

Национальная академия наук Украины  
Радиоастрономический институт

На правах рукописи

УДК: 537.876.23

Колосков Александр Валериевич

**Электромагнитные проявления низкочастотных процессов в геокосмосе**

01.04.03 – радиофизика

Диссертация на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Научный консультант – доктор физико-математических  
наук, чл.-корр. НАН Украины  
Ямпольский Юрий Моисеевич

Харьков – 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	7
РАЗДЕЛ 1.....	19
АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР.....	19
1.1 Геокосмос.....	19
1.1.1 Магнитосфера.....	21
1.1.2 Ионосфера.....	24
1.1.3 Атмосфера и литосфера.....	31
1.2 Низкочастотные процессы в геокосмосе.....	33
1.2.1 Наземный патруль солнечных и галактических источников.....	37
1.2.2 Патруль космической погоды с помощью орбитальных аппаратов.....	39
1.2.3. Наземные системы диагностики состояния ионосферы Земли.....	40
1.2.4 Шумановский резонанс.....	48
1.2.5 Ионосферный альфвеновский резонатор.....	53
1.2.6 Акустико-гравитационные волны.....	58
Выводы Раздела 1.....	61
РАЗДЕЛ 2.....	62
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И ПРОЦЕССОВ.....	62
2.1 Измерительные системы, размещенные в полярных регионах.....	64
2.2 Низкочастотная обсерватория РИ НАНУ.....	73
2.3 Сеть интернет управляемых ВЧ приемников.....	80
2.3.1. Аппаратное обеспечение ПИК и программа сбора данных.....	86
2.3.2. Система интернет-трансляции обработки и визуализации данных наблюдений.....	89
2.4 Методика обработки и визуализации данных УНЧ-СНЧ.....	93
Выводы Раздела 2.....	100

РАЗДЕЛ 3 .....	102
ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ШУМАНОВСКИХ РЕЗОНАНСОВ.....	102
3.1 Сезонно-суточные зависимости интенсивности и пиковой частоты ШР .....	105
3.2 Суточно - сезонные зависимости поляризационных характеристик ШР..	115
3.3 Изменения характеристик ШР в цикле солнечной активности .....	138
3.4 Возможные механизмы долгосрочных вариаций пиковых частот и интенсивностей .....	149
3.5 Поляризационная локация сверхмощных СНЧ всплесков.....	160
Выводы Раздела 3 .....	178
РАЗДЕЛ 4.....	181
ИОНОСФЕРНЫЙ АЛЬФВЕНОВСКИЙ РЕЗОНАТОР.....	181
4.1 Модель связанных МГД резонаторов.....	183
4.1.1 Основные соотношения.....	184
4.1.2 Собственные частоты ИАР и FLR.....	190
4.1.3 Сравнение модельных расчетов с экспериментом .....	194
4.2 Суточные и сезонные и периодичности поведения ИАР, зависимость от солнечной и геомагнитной активности .....	197
4.3. Сопоставление результатов многопозиционных наблюдений ИАР ...	210
4.4. Эффект расщепления резонансных мод ИАР .....	215
4.5 Методика восстановления критической частоты ионосферы по данным наблюдений ИАР .....	221
Выводы Раздела 4 .....	226
РАЗДЕЛ 5.....	229
ГЛОБАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ РЕЗОНАТОРЫ, КАК ИНДИКАТОРЫ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ.....	229
5.1 Эффекты сверхмощной геокосмической бури октября-ноября 2003 г.	230
5.2 Реакция электромагнитных резонаторов на протонные и рентгеновские вспышки на Солнце .....	245

5.3 Проявления сейсмической активности в электромагнитном излучении УНЧ-СНЧ диапазона .....	253
5.4 Наблюдения излучения энергосистем Североамериканского континента в Антарктике, “уикэнд эффект” .....	259
Выводы Раздела 5 .....	274
РАЗДЕЛ 6.....	276
МНОГОПОЗИЦИОННАЯ РАДИОДИАГНОСТИКА НИЗКОЧАСТОТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ИОНОСФЕРЕ .....	276
6.1 Радиальный дрейф стимулированных мелкомасштабных ионосферных неоднородностей.....	278
6.1.1 Измерительные установки и методика проведения наблюдений ..	279
6.1.2 Результаты наблюдений .....	282
6.1.3 Интерпретация результатов наблюдений .....	286
6.2 Диагностика ионосферных процессов методом многопозиционного и многочастотного приема рассеянных ВЧ сигналов .....	294
6.2.1 ВЧ сигналы, рассеянные на естественных неоднородностях.....	294
6.2.2 Диагностика неоднородностей в области ИИТ методом ракурсного рассеяния ВЧ сигналов .....	300
6.3. Диагностика волновых возмущений ионосферы методом радиопросвечивания сигналами ГНСС .....	310
6.4 Изучение механизмов сверхдальнего распространения ВЧ сигналов .	318
Выводы Раздела 6 .....	335
ВЫВОДЫ.....	338
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	341

## ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

CME – Coronal mass ejection

EISCAT – European Incoherent Scatter Scientific Association

FLR – Field line resonances

GEC – Global electron content

GIM – Global Ionospheric Maps

GOES – Geostationary Operational Environmental Satellite

HAARP/ХААРП – The High Frequency Active Auroral Research Program

IAGA – International Association of Geomagnetism and Aeronomy

INTERMAGNET – International Real-time Magnetic Observatory Network

LIS – Lightning Imaging Sensor

OTD – Optical Transient Detector

URSI – International Union of Radio Science

АГВ – Акустико-гравитационные волны

АММС – Автоматическая метеомагнитная станция

ВЗИ – Вертикальное зондирование ионосферы

ВЧ – Высокие частоты

ГКЛ – Галактические космические лучи

ГНСС – Глобальная навигационная спутниковая система

ДН – Диаграмма направленности

ДСЧ – Доплеровское смещение частоты

ЗВ – Запад - Восток

ИАР – Ионосферный альфвеновский резонатор

ИИТ – Искусственная ионосферная турбулентность

ИСЗ – Искусственный спутник Земли

КВ – Короткие волны

КП – Космическая погода

ЛЭП – Линии электропередач

МГД – Магнитогидродинамические волны  
МОН – Магнитоориентированные неоднородности  
МПЗ – Магнитное поле Земли  
МПЧ – Максимально применимая частота  
МР – Магнитосферный резонатор  
НР – Радары некогерентного рассеяния  
НС – Нагревный стенд  
ОНЧ – Очень низкие частоты  
ПИВ – Перемещающиеся ионосферные возмущения  
ПИК – Приемно-измерительный комплекс  
ПО – Программное обеспечение  
ПЭС – Полное электронное содержание  
РР – Ракурсное рассеяние  
РСС – Резонансные структуры спектров  
СВМ – Смещенный вниз максимум  
СНЧ – Сверхнизкие частоты  
СЮ – Север-Юг  
ТПН – Тепловая параметрическая неустойчивость  
УАС – Украинская антарктическая станция  
УАЭ – Украинская антарктическая экспедиция  
УВЧ – Ультравысокие частоты  
УНЧ – Ультранизкие частоты  
ЦУП – Центральный пункт управления  
ЧУЗИ – Частотно-угловое зондирование ионосферы  
ШАЛ – Широкий атмосферный ливень  
ШР – Шумановский резонатор  
ШСВМ – Широкий смещенный вверх максимум

## ВВЕДЕНИЕ

*Актуальность темы.* Данная диссертационная работа посвящена разработке новых радиофизических методов электромагнитной диагностики околоземного космического окружения Земли, направленных на изучение наиболее “энергонесущих” низкочастотных процессов, происходящих в геокосмосе. Исследуемая область пространства начинается в нижней ионосфере и заканчивается в верхней магнитосфере. Ее внешнюю границу можно условно отнести к высотам магнитопаузы.

С началом космической эры во второй половине XX-го столетия геокосмос стал средой обитания человечества. Сотни наземно-космических комплексов непрерывно обеспечивают пользователей услугами радиосвязи, телевидения, глобальной навигации, мониторингом атмосферы, диагностики недр, поверхности суши и мирового океана, прогнозирования катастрофических явлений и другими жизненно важными потребностями цивилизации. Очевидно, что успешное функционирование уже существующих и создание новых систем требуют совершенствования наших знаний о среде “обитания” искусственных спутников Земли (ИСЗ), являющихся главным технологическим звеном в эксплуатации геокосмоса. Одним из ведущих научных направлений XXI-го века международным сообществом ученых провозглашена концепция космической погоды (КП), направленная на визуализацию состояния околоземного плазменного окружения и построение прогностических моделей его поведения в зависимости от солнечной активности.

Еще одним важным побудительным мотивом для развития исследований ионосферы и магнитосферы нашей планеты является фундаментальный научный аспект солнечно-земного взаимодействия. На сегодня достаточно подробно изучены и хорошо моделируются в среднем процессы взаимодействия атмосферы и магнитного поля Земли с регулярными

радиационными и корпускулярными потоками солнечной энергии. В тоже время флуктуационные процессы в геокосмосе, стимулируемые спорадической активностью Солнца – вспышками разных типов, выбросами корональных масс и эмитированием высокоэнергичных солнечных лучей изучены далеко не полно. Ионосфера и магнитосфера являются гигантскими природными плазменными “лабораториями”, позволяющими исследовать процессы, не реализуемые в наземных условиях.

Очевидно, что ключевую роль в развитии исследований геокосмоса и создании образа космической погоды играет дистанционная диагностика околоземного пространства. Безусловными преимуществами обладают дистанционные радиофизические методы зондирования ионосферы и магнитосферы, основанные на применении в качестве “сенсоров” электромагнитных полей и сигналов. В связи с растущим энергопотреблением и, как следствие, электромагнитным загрязнением окружающей среды, предпочтительнее оказываются такие методы, которые не требуют создания специальных передающих систем, а используют уже существующие виды электромагнитного излучения природного и искусственного происхождения.

В связи с этим разработка новых оригинальных подходов дистанционного зондирования геокосмоса, с использованием природных “индикаторов” космической погоды является *актуальной и перспективной*. В качестве таких “индикаторов” в диссертации предложены, исследованы и апробированы глобальные электромагнитные резонаторы – Шумановский резонатор (ШР) и Ионосферный альфвеновский резонатор (ИАР). ШР образован сферической полостью между Землей и нижней ионосферой. ИАР сформирован высотным профилем электронной концентрации и структурой магнитного поля Земли (МПЗ). Нижняя граница ИАР расположена на высотах динамо области, а верхняя локализована во внешней ионосфере. Собственными модами Шумановского резонатора являются электромагнитные волны СНЧ диапазона, длина волн которых соизмерима с длиной земной окружности. Резонансными колебаниями ИАР являются МГД

волны УНЧ диапазона с пространственными масштабами порядка толщины ионосферы (1000 – 2000км).

Описанные выше резонансные системы применены в диссертации для диагностики низкочастотных процессов в геокосмосе, стимулированных регулярными гелиофизическими циклическими, спорадической активностью Солнца, мощными возмущениями в магнитосфере, тропосфере и на поверхности Земли. К первым относятся 11-летний цикл солнечной активности, сезонные и суточные вариации, вторую группу формируют вспышки на Солнце, магнитные бури, высыпания энергичных частиц, мощные тропосферные погодные фронты, глобальная грозовая активность, землетрясения, акустико-гравитационные волны и искусственные воздействия на ионосферную плазму.

Изученные в работе явления носят планетарный характер, поэтому для их диагностики была создана сеть пространственно-разнесенных, автономных, постоянно действующих обсерваторных радиофизических комплексов дистанционной диагностики геокосмоса с использованием электромагнитных полей и сигналов УНЧ, СНЧ, ВЧ и УВЧ диапазонов, размещенных в Антарктике, Арктике, Европе, Азии и Африке. Исследования, проведенные в диссертации, позволили обнаружить и изучить ряд новых физических явлений и процессов, таких как 11-ти летний тренд в поведении ШР и ИАР, расщепление спектров ИАР, радиальный дрейф искусственно стимулированных ионосферных неоднородностей, “заброс” энергии излучения силовых электрических сетей Североамериканского континента в Антарктику и др.

Приведенные выше аргументы и факты свидетельствуют об **актуальности, востребованности и перспективности** проблематики данной диссертационной работы.

**Связь работы с научными программами, планами, темами.** В диссертации приведены обобщенные результаты исследований, выполненные автором самостоятельно либо при его определяющем участии, в период 1999-

2016 г., в соответствии с научными планами и научно-исследовательскими работами Радиоастрономического института НАН Украины (РИ НАНУ). Основные из выполненных НИР это: “Дослідження хвильових процесів у космічному просторі та космічна погода” (“Ямб-2”, 0103U007921, исполнитель); “Исследование электромагнитных процессов в геокосмосе методами дистанционного зондирования” (“Ятаган”, 0107U000029, исполнитель); “Дослідження збурень у геокосмосі та розробка нових дистанційних методів їх зондування” (“Ятаган-2”, 0111U000063, ответственный исполнитель); “Дослідження електромагнітних резонансних процесів у навколоземному просторі” (“Ятаган-3”, 0116U000035, ответственный исполнитель); “Розроблення, створення та удосконалення науково-дослідної апаратури для фундаментальних досліджень земної поверхні та навколоземного середовища” (“Зонд-3”, 0113U002045, исполнитель); “Двопозиційні (Антарктика-Україна) дослідження глобальних електромагнітних резонаторів – шуманівського (ШР) та іоносферного альфвенівського (ІАР)” (“Шіар”, 0110U004535, научный руководитель); “Дослідження електромагнітних проявів геокосмічних та погодних збурень в Антарктиці” (“Геліомакс”, 0111U007683, “Геліомакс,-2012”, 0112U007280с, научный руководитель); “Дослідження взаємодії космічної та атмосферної погодних систем за даними моніторингових спостережень електромагнітних обсерваторій на УАС та в Україні” (“Антей”, 0113U004571, научный руководитель).

Значительная часть результатов была получена в рамках международных проектов: “Дослідження динамічних процесів в іоносфері Землі методом багатопозиційної доплероскопії” (“Збурення”, 0111U003979, ответственный исполнитель); “Многопозиционные радарные исследования ионосферных неоднородностей в средних и высоких широтах над евразийским регионом” (“Сизиф”, 0113U000703, ответственный исполнитель); “Дослідження природних і штучно стимульованих іоносферних процесів та розробка дистанційних методів тривимірної діагностики

плазмових неоднорідностей” (“Шпіцберген-2014”, 0114U002820, зам. научного керівника); проекти УНТЦ - “Розробка методів зондування та візуалізації хвильових збурень для створення світової КХ мережі моніторингу іоносфери” (№827); “Дослідження впливу природних та техногенних збурень в атмосфері Північної півкулі на електромагнітне оточення в Антарктиці” (Р-072, виконавець); “Використання “ефекту саморозсіювання” для діагностики іоносферних неоднорідностей, стимульованих КХ випромінюванням за допомогою DPS систем”(Р-330, виконавець); “Визначення характеристик іоносферного хвилеводного поширення за даними моніторингу ВЧ випромінювання станції ХААРП в Антарктиці” (Р-524, виконавець); INTAS проект “Non-linear structuring of the ionospheric plasma under the action of powerful electromagnetic waves” (№ 03-51-5583, виконавець); проекти СРЕASMS 2011/10047 “Atmospheric-space weather system interaction in Arctic and mid-latitude regions” (координатор проекту от РІ НАНУ); СРЕА-2012/10021 “Norwegian-Ukrainian cooperation aimed to sustainable development of the education process in geospace researches” (координатор проекту от РІ НАНУ); СРЕАЛА-2014/10001 “Harmonization of the Norwegian-Ukrainian educational activities in geospace researches” (координатор проекту от РІ НАНУ).

**Цель и задачи исследования.** Цель работы состоит в разработке оригинальных подходов и новых методов для электромагнитной диагностики низкочастотных процессов в геокосмосе.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

- Разработка методического, аппаратного и программного обеспечения оригинальных систем мониторинга сигналов УНЧ, СНЧ, ВЧ и УВЧ диапазонов в Украине, Антарктике, Арктике, Африке и Сибири для диагностики низкочастотных геокосмических процессов, и состояния космической погоды. Обеспечение непрерывной многолетней работы этих систем.

- Создание баз данных систематических, многолетних, многопозиционных наблюдений электромагнитных полей и сигналов УНЧ, СНЧ, ВЧ и УВЧ диапазонов.
- Исследование регулярных закономерностей поведения электромагнитных низкочастотных процессов в геокосмосе, таких как: 11-ти летние, сезонные, недельные и суточные цикличности.
- Исследование реакции резонаторов и ионосферы на вспышечную активность Солнца, геокосмические бури, тропосферные фронты, землетрясения, планетарную грозовую и техногенную активности.
- Разработка упрощенных физических моделей, объясняющих связь между характеристиками глобальных электромагнитных резонаторов и структурными составляющими геокосмоса - ионосферой и магнитосферой.

*Объект исследования* – околоземное космическое пространство (геокосмос).

*Предмет исследования* – низкочастотные процессы в околоземном пространстве.

**Методы исследований.** В диссертации применены традиционные и оригинальные, разработанные с участием автора, радиофизические методы дистанционной диагностики геокосмоса. Реализована новая концепция использования электромагнитных резонаторов Земли в роли “индикаторов” состояния космической погоды. Характеристики УНЧ, СНЧ, ВЧ и УВЧ радиосигналов, анализировались спектральными, поляризационными и частотно-временными методами. Применялись методы статистической обработки и корреляционный анализ больших массивов экспериментальных данных. Для интерпретации результатов использованы методы численного и аналитического моделирования в рамках известных и оригинальных физических моделей. Первичные данные измерений и их обработка проводились в соответствии с рекомендациями международных научных организаций URSI, INTERMAGNET и IAGA. Инсталляция новых аппаратно-программных средств осуществлялась автором лично на обсерваториях в Украине, в Антарктиде и в Арктике.

### ***Научная новизна полученных результатов***

1) Впервые реализован новый подход использования электромагнитных резонаторов Земли в качестве индикаторов состояния космической погоды. Установленные реакции ШР и ИАР на регулярную и спорадическую активности Солнца. Разработаны упрощенные физические модели, объясняющие механизмы взаимодействия потоков солнечной энергии с плазменным окружением Земли.

2) Для дистанционной диагностики ионосферы и глобальной грозовой активности построена и введена в эксплуатацию глобальная сеть Интернет - управляемых приемных систем УНЧ, СНЧ и ВЧ диапазонов, которые размещены в Украине, Антарктиде, Арктике, Африке и в Сибири. Создана уникальная многолетняя база данных многопозиционных наблюдений, используемая для моделирования геокосмических процессов учеными Украины, США и Европы.

3) Проведено картографирование сверхмощных молниевых разрядов с применением поляризационной методики, новизна которой заключается в учете гиротропии ионосферы. Применены данные синхронного трехпозиционного мониторинга СНЧ шумов на двух антарктических станциях и на обсерватории в Японии. Данные картографирования верифицированы путем их сравнения с результатами глобального спутникового мониторинга молниевых разрядов в оптическом диапазоне.

4) Впервые зарегистрирован и изучен новый эффект "расщепления" спектральных максимумов ИАР, определены его свойства и предложены возможные механизмы возникновения эффекта. Разработана и апробирована новая методика оценки критической частоты ионосферного слоя F2 по анализу поведения спектральных характеристик ИАР, которая может быть применена в любом регионе земного шара.

