



# Научно- исследовательский радиофизический ИНСТИТУТ



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
«Научно-исследовательский радиофизический институт»  
(ФГБНУ НИРФИ)

Препринт № 547

Результаты исследований  
в ФГБНУ НИРФИ  
околоземного пространства  
и солнечно-земных связей



Нижний Новгород  
2013

**Результаты исследований в ФГБНУ НИРФИ околоземного пространства и солнечно-земных связей // Препринт № 547. – Нижний Новгород: ФГБНУ НИРФИ, 2013. – 23с**

УДК 520; 523.31-852; 523.4-853; 523.62; 523.9

В препринте, представлены наиболее значимые результаты исследований научных отделов, показаны достижения и перспективы развития в области исследований околоземного пространства и солнечно-земных связей.

В препринте отражена деятельность института на современном этапе в области исследований околоземного пространства и солнечно-земных связей. Основные результаты этого направления деятельности ФГБНУ НИРФИ представлены в виде блоков.

На первой странице приведены общие данные о многоцелевом комплексе для исследований околоземного космического пространства – стенде СУРА, входящем в уникальные исследовательские установки России (рег. № 06-30).

Блок последующих 2-х страниц отражает деятельность развернутой в институте Российской сети ЛЧМ (с линейно-частотной модуляцией сигналов) ионозондов и результаты введения в исследования нового инструмента для изучения ионосферы и распространения радиоволн – ЛЧМ ионозонда/радиопеленгатора. Российская сеть ЛЧМ ионозондов охватывает обширные стратегически важные районы Северо-Востока, Дальнего Востока, Восточной Сибири и Евразийской части России и направлена результатами своих исследований на совершенствование системы КВ-радиосвязи.

Далее представлены разработки двух широко применяемых методов исследования ионосферы (метода создания искусственных периодических неоднородностей и метода частичных отражений) и ряд основных результатов исследований, полученных с использованием этих методов.

Очередной раздел препринта посвящен результатам фундаментальных исследований ионосферы, полученным ранее и в последние годы как с использованием нагревного стенда СУРА, так и с использованием маломощных приемопередающих комплексов диагностики F-области ионосферы («Диагностика искусственной турбулентности F-области ионосферы с помощью искусственного радиоизлучения ионосферы – ИРИ», «Искусственная ионосферная турбулентность – ИИТ в F-области ионосферы»), а также исследованиям в более высоких слоях ионосферы: до ~700 км с использованием данных французского микроспутника DEMETER при пролетах над областью возмущений нагревного стенда СУРА («Исследование характеристик искусственной ионосферной турбулентности во внешней ионосфере Земли»). Здесь же представлены результаты изучения крупных неоднородностей с использованием сигналов GPS: «Зондирование сигналами GPS крупномасштабных неоднородностей ионосферы, вызванных радиоизлучением стенда СУРА».

На следующей странице из этой серии рассказано о методе и результатах зондирования мезосферы при применении КВ-радаров стенда СУРА: «Радиозондирование мезосферы».

Информация о фундаментальных открытиях в институте километрового радиоизлучения в магнитосфере и «Эффекта Гетманцева» и результатах, основанных на этих открытиях, приведена на странице «Исследования низкочастотных радиоволн в ФГБНУ НИРФИ».

Развитие этих результатов нашло отражение в разделе «Аппаратура для мониторинга естественных электромагнитных шумов и антропогенных сигналов в ближнем космосе», где говорится об участии института в международном космическом проекте «Резонанс» и Федеральной целевой программе России по созданию и развитию системы мониторинга геофизической обстановки над территорией Российской Федерации.

В разделе «Декаметровое радиозондирование объектов ближнего космоса» излагаются результаты, полученные с использованием стенда СУРА в качестве приемопередающей антенны для исследования Луны, переходной области солнечного ветра и калибровки аппаратуры удаленных космических аппаратов.

Физические и прикладные результаты исследований радиоизлучения Солнца и солнечно-земных связей: «Исследования проявлений солнечной активности по радиоданным», «Разработка методов прогноза явлений солнечной активности и их геоэффективных проявлений» – представлены в следующем разделе.

Результаты развития современного метода радиоастрономических наблюдений проиллюстрированы в разделах: «Радиоинтерферометрия со сверхдлинной базой (РСДБ)» и «Научные и прикладные РСДБ-исследования 2006-2011 гг.». Показаны возможности применения радиоинтерферометрии для задач траекторных и координатных измерений космических объектов, контроля состояния ионосферы, в том числе для измерения динамических характеристик неоднородностей электронной концентрации ионосферы и интенсивности ее флуктуаций под внешним воздействием (стенд СУРА).

Последняя страница препринта – «Солнечный спектромагнитограф ФГБНУ НИРФИ полетит к Солнцу» – посвящена разработке многофункционального солнечного телескопа «ТАХОМАГ», предназначенного для размещения на Международной космической станции «ИНТЕРГЕЛИОЗОНД». Предполагается, что станция будет использована для комплексного изучения природы и глобальной динамики наиболее мощных проявлений солнечной активности и их влияния на гелиосферу и космическую погоду.



# МНОГОЦЕЛЕВОЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА - СТЕНД СУРА

(УНИКАЛЬНАЯ УСТАНОВКА РОССИИ № 06-30)

Стенд СУРА сооружен в 1981 г. по инициативе Г.Г.Гетманцева, профессора, доктора физико-математических наук, как *базовый отечественный инструмент* для изучения эффектов взаимодействия мощного КВ радиоизлучения с ионосферной плазмой.

Расположен в 100 км к востоку от г. Нижний Новгород вблизи р.п. Васильсурск (56.13° N , 46.10° E).

*Входит в мировую сеть* специализированных стендов - EISCAT, HAARP, HIPAS, SPEAR, являясь единственной установкой такого рода на средних широтах. Используется для исследований *по приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники* в области информационно-телекоммуникационных систем (технологии передачи, обработки и защиты информации) и рационального природопользования (технологии мониторинга и прогнозирования состояния атмосферы и гидросферы, технологии экологически безопасной разработки месторождений добычи полезных ископаемых).



*Основу стенда* составляют три вещательных КВ радиопередатчика мощностью 250 кВт каждый и трехсекционная приемно-передающая антенна с размерами 300 м x 300 м, состоящая из 144 крестообразных вибраторов. Эффективная мощность излучения стенда составляет около 290 МВт на средней частоте рабочего диапазона антенны 4.5 - 9.3 МГц. Его энергетику обеспечивают 30-ти километровая высоковольтная линия ЛЭП-35 и электрическая подстанция мощностью 8 МВт.

Стенд *оснащен широким набором вспомогательных диагностических устройств* непосредственно под пятном нагрева и в выносных наблюдательных пунктах.



За годы эксплуатации стенда СУРА разработаны и освоены *оригинальные методики исследований*, что позволяет в настоящее время использовать его в качестве исследовательской установки:

- ❖ для изучения ионосферных возмущений в поле мощных радиоизлучения и управления ионосферным каналом распространения радиоволн;
- ❖ для генерации искусственного радиоизлучения ионосферы, включая КНЧ-УНЧ-СНЧ диапазон;
- ❖ для диагностики параметров ионосферы и верхней атмосферы методами резонансного рассеяния радиоволн на искусственных периодических неоднородностях и ЛЧМ – зондирования;
- ❖ для радиоакустического зондирования тропосферы и мезосферы;
- ❖ а также в качестве КВ радара и декаметрового радиотелескопа для исследований объектов ближнего и дальнего космоса.

*Перспективы исследований* ориентированы на разработку новых методов и технологий дистанционного зондирования атмосферы Земли на основе контролируемых воздействий, развитие методов создания управляемого канала дальнего распространения КВ-УКВ радиоволн в интересах совершенствования радиосистем специального назначения, выявление техногенных факторов глобальных атмосферных возмущений.





# РОССИЙСКАЯ СЕТЬ ЛЧМ ИОНОЗОНДОВ

## Российская сеть ЛЧМ зондов



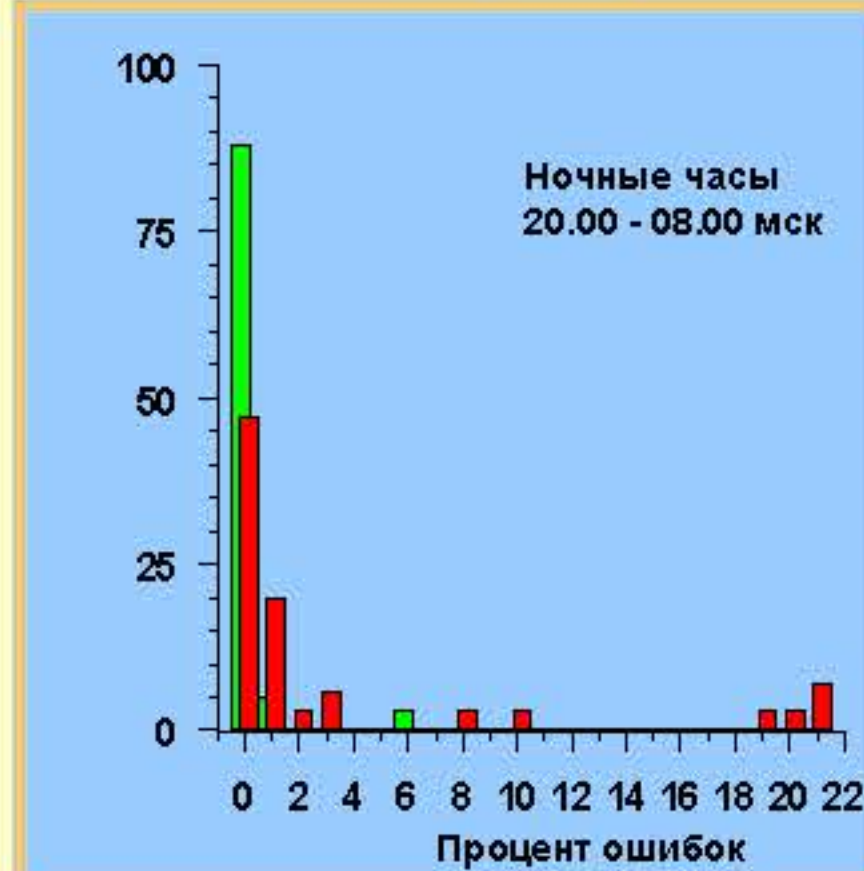
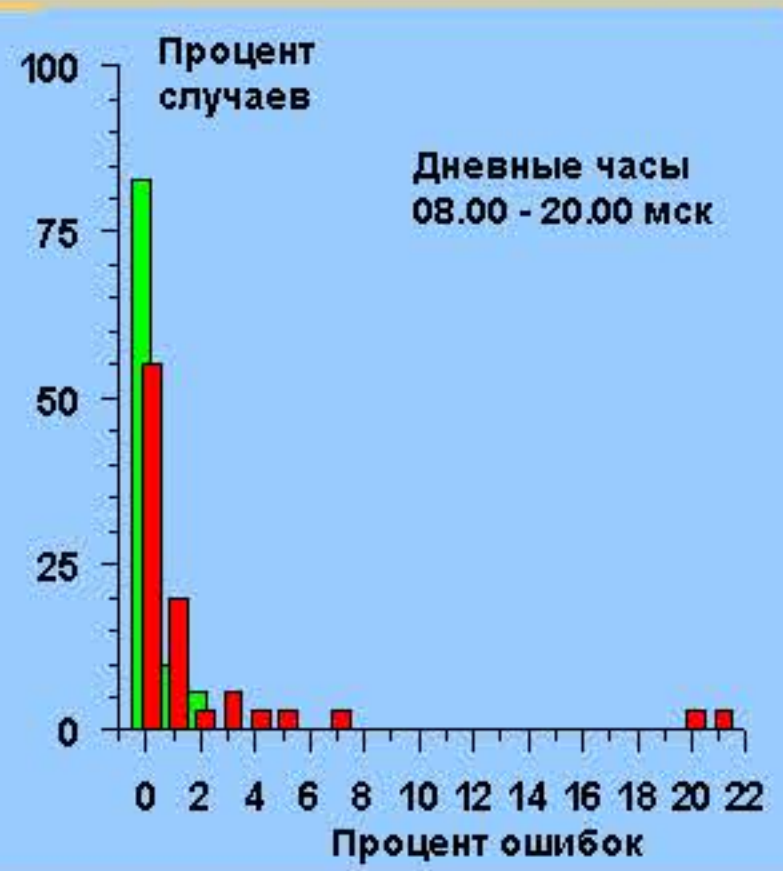
Российская сеть трасс наклонного зондирования ионосферы, покрывающая обширные стратегически важные регионы Северо-Востока, Дальнего Востока, Восточной Сибири и Европейской части России, создана совместно ФГНУ «НИРФИ», ИСЗФ СО РАН, ИКИР ДВО РАН, РГУ, МарГТУ, ИЗМИРАН и НПП «Полет» на базе отечественного ионозонда с непрерывным излучением линейно-частотно-модулированного (ЛЧМ) сигнала. Как показал многолетний опыт эксплуатации, российская сеть ЛЧМ ионозондов является эффективным инструментом для проведения исследований на различных этапах выполнения как фундаментальных, так и прикладных НИОКР: от стадии разработки и проверки отдельных узлов оборудования до полевых испытаний всей системы КВ радиосвязи в контролируемых ионосферных условиях.

### ЛЧМ ионозонд для наклонного зондирования ионосферы

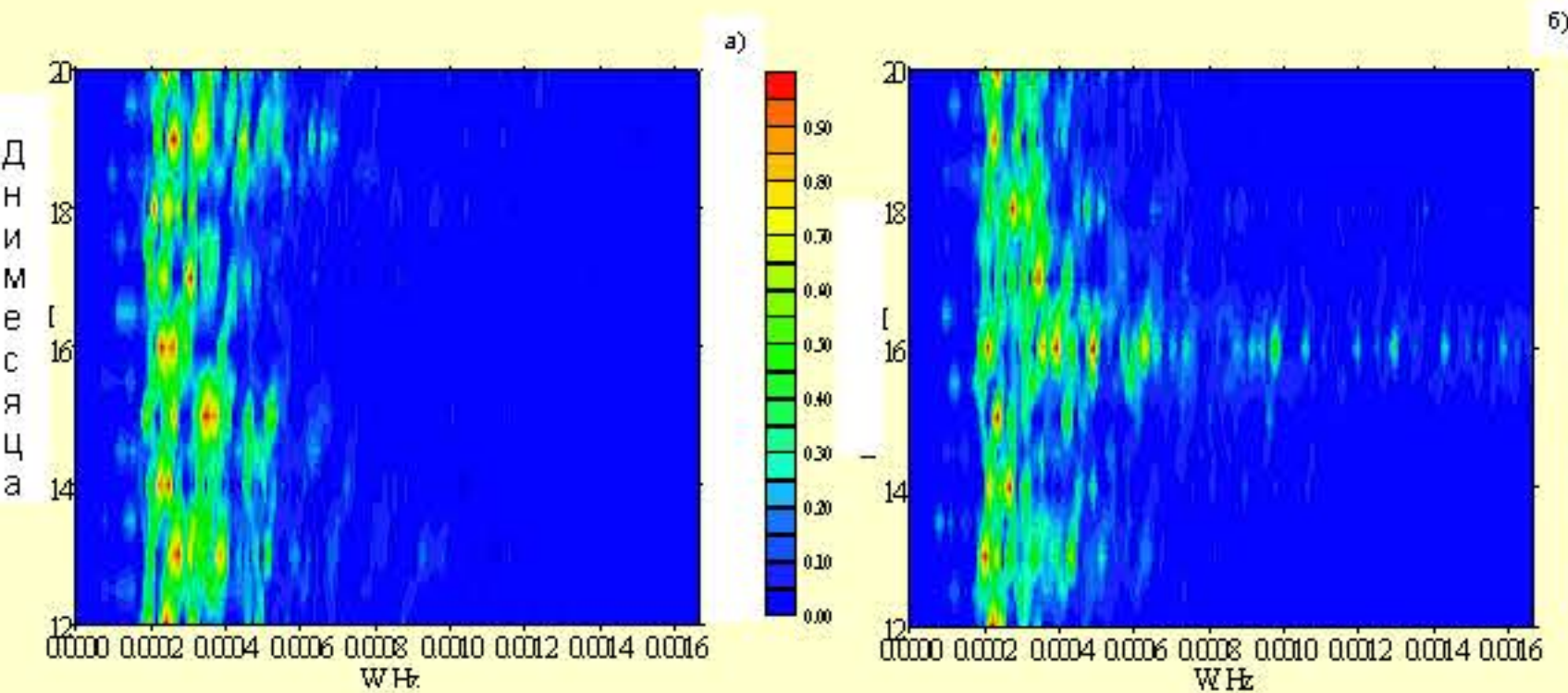
Диапазон частот: 3 – 30 МГц  
Скорость перестройки частоты: 100 – 1000 кГц/с  
Мощность излучения: 10 – 100 Вт  
Разрешение по групповой задержке: 15 мкс  
Автоматизированная обработка ионограмм, включая выбор оптимальных рабочих частот для систем связи



Практически реализован метод оперативного прогнозирования оптимальных рабочих частот (ОРЧ) на базе маломощного ЛЧМ ионозонда в составе частотно-адаптивной системы КВ радиосвязи. Показано, что на средненишотной трассе протяженностью 3000 км работа связанной радиолинии при мощности связанного сигнала 5 Вт на ОРЧ, назначаемых по оперативному прогнозу, обеспечивала надежность связи на уровне 97%, в то время как при выборе ОРЧ по долгосрочному прогнозу – около 68%.

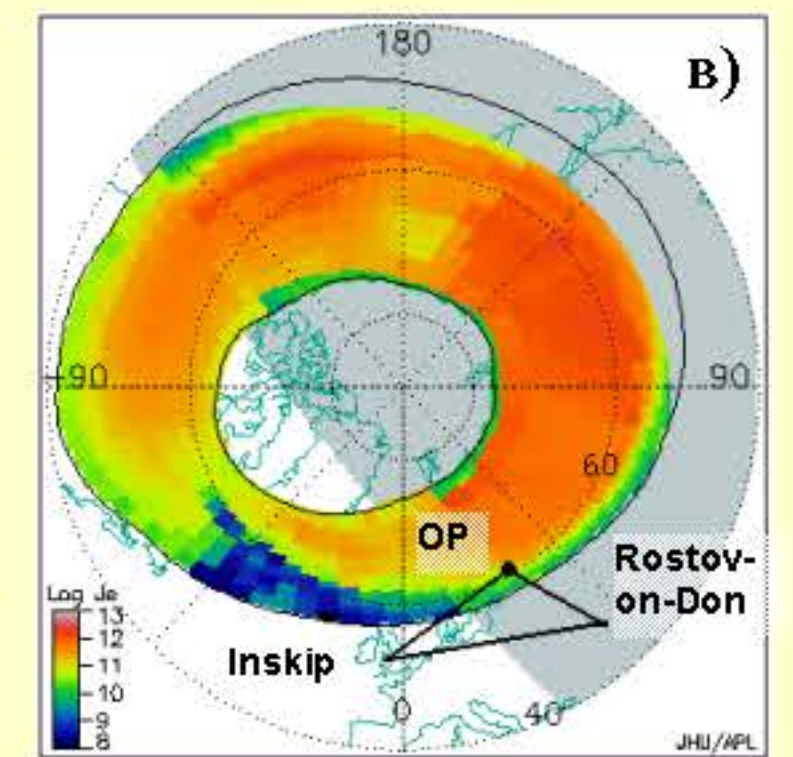
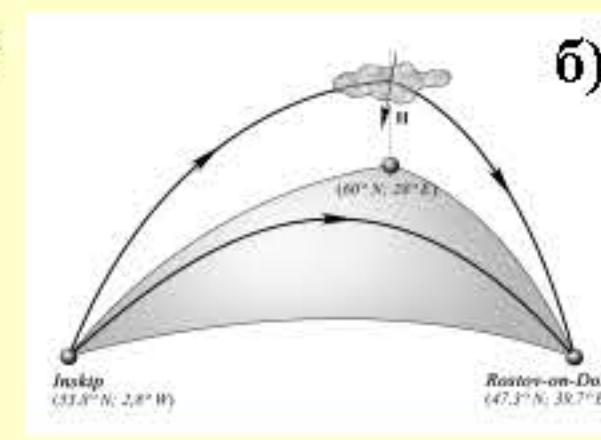
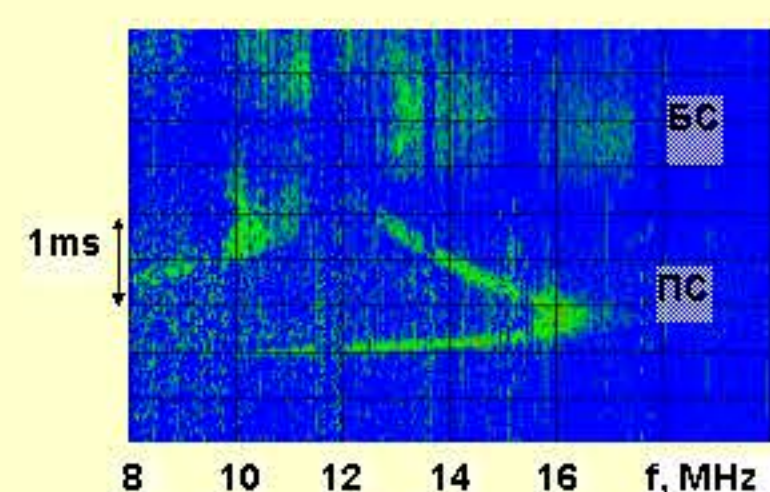


Радиолиния Алма-Ата - Москва. Октябрь 1990 г. Распределение ошибок информационных сообщений при работе системы КВ радиосвязи по оперативному (зеленый) и долгосрочному (красный) прогнозам оптимальных рабочих частот.



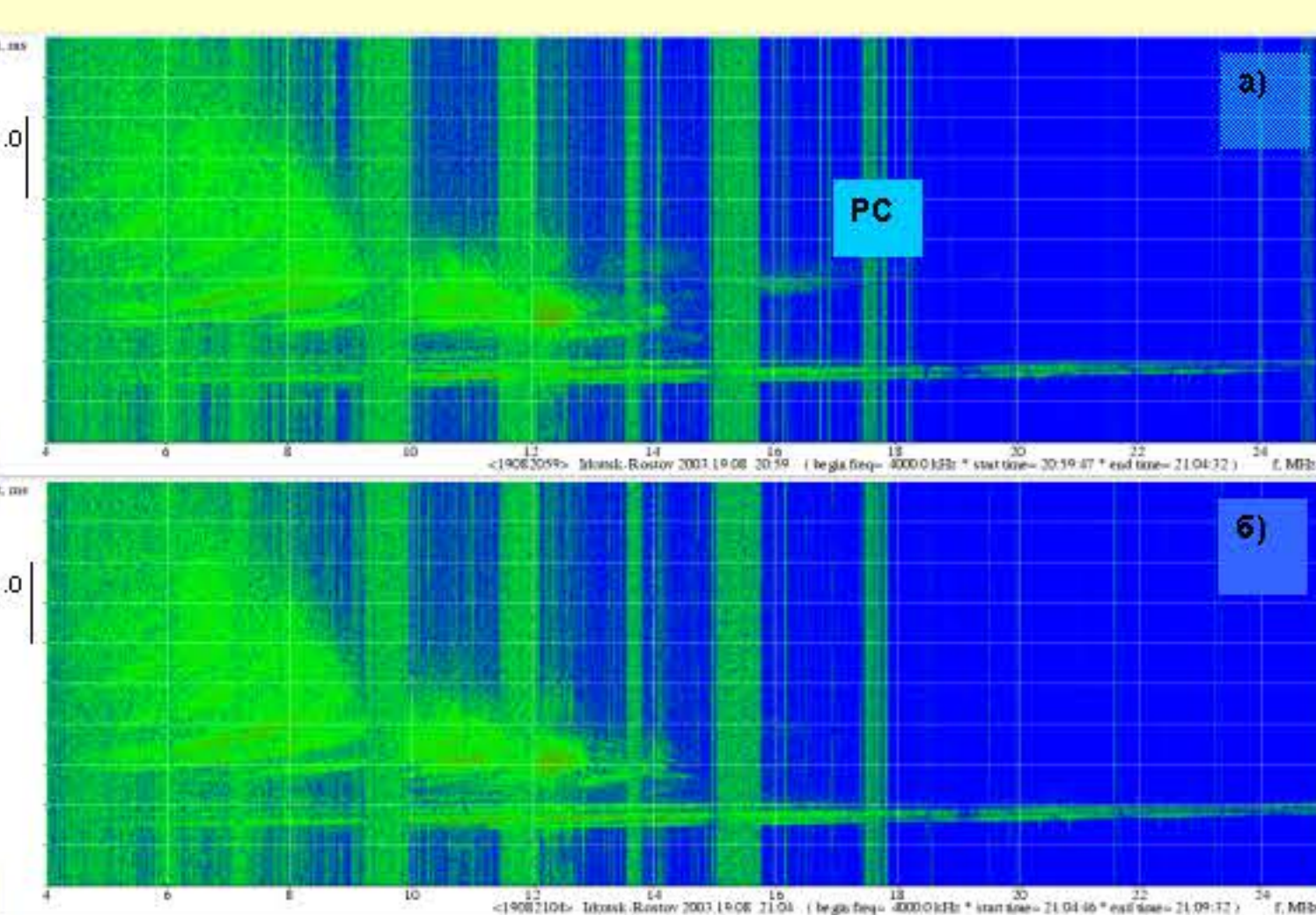
Спектральная плотность мощности временных вариаций максимальной наблюдаемой частоты на трассе Кипр – Ростов-на-Дону для ряда последовательных дней различных месяцев: а – январь 2005г., б – март 2005г.

На основе непрерывных многомесячных круглосуточных наблюдений вариаций максимальной наблюдаемой частоты (МНЧ) на средненишотных трассах различной протяженности и ориентации показано, что метод наклонного ЛЧМ зондирования с высоким разрешением по времени группового запаздывания и частоте позволяет уверенно детектировать волновые возмущения с периодом от 15 минут до нескольких часов. Данный метод может найти применение для идентификации и прогнозирования волновых возмущений различной природы как естественного, так и искусственного происхождения (прохождение терминатора, магнитные бури, землетрясения, извержения вулканов, ураганы, старты космических аппаратов, взрывы, мощное радиоизлучение и др.).



Экспериментально показано, что система трасс наклонного ЛЧМ зондирования, охватывающая обширный евроазиатский долготный сектор от Англии до Магадана, слабо оснащенный средствами диагностики, может служить эффективным средством для мониторинга ионосферных эффектов геомагнитных возмущений. При этом сеть ЛЧМ-ионозондов используется как бистатические КВ радары, чувствительные как к крупномасштабным структурам (главный ионосферный провал, авральный овал, перемещающиеся ионосферные возмущения, пэтчи с повышенной электронной концентрацией), так и к мелкомасштабным неоднородностям, которые сопровождают такие крупномасштабные образования.

Позиционирование мелкомасштабных неоднородностей аврального овала с помощью бистатического ЛЧМ КВ радара Инскип (Англия) – Ростов-на-Дону во время экстремально сильной магнитной бури 29 октября 2003г. 14:42 UT. а) – эксперимент, б) - лучевые траектории, в) - положение аврального овала по данным спутника DMSP. РС – прямой сигнал, БС - боковой (рассеянный) сигнал, ОР – положение области с неоднородностями, ответственными за рассеяние, определенное на основе сопоставления экспериментальных и расчетных данных.



Вывод радиоволн из канала за счет рассеяния на искусственных мелкомасштабных магнитно-ориентированных неоднородностях на трассе Иркутск – СУРА – Ростов-на-Дону. 19 августа 2003г. 21:00 мск а) – нагрев, б) – пауза. РС – рассеянный сигнал.

На радиолиниях Хабаровск – СУРА – Темрюк и Иркутск – СУРА – Ростов-на-Дону реализован механизм управления дальним распространением КВ путем вывода радиоволн из канала за счет ракурсного рассеяния на искусственных мелкомасштабных магнитно-ориентированных неоднородностях, возбуждаемых внутри волновода мощным наземным радиоизлучением. Это явление может быть использовано для организации КВ связи на частотах, превышающих МПЧ стандартного скачкового распространения (для повышения скрытности связи), а также для организации дальнего канала КВ связи во время геомагнитных возмущений, когда возрастает поглощение радиоволн в нижних слоях (D и E) ионосферы, вплоть до полного блэкаута сигналов. В то же время волноводные моды распространяются выше этих слоев и подвергаются существенно меньшему поглощению.

Для модернизации КВ радиооборудования планируется разработать и создать современную автоматизированную базовую передающую станцию (БПС) мониторинга ионосферных радиолиний, использующую широкополосные сигналы различной частотно-временной структуры, в том числе и ЛЧМ для пунктов Российской ионосферной информационно-измерительной сети. Модернизированная БПС будет удовлетворять следующим техническим и эксплуатационным требованиям:

1. Полная автоматическая работа БПС по заданной программе без вмешательства оператора.
2. Высокая надежность, позволяющая БПС непрерывно работать в течение нескольких лет.
3. Сохранение временных и частотных режимов работы в случаях непредвиденного отключения сетевого электропитания.
4. Возможность бланкирования заданных "запрещенных" частот или диапазонов частот.
5. Возможность одновременной передачи с зондирующим ЛЧМ сигналом повторяющегося информационного (командного) сигнала, что крайне важно в условиях сильных ионосферных возмущений, когда происходит быстрая перестройка ионосферы (единицы-десятки секунд) и системы связи не успевают адаптироваться к условиям распространения радиоволн в виду сильной нестационарности КВ канала.
6. Малые габариты, вес и электропотребление.



# ЛЧМ ИОНОЗОНД /РАДИОПЕЛЕНГАТОР – НОВЫЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ИОНОСФЕРЫ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН

## НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ УРОВЕНЬ

Совместно с Южным федеральным университетом создан новый, не имеющий в мире аналога, инструмент – ЛЧМ ионозонд-радиопеленгатор, позволяющий в реальном времени одновременно измерять полный набор ключевых характеристик ионосферного радиоканала: дистанционно-частотные (ДЧХ), амплитудно-частотные (АЧХ) и угловые частотные (УЧХ) характеристики. В состав ионозонда-радиопеленгатора входят два радиоприемника с общим перестраиваемым ЛЧМ генератором. Антенная решетка состоит из 16 вертикальных 9-ти метровых штыревых антенн, размещенных на площадке  $100 \times 100 \text{ м}^2$ . На основе определения амплитудно-фазового распределения поля радиоволн на апертуре антенной решетки делается оценка углов прихода различных лучей путем синтеза диаграммы направленности.

## ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ:

- Диапазон частот 2 – 30 МГц
- Скорость перестройки частоты 50 – 500 кГц/с
- Разрешение по групповой задержке 15 мкс
- Инструментальная погрешность измерения азимута  $\approx 0,2^\circ$
- Инструментальная погрешность измерения угла места  $\approx 1^\circ$
- Автоматизированная обработка ионограмм, включая выбор оптимальных рабочих частот для систем КВ радиосвязи и расчет надежности связи

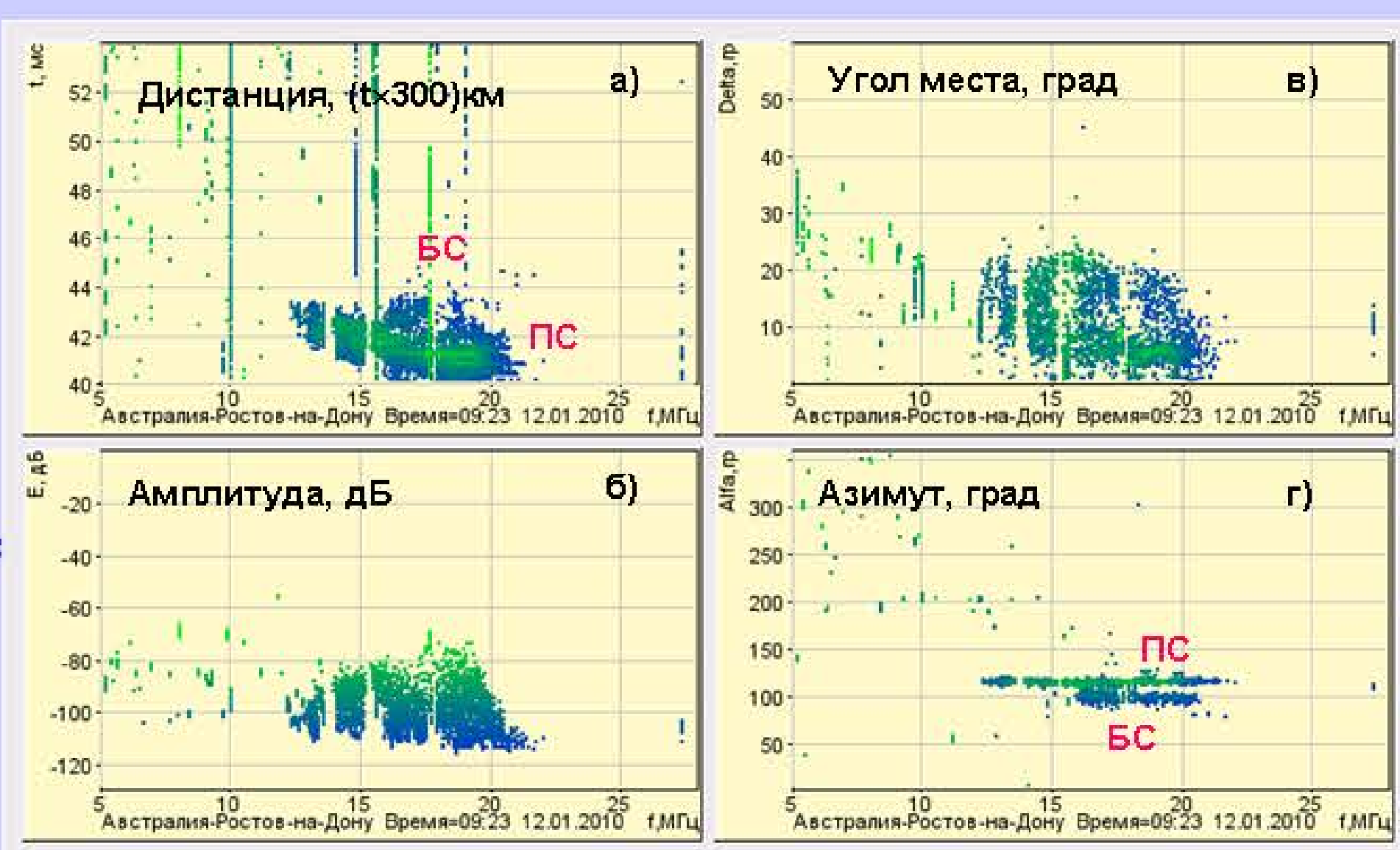


Рис.1. ДЧХ (а), АЧХ (б) и УЧХ ((в) - угол места  $\Delta$ , (г) - азимут  $\alpha$ ) радиосигналов на трассе ЛЧМ зондирования Лейвертон (Австралия) – Ростов-на-Дону. 12.01.2010г., 09:23 мск. ПС – прямой сигнал, БС – боковой сигнал

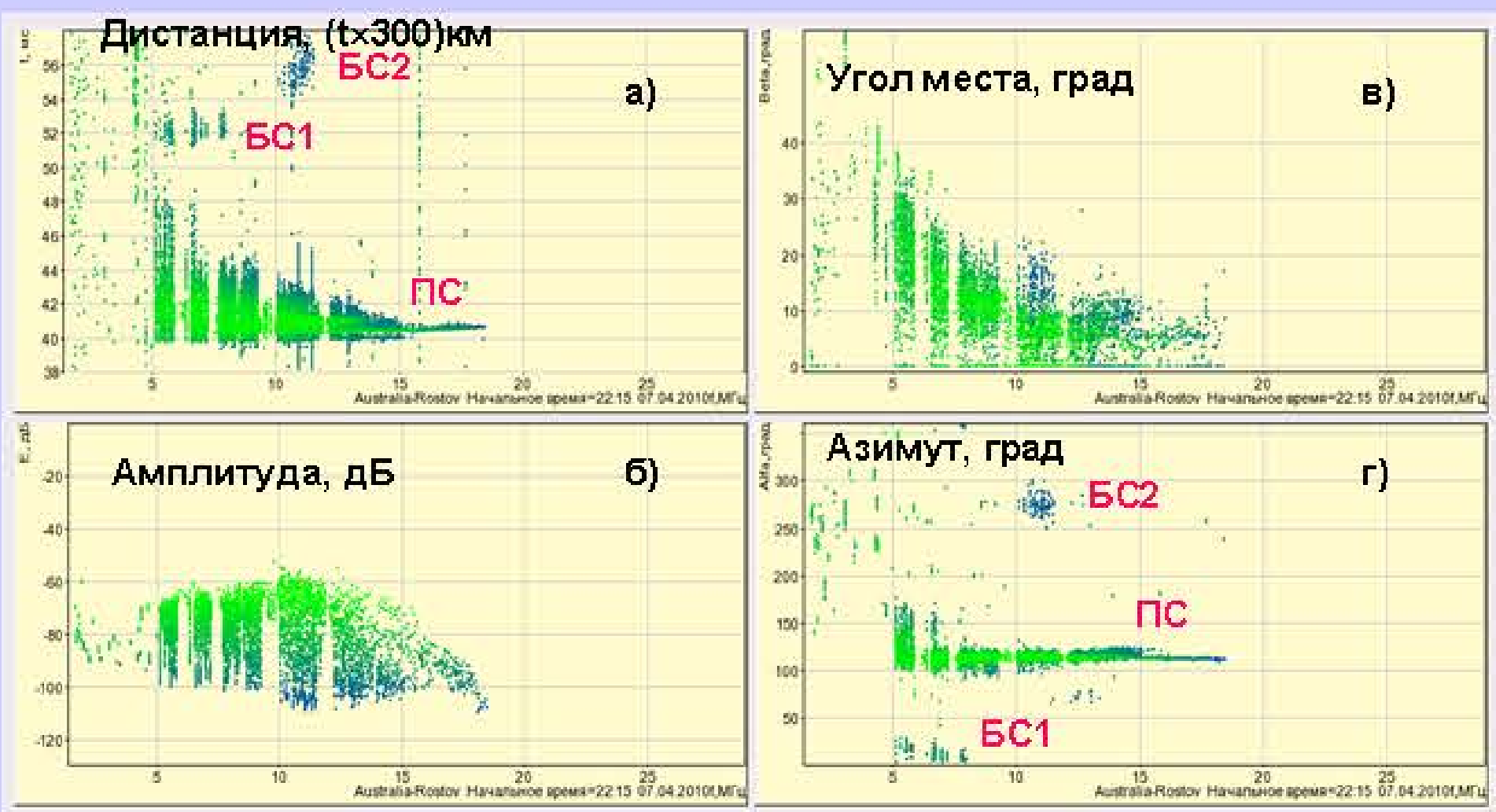


Рис.3. ДЧХ (а), АЧХ (б) и УЧХ ((в) - угол места  $\Delta$ , (г) - азимут  $\alpha$ ) радиосигналов на трассе ЛЧМ зондирования Лейвертон – Ростов-на-Дону для сеанса 22:15 мск 07.04.2010г. ПС – прямой сигнал, БС1 – рассеяние от неоднородностей аврорального овала, БС2 – рассеяние от Альп

На основе экспериментальных данных и моделирования распространения радиоволн установлено, что аномальные сигналы с задержкой  $\sim 2-3$  мс (относительно прямого сигнала), наблюдавшиеся с азимутами  $100^\circ$  и  $145-150^\circ$ , связаны с боковым рассеянием радиоволн от горного массива Гималаи и Иранского нагорья соответственно (рис.1,2). Аномальные (боковые) сигналы на частотах  $\sim 10-11,5$  МГц с задержкой 14-16 мс и азимутом угла прихода  $270^\circ$  (рис.3, боковой сигнал БС2) обусловлены рассеянием радиоволн от Альп. Аномальные сигналы на частотах  $\sim 5-7$  МГц с задержкой  $\sim 12-13$  мс и азимутом угла прихода  $\alpha \approx 15-20^\circ$  (рис.3, боковой сигнал БС1) обусловлены рассеянием рикошетирующих и волноводных мод от неоднородностей высокоширотной ионосферы северного полушария.

## РАДАРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ИСКУССТВЕННОЙ ИОНОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Зондирование искусственной ионосферной турбулентности с помощью ЛЧМ ионозонда – радиопеленгатора проводится с 2008г. на трассе ИЗМИРАН – СУРА – Ростов-на-Дону. Во время работы нагревного стенда СУРА на ионограммах наклонного ЛЧМ зондирования наблюдаются рассеянные сигналы в виде треков, задержанных относительно прямого сигнала. Примеры ионограмм с рассеянным сигналом показаны на рис.5 и 6. В вечернее время часто наблюдается расщепление рассеянного сигнала на несколько треков (до 2-4) с задержками между соседними треками  $\sim 0,1-0,2$  мс. На основе экспериментальных данных и расчета лучевых траекторий в трехмерно-неоднородной магнитоактивной ионосфере проведено позиционирование искусственных мелкомасштабных магнитно-ориентированных неоднородностей, ответственных за ракурсное рассеяние радиоволн. Обнаружена кластерная структура искусственной ионосферной турбулентности. Показано, что смещение отдельных кластеров от основной области рассеяния составляет  $\sim 10-40$  км, причем меньшие смещения наблюдаются в дневной ионосфере, большие – в вечерней.

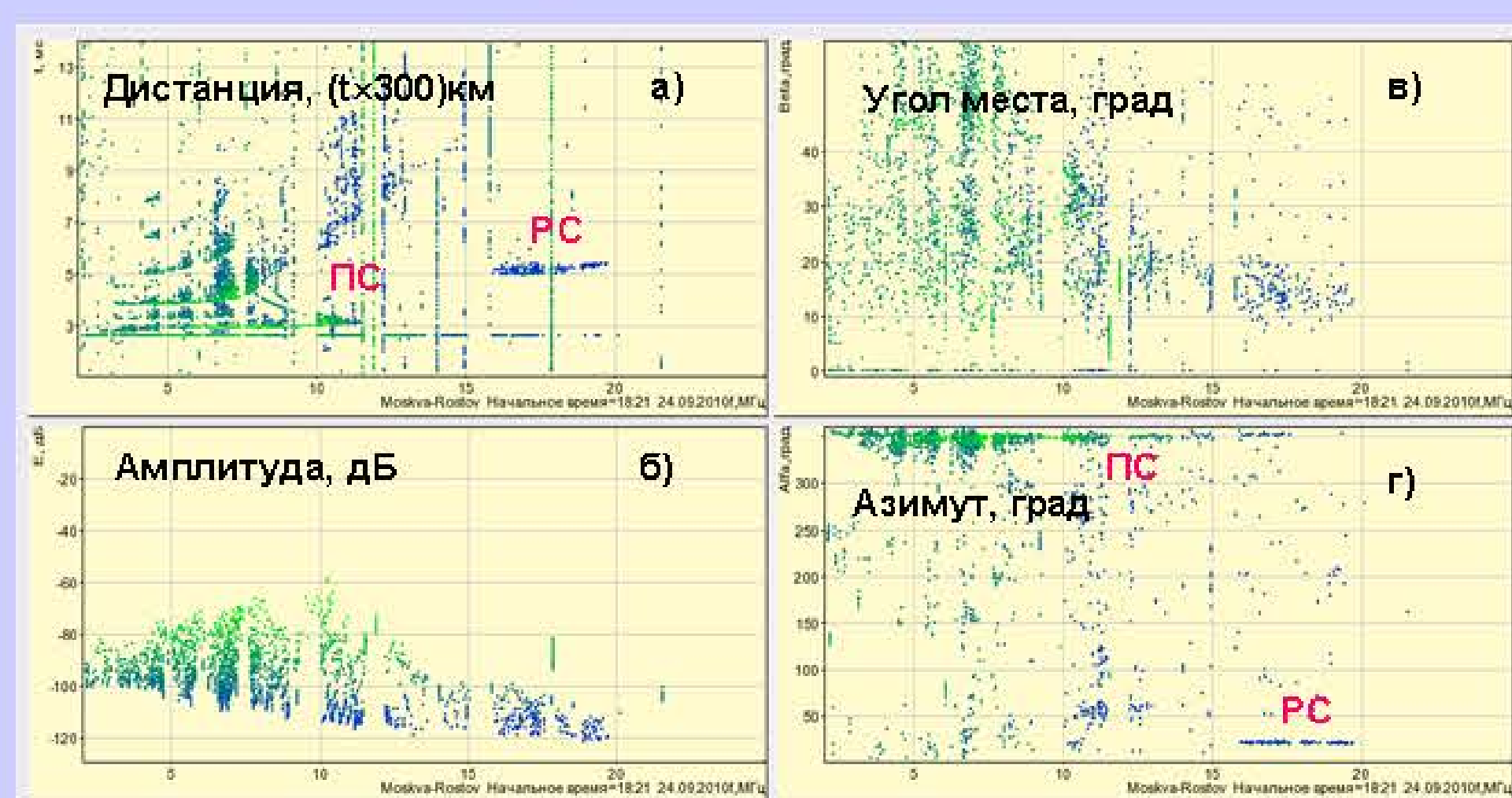


Рис.5. ДЧХ (а), АЧХ (б) и УЧХ ((в) - угол места  $\Delta$ , (г) - азимут  $\alpha$ ) прямого и рассеянного сигналов на трассе ЛЧМ зондирования ИЗМИРАН – СУРА – Ростов-на-Дону для сеанса 18:21 мск 24.09.2010г. ПС – прямой сигнал, РС – рассеянный сигнал

## ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ:

1. Исследование особенностей дальнего распространения коротких радиоволн на трассах различной ориентации
2. Радарные измерения естественной и искусственной ионосферной турбулентности
3. Использование в системах радиопеленгации, радионавигации, радиосвязи и радиолокации для сопровождения и обеспечения надежной работы радиоэлектронных систем путем их адаптации к условиям распространения радиоволн по результатам зондирования ионосферного канала с помощью ЛЧМ ионозонда – радиопеленгатора

## ТРАНСЭКВАТОРИАЛЬНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ИОНОСФЕРНОГО КАНАЛА

Исследование сверхдальнего распространения коротких радиоволн на трансэкваториальной трассе Лейвертон (Австралия) – Ростов-на-Дону протяженностью 11790 км проводилось с помощью ЛЧМ ионозонда-радиопеленгатора в 2009 – 2010гг. Азимут из приемного пункта на передатчик составляет угол  $\alpha = 115^\circ$  (прямая трасса). При проведении исследований обнаружены аномальные сигналы и определены механизмы их распространения. Примеры прямых и аномальных (боковых) сигналов на данной трассе приведены на рис.1-3, а на рис.4 показаны пути распространения сигналов.

