Харькова. На карте приведена траектория движения полной тени (серая полоса) и ее центра по поверхности Земли во время полной фазы затмения, которое состоялось 1 августа 2008 г. с 09:22 по 11:20 UT. В процессе измерений передающие пункты последовательно по минуте излучали непрерывные сигналы на двух частотах  $f_1=10999$  кГц и  $f_2=12333$  кГц. В приемных пунктах проводился спектральный анализ принятых сигналов. Вариации значений доплеровского сдвига частоты (ДСЧ) в день затмения приведены на рис. 5, а–г для трасс

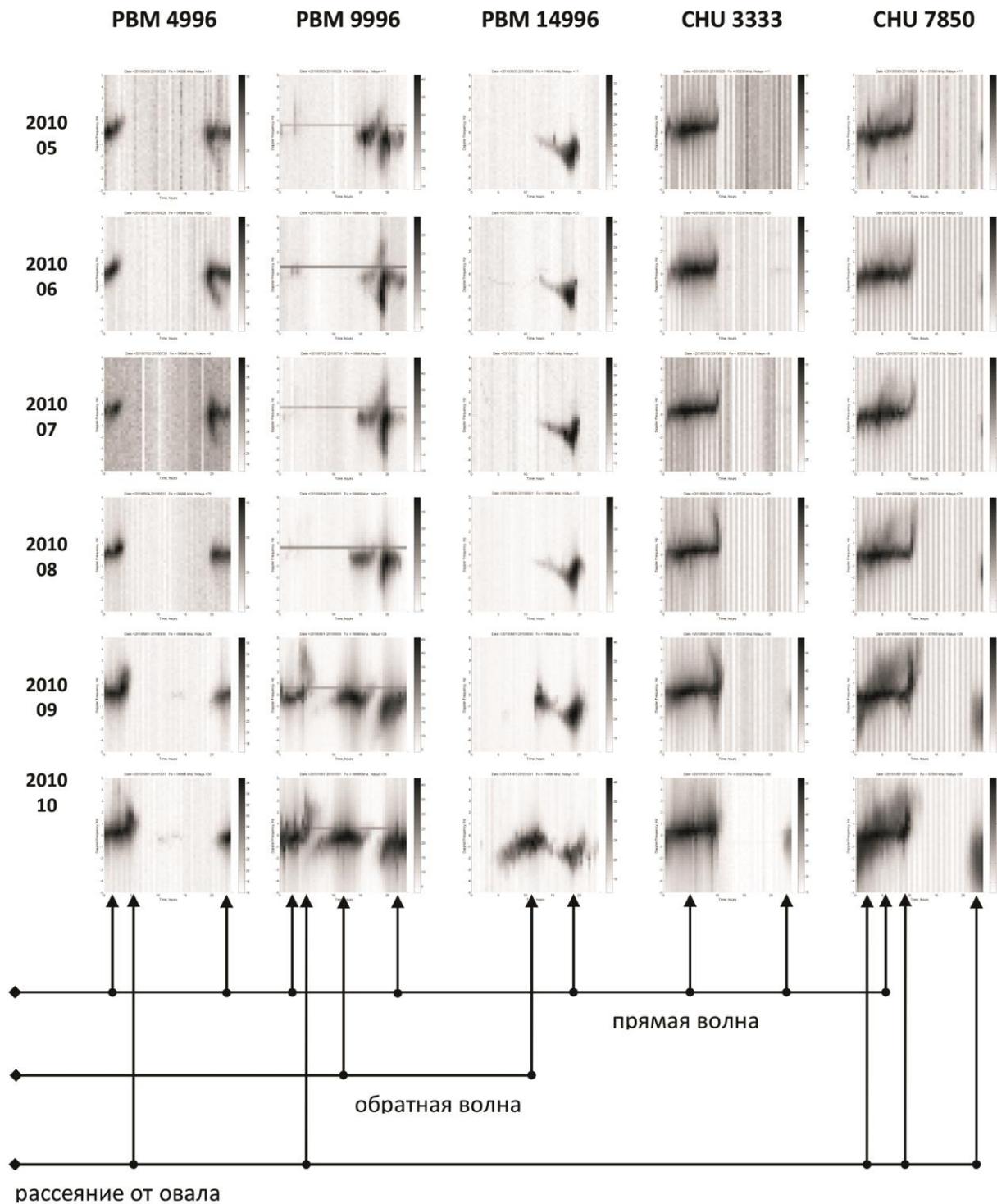


Рис. 2. Усредненные суточные спектрограммы сигналов на различных трассах и частотах.