5) Разработана и реализована новая методика спектрально-поляризационной диагностики в Антарктиде уровней "паразитного" излучения энергосистем промышленно развитых регионов земного шара.

Подтверждена регистрация сигнала с частотой 60 Гц от электросетей Северной Америки и изучены особенности его поведения: "weekend" эффект континентального энергопотребления, реакция характеристик сигнала на значительную аварию энергосистемы США - Канада. Впервые оценен уровень загрязнения электромагнитного окружения Антарктики техногенным излучением из северного полушария.

6) Впервые область искусственной ионосферной турбулентности, созданная мощным ВЧ нагревом, использована для управляемой "запитки" межслоевого ионосферного волновода между областями E и F. Путем анализа спектра стимулированного излучения ионосферы вблизи НС, и сигналов HAARP в Антарктике установлена зависимость между неоднородностями метровых - декаметровых масштабов и спектральной структурой стимулированной электромагнитной эмиссии ионосферы.

7) Впервые данная физическая интерпретация низкочастотного эффекта "расщепления" спектра пробного ВЧ сигнала, рассеянного на искусственной ионосферной турбулентности. Разработана модель радиального дрейфа стимулированных неоднородностей от центра к периферии нагретой области. Восстановлена динамика дрейфа в условиях стационарного нагрева ионосферной плазмы и на стадии релаксации.

8) Разработана и реализована новая методика построения карт вариаций полного электронного содержания по данным региональных сетей ГНСС приемников, позволяющая контролировать и визуализировать низкочастотные возмущения в ионосфере.

9) Создано и введено в эксплуатацию аппаратно-программное обеспечение для "Комплекса электромагнитного зондирования окружающего пространства" Низкочастотной обсерватории РИ НАНУ, который является объектом национального достояния Украины. Обеспечено непрерывное функционирование Комплекса в режиме Интернет - доступа, обработки и отображения данных в реальном времени на WEB - сайте <<http://geospace.com.ua>>.

*Практическое значение полученных результатов* заключается в подтвержденной экспериментально возможности применения разработанных в диссертации аппаратных средств, систем, методик и физических моделей для патруля состояния космической погоды, диагностики процессов, происходящих в геокосмосе и на поверхности Земли, а также анализа и прогноза глобальных климатических изменений. Важным аспектом этой деятельности является способность осуществлять радиодиагностику околоземного пространства на базе автоматизированных, интернет-управляемых, компактных, пассивных приемных систем, использующих в качестве пробных уже существующие природные и техногенные сигналы. Практический интерес представляет оригинальная концепция применения природных электромагнитных резонаторов, в роли индикаторов геокосмических и наземных процессов, а также состояния околоземной плазмы. Эта концепция развивает идею рассмотрения окружения Земли в виде естественной плазменной лаборатории, дополняя ее возможностью использования самих плазменных процессов и явлений в роли средств диагностики. Необходимо отметить что, разработки диссертационной работы уже нашли свою практическую реализацию при выполнении геокосмических исследований в рамках: “Государственных целевых научно-технических программ проведения исследований в Антарктике на 2002-2010 гг., и на 2011-2020 гг.”, “Программы совместных исследований Национальной академии наук Украины и Европейской ассоциации ионосферного рассеяния EISCAT на 2012-2015 гг.”. Методики и аппаратно-программное обеспечение, разработанные автором, уже внедрены на обсерваториях в Антарктиде, Арктике и в Украине и постоянно используются в НАНЦ МОНУ, РИ НАНУ и Университете г. Тромсо (Норвегия) для диагностики состояния геокосмоса. В частности, “Комплекс электромагнитного зондирования окружающего пространства” РИ НАНУ, являющийся объектом национального достояния Украины, функционирует по программе разработанной автором.

Практическая значимость и высокий уровень полученных в диссертации результатов подтверждены также тем, что большинство из них включено в цикл работ “Структура и динамика геофизических полей как отражение эволюции и взаимодействия геосфер в Антарктике”, выдвинутой на соискание и рекомендованной к присуждению Государственной премии Украины в области науки и техники за 2015 год.

Следует также отметить, что разработанные в диссертации методики и программно-аппаратные средства запланированы для внедрения в систему Национальной службы космической погоды, создаваемой в интересах Государственного космического агентства Украины.

***Содержание работы.*** Диссертационная работа состоит из введения, шести глав и заключения.

***Личный вклад соискателя.*** Все результаты, приведенные в диссертации получены автором самостоятельно, либо с его определяющим участием. В работах, посвященных изучению ШР [1, 2, 3], автору принадлежит модельное решение пеленгационной задачи, получение, обработка данных и интерпретация результатов, а в статьях [4, 5] – проведение экспериментов и обработка данных, накопленных в Антарктике и участие в их интерпретации. В статьях [6, 7], автор участвовал в постановке задач, а в публикациях [8, 9, 10, 11] ему принадлежат разработки алгоритмов обработки, организация экспериментов и интерпретации данных. В статьях посвященных решению обратных задач распространения радиоволн автору принадлежит построение алгоритмов, численное моделирование и расчеты характеристик ионосферных радиосигналов [12, 13, 14]. В работах [15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25] автор участвовал в проведении экспериментов, разработке алгоритмов, обработке данных и интерпретации результатов. В работах, посвященных реализации новых методов радиодиагностики, автору принадлежат: постановка задачи [26], моделирование и обработка данных натуральных экспериментов выполнены под его руководством в статьях [27, 28, 29, 30]. В публикациях [31, 32, 33], описывающих измерительные комплексы УНЧ,

СНЧ, ВЧ диапазонов автору принадлежат концепция построения сети, разработка методическо-программного обеспечения, инсталляция устройств, обработка и визуализация данных. Результаты комплексной диагностики геокосмоса и состояния космической погоды, полученные в диссертации, были доложены на многочисленных международных и национальных конференциях, симпозиумах и молодежных научных школах [34, 35, 36, 37, 38]. Автор неоднократно выступал в роли заказного докладчика и лектора на престижных научных форумах. Работы [7, 32] напечатаны без соавторства.

Автор лично осуществлял установку оборудования, инсталляцию методик и программного обеспечения на электромагнитной обсерватории УАС “Академик Вернадский” во время двух Украинских антарктических экспедиций (7-й и 10-й УАЭ), участвовал в IV-ой морской экспедиции в Антарктику. Соискателем было создано и эксплуатируется методическое и программное обеспечение шести сенсоров “Комплекса электромагнитного зондирования окружающего пространства”, расположенного на Низкочастотной обсерватории РИ НАНУ и установки РИ НАНУ в Северной Скандинавии и на арх. Шпицберген.

**Апробация результатов диссертации.** Представленные в работе результаты докладывались на 38 национальных и международных, конференциях, симпозиумах и школах, основные из которых следующие: Международные антарктические конференции, Киев, 2004, 2009, 2011, 2013 и 2015; International Antarctic Conference IAC2009, May 22-24, 2009, Kharkiv, Ukraine; Международные байкальские молодежные научные школы по фундаментальной физике, Иркутск, 2005, 2007 и 2011; Украинские конференции по космическим исследованиям, 2007, 2009, 2010, 2015; Вторая Всеукраинская конференция “Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки GEO-UA 2010”. г. Киев, 14-17 июня 2010; Первая украинская конференция “Электромагнитные методы исследования окружающего пространства”, Харьков, 25-27 сентября 2012; Всероссийские научные конференции “Глобальная электрическая цепь” 2013 и

“Распространение радиоволн” 2014; RF Ionospheric Interactions Workshops, 1999, 2001, 2005, 2008 USA; URSI, General Assemblies, 2002, 2008, 2014; 16th International EISCAT symposium, 12-16 August 2013, Lancaster UK; Remote Radio Sounding of the Ionosphere (ION – 2013, 2014); XV International Conference on Atmospheric Electricity, 15-20 June 2014, Norman, Oklahoma, USA; AGU Fall Meeting, 15-19 December 2014, San Francisco, USA; 14th International Ionospheric Effects Symposium IES-2015: 12-14 May 2015, USA; EUREF 2016 Symposium, Donostia San Sebastian, May 25th – 27th, 2016.

***Публикации.*** Основные материалы диссертации представлены в 38 научных работах, включая 26 статей в профильных по специальности “радиофизика” отечественных и зарубежных журналах, 12 тезисах докладов на национальных и международных конференциях.

## РАЗДЕЛ 1

### АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

В аналитическом обзоре рассмотрено современное состояние исследований околоземного космического пространства, методов и комплексов его дистанционной радиофизической диагностики. Обоснованы выбор проблематики исследований, необходимости и актуальности решения задач диссертационной работы.

В первом подразделе введены определения и кратко описаны современные понятия: геокосмос, магнитосфера, ионосфера и атмосфера, а также дано определение литосферы. Второй подраздел посвящен низкочастотным процессам и явлениям. В нем представлены основные характеристические индексы солнечной и магнитной активности, а также рассмотрены наземные радиофизические методы и комплексы, использующиеся для диагностики состояния геокосмоса. Показана необходимость дополнения их оригинальными разработками, созданными и эксплуатируемыми сегодня при участии автора. Представлены характеристики шумановских и ионосферных альфвеновских резонансов, акустико-гравитационных волн, рассмотрено современное состояние дел в области их изучения, а также очерчены проблемы и задачи, решению которых посвящена диссертационная работа.

#### 1.1 Геокосмос

Геокосмосом называется область межпланетного пространства вблизи Земли, включающая в себя нейтральную атмосферу, ионосферу и магнитосферу [39]. Слово геокосмос содержит две составляющие: “гео”, которая происходит от древнегреческого слова Земля - “γη”, и “космос” по-древнегречески “κόσμος” – мир, пространство. Это, как нельзя точнее,

соответствует определению, согласно которому: геокосмосом называется часть околоземного пространства, на параметры которого оказывают воздействие атмосфера и магнитное поле Земли. Внешней границей геокосмоса принято считать магнитопаузу, отделяющую область, контролируруемую магнитным полем Земли от межпланетной среды, свойства которой определяются потоками солнечного ветра [40]. Положение магнитопаузы определяется равенством динамического давления планетарного и межпланетного магнитных полей. В подсолнечной точке оно может быть оценено из соотношения:

$$(\rho v^2) \approx \left( \frac{4B(r)^2}{2\mu_0} \right), \quad (1.1)$$

Здесь:  $\rho$  и  $v$  это плотность и скорость солнечного ветра соответственно;  $B(r) = B_0/r^3$  - напряженность магнитного поля Земли;  $B_0$  - ее магнитный момент;  $r$  - дистанция до магнитопаузы, называемая расстоянием Чепмена-Ферраро;  $\mu_0$  - магнитная проницаемость вакуума. Учитывая (1.1)  $r$  можно оценить, как:

$$r \approx \sqrt[6]{\left( \frac{2B_0^2}{\mu_0 \rho v^2} \right)}, \quad (1.2)$$

Входящие в (1.2) величины  $\rho$  и  $v$  зависят от текущей солнечной активности. Поэтому расстояние до магнитопаузы в подсолнечной точке изменяется в пределах от 6 до 15 радиусов Земли ( $\sim 40\,000 - 100\,000$  км). При этом в хвостовой части характерный размер магнитосферы значительно увеличивается и может составлять более миллиона километров, что в несколько раз превышает радиус орбиты Луны.

Следует отметить, что существует и другое определение [39], в соответствии с которым к геокосмосу относится область межпланетного

пространства от солнечной фотосферы до мезосферы Земли. В такой формулировке геокосмос включает фотосферу, хромосферу, корону, солнечный ветер, магнитосферу и ионосферу Земли. Данное определение неявно предполагает, что все процессы в геокосмосе полностью формируются под влиянием энергетических потоков, приходящих от Солнца. Несомненно, Солнце является главным фактором, контролирующим околоземное плазменное окружение. В то же время, научные результаты последних лет, в том числе и полученные в данной работе, показывают, что на состояние геокосмоса также оказывают влияние процессы, происходящие под, на и вблизи поверхности Земли [41, 42, 43, 44]. Поэтому в диссертационной работе использовано первое определение геокосмоса, как области межпланетного пространства, где сказывается влияние Земли, ее атмосферы и магнитного поля.

Далее кратко рассмотрены области околоземного пространства, входящие в состав геокосмоса.

### 1.1.1 Магнитосфера

*Магнитосферой* называется область, в которой динамика заряженных частиц контролируется не столько тепловыми процессами, сколько геомагнитным полем [45, 46]. Математически это выражается неравенством:

$$\frac{B^2}{2\mu_0} > nkT, \quad (1.3)$$

где:  $B$  - индукция геомагнитного поля,  $k$  – постоянная Больцмана,  $n$  – концентрация плазмы,  $T$  – температура.

Изучение магнитосферы Земли было начато в 1600 году, когда английский физик Вильям Гильберт предложил простую “механистическую” модель магнитного поля Земли в виде намагниченного шара – тереллы (по латински “маленькая земля”). До середины 20-го века геомагнитное поле

исследовалось с поверхности при помощи магнитометров, которые дали возможность описать структуру поля в зависимости от координат и времени. Ракетные измерения, начатые в конце 50-х годов прошлого века, позволили начать исследования “in situ”. С этого времени спутниковые измерения стали главным способом получения информации о свойствах магнитосферы. Открытые в ходе космической миссии “Explorer-1” *радиационные пояса Ван-Аллена*, а также предложенная в 1958 г., американским астрофизиком Е. Паркером концепция солнечного ветра сформировали современные представления о структуре магнитосферы (см., рис. 1.1). Определяющее воздействие на нее оказывает конфигурация геомагнитного поля. Далее представлено ее краткое описание.

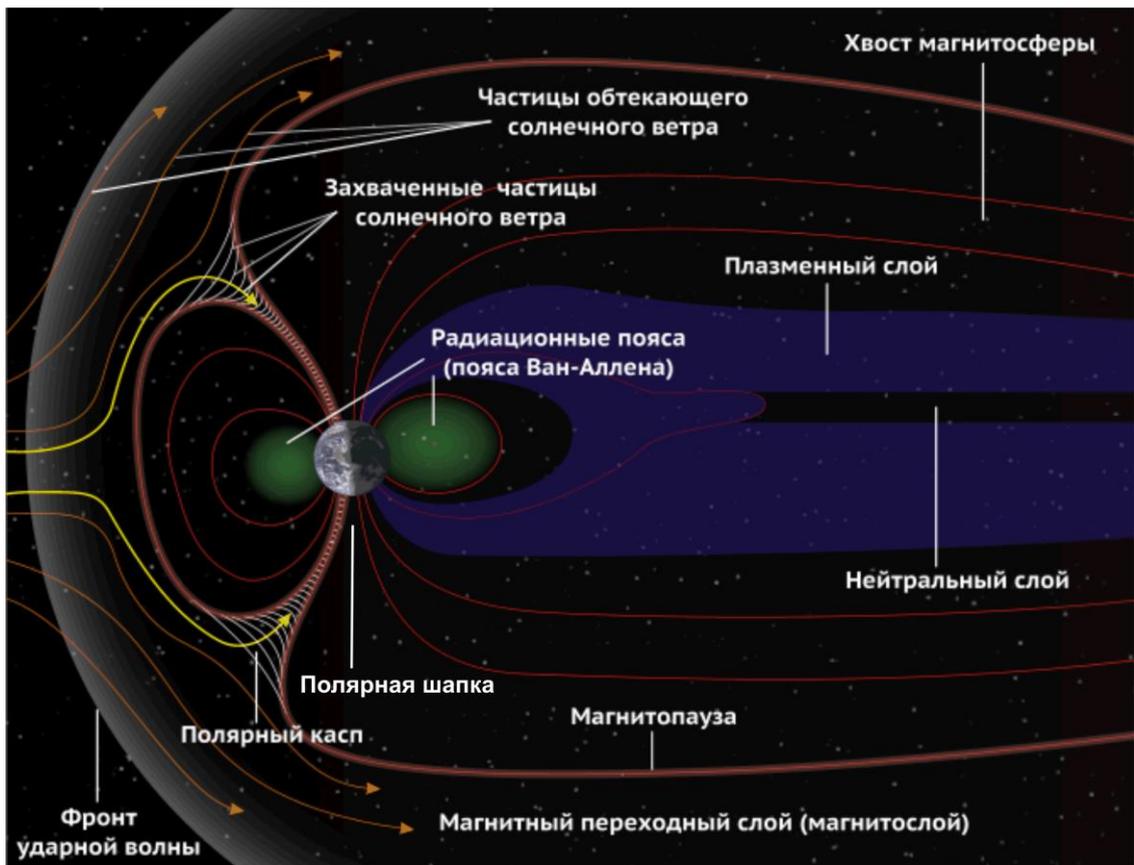


Рисунок 1.1 – Структура магнитосферы Земли (рисунок приведен согласно [47])

В спокойных условиях силовые линии, выходящие с геомагнитных широт до  $80^{\circ}$  дневного полушария, замыкаются над дневной стороной. Такая же система линий, но уже для меньшего диапазона широт присутствует и на ночной стороне. В области замкнутых силовых линий создаются условия для распространения вдоль них магнитогидродинамических (МГД) волн, которые отражаясь от магнитосопреженных участков ионосферы в Северном и Южном полушариях образуют структуру стоячих волн. Они формируют глобальный магнитосферный резонатор [48], свойства которого можно изучать, регистрируя на поверхности Земли геомагнитные пульсации [49]. Этот способ диагностики представлен в 4-ом разделе диссертации.

Силовые линии МПЗ, выходящие с более высоких широт, формируют область *полярного каспа* (воронки). Начиная с  $70^{\circ}$ , силовые линии ночной стороны оказываются сильно вытянутыми в антисолнечном направлении, образуя так называемый *хвост магнитосферы*. В плоскости, перпендикулярной направлению на Солнце, сечение хвоста напоминает греческую букву  $\theta$ , перемычки которой разделяют геомагнитные силовые линии, направленные к Солнцу и от него. Поверхность, разделяющая силовые линии, идущие в противоположных направлениях, называется *нейтральным слоем*. Частицы, влетающие в магнитное поле долей хвоста, смещаются под действием силы Лоренца, образуя ток, направленный вдоль наружной поверхности хвоста от его вечерней стороны к утренней.

Приполюсная область, силовые линии которой уходят в хвост магнитосферы называется *полярной шапкой*. Проецируемая на Землю овальная зона, близкая к проекции сечения хвоста магнитосферы, обозначает область, связанную силовыми линиями с магнитосферным хвостом. Она называется *авроральным овалом*. Заряженные частицы, находящиеся в хвосте магнитосферы и движущиеся по магнитным силовым линиям попадают внутрь рассматриваемой зоны, вызывая там полярные сияния, поэтому эта область называется еще *овалом полярных сияний*. Овал приближается к геомагнитному полюсу на дневной стороне и удаляется от него на ночной.

Размер овала и его положение сильно зависят от уровня солнечной активности. Во время мощных геокосмических бурь [46], таких как “событие Кэррингтона” 1859 года, полярные сияния могут наблюдаться даже в тропическом поясе [50]. Важно отметить изменчивость магнитосферы в зависимости от уровня активности Солнца. Условной границей между магнитосферой и *ионосферой* считается высота порядка 1000 км.