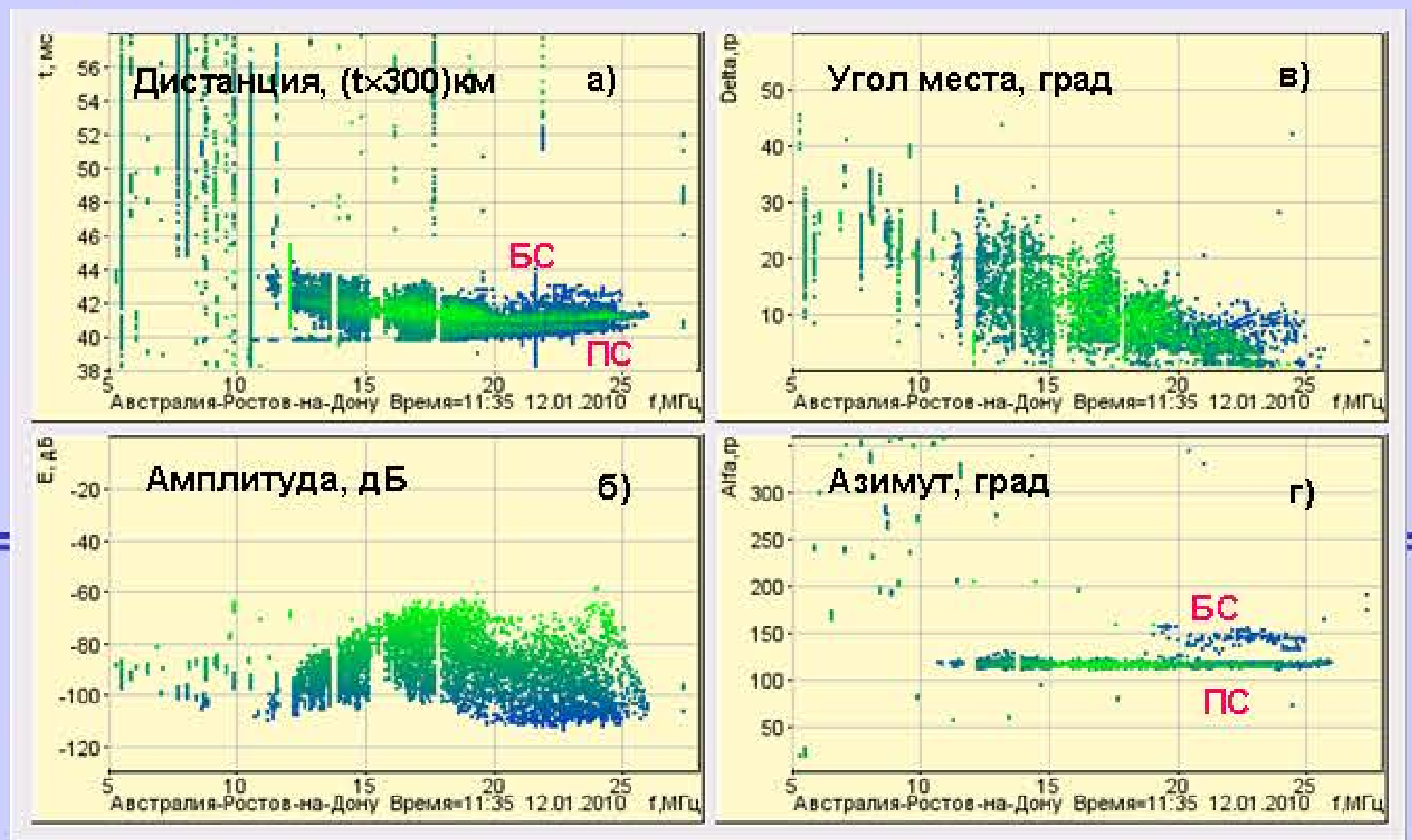


Рис.2. ДЧХ (а), АЧХ (б) и УЧХ ((в) - угол места  $\Delta$ , (г) - азимут  $\alpha$ ) радиосигналов на трассе ЛЧМ зондирования Лейвертон – Ростов-на-Дону. 12.01.2010г., 11:35 мск. ПС – прямой сигнал, БС – боковой сигнал

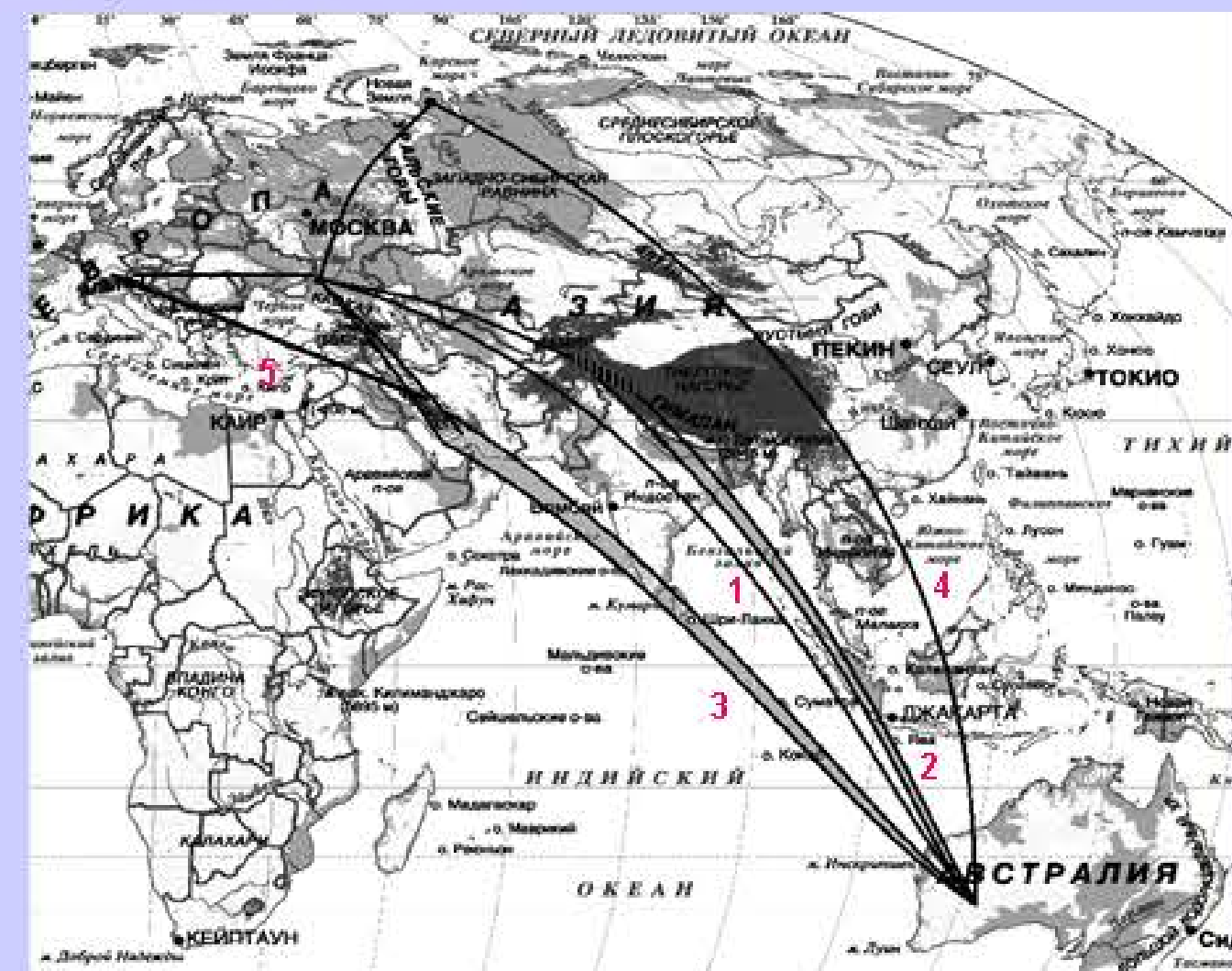


Рис.4. Схема эксперимента и пути распространения сигналов: 1 – прямой сигнал, 2 и 3 – боковые сигналы с отражением от горного массива Гималаи и Иранского нагорья соответственно; 4 – аномальный сигнал с большой задержкой с рассеянием радиоволн от неоднородностей высокоширотной ионосферы северного полушария; 5 – боковой сигнал с отражением от Альп

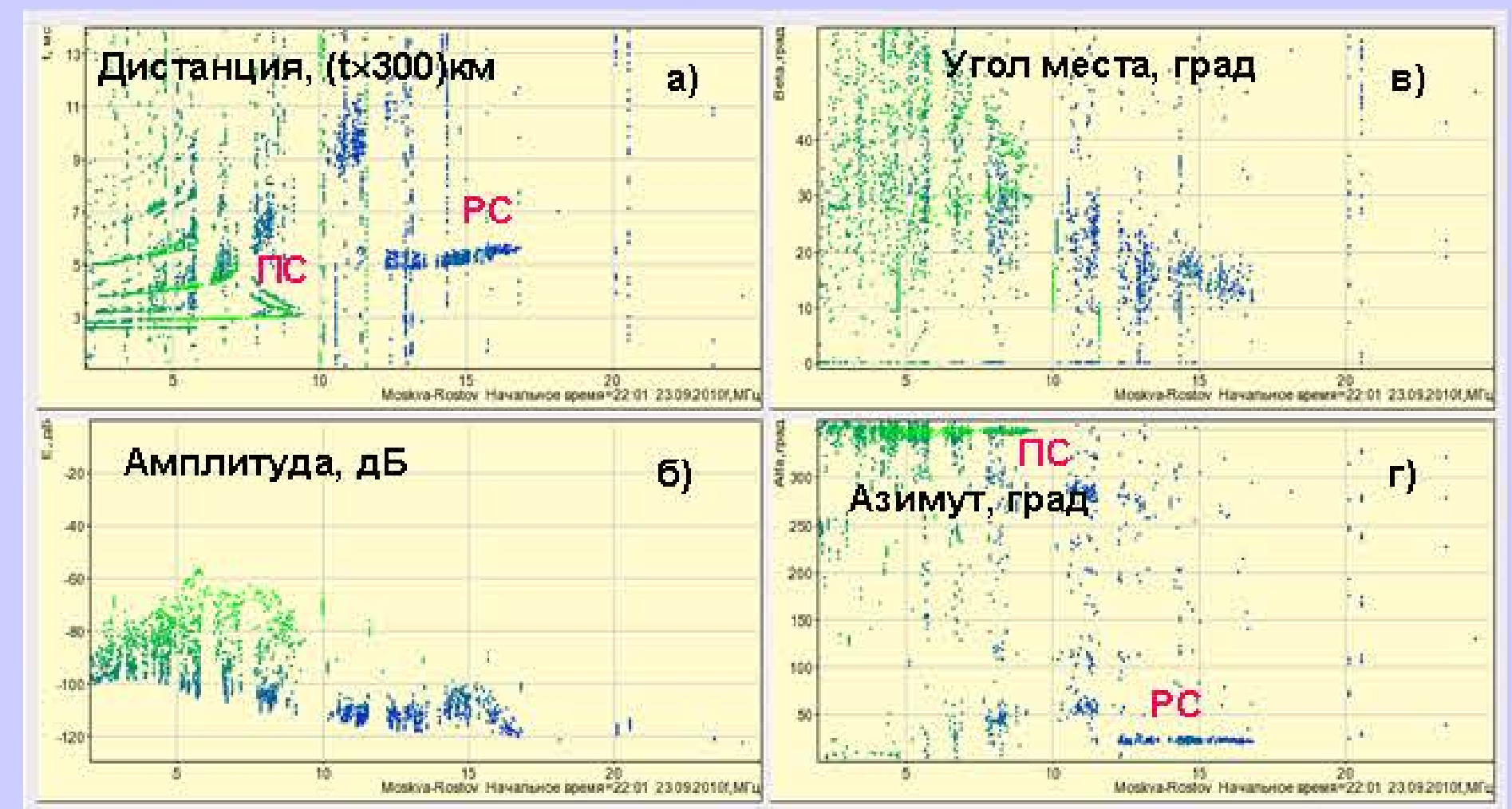


Рис.6. ДЧХ (а), АЧХ (б) и УЧХ ((в) - угол места  $\Delta$ , (г) - азимут  $\alpha$ ) прямого и рассеянного сигналов на трассе ЛЧМ зондирования ИЗМИРАН – СУРА – Ростов-на-Дону для сеанса 22:01 мск 23.09.2010г. ПС – прямой сигнал, РС – рассеянный сигнал

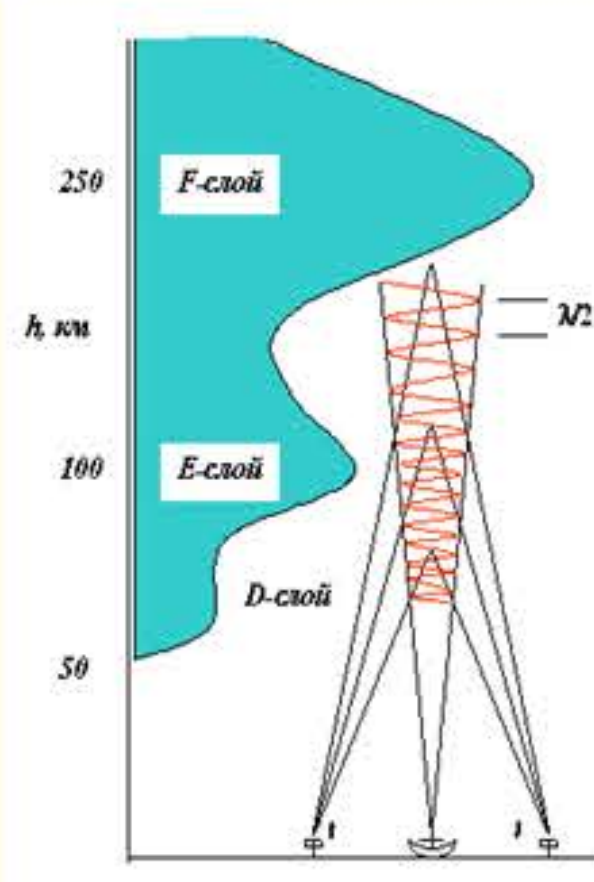


# ИСКУССТВЕННЫЕ ПЕРИОДИЧЕСКИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ – ПЕРСПЕКТИВНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ В ИССЛЕДОВАНИИ ИОНОСФЕРЫ



## ОБНАРУЖЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ

Впервые искусственные периодические неоднородности (ИПН) были обнаружены в 1975 году в экспериментах по модификации ионосферы мощным высокочастотным радиоизлучением. Эти исследования были начаты по инициативе Г.Г. Гетманцева и проводились с помощью нагревного стенда ЯСТРЕБ в загородной лаборатории НИРФИ «Зименки». В настоящее время они проводятся на базе стенда СУРА.



ИПН формируются в поле мощной стоячей волны, образующейся в результате интерференции падающей на ионосферу и отраженной от нее волн. В поле стоячей волны возникает периодическая структура с неоднородностями электронной концентрации с пространственным периодом, равным половине длины мощной радиоволны. ИПН лоцируют радаром, осуществляя прием амплитуды и фазы обратно рассеянного сигнала. Резонансное рассеяние происходит при условии Брэгга. В случае обратного рассеяния оно приводит к равенству длин нагревной и пробной радиоволн.

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ И РЕЛАКСАЦИИ ИПН

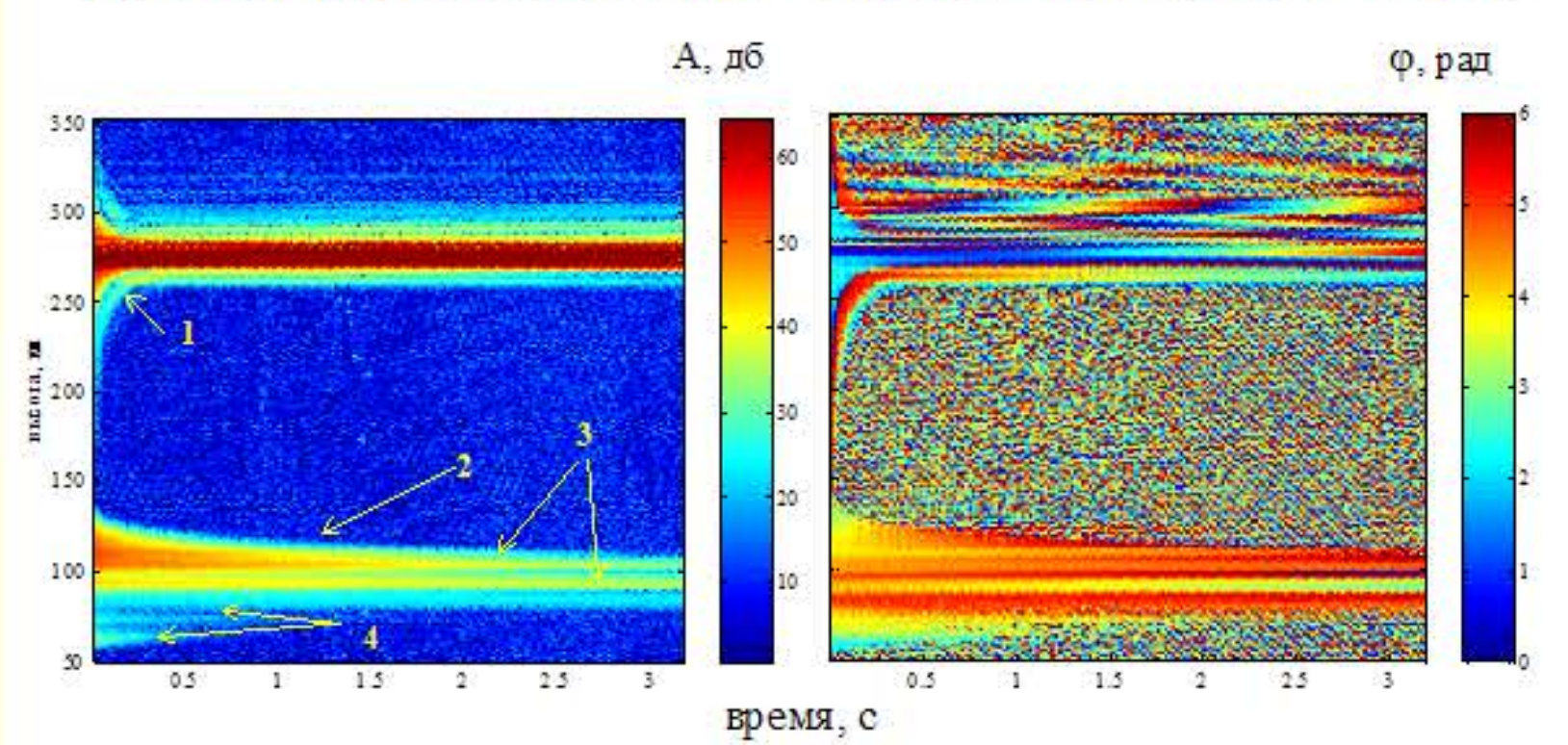
- F-область** – действие пондеромоторной стрикционной силы с возбуждением ионного звука.
- E-область** – диффузионное перераспределение плазмы.
- D-область** – температурная зависимость коэффициента прилипания электронов к молекулам атомарного кислорода.

Теоретический анализ процессов формирования и релаксации ИПН позволил разработать методы определения большого числа параметров ионосферы и нейтральной атмосферы на основе измерения высотно-временной зависимости амплитуды и фазы сигнала, рассеянного ИПН.

### ИОНОСФЕРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ, ИЗУЧАЕМЫЕ МЕТОДОМ РЕЗОНАНСНОГО РАССЕЯНИЯ РАДИОВОЛН НА ИПН

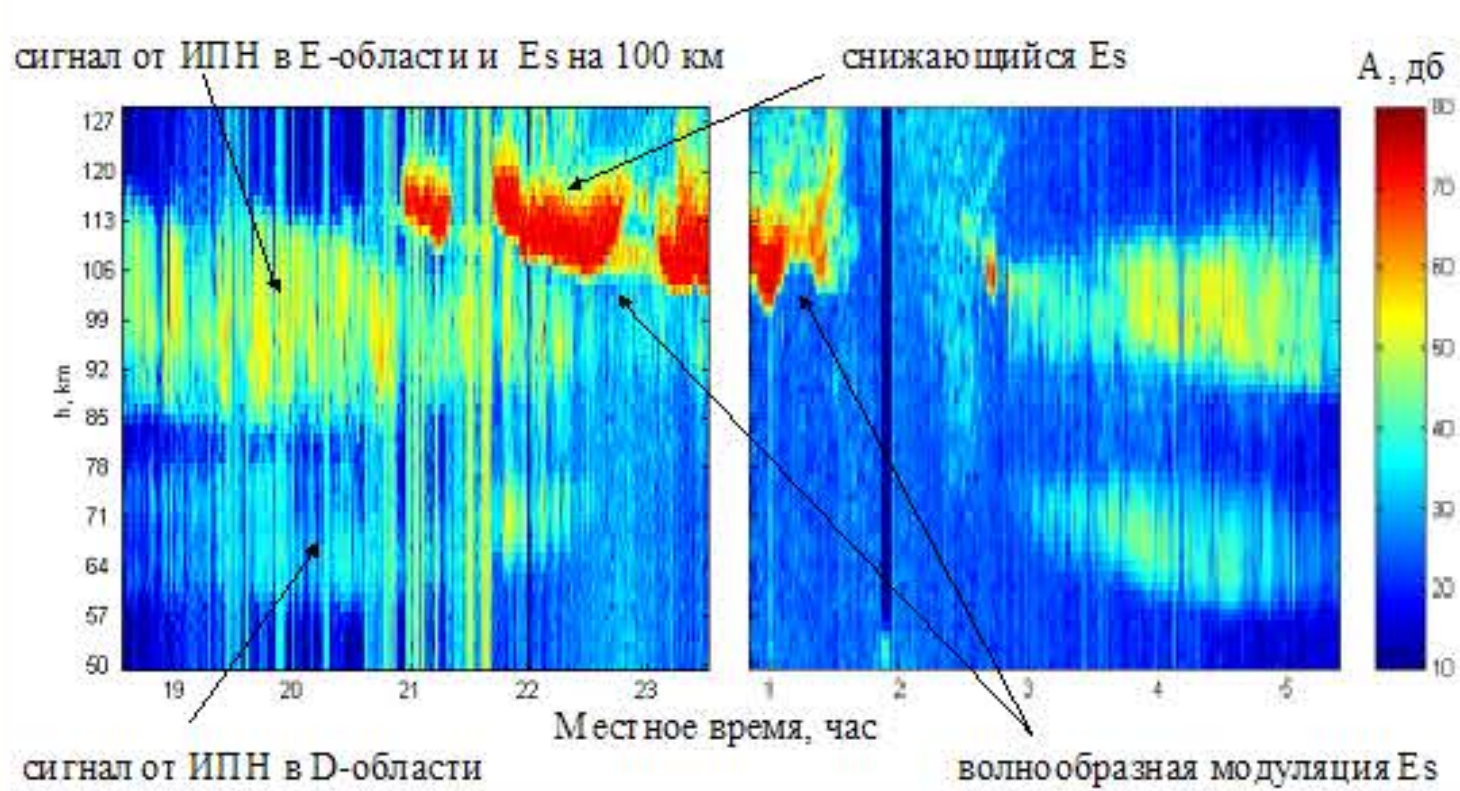
- Внутренние гравитационных волны.
- Неоднородная структура нижней ионосферы, в том числе расслоение регулярного E-слоя и атмосферная турбулентность.
- Спорадический слой E.
- Расслоение профиля электронной концентрации с нижней части D-области до высоты максимума F-слоя.
- Восходные и заходные явления в области D.

Пример высотно - временной зависимости амплитуды и фазы сигнала, рассеянного ИПН, 7 апреля 2004 г., Васильевск



1 - сигнал от ИПН в F-области, ионный звук 2 - сигнал от ИПН в E-области  
3 - рассеянный сигнал от «двойного» E<sub>s</sub> 4 - сигналы от ИПН в D-области

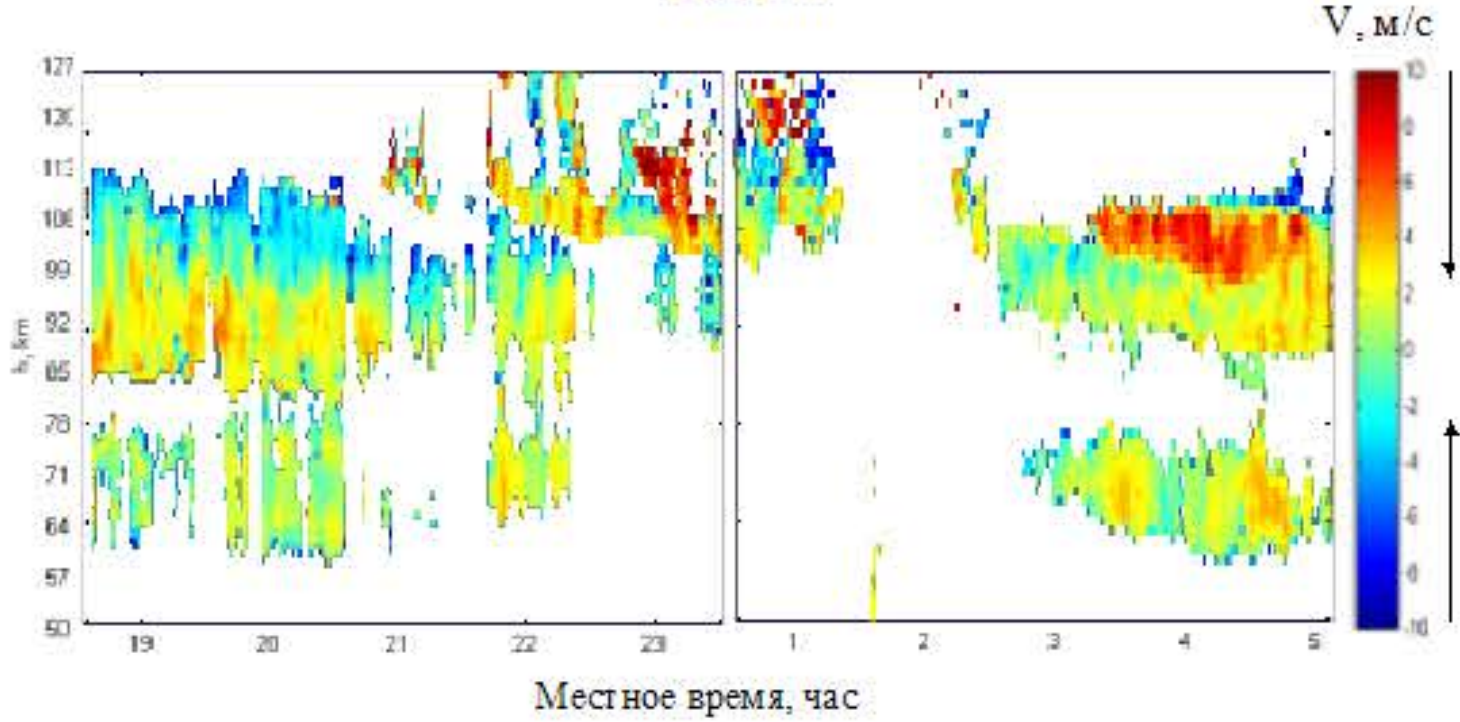
Высотно-временная зависимость амплитуды рассеянного сигнала в заходно-восходные часы 15-16 июня 2001 г.



## ХАРАКТЕРИСТИКИ ИОНОСФЕРЫ И НЕЙТРАЛЬНОЙ АТМОСФЕРЫ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫЕ МЕТОДОМ ИПН

- Высотное распределение электронной концентрации, включая межслоевую E-F впадину (долину).
- Температура и плотность атмосферы на высотах E-области.
- Скорости вертикальных движений в D- и E-областях
- Турбулентные скорости и высота турбопаузы.
- Относительная концентрация отрицательных ионов кислорода, концентрации атомного кислорода и возбужденного молекулярного кислорода в состоянии  $1\Delta_g$  в D-области.
- Ионный состав спорадического слоя E.
- Электронная и ионная температуры в F-области.

Высотно-временная зависимость скорости вертикального движения плазмы в заходно-восходные часы 15-16 июня 2001 г.



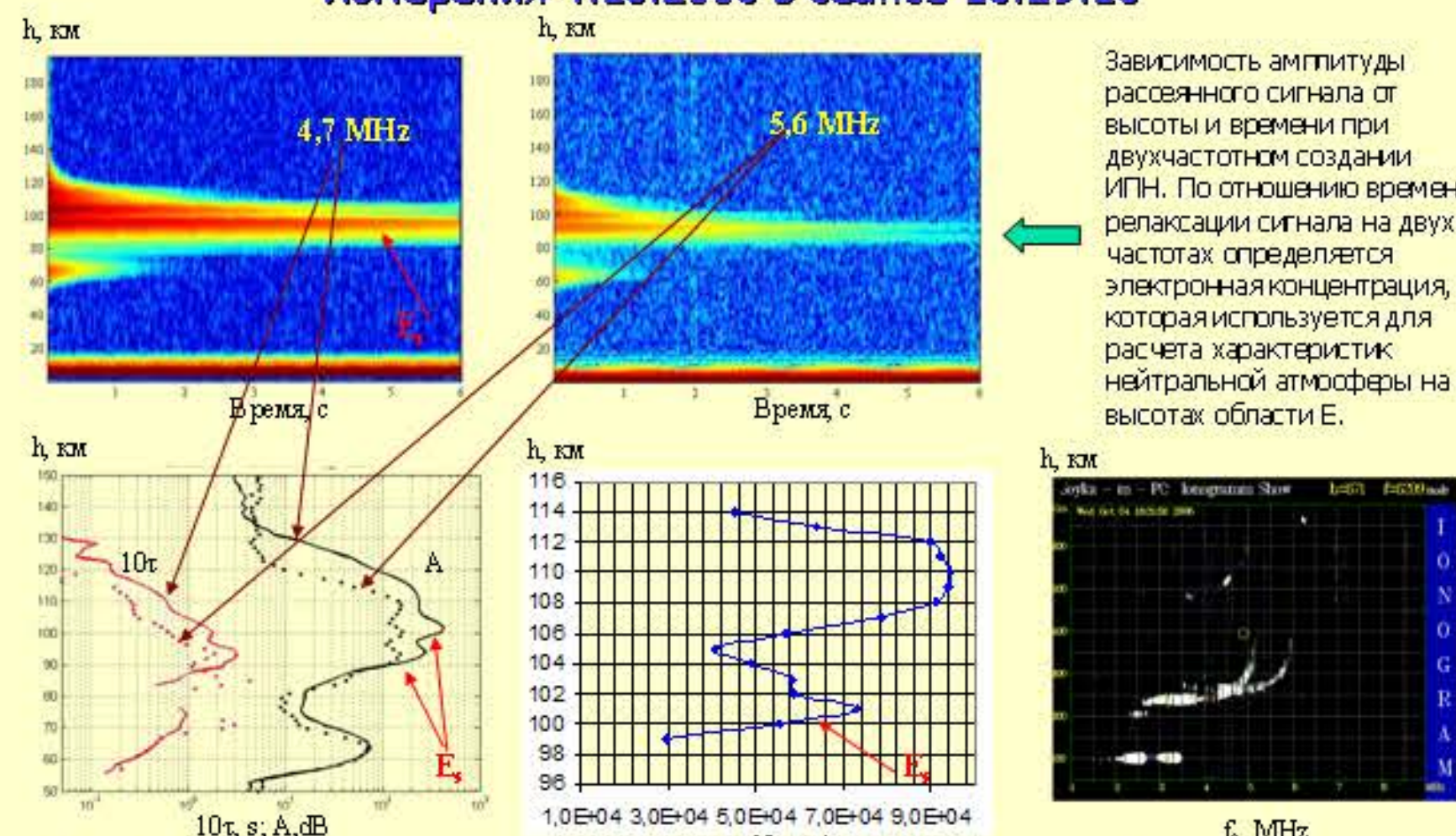
### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ИОНОСФЕРЫ МЕТОДОМ РЕЗОНАНСНОГО РАССЕЯНИЯ РАДИОВОЛН НА ИПН

- Изучены основные характеристики межслоевой E-F впадины (долины), установлено, что ее нижняя граница нестабильна.
- Изучены сезонно-суточные вариации скорости вертикального движения ионосферной плазмы в D- и E-областях ионосферы.
- Предложен метод определения концентрации металлических ионов в спорадическом слое E.
- Исследованы восходно-заходные явления в D-области.
- Обнаружена асимметрия высотных зависимостей амплитуды и времени релаксации обратно рассеянных сигналов - запаздывание роста амплитуды сигнала на восходе Солнца на высоте ниже 70-75 км.
- Обнаружена двухслойная стратификация D-области ионосферы.

## РАЗВИТИЕ МЕТОДА ИПН

В последние годы разработана методика и создана оригинальная аппаратура для исследования ионосферы методом создания ИПН практически одновременно на двух частотах. Такой подход позволяет измерять электронную концентрацию в E-области ионосферы. В 2006 -2007 гг. на базе стенда СУРА В.В. Беликовичем проведены первые эксперименты. Применение двухчастотного метода создания ИПН позволит проводить одновременное измерение большого числа ионосферных параметров с повышенной точностью. Метод исследования ионосферы на базе создания ИПН хорошо сочетается с методом частичных отражений, основанном на рассеянии радиоволн на естественных неоднородностях ионосферной плазмы в D-области ионосферы. Комбинация этих методов позволит осуществлять мониторинг нижней ионосферы в области высот 60-130 км.

Двухчастотный метод создания ИПН. Измерения 4.10.2006 в сеансе 16:29:10

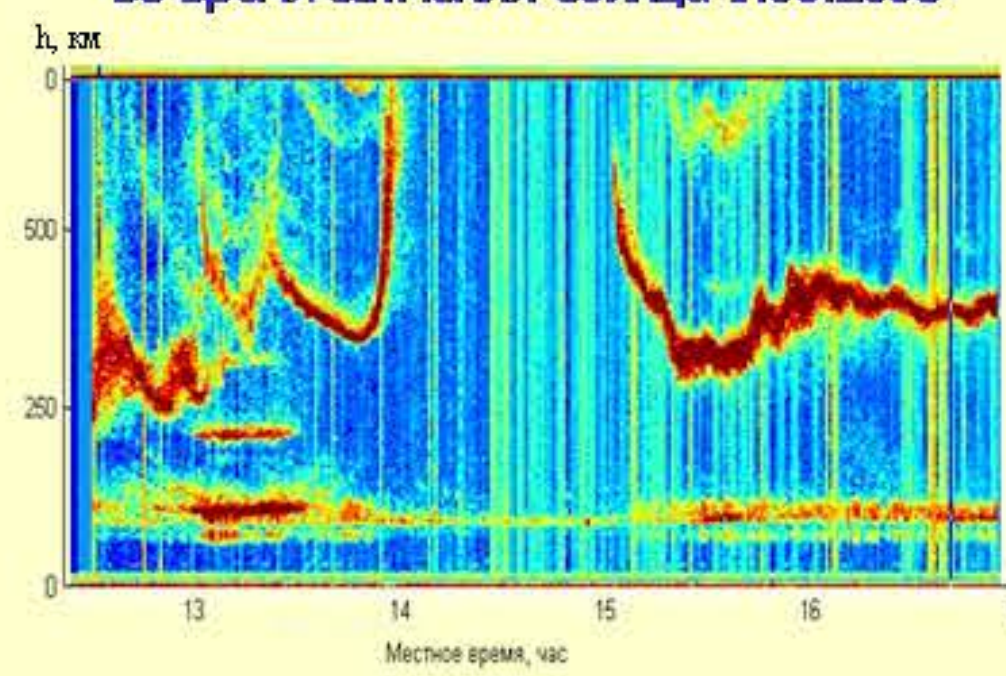


Высотные профили амплитуды и времени релаксации сигнала, рассеянного ИПН, на двух частотах.

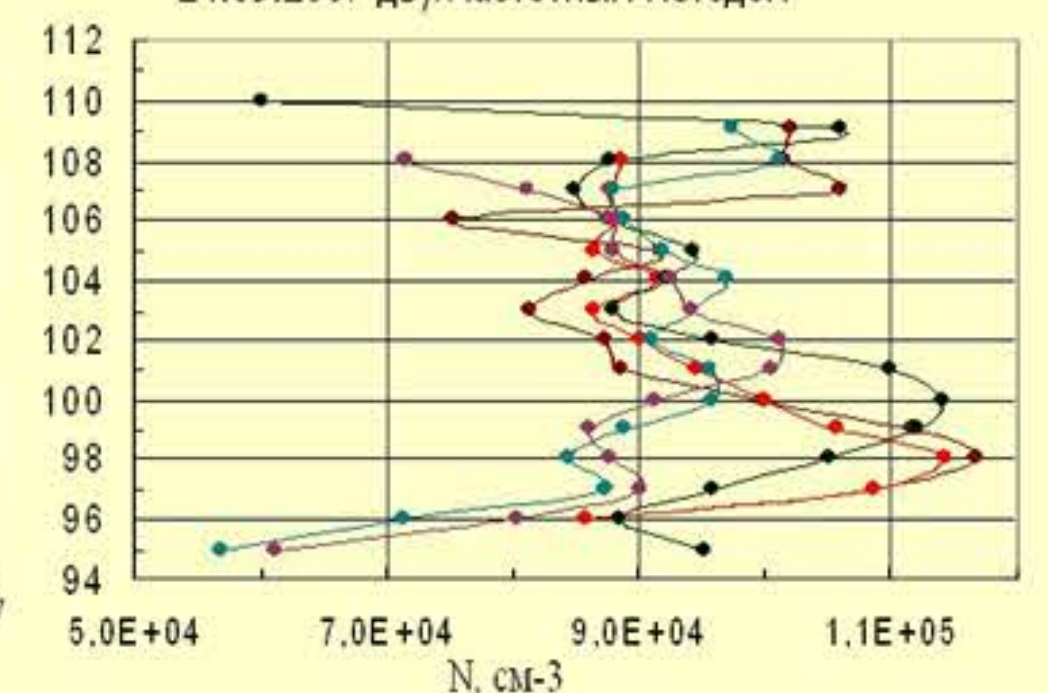
Профиль электронной концентрации со спорадическим слоем E.

Ионограмма вертикального зондирования.

Сигналы, рассеянные на ИПН, во время затмения Солнца 1.08.2008



Профили электронной концентрации, полученные 24.09.2007 двухчастотным методом

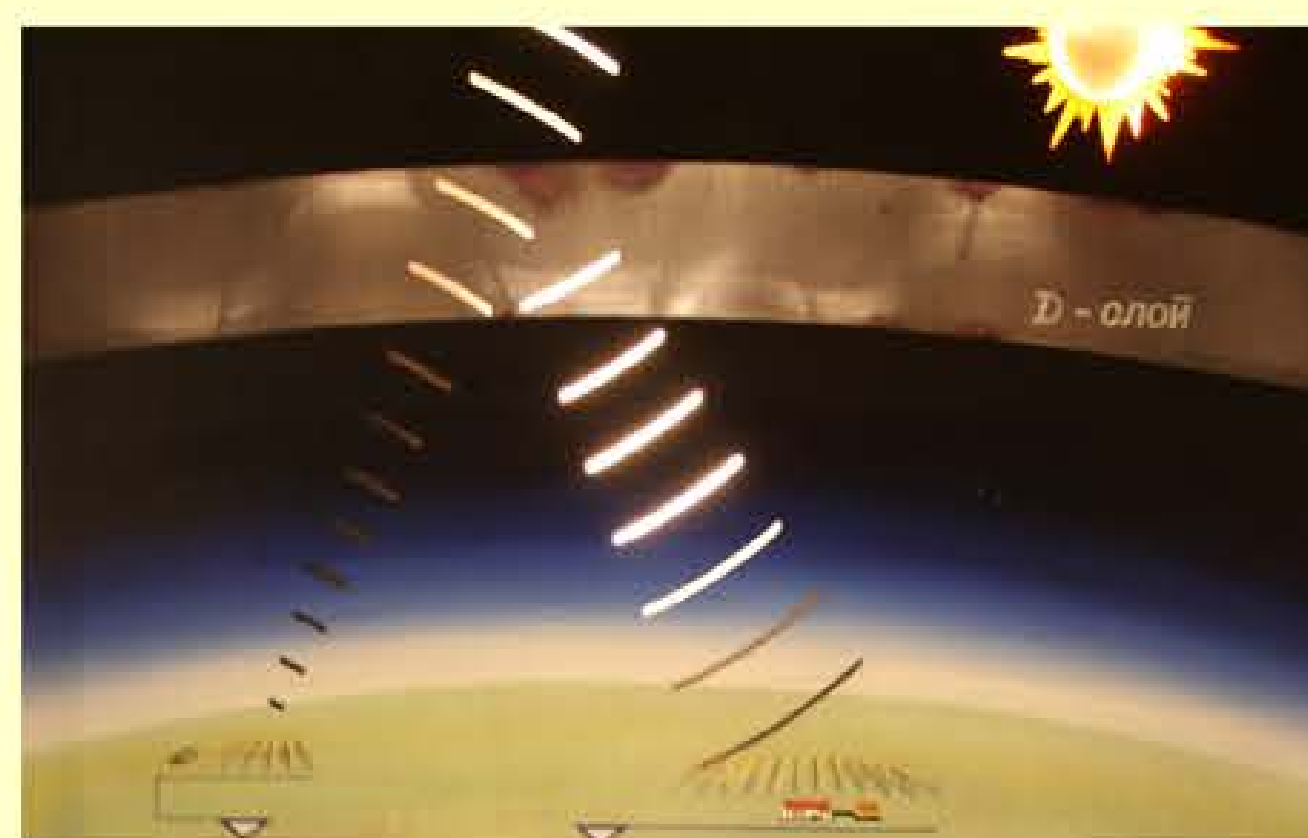


Приоритет НИРФИ в исследованиях ионосферы методом ИПН признан мировой наукой. Метод применялся на нагревных стендах в Аресибо (Пуэрто-Рико), EISCAT (Тромсе, Норвегия), HAARP (Аляска, США). Результаты исследований ИПН отражены в монографии В.В. Беликовича, Е.А. Бенедиктова, А.В. Толмачевой и Н.В. Бахметьевой, дополненный перевод которой на английский язык вышел в Германии в издательстве Cornecticus. По результатам исследований опубликовано более 60 статей, получено пять авторских свидетельств.

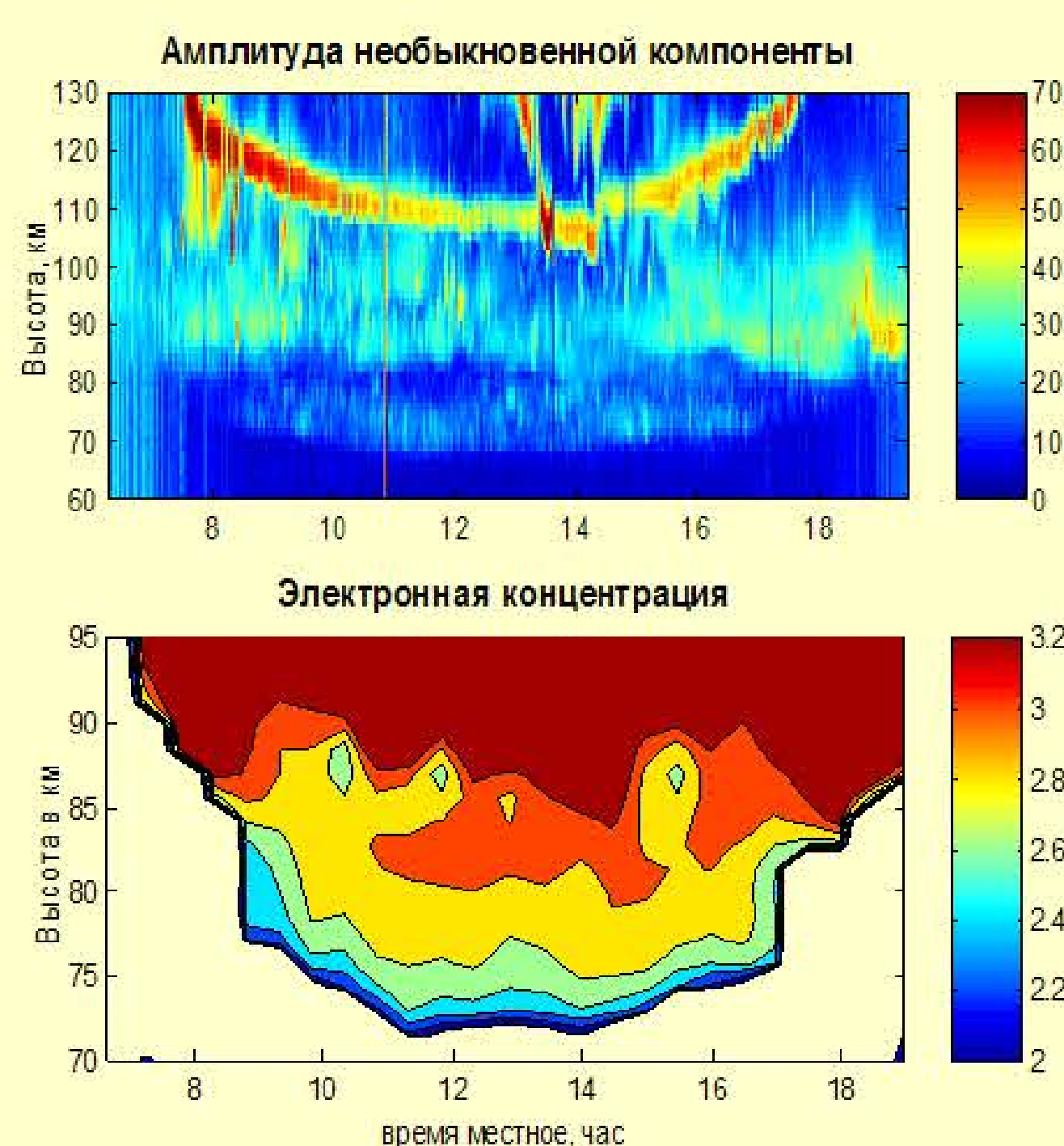
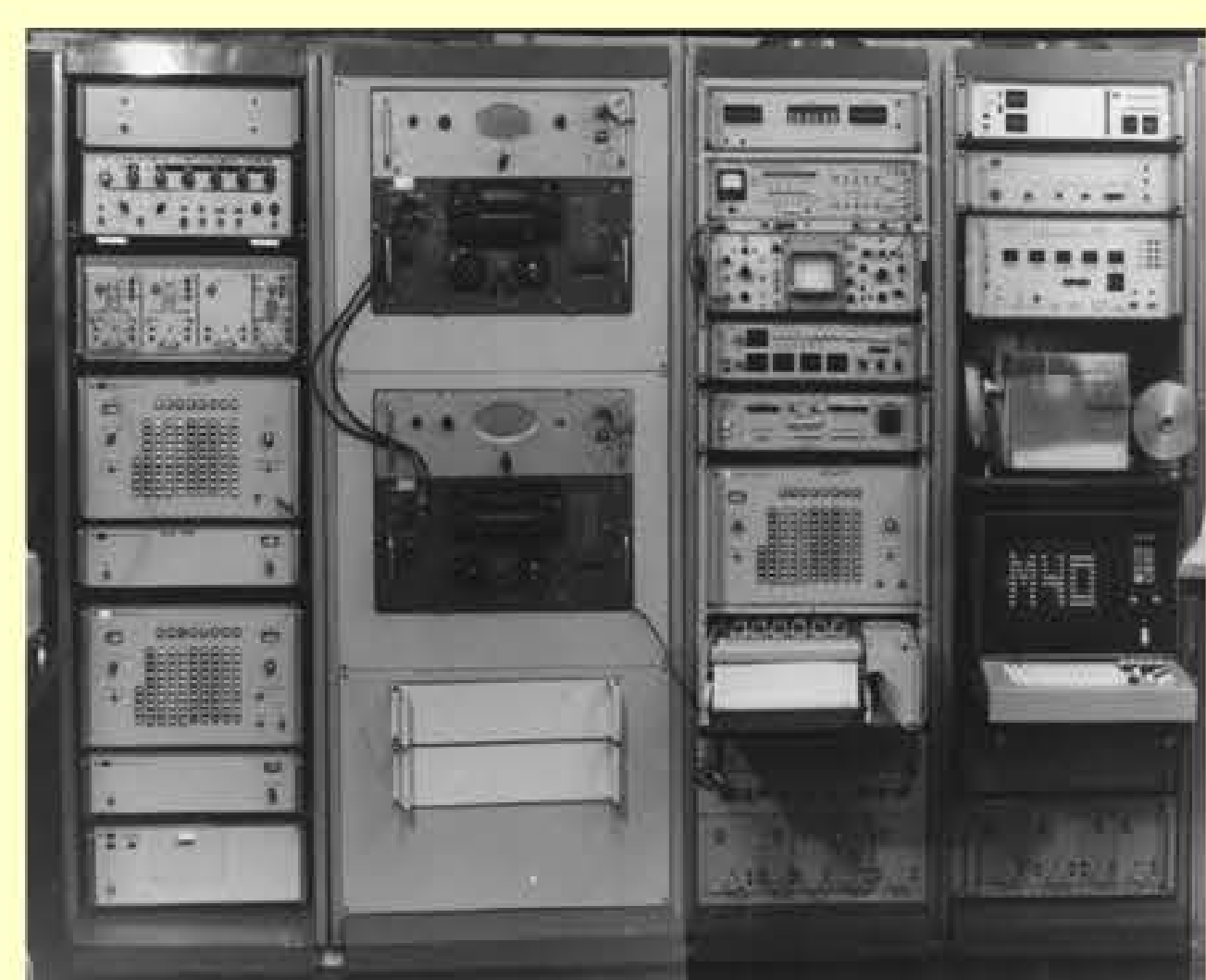


# ИССЛЕДОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ МЕТОДОМ ЧАСТИЧНЫХ ОТРАЖЕНИЙ

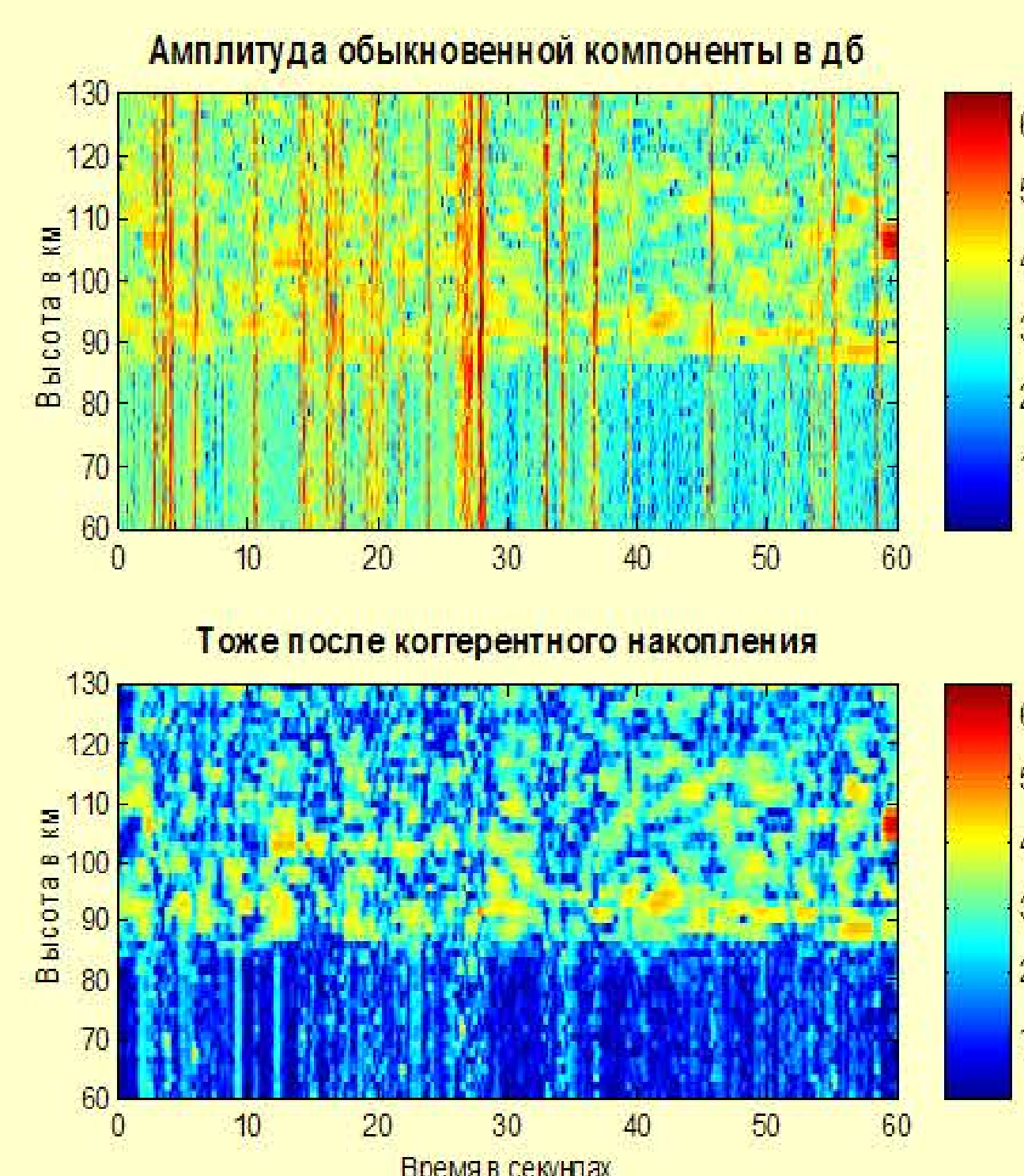
Метод частичных отражений – это радиолокационный метод исследования нижней ионосферы (высоты 50-90 км). Он основан на рассеянии радиоволн на естественных неоднородностях ионосферной плазмы. По характеристикам этих сигналов можно получить высотный профиль электронной концентрации, скорости движений и параметры неоднородностей. Наибольшее распространение получила методика дифференциального поглощения, в которой электронная концентрация находится по отношению амплитуд обыкновенной и необыкновенной компонент рассеянных сигналов. Во второй половине 60-х годов метод частичных отражений начал осваиваться в НИРФИ. К концу 1969 года на территории загородной лаборатории Зименки был создан первый вариант оборудования, способный регистрировать рассеянные сигналы на частоте 5,75 МГц. Первые эксперименты на установке показали возможность измерения профилей электронной концентрации в период вспышек на Солнце, а также необходимость применения более низкой частоты для уверенных измерений в спокойных условиях.



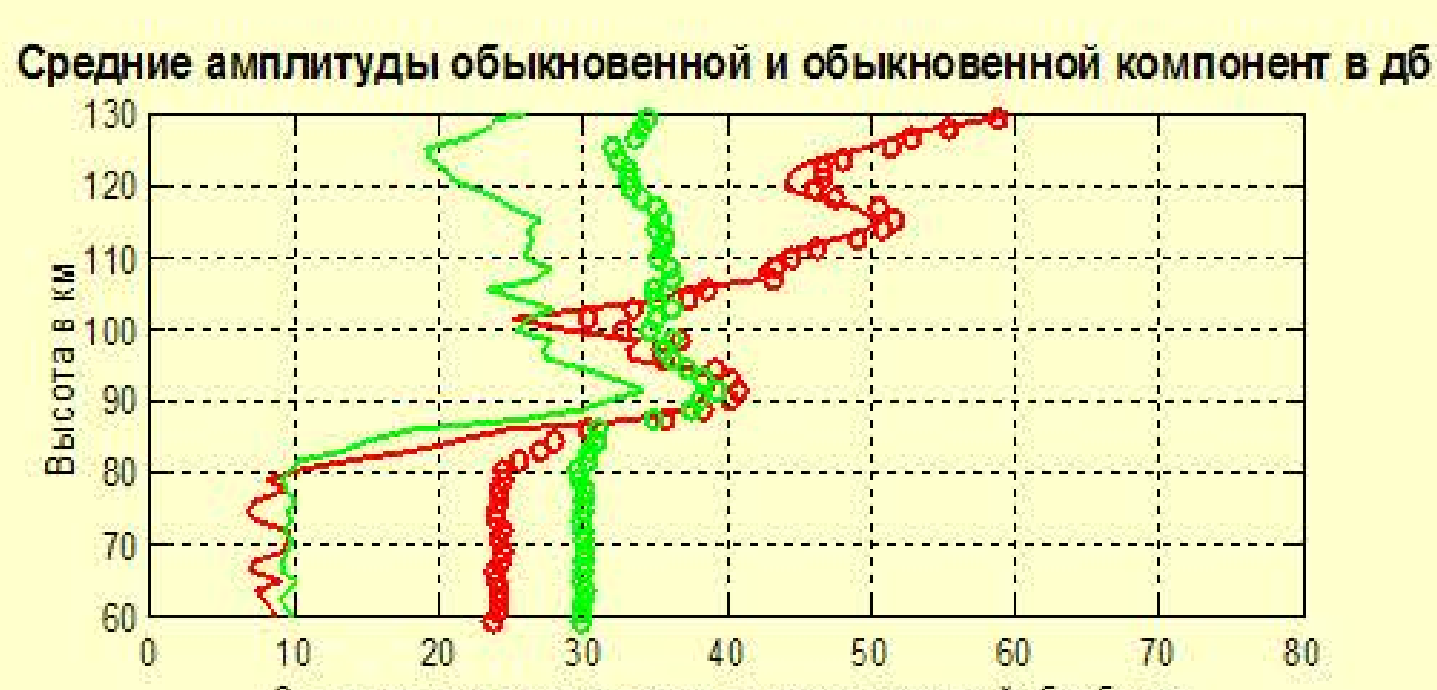
В 70-е годы был создан измерительный комплекс, работающий на частотах 5,75 и 3 МГц. Он состоял из двух импульсных передатчиков, приемно-регистрирующей аппаратуры и двух приемно-передающих антенн. Одновременно совершенствовалась теория обратного рассеяния радиоволн применительно к методу частичных отражений и разрабатывались методики определения ионосферных параметров.