Иркутск–РАО, Магадан–РАО, Норильск–РАО и Иркутск–Свалбард соответственно. На графиках хорошо видны общие для всех трасс и частот закономерности: первоначально спектральные максимумы смещаются в отрицательную область, затем следует быстрый переход от максимально отрицательных к максимально положительным значениям смещения. Моменты перехода ДСЧ через ноль для всех трасс и частот с точностью до одной минуты [Кашеев и др., 2009] совпадают со временем максимальной фазы затмения над трассой. Нами были

рассчитаны вариации интегральной освещенности всех трасс во время затмения. Результаты такого моделирования приведены на рис. 5. Хорошо видно качественное и количественное совпадение между вариацией ДСЧ сигналов и скоростью изменения освещенности, причем максимальная корреляция между процессами наблюдается на самой длинной трассе Магадан–РАО, а минимальная – на самой короткой трассе Норильск–РАО. Необходимо отметить, что на всех трассах девиации частоты сигнала на более высокой рабочей частоте были меньше,

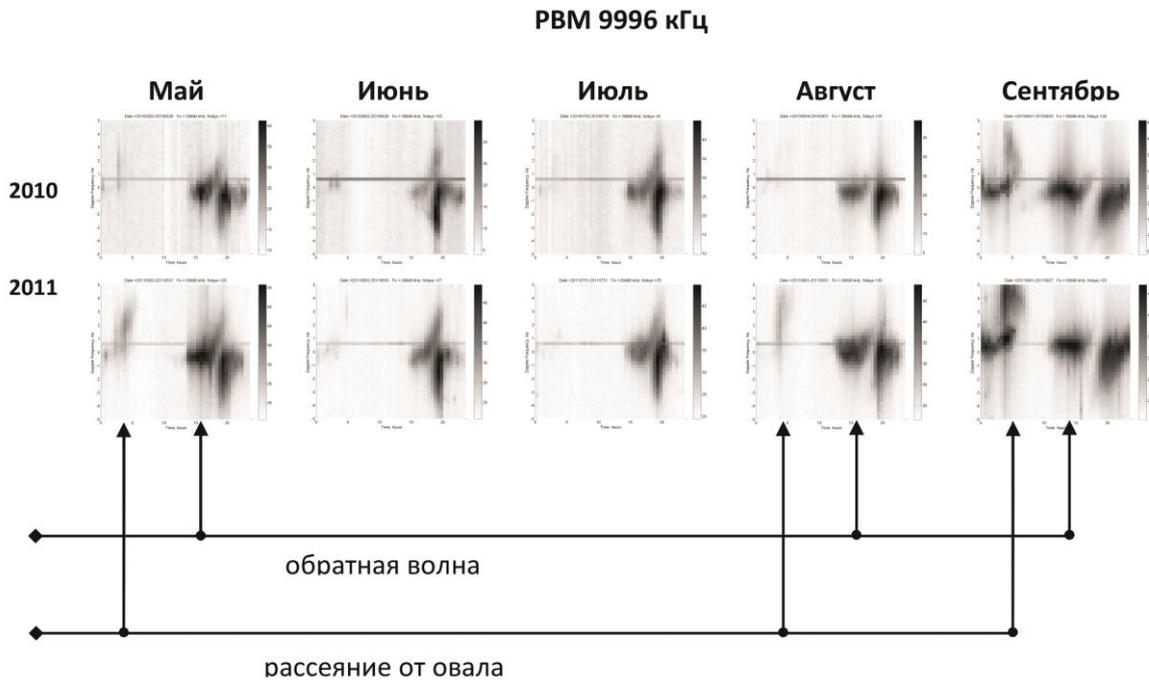


Рис. 3. Сравнение спектрограмм сигналов в разные периоды солнечной активности.



Рис. 4. Схема проведения измерений во время солнечного затмения 01.08.2008 г.

чем на более низкой; зависимость ДСЧ сигналов от несущей частоты весьма близка к обратно пропорциональной. Таким образом, проведенные эксперименты позволили установить, что доплеровский сдвиг частоты сигнала обусловлен изменением коэффициента преломления вдоль трассы распространения, а не физической скоростью смещения области отражения.