### 1.1.2 Ионосфера

*Ионосферой* называется ионизированная часть верхней атмосферы, расположенная в области высот примерно от 50 до 1000 км. Главной причиной ее возникновения является воздействие на нейтральную атмосферу высокочастотного ультрафиолетового и рентгеновского излучения Солнца, в результате чего происходит ионизация атомов и молекул [51]. Ионосфера Земли состоит из смеси газа нейтральных атомов и молекул (в основном молекулярных и атомных азота и кислорода) и квазинейтральной плазмы, в которой число отрицательно заряженных частиц (электронов) в среднем соответствует числу положительно заряженных ионов. Заряженные частицы околоземной плазмы влияют на распространяющиеся в ней электромагнитные волны, что позволяет использовать последние для дистанционной диагностики ионосферы. Определяющее влияние на распространение радиоволн оказывают наиболее легкие и подвижные из заряженных частиц — электроны, концентрация которых  $N_e$  определяется числом электронов в единице объема и характеризует пространственно-временное состояние ионосферы.

Данные наблюдений показали, что структуру ионосферы можно в первом приближении считать сферически слоистой [45, 51, 52]. Основные слои в соответствии с классификацией, введенной английским исследователем Э. Эплтоном, обозначаются буквами *E*, *F* и *D* [53]. Типичная структура ионосферы для разных уровней солнечной активности представлена на рис. 1.2 [45].

Согласно современным представлениям ионосфера структурируется следующим образом:

Слой *D* – это самая нижняя область, расположенная на высотах 60-90 км. В вечернее время в нижней части области (60-70 км) может возникать выраженный слой *C* и “долина” на высотах 70-85 км. В дневное время слой *C* обычно исчезает. В верхней части слоя *D* преобладают процессы фотоионизации, контролируемые уровнем солнечного излучения. В первую очередь ионизацию там обеспечивает солнечная линия  $L_{\alpha}$  ( $\lambda = 1216 \text{ \AA}$ ),

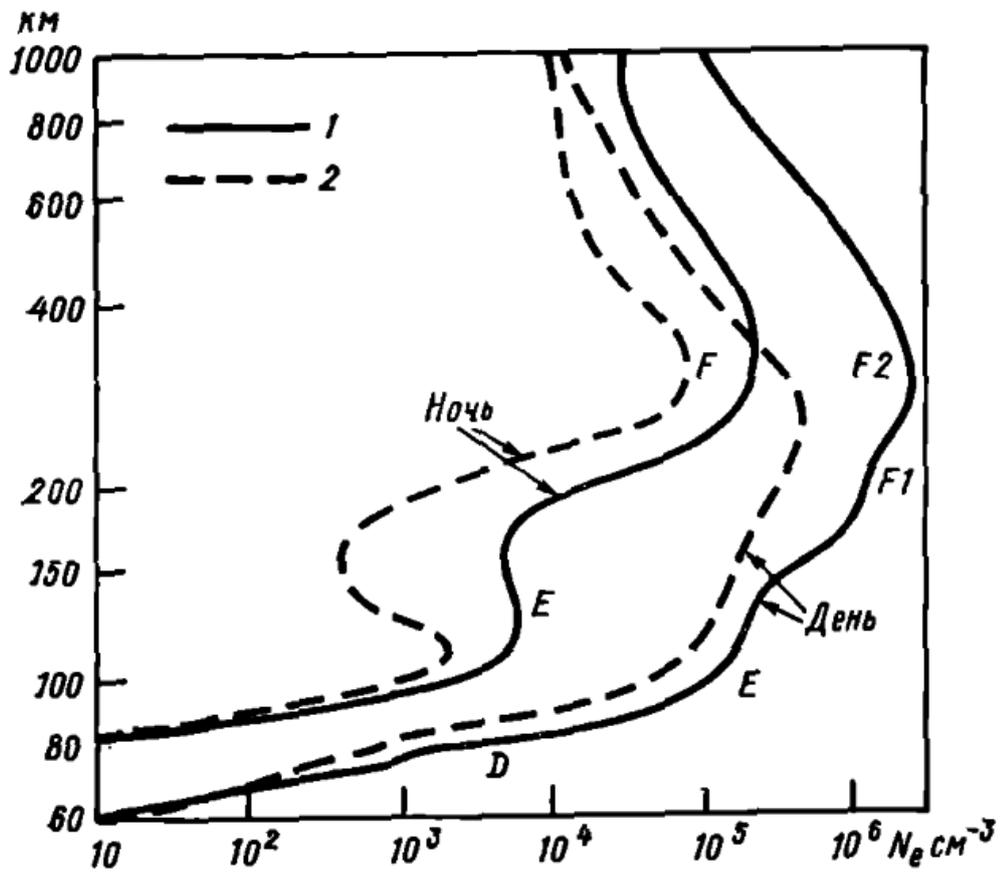


Рисунок 1.2 – Высотные профили электронной концентрации в среднеширотной ионосфере при максимуме (1) и минимуме (2) солнечной активности (рисунок взят из [45])

которая ионизирует окись азота  $NO$ . Кроме того, жестким рентгеновским ( $\lambda < 10 \text{ \AA}$ ) и ультрафиолетовым ( $1028 \text{ \AA} < \lambda < 118 \text{ \AA}$ ) излучением Солнца ионизируются молекулярные азот и кислород -  $N_2$  и  $O_2$ . В нижней части области  $D$  в спокойных условиях ионизация происходит в основном за счет галактических космических лучей (ГКЛ) и слабо меняется в течении суток. В возмущенных условиях дополнительную ионизацию обеспечивают так же “высыпающиеся” высокоэнергичные солнечные частицы. Из-за высокого коэффициента рекомбинации концентрация заряженной компоненты в  $D$  слое значительно ниже, чем нейтральной. Плазма на этих высотах является слабой примесью, в дневное время ее концентрация обычно не превышает  $10^3 \text{ см}^{-3}$ . Во время солнечных рентгеновских и протонных вспышек электронная концентрация в слое и может значительно возрасти, вплоть до  $10^4 \text{ см}^{-3}$ . Кроме спорадических изменений в возмущенные периоды имеют место регулярные суточные и сезонные вариации электронной концентрации в  $D$  области, которые имеют различный характер для низко, средне и высокоширотных регионов. Все вышесказанное говорит о большом многообразии и сложности процессов, формирующих распределение  $N_e$  в области  $D$ , и подтверждает вывод авторов монографии [51] о том что: “вариации параметров  $D$ -области изучены в наименьшей степени по сравнению с другими высотными областями”. Одной из причин этому является ограниченное число методов диагностики параметров  $D$ -области (метод частичных отражений [54, 55, 56], риометрические наблюдения [57], метод резонансного рассеяния на искусственных плазменных неоднородностях [58]). В то же время изучение  $D$ -области имеет не только фундаментальное, но и прикладное значение, поскольку изменения электронной плотности там существенно влияют на распространение радиоволн ВЧ, ОНЧ и СНЧ диапазонов. Следует отметить, что основное неотклоняющее поглощение ВЧ радиосигналы приобретают именно в  $D$ -слое. Для определяющей поглощение мнимой части  $\chi$  комплексного показателя

преломления  $n$  в пренебрежении магнитным полем можно записать следующее выражение [52]:

$$\chi = 4,6 \cdot 10^{-2} \frac{N_e \nu}{\omega^2 + \nu^2} \text{ дБ/км}, \quad (1.4)$$

где:  $N_e$  - электронная концентрация,  $\nu$  - частота соударений электронов с нейтралами,  $\omega$  - круговая частота радиоволны. Учитывая уравнение (1.4) и характерные высотные профили  $N_e$  и  $\nu$  можно показать (см., [52]), что максимум поглощения приходится на те высоты  $D$ -области, где  $\omega = \nu$ .

Во время мощных солнечных вспышек наблюдается сильное поглощение сигналов на ионосферных радиополосах вплоть до полного прекращения ВЧ радиосвязи. Прогноз и минимизация последствий таких явлений весьма актуальны. Знание процессов, происходящих в  $D$ -области, важно для понимания условий распространения радиоволн СНЧ и ОНЧ диапазонов и исследования характеристик глобальной грозовой активности. Эти вопросы подробно рассмотрены в разделах 3, 5 и 6 диссертации.

*Слой E* соответствует диапазону высот 90-120 км. Исторически он был открыт раньше других слоев ионосферы и известен еще как “слой Кеннелли – Хевисайда” [59, 60]. Характеристики  $E$  области хорошо контролируются солнечным излучением и близки к свойствам модели слоя Чепмена [61, 62]. Основным источником ионизации в области-  $E$  является ультрафиолетовое и рентгеновское излучение [51]. Днем электронная концентрация составляет до  $10^5 \text{ см}^{-3}$ , а ночью может падать до  $10^3 \text{ см}^{-3}$ . Ночная концентрация поддерживается за счет диффузии электронов из  $F$ -области ионосферы и дополнительной ионизации метеорными потоками и галактических космических лучей (ГКЛ). Заметим, что в освещенной  $E$  области фотохимические процессы преобладают над эффектами переноса, тогда как в неосвещенной части эти процессы могут конкурировать.

На высоты  $E$  слоя без заметного ослабления проникает солнечное рентгеновское излучения с  $\lambda < 100 \text{ \AA}$  (преимущественно  $40 \dots 60 \text{ \AA}$ ), и длинноволновое ультрафиолетовое с  $\lambda > 977 \text{ \AA}$ . Рентгеновское излучение ионизирует нейтральные компоненты:  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $O$ , длинноволновое – только  $O_2$ . В спокойных условиях при средней солнечной активности вклад рентгеновского излучения невелик, и можно считать, что ионизируется только одна атмосферная компонента  $O_2$ . В сумеречных условиях становится важной ионизация  $NO$  линией  $L_\alpha$  ( $\lambda = 1216 \text{ \AA}$ ). Поскольку глубоко проникающая линия  $L_\alpha$  ослабевает с ростом зенитного угла Солнца гораздо медленнее, чем интенсивность более коротковолнового излучения, то, несмотря на сравнительную малость концентрации  $n(NO)$ , произведение  $I(L_\alpha)n(NO)$  в сумерках может стать достаточно большим, чтобы заряд  $q(NO)$  стал сравнимым с  $q(O_2)$ . Вследствие этого, ионы  $NO^+$  становятся преобладающим над всеми остальными. Таким образом,  $E$  область ионосферы – это область молекулярной плазмы, представленной преимущественно двухатомными ионами.

$E$  область в силу своих электродинамических свойств называется также динамо-областью, поскольку тут возбуждаются горизонтальные токовые системы. Именно здесь находятся “нижние стенки” магнитосферного и ионосферного альфвеновского резонаторов, которые определяют свойства данных резонансных систем. В высоких широтах в  $E$  области на ионосферных высотах “закорачиваются” магнитосферные электрические токи, тем самым определяя механизмы ионосферно-магнитосферного взаимодействия.

Кроме регулярного  $E$ -слоя в диапазоне высот  $90 \dots 150$  км достаточно часто возникают спорадические  $E$  слои ( $E_s$ ), как правило, достаточно тонкие образования, толщиной порядка  $1$  км. При этом электронная концентрация в них может быть весьма большой, превышающей концентрацию максимума  $E$  и  $F$  областей. В настоящее время общепринятой является теория “ветрового сдвига”. Формирование среднеширотных спорадических слоев объясняется

“сгонкой” заряженных частиц по вертикали с накоплением на некоторой высоте [51] и конвергенцией металлических ионов, время жизни которых многократно превышает время жизни основных ионизированных молекулярных компонент области  $E$  [63]. На сезонно-суточное поведение среднеширотных спорадических слоев оказывают влияние ветры, а также приливные вариации, планетарные волны и АГВ [64, 65].

$F$  область ионосферы расположена выше 130-140 км. Здесь на высотах 250-450 км формируется главный максимум электронной концентрации ( $10^5 - 10^6 \text{ см}^{-3}$ ). В нижней части области  $F$  на высотах 160...200 км иногда может развиваться слой  $F_1$ , который проявляется как выступ или перегиб на профиле  $N_e(h)$  между слоями  $E$  и  $F_2$ . Слой  $F_1$  наблюдается преимущественно летом в дневное время и практически отсутствует зимой. В области  $F_1$  подобно регулярному слою  $E$  преобладают фотохимические процессы и ионизация контролируется солнечным ультрафиолетовым излучением в диапазоне длин волн  $100 \text{ \AA} < \lambda < 900 \text{ \AA}$  [51]. Основные ионизируемые компоненты на этих высотах - азот и кислород, а преобладающими ионами являются  $NO^+$  и  $O_2^+$ , те же, что и в  $E$  - области. Начиная с высоты 200 км процессы переноса начинают преобладать над фотохимическими. Ионобразование как и в  $F_1$  поддерживается ультрафиолетовым излучением с  $100 \text{ \AA} < \lambda < 900 \text{ \AA}$ . Основная ионизируемая компонента это атомарный кислород, а преобладающий ион -  $O^+$ . На больших высотах к нему добавляются атомарные ионы водорода и гелия  $H^+$  и  $He^+$ . Считается, что в ночное время электронная концентрация поддерживается за счет потоков плазмы из протоносферы [51] и частично фотоэлектронов из освещенной магнитосопреженной области.

Поскольку выше 200 км времена жизни ионов  $O^+$  сравнимы и больше характерного времени переноса, максимум области  $F_2$  формируется за счет амбиполярной диффузии  $O^+$  вниз, где скорости рекомбинации выше. В силу “замагниченности” плазмы ( $\omega_H > \nu$  гирочастоты больше частот соударений) диффузия осуществляется преимущественно вдоль магнитного поля. Поэтому большое влияние на вертикальное распределение плотности плазмы особенно

в средних широтах оказывают нейтральные ветры, увлекающие плазму вверх или вниз [66]. В низких и высоких широтах важную роль играют дрейфы заряженных частиц в скрещенных электрических и магнитных полях. Кроме того, в  $F$  области присутствуют множество неоднородностей различных масштабов, связанных с прохождением солнечного терминатора [67], планетарных [68] и внутренних акустико-гравитационных волн [69, 70], а также неустойчивостей различной природы, которые приводят к турбулизации ионосферной плазмы [71].

Таким образом,  $F$  область является неоднородной и нестационарной средой, теоретическое и экспериментальное изучение которой еще далеко не окончено. Поэтому, несмотря на наличие, достаточно большого числа способов диагностики этой области ионосферы, разработка новых методик является весьма актуальной задачей. В этом контексте в 4-ой главе настоящей работы предложен новый метод определения критической частоты области  $F_2$  по данным наблюдений ионосферного альфвеновского резонанса, а глава 7 полностью посвящена новым способам диагностики неоднородной структуры  $F$  слоя. Следует отметить, что особенно сложной областью для наблюдения является “долина” между слоями  $E$  и  $F$ , недоступная для большинства традиционных методов ионосферного зондирования, как с поверхности, так и из космоса. Ее исследование возможно только дорогостоящими и сложными для реализации методами некогерентного рассеяния [72], резонансного рассеяния на искусственных плазменных неоднородностях [73] и путем спутниковых наблюдений “in situ”. В диссертационной работе проведен анализ сверхдальнего распространения сигналов нагревного стенда HAARP (Аляска, США) зарегистрированных малоразмерным ВЧ приемником в Антарктике и показано, что наиболее вероятным механизмом канализации энергии является возбуждение межслоевого ионосферного волновода, как раз в области “долины”. Это позволяет использовать данные подобных экспериментов для диагностики свойств этой слабо изученной области ионосферы.

### 1.1.3 Атмосфера и литосфера.

Хотя рассматриваемые в диссертационной работе явления преимущественно локализованы в геокосмосе, т.е. на ионосферных и магнитосферных высотах, часть порождающих эти процессы источников (грозовая активность, мощные погодные фронты, землетрясения) находятся в тропосфере, на поверхности Земли и под ней. Ниже кратко приведены основные характеристики атмосферы и литосферы.

*Атмосфера Земли* (от др.-греч. ἀτμός — “пар” и σφαῖρα — “сфера”) это газовая оболочка планеты, удерживаемая около нее гравитацией. Свойства атмосферы зависят от высоты над поверхностью Земли, географических координат, времени суток и сезона. В вертикальном разрезе атмосфера делится на слои, которые принято классифицировать по высотному градиенту температуры (см., рис. 1.3 [74]).

Нижняя часть атмосферы, тропосфера, обладает отрицательным градиентом температуры (порядка  $-5...-10 \text{ K/км}$ ) и простирается от поверхности Земли до тропопаузы, где градиент температуры обращается в нуль. Тропосфера – это основной слой атмосферы. В нем содержится около 80 % всей массы атмосферного воздуха. Грозовые разряды, которые являются основным источником шумановского [75, 76, 77] и ионосферного альфвеновского [78, 79] резонансов локализованы в тропосфере.

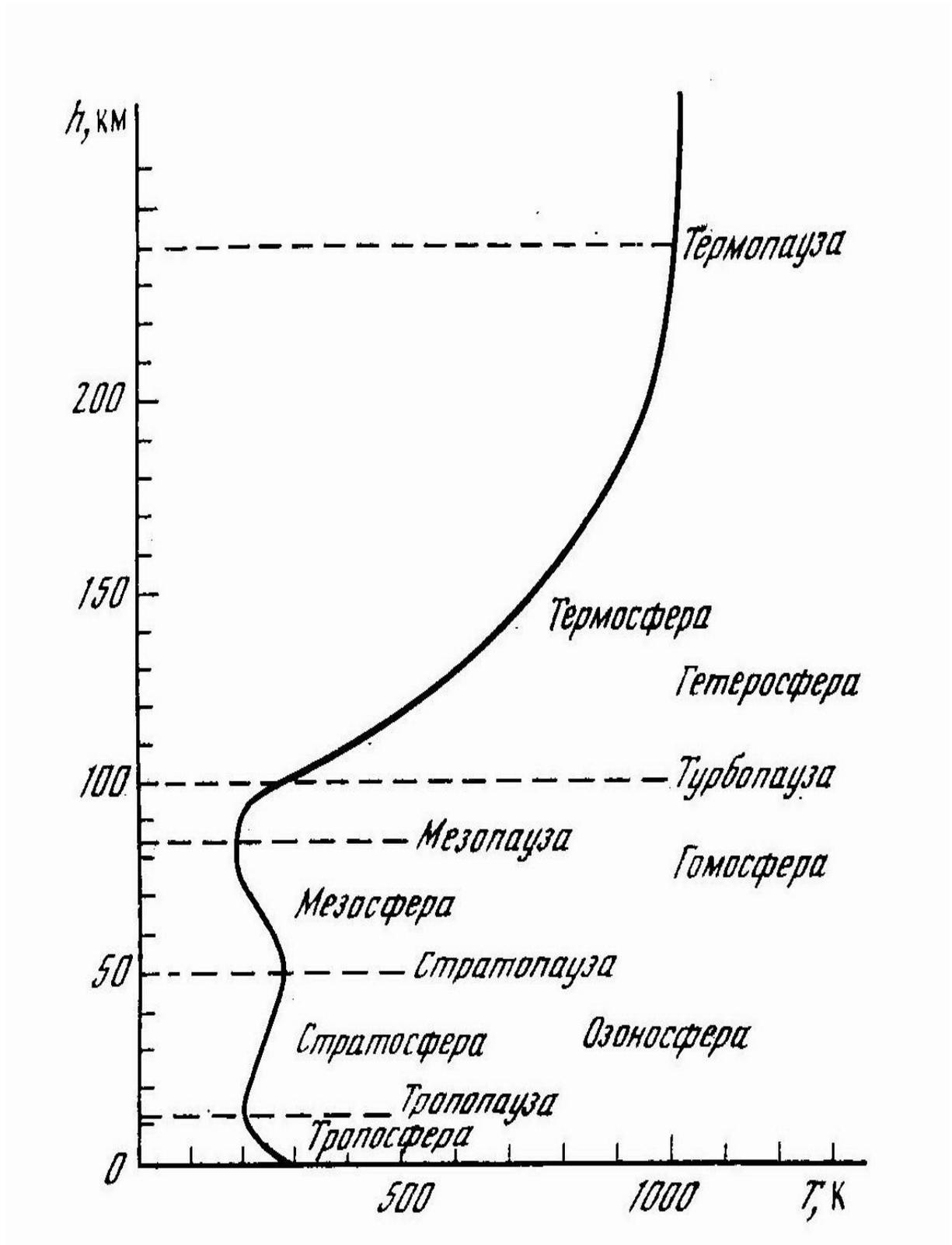


Рисунок 1.3 – Вертикальная структура атмосферы (согласно [70])

Стратосфера – область атмосферы с положительным высотным градиентом температуры от тропопаузы до стратопаузы ( $50 \pm 5$  км), на которой температура достигает величины  $270 \pm 20$  К. Рост температуры в стратосфере обусловлен наличием в ней слоя озона, эффективно поглощающего солнечное ультрафиолетовое излучение.