Большой объем исследований методом частичных отражений был проведен в 80-е годы. Получено более 2000 профилей в различных гелио-геофизических условиях. Исследована зимняя аномалия области D, проведены исследования на авроральных широтах в п. Туманный Мурманской области и на крайнем юге вблизи г. Душанбе. На базе этих исследований **разработана эмпирическая модель высотного профиля электронной концентрации в среднеширотной D-области ионосферы, определены высотные профили электронной концентрации и коэффициента потерь электронов в периоды Солнечных вспышек.**



Новый этап в развитии экспериментальных исследований ионосферы методом частичных отражений на качественно новом уровне начался в 1996 г. Компьютерное оборудование позволило вести регистрацию сигналов в 12-разрядном двоичном коде и шагом по высоте около одного километра. Современные компьютерные технологии обработки принятых сигналов позволили использовать метод когерентного накопления сигнала, который снижает уровень помех на 15-20 дБ.



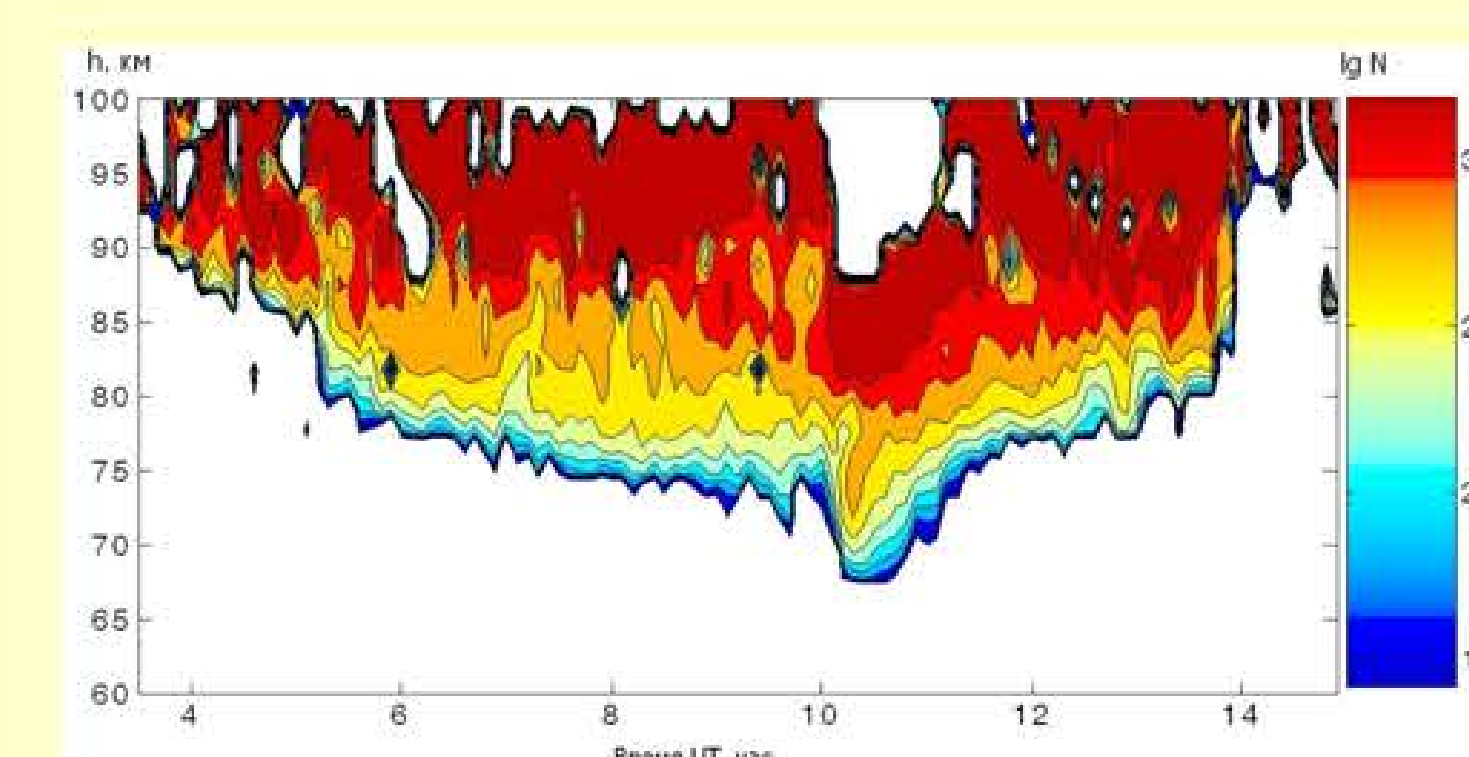
Высотно-временное поведение амплитуды рассеянных сигналов и электронной концентрации 4 апреля 2004 года. Высотные профили электронной концентрации и амплитуды рассеянных сигналов с усреднением на 30 мин.

Когерентная обработка сигналов частичных отражений позволяет снизить уровень шумов и помех на 15-20 децибел, и тем самым значительно повысить точность измерений электронной концентрации.

## Ионосферный эффект солнечной вспышки



Рентгеновское излучение солнечных вспышек с интенсивностью излучения более  $3 \cdot 10^{-6}$  и  $3 \cdot 10^{-7}$  Вт/м<sup>2</sup> в диапазонах 1-8 Å и 0.5-3 Å создает заметную ионизацию на высотах 60-70 км, легко измеряемую методом частичных отражений. Электронная концентрация во время солнечной вспышки 08.04.2004 на трех высотах 73, 77 и 79 км (красные кружки) и поток рентгеновского излучения в диапазонах 1-8 и 0.5-3 Å (синие линии). Хорошо видно, что электронная концентрация пропорциональна потоку рентгеновского излучения. Малая вспышка в 13:20 UT с максимальным потоком рентгеновского излучения  $1,4 \cdot 10^{-6}$  и  $1,02 \cdot 10^{-7}$  Вт/м<sup>2</sup> в соответствующих диапазонах практически не дает заметного увеличения электронной концентрации.



Исследования последних лет позволили получить новые сведения о нижней ионосфере. **Было установлено, что в спокойных и возмущенных условиях концентрация электронов в области D пропорциональна интенсивности ионизирующего излучения  $N \sim q$ , а не  $N \sim q^{0,5}$ , как дают господствующая аэрономическая теория. На основе расчетов, проведенных для солнечных вспышек, высказана гипотеза о том, что основной процесс потерь электронов в области D обусловлен не диссоциативной рекомбинацией, а рекомбинацией электронов и ионов на аэрозольных и пылевидных частицах размером  $l \approx 10^{-5}$  см при концентрации пыли  $N \approx 30-100$  см<sup>-3</sup>.**

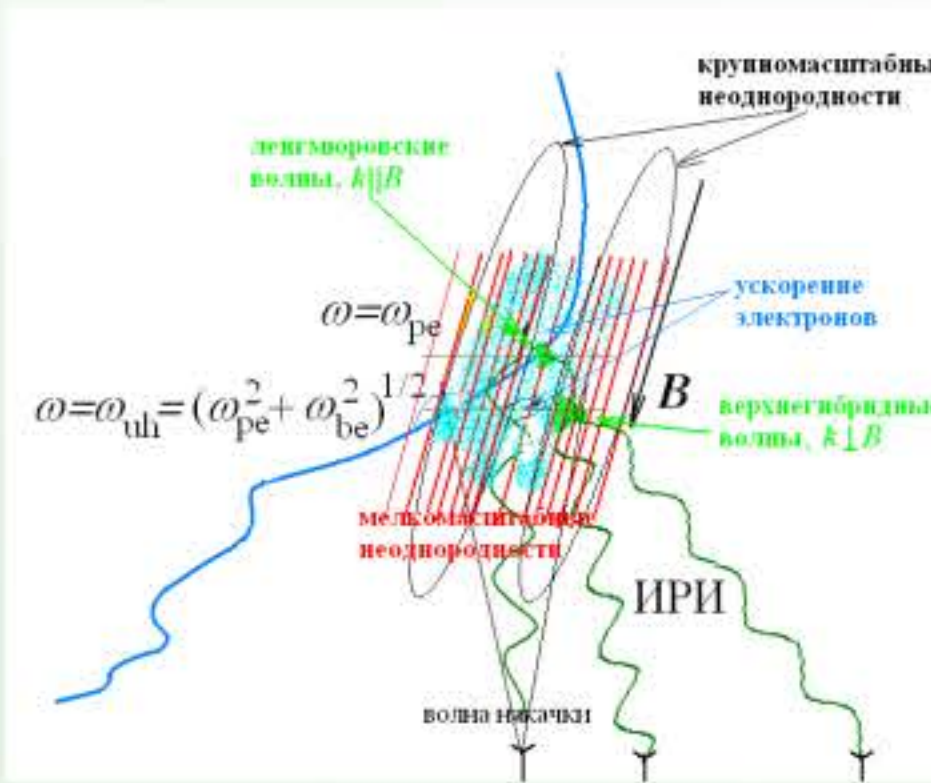
Особенности полярной и среднеширотной ионосферы изучаются совместно с Полярным геофизическим институтом КНЦ РАН, имеющим установку частичных отражений с похожими параметрами. Все по методу частичных отражений в НИРФИ опубликовано около 40 научных работ. Опыт работы НИРФИ был использован при создании установок частичных отражений в Полярном геофизическом институте КНЦ РАН, и Институте атмосферной физики ГДР. Метод частичных отражений может быть успешно использован для мониторинга нижней ионосферы. Исследования последнего десятилетия проведены при финансовой поддержке РФФИ.



# ДИАГНОСТИКА ИСКУССТВЕННОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ F-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ИОНОСФЕРЫ (ИРИ)



Стенд «СУРА». Корпус мощных передатчиков (слева), лабораторный корпус (справа), часть приемопередающей антенны стенда (на переднем плане).



Схематическое изображение явлений в F-области ионосферы при воздействии мощных КВ радиоволн

Систематические исследования взаимодействия мощного коротковолнового радиоизлучения с ионосферной плазмой проводятся в ФГНУ НИРФИ с 1972 г. (стенд ЯСТРЕБ, полигон «Зименки»). С 1981 г. Исследования проводятся на стенде «СУРА». Серьезный интерес в мире к исследованиям искусственных ионосферных возмущений связан с их влиянием на работу телекоммуникационных систем различного назначения: КВ и УКВ радиосвязи, загоризонтной радиолокации и т.п., а также с возможностью моделирования естественных процессов в космической плазме. В последние годы исследования проводятся в рамках ФЦНТП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники" на 2002-2006 годы по приоритетному направлению «Информационно-телекоммуникационные системы».

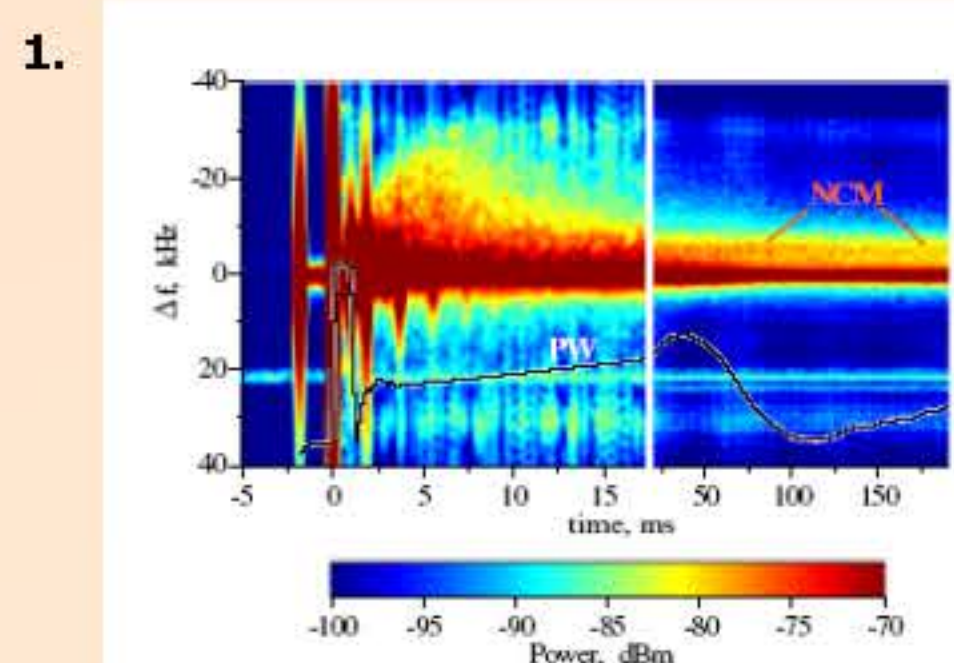
При воздействии мощной КВ радиоволны обыкновенной поляризации на плазму F-слоя ионосферы в ней возникает искусственная ионосферная турбулентность (ИИТ): собственные высокочастотные плазменные волны (ленгмюровские, верхнегибридные), нижнегибридные волны, ионно-звуковые колебания, неоднородности концентрации плазмы, вытянутые вдоль геомагнитного поля с масштабами от нескольких см до десятков км.

Диагностика возмущенной области ионосферы осуществляется с помощью зондирования и просвечивания возмущенной области ионосферы пробными радиоволнами различных диапазонов (КВ, УКВ, СВЧ), а также при измерениях излучения из возмущенной области в оптическом и радио диапазонах.

**Искусственное радиоизлучение ионосферы** в коротковолновом диапазоне (**ИРИ**) наблюдается как шумовая составляющая малой интенсивности ((-50) – (-80) дБ) в спектре отраженного от ионосферы сигнала волны накачки, занимающая полосу частот в несколько десятков (в некоторых случаях до сотен) килогерц и представляет собой продукт конверсии плазменных волн в электромагнитные при взаимодействии первых с низкочастотными возмущениями. Измерения ИРИ и сопоставление результатов с данными теоретических моделей позволяют осуществлять детальную диагностику параметров ИИТ и процессов, протекающих в области ИИТ.



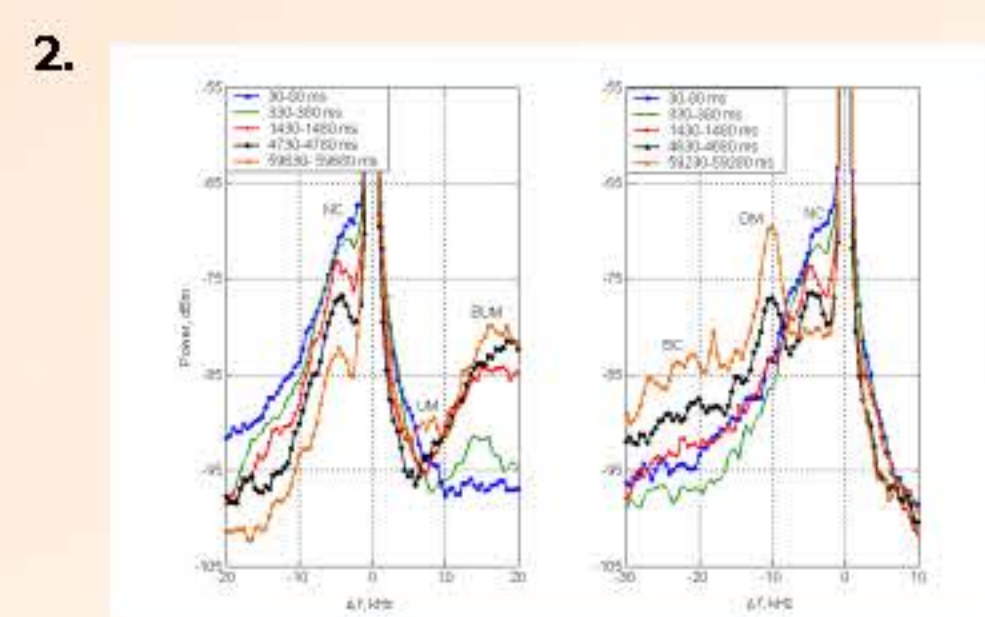
Приемный пункт для регистрации ИРИ на стенде «СУРА». Слева – спектроанализатор HP3585; радиоприемники «Катран» для регистрации динамики сигналов ИРИ на фиксированных частотах. Справа – блок сбора информации с радиоприемников, компьютер с 8-канальным АЦП для регистрации и обработки данных в среде LabView; многофункциональное трехканальное КВ радиоприемное устройство (РПУ) с диапазоном частот 1-30 МГц и динамическим диапазоном 90 дБ, сопряженное с системой цифровой обработки сигнала промежуточной частоты 2500 кГц в полосе до 500 кГц.



Спектрограмма ИРИ в течение 200 мс после включения мощной волны. Черная линия – поведение отраженного от ионосферы сигнала мощной волны

### Результат :

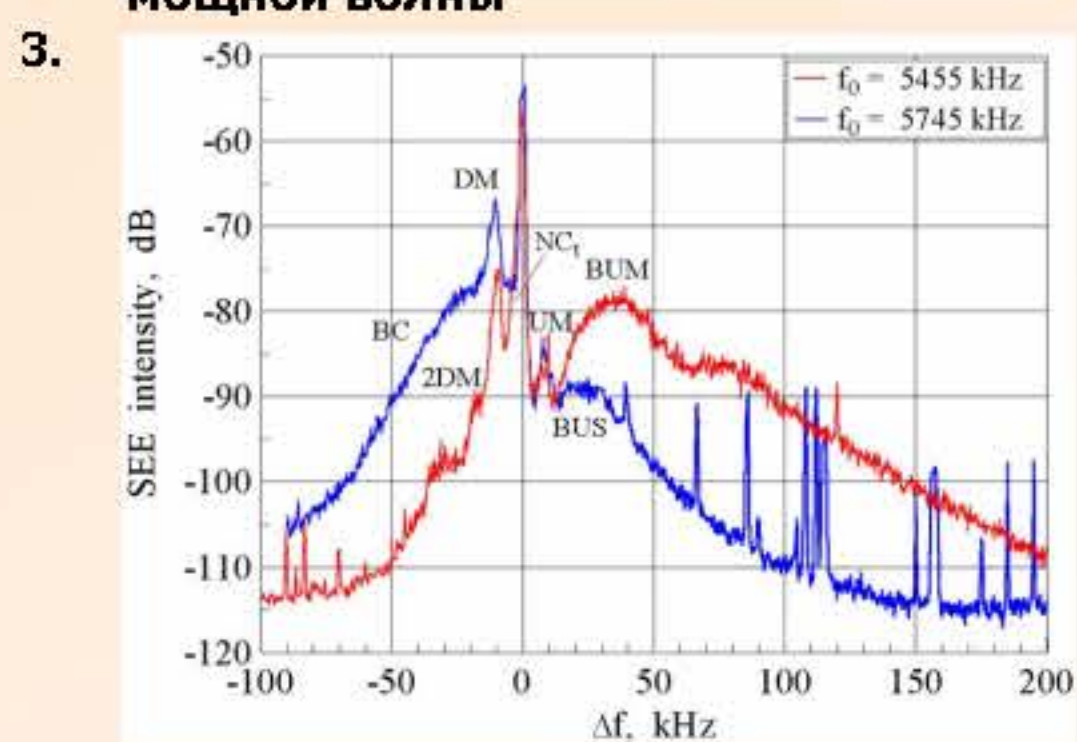
В первые миллисекунды воздействия происходит расширение спектра ИРИ за счет каскадной перекачки ленгмюровских волн в область низких частот. В дальнейшем – за счет сдвига области взаимодействия вниз от точки отражения – спектр обужается и появляется его тонкая структура (NCM).



Последовательность спектров ИРИ после включения мощной волны при частоте воздействия  $f_0 \approx 5f_{ce}$  и  $f_0 < 5f_{ce}$

### Результат :

при развитии спектральных компонент ИРИ, связанных с существованием верхнегибридных волн и вытянутых неоднородностей (DM, BC), подавляются компоненты ИРИ, связанные с существованием ленгмюровских волн, т.е. область взаимодействия мощной волны с ионосферной плазмой смещается от точки отражения в область верхнего гибридного резонанса.

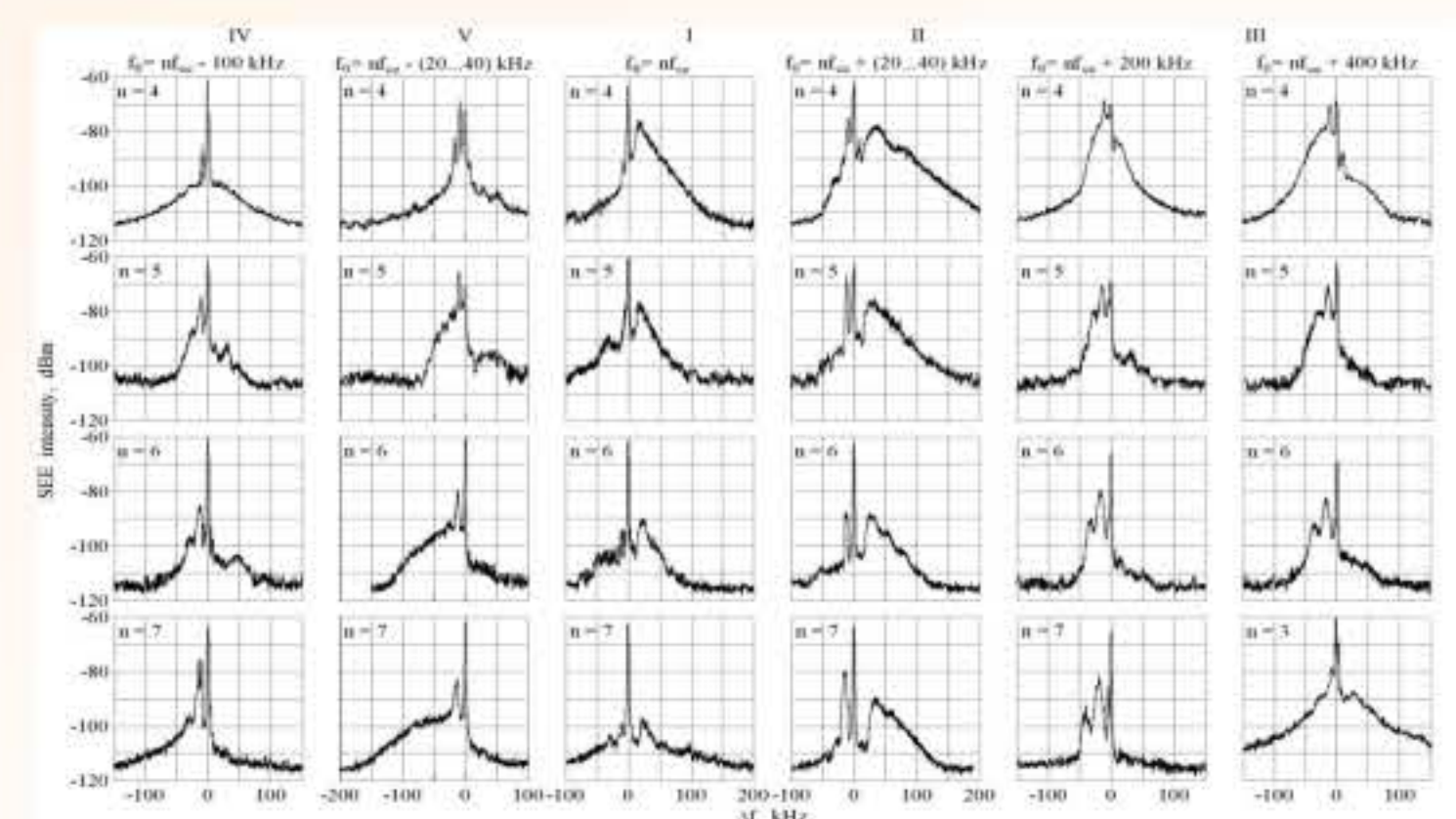


Характерные спектры ИРИ при  $f_0$  несколько (красный) и существенно (синий) выше  $4f_{ce}$ .  
**Результат:**

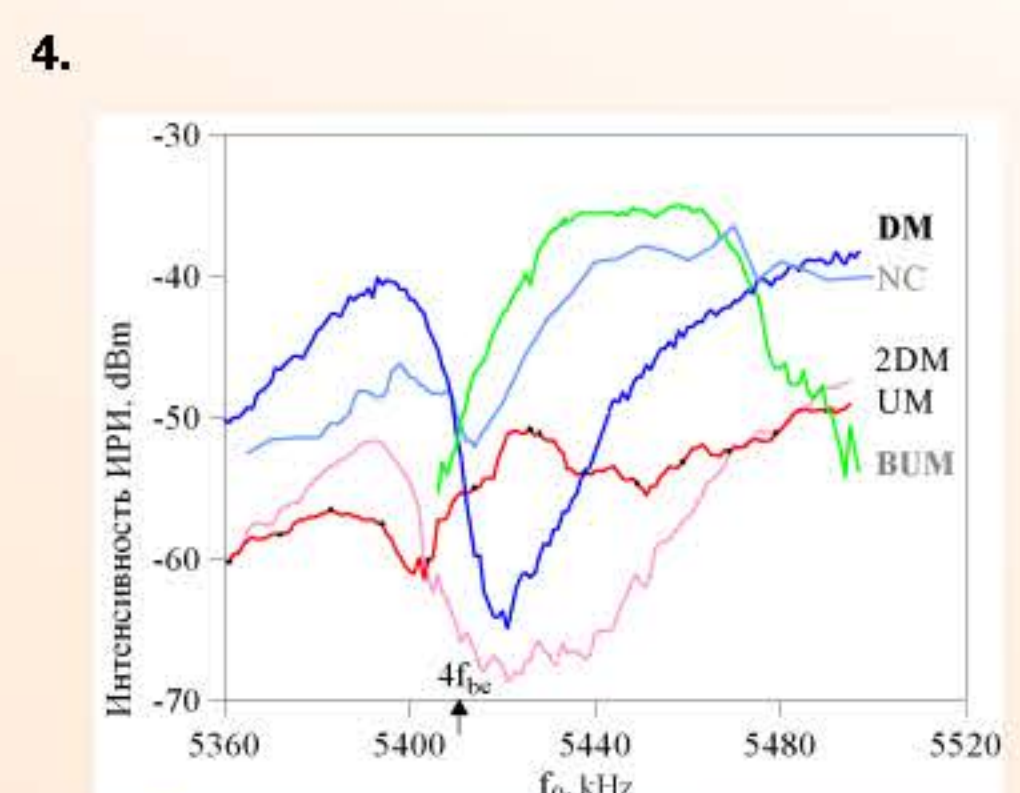
Наблюдается циклическая зависимость вида спектров ИРИ от частоты воздействия  $f_0$  при ее изменении между последовательными гармониками электронной циклотронной частоты  $nf_{ce}$  при различных номерах гармоник  $n$  от  $n=4$  до 7. При  $f_0 \approx nf_{ce}$  взаимодействие мощной волны с ионосферной плазмой существенно ослабляется.

Спектральные компоненты ИРИ, возникающие при рассеянии верхнегибридных волн на вытянутых мелкомасштабных неоднородностях:

- Главный спектральный максимум (DM) на отстройке  $\Delta f_{DM} = f_{ИРИ} - f_0 \sim [(-8) - (-20)]$  кГц и его спутник 2DM.
- Верхний максимум (UM) с  $\Delta f_{UM} > 0$  с  $\Delta f_{UM} \sim |\Delta f_{DM}| - 2$  кГц  $\sim [(+6) - (+18)]$  кГц.
- Широкий верхний максимум (BUM) с  $\Delta f_{BUM} \sim [(+14) - (+200)]$  кГц, существует при  $f_0 \geq nf_{ce}$
- Широкополосная компонента (BC) с  $\Delta f_{BC} = [(-15) - (-100)]$  кГц.
- Широкополосная структура (BUS) с  $\Delta f_{BUS} \sim [(+12) - (+70)]$  кГц.
- Узкополосная компонента (NC) с  $\Delta f_{NC} = [0 - (-7)]$  кГц.



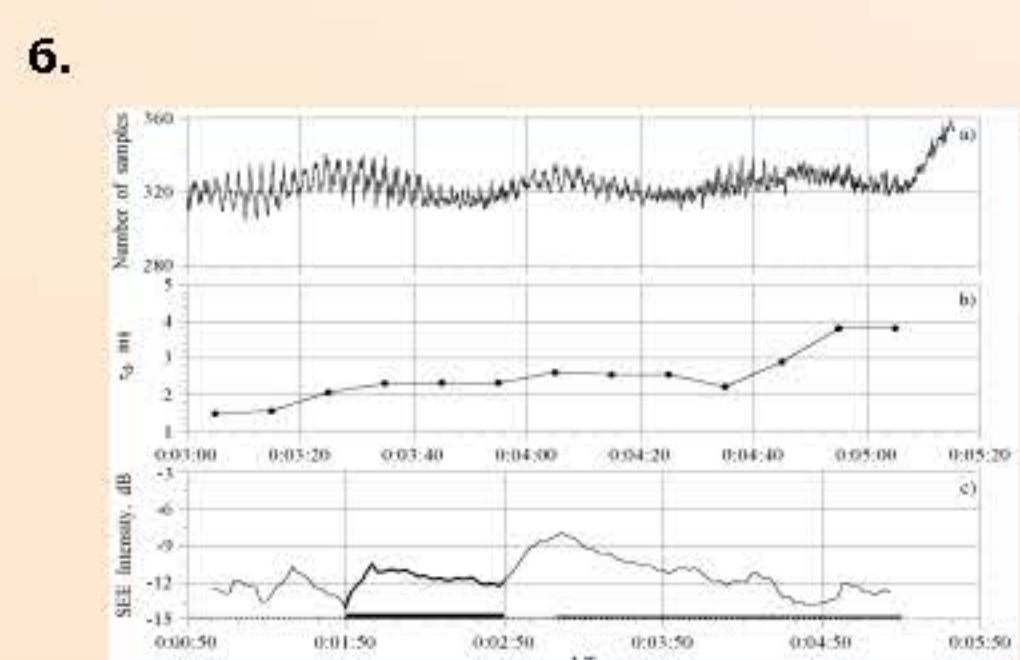
Поведение стационарных спектров ИРИ во всем диапазоне частот стенда «Сура».



### Результат:

В экспериментах по быстрому свипированию частоты воздействия вокруг циклотронных гармоник существенно повышается точность определения циклотронной частоты в области взаимодействия мощной волны с ионосферной плазмой.

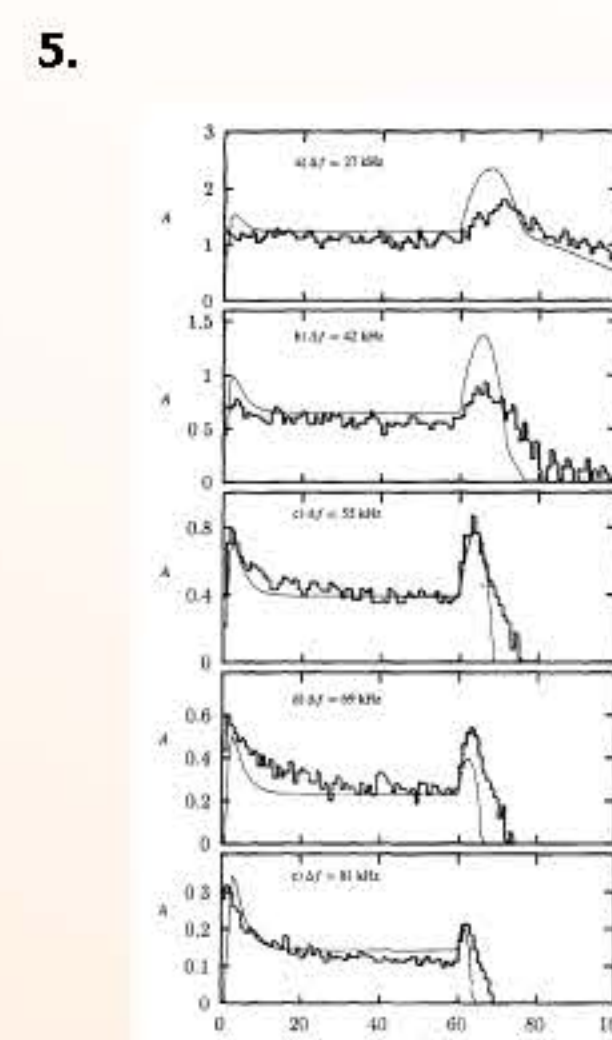
При увеличении частоты воздействия и ее проходе через циклотронную гармонику последовательно на одной и той же частоте (равной кратной циклотронной) достигаются минимумы интенсивности UM, интегральной интенсивности ИРИ, интенсивности DM. Частота BUM оказывается всегда выше кратной циклотронной.



Временной ход интенсивности оптического свечения в зеленой линии (панель а), времени релаксации ИРИ после выключения импульса накачки (панель б); интенсивности ИРИ (панель с). Точки над осью времени панели с) соответствуют импульсному воздействию, черный прямоугольник непрерывному, белый – интервалу времени, представленному на панелях а) и б).

### Результат:

Искусственное оптическое свечение ионосферы регистрируется во время увеличенного (бесстолкновительного) затухания плазменных волн, оба эти эффекта связаны с ускоренными электронами.



Сопоставление динамики ИРИ (BC-компоненты) на фиксированных отстройках  $\Delta f = f_0 - f_{BC}$  с модельными расчетами (тонкие линии), выполненными в рамках механизма «двойной трансформации» с использованием эмпирической модели пространственного спектра мелкомасштабных неоднородностей, при переходе от непрерывного режима воздействия к импульсному на 60-й секунде.

### Результат:

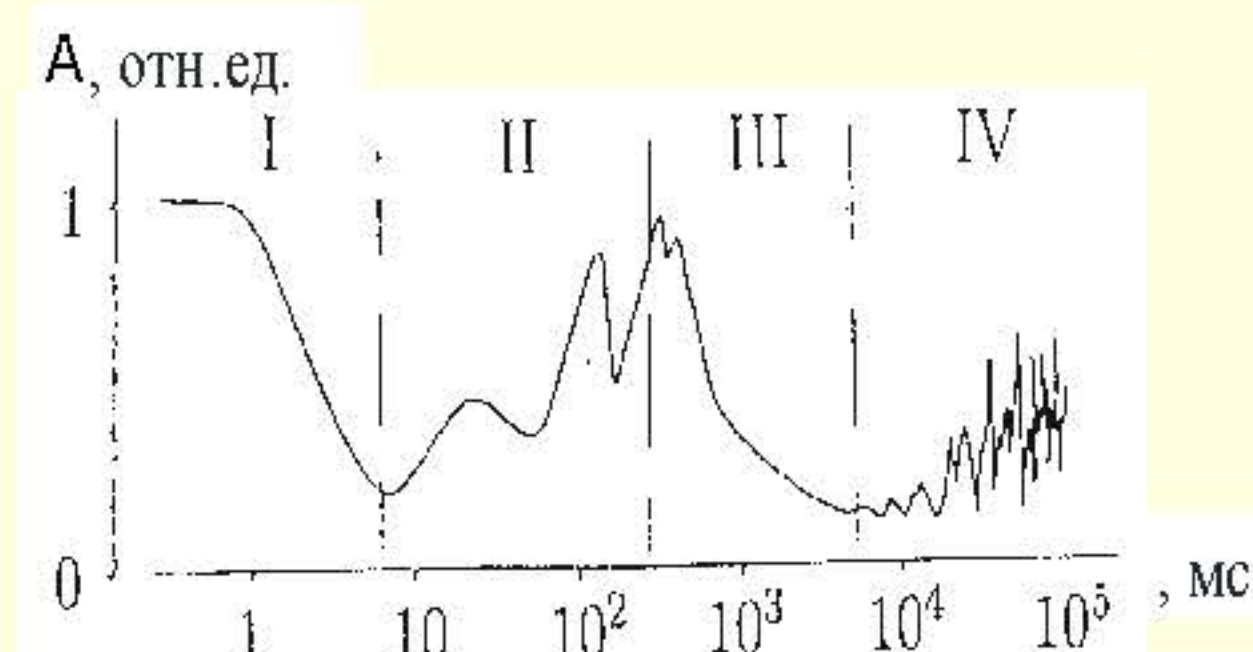
Разработан способ оценки (восстановления) пространственного спектра мелкомасштабных неоднородностей по измерениям BC-компоненты ИРИ. Установлено, что спектр неоднородностей существенно дальше в область мелких масштабов в нижней части диапазона частот воздействующей волны (4.3-5.1 МГц), а также в области частот, несколько превышающих 4-ую циклотронную гармонику.

**Результаты 1-3 получены в сотрудничестве с Институтом космической физики (Швеция) и Институтом аэронауки им. Макса Планка (Германия); результат 6 – с Казанским госуниверситетом**

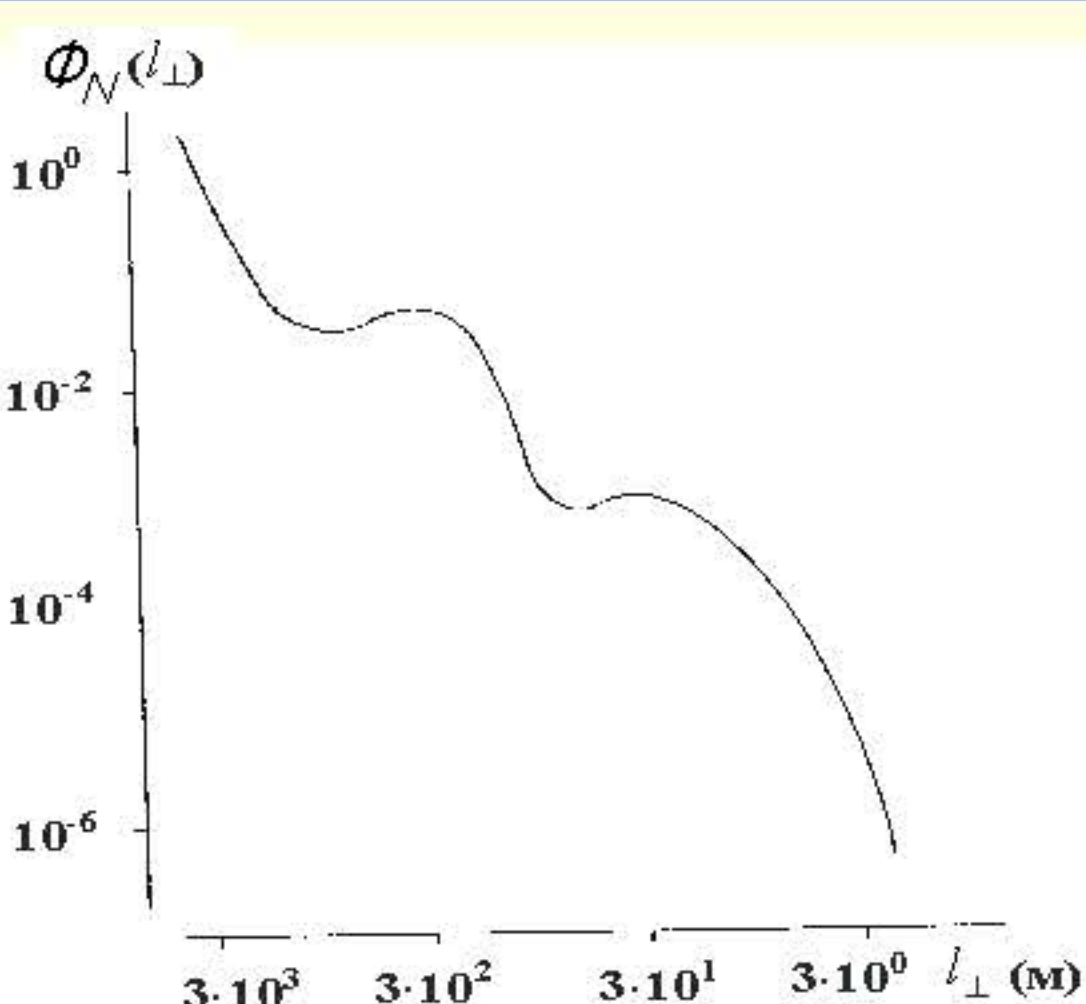


# ИСКУССТВЕННАЯ ИОНОСФЕРНАЯ ТУРБУЛЕНТНОСТЬ (ИИТ) В F-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ

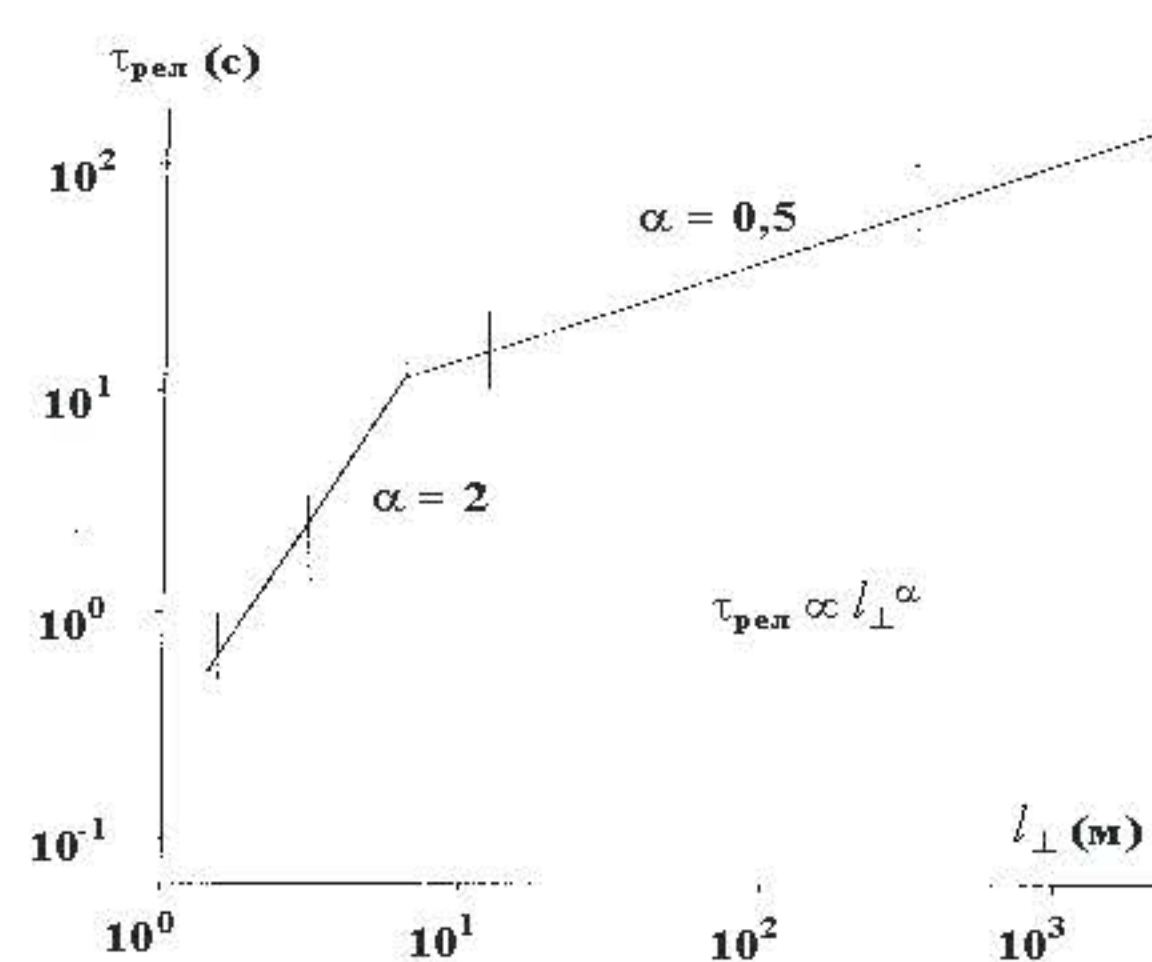
**I. Четыре стадии развития взаимодействия мощной радиоволны O-поляризации с плазмой F-области ионосферы.** Первая стадия (I) – развитие *стрикционной параметрической неустойчивости (СПН)* – длится 10 – 20 мс с момента включения волны накачки (ВН) в плазме и характеризуется уменьшением интенсивности принимаемого сигнала ВН на 10 – 20 дБ. Вторая стадия (II) длится 0.5 – 3 с, характеризуется восстановлением уровня отраженного сигнала ВН с появлением характерных квазипериодических осцилляций (пиков) ее амплитуды. Третья стадия (III) – развитие *тепловой (резонансной) параметрической неустойчивости (ТПН)* – наступает через 0.5 – 10 с после включения ВН и сопровождается генерацией мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН) с  $l_{\perp} \leq 30 - 50$  м. Четвертая стадия (IV) – развитие *самофокусирующей неустойчивости* мощной радиоволны – наступает через 10 – 30 с после включения ВН и сопровождается ростом интенсивности среднемасштабных (с  $l_{\perp} \approx 0.1 - 1$  км) и крупномасштабных (с  $l_{\perp} \geq 1$  км) искусственных ионосферных неоднородностей (ИИН).



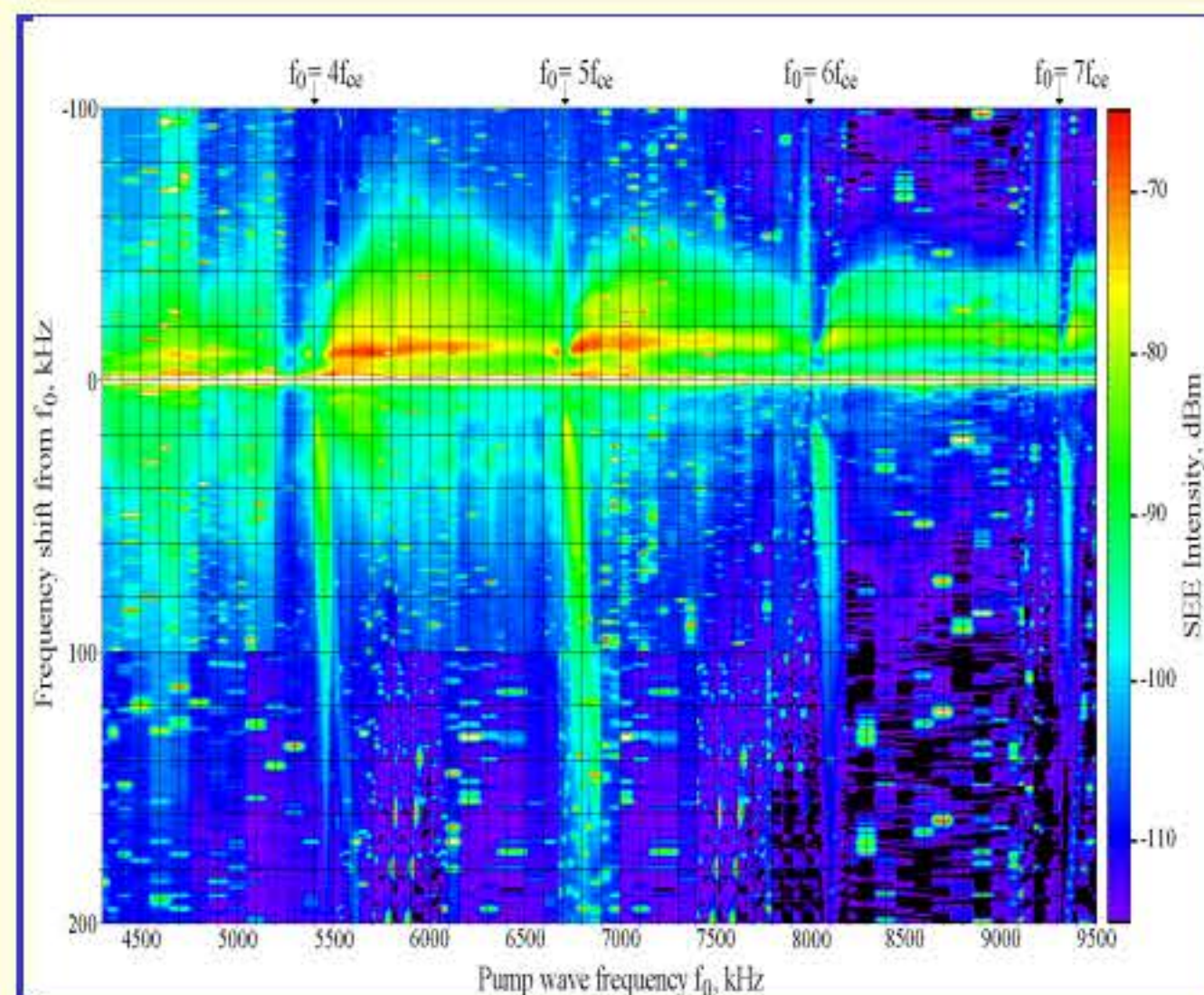
**II. Спектральные характеристики ИИТ.** При кусочно-степенной аппроксимации зависимости спектральной плотности флуктуаций плотности плазмы  $\Phi_N(l_{\perp}) \propto l_{\perp}^p$  было определено, что:  $p \approx 4 - 5$  для  $l_{\perp} \approx 1 - 3$  м,  $p \approx 2 - 3$  для  $l_{\perp} \approx 3 - 20$  м,  $p \approx 3$  для  $l_{\perp} \approx 200 - 400$  м,  $p \approx 1.5 - 2$  для  $l_{\perp} \approx 600 - 800$  м,  $p \approx 3 - 4$  для  $l_{\perp} \approx 0.8 - 4$  км. Максимум  $\Phi_N(l_{\perp})$  в области масштабов  $l_{\perp} \approx 50$  м обусловлен механизмом генерации неоднородностей вследствие развития ТПН. Второй максимум (для  $l_{\perp} \approx 400 - 600$  м) определяется развитием самофокусирующей неустойчивости. Характерные значения относительных флуктуаций плотности плазмы на стационарной стадии развития ИИТ составляют:  $\delta N \approx 10^{-2}$  для  $l_{\perp} \approx 1 - 2$  км,  $\delta N \approx 10^{-3}$  для  $l_{\perp} \approx 200 - 600$  м,  $\delta N \approx 3 \cdot 10^{-4}$  для  $l_{\perp} \approx 3 - 30$  м. Установлено, что наиболее интенсивные МИИН генерируются при углах наклона  $\sim 12^\circ$  к югу от вертикали — *эффект магнитного зенита*. Разработаны методы управления спектральными характеристиками искусственных ионосферных неоднородностей (ИИН), что имеет важное значение для использования ИИТ для решения различных исследовательских и прикладных задач.