Рассмотрим результаты многопозиционной ВЧ-доплероскопии, полученные в последнее время. Нами разработан метод частотно-временной обработки сигналов станции точного времени РВМ во время импульсного режима излучения с частотой посылок 10 Гц [Кащеев и др., 2013]. Метод позволяет параллельно измерять задержку и ДСЧ отдельных модов сигнала с последующим представлением

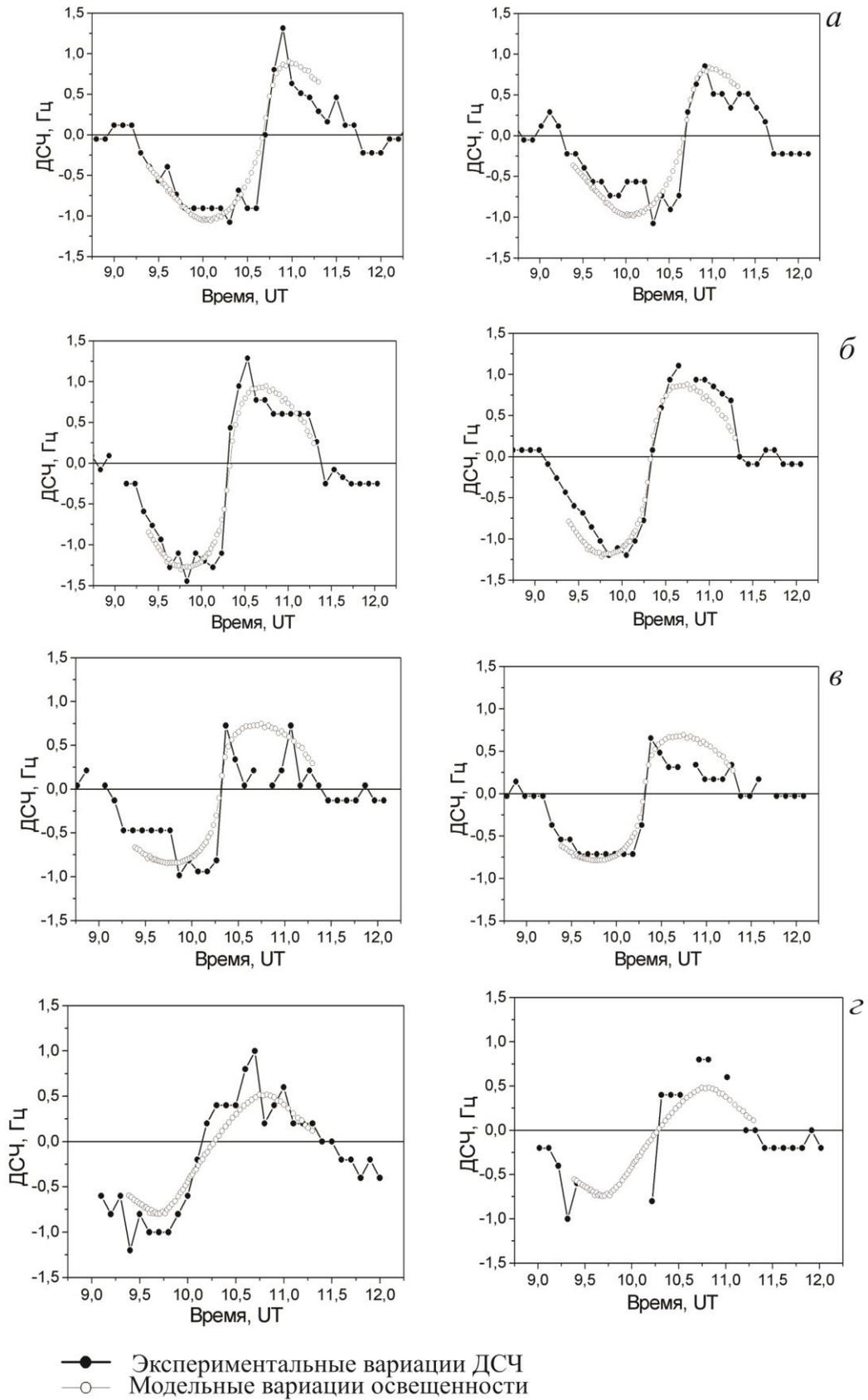


Рис. 5. Вариации ДСЧ сигналов и освещенности трасс во время затмения Солнца.

их в виде спектрограмм в координатах «время задержки – сдвиг частоты». В ночное время, когда рабочие частоты станции РВМ становятся выше МПЧ для прямой трассы Москва–Харьков, постоянно наблюдается два или более мода с различными

задержкой и ДСЧ (рис. 6). На рис. 7 приведены временные зависимости длины групповых путей различных модов сигнала на частоте 9996 кГц, полученные в апреле 2012 г. Наиболее энергонесущая компонента сигнала, показанная квадратами, была

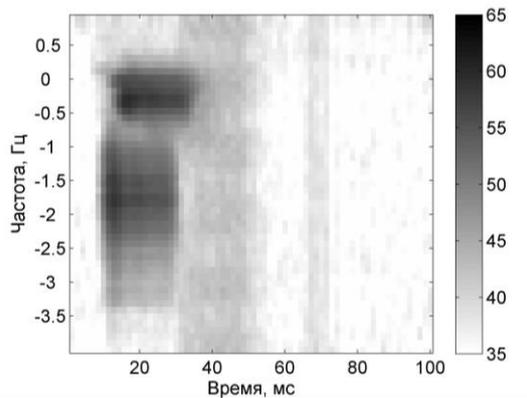


Рис. 6. Спектрограмма импульсного сигнала станции РВМ, 9996 кГц, 22:20 16.04.2012 г.