Мезосфера – область от стратопаузы до мезопаузы (80-90 км), в которой температура вновь падает с высотой, достигая на мезопаузе абсолютного минимума ( $\sim 180$  К).

Термосфера – область с положительным высотным градиентом температуры, расположенная над мезопаузой. В термосфере рост температуры с высотой замедляется, и наконец, выше некоторой высоты, называемой термопаузой, прекращается, и атмосфера становится изотермической по высоте

*Литосféра* (от греч. λίθος — “камень” и σφαίρα — “сфера”) — твёрдая оболочка Земли. Она состоит из земной коры и верхней части мантии, до астеносферы, где скорости сейсмических волн понижаются, свидетельствуя об изменении пластичности пород. В строении литосферы выделяют подвижные области (складчатые пояса) и относительно стабильные платформы. В контексте настоящей работы из всего спектра литосферных процессов выделены землетрясения, представляющие собой подземные толчки и колебания земной поверхности. Они возникают из-за тектонических смещений и разрывов в земной коре или верхней части мантии Земли. В разделе 5 работы исследуются проявления сейсмической активности в электромагнитном излучении волн УНЧ-СНЧ диапазона.

## 1.2 Низкочастотные процессы в геокосмосе

Приведенное в предыдущем подразделе краткое структурное описание околоземного космического пространства, атмосферы и литосферы демонстрирует разнообразие, сложность и изменчивость происходящих в них процессов. Состояние геокосмоса формируется под воздействием большого

числа факторов, многие из которых носят случайный характер. Современные детерминистские модели позволяют удовлетворительно описать пространственно-временное поведение околоземной плазмы только для спокойных (регулярных в среднем) условий. В то же время знание текущей геокосмической обстановки и ее прогноз необходимы для надежного функционирования многочисленных наземно-космических систем. Они призваны обеспечивать нашу цивилизацию связью, телевидением, глобальной навигацией, мониторингом состояния суши и морской поверхности, прогнозом катастрофических и погодных явлений. Поэтому с конца 20-го века начала развиваться концепция “космической погоды”, которая по аналогии с традиционной атмосферной погодой призвана контролировать и отображать в динамике состояние околоземного плазменного окружения. Авторство в терминологии “космическая погода” принадлежит советскому ученому А.Л. Чижевскому (см., [80]).

При изучении динамики геокосмических процессов естественно в первую очередь интересоваться наиболее “энергонесущими” из них, теми, которые вносят максимальный вклад в энергетический баланс околоземного плазменного окружения. Как правило, к ним относятся крупномасштабные и низкочастотные возмущения. Основной *целью* диссертационной работы является разработка новых подходов электромагнитной диагностики *низкочастотных* геокосмических процессов, их апробирование и практическая реализация. Сразу следует отметить, что условие *низкочастотности* накладывается на характеристики самого процесса, а не на частотный диапазон электромагнитных излучений, используемых для его диагностики. В диссертации роль пробных излучений играют природные электромагнитные поля и уже существующие сигналы в широкой полосе частот от миллигерц до нескольких гигагерц. А в качестве “индикаторов” состояния составляющих геокосмоса – ионосферы и магнитосферы используются глобальные электромагнитные резонаторы (МР, ИАР и ШР, см. Рис. 1.4). В таблице 1.1 перечислены низкочастотные процессы, исследуемые

Таблица 1.1 – Классификация низкочастотных процессов в геокосмосе

№	«Индикаторы»	Характерные времена, сек	Процессы	№ раздела
1	ШР	$3.5 \cdot 10^8$ 11-лет	Вариации интенсивности и частоты в 11-ти летнем цикле	3
	ИАР		Зависимость наблюдаемости ИАР в 11-ти летнем цикле	4
	ИАР/FOF2		Зависимость расстояния между максимумами ИАР от FOF2 и опосредовано от солнечной активности в 11-ти летнем цикле	4
2	ШР/ИАР/FOF2	$3 \cdot 10^7$ год	Годовые вариации параметров	3, 4
3	ШР	$8 \cdot 10^6$ месяц(ы)	Электромагнитные сезоны	3
	ИАР		Сезонные изменения наблюдаемости и расстояния между максимумами	4
4	Силовые электросети	$6 \cdot 10^5$ - $3 \cdot 10^6$ неделя	“Week end” эффект	6
	ШР/ИАР/Протонные вспышки		Отклик резонаторов на корпускулярные возмущения на Солнце	5
5	ШР	$10^5$ сутки	Суточная зависимость параметров	3
	ИАР		Суточная зависимость параметров	4
6	АГВ/ПИВ/	600-6000 час(ы)	Характерные периоды	2, 7
	ШР/Рентгеновские вспышки		Отклик параметров ШР на радиационные возмущения на Солнце	5
	Межслоевой волновод, сверхдальнее распространение КВ		Характерное время существования эффектов	2, 7
7	ШР/ИАР, Сейсмособытия	10-600 минут(ы)	Отклик резонаторов на сейсмособытия	5
	Пульсации		Характерные периоды	2, 7
	ИИТ		Радиальный дрейф неоднородностей в ИИТ	7
8	ИАР	$3 \cdot 10^{-2}$ -1 доли секунды	Диапазон собственных резонансных частот	3
9	ШР	$3 \cdot 10^{-2}$ - $10^{-1}$ доли секунды	Диапазон собственных резонансных частот	4

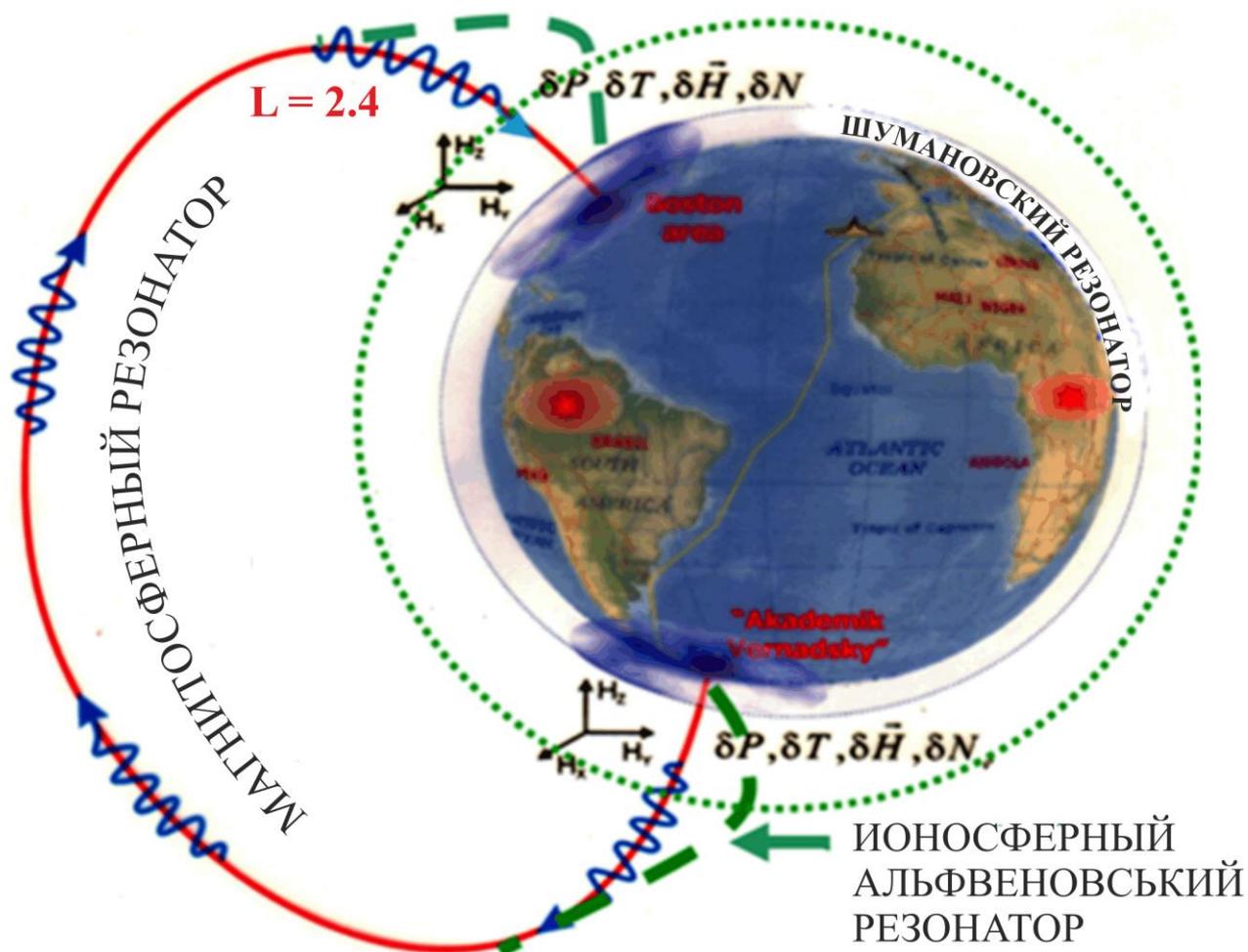


Рисунок 1.4 – Схема формирования ШР, ИАР и МР

в диссертационной работе в зависимости от их характерного временного периода. В последнем столбце указан раздел работы, в котором изложены результаты исследований данного процесса. Из таблицы видно, что в работе исследуется широкий класс геокосмических процессов и явлений с периодами от 11 лет до сотых долей секунды.

Перед описанием, представленных в таблице процессов и явлений рассмотрим кратко основные индексы и показатели, характеризующие космическую погоду, а также методы и системы для ее диагностики.

### 1.2.1 Наземный патруль солнечных и галактических источников

Наземный патруль состояния космической погоды включает в себя наблюдения за: солнечной радиационной и корпускулярной активностью, гелиосферным магнитным полем, потоками галактического излучения, вариациями магнитного поля Земли, состоянием околоземной плазмы. Обычно используются следующие стандартные характеристики:

Число Вольфа – это число солнечных пятен в фотосфере Солнца, регистрируемых в диапазоне видимого света на обращенном к Земле полушарии. Количество и общая площадь солнечных пятен связаны с потоком солнечного излучения в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах, а также числом солнечных вспышек и корональных выбросов массы (coronal mass ejection, CME).

Поток солнечного радиоизлучения с длиной волны 10,7 см (F10.7) хорошо коррелирует с потоком солнечного ультрафиолетового излучения. Его измерения проводятся с 1947 г., на обсерватории Dominion (Пентиктон, Британская Колумбия, Канада). Регистрация интенсивности солнечной радиации в сантиметровом диапазоне на уровне Земли не представляет проблем, в то время как ультрафиолетовое излучение существенно поглощается атмосферой. Индекс F10.7, оценивается в единицах спектральной плотности потока солнечного излучения ( $10^{-22}$  Вт м<sup>-2</sup> Гц<sup>-1</sup>), фиксируется один раз в день в локальный полдень, и поступает в архив Национального центра геофизических данных США (National Geophysical Data Center, [ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR\\_DATA/](ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/)).

Фундаментальное значение для мониторинга космической погоды имеют данные наблюдений геомагнитного поля, выполняемые наземными магнитометрами [81]. На некоторых обсерваториях эти результаты фиксируются уже более столетия. В настоящее время они поставляют оперативную информацию в режиме реального времени. Наиболее развитой и востребованной сетью магнитометров является мировая служба INTERMAGNET [82], включающая более 100 магнитных обсерваторий, размещенных на всех континентах.

Индекс  $D_{st}$  представляет собой оценку изменений магнитного поля на магнитном экваторе Земли, возникающих из-за вариаций кольцевого электрического тока. Индекс рассчитывается с дискретностью в 1 час по данным четырех наземных магнитных обсерваторий, расположенных между  $21^\circ$  и  $33^\circ$  магнитной широты. Индекс  $D_{st}$  накапливается в Мировом центре данных по Геомагнетизму (Киото, Япония. <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst/dir/index.html>).

Планетарные индексы  $K_p/A_p$ . Индекс  $A_p$ : соответствуют средней за 3 часа величине вариаций геомагнитного поля, полученной для сети из 13 среднеширотных магнитных обсерваторий (широты:  $40^\circ$ - $50^\circ$ ). Индекс  $K_p$  представляет эту же величину в логарифмической шкале. Планетарные индексы рассчитываются путем усреднения локальных индексов  $K/A$ , рассчитанных для каждой обсерватории. Архив значений планетарных индексов  $K_p/A_p$  доступен с 1932 года.

Индекс  $A_E$  определяется путем усреднения данных о геомагнитных возмущениях, полученных на 12 магнитных обсерваторий, расположенных в авроральных областях. Он обладает высоким разрешением по времени (1 мин), однако доступен с отставанием во времени в 2-3 суток (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aedir/index.html>), что снижает его полезность для оперативного мониторинга космической погоды.

Нейтронные мониторы, размещенные на поверхности Земли, косвенно контролируют уровень космических лучей галактического и солнечного происхождения. Их принцип действия основывается на способности высокоэнергичных заряженных частиц от солнечных и галактических источников вызывать “широкий атмосферный ливень” (ШАЛ), представляющий собой поток энергичных частиц, образующийся в результате множественных каскадных реакций в земной атмосфере.

### 1.2.2 Патруль космической погоды с помощью орбитальных аппаратов

В данном пункте будут перечислены основные космические миссии, ориентированные на изучение космической погоды [83, 84]. Первыми установками, начавшими в 60-е годы патруль околоземного плазменного окружения, были орбитальные геофизические обсерватории (Orbiting Geophysical Observatory – OGO). Современные устройства представлены совместной миссией NASA-ESA STEREO (Solar-Terrestrial Relations Observatory). Два идентичных аппарата запущены в 2006 г., на солнечную орбиту, а один в 2012 г., на вытянутую эллиптическую орбиту вокруг Земли. Аппараты осуществляют мониторинг потоков солнечной радиации и заряженных частиц, а также состояния радиационных поясов Земли. Они в частности позволяют получать трехмерную структуру корональных выбросов массы. Аппарат NASA Advanced Composition Explorer (ACE) осуществляет мониторинг солнечного ветра в точке Лагранжа L1 системы Солнце-Земля с 1997 по настоящее время. Поскольку солнечное ультрафиолетовое излучение не может контролироваться с поверхности Земли, начиная с 1995 г., этот мониторинг также выполняется из точки L1 в рамках совместной миссии NASA-ESA Solar and Heliospheric Observatory (SOHO). Существует несколько серий специализированных космических аппаратов, сенсоры которых ориентированы на изучение космической погоды. Это: Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES) [85], Polar-orbiting Operational Environmental Satellite (POES) [86], Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) [87] и Meteosat (<http://www.eumetsat.int/website/home/Satellites/CurrentSatellites/Meteosat/index.html>). В частности, аппараты серии GOES снабжены: датчиками рентгеновского излучения в двух диапазонах длин волн от 0,5 до 4 А и от 1 до 8 А; магнитометром, измеряющим напряженность межпланетного магнитного поля; ультрафиолетовым сенсором и датчиками заряженных частиц, которые фиксируют ионы и электроны в диапазоне энергий от 50 кэВ до 500 МэВ. В феврале 2015 г., была запущена миссия Deep Space Climate Observatory (DSCOVR), основной задачей которой является предупреждение о корональных выбросах массы. Большую роль при изучении

мировой грозовой активности сыграли аппараты Optical Transient Detector (OTD) [88] и Lightning Imaging Sensor (LIS) [89] выполнявшие регистрацию молниевых вспышек на поверхности Земли с 1995 по 2001 год и с 1997 по настоящее время соответственно. Данные этих аппаратов использованы автором в диссертационной работе для сопоставления с результатами наблюдений сигналов шумановского резонанса.

### 1.2.3. Наземные системы диагностики состояния ионосферы Земли

Описанные выше средства направлены в основном на мониторинг вариаций солнечной активности и связанных ними изменений геомагнитного поля. Важное значение имеют также системы диагностики состояния ионосферы Земли. Рассмотрим основные такие системы, работающие в настоящее время.

Сеть станций *вертикального зондирования ионосферы (ВЗИ)*. Вертикальное зондирование ионосферы осуществляется с помощью ионозондов – импульсных локаторов ВЧ диапазона, предназначенных для восстановления высотных профилей электронной концентрации до высоты главного максимума ионизации. Наиболее совершенными ионозондами сегодня являются так называемые “дигизонды” (digisonde) [90], выпускаемые в University of Massachusetts Lowell’s Center for Atmospheric Research (UMLCAR). Большинство из них объединено в единую сеть – Глобальную Ионосферную Радио Обсерваторию Global Ionospheric Radio Observatory (GIRO) [91] см., рис 1.4.

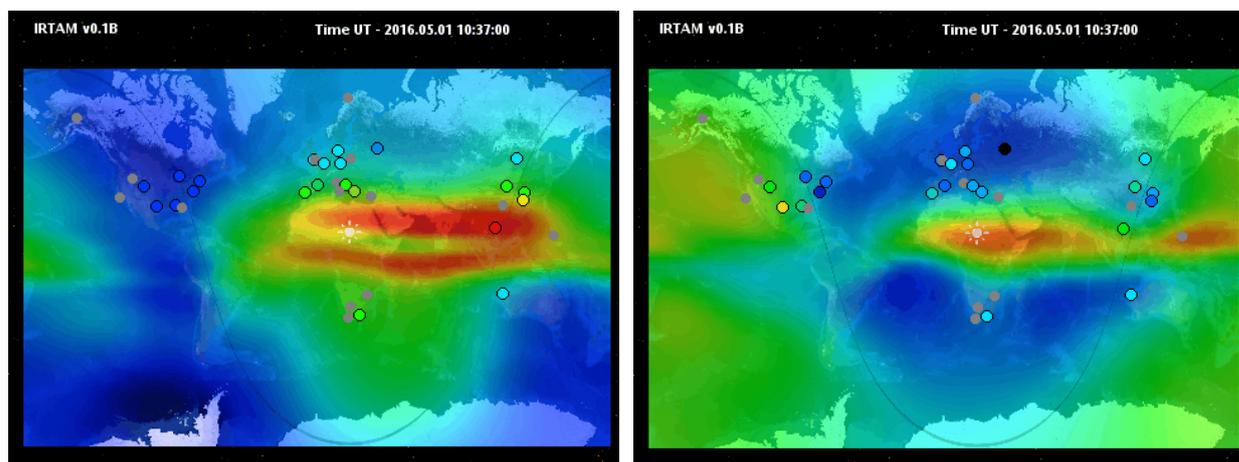
GIRO обеспечивает восстановление высотных профилей электронной плотности ионосферы в разных регионах земного шара более чем в 60-ти пунктах наблюдений (см., рис. 1.5). Причем для 37 из них данные поступают в реальном времени. Это позволяет оперативно получать информацию и производить картографирование основных параметров ионосферы в масштабах всей планеты. Такие карты в режиме реального времени доступны по веб-ссылке: (<http://giro.uml.edu/IRTAM/>) см., рис 1.6.