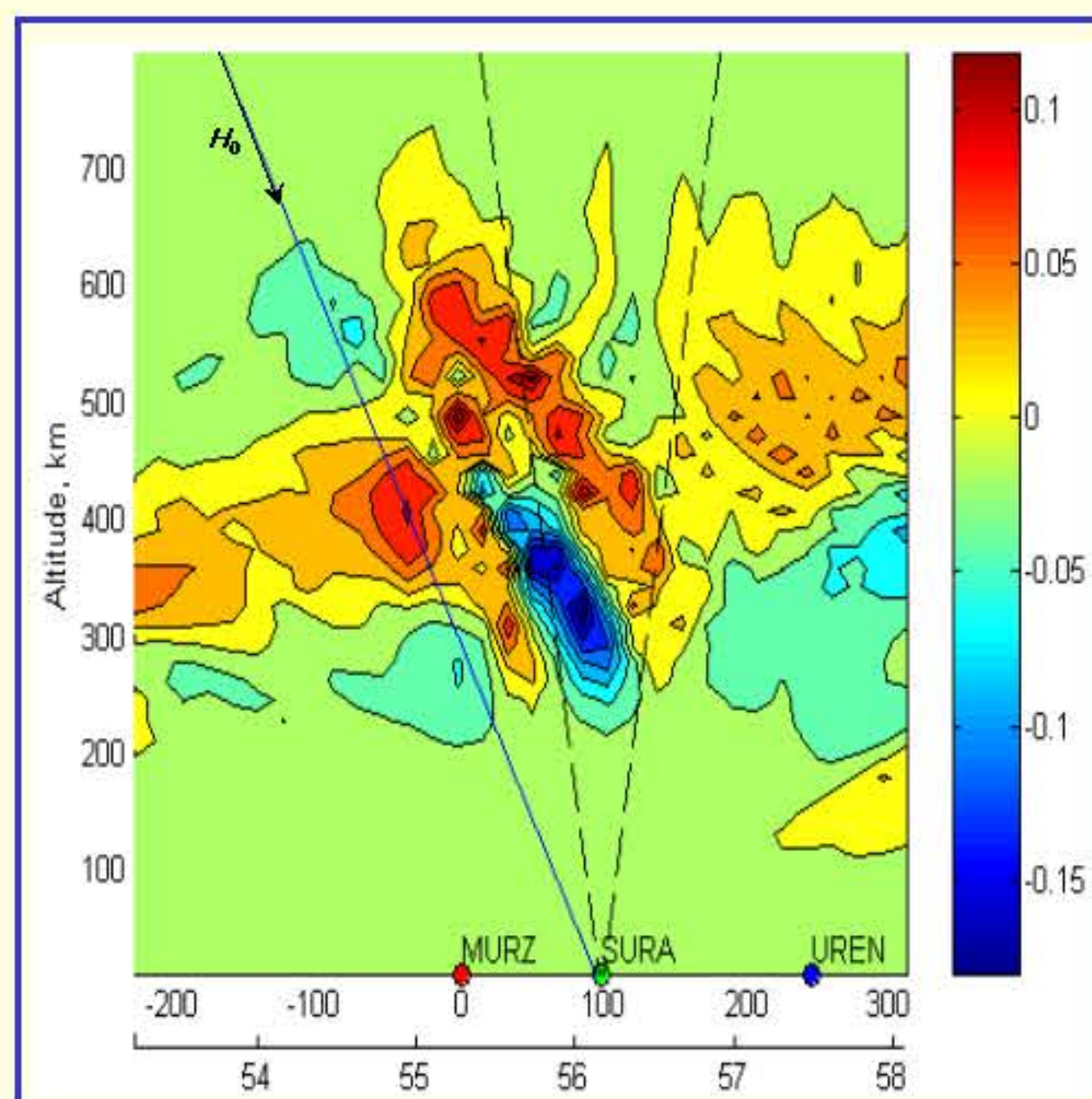
**III. Релаксация искусственных ионосферных неоднородностей.** Времена релаксации ИИН для  $l_{\perp} \approx 1 - 1000$  м зависят в сильной степени от масштаба неоднородностей  $l_{\perp}$ : для  $l_{\perp} \leq l_{\perp}^*$  имеет место квадратичная зависимость  $\tau_{\text{рел}}(l_{\perp}) \propto l_{\perp}^2$ , более слабая зависимость  $\tau_{\text{рел}}(l_{\perp}) \propto l_{\perp}^{0.5}$  для  $l_{\perp} \geq l_{\perp}^*$  ( $l_{\perp}^* \approx 3 - 20$  м, уменьшаясь от дневных к ночным условиям проведения измерений). Считается, что в области квадратичной зависимости  $\tau_{\text{рел}}(l_{\perp})$  релаксация МИИН определяется поперечной амбиполярной диффузией, а для  $l_{\perp} > l_{\perp}^*$  релаксация ИИН обусловлена продольной амбиполярной диффузией плазмы. Значения времен релаксации неоднородностей зависят от времени суток, высоты отражения ВН, местоположения неоднородностей внутри ВО, режима излучения ВН, уровня возмущенности ионосферы и др. При нестационарном уровне развития МИИН их релаксация происходит в несколько раз быстрее, чем для стационарной ИИТ. Установлено, что релаксация МИИН носит, как правило, двухступенчатый характер, когда после уменьшения уровня МИИН на  $\sim 10 - 20$  дБ начинает регистрироваться вторая, в несколько раз более медленная стадия их релаксации.



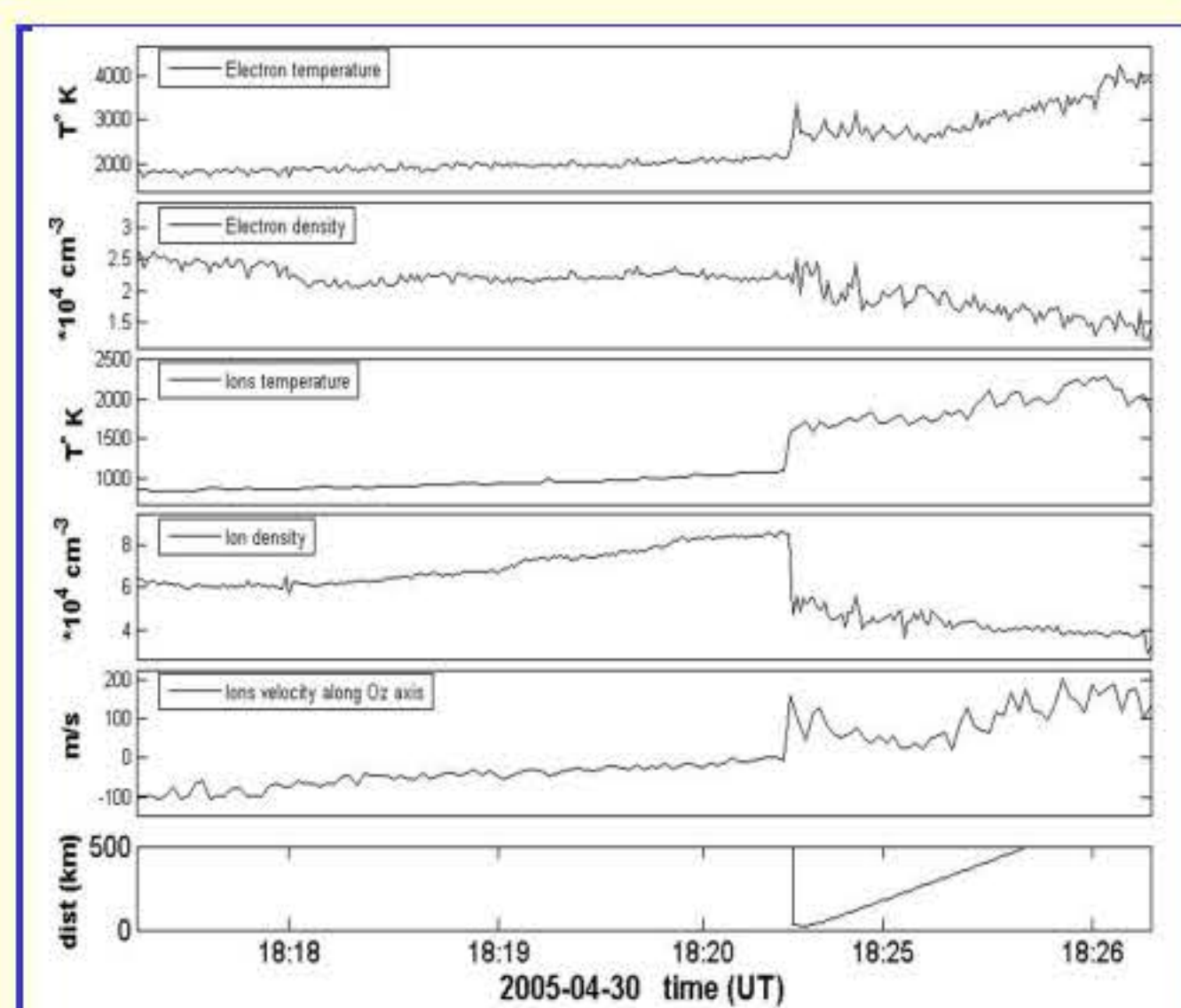
**IV. Искусственное радиоизлучение ионосферы (ИРИ).** Это излучение генерируется в ВО ионосферы вблизи уровня отражения ВН в результате различных процессов взаимодействия электромагнитных волн и высокочастотных плазменных колебаний с низкочастотной плазменной турбулентностью. К основным компонентам ИРИ относятся: 1) DM – down-shifted maximum, 2) BC – broad continuum, 3) UM – up-shifted maximum, 4) BUM – broad up-shifted maximum, 5) NC<sub>p</sub> – ponderomotive narrow continuum, 6) NC<sub>th</sub> – thermal narrow continuum, 7) BUS – broad up-shifted structure. Сегодня выделено всего более 15 компонент ИРИ. Выполненные на стенде Сура исследования в диапазоне частот  $f_{\text{ВН}} = 4.3 - 9.5$  МГц показали, что вид спектра ИРИ изменяется кардинальным образом в узкой области частот ВН, когда  $f_{\text{ВН}} \approx n f_{\text{ce}}$ , где  $n$  – номер гирогармоники. Взаимосвязь и взаимовлияние различных плазменных процессов при генерации ИРИ обуславливают его широкие диагностические возможности для изучения свойств как искусственной, так и естественной плазменной турбулентности.



**V. Неоднородная структура ВО ионосферы.** Впервые методами спутниковой радиотомографии и мерцания сигналов ИСЗ исследована полная система возмущений плотности плазмы в ВО ионосферы. Зарегистрирована генерация неоднородностей электронной плотности с размерами от нескольких десятков километров до сотни километров с относительными флуктуациями плотности до 10%, которые обнаруживаются до высот  $\sim 600 - 700$  км и занимают по долготе область  $\pm (150 - 200)$  км относительно центра луча мощных радиоволн. Установлено, что такие структуры наиболее эффективно возбуждаются, когда направление излучения мощной радиоволны в ионосфере близко к направлению линий геомагнитного поля — *эффект магнитного зенита*. Установлено, что ИИН, отвечающие за сцинтилляции прошедшего через ВО ионосферы сигнала, преимущественно возбуждаются в крупномасштабных образованиях с большими отрицательными флуктуациями плотности плазмы. С использованием метода диагностического ИРИ установлено, что характерные скорости распространения плазменных возмущений вдоль геомагнитного поля оказываются  $\geq V_{Te}$  ( $V_{Te} \approx 2 \cdot 10^7$  см/с), что свидетельствует о важности учета потоков тепловых и ускоренных электронов, а также токов короткого замыкания по фоновой плазме, в механизмах генерации ИИТ вдали от областей резонансного взаимодействия мощной волны с плазмой.



**VI. Исследование искусственных плазменных возмущений с помощью микроспутника DEMETER (h = 710 км).** Эксперименты проводились в марте – сентябре 2005 г. Когда нагрев ионосферы осуществлялся в условиях ночной ионосферы при отражении ВН вблизи максимума ее F<sub>2</sub>-слоя, были зарегистрированы значительные вариации плотности и температуры электронной и ионной составляющих плазмы, а также вариации скоростей ионов. Измеренные значения относительных флуктуации для  $T_e$ ,  $N_e$  и  $N_i$  составляют  $\sim 10 - 15\%$ , тогда как величина флуктуаций для  $T_i$  оказывается в 2 – 3 раза меньше. Пространственные масштабы вариаций  $N_e$  и  $T_e$  составляли  $\sim 30$  км. Важно отметить, что возмущения  $T_e$ ,  $N_e$ ,  $T_i$ ,  $N_i$  и  $V_i$  регистрировались вдоль орбиты ИСЗ на расстояниях до  $\pm 400$  км от центра возмущенной силовой магнитной трубки, выходя далеко за трубку, опирающуюся на центральную часть ВО ионосферы. Когда спутник проходил через возмущенную силовую трубку, спектральный анализ принимаемых на спутнике VLF и ELF излучений показал наличие многообразных структур в диапазоне частот 0 – 1200 Гц и 10 – 15 кГц, которые могут носить искусственный характер.





# ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИСКУССТВЕННОЙ ИОНОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ВО ВНЕШНЕЙ ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ



Измерения выполнены с помощью французского микро ИСЗ *DEMETER* (*D*etection of *E*lectro-*M*agnetic *E*missions *T*ransmitted from *E*arthquake *R*egions).



Французский ИСЗ *DEMETER* был запущен 29 июня 2004 г. для диагностики ионосферных возмущений, связанными как с природными геофизическими явлениями, так и различными электромагнитными проявлениями человеческой активности. Он обладает уникальным набором высокочувствительных инструментов. Эксперименты по программе СУРА-*DEMETER* проводились в ФГБНУ НИРФИ на протяжении всей его миссии с 2005 г. по 2010 г. Всего было выполнено более 100 сеансов измерений.

ИСЗ *DEMETER* оснащен следующей диагностической аппаратурой: ионный анализатор, датчик энергичных частиц в диапазоне 70 кэВ – 2 МэВ, ленгмюровский зонд, измерители электрических и магнитных полей. Имеющиеся на борту ИСЗ инструменты позволяют измерять основные плазменные параметры ионосферы ( $T_e$ ,  $T_i$ ,  $N_e$ ,  $N_i$  и  $I$ ). С помощью установленного на спутнике оборудования могут быть выполнены следующие измерения электромагнитных полей:

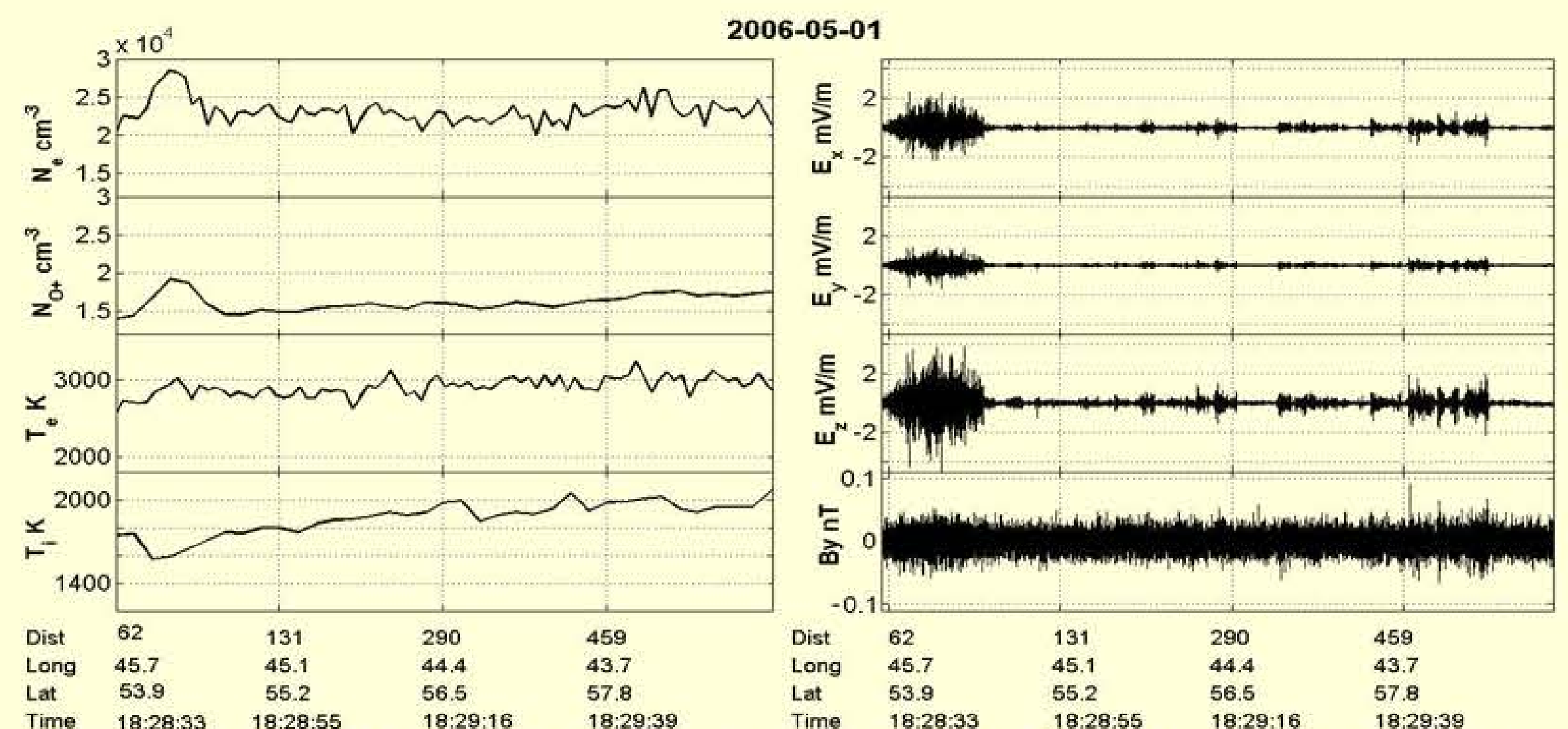
- в режиме *survey mode*:  
трех компонент электрического поля в диапазоне 0 – 15 Гц,  
двух компонент ( $1B + 1E$ ) в диапазоне до 20 кГц,  
одной компоненты электрического поля ( $1E$ ) в диапазоне до 3.5 МГц;
- в режиме *burst mode*:  
трех компонент электрического поля в диапазоне 0 – 15 Гц,  
шести компонент электромагнитного поля ( $3B + 3E$ ) в диапазоне 10 Гц – 1.25 кГц  
двух компонент ( $1B + 1E$ ) в диапазоне до 20 кГц,  
одной компоненты электрического поля ( $1E$ ) в диапазоне до 3.5 МГц.

При выполнении программы СУРА-*DEMETER* модификация ионосферы осуществлялась, используя пучок мощных радиоволн O-поляризации. Диаграмма направленности излучения антенны стенда была ориентирована под углом  $12^\circ$  от вертикали на юг, чтобы усилить генерацию искусственной ионосферной турбулентности за счёт эффекта магнитного зенита. Эффективная мощность излучения стенда СУРА составляла 80 – 150 МВт в диапазоне используемых частот  $f_{\text{ВН}} = 4.3 - 5.8$  МГц.

## Результаты

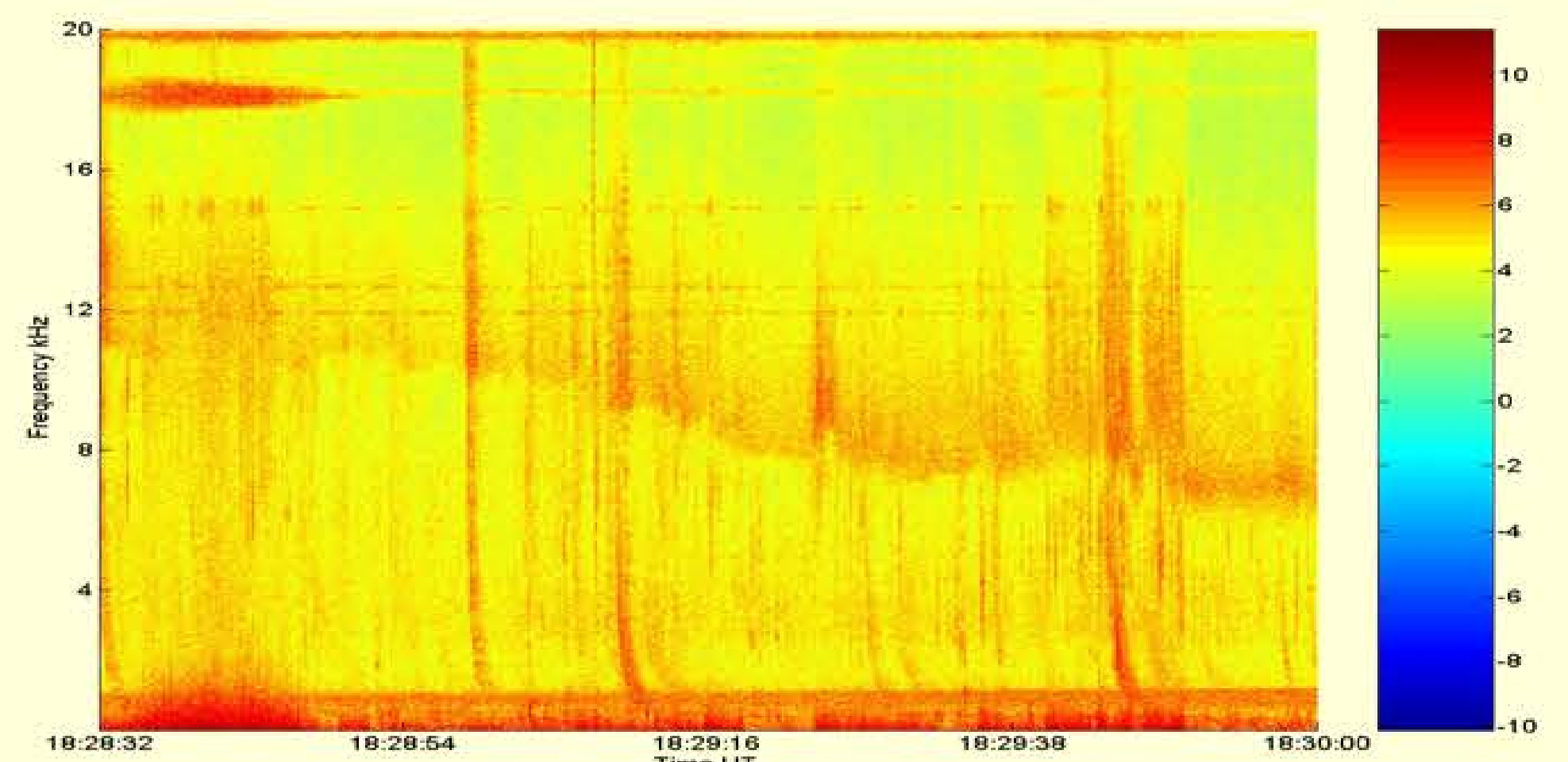
При пролёте ИСЗ через возмущенную силовую трубку регистрируется появление флуктуаций электронной и ионной концентраций, а также электронной температуры величиной до  $\sim 10 - 20$  % от их невозмущенных значений. Характерный пространственный масштаб наблюдаемых вариаций плотности и температуры плазмы составлял  $\sim 30$  км, а сами возмущения наблюдались до  $\sim 150$  км от центра возмущенной силовой трубки. Индуцированные нагревом F2-области ионосферы возмущения ионной температуры не были зарегистрированы.

Обнаружено, что при нагреве ночной F2-области ионосферы мощной радиоволной в ряде случаев имело место формирование во внешней ионосфере на высотах  $\sim 700$  км и выше искусственного дакта с увеличенной (до  $\sim 30$  %) плотностью плазмы, имеющего поперечные к геомагнитному полю размеры  $\sim 60 - 80$  км.



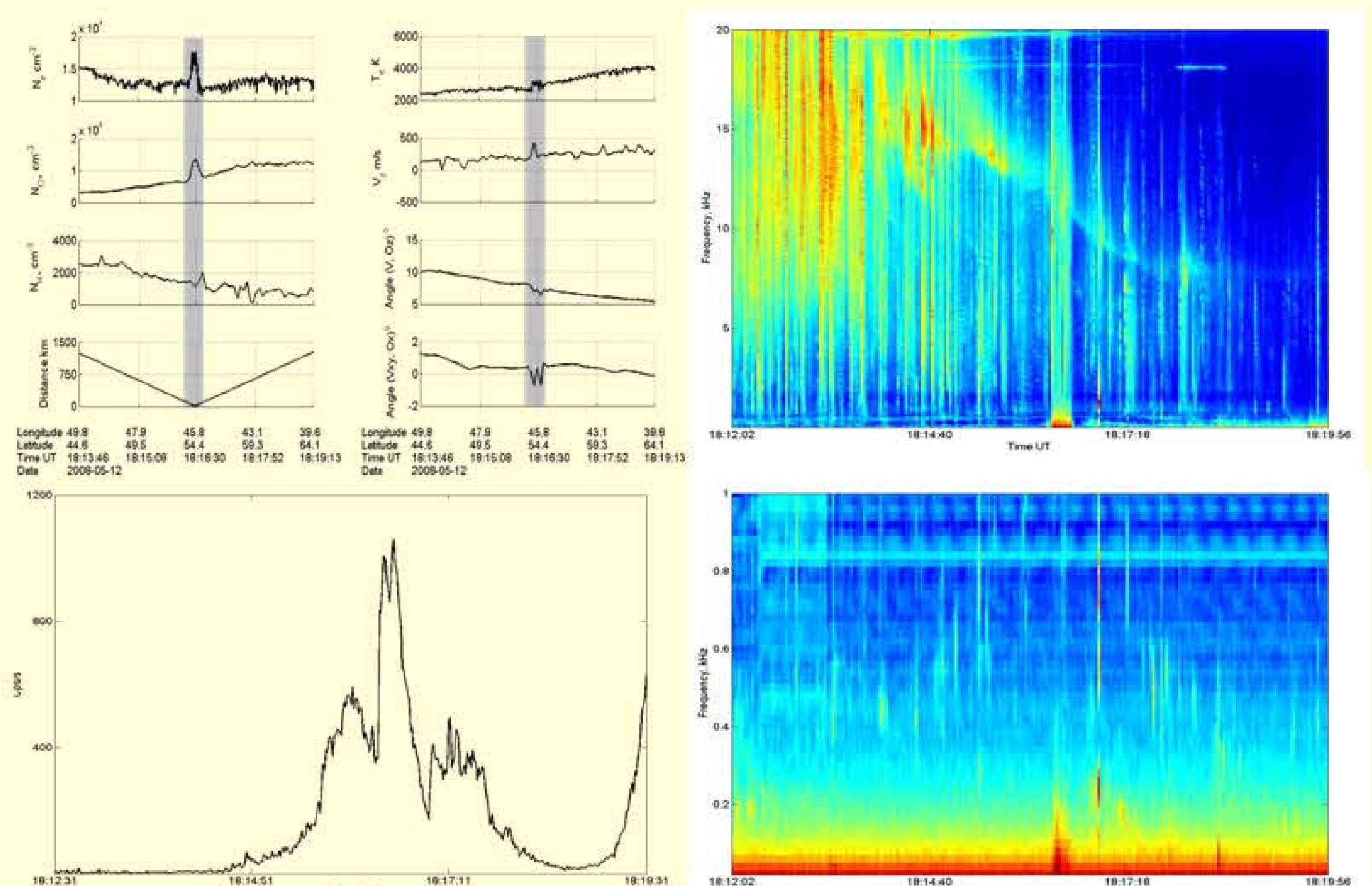
Пример дакта плотности (панель слева) и наблюдающееся усиление в нём амплитуд электромагнитных полей (панель справа).

В областях повышения концентрации плазмы (в дактах плотности) наблюдалось увеличение амплитуды флуктуаций электрического поля в диапазоне частот от 10 Гц до 1–2 кГц, усиление интенсивности шумов в диапазоне 5–16 кГц, а также значительное (на десятки дБ) увеличение интенсивности сигналов от ОНЧ передатчиков и уширение (до  $\pm 500$  Гц) их частотного спектра.



Спектрограмма электрического поля в полосе 0–20 кГц при пролёте ИСЗ через возмущённую силовую магнитную трубку.

Предложен и реализован в натурном эксперименте метод управляемого возбуждения магнитосферного мазера путём формирования мощным КВ радиоизлучением с поверхности Земли искусственных дактов плотности.

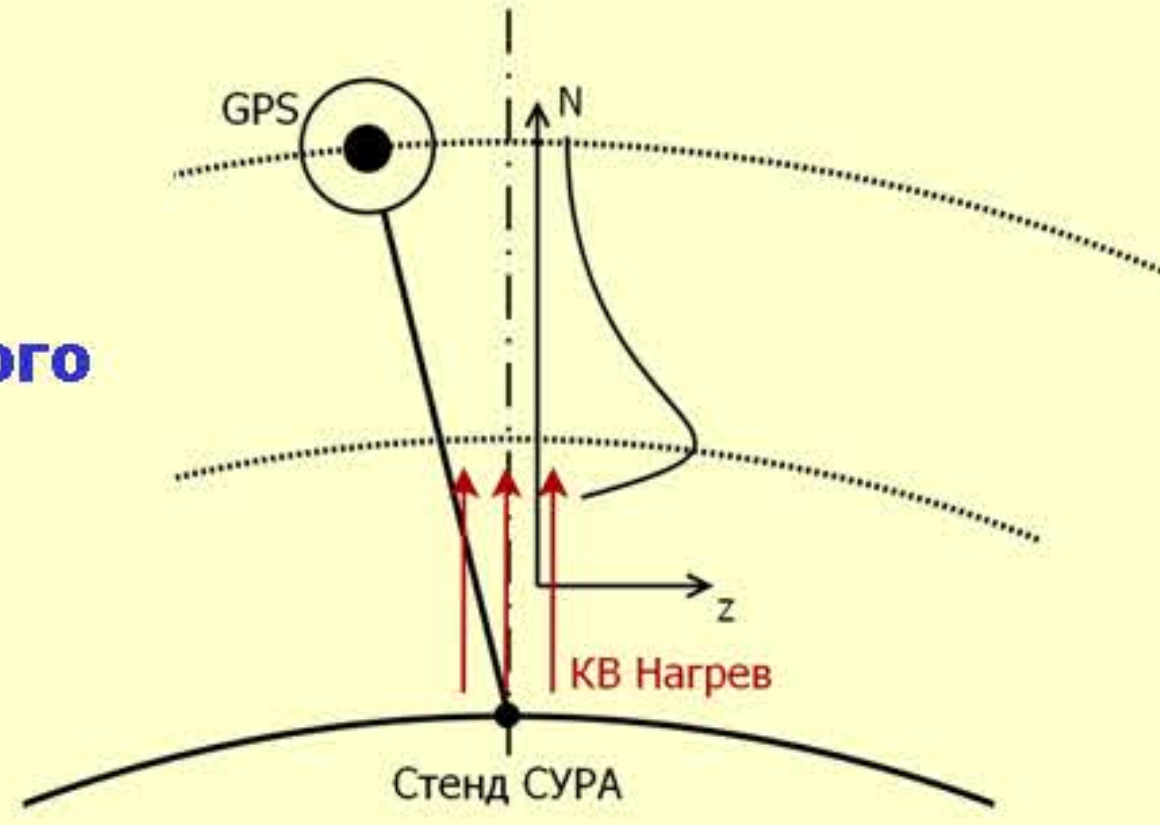


Создание дакта плотности (вверху слева), увеличение интенсивности флуктуаций электрических (вверху справа) и магнитных (внизу справа) полей, а также стимуляция высыпания энергичных электронов (внизу слева) при модификации ионосферы мощным КВ радиоизлучением.

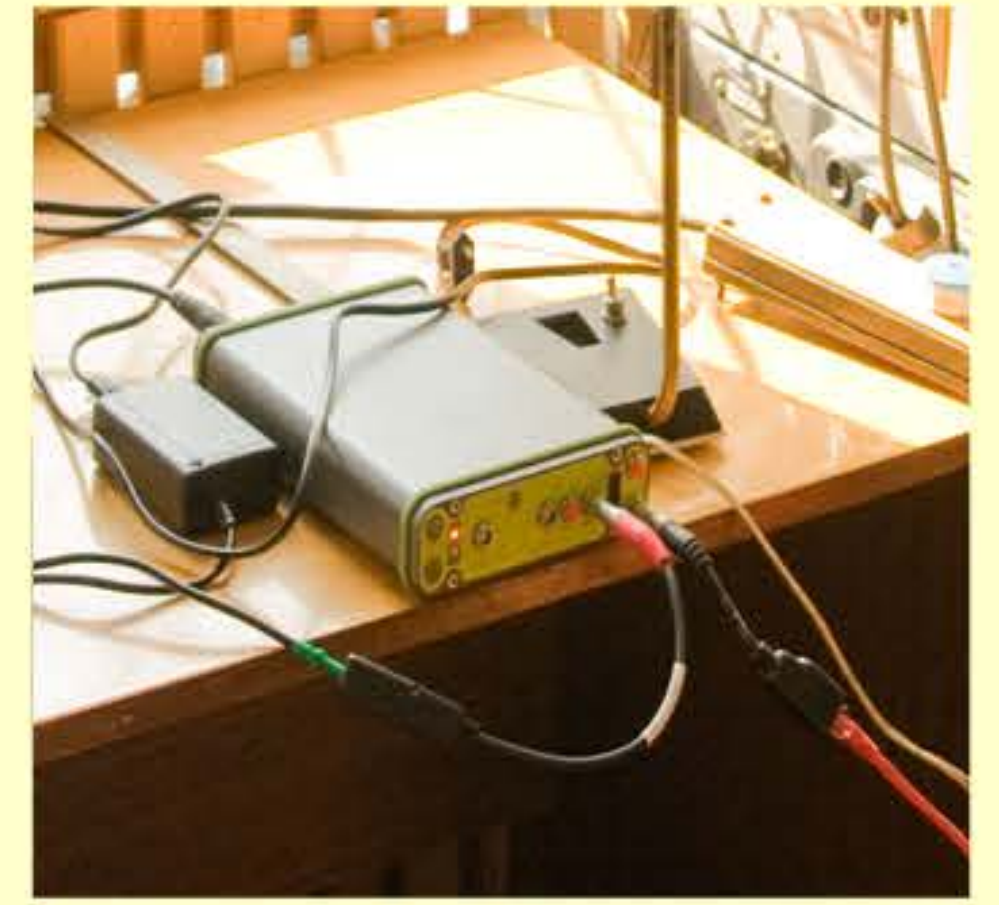


# ЗОНДИРОВАНИЕ СИГНАЛАМИ GPS КРУПНОМАСШТАБНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ИОНОСФЕРЫ, ВЫЗВАННЫХ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ СТЕНДА СУРА

Крупномасштабные неоднородности могут быть обнаружены с помощью двухчастотного радиопросвечивания сигналами ИСЗ систем NAVSTAR или GLONASS



При воздействии на ионосферу мощной КВ радиоволной в области ее отражения образуются неоднородности электронной концентрации с размерами от десятков сантиметров до десятков километров



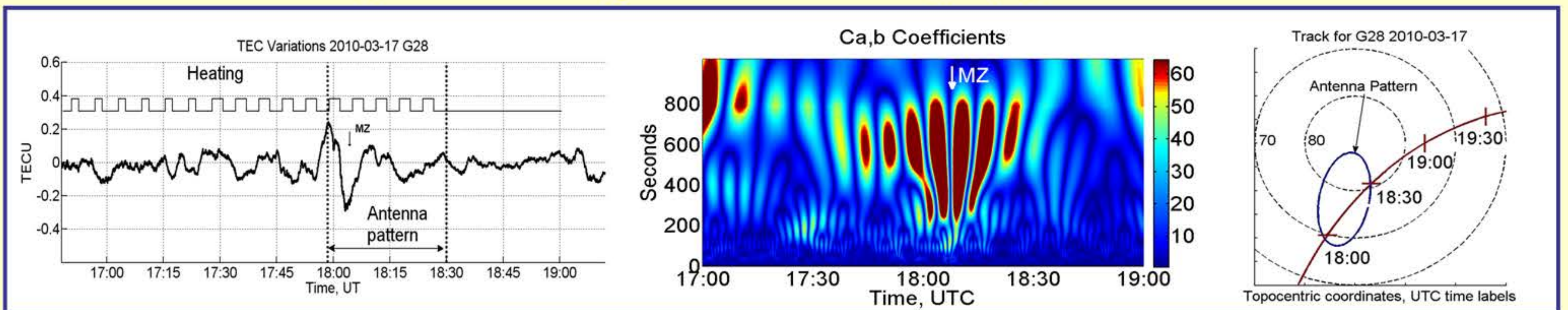
При распространении через возмущенную область у сигналов GPS появляется набег фазы, обусловленный дисперсией радиоволн в ионосферной плазме и линейно связанный с полным электронным содержанием (ПЭС) на траектории распространения

$$I = -\frac{1}{K} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2] + Const$$

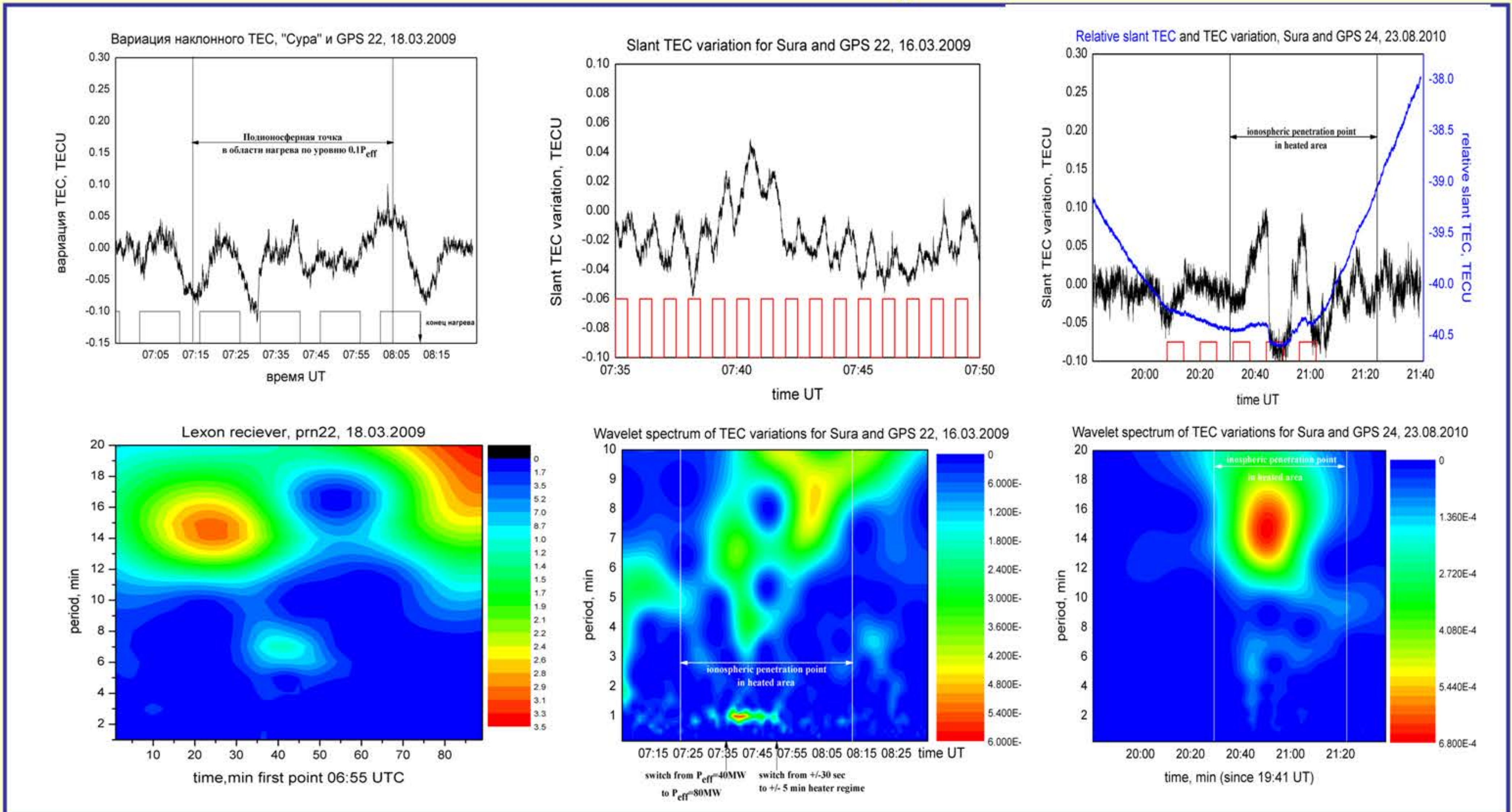


## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ИОНОСФЕРУ МОЩНЫМ КВ ИЗЛУЧЕНИЕМ СТЕНДА СУРА

Во время пролета спутника над возмущенной областью ионосферы появляются вариации ПЭС, что говорит о наличии крупномасштабных неоднородностей в этой зоне.



Наибольшая амплитуда колебаний приходится на интервал времени 18:05—18:10, когда спутник был наиболее близок к магнитному зениту



На верхних панелях приведены примеры зарегистрированных во время экспериментов вариаций ПЭС, на нижних — рассчитанные для них wavelet-спектры с использованием вэйвлета Морле. Подводя итоги исследований по модификации ионосферы мощным КВ радиоизлучением O-поляризации, можно констатировать следующее:

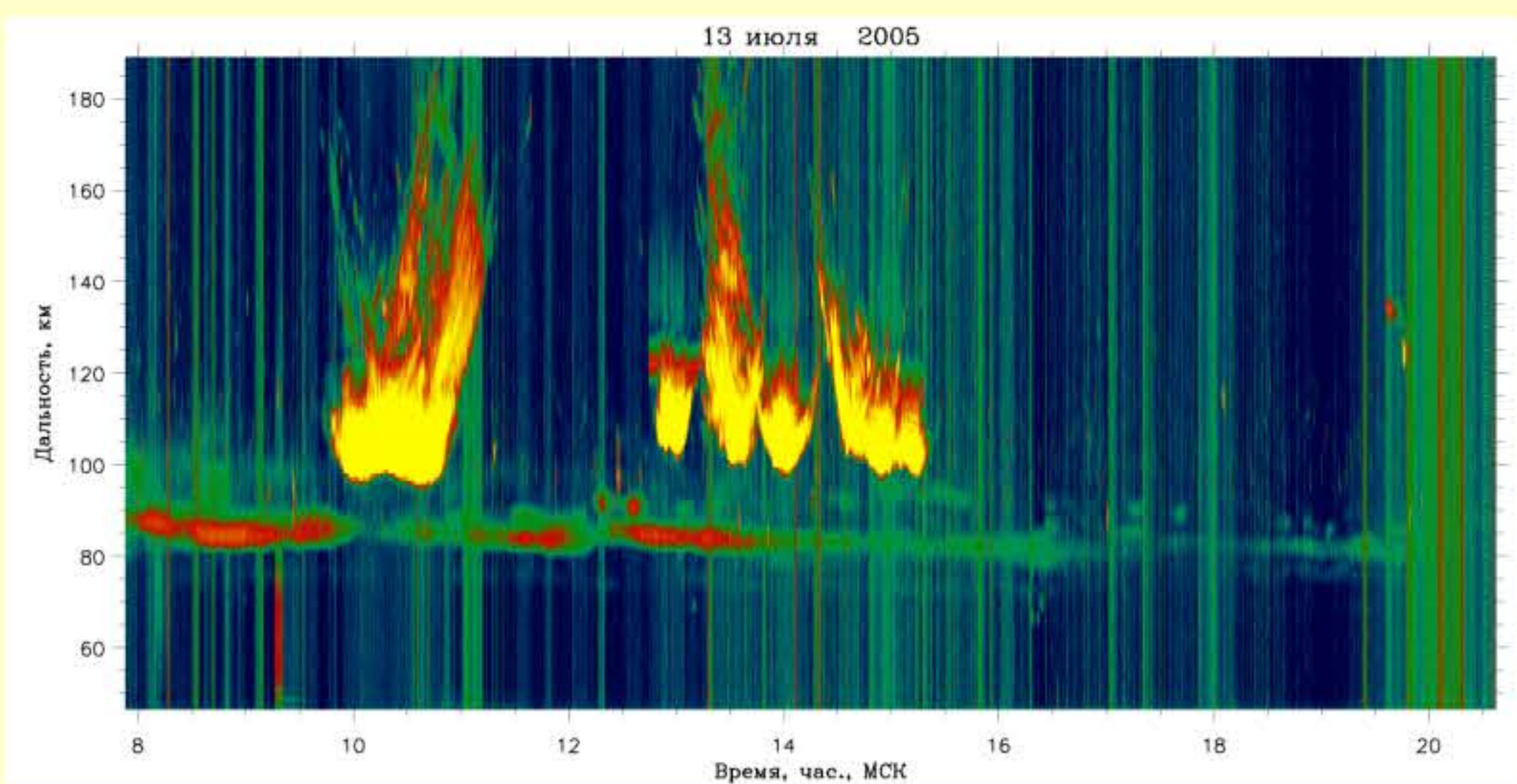
1. Установлено, что в дневное время вариации ПЭС достигают величины до 0.1 TECU, а сами вариации имеют наибольшую интенсивность в области магнитного зенита и несколько южнее его, указывая на влияние эффекта магнитного зенита на генерацию крупномасштабных плазменных возмущений;
2. Пороговые мощности, при которых начинает регистрироваться уменьшение величины, составляют ~ 4 МВт на северном и восточном краях возмущенной области, ~ 2 МВт на её западном крае и ≤ 1 МВт на южном крае;
3. Показано, что разные их типы ПЭС имеют разные характерные времена развития и релаксации и степень своего проявления в разных частях возмущенной области ионосферы;
4. Показано, что увеличение ПЭС (см. среднюю панель) связано с формированием на высотах 130 – 180 км дефокусирующей линзы с увеличенной плотностью плазмы, оказывающей существенное влияние на характер взаимодействия мощной радиоволны с ионосферной плазмой;
5. Сделано предположение, что уменьшение величины ПЭС может быть связано не только с уменьшением плотности плазмы и формированием фокусирующей линзы вблизи уровня отражения волны накачки, но и с заметным уменьшением её плотности на высотах внешней ионосферы.
6. Наблюдаются существенные различия в характеристиках возмущений плотности плазмы, создаваемых при нагреве дневной и ночной F2-области ионосферы.



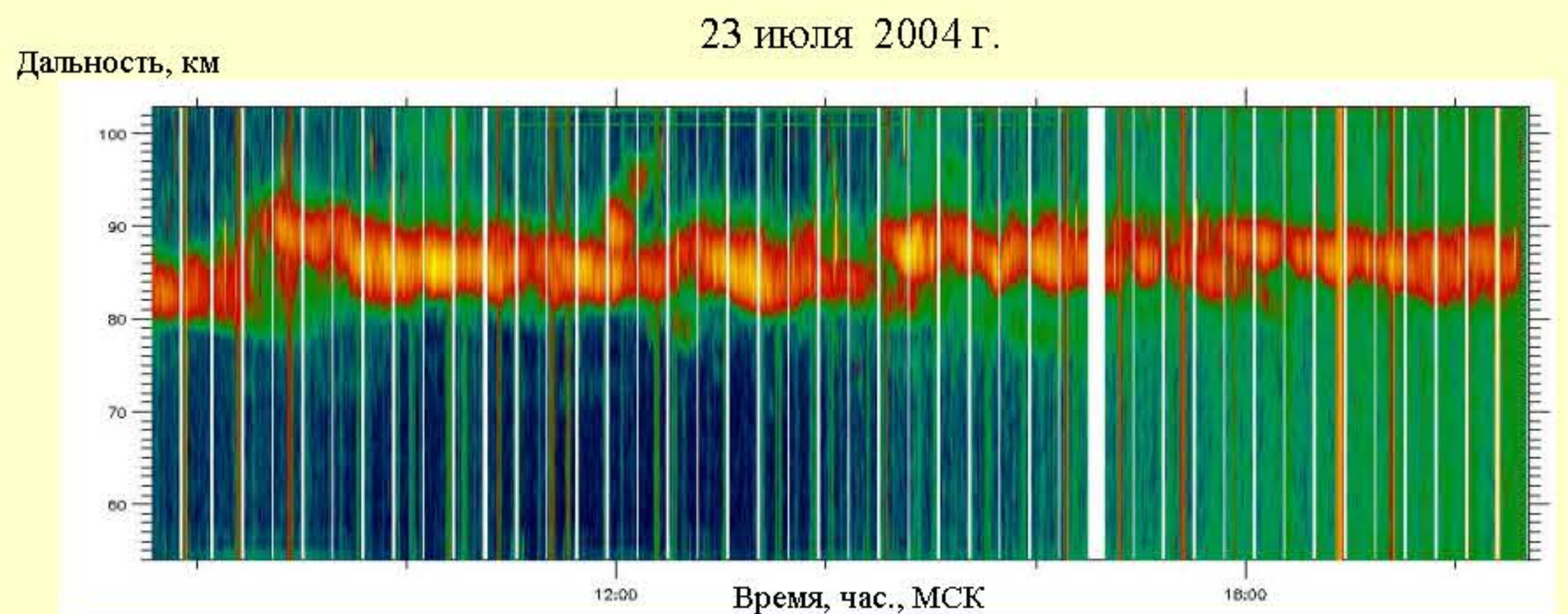
# РАДИОЗОНДИРОВАНИЕ МЕЗОСФЕРЫ



Проводится с использованием КВ радара стенда СУРА, включающего в себя приемо-передающую антенную систему стенда ППАДД, импульсный передатчик с выходной мощностью до 50 кВт, два радиоприемных устройства и систему управления радаром и сбора данных на базе персонального компьютера и крейта КАМАК с набором таймеров и АЦП. Зондирование проводится на частотах около 9 МГц при длительности зондирующего импульса 20 мксек, что соответствует пространственному разрешению 3 км. Интервал исследуемых высот 50-180 км включает в себя и высоты E-слоя, временное разрешение до 20 мс.



Пример высотно-временной зависимости интенсивности радиоэхо в широком интервале высот, включающем высоты слоя E. Выше мезосферных слоев видны спорадические слои Es.

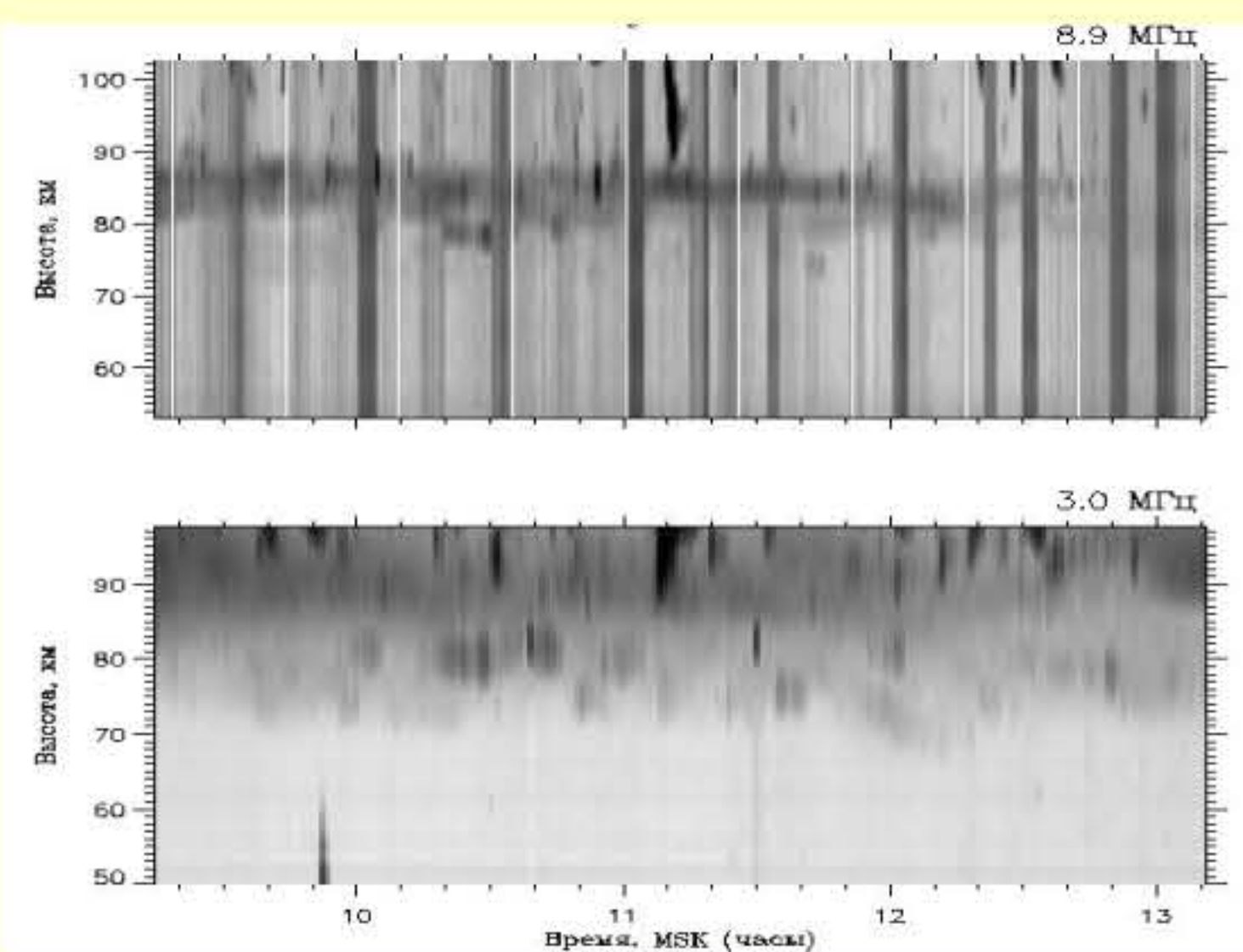


Высотно-временная зависимость интенсивности мезосферных радиоэхо. Практически постоянно регистрируется интенсивный слой в области высот 82-88 км, соответствующий положению мезопаузы. Слой зарождается в верхней части указанного интервала высот и медленно дрейфует вниз со скоростью 1-2 м/с, где исчезает. Одновременно с исчезновением слоя в нижней части высотного интервала, а часто и раньше, в верхней его части, зарождается новый рассеивающий слой, который в свою очередь дрейфует вниз. Скорость дрейфа, определяемая по смещению слоя, как правило, совпадает со средней доплеровской скоростью радиоэхо.