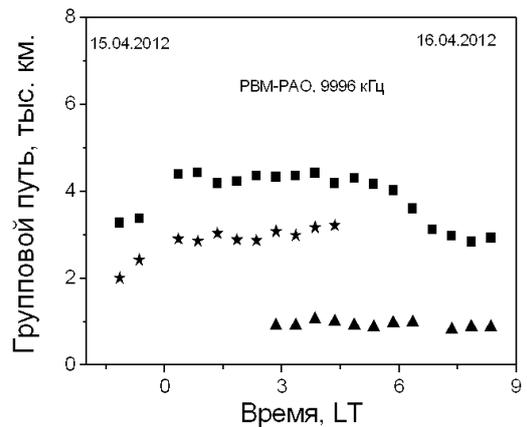


Рис. 7. Вариации групповых путей различных модов сигнала, 9996 кГц, 16.04.2012 г.

принята с дистанций, которые варьировали от 3000 до 5000 км. Это сигналы, отраженные от поверхности Земли на больших расстояниях от передающего и приемного пунктов, их можно назвать сигналами бистатического возвратно-наклонного зондирования (ВНЗ). Спектральная и временная селекция сопровождалась пеленгацией принятого сигнала [Кашеев и др., 2013]. Это позволило установить, что во время экспериментов сигналы ВНЗ приходили преимущественно с юго-восточного направления.

Несколько меньше мощность другого мода, показанного на рисунке звездочками. Его спектр значительно шире, чем сигнала ВНЗ, а величину ДСЧ в рамках применяемой методики обработки в некоторых случаях определить не удавалось, так как ширина спектра превышала полосу анализа (5 Гц). Этот сигнал обусловлен рассеянием на неоднородностях, расположенных на границе полярного овала. Длина группового пути от 2000 до 3000 км соответствует протяженности трассы РВМ – граница овала – РАО. В одну из ночей (18.04) наблюдалась большая интенсивность этого сигнала и несколько меньший

групповой путь, что объясняется сильным магнитным возмущением и смещением границы полярного овала на юг.

Компонента сигнала, показанная треугольниками, становилась заметной в каждую ночь проведения эксперимента в предрассветные часы примерно в одно и то же время. По мере приближения времени восхода ее мощность увеличивалась, задержка соответствовала групповому пути 800÷1000 км, что по протяженности близко к длине трассы зеркального сигнала, отраженного от F-слоя. Эта компонента обусловлена рассеянием сигнала на мелкомасштабных ионосферных неоднородностях вблизи средней точки прямой радиотрассы.

Таким образом, измерения временных и спектральных характеристик импульсных сигналов станций точного времени и специальных исследовательских передатчиков ИСЗФ СО РАН позволяют диагностировать динамические процессы в ионосфере в разных регионах земного шара. В частности, анализ сигналов, рассеянных на границе полярного овала, дает возможность оценивать ее местоположение, интенсивности и скорости движения плазменных неоднородностей в этом районе. В лекции на нескольких конкретных примерах продемонстрированы возможности глобальной диагностики ионосферы сигналами исследовательских и широкоэмиттерных передатчиков с использованием приемов импульсной, частотной и угловой селекции в пространственно разнесенных пунктах. Ряд результатов исследований, представленных в докладе, получен в рамках совместных украинско-российских грантов НАНУ – СО РАН, НИР «Збурення» и «Сизиф» (регистрационные номера НДР 0111U003979, 0113U000703).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Кашеев С.Б., Зализовский А.В., Колосков А.В. и др. Вариации частоты КВ-сигналов на протяженных трассах во время солнечного затмения // Радиофизика и радиоастрономия. 2009. Т. 14, № 4. С. 353–366.

Кашеев С.Б., Галушко В.Г., Колосков А.В. и др. Многофункциональные приемные комплексы ВЧ-диапазона для исследований динамических процессов в ионосфере // Электромагнитные методы исследования окружающего пространства: Сб. тез. докл. Первой Украинской конференции. Харьков, 2012. 308 с.

Кашеев С.Б., Зализовский А.В., Сопин А.А., Пикулик И.И. О возможности бистатического ВЧ-зондирования ионосферы сигналами точного времени // Радиофизика и радиоастрономия. 2013. Т. 18, № 1. С. 34–42.

<http://ri.kharkov.ua/geospace/data.html>.

Радиоастрономический институт НАН Украины, Харьков, Украина