Кроме того, подробные базы данных ионосферных параметров для индивидуальных ионозондов открыты для публичного доступа через DIDBase, а также инструменты пользовательского программного обеспечения для анализа данных, SAO Explorer, и Drift Explorer.

*Радары некогерентного рассеяния (НР).* Метод НР является одним из наиболее информативных способов ионосферной диагностики [92, 93]. Суть метода заключается в импульсном зондировании ионосферы в УВЧ диапазоне волн мощным радаром (импульсная мощность существующих установок более 1 МВт, рабочие частоты от 50 до 1600 МГц) и последующем спектральном или корреляционном анализе обратно рассеянных сигналов. Методом НР измеряется высотная (в диапазоне высот 120-1500 км) зависимость мощности зондирующего сигнала, обратно рассеянного на флуктуациях электронной плотности. В приближении равновесной плазмы интенсивность рассеяния пропорциональна электронной плотности, что позволяет восстанавливать высотный профиль концентрации. Анализ спектра рассеяния дает возможность оценивать температуры электронов и ионов в широком интервале высот вплоть до границ внешней ионосферы. Сегодня в мире работает 11 установок НР (3 – в США, 1 – в Перу, 3 – в Норвегии, 1 – в Гренландии, 1 – в Японии и по одной в Украине и России). Расположенный вблизи Харькова радар НР Института Ионосферы НАН-МОН Украины является единственной установкой такого типа в среднеширотной Европе. С его помощью проводятся комплексные исследования ионосферы над Украиной для различных сезонов и уровней солнечной активности. Важным результатом является создание на базе данных установки НР Центрально Европейской региональной модели ионосферы Central Europe Regional Ionospheric Model (CERIM ION) [94].



Рисунок 1.5 – Сеть дигизондов – Глобальная Ионосферная Радио Обсерватория  
[\(http://giro.uml.edu/\)](http://giro.uml.edu/)



(a)

(б)

Рисунок 1.6 – Примеры карт для (а) критической частоты и (б) действующей высоты ионосферного слоя  $F_2$ , полученные GIRO (<http://giro.uml.edu/IRTAM/>)

*Определение полного электронного содержания (ПЭС) по данным Глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС).* В состав ГНСС входят 3 основных сегмента: космический, наземный и пользовательский. Космический сегмент состоит из автономных спутников, равномерно распределенных по высоким почти круговым орбитам. Каждый спутник излучает на двух или трех частотах навигационные и служебные сигналы. Наземный сегмент - сеть станций слежения, с помощью которых вычисляются и контролируются орбиты спутников, корректируется собственное время бортовых часов спутников, и др.

Основная часть третьего сегмента — это ГНСС приемники, а также международные организации, предоставляющие услуги конечным пользователям. Основным типом ионосферных данных являются глобальные ионосферные карты (Global Ionospheric Maps – GIM, см., рис. 1.7) полного электронного содержания в вертикальном столбе ионосферы единичной площади [95].

На этих картах представлено глобальное распределение ПЭС в узлах сетки с шагом  $2,5^\circ$  по широте,  $5^\circ$  по долготе и 1 час по времени, отражающее общие тенденции процессов в ионосфере, например, суточную цикличность и реакцию на планетарные геомагнитные возмущения. Данные в виде ежесуточных таблиц доступны на сайте <http://www.aiub.unibe.ch/download/CODE/>. GIM представляет собой сглаженную картину, математически она моделируется рядом по сферическим гармоникам 15-го порядка. Достоинством такого генерализированного представления является возможность построения наглядных карт поведения ПЭС над обширными территориями с малой плотностью перманентных станций. Но сглаженный характер пространственного распределения ПЭС и часовая дискретность по времени не позволяют проводить исследований относительно быстрых локальных процессов в ионосфере. В 6-ом разделе диссертационной работы представлена новая методика восстановления региональных карт ПЭС по данным “густых” ГНСС сетей, которая устраняет этот недостаток и дает

гораздо лучшую детализацию неоднородной структуры ионосферы, чем карты GIM.

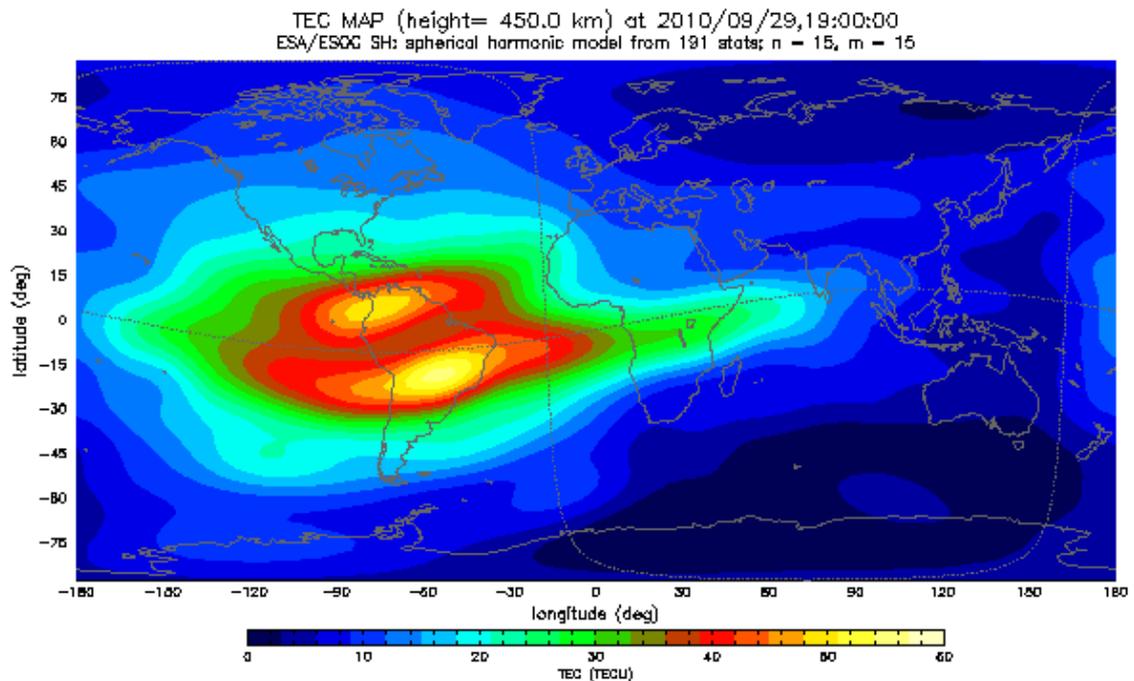


Рисунок 1.7 – Global Ionospheric Maps (<http://iono.jpl.nasa.gov/gim.html>)

*Радары системы SuperDarn* – это система когерентных ВЧ радаров, расположенных в авроральных областях Земли. 12 в северном полушарии и 7 в южном. Система была разработана для наблюдения и изучения дрейфов плазмы в ионосфере (см., рис. 1.8) [96].

Радары, входящие в систему, схожи между собой: это импульсные радары с пиковой мощностью 9600 Вт, работающие в КВ диапазоне на частотах 8-20 МГц. Радары формируют многолепестковую диаграмму направленности (ДН), состоящую из 16-ти частично перекрывающихся в горизонтальной плоскости лучей. Каждый луч имеет узкую в азимутальной плоскости (порядка  $6^\circ$ ) и широкую в угломестной плоскости (порядка  $30^\circ$ ) диаграмму направленности. Радары засвечивают сектор азимутальных углов  $\sim 50^\circ$ - $60^\circ$  на дальности до 4 тысяч километров с разрешением по дистанции 45 км. Основным объектом наблюдений для радаров SuperDARN являются плазменные неоднородности на высотах *E*- и *F*-областей ионосферы. Оценки

скоростей их движений позволяют восстанавливать электрические поля в полярной термосфере.

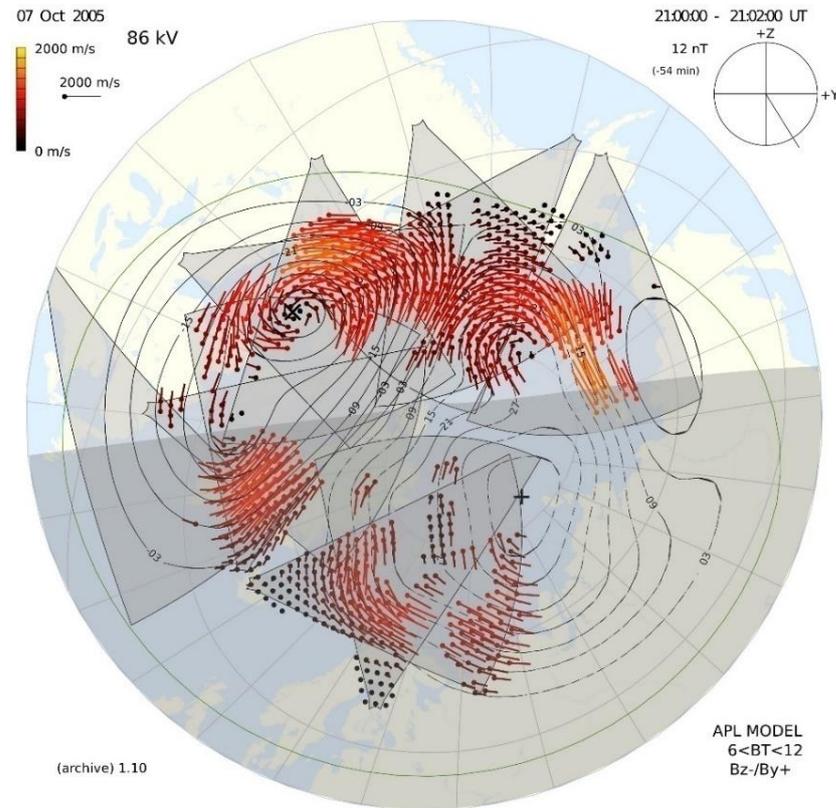


Рисунок 1.8 – Конвекция плазмы в полярной области северного полушария по данным SuperDARN (<http://www.superdarn.ac.uk/about/how-does-it-work/>)

Важным объектом исследований при изучении состояния геокосмоса являются глобальные электромагнитные резонансы Земли: шумановский и ионосферный альфвеновский. Исследованию их реакции на различные низкочастотные процессы в геокосмосе посвящена значительная часть диссертационной работы. По-видимому, впервые в работе предпринята попытка использования этих природных резонаторов в качестве “индикаторов” состояния космической погоды. В данном подразделе они будут рассмотрены в отдельных пунктах 1.2.4-1.2.5.

В таблице 1.2 представлены обсерватории, где проводятся измерения ШР (а на некоторых и ИАР). Данные о существующих приемных УНЧ – СНЧ

Таблица 1.2 – УНЧ-СНЧ обсерватории (обсерватории РИ НАНУ и организаций-партнеров, выделены серым тоном; п/с – калибровка отсутствует; N.A. – опция отсутствует)

Станция	Географические координаты	Ед., изм			Частотный диапазон, Гц	Частота оцифровки, Гц
		Ez	BEW	BNS		
LFO IRA, Ukraine (MAR)	+49.9°, +37.0°	n/c	пТл	пТл	[0.5-40]	125
Vernadsky, Antarctica (VRN)	-65.3°, -64.3°	N.A.	пТл	пТл	[0.001-300]	600
Svalbard, Arctica (SOUSU)	+78.15°, +16.4°	N.A.	пТл	пТл	[0.001-80]	256
Sayany Russia, (SSO)	+51.27°, -100.92°	N.A.	пТл	пТл	[0.001-30]	128
Canberra, Australia	-35.31 <sup>0</sup> +149.36 <sup>0</sup>	N.A.	пТл	пТл	[0-1600]	4000
Sutherland, South Africa	-32.37 <sup>0</sup> +20.81 <sup>0</sup>	N.A.	пТл	пТл	[0-1600]	4000
Pinon Flat, California, USA	+33.61 <sup>0</sup> - 116.46 <sup>0</sup>	N.A.	пТл	пТл	[0-1600]	4000
Eskdalemuir, Scotland	+55.29 <sup>0</sup> -3.17 <sup>0</sup>	N.A.	пТл	пТл	[0-1600]	4000
Shillong, India (SHL)	+25.6° +91.9°	N.A.	нТл	нТл	[5–30]	64
Mitzpe Ramon, Israel (MRN)	+30.61 <sup>0</sup> +34.8 <sup>0</sup>	?	?	?	?	?
Hylaty, Poland (HYL)	+49.19 <sup>0</sup> +22.55 <sup>0</sup>	N.A.	пТл	пТл	[0.03 - 55]	176
Belsk, Poland (BLK)	+51.8° +20.8°	мВ/м	пТл	пТл	~[5–40]	100
Hornsund, Poland (HRN)	+77° +15.55 <sup>0</sup>	?	?	?	?	?
Arrival Heights, Antarctica (ARH)	-77.82 <sup>0</sup> +166.65 <sup>0</sup>	?	?	?	?	?
AGO, Modra, Slovakia (MOD)	+ 48.37 <sup>0</sup> +17.27 <sup>0</sup>	n/c	N.A.	N.A.	[5 – 100]	200
Lekhta, Russia (LEH)	+64.43 <sup>0</sup> +33.97 <sup>0</sup>	?	?	?	[4-40]	?
Nagycenk, Hungary (before 2005) (NCK)	+47.6° +16.7°	мВ/м	пТл	пТл	~[5-35]	100
Nagycenk, Hungary (from 2005) (NCK)	+47.6° +16.7°	мВ/м	пТл	пТл	~[5-35]	514
Moshiri, Japan (MOS)	+44.3° +142.2°	n/c	пТл	пТл	[0.0001-1000]	4000

Продолжение Таблицы 1.2

Rhode Island, USA (RID)	+41.6° -71.7°	n/c	пТл	пТл	[5-130]	200.4812
Syowa, Antarctica (SYO)	-69.018° +39.506°	N.A.	пТл	пТл	[1-100]	400
Sonderstrom, Greenland	+67.01° - 50.71°	?	?	?	?	?
Onagawa, Japan	+38.433° +141.483°	?	?	?	[1-100]	400
Esrang, Sweden	+21.1° +67.833°	?	?	?	[1-100]	400
QiaoJia, China (QIA)	+26.9°, +102.93°	N.A.	пТл	пТл	[3-32]	100
Tonghai, China (TON)	+24.1° +102.76°	N.A.	пТл	пТл	[3-32]	100
Yongsheng, China (YON)	+26.7°, +100.75°	N.A.	пТл	пТл	[3-32]	100
Weihai, China (WEI)	+37.11°, +121.76°	N.A.	пТл	пТл	[3-32]	100
Mangshi, China (MAN)	+24.42°, +98.59°	N.A.	пТл	пТл	[3-32]	100

станциях любезно предоставлены автору профессором Массачусетского технологического института, Ерлом Вилльямсом (Earle Williams).

Из приведенного выше перечня следует, что на сегодняшний день в мире существует значительное число систем, поставляющих диагностическую информацию в УНЧ–СНЧ диапазоне. Однако, большинство из них не поставляют непрерывные многолетние ряды наблюдений, что не дает возможность использовать их для диагностики долгопериодных процессов в геокомосе. Многие из них расположены в промышленно развитых регионах с высоким уровнем техногенных помех, что делает невозможным одновременное патрулирование ИАР и ШР. От всех этих недостатков свободен УНЧ-СНЧ комплекс, функционирующий в Антарктиде, на УАС “Академик Вернадский” [97]. Эта установка и ей подобные, размещенные при участии автора в Украине и Арктике, подробно описаны в разделе 2. В этом же разделе представлена сеть цифровых малоразмерных Интернет-управляемых ВЧ приемных комплексов [31], а результаты ионосферной диагностики, полученные при помощи данной сети, изложены в разделе 6.

Рассмотрим кратко современные представления о глобальных электромагнитных резонаторах ШР и ИАР, а также сведения о волновых процессах в ионосфере, порождаемых распространением АГВ/ПИВ.

#### 1.2.4 Шумановский резонанс

Идея о том, что область пространства между хорошо проводящими (в СНЧ диапазоне) Землей и нижней ионосферой может являться резонатором для низкочастотных волн, длина которых соответствует длине окружности земного шара появилась еще в конце позапрошлого века. В 1893 году ирландский физик Джордж Фитцджеральд предположил, что при наличии на высоте около 100 км хорошо проводящего слоя в полости Земля-ионосфера возникнут электромагнитные волны с периодом около 0.1 сек [98]. В начале 20-го века сербский инженер и изобретатель Никола Тесла предложил концепцию Земного шара, как глобального радиоустройства [99] запатентовал свою идею [100] и попытался возбудить электромагнитный сигнал с длиной волны в окружность Земли. Однако он не предполагал наличия проводящего ионосферного слоя, и его оценки частоты резонанса оказались неверными [101]. Систематическое изучение этого резонанса, началось в середине 20-го столетия, когда профессор Мюнхенского университета В.О. Шуман высказал предположение о существовании и описал основные свойства резонанса электромагнитных волн в полости Земля — ионосфера. В своей оригинальной работе [102] исследователь проанализировал колебания, возникающие в сферическом объёмном резонаторе. При этом он полагал, что поверхность Земли имеет постоянную проводимость около  $\sigma = 10^{-3}$  См/м, а проводимость ионосферы на высотах 70—90 км меняется в пределах  $\sigma = 10^{-5}$ — $10^{-3}$  См/м. Из-за этого средняя скорость распространения электромагнитной волны  $V(\sigma)$  примерно на 20 % меньше, чем при отражении от сферы с бесконечной проводимостью. Для частоты  $n$ -й гармоники  $f_n$  Шуман получил выражение:

$$f_n = \frac{V(\sigma)}{L} \sqrt{n(n+1)} \approx 6,0\sqrt{n(n+1)}, n = 1, 2, \dots, \quad (1.5)$$

где  $L \approx 40\,000$  км соответствует длине окружности Земли. Такая модель для 5-ти первых пяти гармоник даёт величины 8,5 — 14,7 — 20,8 — 26,8 — 32,9 Гц, что весьма близко к данным, получаемым из эксперимента.

Экспериментальное подтверждение наличия резонансов Шумана в 1960 году [103] послужило началом интенсивному изучению глобального резонанса. Интерес к исследованию данного явления обусловлен возможностью использовать резонансные сигналы как для диагностики нижней ионосферы, число методов изучения которой весьма ограничено, так и для мониторинга глобальной грозовой активности, играющей важную роль при формировании климата Земли. Кроме того, практическая необходимость обеспечения стабильной радиосвязи с погруженными объектами, послужила мощным стимулом к разработке систем радиосвязи в СНЧ диапазоне (проекты “Sanguine” [104] и “Зевс” [105] военно-морских сил США и СССР соответственно), а также теории распространения радиоволн этого диапазона, природный фон в котором, определяют сигналы ШР [106]. Большой вклад в изучение глобального резонанса внесли украинские ученые. В 1977 году специалисты ИРЭ АН УССР издали монографию [75], в которой описывалось текущее состояние дел с изучением ШР в СССР и мире. В дальнейшем, один из авторов этой работы профессор А.П. Николаенко совместно с японским коллегой профессором М. Хаякавой опубликовал еще две монографии [76, 77].