Мезосферные радиоэхо в КВ диапазоне имеют выраженную слоистую структуру. Наиболее интенсивные рассеивающие слои наблюдаются в области мезопаузы практически постоянно. В летний период на этих высотах наблюдаются спорадические слои повышенной интенсивности, связанные с явлением мезосферного летнего эхо (MSE), наблюдаемого в УКВ диапазоне. Рассеяние от области мезопаузы, как правило, обусловлено турбулентностью. Слои на меньших высотах имеют более низкую интенсивность и наблюдаются нерегулярно, а характер отражений свидетельствует об отражении от резкого градиента электронной плотности. Кроме мезосферных слоев регистрируется большое количество отражений от метеорных следов на дальностях более 80 км. На высотах более 100 км наблюдаются спорадические слои Es.

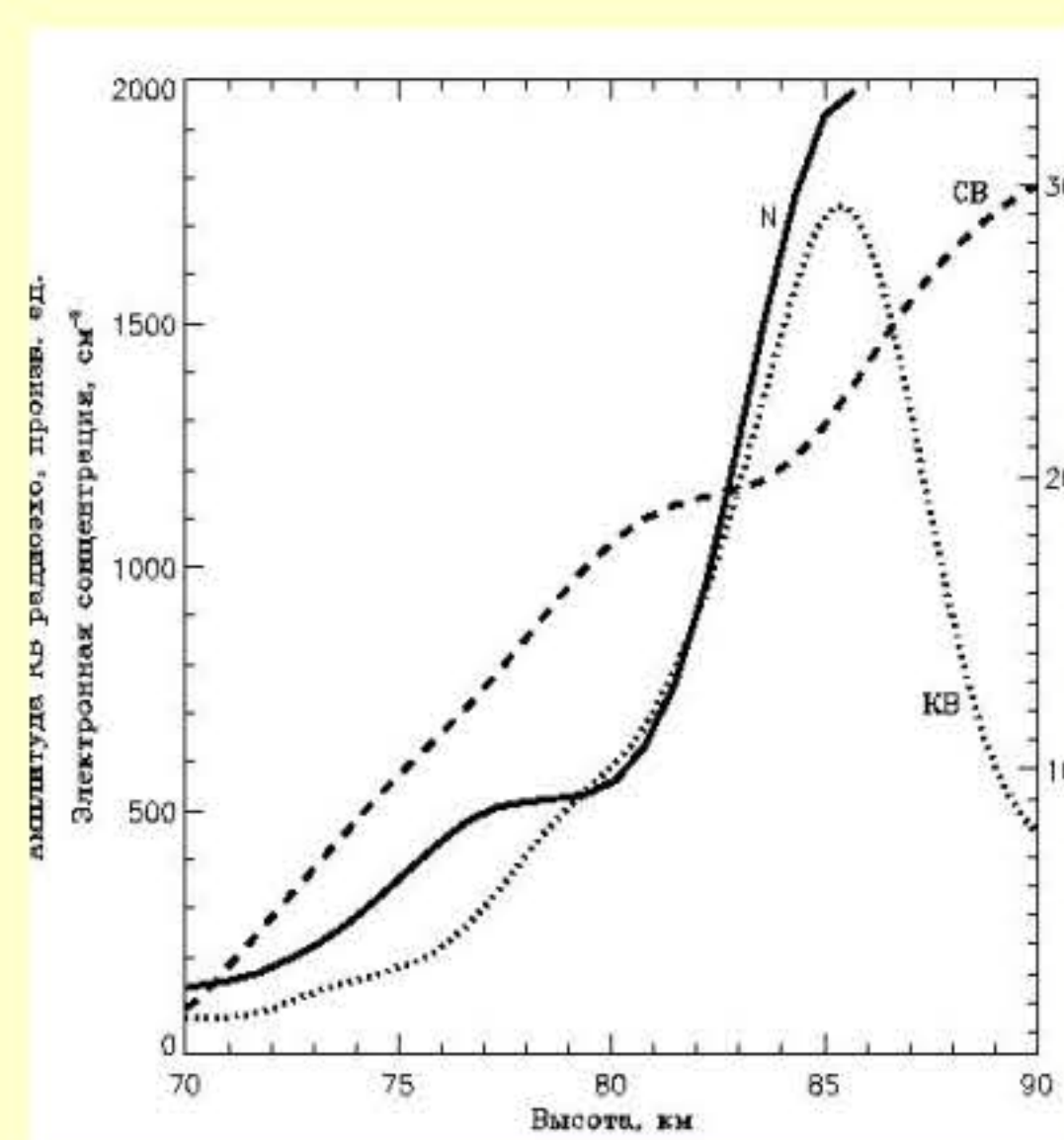
## Одновременное зондирование в КВ и СВ диапазонах

По данным СВ зондирования определялись профили концентрации электронов на высотах от 70 до 85 км с временным разрешением 8 мин. Средняя (за несколько часов) интенсивность КВ радиоэхо растет с высотой вместе с ростом электронной концентрации до высоты порядка 85 км, практически повторяя ее профиль в интервале высот 80-85 км. Уменьшение интенсивности КВ-радиоэхо на больших высотах связано с увеличением степени замагниченности электронов с высотой.

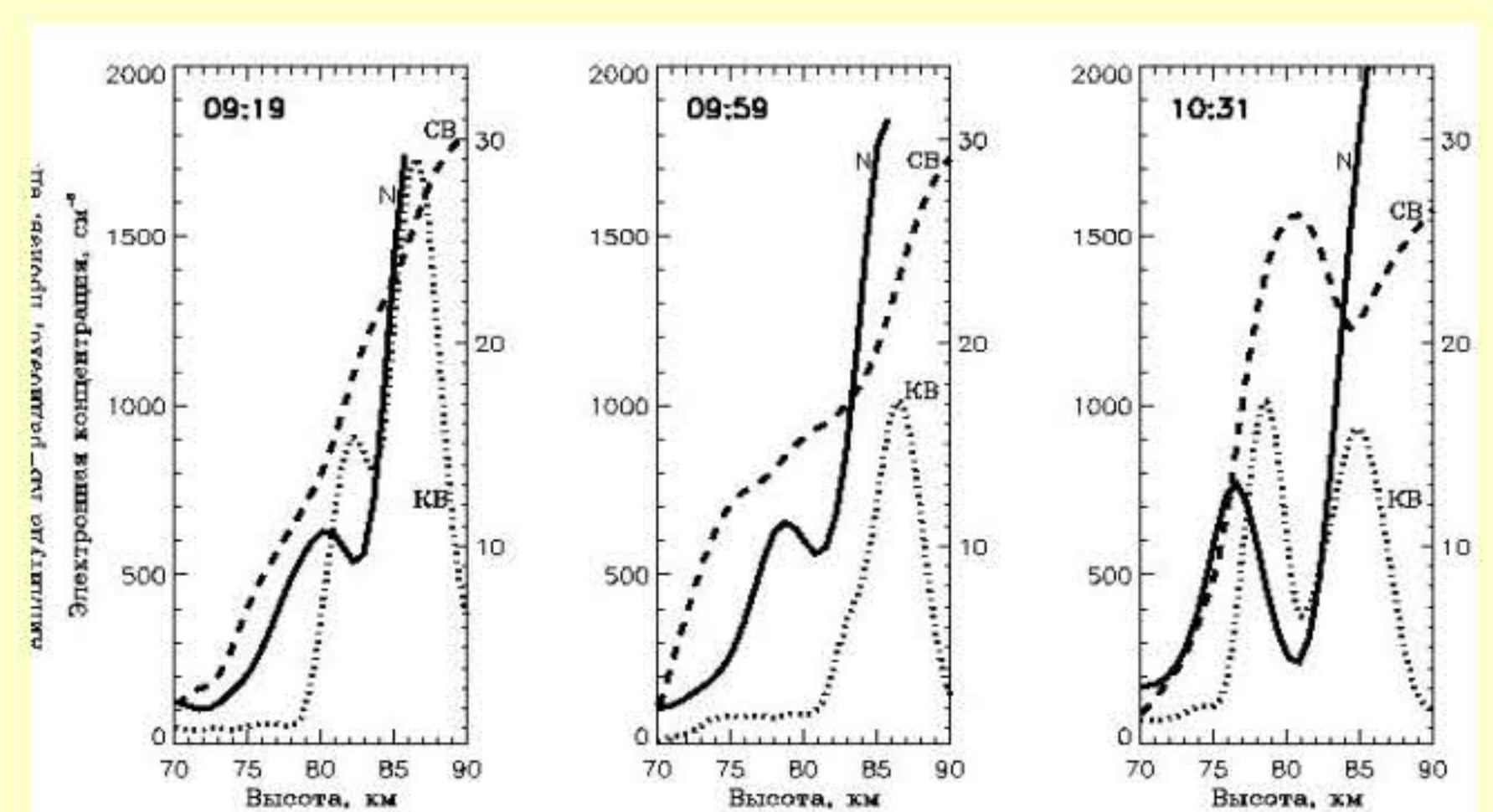


Высотно-временное распределение интенсивности радиоэхо в КВ (вверху) и СВ (внизу) диапазонах

В КВ - четко выраженная слоистая по высоте структура. В СВ - как правило, монотонный рост интенсивности, однако наблюдаются и слоистые структуры. Слои в КВ и СВ диапазонах, вообще говоря, не коррелируют друг с другом ни по времени, ни по высоте.



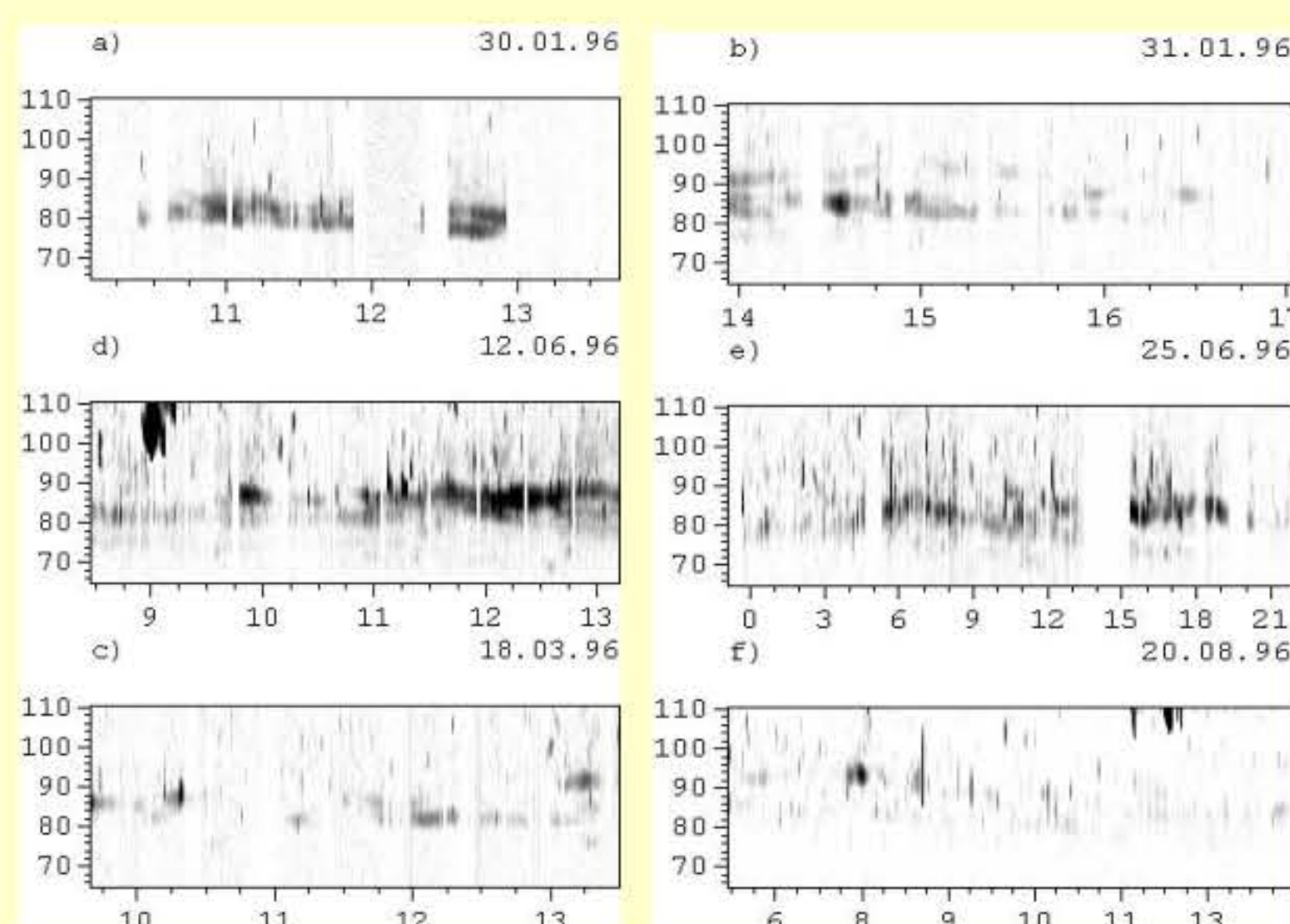
Усредненный за 4 часа профиль концентрации электронов и усредненная интенсивность радиоэхо, в КВ и СВ диапазонах (обыкновенная компонента).



Отдельные 8-минутные реализации показывают существенные различия между профилем электронной концентрации и интенсивностью радиоэхо.

Радиоотражающие слои на высотах ниже 85 км появляются только при наличии локального минимума в профиле электронной концентрации (9:19, 10:31) и располагаются в области этого минимума. Вместе с тем, наличие минимума в профиле электронной концентрации не обязательно приводит к образованию слоя в КВ-радиоотражениях (9:59).

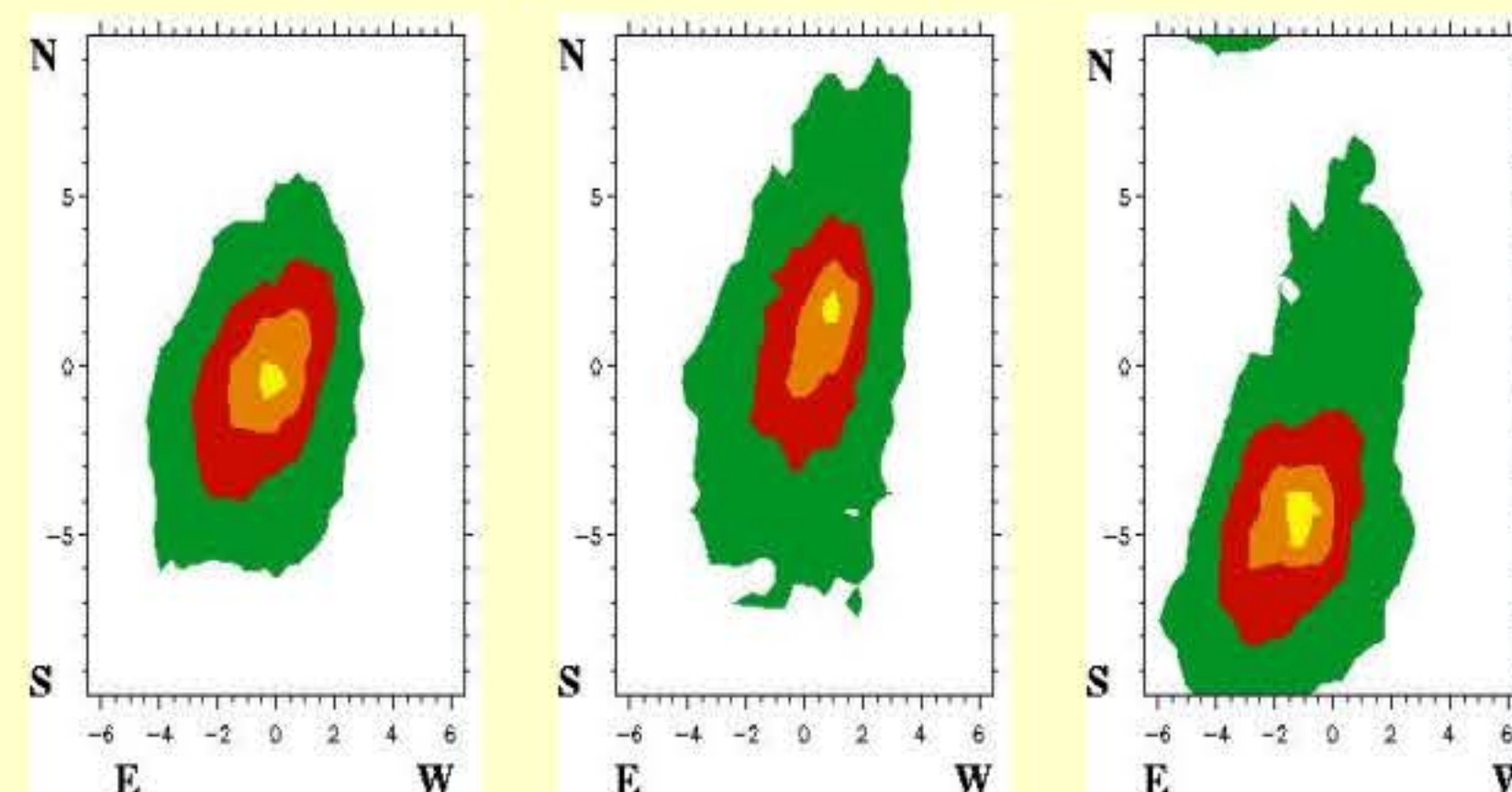
## Суточное и сезонное поведение мезосферных радиоэхо



Суточная зависимость интенсивности отраженных сигналов определяется, в основном, освещенностью мезосферы Солнцем, т. е. интенсивностью фотоионизации.

Радиоэхо наблюдаются только в светлое время суток. Для сезонного хода радиоэхо от области мезопаузы характерна полугодовая вариация: в зимний (верхние рисунки, январь) и летний (средние рисунки, июнь) периоды средняя амплитуда рассеянных сигналов значительно выше, чем в осенний (внизу справа, август) и весенний (внизу слева, март).

## Углы прихода мезосферных радиоэхо



Усредненные за время порядка 15 минут двумерные распределения углов прихода радиоэхо от мезосферного слоя в области мезопаузы, полученные 23 и 24 июля 2004 г. Контуры проведены по уровням 0.25, 0.5, 0.75 и 0.95 от максимума.

Распределения углов прихода имеют выраженный максимум, соответствующий, как правило, вертикальному направлению, и вытянуты в направлении примерно север-юг. Вариации направления на максимум распределения незначительны (менее 1 градуса от вертикали) в направлении восток-запад и гораздо более существенны (до 5 градусов от вертикали и более) в ортогональном север-южном направлении. Такое поведение может быть обусловлено вытягиванием рассеивающих неоднородностей в направлении геострофического ветра.

Для определения углов прихода радиоэхо каждая секция антенной системы ППАДД разделена на две половины в направлении восток-запад путем установки нагрузок и перемычек в фидерной системе каждого ряда диполей, а также введения дополнительной фазировочной и суммирующей системы для съема сигнала с западной половины третьей секции. Схема трехточечного приема реализована с использованием двух половин третьей секции (направление восток-запад, разнос фазовых центров 150 м) и одной (восточной) половины второй секции (направление север-юг, разнос фазовых центров 100 м). Распределение углов прихода радиоэхо определяется по разности фаз сигналов, принятых пространственно-разнесенными антеннами.



# ИССЛЕДОВАНИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ РАДИОВОЛН В ФГБНУ НИРФИ

## Километровое радиоизлучение в магнитосфере Земли

Исследования в диапазоне длинных радиоволн были начаты в ФГНУ НИРФИ с наступлением спутниковой эры еще в шестидесятых годах. Так, на первых советских научных спутниках Электрон-2 и Электрон-4 в 1964г. были установлены созданные в НИРФИ, приемники радиоизлучения в диапазоне 0,7 - 1,5 МГц. В этих экспериментах впервые было обнаружено интенсивное спорадическое излучение магнитосферы, впоследствии получившее наименование Авроральное Километровое Излучение (АКР), а также тесная корреляция интенсивности АКР с величиной потока электронов с энергиями выше 100 эВ. Интенсивность излучения на 2-3 порядка превышала интенсивность космического фона. Практически впервые было обнаружено проявление неустойчивости сильно неравновесной плазмы в магнитосфере Земли.

Обнаружение АКР дало толчок к интенсивным исследованиям явления в семидесятых годах на спутниках ISIS1, IMP6, IVP8, Voyager 2; исследования продолжаются и поныне (спутники FREYA, ИНТЕРБОЛ-2 и др). Эти исследования показали, что область генерации АКР находится на расстоянии 2-3 радиуса Земли и тесно связана с ярким явлением в энергетическом спектре электронов, получившим название "перевернутое V", а интенсивность АКР максимальна на частотах 200-300 кГц.

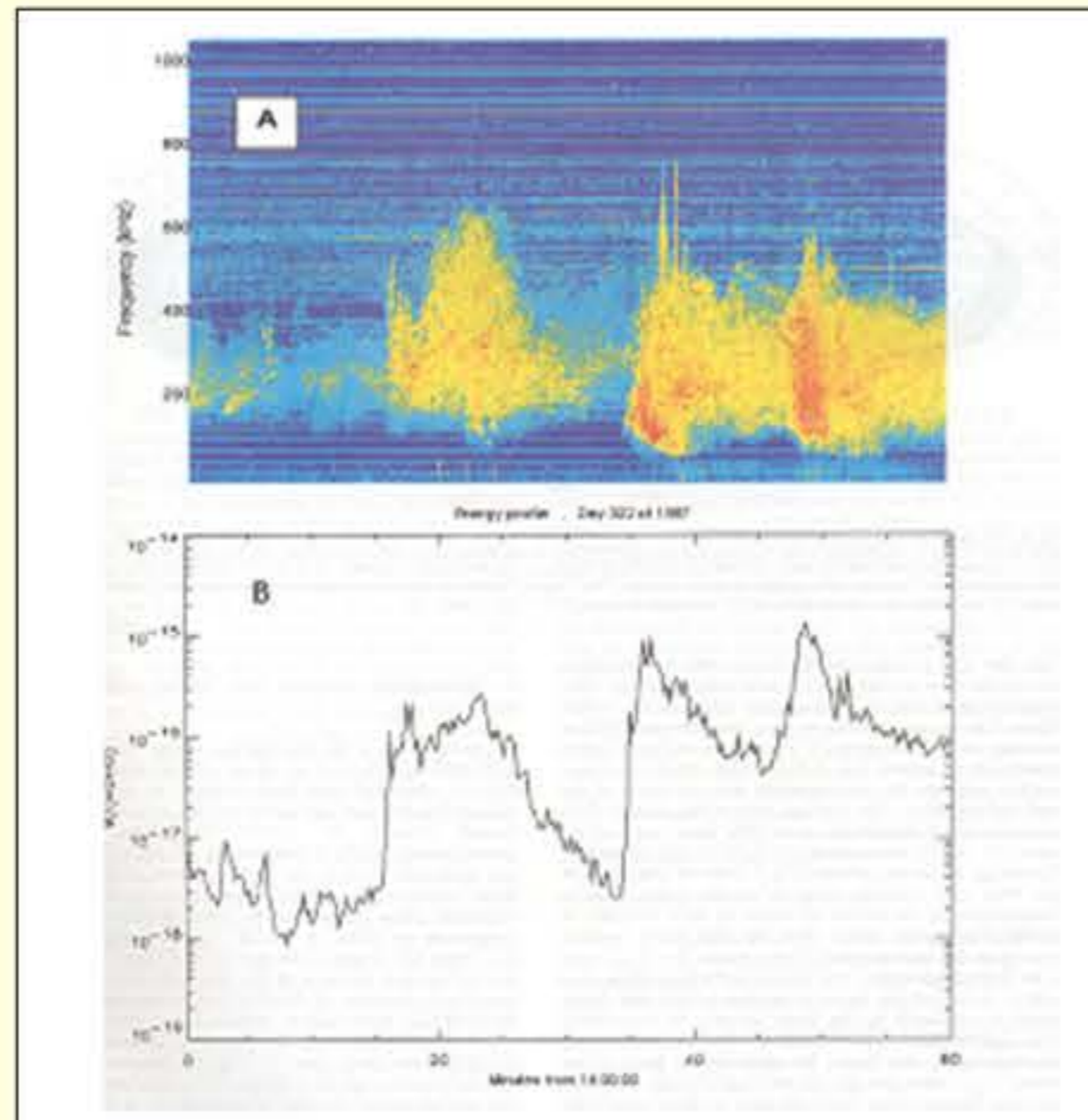


Рис.1. Пример бартерной структуры АКР, зарегистрированной на спутнике ИНТЕРБОЛ-2

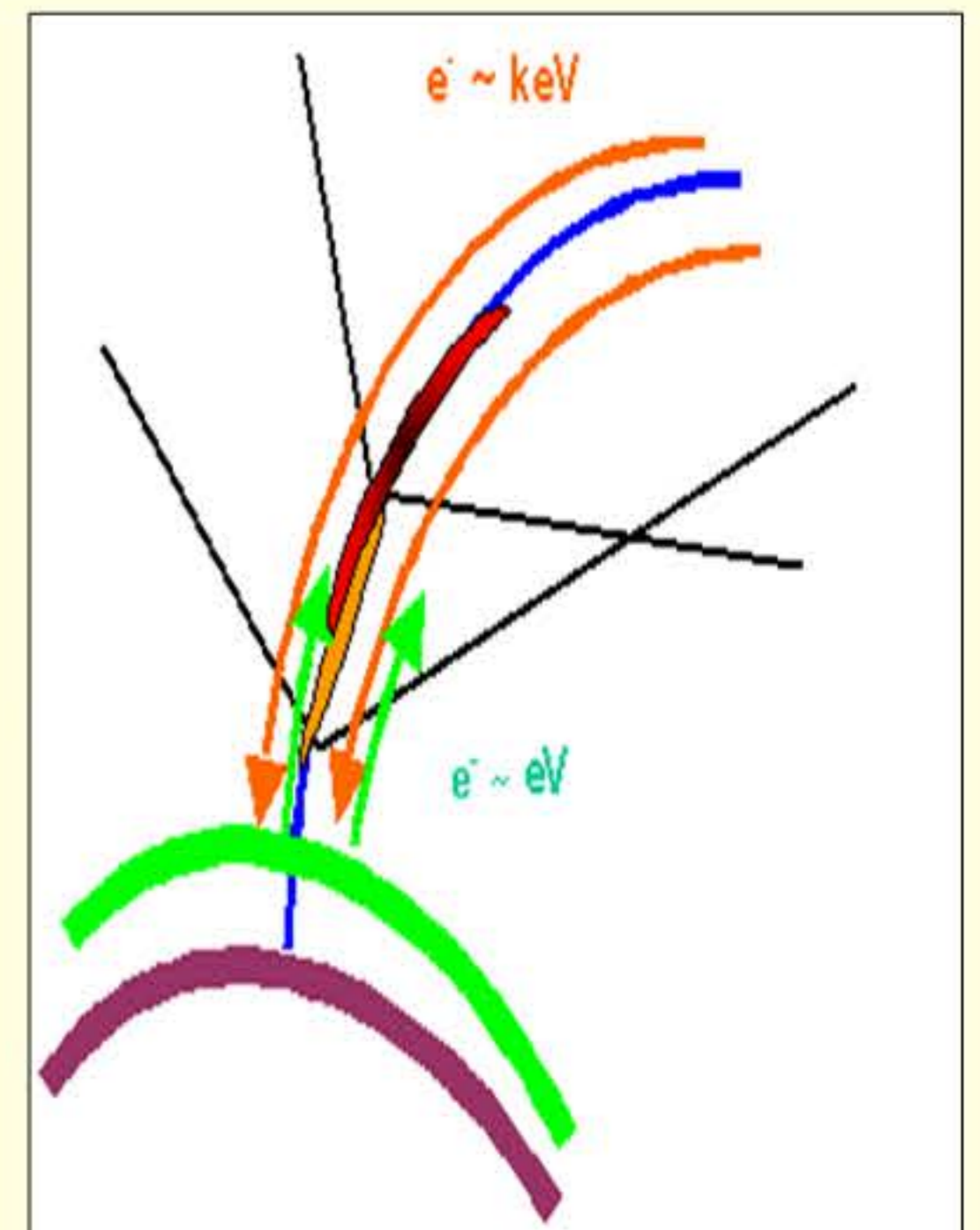


Рис.2. Схема возникновения бартеров.

## Исследования эффекта Гетманцева

Новый многолетний этап в низкочастотных исследованиях был связан с обнаружением низкочастотного радиоизлучения на частоте модуляции (сигналы комбинационных частот – СКЧ) в диапазоне нескольких килогерц, генерируемого в ионосфере в результате взаимодействия плазмы с мощным модулированным КВ-излучением. Была предложена модель генерации на основе тепловой нелинейности и модуляции квазистационарных ионосферных токов. Позднее (в 1980г.) группа ученых из НИРФИ и ПГИ получила диплом на открытие №231, а сам эффект получил название - "эффект Гетманцева" (Открытия в СССР, ВНИИПИ, М. 1981, с.25). В течение двух десятилетий "эффект Гетманцева" интенсивно и всесторонне исследовался как на мощном стенде ФГНУ НИРФИ СУРА, так и во всех мировых центрах, обладающих мощными коротковолновыми нагревными средствами (Аресибо, Тромсё, Фербенс). В настоящее время исследования продолжают на стендах HAARP (Аляска) и SPIRE (Шпицберген).

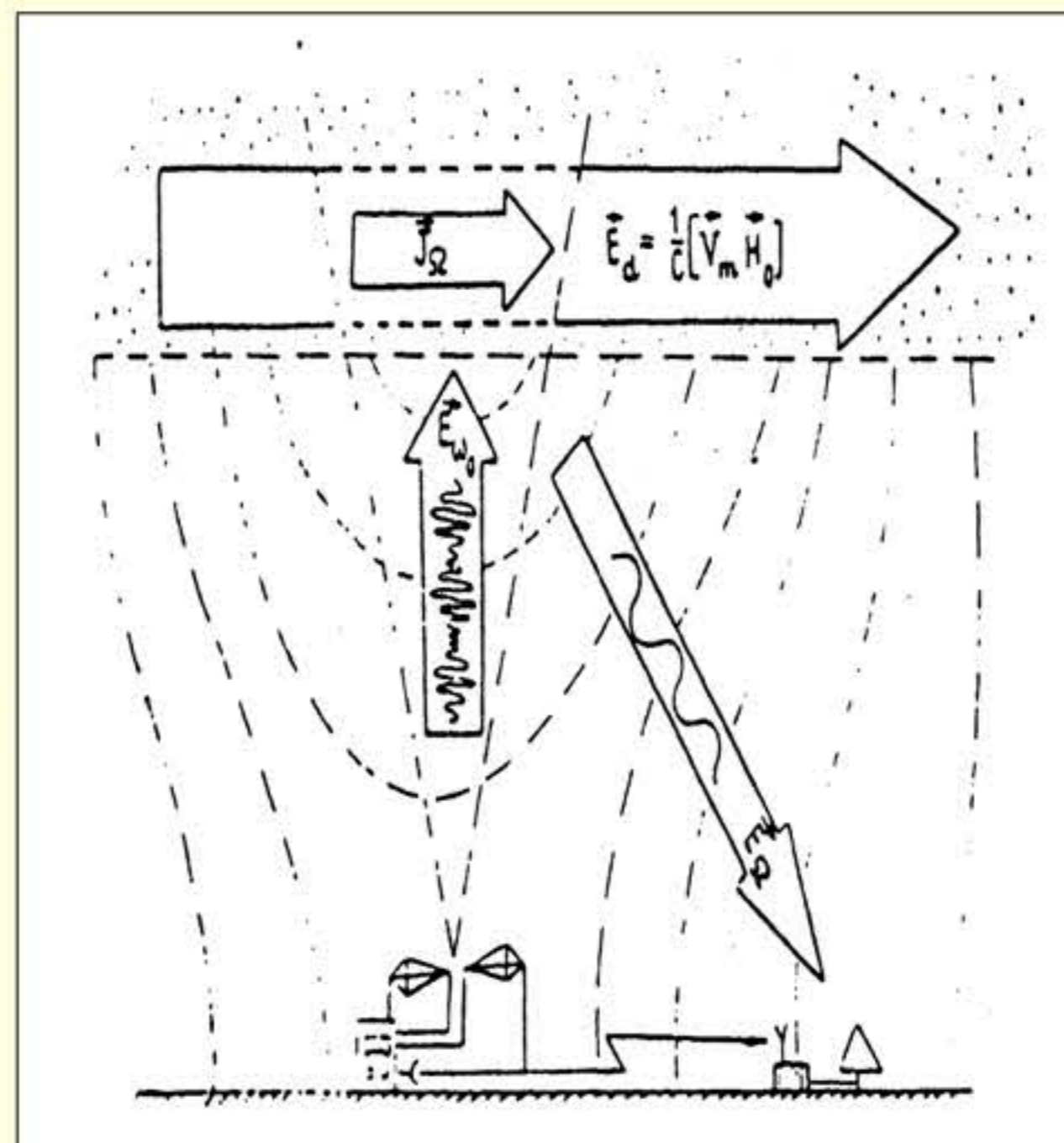
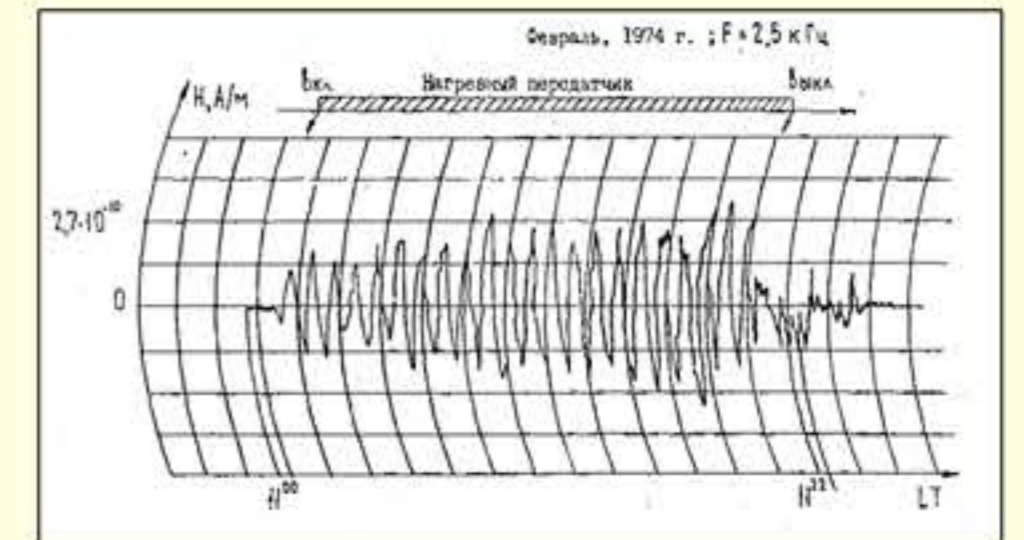
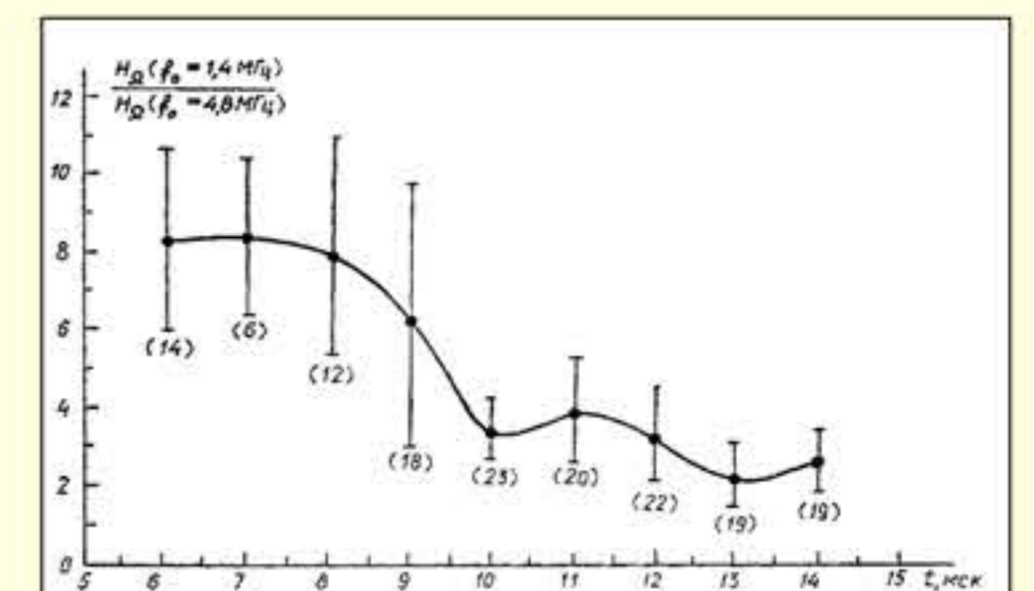


Схема эксперимента



Впервые обнаруженный сигнал



Сравнение эффективности генерации СКЧ на частотах 1,4 и 4,8 МГц.

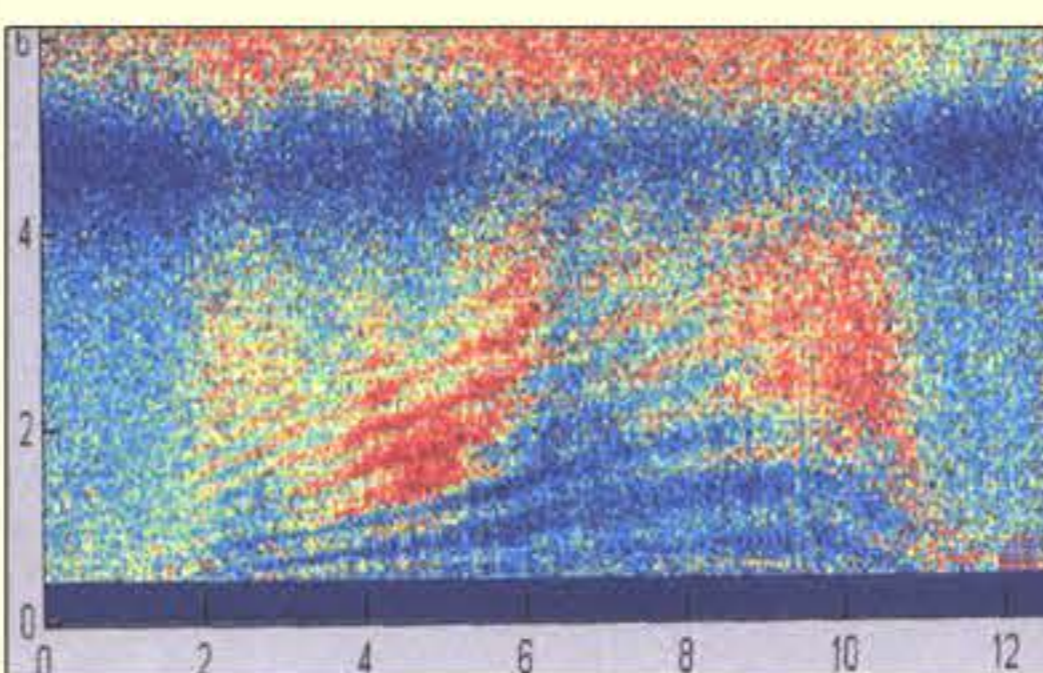
## Исследования шумов в УНЧ диапазоне –

обнаружение резонансной структуры спектра шума (РСС) – как проявления ионосферного альвеновского резонатора (ИАР), и широкополосного максимума – как проявления ионосферного резонатора на высотах 80-250 км (суб-ИАР)

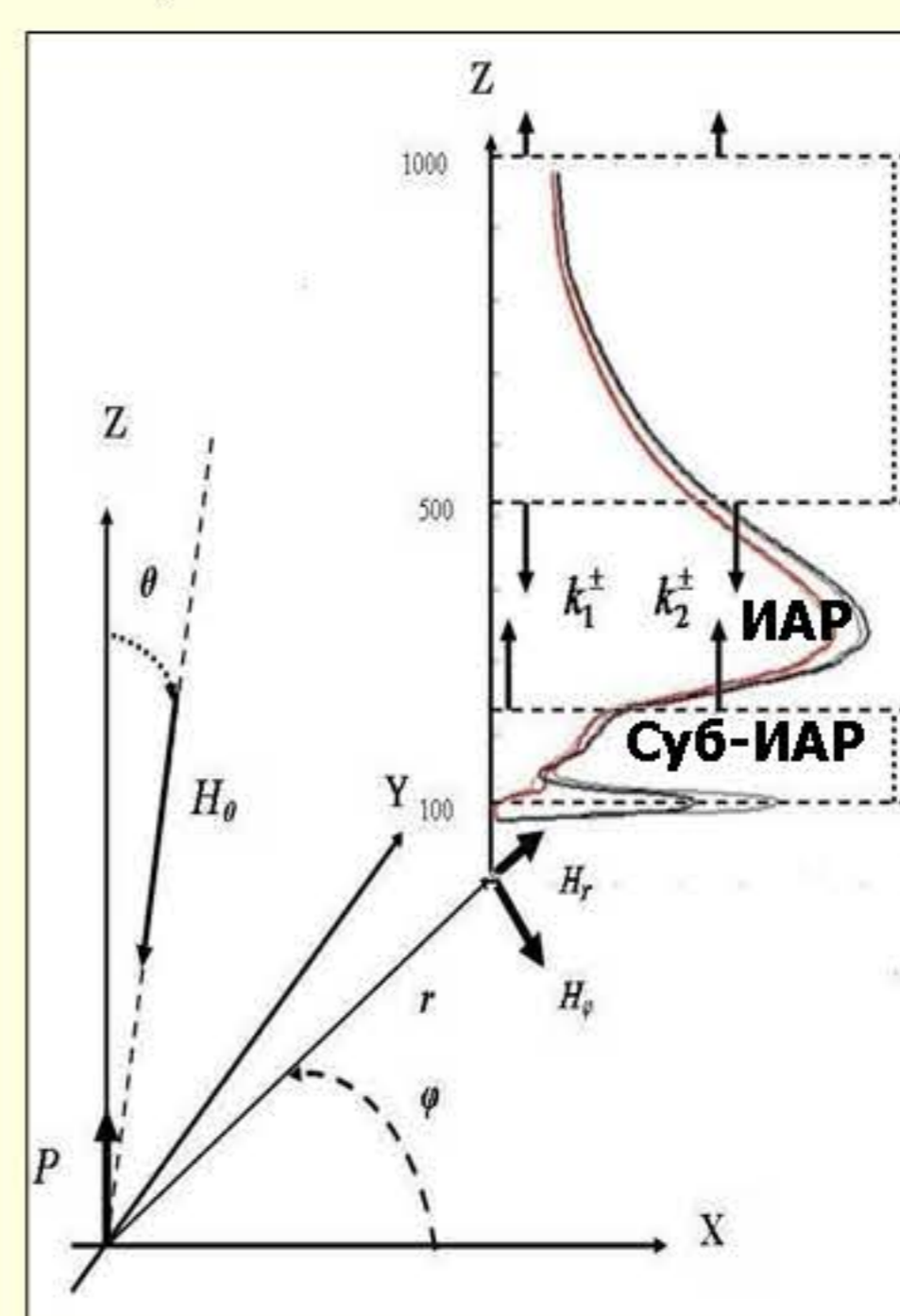
С помощью нового поколения сверхчувствительных датчиков и, опираясь на теоретические модели ионосферного альвеновского резонатора, были проведены целенаправленные исследования спектральных характеристик атмосферных шумов на частотах ниже 10 Гц. Эти исследования выявили неизвестную ранее резонансную структуру спектра (РСС) в диапазоне 0,1-10 Гц, обусловленную свойствами ионосферного альвеновского резонатора, и широкополосный спектральный максимум (ШСМ), как проявление резонансных свойств нижней ионосферы. Детально исследованы характеристики РСС, имеющие четко выраженные дневные, сезонные и солнечно-цикловые зависимости.



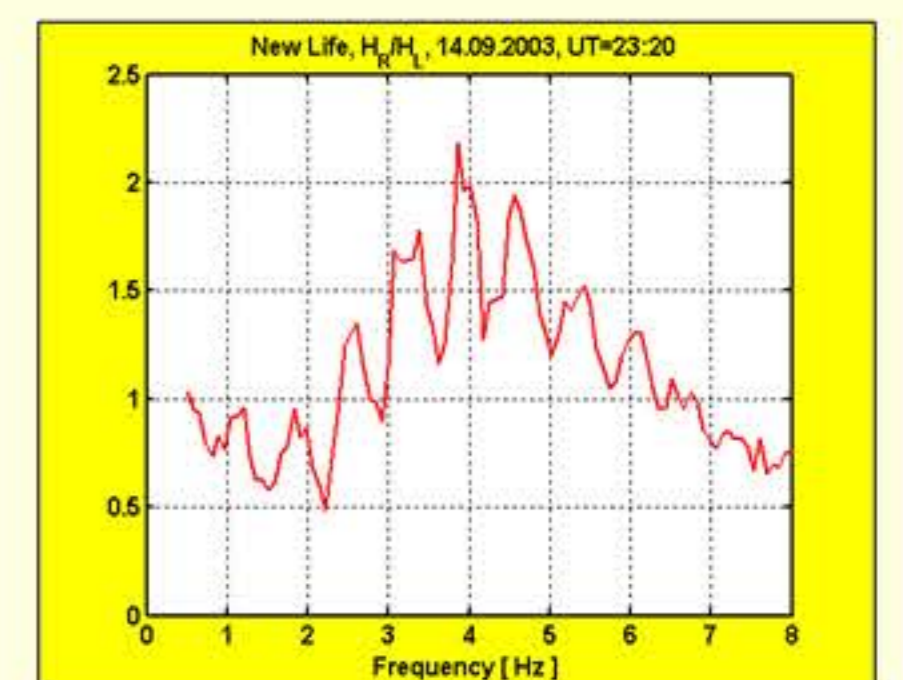
Молнии – главный источник шума в исследуемом диапазоне



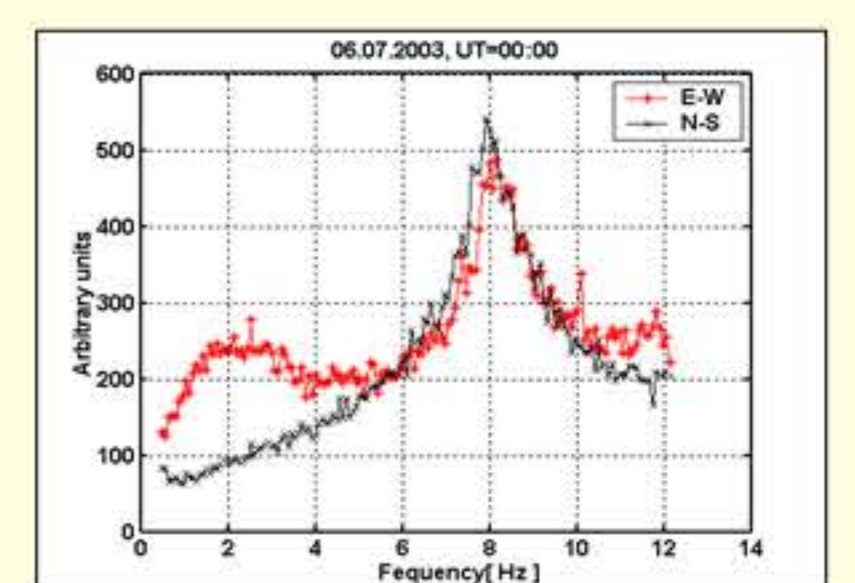
Типичная спектрограмма РСС



Теоретическая модель



Спектр РСС



Широкополосный спектральный максимум





# АППАРАТУРА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЕСТЕСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ШУМОВ И АНТРОПОГЕННЫХ СИГНАЛОВ В БЛИЖНЕМ КОСМОСЕ

## Международный космический проект «Резонанс»

Проект РЕЗОНАНС направлен на исследования взаимодействия волн и частиц во внутренней магнитосфере Земли. В проекте принимают участие Россия, США, Франция, Германия, Польша, Украина, Финляндия, Болгария.

Разработан оригинальный трехкомпонентный индукционный датчик магнитного поля, работающий в диапазонах низких, средних и высоких частот, предназначенный для установки на космические аппараты проекта «Резонанс». Конструктивно датчик представляет собой три взаимно перпендикулярные одновитковые рамки с возможностью складывания всей системы в одной плоскости. Согласующее устройство между рамкой и предварительным усилителем выполнено в виде бесконтактного трансформаторного датчика тока. Для корректировки амплитудно-частотной характеристики в средней части рабочего диапазона частот использована обратная связь. Запуск четырех космических аппаратов «Резонанс» планируется в 2014 году на эллиптические магнитосинхронные орбиты, сопряженные со станцией HAARP (США, Аляска).

Аналоги, запущенные в космос, отсутствуют.

### Конструктивные требования:

Габаритные размеры: Высота не более 600мм;  
Максимальный диаметр не более 550мм;  
Масса: не более 1000г.

### Требования назначения:

Блок магнитных датчиков предназначен для:  
- изучения взаимодействия волн и частиц во внутренней магнитосфере Земли;  
- исследования свойств источников Аврорального Километрового Радиоизлучения (АКР);  
- изучения свойств АКР вне источника;  
Технические характеристики блока магнитных датчиков:  
- частотный диапазон – 10 кГц – 10 МГц;  
- Уровень шума на частоте 1 МГц не выше  $1 \text{ фТл}/(\text{Гц})^{1/2}$  – уровень космического шумового фона.



Технологический образец

## Федеральная целевая программа России «Создание и развитие системы мониторинга геофизической обстановки над территорией Российской Федерации на 2008-2015 годы»

Разработан малогабаритный индукционный датчик магнитного поля для диапазонов крайне низких, сверхнизких и очень низких частот. Конструктивно датчик представляет собой многосекционную катушку с сердечником в одном корпусе с предварительным усилителем. Особенностью сердечника являются малые потери на высоких частотах за счет многослойной конструкции. Секционирование приемной катушки способствует уменьшению собственной емкости и росту частот паразитных резонансов. Для выравнивания амплитудно-частотной характеристики использована обратная связь по магнитному полю.