Как уже отмечалось, основным источником сигналов ШР является глобальная грозовая активность, сосредоточенная в приэкваториальных грозовых центрах, локализованных в Юго-Восточной Азии, Африке и Америке. По разным оценкам на земном шаре ежесекундно происходит от 30 до 100 [75, 107] индивидуальных молниевых разрядов. При временах накопления (десятки секунд), необходимых для спектрального разделения основных резонансных мод, характеристики ШР носят усредненный характер.

Информация о характеристиках источника содержится в параметрах мод ШР, форму спектра которых  $y(f)$  принято описывать кривой Лоренца (лоренцианом) [77]:

$$y(f) = y_0 + \frac{A}{(f - f_0)^2 + \left(\frac{f_0}{2Q}\right)^2}, \quad (1.6)$$

где:  $y_0$  – некоторая константа,  $A$  – амплитуда резонансного сигнала,  $f_0$  – пиковая частота,  $Q$  – добротность спектральной линии, связанная с ее шириной  $\Delta f$  ( $Q = f_0/\Delta f$ ). Величины  $y_0$ ,  $A$ ,  $f_0$  и  $Q$  для нескольких мод ШР определяются по экспериментальным записям горизонтальных магнитных и вертикальной электрической компоненты СНЧ сигнала и могут быть использованы для оценки характеристик мировых гроз и параметров нижней ионосферы даже по данным одной шумановской обсерватории. Для решения такой обратной задачи используются различные модели грозовых центров, начиная от простейших представлений в виде точечного источника [108, 109, 110], движущегося вдоль экватора вблизи 17-18 LT, нескольких [111, 112] точечных источников, до более реалистичных пространственно-распределенных источников, основанных на данных оптических наблюдений молниевых вспышек из космоса [113, 114]. В простейшем случае ионосферу внутри резонансной полости можно считать изотропной в горизонтальном направлении [75, 76]. Более точные модели могут учитывать анизотропию, связанную с неоднородностью день-ночь [115, 116], особыми условиями в полярных областях и [76] т.д., а также гиротропию, вызванную наличием магнитного поля Земли [117, 118]. Отметим, что, несмотря на потенциальную привлекательность ШР как “индикатора” возмущений КП, его практическое использование может быть ограничено сложностью исследуемого явления. Например, полученные в эксперименте временные вариации параметров ШР могут быть объяснены, как изменениями положений и активностей

источников, так и модуляцией свойств ионосферы (см., например [77] и цитируемую в ней литературу). Поэтому, в каждом случае для корректного решения обратной задачи восстановления параметров источника либо свойств среды, необходим тщательный выбор адекватной физической модели и методики расчетов [119]. Следует отметить, что существенную помощь, в разделении эффектов источника и среды распространения оказывают методики расчета, основанные на использовании синхронных многопунктовых измерений параметров ШР [120, 121]. Другой возможностью является анализ параметров шумановских сигналов во время мощных протонных [122, 123], рентгеновских [124, 125] и гамма вспышек [112], когда изменения в ионосфере происходят в известное время и имеют относительно небольшую продолжительность, что упрощает разделение эффектов среды и источников. Поскольку патруль за спорадическим солнечным и галактическим излучением в последние десятилетия непрерывно осуществляется, как с поверхности Земли, так и из космического пространства, его данные могут быть использованы для независимой оценки изменений в нижней ионосфере, и впоследствии для “калибровки” моделей ШР. В рамках этого направления исследований в диссертации предложена и развита концепция использования глобальных электромагнитных резонаторов в роли “индикаторов” космической погоды (см., раздел 5 работы). Следует отметить, что мониторинг параметров ШР позволяет анализировать не только возмущения, связанные с вариацией потоков энергии, приходящих в ионосферу от космических источников, но и фиксировать излучение от мощных наземных процессов, таких как землетрясения [126, 127, 128]. Исследованию таких событий посвящен подраздел 5.3 диссертации.

Другой важной особенностью, обнаруженной при исследованиях ШР является связь интенсивности резонансных линий с изменениями глобальной температуры в субтропическом поясе [129]. Связь между резонансом Шумана и ростом температуры проявляется в нелинейном увеличении частоты молниевых разрядов [129]. Нелинейность этого отношения делает ШР

чувствительным глобальным “термометром”, помогающим диагностировать климатические изменения на планете. Кроме того, водяной пар в верхней тропосфере является одним из ключевых элементов, формирующих климат Земли, подобно парниковым газам, а также косвенно влияет на химию тропосферы посредством взаимодействия с облаками и аэрозолями. Тропосферный водяной пар гораздо сильнее изменяет интенсивность парникового эффекта, чем водяной пар вблизи поверхности [130], но является ли это влияние положительным, или отрицательным пока точно не установлено [131]. Одной из основных проблем является сложность мониторинга водяного пара в глобальном масштабе и в течение длительного периода времени. Автор работы [132] предложил, получать данные о концентрации тропосферного пара из шумановских записей. Следуют отметить, что описанные выше исследования требуют организации непрерывного патруля шумановских сигналов, который должен выполняться на протяжении десятилетий. Однако, в литературе насчитывается незначительное число ссылок на достаточно долгосрочные измерения сигналов ШР, а имеющиеся характеризуются значительным количеством пропусков. Поэтому в 2002 году непрерывный мониторинг ШР был организован на Украинской антарктической станции (УАС, см., раздел 2 диссертации) и непрерывно ведется до настоящего времени. Полученные с его помощью результаты изложены в разделах 3, 5 и 6 данной работы.

Кроме того, идентичные наблюдения были начаты в 2008 год в Украине (на Низкочастотной обсерватории РИ НАНУ) и в 2013 году в Арктике (арх. Шпицберген, обсерватория SOUSY). Создание еще двух далеко разнесенных пунктов мониторинга ШР дало возможность получить базу УНЧ-СНЧ данных, пригодную для реализации многопозиционных алгоритмов восстановления средних характеристик мировой грозовой активности. Синхронная регистрация резонансных полей позволяет восстанавливать местоположение одиночных сверхмощных молниевых вспышек, так называемых Q-bursts [133]. Оригинальные методики, основанные на

поляризационной локации, были применены автором (см., подраздел 3.5) для обработки совместных наблюдений сигналов ШР, выполненных на УАС, японской антарктической станции Showa и обсерватории Onagawa (Япония). В отличие от описанных в литературе [134, 135, 136] способов, методики, разработанные в РИ НАНУ, учитывают смещение линии пеленга на источник, связанное с гиротропией ионосферы [117]. Следует отметить, что многие Q-bursts ассоциируются со сверхмощными разрядами, такими как спрайты (sprite), голубые струи (blue jet) и эльфы (ELVES). Локация таких молниевых разрядов сегодня представляет значительный физический интерес, поскольку природа их возникновения изучена недостаточно.

### 1.2.5 Ионосферный альфвеновский резонатор

Еще одной природной резонансной УНЧ-СНЧ системой является ионосферный альфвеновский резонатор (ИАР) [137]. В отличие от ШР ИАР формируется в верхней ионосфере, а собственными модами резонатора являются магнитогидродинамические (МГД) волны. Их поведение описывается в гидродинамическом приближении [138]. Для однокомпонентной “намагниченной” жидкости, как правило используются следующие уравнения:

а) непрерывности

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot \rho_m \vec{U} = 0, \quad (1.6)$$

где  $\rho_m = m_e N_e + m_i N_i$  - плотность плазмы,  $\vec{U}$  - вектор скорости элементарного объема жидкости;

б) движения

$$\rho_m \frac{d}{dt} \vec{U} = \vec{J} \times \vec{B} - \nabla p, \quad (1.7)$$

где  $p = nK_B T$  давление,  $n$  - концентрация частиц,  $K_B = 1.38 \times 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана;

в) закона Ома

$$\vec{J} = \sigma(\vec{E} + \vec{U} \times \vec{B}), \quad (1.8)$$

где  $\sigma$  - проводимость плазмы;

г) уравнения состояния

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(p\rho_m^{-\gamma}) &= 0 \\ \frac{d}{dt}\left(\frac{p}{\rho_m}\right) &= 0 \end{aligned}, \quad (1.9)$$

здесь  $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$  – отношение теплоемкостей газа при постоянном давлении и объеме.

Решениями этой системы уравнений являются альфвеновские и магнитозвуковые волны. Первые из них являются поперечными. Массовая скорость движения плазмы перпендикулярна как фазовой, так и групповой скорости. При распространении альфвеновских волн в среде, массовая плотность не изменяется, т.е. волны являются некомпессионными. Для плоской альфвеновской волны дисперсионное уравнение можно записать в виде [138]:

$$\frac{\omega^2}{k^2} = V_{ph}^2 = V_A^2 \cos^2 \theta, \quad (1.10)$$

где  $V_{ph}$  - фазовая скорость волны,  $\theta$  - угол между направлением распространения волны и магнитным полем, а  $V_A$  - альфвеновская скорость, определяемая выражением:

$$V_A = \pm \frac{B_0}{(\mu_0 \rho_m)^{1/2}}. \quad (1.11)$$

$B_0$  - это магнитная индукция, а  $\rho_m$  - массовая плотность плазмы.

Для магнитозвуковых мод МГД волн дисперсионное уравнение может быть представлено в виде:

$$2V_{ph}^2 = (V_A^2 + c_s^2) \left[ 1 \pm \left( 1 - \frac{4c_s^2 V_A^2 \cos^2 \theta}{(c_s^2 + V_A^2)^2} \right)^{1/2} \right]. \quad (1.12)$$

Здесь  $c_s$  - это скорость звука.

В случае, если  $\frac{4c_s^2 V_A^2 \cos^2 \theta}{(c_s^2 + V_A^2)^2} \ll 1$ , что реализуется, если  $\theta \approx \frac{\pi}{2}$  или  $c_s \ll V_A$

(именно этот вариант соответствует ситуации в верхней ионосфере), или  $c_s \gg V_A$ , выражение (1.12) дает два решения:

$$V_{ph}^2 \approx \frac{4c_s^2 V_A^2 \cos^2 \theta}{(c_s^2 + V_A^2)^2}, \quad (1.13)$$

$$V_{ph}^2 \approx V_A^2 + c_s^2. \quad (1.14)$$

Выражение (1.13) – это дисперсионное уравнение для медленной магнитозвуковой волны, (1.14) – для быстрой магнитозвуковой волны. Как и в случае с альфвеновской модой, медленная магнитозвуковая волна не может распространяться поперек магнитного поля. Быстрая магнитозвуковая волна является фактически изотропной волной, распространяющейся в ионосферной плазме с альфвеновской скоростью. Обе моды магнитозвуковых волн являются компрессионными.

При распространении МГД волн в ионосфере и магнитосфере Земли могут быть сформировано несколько резонансных систем. На рис. 1.9., заимствованным из работы [79], схематически показаны две из них:

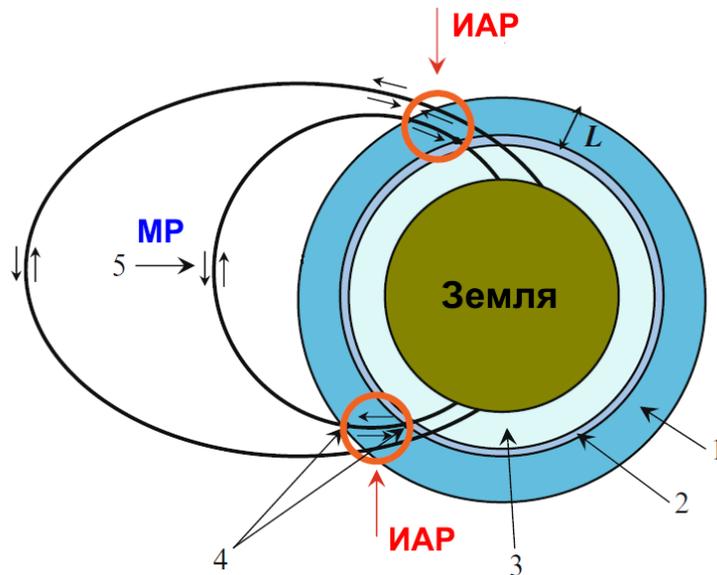


Рисунок 1.9 – Схематическое изображение ионосферного альфвеновского (ИАР) и магнитосферного (МР) резонаторов. (1) ионосферный волновод; (2) E-слой ионосферы; (3) нейтральная атмосфера; (4) ИАР; (5) МР (согласно [79])

магнитосферный и ионосферный альфвеновский резонаторы. Для обеих систем нижними границами является проводящий слой в E- области ионосферы (высоты 100-130 км), характеризующийся максимальными значениями поперечных проводимостей (педерсеновской и холловской). Резонанс формируют альфвеновские волны, распространяющиеся вдоль силовых линий магнитного поля. Для магнитосферного резонатора границы находятся в магнитосопреженных областях ионосферы в разных полушариях.

На высотах внешней ионосферы (600-1200 км) за счет быстрого спада концентрации электронной концентрации возникает резкий градиент альфвеновской скорости, который формирует полупрозрачную “стенку” для альфвеновских волн. В результате в ионосфере возникает резонансная полость ИАР. Резонансные структуры спектров (РСС) наблюдаются в зависимости от его добротности в интервале частот от долей до нескольких герц [79].

Изучение ИАР, существование которого было предсказано С.Н. Поляковым (НИРФИ, Россия) в 1976 году [139], интенсивно проводилось многими исследователями [140, 141, 142, 143]. Существование ИАР и его морфология были проанализированы по данным наблюдений в низких [144, 145], средних [140, 141, 144, 146, 147] и высоких [78, 148, 149] широтах. Эти наблюдения выполнялись с помощью наземных магнитометров. В современной литературе приводятся свидетельства о регистрации ИАР космическими аппаратами [150, 151, 152, 153].

Несмотря на то, что ИАР изучается уже в течении достаточно длительного времени многие вопросы, связанные с его формированием, динамикой поведения и количественным описанием еще далеки от своего разрешения. Например, нет устоявшегося единого мнения об источниках ИАР. В качестве возможных механизмов их генерации называют: возбуждение различными плазменными неустойчивостями [142, 143, 154], молниевыми разрядами [155, 156, 157, 158, 159, 160], а также электромагнитными волнами, проникающими в ионосферу из космоса [161]. Хотя основные морфологические свойства ИАР в зависимости от времени суток, сезона года, солнечной активности и характеристик ионосферы и т.д., в целом известны, однако большая часть результатов получена на основе эпизодических наблюдений. Многие исследователи отмечают, что необходим непрерывный многолетний мониторинг резонансных полей в разных регионах земного шара.

Результаты, полученные в настоящей работе, подтверждают этот вывод. При непосредственном участии автора систематические измерения резонансных полей были организованы в Антарктике на УАС, в Украине на Низкочастотной обсерватории РИ НАНУ, в Арктике на о. Свалбард и в Восточной Сибири на Саянской Солнечной Обсерватории Института Солнечно-Земной Физики (г. Иркутск).

Это позволило обнаружить ряд новых эффектов в поведении РСС ИАР и систематически исследовать суточные, сезонные и одиннадцатилетние особенности его поведения в разных регионах земного шара (раздел 4).

### 1.2.6 Акустико-гравитационные волны

Важной разновидностью низкочастотных возмущений, существенно влияющих на динамику геокосмоса, являются акустико-гравитационные волны (АГВ). Условно они делятся на крупномасштабные (периоды – свыше часа, длины волн – порядка и более 1000 км, скорости 400-1000 м/с). Среднемасштабные волны имеют периоды 15-60 минут, а их скорости варьируются от 100 до 250 м/с [162]. Теоретические основы возбуждения и распространения АГВ в рамках упрощенных моделей атмосферы довольно полно изложены в монографии [45]. В акустической волне возвращающей силой является изменение давления при сжатии среды. В гравитационной волне – это сила тяжести, влияющая на объем газа в стратифицированной атмосфере. При рассмотрении АГВ необходимо учитывать оба фактора. При укорочении длины волны превалирует звуковая компонента, а для больших масштабов определяющей является гравитационная составляющая.

Дисперсионное уравнение АГВ имеет вид:

$$\omega^4 - \omega^2 c^2 (k_x^2 + k_z^2) + (\gamma - 1) g^2 k_x^2 + \omega^2 \gamma^2 g^2 / 4c^2 = 0, \quad (1.15)$$

где:  $k_x$  и  $k_z$  - волновые числа в горизонтальном и вертикальном направлении соответственно;  $\omega$  - круговая частота;  $c$  - скорость звука;  $\gamma$  - соотношение удельных теплоемкостей атмосферного газа;  $g$  - ускорение силы тяжести. Если в уравнении (1.15) положить  $g = 0$ , то получится дисперсионное уравнение для акустической (звуковой) волны:

$$c = \frac{\omega}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} = \frac{\omega\lambda}{2\pi}, \quad (1.16)$$

фазовая скорость которой не зависит от направления.

Подставляя

$$\omega_a = \gamma g / 2c, \quad (1.17)$$

и

$$\omega_B = \sqrt{\gamma - 1} \cdot g / c, \quad (1.18)$$

в уравнение (1.15) и преобразуя его, можно получить

$$k_z^2 = (1 - \omega_a^2 / \omega^2) \cdot \omega^2 / c^2 - k_x^2 (1 - \omega_B^2 / \omega^2). \quad (1.19)$$

Затем, полагая что  $\omega^2 \ll c^2 k_x^2$  (т.е. исключая эффект сжимаемости), получим:

$$k_z^2 = k_x^2 (\omega_B^2 / \omega^2 - 1). \quad (1.20)$$

Это выражение соответствует гравитационной волне

Уравнение (1.15) включает в себя весь спектр АГВ. В общем случае траектория частиц движения частиц воздуха в них эллиптическая, что объясняется комбинацией продольного движения акустической волны и поперечного движения гравитационной. Поскольку  $k_x$  и  $k_z$  должны быть действительными, распространение волн возможно только при  $\omega > \omega_a$  и  $\omega < \omega_B$ , что соответствует акустической и гравитационной ветвям. Если  $\omega_B < \omega_a$ ,

волны промежуточных частот являются не распространяющимися. Величины  $\omega_a$  и  $\omega_B$  имеют физический смысл частоты акустического резонанса всей атмосферы и частоты всплывания, или резонанса Брента-Вяйсяля соответственно [45]. Исходя из значений  $\omega_B$  для реальной атмосферы на ионосферных высотах волны с периодами больше 10-15 мин относятся к гравитационной, а с меньшими к акустической ветвям.

Акустико-гравитационные волны характерны, прежде всего, для нейтральной атмосферы. Динамика нейтрального газа передается ионной компоненте плазмы за счет соударений. Распространение АГВ на ионосферных высотах приводит к модуляции плотности плазмы и вызывает появление перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ). На относительно небольших высотах (где частота соударений много больше гирочастоты) направления движения ионизированной и нейтральной компонент атмосферного газа совпадают. На больших высотах, где плазма “замагничена”, движение ионов поперек магнитного поля тормозится и направления движения компонент различаются. Поскольку дистанционно наблюдать за заряженной компонентой в геокосмосе существенно проще чем за нейтральной, основной объем экспериментальной информации об АГВ получен путем наблюдений ПИВ. Для их регистрации используют: ионозонды, радары НР, высокочастотные доплеровские методы, измерения полного электронного содержания и другие методы.