Магнитный датчик предназначен для установки на каждый из четырех однотипных КА «Ионосфера», объединенных в орбитальную группировку для проведения мониторинга геофизической обстановки («космической погоды») путем измерения основных параметров процессов в атмосфере, ионосфере и магнитосфере, а также на КА «ЗОНД». Запуск КА «Ионосфера» запланирован на 2014 г. на солнечно-синхронные круговые орбиты в две орбитальные плоскости (по два КА в каждой плоскости) с высотой 820 км. КА «Зонд» будет выведен в 2015 году на круговую солнечно-синхронную околоземную орбиту высотой порядка 650 км.

Ближайшие аналоги:

- IMSC (КА «DEMETER», ФРАНЦИЯ);  
- LEMI-106I (ЛЬВОВСКИЙ ЦЕНТР ИНСТИТУТА КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ);  
- SCM (КА «THEMIS», США).



Технологический образец

### Технические характеристики магнитного датчика:

- диапазон частот 1 Гц – 20 кГц;  
- уровень шума 1 Гц – 10 пТл /  $(\text{Гц})^{1/2}$   
100 Гц – 100 фТл /  $(\text{Гц})^{1/2}$   
1 кГц – 10 фТл /  $(\text{Гц})^{1/2}$   
10 кГц – 10 фТл /  $(\text{Гц})^{1/2}$ ;  
- форма передаточной характеристики датчика - линейно-плоская с частотой перегиба 100 Гц;  
- неравномерность амплитудно-частотной и фазово-частотной характеристик датчика не хуже 1 дБ и 3 угловых градусов;  
- уровень сигнала на плоской части передаточной характеристики не более 10 нТл.

### Конструктивные требования:

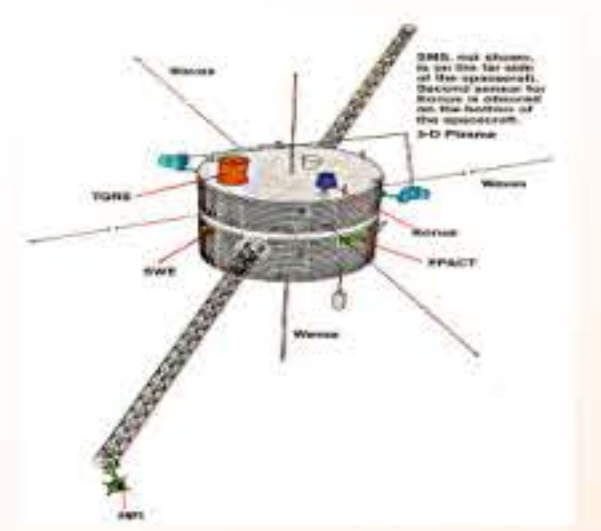
Длина не более 300мм  
Масса не более 300г.



# ДЕКАМЕТРОВОЕ РАДИОЗОНДИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ БЛИЖНЕГО КОСМОСА

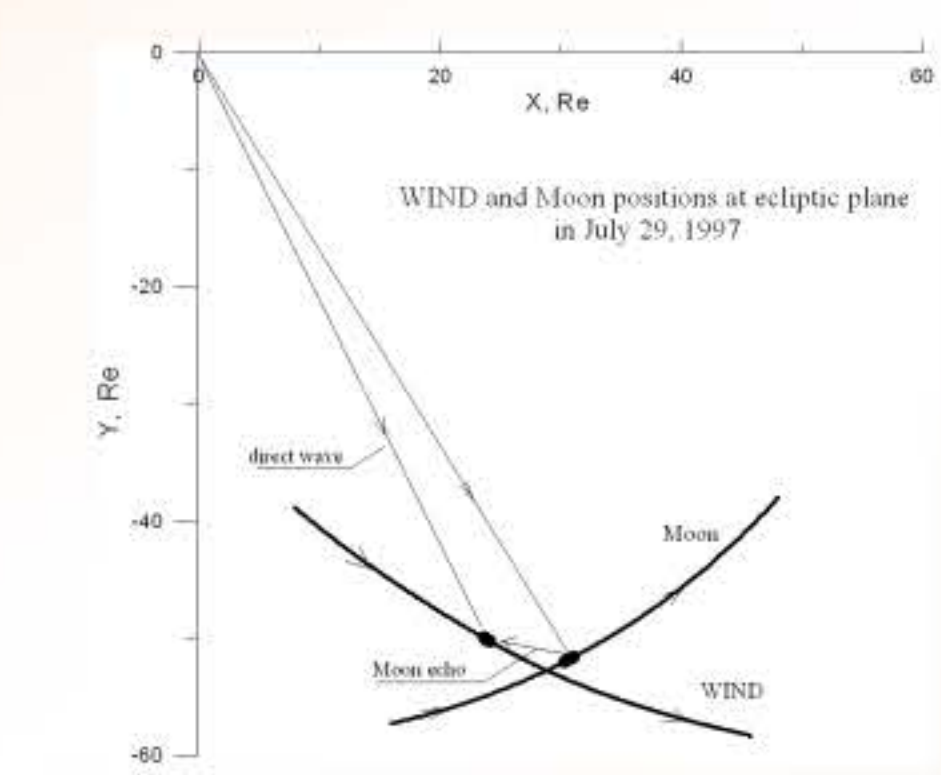
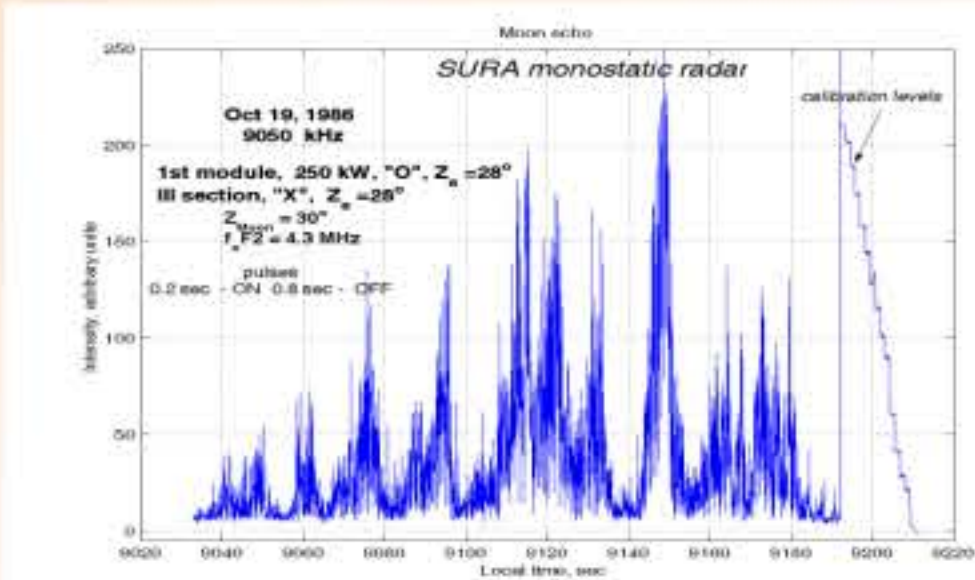


При работе на частотах выше критических частот ионосферы **стенд СУРА** представляет собой **передающий модуль радара с эффективной мощностью излучения до 100 МВт**, что позволяет использовать его для **исследований объектов ближнего космоса (околоземная плазма, Луна, солнечный ветер, корональные выбросы масс)** методами радиозондирования.



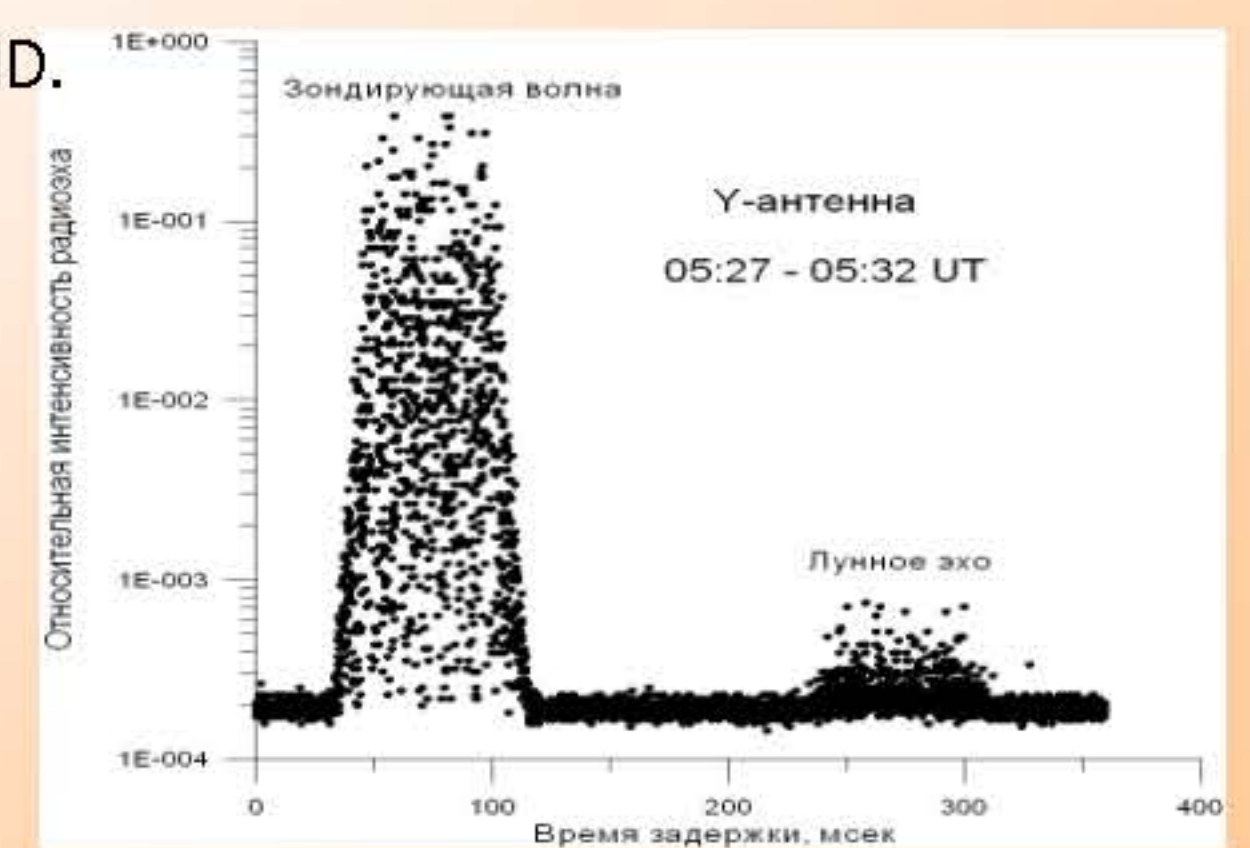
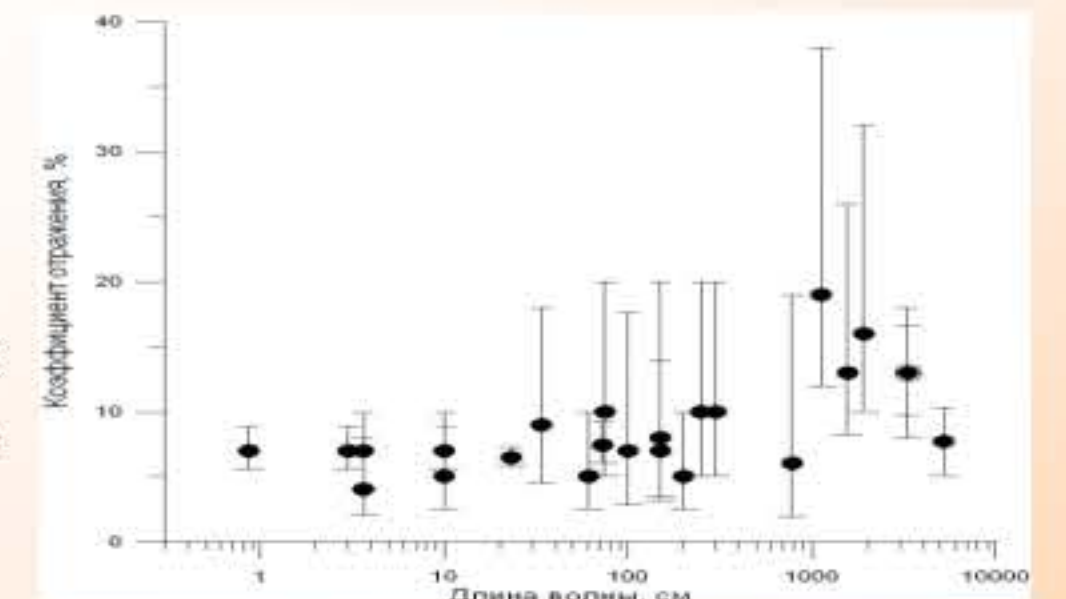
В радарных исследованиях прием сигналов радиоэха может производиться как на удаленную антенну, так и на приемно-передающую антенну стенда ППАДД. Обе эти схемы были реализованы **в экспериментах по радиозондированию Луны в малоизученном диапазоне ниже 10 МГц**. В качестве удаленного приемного модуля использовались радиотелескопы украинской декаметрового системы URAN и космический аппарат NASA WIND.

В 1984-1993 г.г. в исследованиях Луны в схеме моностатической локации (эффективная мощность излучения 18 МВт, чувствительность приема  $3 \cdot 10^{-22}$  ВТ·м<sup>-2</sup>), впервые был измерен **радарный поперечник Луны на рекордно низких для наземных измерений частотах 9,31; 9,05 и 5,83 МГц**.

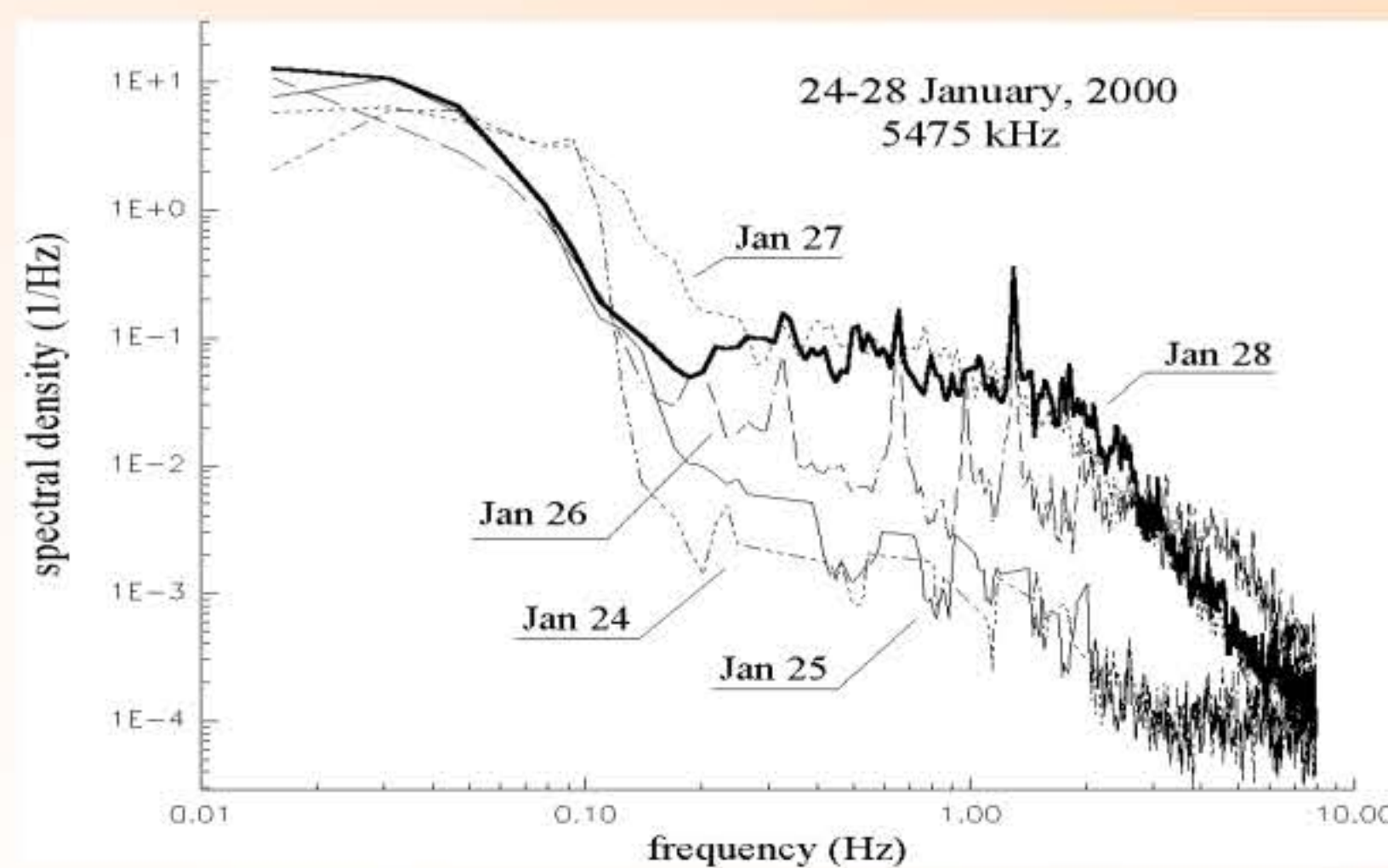
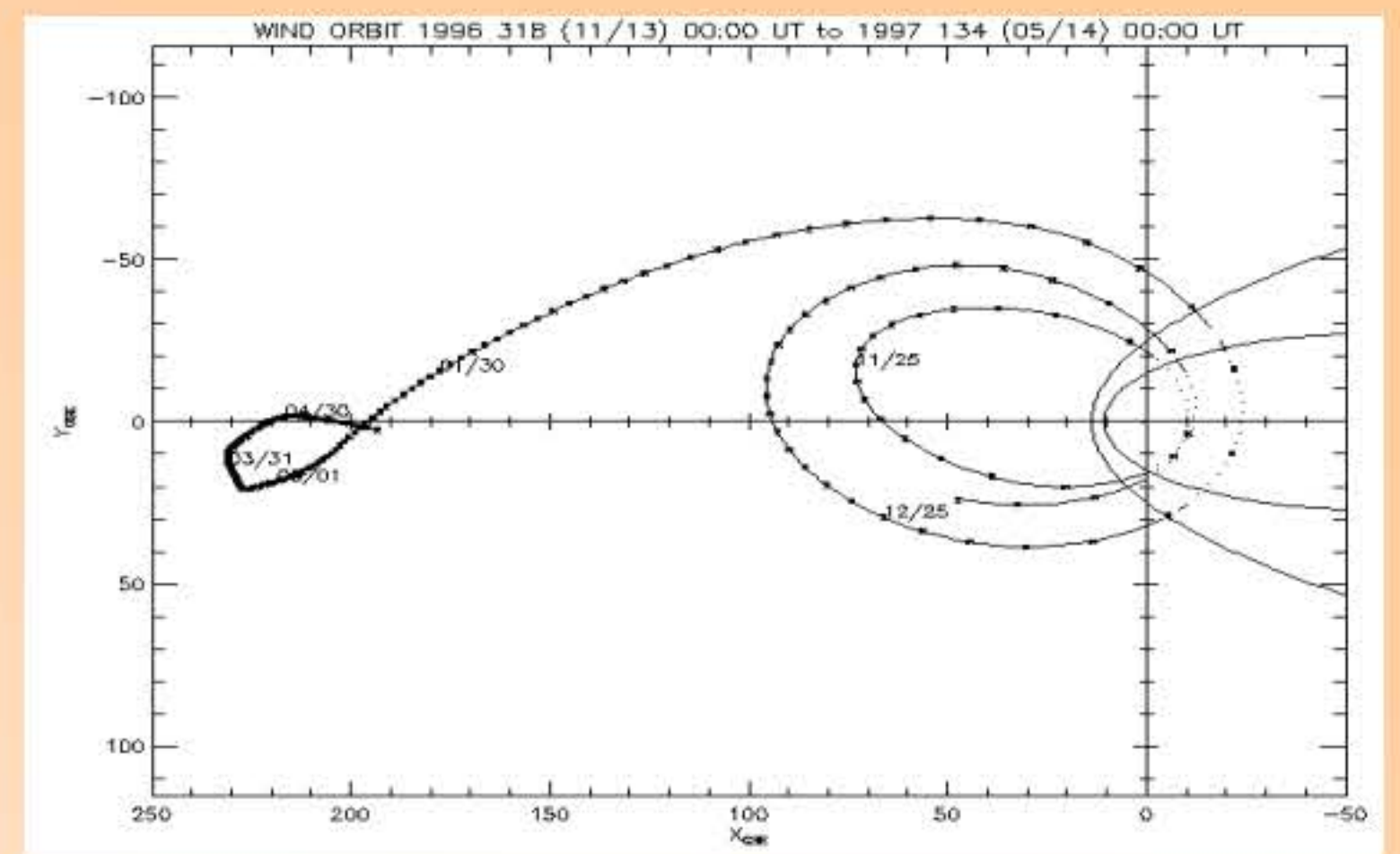


В 1997 г. проведены первые эксперименты по **бистатической локации Луны** с использованием КА WIND. Во время пролета аппарата мимо Луны на расстоянии 8 лунных радиусов его бортовой приемник WAVES RAD2 зарегистрировал прямые и отраженные сигналы на частоте 8,9 кГц.

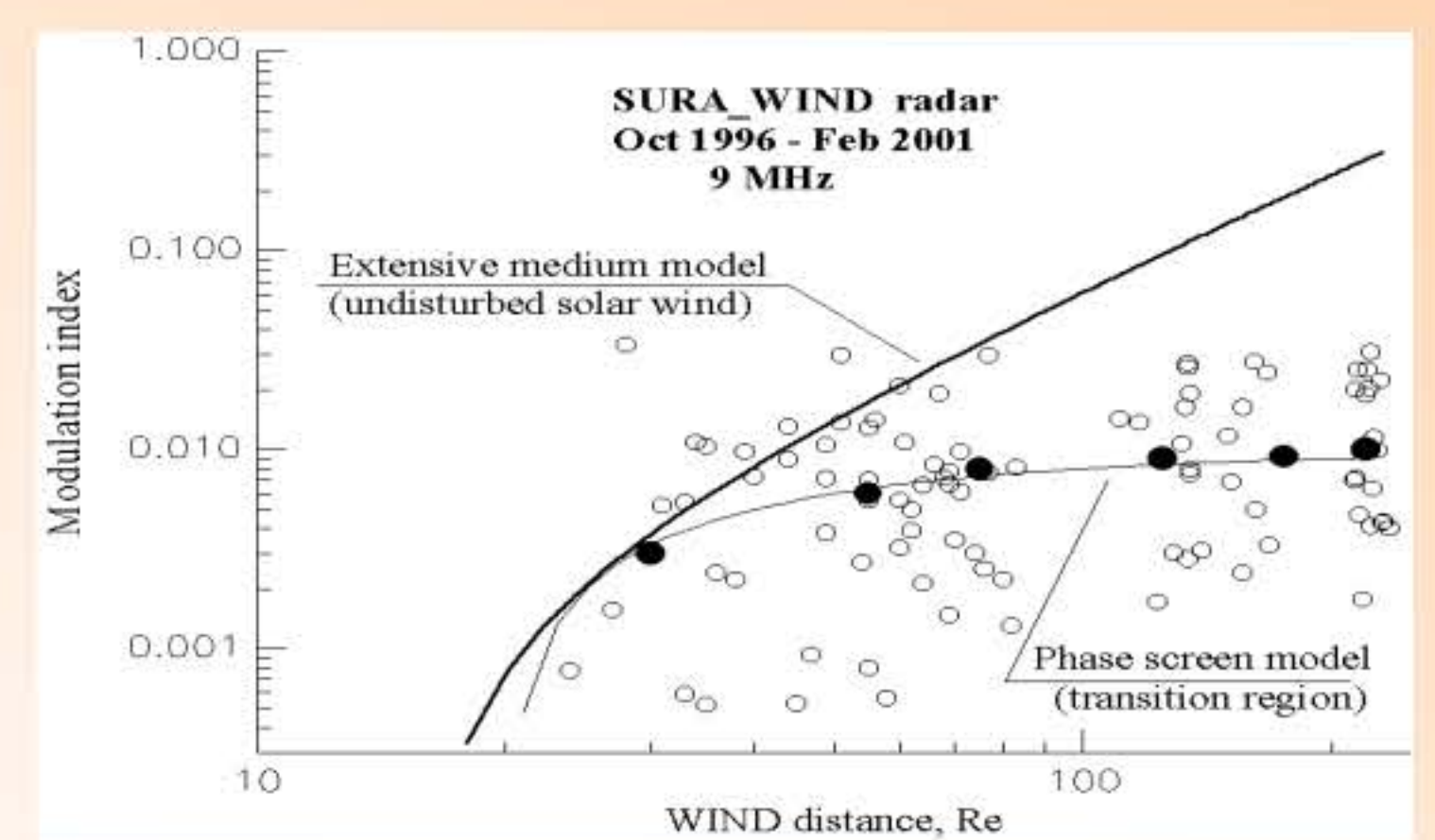
Сделана **оценка радарного поперечника Луны в диапазоне 9 МГц, свободная от влияния эффектов прохождения радиоволн через ионосферу Земли**. Получено **независимое доказательство усиления отражательных свойств лунной поверхности в декаметровом диапазоне волн**.



С августа 1995 г. после вывода в космос космического аппарата WIND, способного регистрировать КВ излучение, успешно функционирует **бистатический радар СУРА- WIND**. Сигналы стенда весьма чувствительны к параметрам среды распространения, что открывает эффективный способ **диагностики околоземной и межпланетной плазмы на трассе Земля – КА**.

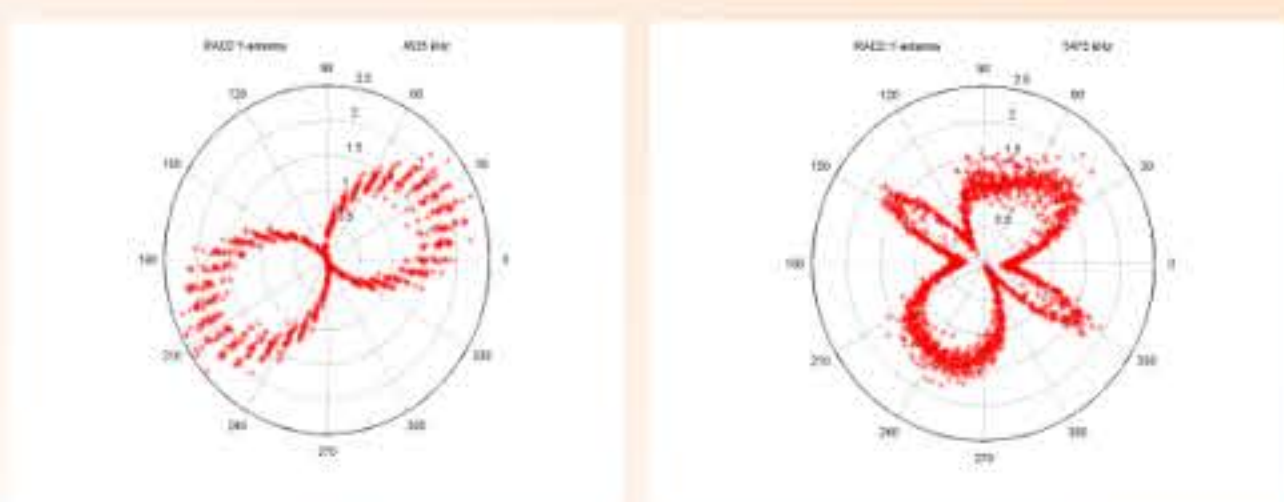
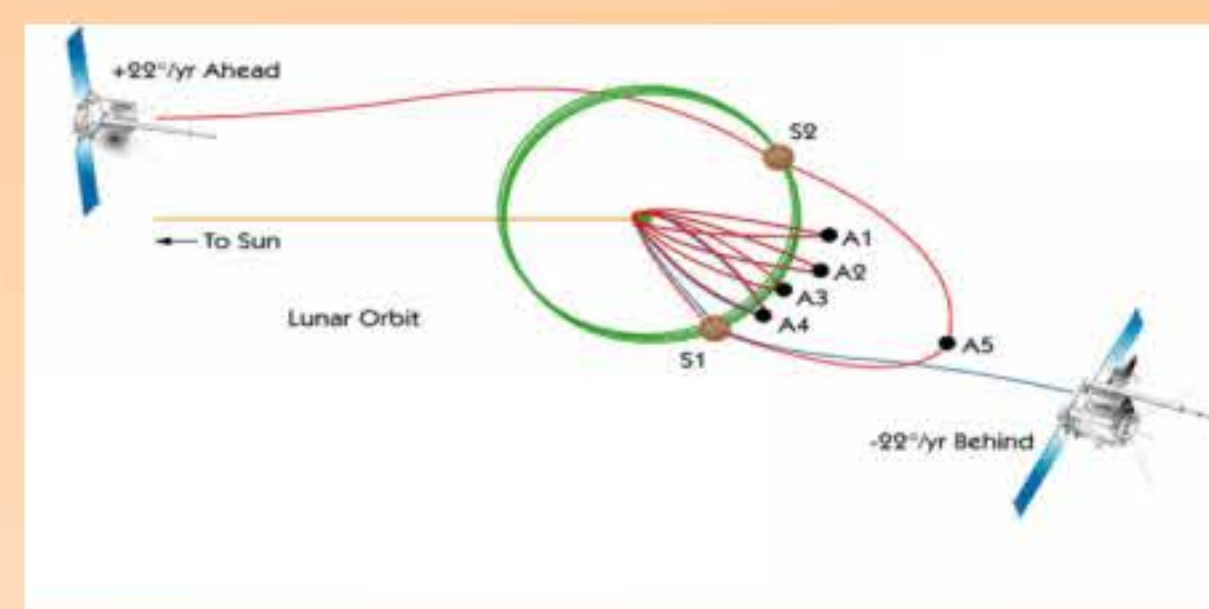


В сеансах, когда **WIND находится за пределами магнитопаузы**, в принятых сигналах возникают быстрые флуктуации, а в спектре мерцаний **формируется вторичный максимум** вблизи частот  $\sim 1$  Гц, обусловленный **рассеянием радиоволн на облаках солнечного ветра с масштабами  $\sim 40-200$  км**.

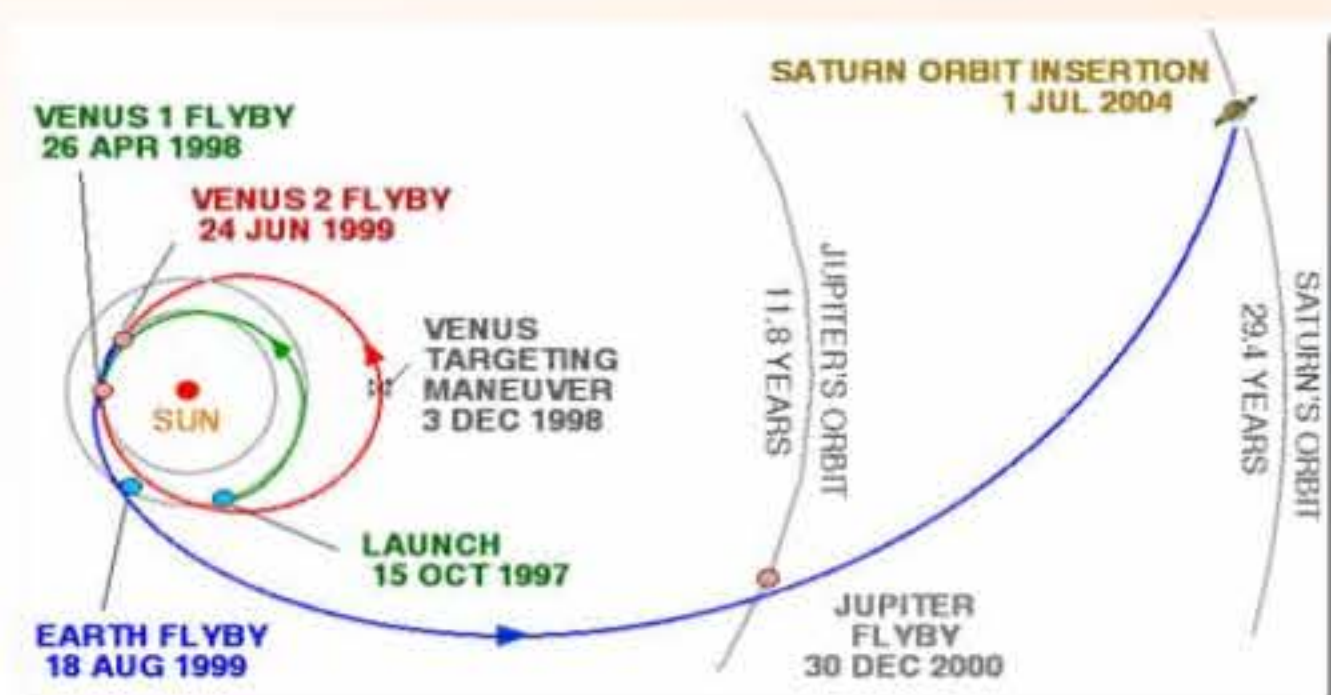
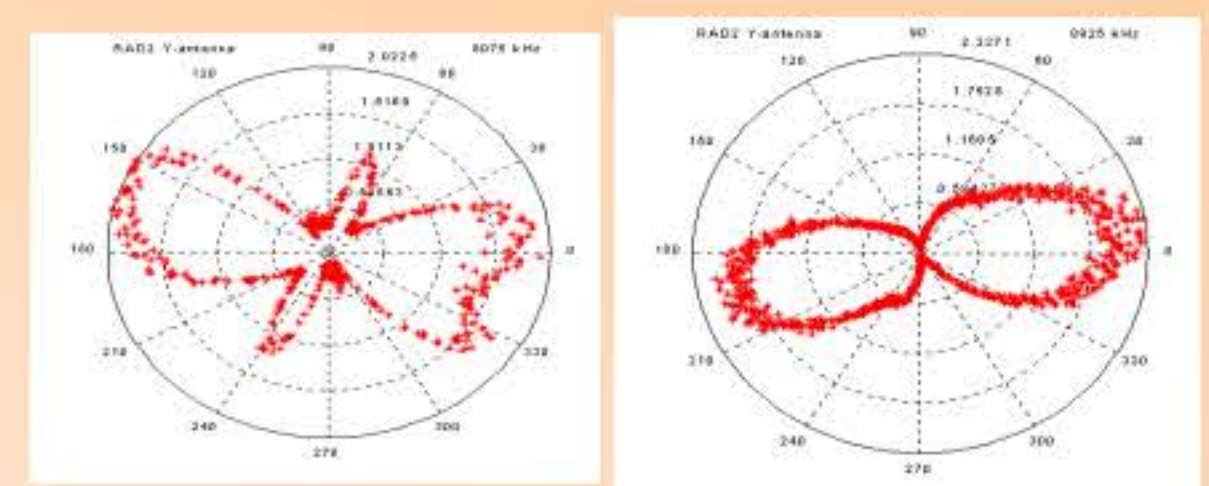


Установлено, что **основной вклад в наблюдаемые межпланетные мерцания сигналов СУРЫ вносит переходная область** между магнитопаузой и отошедшей ударной волной солнечного ветра. Получена **база данных о мелкомасштабных неоднородностях переходной области** на интервале 11-летнего цикла солнечной активности, представляющая интерес для развития **механизмов формирования плазменной турбулентности при взаимодействии солнечного ветра с магнитосферой Земли**.

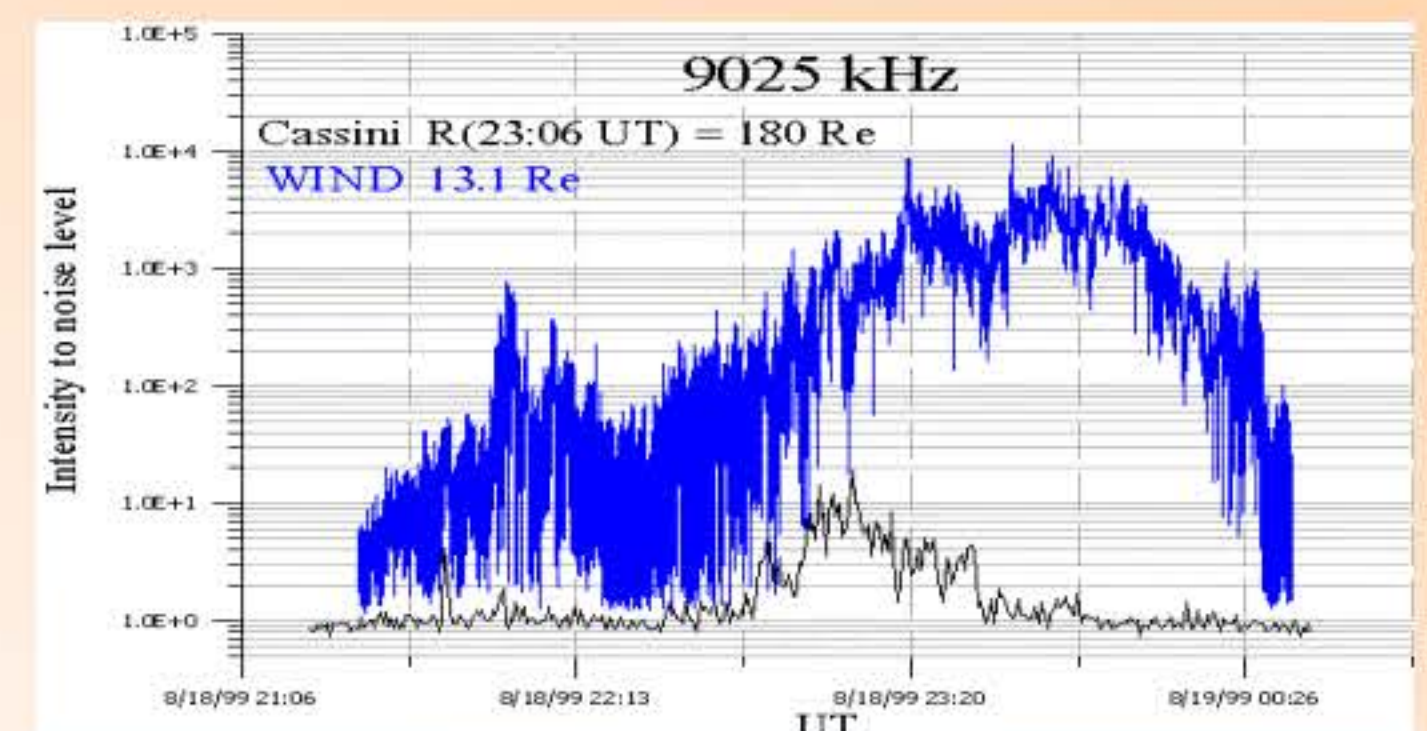
Сигналы стенда доминируют над уровнем космических шумов вплоть до расстояний порядка 10 млн км и обладают контролируемыми характеристиками (средняя мощность, поляризация, частотно-временная кодировка), что весьма удобно **для калибровок приемной аппаратуры удаленных космических аппаратов**.



В 1997 – 1999 г.г. в сеансах СУРА- WIND были **измерены диаграммы направленности** вращающейся 15-м антенны КА WIND на частотах 4525, 5475, 8075 и 8925 кГц



а также сделана **абсолютная калибровка радиоприемника Cassini** в диапазоне 9 МГц вблизи антенного резонанса во время пролета этого КА в августе 1999 г. на его пути к планете Сатурн.



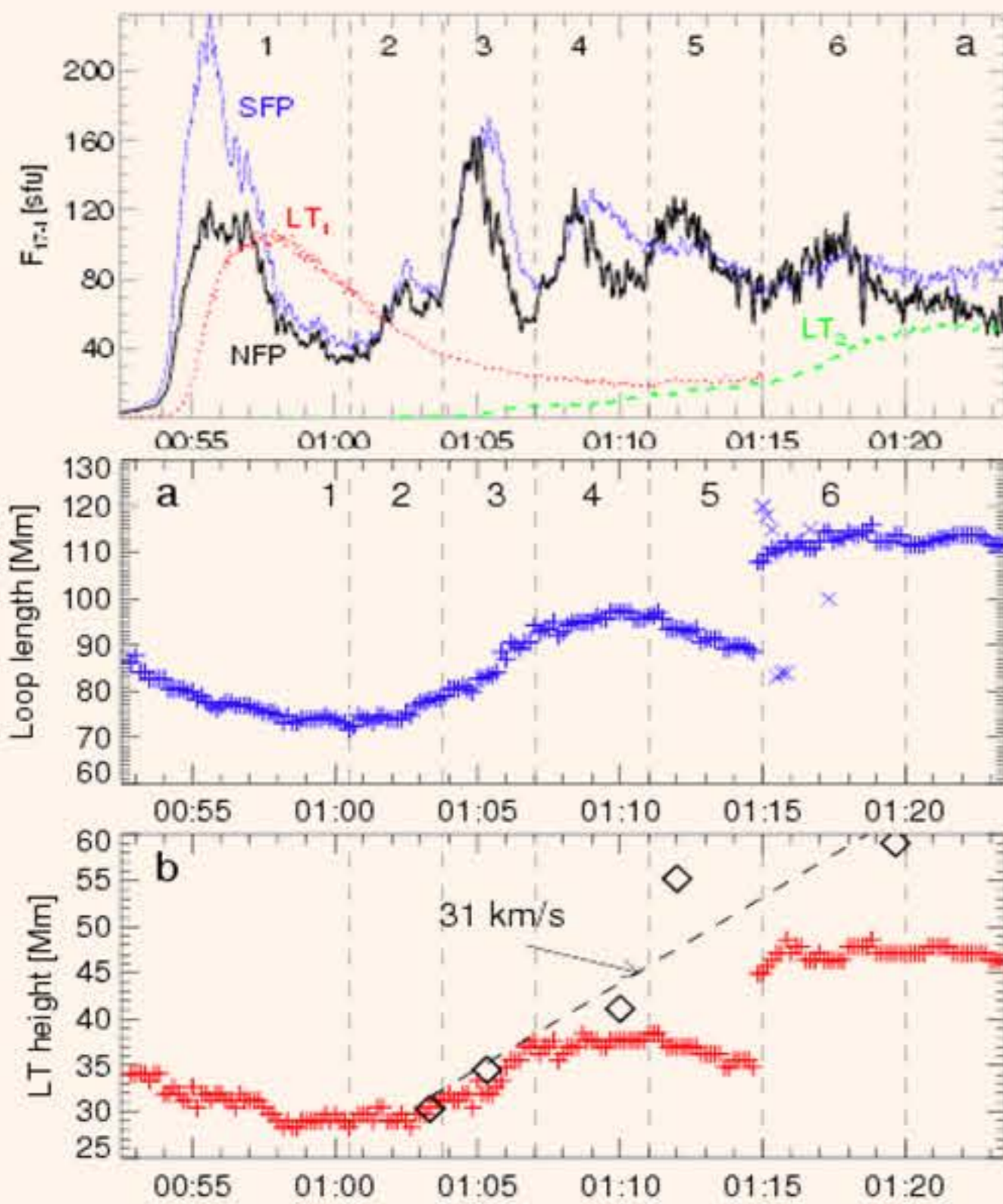
Достигнута договоренность о **калибровке радиоприемной аппаратуры двух идентичных космических аппаратов** на начальной стадии уникального проекта STEREO с ожидаемым выводом в космос в августе 2006 г.



# ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЯВЛЕНИЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ ПО РАДИОДАНЫМ

## РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ В СОЛНЕЧНОЙ ПЛАЗМЕ, И МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛНЕЧНЫХ СТРУКТУР

### ПАРАМЕТРЫ КОРОНАЛЬНЫХ ПЕТЕЛЬ

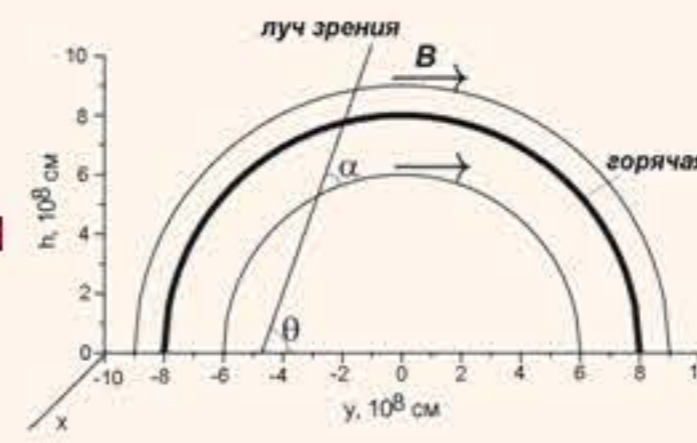


Впервые в микроволновом диапазоне обнаружен эффект монотонного уменьшения длины и высоты системы вспыхивающих петель, а также расстояния между их основаниями, в ходе начальной фазы двухленточной вспышки.

Этот эффект не был предсказан стандартной моделью вспышки.

На рисунках представлены временные профили

- 1) интенсивности микроволнового излучения из вершины (DLT), северного (NFP) и южного (SFP) оснований вспыхивающей петли (верхняя панель);
- 2) длины (а) и высоты (b) петли. В течение первого пика интенсивности отчетливо видно, что длина и высота петли сокращаются.



Расчеты спектрально-поляризационных характеристик (в том числе интегральных) теплового циклотронного излучения трехмерной модели корональной петли в виде тора позволили выявить новые эффекты, которые отличают источник, содержащий горячую петлю, от стандартного источника s-компоненты:

- спектр излучения тонкой петли содержит циклотронные линии на длинах волн, соответствующих гармоникам электронной гирочастоты, отвечающих магнитному полю в горячей петле; спектр относительно толстой петли имеет один обобщенный максимум, смещенный в сторону длинных волн от максимума фонового источника;
- при определенных соотношениях между параметрами петли и окружающей короны в некотором интервале частот преобладающим становится излучение обыкновенной волны; это приводит к эффекту инверсии поляризации по диапазону.

При наличии полной информации о спектре и поляризации микроволнового излучения источника и их особенностях можно проводить диагностику физических условий в корональной петле, в первую очередь, величин магнитного поля.

Спектрографические наблюдения позволили оценить основные физические параметры вспыхивающих петель

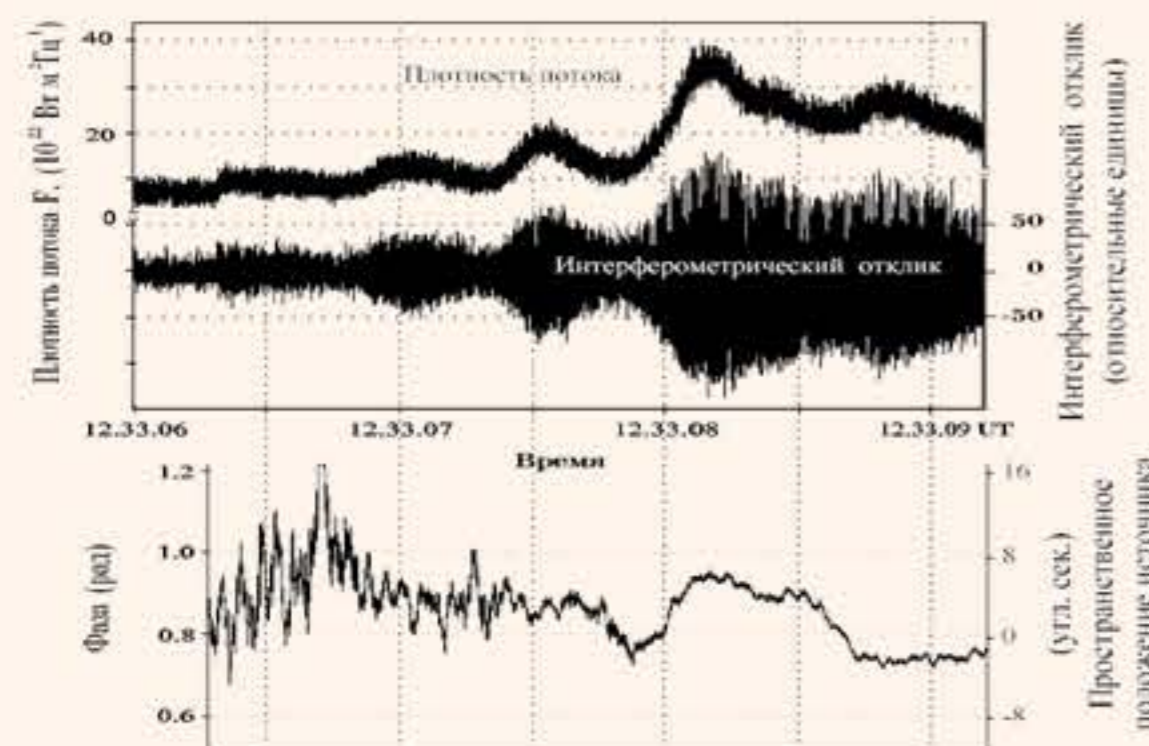
по микроволновым ступенчатым предвестникам с узкополосной дрейфующей по частоте компонентой

концентрацию  $N_0 \sim (2.5 \div 10) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ , масштаб неоднородности плазмы в области источника  $L_{N011} \sim 3 \cdot 10^8 \text{ см}$ , поперечный размер области энерговыделения  $L_{\perp} \leq 10^8 \text{ см}$ , энергию  $E_s \sim 30 \text{ кэВ}$  и плотность потока высыпавшихся частиц  $J_s \sim 10^{15} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ , магнитное поле в области источника  $H \approx 200 \div 300 \text{ Гс}$ , ширину углового спектра плазменных волн  $30^\circ < \theta < 90^\circ$ , связанных с развитием конусной неустойчивости

по источникам миллисекундных пульсаций: плотность плазмы  $N_0 = 1.9 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ ; кинетическую температуру электронов  $T \approx 3 \cdot 10^6 \text{ К}$ ; концентрацию ускоренных электронов  $N_e = 10^5 \text{ см}^{-3}$ ; спектральную ширину генерируемых плазменных волн  $\Delta\omega/\omega \leq 3\%$ ; уровень плазменной турбулентности  $w = W/N_0 T \approx 10^{-6}$ ; полный размер источника  $l \approx 400 \text{ км}$ ; плазменный параметр в источнике  $\gamma = \omega_{pe}/\omega_{ce} = 1.7$ ; характерный масштаб неоднородности в источнике  $H \approx 1.5 \cdot 10^9 \text{ см}$ .

по пульсациям микроволнового излучения вспышки с периодами 16 и 9 с позволили сделать оценки магнитного поля (200 Гс - в вершине и 100 Гс - в основаниях) и плотности плазмы ( $10^{11} \text{ см}^{-3}$ ) во вспыхивающей петле.