Экспериментальные исследования АГВ/ПИВ показывают, что их поведение не может быть полностью объяснено в рамках приведенной выше упрощенной теории. Например теоретические исследования, выполненные в работах [163, 164], описывают данные волновые процессы в виде квазипериодических возмущений несинусоидальной природы в которых большую роль играют нелинейные эффекты. Поэтому для описания АГВ/ПИВ необходима организация их долгосрочного мониторинга для различных гелио и геофизических условий. С результатами таких исследований можно ознакомиться в обзорных статьях, посвященных АГВ/ПИВ [162, 165, 166, 167] и цитируемой в них литературе.

Следует отметить, что АГВ/ПИВ вносят существенный вклад в динамику и энергетику атмосферы и ионосферы. Волны этого вида играют роль основного транспортного агента, переносящего энергию возмущений от нейтральной атмосферы к ионосфере. Они также являются связующим звеном между авроральной активностью и среднеширотным поясом. Необходимо также отметить значительный вклад АГВ/ПИВ в глобальную циркуляцию на высотах мезосферы и термосферы. Их вклад, например, учитывается в циркуляционной модели атмосферы TIME-GSM [168]. Однако, несмотря на интенсивное изучение АГВ/ПИВ, природа собственных внутренних волн в атмосфере, их влияние на климатологию и состояние космической погоды исследованы далеко не полно. В ряде случаев АГВ играют роль геокосмических “индикаторов” мощных приповерхностных энерговыделений, таких как ураганы, землетрясения и цунами. 7-ой раздел диссертации посвящен исследованию этих волновых процессов.

## Выводы Раздела 1

Аналитический обзор литературы, выполненный в данном разделе, иллюстрирует востребованность, актуальность, фундаментальную и практическую значимость задач, поставленных в диссертационной работе. Проведенный анализ показал, что низкочастотные процессы, выбранные для исследования, играют существенную роль при формировании образа космической погоды и отображении ее поведения. Для их изучения обоснована необходимость разработки новых оригинальных методов дистанционной радиофизической диагностики околоземного пространства и создание многофункциональных обсерваторий, расположенных в разных регионах земного шара. Многолетние систематические базы данных наблюдений в высоких и средних широтах, анализ и физическое моделирование, представленные в диссертации, демонстрируют продуктивность и перспективность решение поставленных задач.

## РАЗДЕЛ 2

### ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И ПРОЦЕССОВ

В настоящем разделе описаны измерительные комплексы и методики обработки экспериментальных данных, послуживших основой диссертационной работы. Большая часть данных получена на установках, разработанных с участием автора в Радиоастрономическом институте НАН Украины. К ним относятся электромагнитные сенсоры Низкочастотной обсерватории РИ НАНУ, сети магнитометрических станций УНЧ-СНЧ диапазона и когерентных ВЧ приемников. Кроме того, для обработки привлекались данные измерительных комплексов организаций-партнеров РИ НАНУ, инсталляция которых была реализована с участием автора. Пакеты прикладных программ Интернет – управления, обработки и визуализации данных в реальном времени были разработаны также под руководством автора. Карта расположения пунктов наблюдения показана на рис. 2.1.

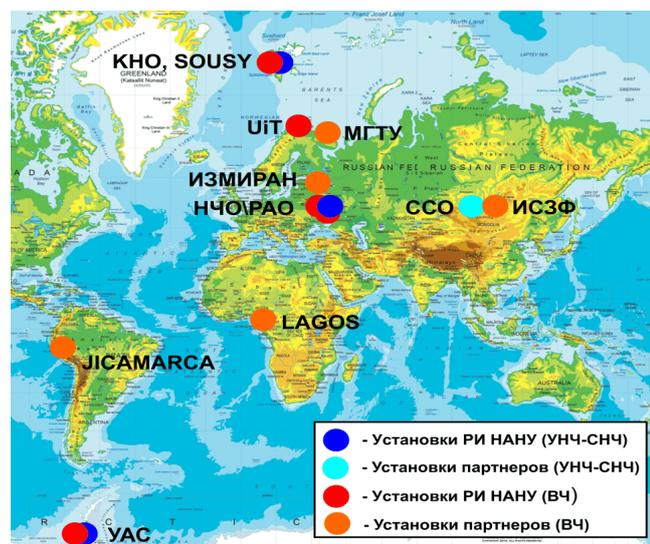


Рисунок 2.1 – Карта размещения УНЧ-СНЧ и ВЧ измерительных установок

В таблице 2.1 приведены данные о расположении и приборном оснащении пунктов наблюдения.

Таблица 2.1 – Расположение пунктов наблюдений (установки РИ НАНУ выделены серым фоном).

<b>№</b>	<b>Наименование</b>	<b>Координаты</b>	<b>Перечень устройств</b>
<b>1</b>	Низкочастотная обсерватория <b>(НЧО)</b> РИ НАНУ, с. Мартовя, Украина	49°56'01'' с.ш., 36°57'10'' в.д.	<b>УНЧ-СНЧ комплекс, ВЧ приемник</b> (1 канал), <b>Магнитометр, Метеостанция, Мюонный телескоп, ГННС приемник, Фотометр (AERONET) Интернет управление</b>
<b>2</b>	Радиоастрономическая обсерватория <b>(РАО)</b> РИ НАНУ, п. Граково, Украина	49°38'18'' пн.ш., 36°56'25'' в.д.	<b>ВЧ приемник</b> (6 каналов), Автономное управление
<b>3</b>	Украинская антарктическая станция <b>(УАС)</b> , о. Галиндес, Антарктика	65°14'45'' ю.ш., 64°15'27'' з.д.	<b>УНЧ-СНЧ комплекс, ВЧ приемник</b> (2 канала), <b>Ионозонд, Магнитометр, Метеостанция, ГНСС приемник, Спектрофотометр Добсона</b> Автономное управление
<b>4</b>	Обсерватории <b>КНО</b> и <b>SOUSY</b> Университетский центр, о. Свадбард, Норвегия	78°08'53'' с.ш., 16°02'35'' в.д.	<b>УНЧ-СНЧ комплекс, ВЧ приемник</b> (2 канала), <b>Ионозонд, Интернет управление</b>
<b>5</b>	Арктический Университет Норвегии <b>(UiT)</b> , г. Тромсе, Норвегия	69°39'41'' с.ш., 18°56'30'' в.д.	<b>ВЧ приемник</b> (2 канала), <b>Ионозонд, ГНСС приемник Интернет управление</b>
<b>6</b>	Лагоский университет <b>(Lagos)</b> , г. Лагос, Нигерия	06°26' с.ш., 03°25' в.д.	<b>ВЧ приемник</b> (1 канал) <b>Интернет управление</b>
<b>7</b>	Обсерватория <b>Jicamarca</b> , Перу	11°57'05'' ю.ш., 76°52'27'' з.д.	<b>ВЧ приемник</b> (1 канал) Автономное управление
<b>8</b>	Саянская солнечная обсерватория <b>(ССО)</b> , Россия	51°37' с.ш., 100°55' в.д.	<b>УНЧ-СНЧ комплекс</b> Автономное управление
<b>9</b>	Институт солнечно-земной физики <b>(ИСЗФ)</b> , г. Иркутск, Россия	52°45' с.ш., 103°49' в.д.	<b>ВЧ приемник</b> (2 канала), <b>Ионозонд</b> Автономное управление
<b>10</b>	<b>ИЗМИРАН</b> , г. Троицк, Россия	55°28'39'' с.ш., 37°18'53'' в.д.	<b>ВЧ приемник</b> (2 канала), <b>Ионозонд</b> Автономное управление
<b>11</b>	Мурманский Государственный Технический Университет <b>(МГТУ)</b> , г. Мурманск, Россия	68°57' с.ш., 33°04' с.ш.	<b>ВЧ приемник</b> (2 канала) Автономное управление

В данном разделе рассмотрены состав измерительных комплексов, принципы их работы, методики регистрации электромагнитных полей и сигналов, а также системы трансляции, архивирования и оперативной обработки потоков данных.

Основные оригинальные результаты этого раздела опубликованы в статьях [2, 9, 10, 11, 12, 16, 17, 18, 22, 23, 29, 31, 169, 170, 171], а также в доложены на многих научных конференций [32, 34, 172, 173, 174, 175, 176, 177].

## 2.1 Измерительные системы, размещенные в полярных регионах

Большая часть оригинальных результатов работы была получена на основе анализа данных, зарегистрированных на Украинской антарктической станции (УАС) “Академик Вернадский”, до 1996 года - Британская антарктическая база “Фарадей”, которая является одной из старейших электромагнитных обсерваторий в Антарктике. Востребованность и высокое качество данных, получаемых на УАС, обусловлено рядом причин:

- станция удалена от источников техногенных и природных электромагнитных источников излучений (таких, например, как теле-радио передатчики и местные грозы), что обеспечивает рекордно низкий уровень активных помех;

- удачное расположение станции относительно экваториальных центров мировой грозовой активности упрощает пространственную селекцию источников таких излучений;

- магнитная сопряженность северной части Антарктического полуострова с восточным побережьем США, где расположено большое число электромагнитных обсерваторий, позволяет синхронно исследовать собственные резонансы внутренней магнитосферы;

- близость пролива Дрейка, как одного из самых метеорологически активных мест на планете, дает возможность организовать мониторинг

тропосферно – ионосферного взаимодействия и исследовать механизмы возбуждения атмосферных гравитационных волн;

- большое различие географических и геомагнитных широт позволяет разделять на ионосферных высотах процессы электродинамической и термодинамической природы, а также исследовать особенности аномального сезонного поведения высотного профиля электронной концентрации, обусловленного этим разделением.

Эти особенности послужили побудительным мотивом организации британцами постоянно действующей полярной станции в данном регионе, специализирующейся на мониторинговых наблюдениях параметров атмосферы и геокосмоса. Регулярные измерения метеопараметров, магнитных полей, полного содержания озона и ионосферное зондирования были начаты там в 1957 г., во время Первого Международного Геофизического Года. В 80-ые годы прошлого века на станции были начаты измерения шумов и радиосигналов в диапазоне ОНЧ. На настоящий момент эти массивы данных являются самыми продолжительными в Антарктике. Часть этих массивов была использована автором для анализа момента начала восходных изменений параметров радиосигналов ОНЧ диапазона, принимаемых в Антарктике в зависимости от длины и ориентации трассы относительно терминатора, частоты сигнала и изменений общего содержания озона [11].

После передачи станции Украине в 1996 г., британские исследовательские программы по диагностике геокосмоса были продолжены и развиты учеными РИ НАНУ, который является головной организацией по геокосмическим исследованиям Украины в Антарктике. Многие действующие измерительные комплексы были модернизированы, а также установлены новые оригинальные системы радиодиагностики геокосмоса. В 2001 г., были проведены первые тестовые измерения электромагнитных шумов в УНЧ-СНЧ диапазоне. С марта 2002 г. при непосредственном участии автора во время VII-ой Украинской антарктической экспедиции (УАЭ), был начат непрерывный мониторинг УНЧ-СНЧ полей, продолжающийся по настоящее время. Во время X-УАЭ автором был внедрен новый алгоритм обработки данных

наблюдений шумановского (ШР) и ионосферного альфвеновского (ИАР) резонаторов (см., подраздел 4 данного раздела). В этот же период была разработана и реализована методика мониторинга излучения энергосетей североамериканского континента (см., подраздел 2 раздела 6).

В 2002 г., на УАС был установлен многоканальный когерентный измерительный ВЧ комплекс, который до этого был апробирован в ходе морской части экспедиции во время трансатлантического рейса Севастополь-УАС. В течение морской экспедиции с его помощью были исследованы характеристики ионосферы и морского волнения, а результаты изложены в работах [22, 169]. В последующем комплекс был использован во время многомесячной измерительной кампании по диагностике перемещающихся ионосферных возмущений в регионе Антарктического полуострова. Основные результаты этих исследований изложены в работе [16]. В дальнейшем ВЧ аппаратура была дополнена когерентной установкой, состоящей из 2-х цифровых приемников WinRadio G-313, которая входит в состав глобальной ВЧ сети, созданной сотрудниками РИ НАНУ в последние 10 лет. Более подробно структура этой сети описана в подразделе 3 данного раздела. В 2005 г. на УАС был установлен двухчастотный приемник ГНСС который позволяет в мониторинговом режиме проводить диагностику полного электронного содержания (ПЭС).

В состав комплекса радиодиагностики ионосферы входят также станция вертикального зондирования (ионозонд) и когерентный цифровой ВЧ передатчик. С мая 2015 года приемная система нового когерентного ВЧ комплекса развернута и непрерывно функционирует на Американской антарктической станции “Палмер”, расположенной в 50-ти километрах севернее УАС. Диагностическое оборудование для этого комплекса было создано совместно с коллегами из университета Бостон колледж (США).

Следует также упомянуть прецизионные магнитометрические установки магнитной обсерватории AIA, расположенной на УАС, функционирующей в непрерывном режиме и включенной в систему “INTERMAGNET”.

Приведенный выше краткий обзор измерительных установок УАС показывает, что станция - это хорошо укомплектованная электромагнитная обсерватория, которая позволяет производить комплексные исследования нейтральной атмосферы и околоземного плазменного окружения. Поскольку большая часть результатов диссертации получена при использовании данных индукционных магнитометрических комплексов УНЧ-СНЧ диапазона, далее они будут рассмотрены более подробно.

Широкополосный магнитометрический комплекс *Lemi112*, установленный на УАС в 2002 году, предназначен для измерений вариаций геомагнитного поля в диапазоне частот от 0.1 мГц до 80 Гц, что позволяет использовать его для изучения широкого класса низкочастотных процессов в околоземном пространстве. Прибор изготовлен Львовским центром института космических исследований (ЛЦ ИКИ) НАНУ-НКАУ. Следует отметить высокую чувствительность на уровне лучших мировых образцов и возможность длительной многолетней работы в мониторинговом режиме. Комплекс состоит из пяти магнитных зондов индукционного типа, двух электрических каналов, коммуникационного и измерительного блока *Lemi-419ANT*, регистрирующего компьютера и коммуникационных кабелей.

Индукционные зонды (далее – зонды) предназначены для исследования флуктуаций магнитного поля. Всего есть три вида зондов:

*Lemi112E* (2 шт.) – ВЧ зонды, регистрирующие вариаций магнитного поля в диапазоне частот 0.001-80 Гц и имеющие практически “плоскую” амплитудно-частотную характеристику в диапазоне 1-80 Гц..

*Lemi112A3* (2 шт.) - Зонды подобные *Lemi112E*, но имеют более узкий частотный диапазон 0.1 мГц -10 Гц и линейную АЧХ в этой полосе частот.

*Lemi112A3P* (1 шт.) - Индукционный рамочный зонд, предназначенный для исследования флуктуаций вертикальной компоненты магнитного поля в диапазоне частот 0,01-80 Гц.

Зонды *Lemi112E* и *Lemi112A3* установлены на расстоянии около 100 м к востоку от СНЧ павильона УАС на специальных бетонных фундаментах, которые сооружены непосредственно в скальном грунте. Датчики жестко

закреплены на фундаментах с помощью металлических немагнитных креплений. Такая конструкция практически полностью нейтрализует "ветровую" помеху, и позволяет эффективно проводить измерения на частотах ниже 3 Гц. Зонды ориентированы вдоль географических меридиана и параллели (каналы юг-север и восток-запад). Зонд Lemi112A3P имеет вид петли на земной поверхности, радиусом 10 м и измеряет вертикальную компоненту вариаций магнитного поля.

Электрические каналы комплекса позволяют регистрировать напряженности  $E_x$  и  $E_y$  составляющих электрического поля и оценивать теллурические токи, однако для задач диссертационной работы не используются.

Блок электроники *Lemi-419ANT* и регистрирующий компьютер расположен в СНЧ павильоне (приблизительно в 500 м к востоку от главного корпуса станции). Все промежуточные преобразования и оцифровка сигналов осуществляется измерительным блоком, а на регистрирующий компьютер данные поступают в цифровом виде. Вид блока электроники показан на рис. 2.2. Его технические характеристики приведены в таблице 2.2.

Компоненты электрического поля измеряются неполяризованными электродами, компоненты магнитного поля - индукционными датчиками. Схема измерительных каналов одинакова как для магнитных датчиков, так и для электрических. Каждый канал состоит из предварительного усилителя с программируемым коэффициентом усиления (1, 10, 100, 1000) и низкочастотного фильтра четвертого порядка (БФ). Частота среза БФ для ВЧ каналов и электрометра – 80 Гц и для НЧ каналов – 10 Гц. БФ также включает режекторный фильтр с центральными частотами 150 Гц и 50 Гц.



Левая панель



Правая панель



Рисунок 2.2 – Блок электроники Lemi-419 ANT

Таблица 2.2 – Технические параметры Lemi-419ANT

Число каналов: переменного магнитного поля	5
электрического поля	2
Диапазон измерений магнитного поля	$\pm 0.25, 2.5, 25, 250$ нТл
Разрешающая способность маг. сигналов	0.01 пкТл
Частотный диапазон:	
- Для 3-х магнитных каналов ВЧ	0.001-80 Гц
- Для 2-х магнитных каналов НЧ	0.0001-10 Гц
- Для электрических каналов	0 – 80 Гц
Подавление сетевых помех	>38 дБ
Частота дискретизации:	320 отсчетов/с
Разрешение АЦП:	24 бита
GPS синхронизация и определение координат	
Рабочий диапазон температур	минус 20 до +40°C
Напряжение питания	+12 В
Мощность	< 3 Вт
Вес блока электроники LEMI-419ANT	3.9 кг

Измеренные данные оцифровываются АЦП и затем через RS-422 интерфейс записываются в память персонального компьютера. Блок электроники снабжен GPS приемником, который осуществляет синхронизацию данных с UT.

Анализ УНЧ-СНЧ данных полученных за несколько лет наблюдений на УАС показал эффективность и перспективность проведения синхронных измерений сигналов с большим разнесением в пространстве. Для их обеспечения с 2008 г., мониторинг низкочастотных вариаций магнитного поля в диапазоне частот 0.5 - 40 Гц был начат в 80 км от г. Харькова на Низкочастотной обсерватории РИ НАНУ (НЧО). Несмотря на удаленность от города качественные измерения УНЧ-СНЧ сигналов непосредственно на обсерватории оказались невозможными из-за высокого уровня помех. Поэтому регистрация сигналов на НЧО осуществляется выносным приемным устройством разработки РИ НАНУ, установленным в лесном массиве на расстоянии примерно 2.5 км от обсерватории, а трансляция данных в пункт регистрации и обработки выполняется по УКВ каналу связи [178].

По инициативе РИ НАНУ с 2010 г., мониторинг УНЧ-СНЧ сигналов осуществляется коллегами из Института солнечно-земной физики на Саянской солнечной обсерватории (рис. 2.1, табл. 2.1). Для регистрации вариаций горизонтальных составляющих магнитного поля используется прибор Lem1-30 разработки ЛЦ ИКИ НАНУ-ГКАУ. Он отличается от описанных выше устройств только диапазоном частот, который составляет 1 мГц - 30 Гц.