### ПАРАМЕТРЫ ОБЛАСТЕЙ ПЕРВИЧНОГО ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ

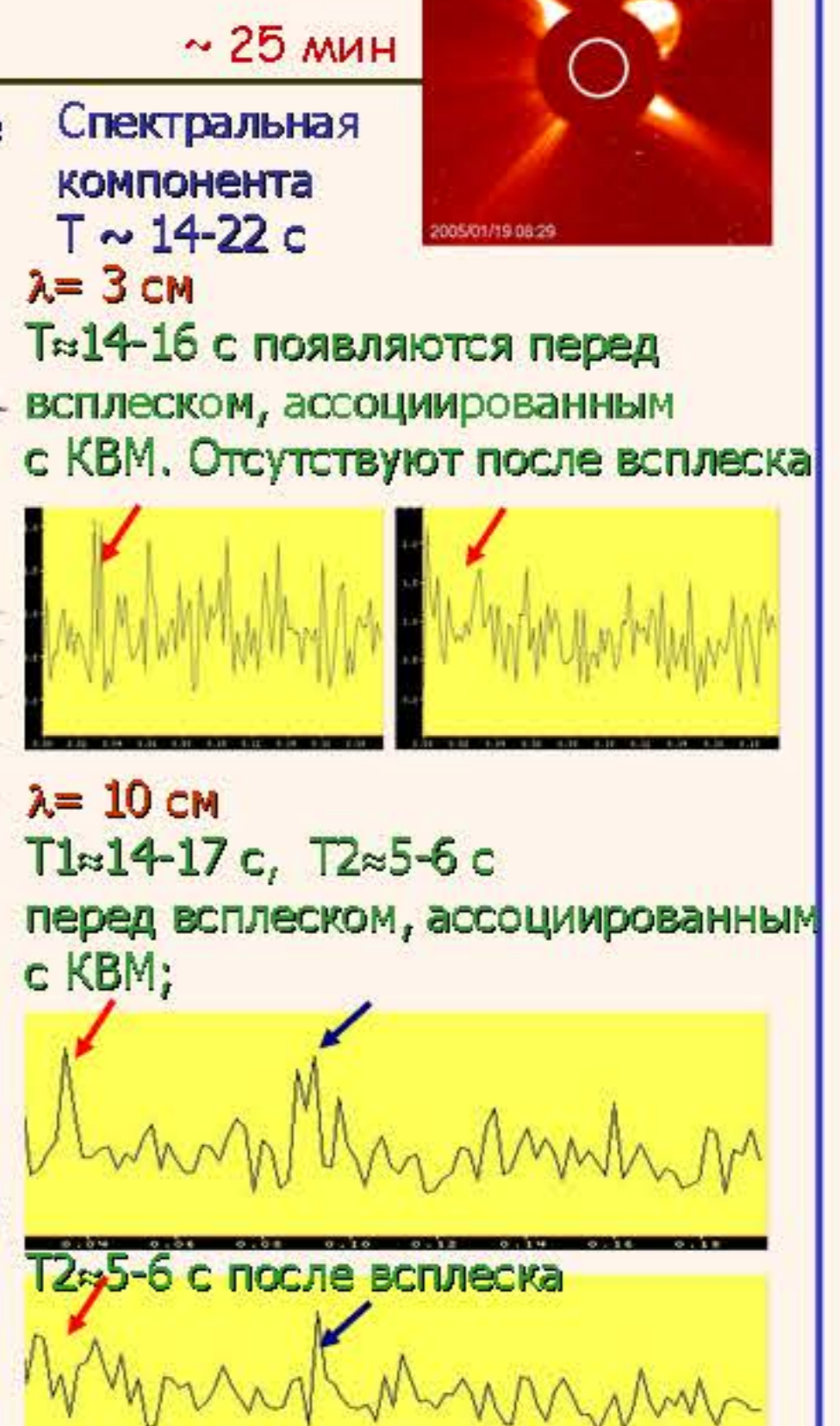
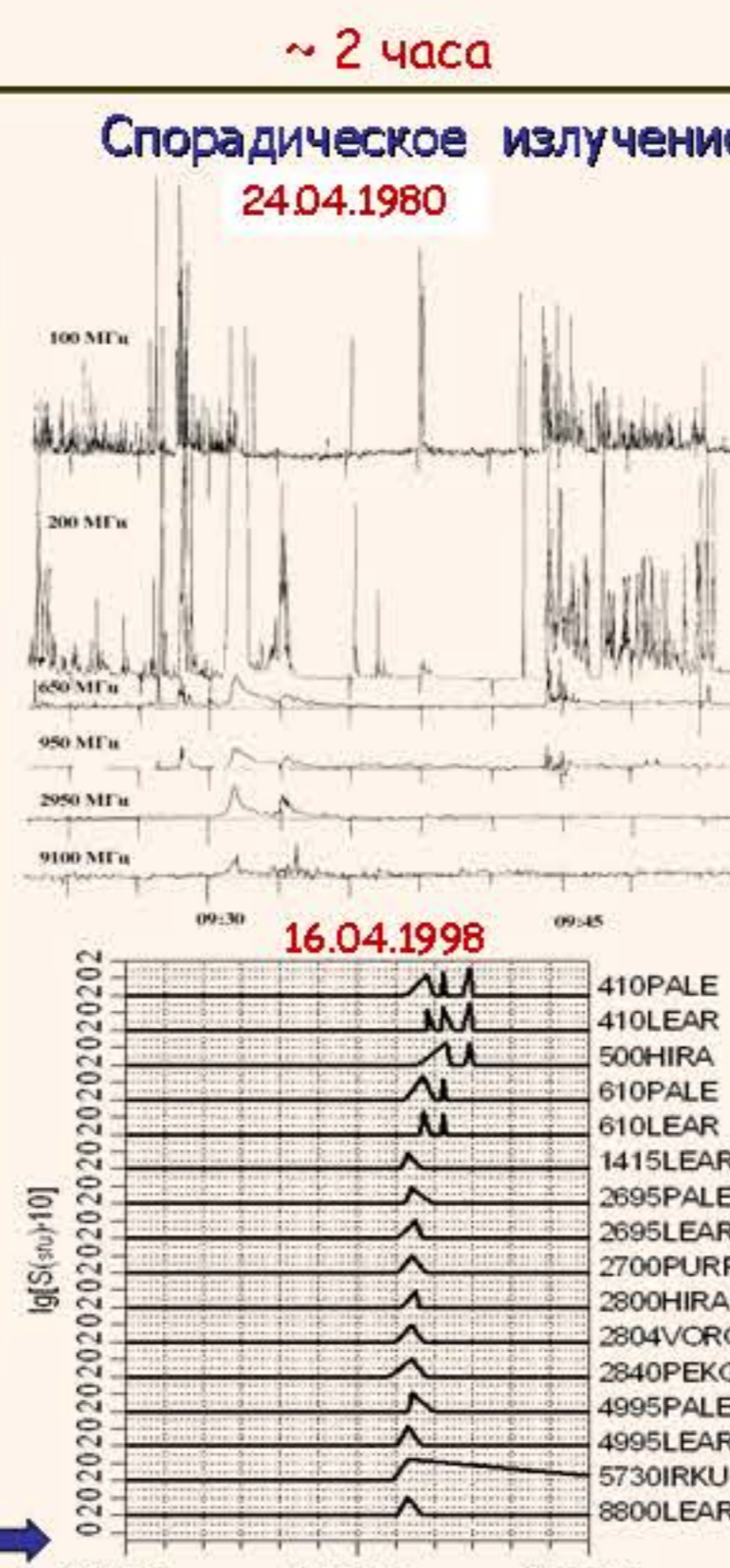
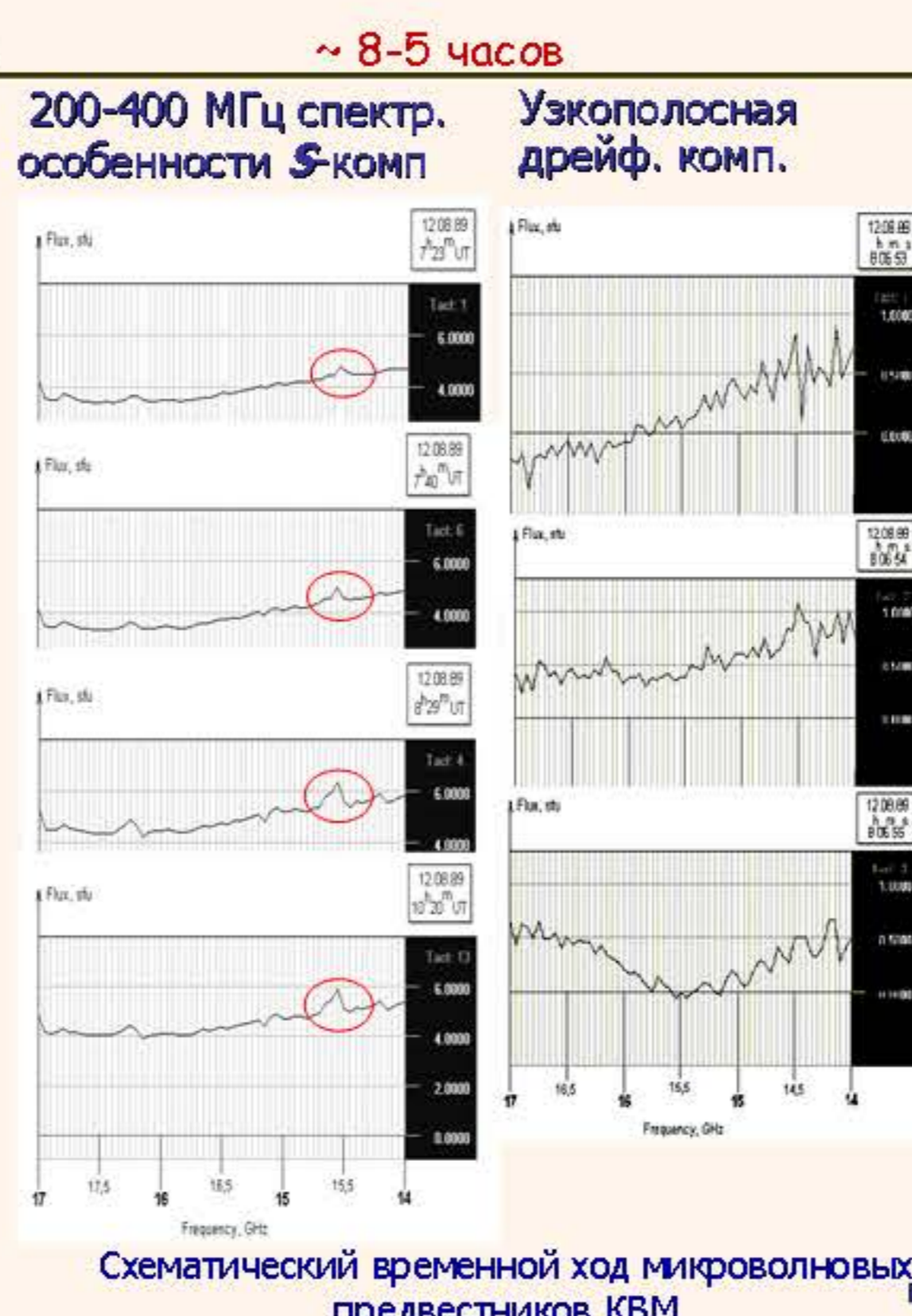
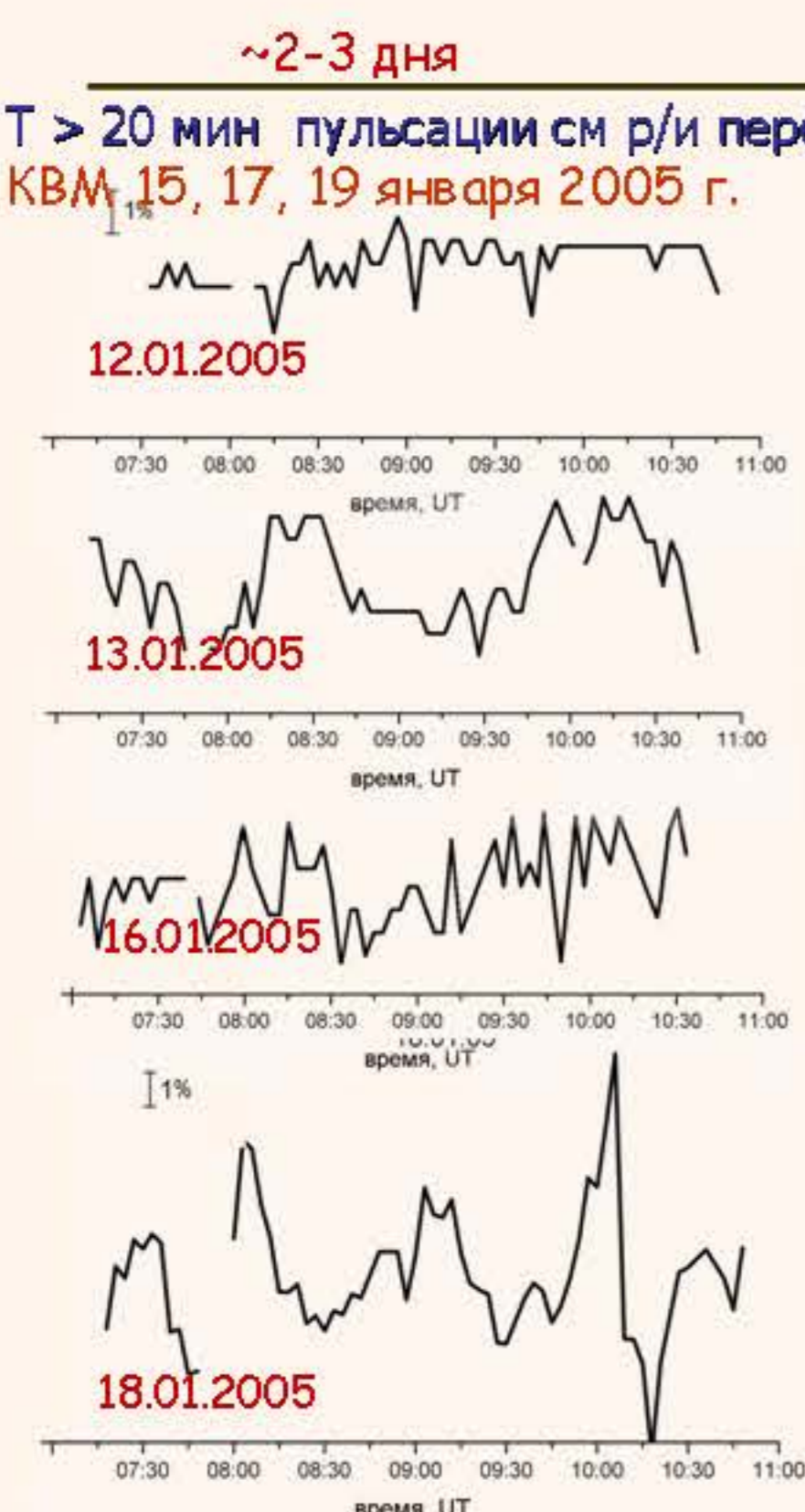


Впервые в мире по радиоинтерферометрическим данным, полученным на двухэлементном интерферометре ФГБНУ «ИРФИ» с базой ~400 м (два радиотелескопа РТ-7,  $f = 540 \text{ МГц}$ ) проанализирована пространственная динамика источников солнечных субсекундных всплесков в дециметровом диапазоне длин волн. Миллисекундное (до 0.256 мс) временное разрешение позволило отслеживать смещение центра яркости в источнике по изменению фазы интерференционного отклика в ходе развития сложного радиовсплеска. Вариации положения центра источников в ходе наиболее интенсивных пиков многокомпонентного радиовсплеска 02.10.94 достигали 8 угл. сек.

## ДИНАМИКА ЯВЛЕНИЙ, НАБЛЮДАЕМЫХ НА СТАДИИ, ПРЕДШЕСТВУЮЩЕЙ ВСПЛЕСКАМ И КОРОНАЛЬНЫМ ВЫБРОСАМ МАССЫ, ПО ДАННЫМ РАО «ЗИМЕНКИ» И МИРОВОЙ СЛУЖБЫ СОЛНЦА

Классифицированы проявления в микроволновом излучении процессов, связанных с формированием и начальным распространением корональных выбросов массы в атмосфере Солнца.

Прослежен комплекс явлений, состоящий из возрастания долгопериодных пульсаций в течение 2-3 суток, спектральных особенностей S-компоненты излучения и узкополосной дрейфующей компоненты за 8-5 часов, импульсных и континуальных всплесков-предвестников в широком диапазоне длин волн за 1-2 часа и колебаний интенсивности с периодами в диапазоне 6-22 секунды за 25-15 минут до регистрации КВМ на коронографх. Существует связь между характером указанных явлений и некоторыми параметрами КВМ.



Схематический временной ход микроволновых предвестников КВМ по данным мировой Службы Солнца

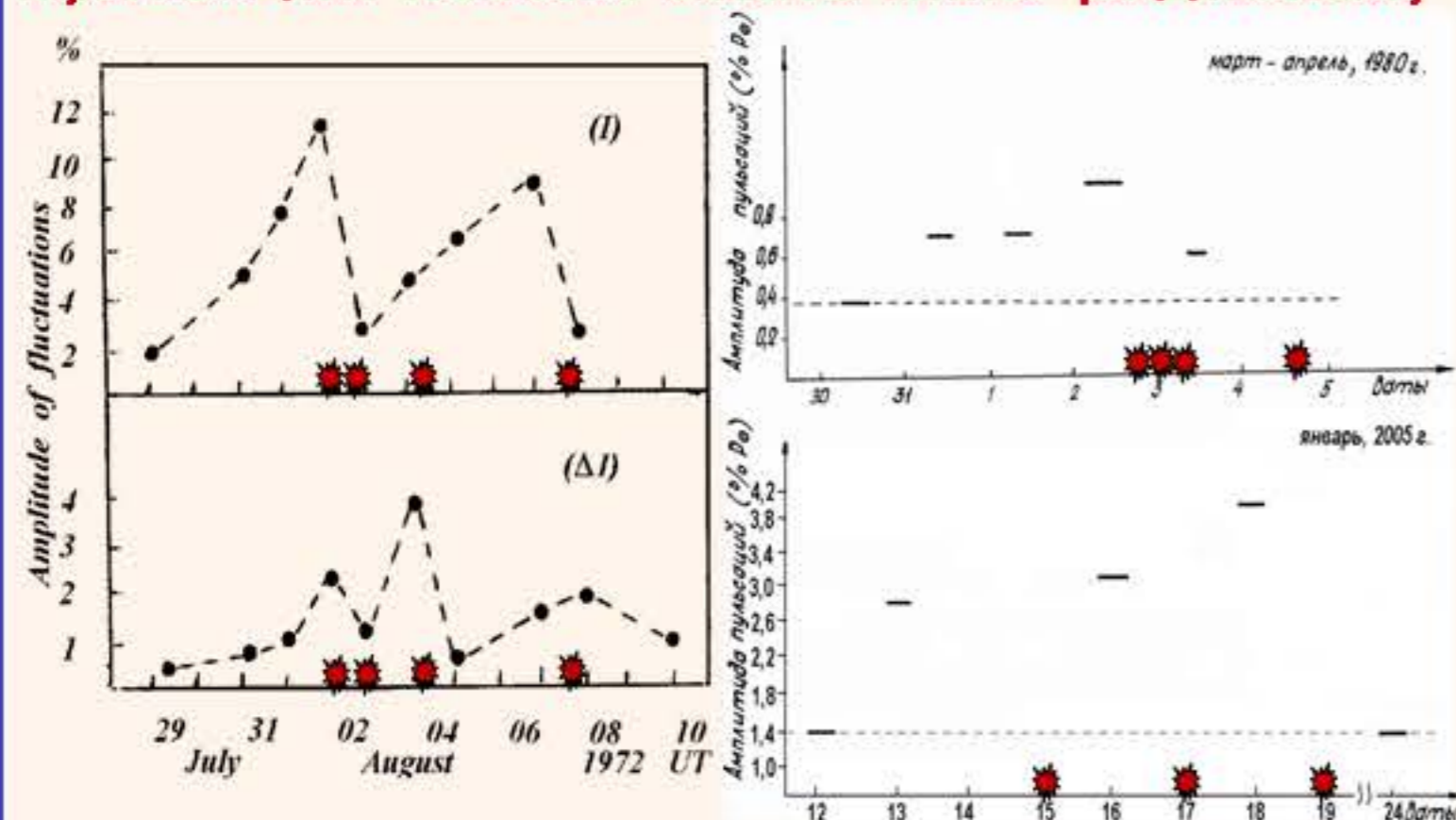


# РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПРОГНОЗА ЯВЛЕНИЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ И ИХ ГЕОЭФФЕКТИВНЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ

**ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРАВЛЕННЫ НА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ МОНИТОРИНГА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ**

## МЕТОД ДПР – ПРОГНОЗ МОЩНЫХ ВСПЫШЕК ПО ДИНАМИКЕ ФЛУКТУАЦИЙ СОЛНЕЧНОГО МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Разработан способ краткосрочного прогноза мощных солнечных вспышек (Патент на изобретение №2419821 от 29.09.2009), основанный на возрастании амплитуды долгопериодных ( $T \geq 20$  минут) квазипериодических пульсаций потока солнечного радиоизлучения за 1-3 суток до мощных вспышек и их спаде после события.



Статистический анализ 381 события показал, что вероятность предсказания мощных событий составляет более 80%, а коэффициент успешности, определяемый, как соотношение числа успешных прогнозов к общему числу прогнозов во всей рассматриваемой совокупности данных, превосходит значения других методов прогноза.

| Наблюдения | Да | Нет | Сумма |
|------------|----|-----|-------|
| Прогноз    |    |     |       |
| Да         | 39 | 22  | 61    |
| Нет        | 4  | 316 | 320   |
| Сумма      | 43 | 338 | 381   |

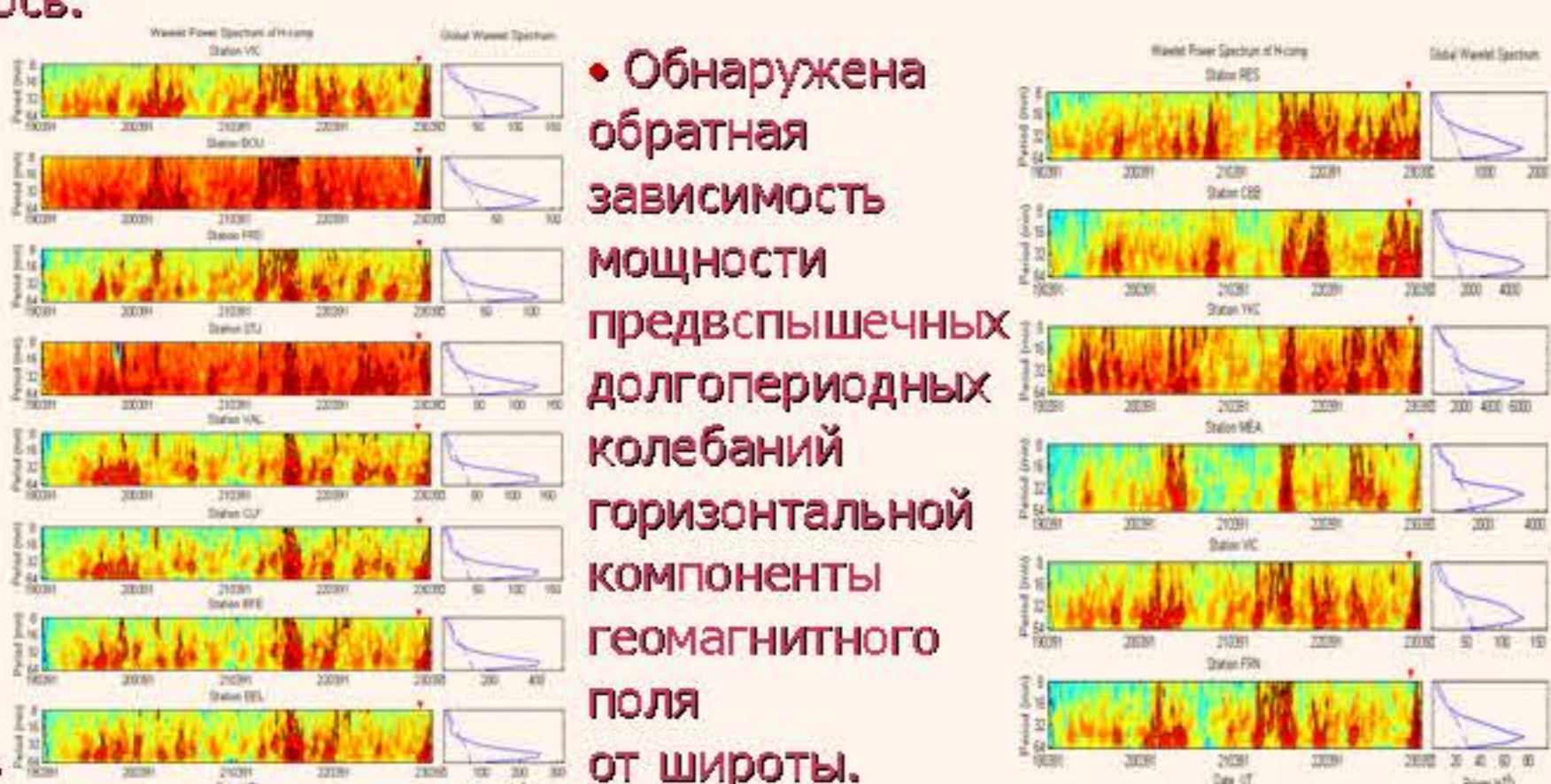
## НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ МЕТОДА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МОЩНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК ПО ФЛУКТУАЦИЯМ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Метод основан на эффекте возрастания долгопериодных ( $T \geq 20$  минут) пульсаций Н-компоненты магнитного поля Земли, предшествующих геоэффективным солнечным вспышкам.

Эффект обнаружен при анализе данных в интервалы времени, совпадающие с протонными событиями на Солнце 02.08.1972 и 03.07.1974, подтвержден на большом статистическом материале за XXII-XXIII циклы солнечной активности.

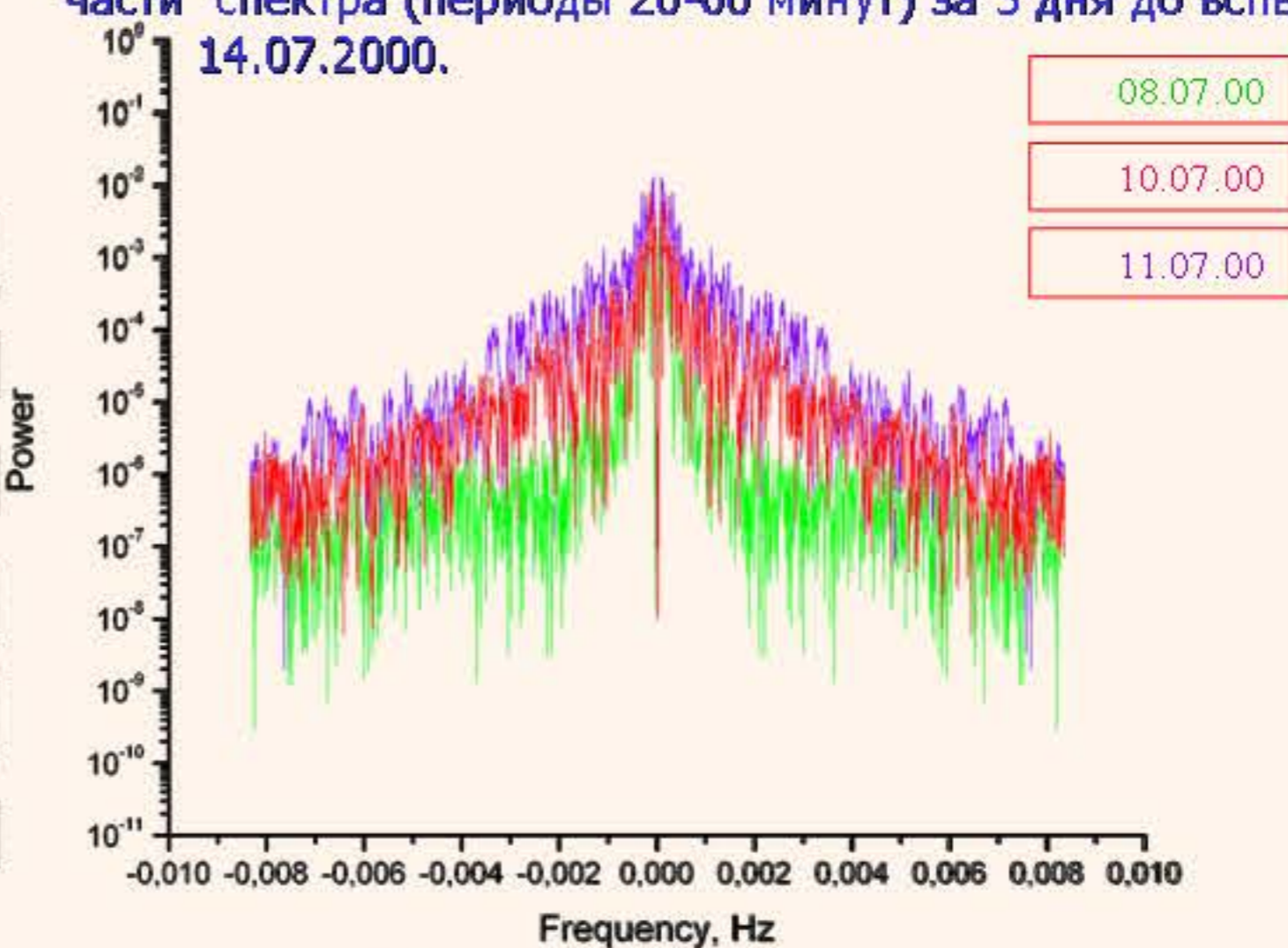
- Обнаружена прямая зависимость мощности долгопериодных колебаний горизонтальной компоненты геомагнитного поля за 3-1 день до солнечного события от величины потока протонов, которым оно сопровождалось.

- Обнаружено отсутствие временного сдвига и зависимости мощности долгопериодных колебаний горизонтальной компоненты геомагнитного поля от долготы.

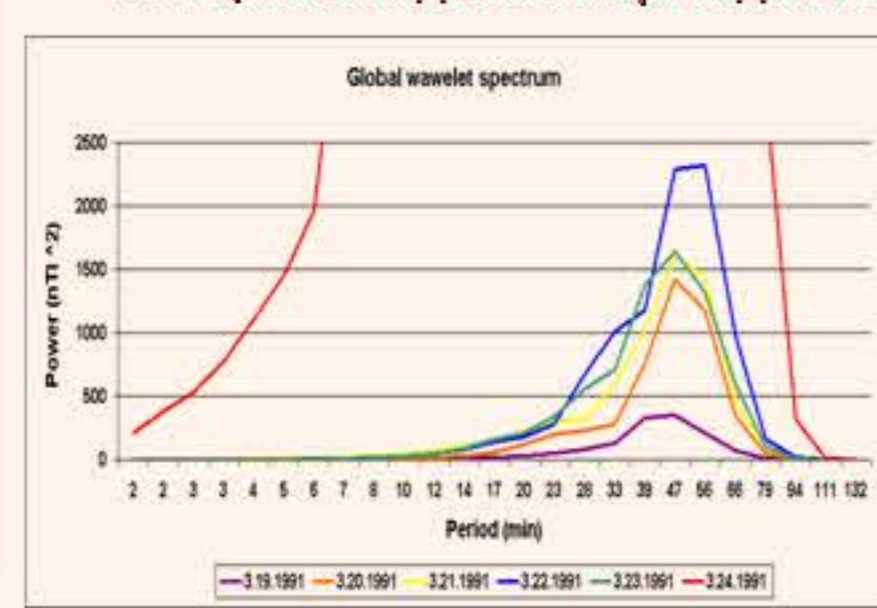


- Обнаружена обратная зависимость мощности предвспышечных долгопериодных колебаний горизонтальной компоненты геомагнитного поля от широты.

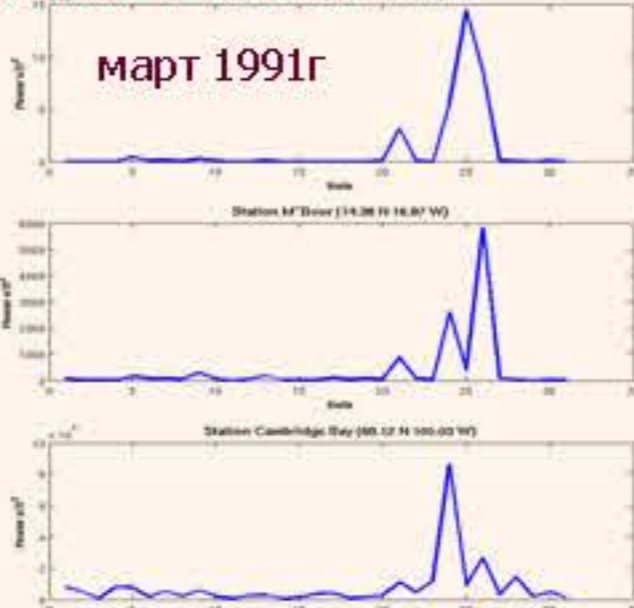
Наблюдается рост амплитуд пульсаций в низкочастотной части спектра (периоды 20-60 минут) за 3 дня до вспышки 14.07.2000.



- Установлено, что предвспышечные колебания горизонтальной компоненты магнитного поля Земли на средних широтах возникают с опережением в несколько часов по отношению к высоким.
- Показано, что наличие предвспышечных флуктуаций магнитного поля Земли может быть обусловлено колебаниями ионизирующего излучения (ультрафиолета и рентгена) в атмосфере Солнца и/или солнечным ветром.
- Предложен алгоритм краткосрочного прогнозирования геоэффективных солнечных вспышек на основании мониторинга мощности долгопериодных колебаний геомагнитного поля.



Глобальный вейвлет спектр Н-компоненты магнитного поля Земли для станции Thule за период времени 19-24.03.1991 г.



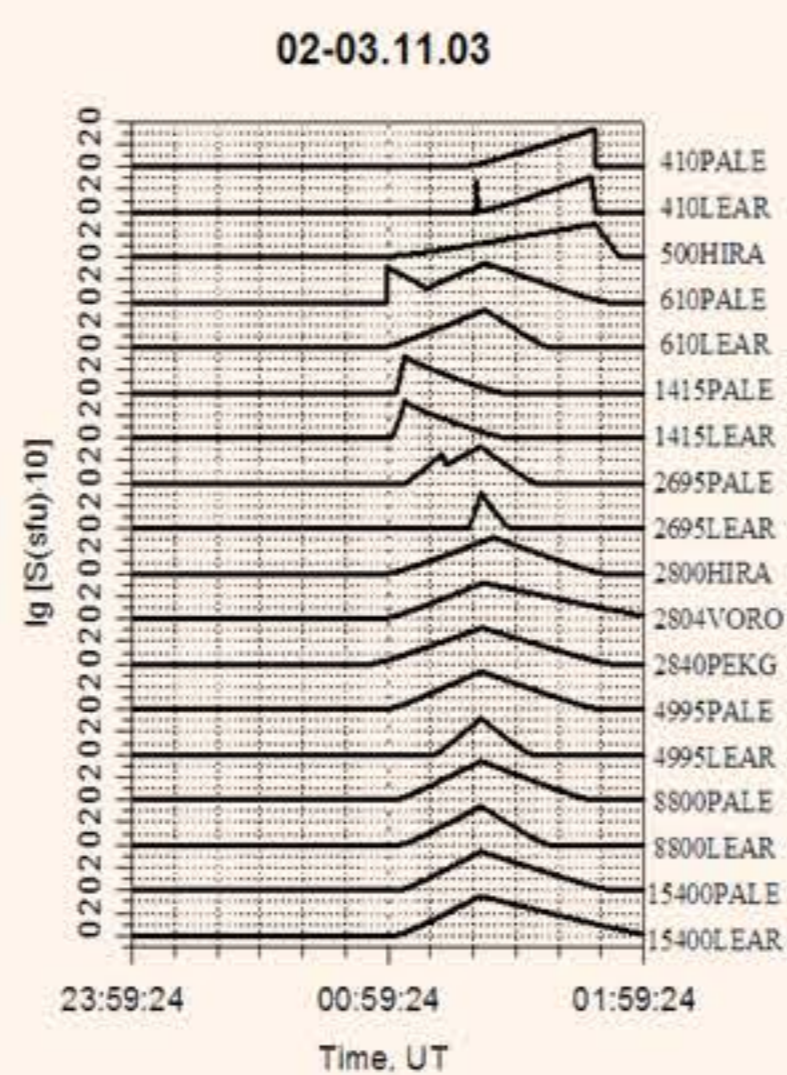
Динамика мощности долгопериодных колебаний. Верхняя панель – среднеширотная станция, средняя панель – низкоширотная, нижняя панель – высокоширотная станция.

Если на 3 среднеширотных геомагнитных обсерваториях, разнесенных по широте не менее чем на 1000 км фиксируется рост среднего значения мощности колебаний Н-компоненты магнитного поля Земли более чем в 4 раза одновременно (с точностью 50% периода) на всех трех тестируемых станциях, то возможно наступление вспышечного события в течение 3-1 ближайших суток.

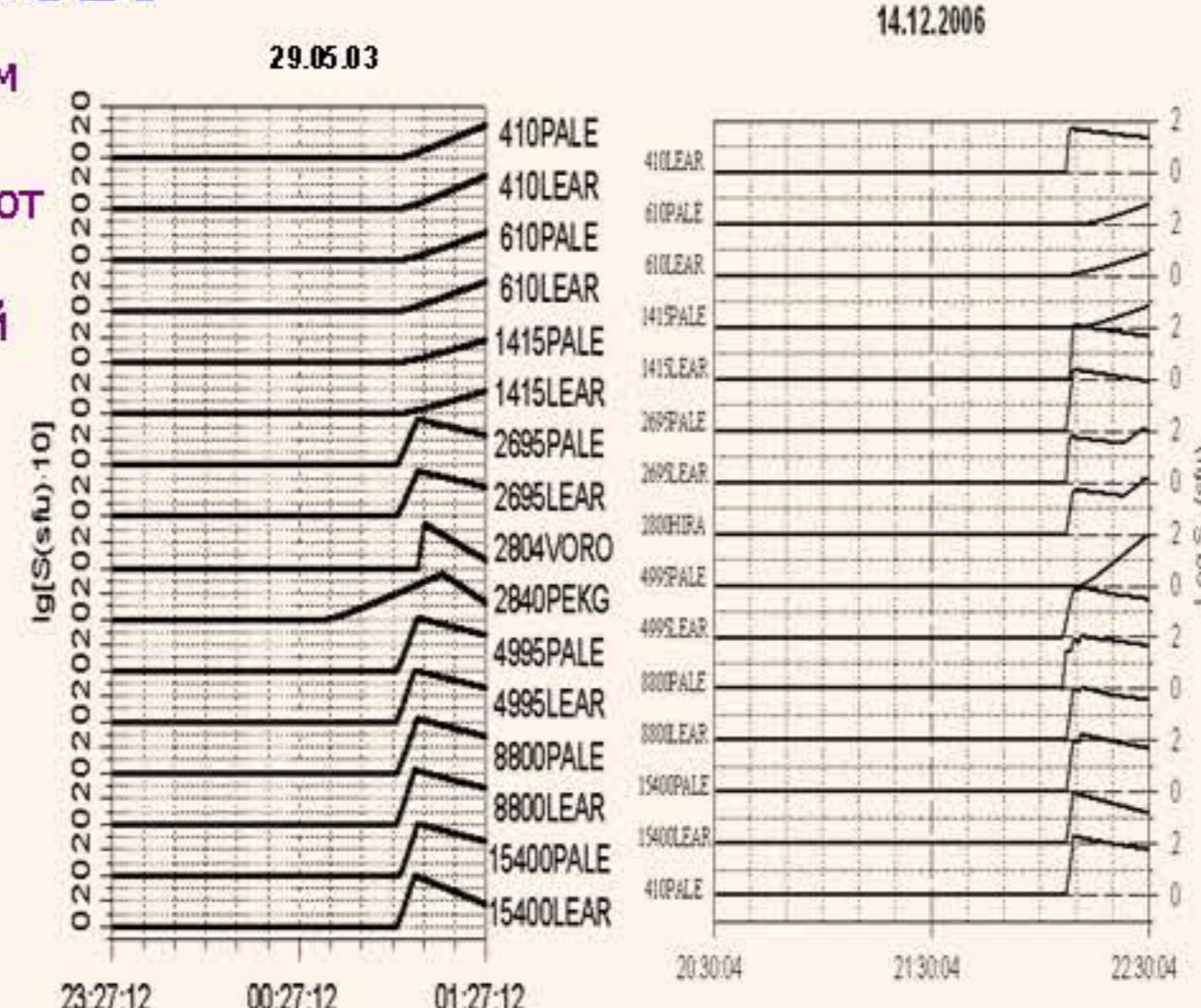
## ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОВОЛНОВЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ ГЕОЭФФЕКТИВНЫХ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ

Установлены на основе статистического анализа событий в отдельные периоды XXI-XXIII циклов солнечной активности закономерности существования микроволновых радиопредвестников геоэффективных корональных выбросов массы, заключающиеся в следующем:

- наличие широкополосного радиоизлучения, по крайней мере, в одном из диапазонов сантиметрового или дециметрового излучения;
- длительность радиопредвестников – более 20 минут

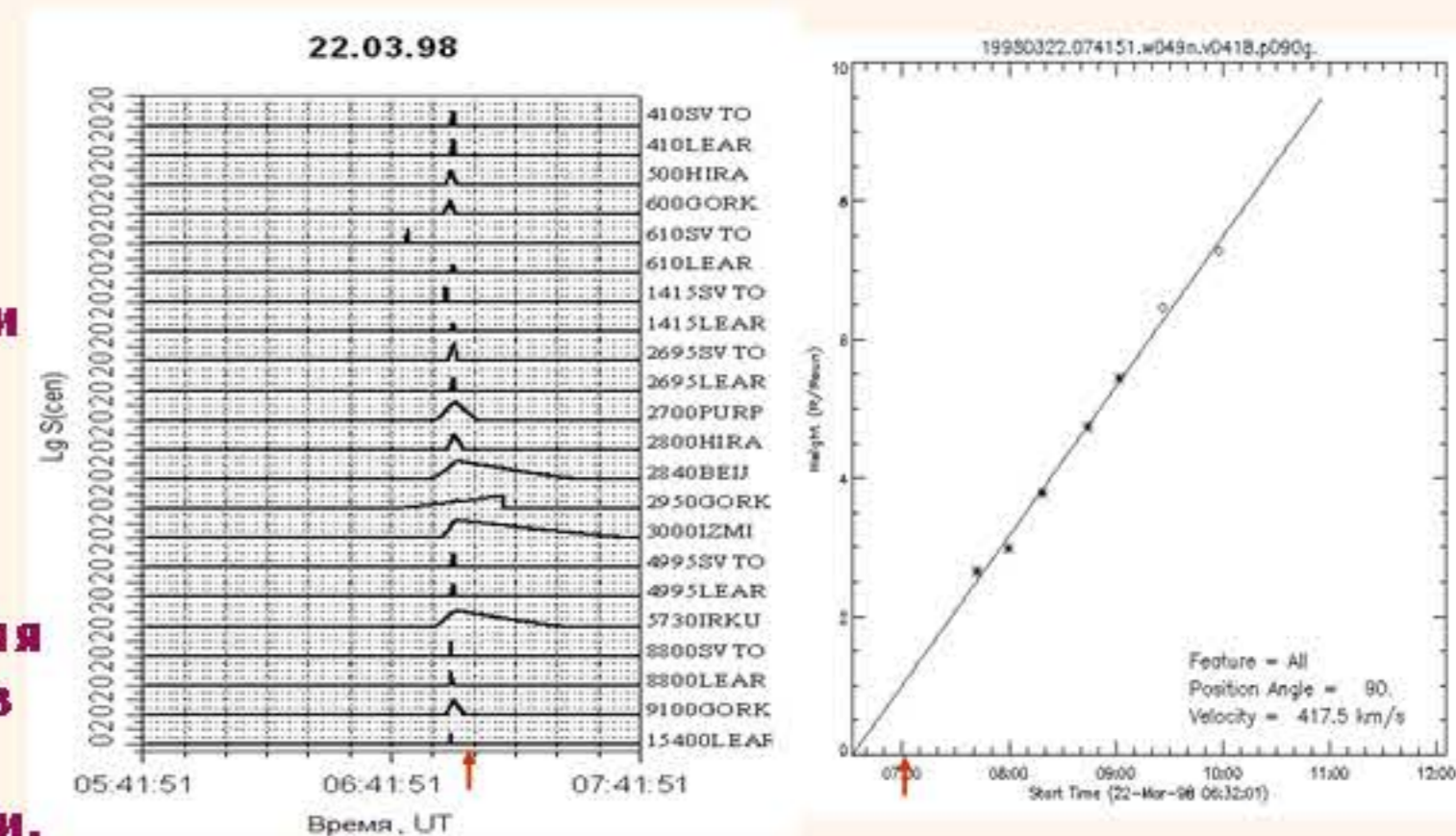


Установлено, что корональным выбросом массы классов гало и частичное гало предшествуют радиопредвестники, охватывающие сантиметровый и дециметровый диапазоны и обладающие особыми свойствами: одновременно возникающей во всем микроволновом диапазоне компонентой излучения с подобным временным поведением на различных частотах микроволнового диапазона с постепенным нарастанием и последующим уменьшением потока.



## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ОТРЫВА КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ ПО РАДИОДАННЫМ

Анализ развития корональных выбросов массы в случаях совпадения периодов наблюдений на коронографх C1 и C2 и в радиодиапазоне показывает, что в абсолютном большинстве случаев (в 15 из 18) время возникновения микроволновых предвестников опережает или совпадает со временем регистрации коронального выброса массы (КВМ) на C1. При этом приводимое в каталоге КВМ расчётное время отрыва указанных корональных выбросов массы от поверхности Солнца с использованием данных коронографа C2 практически совпадает с временем начала импульсных широкополосных микроволновых предвестников, подобных по временному профилю. На рисунке приведен результат сопоставления расчетного момента времени отрыва выброса от поверхности Солнца, указанного в Каталоге и отмеченного на правой панели стрелкой, с экспериментальным временем возникновения радиопредвестников - указано стрелкой на левой панели.





# РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ СО СВЕРХДЛИННОЙ БАЗОЙ (РСДБ)

Метод радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой (РСДБ) позволяет проводить измерения параметров излучения (яркости, поляризации, частотного спектра) космических источников с угловыми размерами менее 1 мсек дуги и является незаменимым инструментом для астрометрических, астронавигационных и геодезических измерений.

С 1965 года ФГБНУ НИРФИ ведёт теоретические и экспериментальные работы в области РСДБ. На основе применения техники собственной разработки были проведены одни из первых в мире эксперименты на РСДБ.

- Предложены основы дифференциальной интерферометрии для установления фундаментальной инерциальной системы небесных координат, систем земных координат и их взаимной связи.
- Разработаны методики радиоинтерферометрического определения координат космических аппаратов относительно внегалактических радиоисточников в целях навигационного обеспечения их полетов. Проведены успешные эксперименты по определению текущих координат межпланетных аппаратов "Вега" и "Фобос", орбитальных аппаратов "Гранат" и "Астрон".
- Впервые привязаны геодезические координаты больших антенн РСДБ-пунктов в Уссурийске, Евпатории и Медвежьих Озерах с погрешностью менее метра.
- Выполнены эксперименты по локации объектов "космического мусора" в околоземном пространстве разработанным методом РСДБ-локации.
- Впервые на РСДБ НИРФИ проведены эксперименты по высокоточному определению положения космических аппаратов глобальных спутниковых радионавигационных систем по квазишумовому сигналу.

## РСДБ-КОМПЛЕКС ФГБНУ НИРФИ

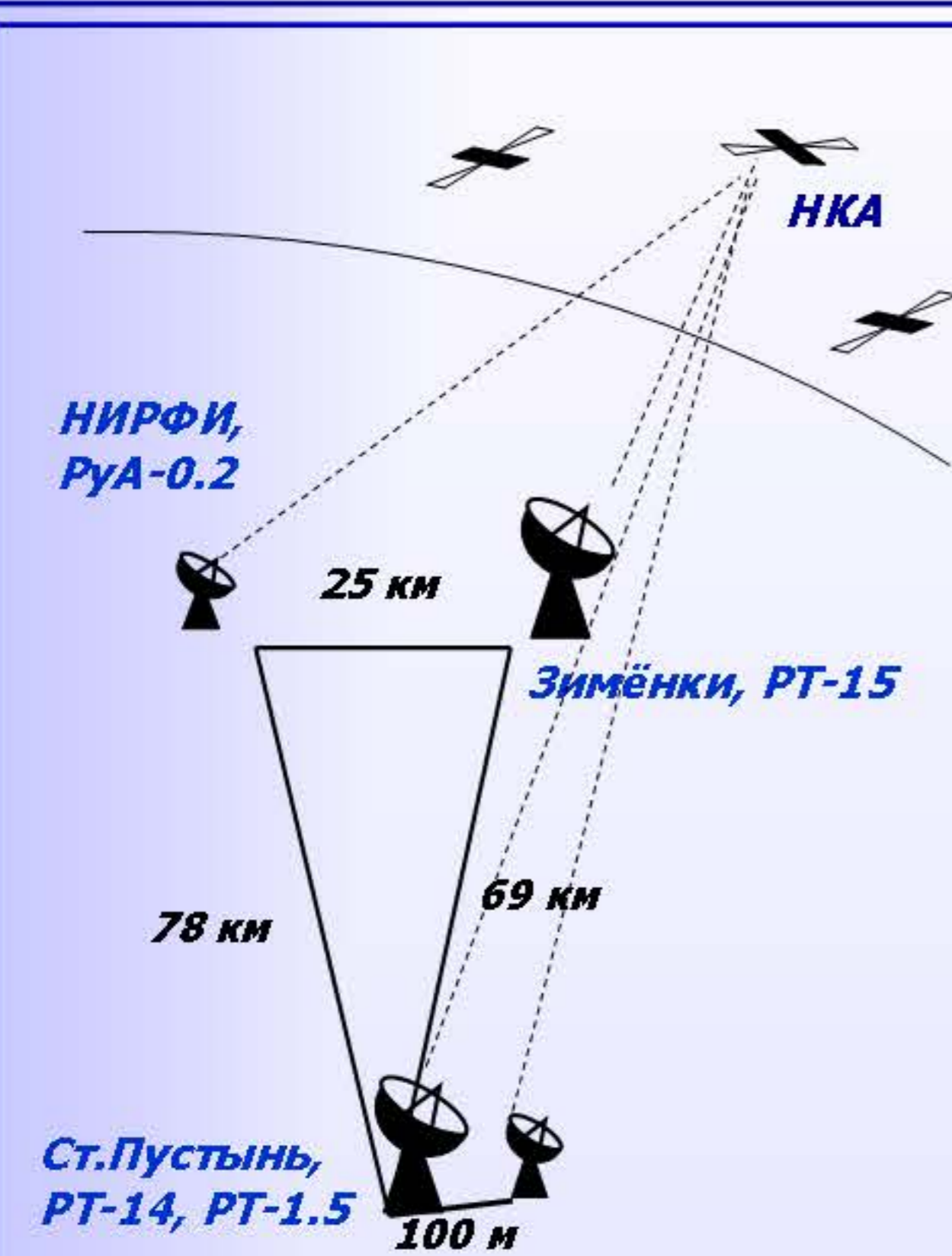
ФГБНУ НИРФИ имеет собственный радиоинтерферометр независимого приёма «Зимёнки (РТ-15) – Старая Пустынь» (РТ-14) с длиной базы 69 км, оборудованный приёмными системами в диапазонах 327 МГц, 610 МГц, 1660 МГц. Интерферометр предназначен для исследований космических сред (солнечного ветра, ионосферы Земли), процессов солнечной активности, а также для отработки методик координатных измерений искусственных космических объектов.

В диапазоне 1,6 ГГц в состав комплекса для работы по сигналам НКА ГЛОНАСС и НАВСТАР дополнительно введены:

- малая антенна (рупор) РуА-0.2, установленная в здании НИРФИ,
- антенна РТ-1.5, установленная в Старой Пустыни.



«Старая Пустынь» РТ-14, РТ-1.5



## РСДБ-АППАРАТУРА

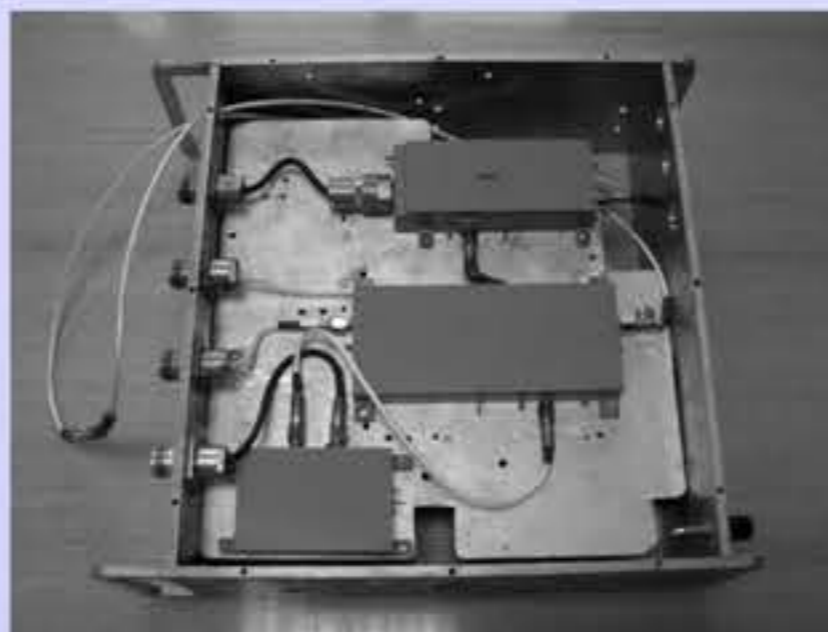
Одним из важнейших направлений работ РСДБ-лаборатории является поддержание работоспособности, совершенствование и создание новой приемной и регистрирующей аппаратуры.

Приёмные системы в РСДБ пунктах «Старая Пустынь» и «Зимёнки» оснащены новыми двухчастотными приёмниками диапазона 327/610 МГц, имеющими шумовую температуру  $T_{ш} < 80$  К, и диапазона 1.6 ГГц с температурой шума 100 К.



РАО «Старая Пустынь» РТ-14  
Трёхчастотный облучатель

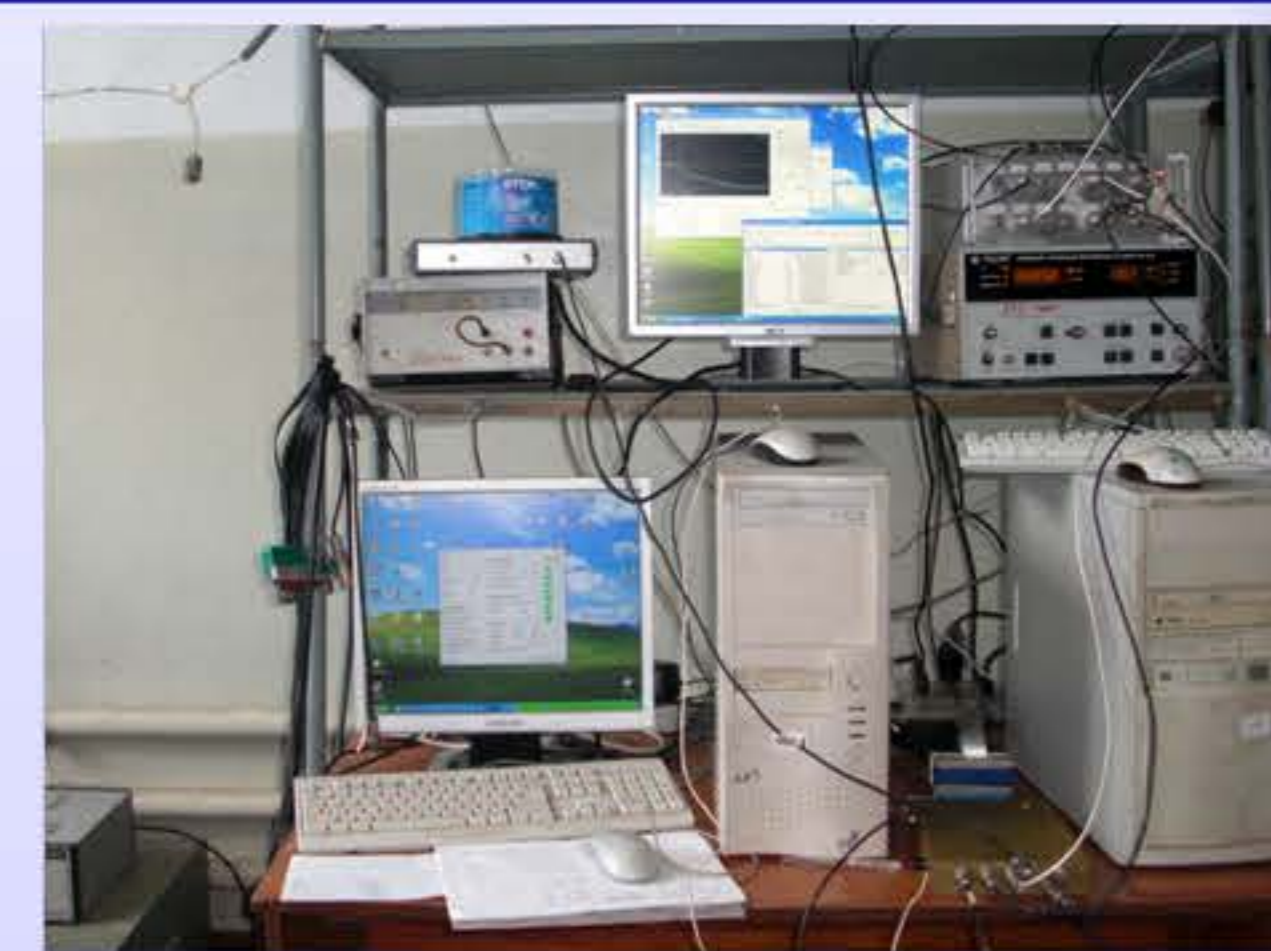
Приёмные системы 1.6 ГГц имеют возможность перестройки частотных поддиапазонов на  $1665 \pm 20$  МГц (радио-астрономическая частота) и 1565-1615 МГц (рабочие частоты спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS). Возможность работы по сигналам НКА СРНС закладывалась с целью проведения РСДБ-экспериментов по высокоточному определению положения КА.



В4-блок приёмника 1.6 ГГц

Инструмент оснащён системой регистрации ТН-16 собственной разработки с записью информации на жёсткий диск компьютера и возможностью трансляции РСДБ-данных через интернет непосредственно во время наблюдений.

Разработаны и введены в действие два новых двухканальных видеоконвертера.



Система регистрации ТН-16



Приёмный комплекс в РАО «Старая Пустынь»

РСДБ-пункты обеспечены мобильными водородными стандартами частоты и времени VCH-1005 и Ч1-1006 и рубидиевым приемником-синхронизатором VCH-311 с синхронизацией шкал времени по сигналам GPS.



## КОРРЕЛЯТОР НИРФИ-4

В настоящее время ведётся модернизация созданной в НИРФИ системы обработки РСДБ-данных. Коррелятор НИРФИ-4 позволяет обрабатывать данные РСДБ-экспериментов по исследованию быстропеременных процессов в солнечном ветре, короткоживущих всплесков солнечного радиоизлучения, излучения пульсаров, квазишумовых сигналов сигналов навигационных космических аппаратов, а также сигналов, отражённых от орбитальных космических объектов и планет земной группы в экспериментах по РСДБ-локации. Коррелятор НИРФИ-4 обладает высоким быстродействием за счёт оптимального программного обеспечения и применения современных высокопроизводительных спецпроцессоров.



# НАУЧНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ РСДБ-ИССЛЕДОВАНИЯ 2006-2011 гг.



Старая Пустынь RT-14,  
НИРФИ, Россия



Медицина RT-32, IRA  
INAF, Италия



Евпатория RT-70, НЦУИКС,  
Украина



Вентспилс RT-32, ВМРЦ,  
Латвия



Зимёнки RT-15,  
НИРФИ, Россия

Направления современных работ РСДБ-лаборатории: разработка методической и аппаратурной базы для решения задач фундаментальной и прикладной радиоастрономии и радиоинтерферометрии, астрометрии, космической навигации, исследования свойств космических сред, Солнца, а также тел Солнечной системы методом радиолокационной радиоинтерферометрии.

С начала 90-х годов ФГБНУ НИРФИ активно участвует в проведении РСДБ-экспериментов на глобальных базовых линиях в составе международных сетей, включающих крупнейшие зарубежные и российские радиотелескопы.

Аппаратурные комплексы ФГБНУ НИРФИ установлены в Евпатории (RT-70, Украина), Вентспилсе (RT-32, Латвия), Калязине (RT-64, АКЦ ФИАН, ОКБ МЭИ), в Старой Пустыни (RT-14) и Зимёнках (RT-15).

## РАДИОЛОКАЦИОННАЯ ДЛИННОБАЗОВАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ

С участием ФГБНУ НИРФИ продолжают эксперименты по исследованию объектов космического мусора на околоземных орбитах методом РСДБ-локации.

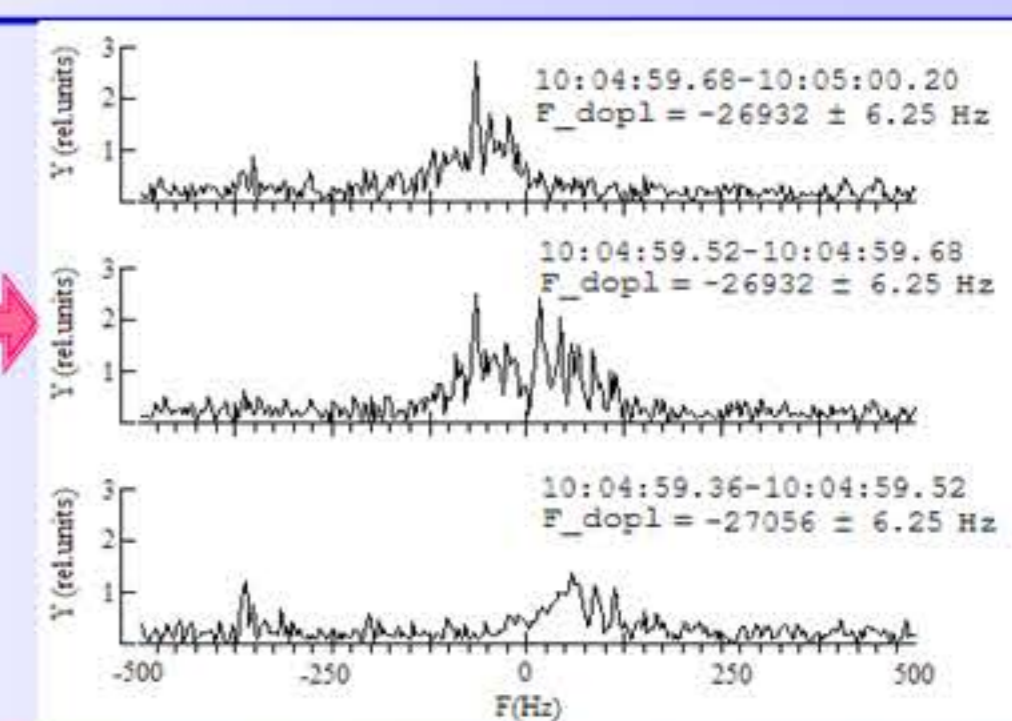
Метод РСДБ-локации, предложенный в НИРФИ в 1998 г., представляет собой объединение двух методов:

- метода радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой (РСДБ), позволяющего выполнять измерения угловых координат и угловых скоростей,
- дальномерно-доплеровского локационного метода для измерения дальности и радиальной скорости.

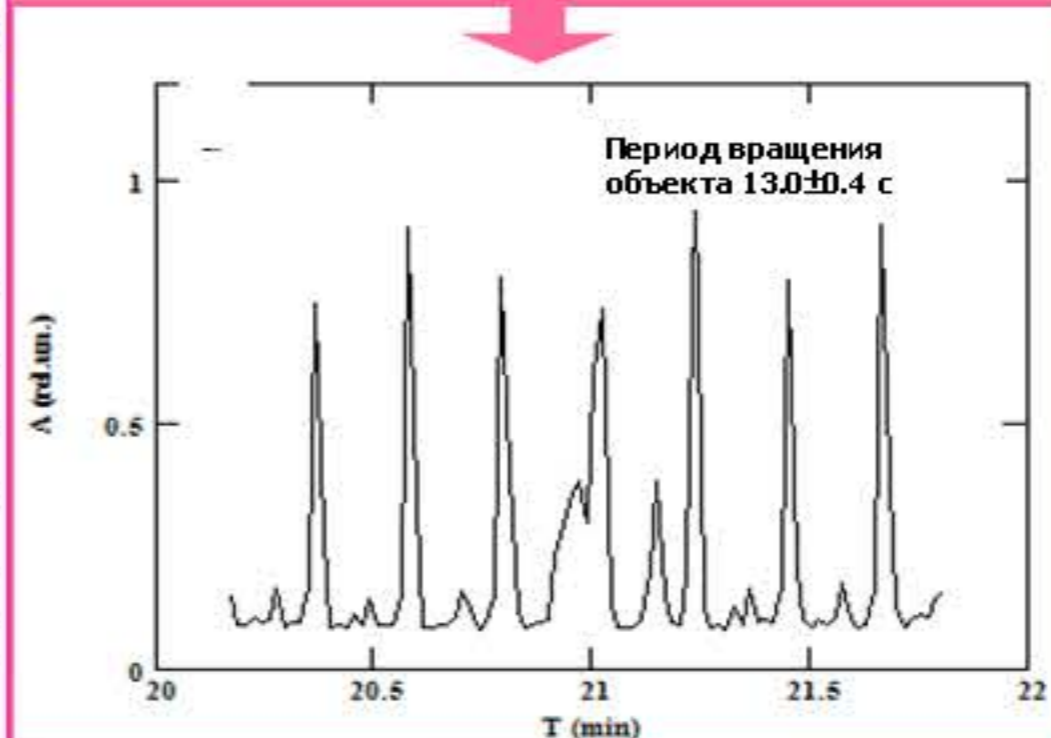
Основная задача – получение информации о положении космического объекта из измерений разности времён прихода сигналов в пункты интерферометра и доплеровского сдвига частот. Разработана методика оценки периода вращения и размеров объектов по амплитуде спектрального отклика.

Во время экспериментов выполняется облучение исследуемых объектов радиоизлучением планетного радиолокатора RT-70 в Евпатории (Украина) и приём отражённых сигналов РСДБ-комплексом, включающем антенны (в различных комбинациях): в Медицине (RT-32, Италия), Вентспилсе (RT-32, Латвия), Симеизе (RT-22, Украина), Калязине (RT-64, Россия) и др. Обработка данных выполняется в НИРФИ.

Спектры мощности кросс-корреляционной функции сигнала, излучённого передатчиком RT-70 (Евпатория), и сигнала, принятого RT-32 (Вентспилс). Объект Iridium 33 1997-051PT. Режим beam-parking. 30 июня 2010 г, 10:04 UT.



Временная зависимость максимума корреляционного сигнала, измеренного в пункте RT-32 (Вентспилс). Объект 95069. 12 сентября 2008 г., 15:20 UT



Спектр кросс-корреляционного сигнала, полученного на базе Калязин–Урумчи. Объект 95104. 2 августа 2007 г, 14:50 UT.

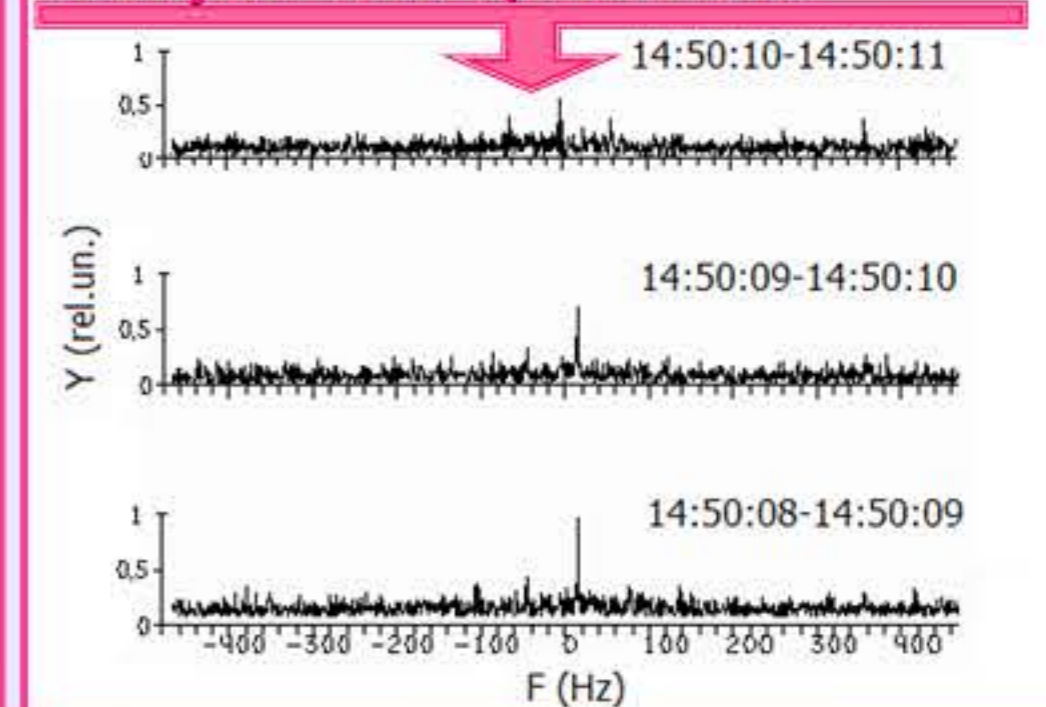


Схема РСДБ-эксперимента по НКА. В – база интерферометра,  $p_0$  ( $p_{x0}$ ,  $p_{y0}$ ,  $p_{z0}$ ) – геоцентрический вектор положения НКА;  $w$  ( $w_\alpha$ ,  $w_\beta$ ) – угловая скорость;  $v_{r0}$  – радиальная скорость

## РСДБ-ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ПРИЁМУ СИГНАЛОВ НКА ГЛОНАСС И GPS

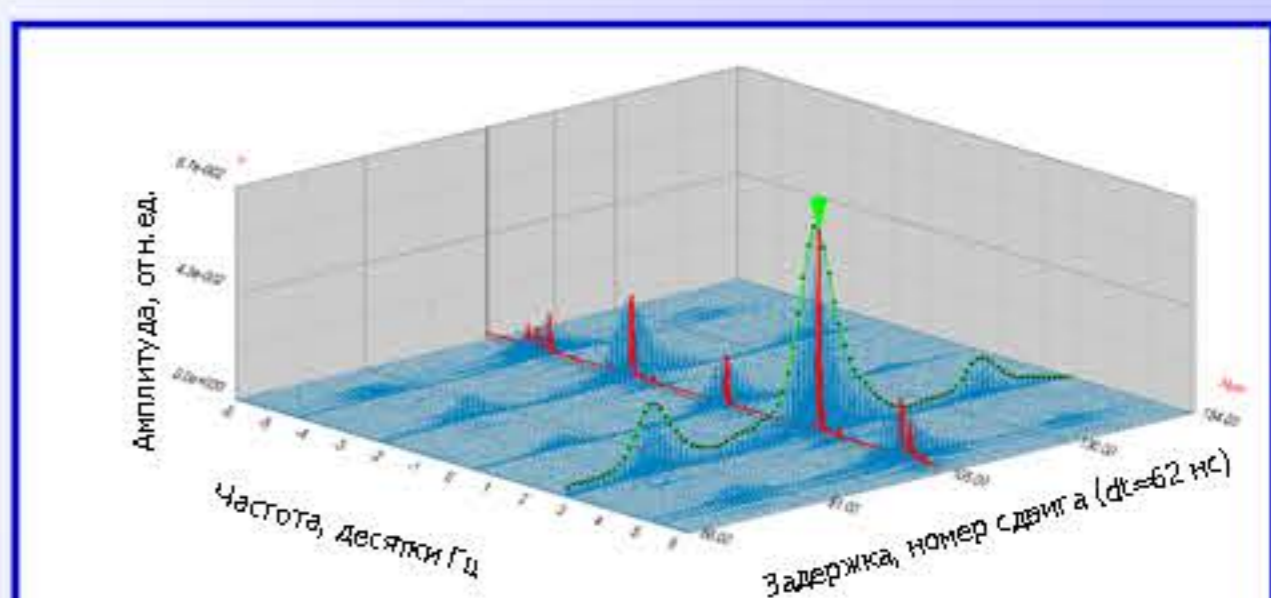


В 2010 г. впервые в отечественной практике на РСДБ НИРФИ проведены наблюдения навигационных космических аппаратов (НКА) систем ГЛОНАСС и GPS.

Рассмотрены следующие задачи:

- измерения параметров одиночных антенн (диаграммы направленности, разъюстировки, коэффициента усиления) по сигналам НКА;
- оперативное определение параметров приёмной РСДБ-аппаратуры, измерения базы интерферометра и калибровки инструмента в целом;
- высокоточное определение положения НКА;
- исследование ионосферы Земли.

Достигнута точность определения задержки – основного параметра для расчётов проекций базы, а в дальнейшем координат КА – 4...7 нс (1...2 м в линейном масштабе).



Отклик интерферометра на сигнал НКА «Космос-36400» в координатах «частота – задержка – амплитуда»

## РСДБ-ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ПЛАЗМЫ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА И ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ МЕТОДОМ РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЯ

Метод основан на измерении взаимной когерентности полей прошедшего через турбулентную среду по разным трассам излучения от удалённого радиоисточника до разнесённых антенн интерферометра. РСДБ-комплекс позволяет исследовать неоднородности распределения электронов в плазме солнечного ветра, имеющие размеры, сравнимые с проекциями баз; получать мгновенную пространственную картину распределения неоднородностей; проводить оценки скорости солнечного ветра и показателя пространственного спектра флуктуаций электронной концентрации.

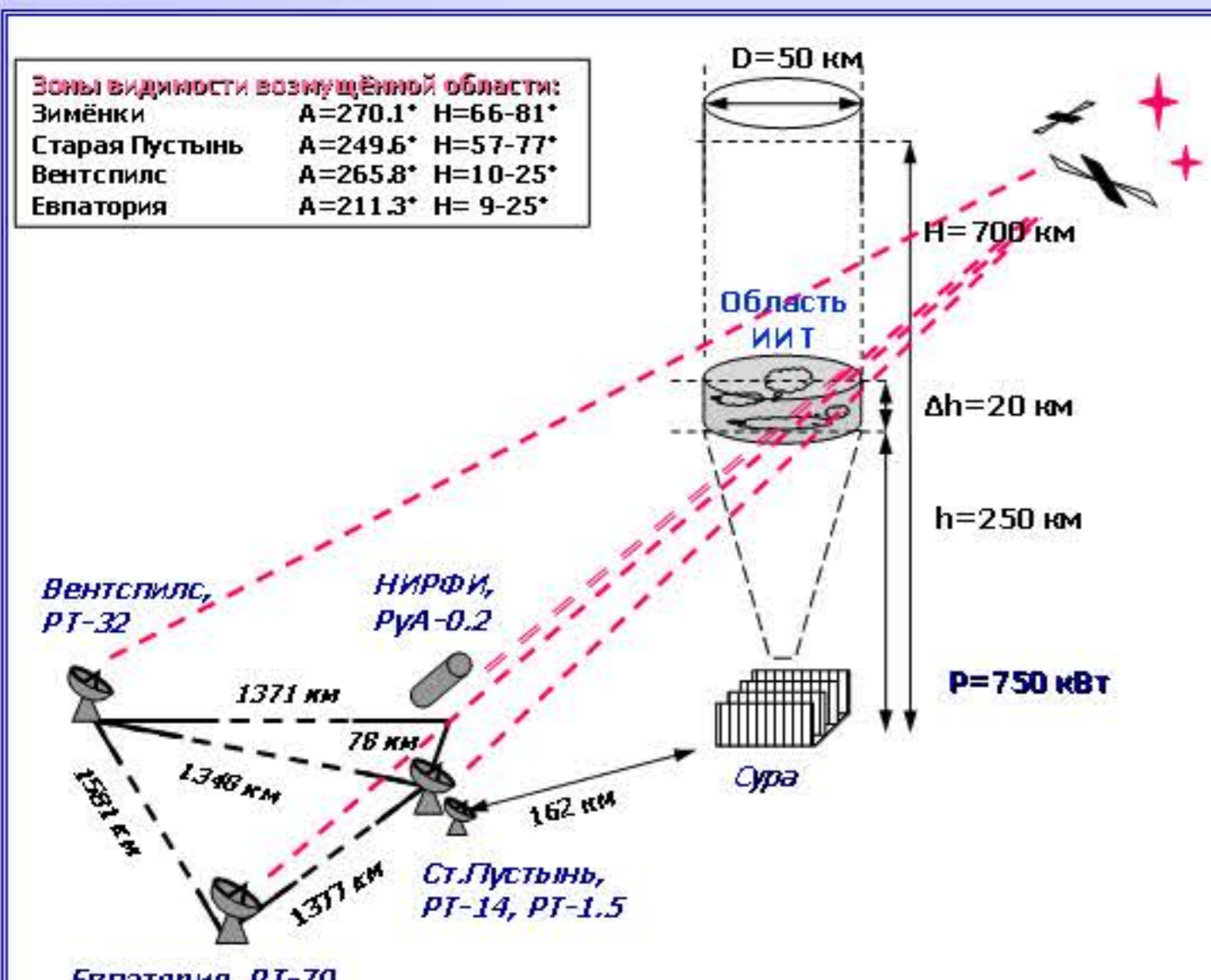


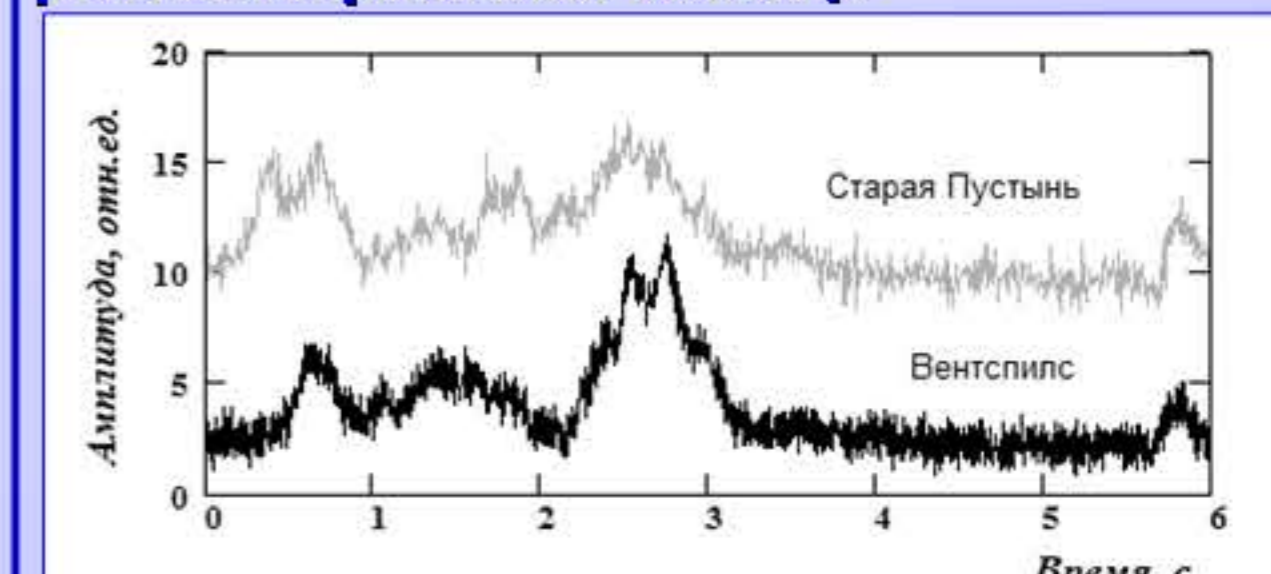
Схема РСДБ-эксперимента по исследованию искусственной ионосферной турбулентности

Данный метод был применён для измерения динамических характеристик неоднородностей электронной концентрации ионосферы Земли, а также выявления зависимости интенсивности флуктуаций электронной концентрации от режима внешнего воздействия на ионосферу.

Исследования искусственной ионосферной турбулентности (ИИТ), возникающей под воздействием мощного коротковолнового излучения стенда «Сура» (НИРФИ, Васильсурск), выполняются при просвечивании среды сигналами удалённых космических источников (на частоте 327 МГц) и сигналами НКА (на частоте 1.6 ГГц).

## ИССЛЕДОВАНИЕ КРОТКОЖИВУЩИХ ВСПЛЕСКОВ СОЛНЕЧНОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

Исследование мощных кратковременных ( $\Delta t < 1$  сек) всплесков солнечного радиоизлучения дециметрового диапазона с узким частотным спектром направлено на получение характеристик пространственной структуры нестационарных источников солнечного радиоизлучения; развития на основе этих данных - представлений об областях энерговыделения вспышек, ускорения энергичных частиц.



Запись интенсивности сигнала во время наблюдений солнечных всплесков, сделанная одновременно в пунктах «Вентспилс» и «Старая Пустынь»



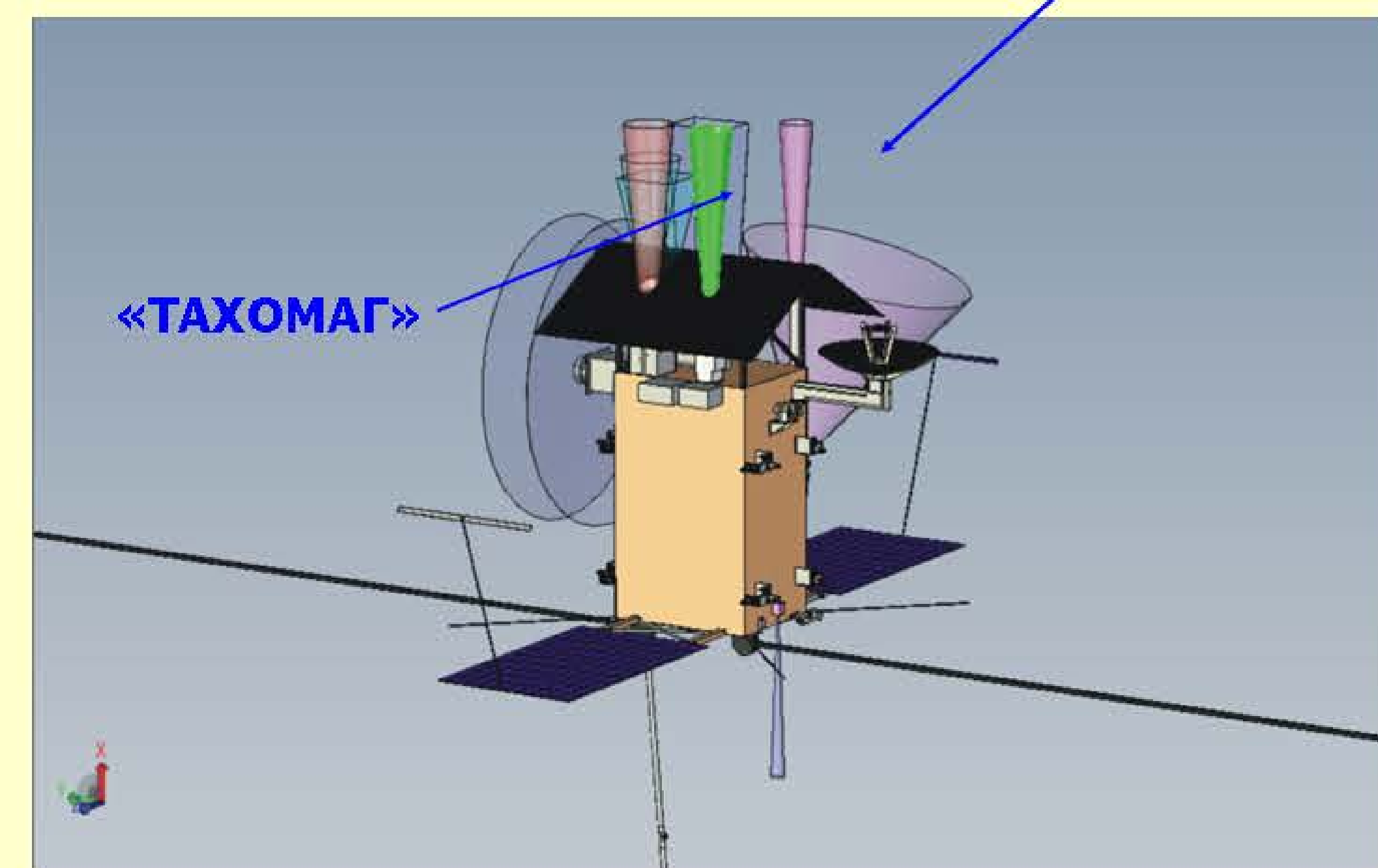
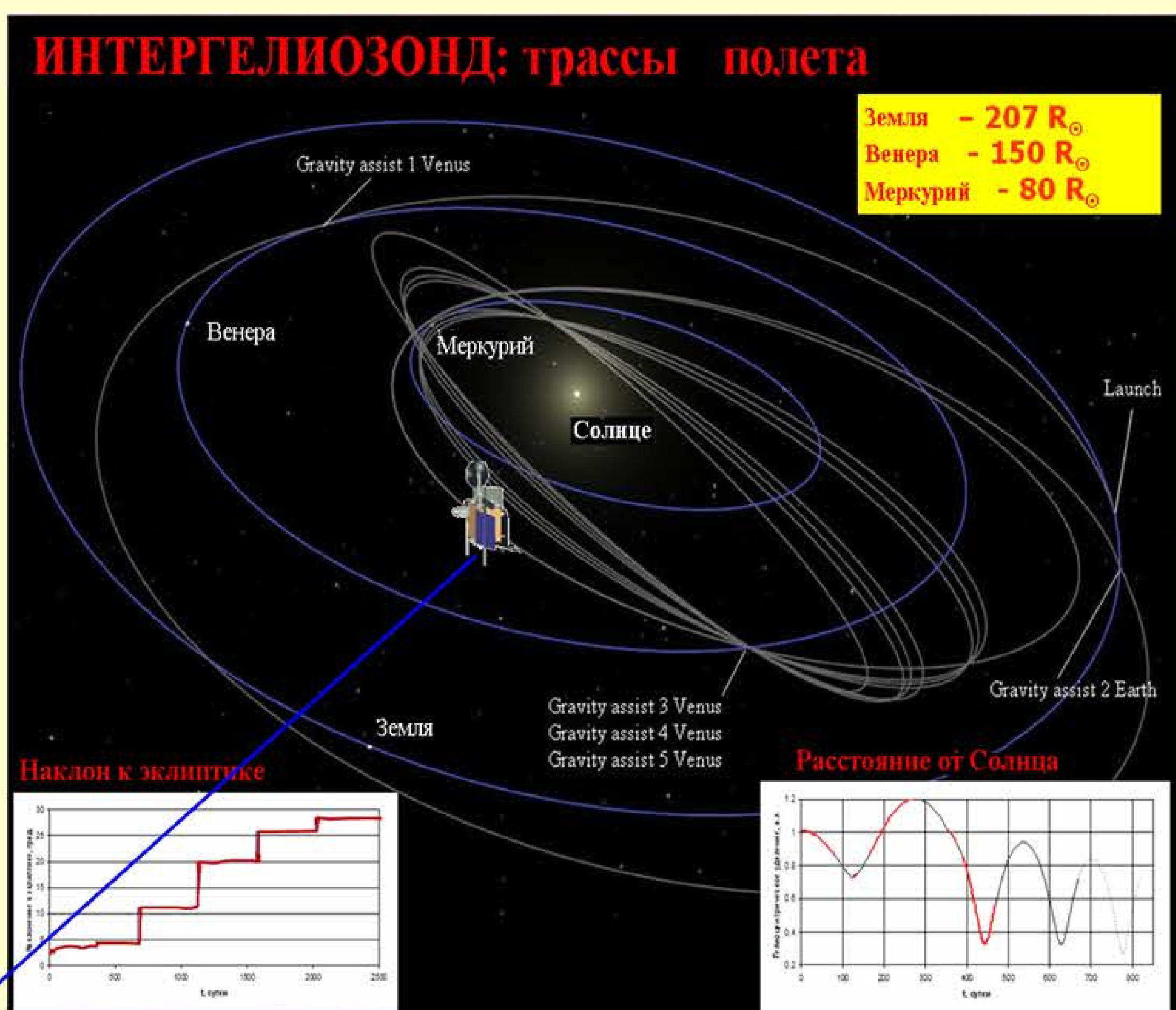
# СОЛНЕЧНЫЙ СПЕКТРОМАГНИТОГРАФ ФГБНУ НИРФИ ПОЛЕТИТ К СОЛНЦУ

В 2018 году в сторону Солнца должна быть отправлена Международная космическая станция «ИНТЕРГЕЛИОЗОНД». Траектория станции будет сформирована с использованием нескольких гравитационных маневров у Венеры и будет включать кольцевые орбиты вокруг Солнца с наклонами от 3,03 до 31,53 градусов к плоскости эклиптики.

Максимальное сближение станции с Солнцем будет составлять 60 солнечных радиусов или 0,3 астрономические единицы (а.е.).

Миссия «ИНТЕРГЕЛИОЗОНД» имеет целью решение нескольких научных проблем:

- исследование сверхтонкой структуры первичных магнитных трубок в атмосфере Солнца;
- исследование магнитных полей в приполярных областях Солнца;
- комплексное изучение природы и глобальной динамики наиболее мощных проявлений солнечной активности – солнечных вспышек, корональных выбросов массы и их влияния на гелиосферу и космическую погоду;
- исследование короны Солнца и солнечного ветра от низких до высоких гелиоширот.



Полезная нагрузка станции будет содержать: 9 солнечных и 7 гелиосферных инструментов.

Исследования Солнца в оптическом диапазоне длин волн от 0,3 до 0,6 мкм будет осуществляться при помощи научной аппаратуры «Многофункциональный солнечный телескоп «ТАХОМАГ»».

По результатам конкурсного отбора право разработки «ТАХОМАГ» было предоставлено рабочей группе в составе:

- ФГБНУ НИРФИ
- ИЗМИРАН

Из 120 кг полезной нагрузки доля «ТАХОМАГ» составляет 38 кг. Таким образом, «Тахомаг» является одним из наиболее значимых солнечных инструментов.

«ТАХОМАГ» будет являться крупнейшим телескопом (диаметр первичного зеркала 400 мм) для исследования солнечной атмосферы, используемый в условиях дальнего космоса. Он будет обеспечивать наблюдения поверхности Солнца с рекордными на сегодняшний день линейным и спектральным разрешениями, с которыми ранее Солнце не исследовалось:

**дифракционное разрешение** 0.1 угл. сек на  $\lambda \sim 0,3$  мкм  
( $\sim 25$  км по поверхности Солнца на расстоянии 0.3 а.е.)  
0.2 угл. сек на  $\lambda \sim 0,6$  мкм  
( $\sim 50$  км по поверхности Солнца на расстоянии 0.3 а.е.)

**угловое поле зрения** 34000 угл. сек.

**спектральное разрешение** 20 мÅ.

**спектральный диапазон** 2,4 Å в окрестности магнитоактивных линий FeI 6301.5Å and 6302.5Å)

**анализатор поляризации** полный вектор Стокса

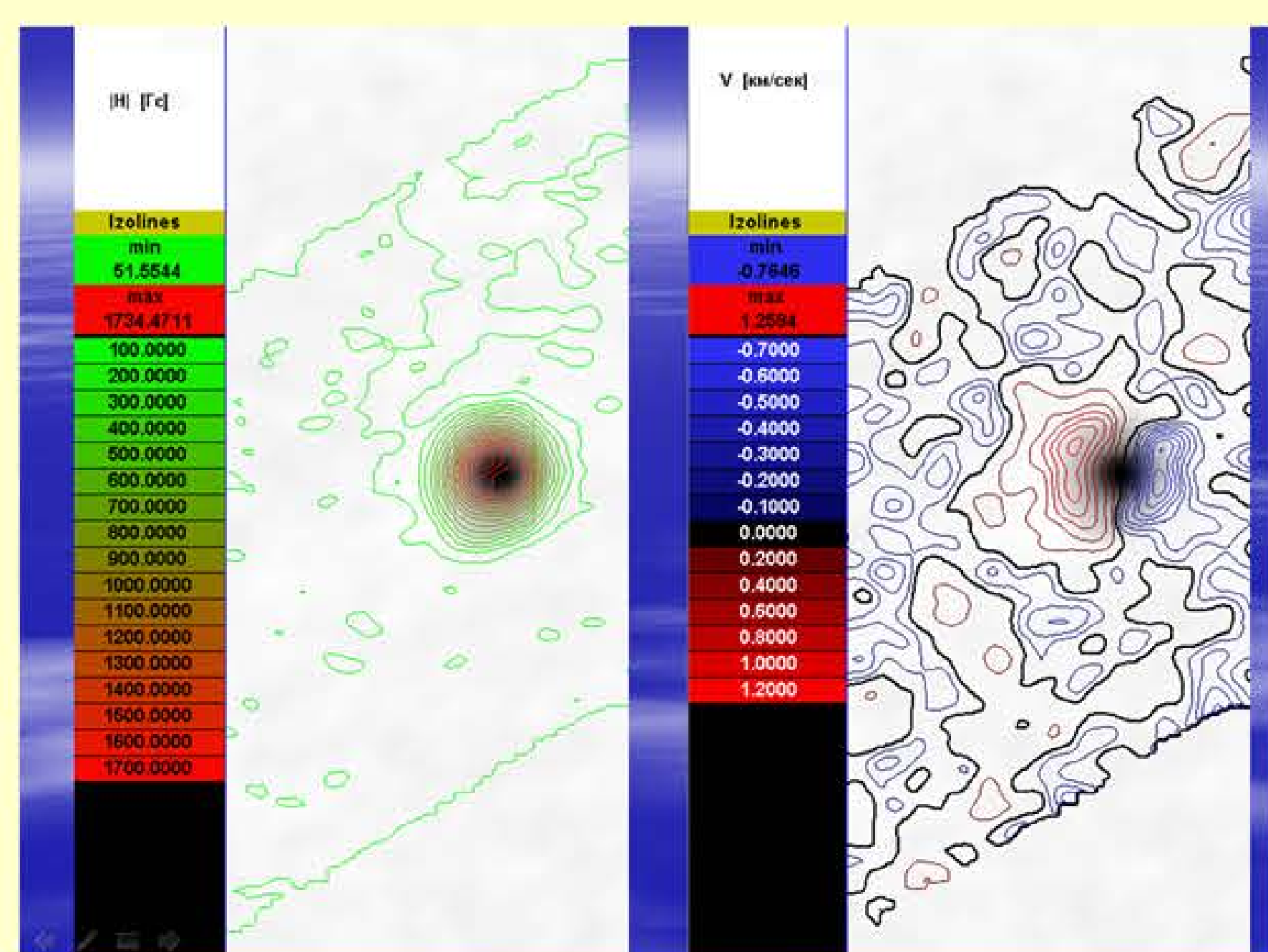
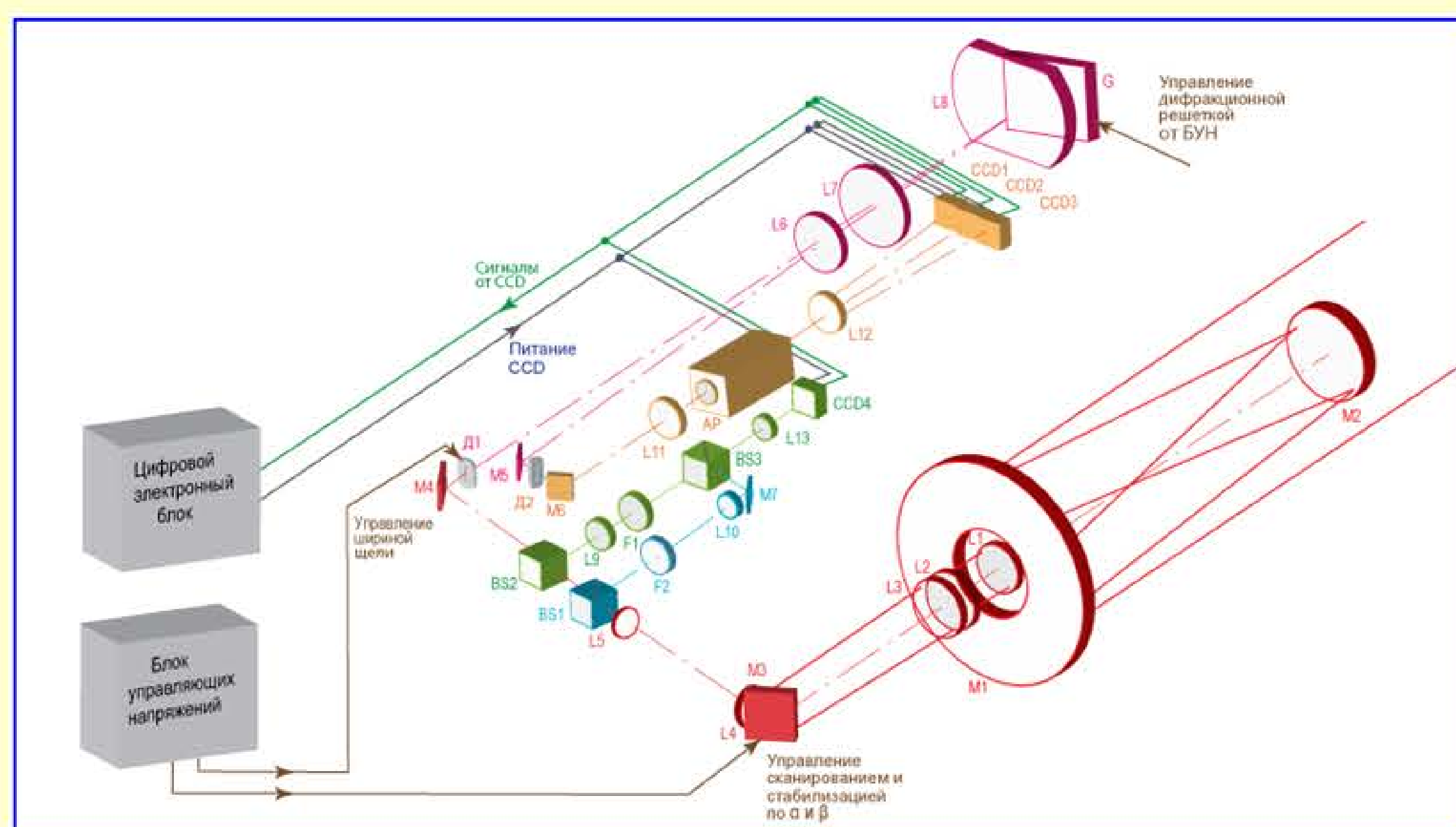
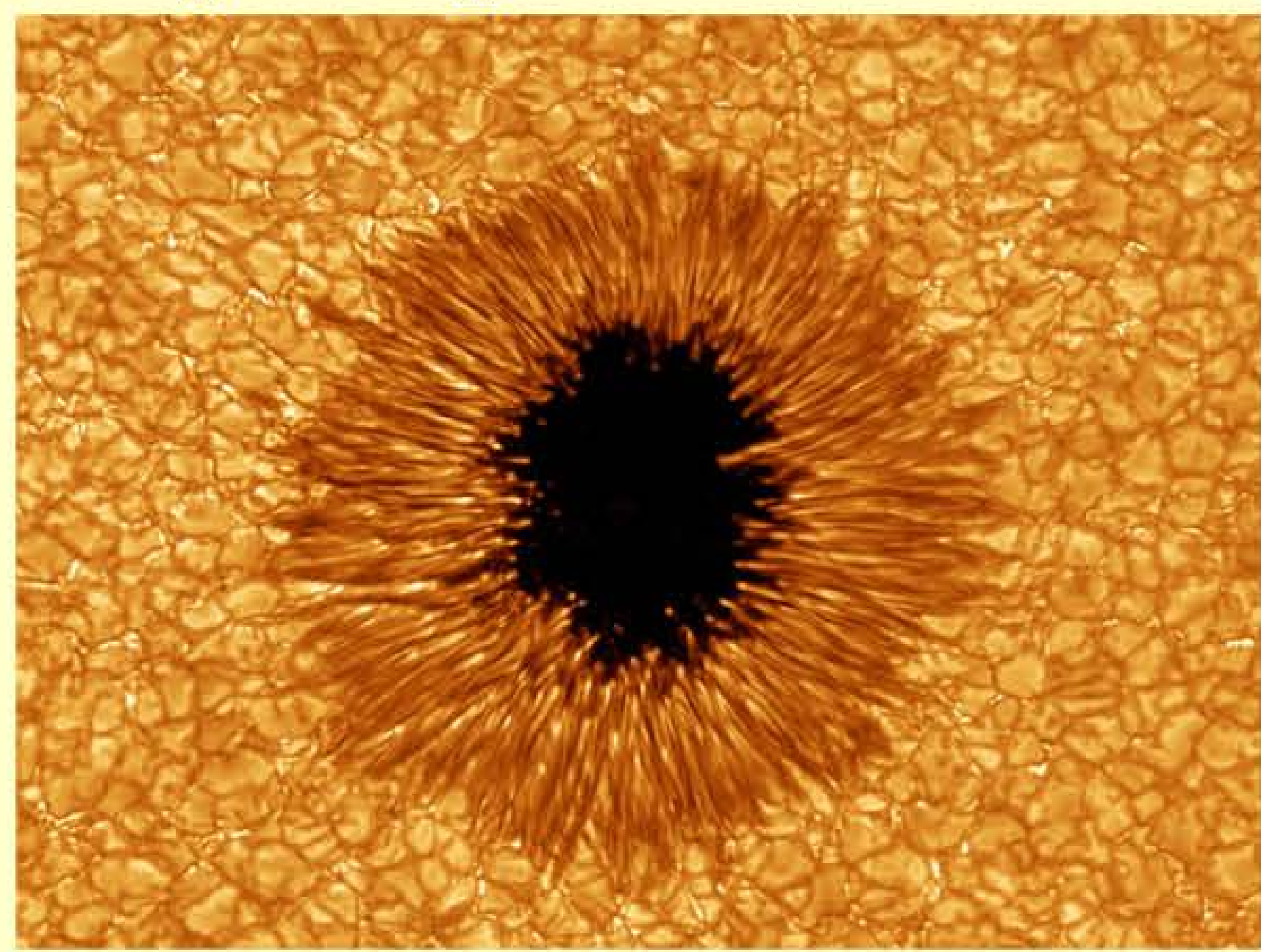


Схема многофункционального оптического телескопа «ТАХОМАГ».

Разрабатываемый комплекс состоит из:

- питающего оптического телескопа (M1-M2, L1-L5);
- солнечного спектромагнитографа с анализатором поляризации параллельного типа (D1, L6-L8, G, D2; V6, L11, AP, L12, CCD)
- блока узкополосных фильтров (BS1, L9, F1,; BS2, F2, L10, BS3, L13, CCD).

Карты полного вектора магнитного поля и поля скоростей в фотосфере в районе одиночного солнечного пятна, полученные на наземном аналоге спектромагнитографа «ТАХОМАГ» (патент на изобретение №2406982 от 20.12.2010)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ В ФГБНУ НИРФИ  
ОКОЛОЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА И СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫХ СВЯЗЕЙ

Оригинал макет подготовлен  
в отделе Методов обработки научной информации  
ФГБНУ НИРФИ

---

Подписано в печать 21.01.2013 г. Формат 60×84/8  
Бумага писчая. Объем 1,4 усл. п. л. Заказ 5620. Тираж 50.

---

Отпечатано в ФГБНУ НИРФИ.  
603950 Н.Новгород, ул. Б.Печерская, 25/12а



# МНОГОЦЕЛЕВОЙ СТЕНД "СУРА" ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ОКОЛОЗЕМНОГО И КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

*Физика ионосферы*

*Физика атмосферы*

*Солнечно-земные связи*

*Длинноволновая радиоастрономия*

*Распространение радиоволн*