Низкочастотные приборные комплексы, расположенные на НЧО и ССО существенно расширили возможности для исследований ШР и ИАР, и способствовали получению новых результатов, изложенных в разделах 3-6 диссертации. В то же время принципиальным недостатком среднеширотных обсерваторий является высокий уровень помех от местных гроз в летний период. Характерный вид суточной спектрограммы искаженной местной грозой показан на рис. 2.3.

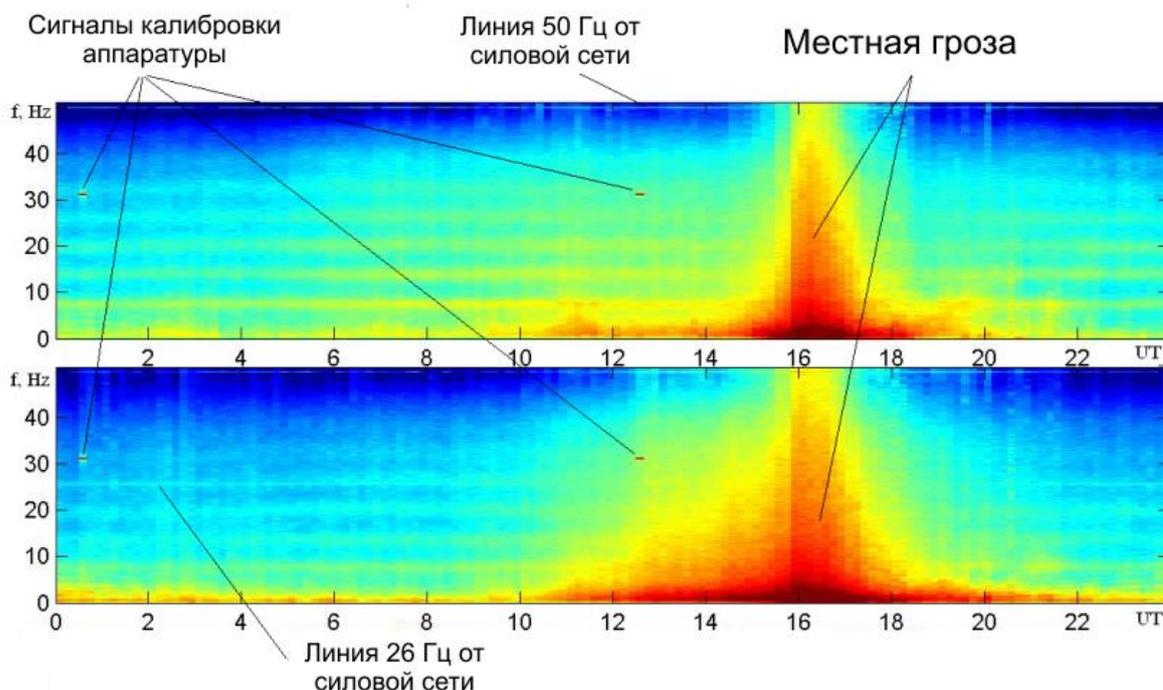


Рисунок 2.3 – Суточная спектрограмма сигналов на НЧО с характерными помехами

Для получения неискаженных помехами записей на больших удалениях от УАС по инициативе и при участии автора совместно с коллегами из Арктического университета Норвегии UiT с сентября 2013 г., на обсерватории SOUSU (о. Свалбард, арх. Шпицберген) установлен магнитометрический комплекс Lemі-30і разработки ЛЦ ИКИ НАНУ-ГКАУ. На рис. 2.4 показан процесс установки магнитных зондов на обсерватории SOUSU и организации системы влаго- и ветрозащиты необходимых в условиях вечной мерзлоты в Заполярье.

Диапазон рабочих частот магнитометра 1 мГц - 80 Гц согласован с характеристиками прибора на УАС, что упрощает взаимную обработку и интерпретацию данных. Обработка данных со всех магнитометрических комплексов осуществляется в соответствии с методикой, изложенной в подразделе 4 данного раздела. Следует также отметить, что данные с

магнитометров на SOUSY и НЧО в режиме реального времени транслируются на файл-сервер РИ НАНУ, обрабатываются и отображаются на веб-странице НЧО <http://geospace.com.ua/data.html> совместно с данными других сенсоров.



Рисунок 2.4 – Установка магнитных зондов на о. Свалбард (слева) и монтаж системы влаго- и ветрозащиты (справа, (а-г))

Высокие чувствительность, частотная стабильность и помехозащищенность описанной выше глобальной сети магнитометров позволяют с их помощью производить диагностику не только естественных шумов, но и излучения техногенного происхождения. В качестве источников пробных сигналов могут использоваться, например, специальные передающие системы УНЧ-СНЧ диапазона волн. Регистрация искусственных сигналов представляет интерес как с точки зрения изучения характеристик канала распространения, возможности передачи информации на сверхдальние расстояния и обнаружения техногенных циклов в окружающем пространстве. В

частности, в рамках экспериментов FENICS-2009 [9] и 2014 [10] изучено взаимодействие электромагнитных волн УНЧ и СНЧ диапазонов (0.1–200 Гц) с земной корой и ионосферой в поле двух взаимно ортогональных промышленных линий электропередачи (ЛЭП) длиной 109 и 120 км, расположенных на Кольском полуострове. Впервые сигналы промышленных ЛЭП уверенно зарегистрированы на о. Свалбард (арх, Шпицберген) и Низкочастотной обсерватории (НЧО) РИ НАНУ вблизи г. Харьков (с. Мартовая) на рекордных удалениях от источника излучений 1180 и 2110 км соответственно. Но и такие расстояния не являются предельными. Когда в роли источника выступает энергосистема всего североамериканского континента, ее излучение на частоте 60 Гц удалось уверенно зарегистрировать в Антарктике, на удалении более 10 Мм от источника. Анализу свойств этих сигналов посвящен подраздел 5.4 диссертации.

## 2.2 Низкочастотная обсерватория РИ НАНУ

Большой объем данных, использованных в работе, был получен на НЧО РИ НАНУ. Кроме описанного ранее магнитометра УНЧ-СНЧ диапазона, в аппаратный парк обсерватории входят: автоматическая метеомагнитная станция (АММС) Lemi-017m для измерения вариаций магнитного поля и атмосферного давления, двухчастотный ГНСС приемник для определения полного электронного содержания ионосферы, приемный ВЧ комплекс на базе цифрового приемника WinRadio G313i, мюонный монитор, метеорологическая станция и солнечный фотометр CIMEL CE318N системы AERONET.

*Автоматическая метеомагнитная станция (АММС) Lemi-017m* разработана в Львовском Центре Института космических исследований НАНУ-НКАУ. Она предназначена для синхронных непрерывных измерений вариаций 3-х компонент магнитного поля Земли и атмосферного давления. Основные характеристики станции приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Технические параметры Lemi-017m.

<b>Магнитометр</b>	
Диапазон измерений	$\pm 65\ 000$ нТл
Частотный диапазон	0 – 1 Гц
Разрешающая способность	0.01 нТл
Уровень шумов на частоте 1Гц	$< 15$ нТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$
Ошибка ортогональности	$< 30$ угл.мин.
Температурный дрейф	$< 0.2$ нТл/ $^{\circ}\text{C}$
Ошибка линейности коэффициента преобразования	$< 0.01\%$
<b>Барометр</b>	
Диапазон измерений	953 - 1113 гПа
Разрешающая способность	1 Па
Уровень шумов на частоте 1 Гц, не больше	$1 \text{ Па}\sqrt{\text{Гц}}$

АММС состоит из 2-х блоков: блока датчиков и блока электроники. Оба блока размещены в подземном немагнитном бункере с активной термостабилизацией. В состав блока датчиков входят три феррозондовых датчика. Блок электроники включает барометр на базе тензорезисторного датчика давления и дополнительный термометр для измерения температуры внутри блока. Цифровые данные в реальном времени передаются по проводной линии связи в аппаратный зал обсерватории и регистрируются на компьютере. Параллельно осуществляется резервное копирование данных на FLASH карту блока электроники. Синхронизация работы станции осуществляется от встроенного приемника GPS. Темп съема данных составляет одну секунду.

*Двухчастотный ГНСС приемник Ashtech-MD12* установлен на НЧО с целью мониторинга ПЭС над обсерваторией. Получаемые записи применяются для изучения вариаций ПЭС, сопровождающие геомагнитные и тропосферные возмущения. Оценка ПЭС по данным двухчастотного просвечивания ионосферы основана на существовании дисперсии показателя преломления для радиоволн в плазме (см., [179]). Приемник подключен к компьютеру через последовательный интерфейс RS232. Темп регистрации первичных данных составляет пять секунд.

*Приемный ВЧ комплекс* создан на базе цифрового приемника WinRadio WR-G313i и предназначен для изучения динамических процессов в ионосфере путем мониторинга излучения широковещательных и специальных ВЧ передатчиков. Более подробно комплекс будет описан в следующем подразделе.

*Мюонный монитор* является усовершенствованным вариантом Аделаидского мюонного телескопа (разработки университета города Аделаида, Австралия). Прибор предназначен для исследования корреляции вариаций потоков мюонов с изменениями атмосферного давления, температуры и магнитного поля Земли. Детектор мюонов, входящий в состав монитора, регистрирует частицы, проходящие сквозь сцинтиллятор и оставляющие в нем ионизационные потери из расчета  $2 \text{ МэВ}/(\text{г см}^2)$ . Минимальная энергия, которой должен обладать мюон, чтобы быть зарегистрированным составляет приблизительно 50 МэВ. Основная часть регистрируемых мюонов лежит в области нескольких сотен МэВ. Мюонный телескоп работает в непрерывном мониторинговом режиме. Регистрируются данные о числе частиц в течение каждой секунды. Временная синхронизация обеспечивается с помощью GPS приемника.

*Метеорологическая станция Oregon Scientific Wireless Weather Station WMR200* включает датчики, измеряющие температуру и влажность воздуха, скорость и направление ветра, а также количество осадков. Датчики температуры и влажности воздуха размещены в психрометрической будке, расположенной на высоте 2 метра над поверхностью. Датчик скорости и направления ветра (анеморумбометр) установлен на высоте 10 метров. Осадкомер закреплен на высоте 1 метр. Данные с каждого сенсора регистрируются с темпом 1 минута и передаются на базовую станцию, расположенную в помещении НЧО. Трансляция данных от датчиков к устройству сбора информации осуществляется по беспроводному радиоканалу. Точность и дискретность измерений параметров составляют: 0,1 градус Цельсия для температуры и точки росы, 1 % для относительной влажности, 0,1 м/с для скорости ветра, 1 градус для направления ветра и 1 мм для количества осадков.

Вся измерительная аппаратура НЧО компьютеризирована и работает в непрерывном режиме. При активном участии автора все приборно-компьютерные комплексы объединены в единую сеть сбора, хранения и передачи данных по сети Интернет на файл – сервер РИ НАНУ в г. Харькове. Предварительная обработка данных осуществляется в автоматическом режиме на сервере РИ НАНУ и публикуется на web-странице в сети Интернет. Кроме данных НЧО, на странице отображаются результаты УНЧ – СНЧ наблюдения на обсерватории SOUSY и ВЧ регистраций на обсерваториях КНО, гг. Тромсе и Лагос. Процедуры обработки и визуализации данных рассмотрены в следующем подразделе.

Все основные комплексы смонтированы в лабораторном помещении НЧО. В состав аппаратуры входят (см., рис. 2.5):

- Компьютеры 1-6;
- коммутатор Ethernet (D-Link DES 1016);
- ADSL модем;
- переключатель KBM (D-Link DKVM-4K) с комплектом монитор, клавиатура, мышь;
- УНЧ-СНЧ приемник (автономный блок регистрации на удалении 2.5 км);
- Солнечный фотометр (вне помещения);
- ВЧ приемник (дипольная антенна вне помещения);
- ГНСС приемник (антенна вне помещения);
- Метеостанция (вне помещения);
- Мюонный монитор;
- блок бесперебойного питания АММС (сама станция размещена в подземном немагнитном термостатированном бункере);
- блок бесперебойного питания компьютеров, и приборов с двумя внешними аккумуляторными батареями.

Внешний вид основной стойки с оборудованием показан на рис. 2.6.

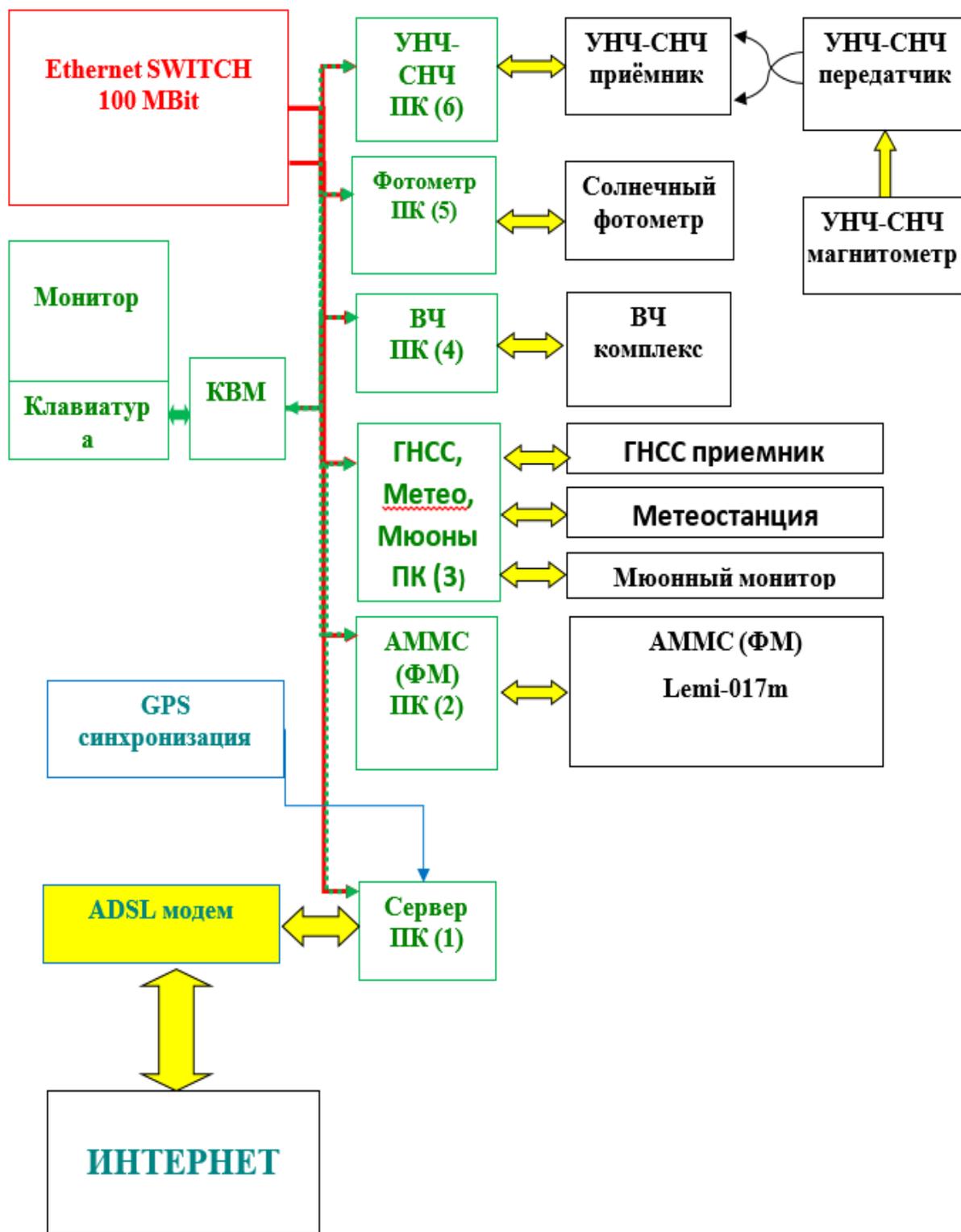


Рисунок 2.5 – Блок-схема аппаратуры НЧО РИ НАНУ



Рисунок 2.6 – Основная стойка с оборудованием

Компьютерный комплекс подключен к локальной сети Ethernet. Комплекс перманентно соединен с Интернет сетью с помощью ADSL модема с максимальной скоростью передачи данных 10 Мбит/с. Интернет-провайдером является оператор УкрТелеком. Модем установлен на компьютере (1), который является Интернет-шлюзом. Время в локальной сети комплекса синхронизируется с серверами времени Интернет по протоколу NTP. В случае аварийного отключения от глобальной сети и работы комплекса в автономном режиме предусмотрена возможность синхронизации времени с помощью GPS приемника.

Программное обеспечение (ПО) комплекса организовано таким образом, чтобы обеспечить полностью автоматическое функционирование обсерватории и свести к минимуму необходимость вмешательства технического персонала. Реализовать такой режим работы оказалось возможным, поскольку все измерительные системы НЧО соединены с ПК. Для каждой измерительной системы (ННЧ комплекс, ФМ (АММС), солнечный фотометр, ВЧ приемник, ГНСС приемник, метеостанция, мюонный монитор) создано специализированное ПО, которое в соответствии с заранее составленным расписанием управляет режимом регистрации и обеспечивает запись первичных данных на жесткий диск соответствующего ПК. ПО также контролирует непрерывность поступления данных с устройств, и в случае появления сбоя в записи “перезапускает” программу регистрации. На ПО измерительных систем также возложена функция автоматического копирования первичных данных в единую базу данных, размещенную на сервере НЧО (ПК 1). В зависимости от потребностей программ обработки (запускаются на сервере в РИ НАНУ, г. Харьков) и технических возможностей измерительных систем периодичность обновления данных в базе составляет от 5-ти минут (ВЧ приемник) до одних суток (УНЧ-СНЧ комплекс). При этом архивная копия первичных данных остается на жестких дисках ПК измерительных комплексов, что обеспечивает резервирование информации.

Сервер НЧО не сопряжен ни с одним из измерительных комплексов. Он выполняет функции:

- 1) файл сервера для хранения базы данных всех измерительных систем НЧО;
- 2) системы Интернет-трансляции данных на сервер РИ НАНУ (расположен в г. Харьков);
- 3) шлюза для обеспечения перманентного подключения к сети Интернет и поддержки соединения локальной сети НЧО с компьютерной сетью РИ НАНУ.

Первая из перечисленных функций обеспечивается измерительными системами, а другие, выполняются специализированным ПО, установленным на сервере. Сервер НЧО поддерживает перманентное подключение к глобальной сети Интернет и режим защищенного соединения с компьютерной сетью РИ НАНУ через VPN туннель. Таким образом, компьютерная сеть НЧО фактически является частью локальной сети РИ НАНУ. Это обеспечивает возможность удаленного управления любым компьютером комплекса при помощи стандартного удаленного рабочего стола ОС Windows по протоколу RDP. Применение RDP управления позволяет выполнять модернизацию ПО компьютерной системы и, в большинстве случаев, устранять сбои в работе программного обеспечения дистанционно с сервера РИ НАНУ не выезжая на обсерваторию.

### 2.3 Сеть интернет управляемых ВЧ приемников

Одним из эффективных способов исследования низкочастотных динамических процессов в ионосфере является доплеровский метод [52, 180, 181]. В РИ НАНУ метод доплеровского зондирования ионосферной плазмы используется уже более 30 лет. При участии автора работы с его помощью исследовано поведение спектров ВЧ сигналов на радиотрассах различной ориентации и протяженности, включая дальние и сверхдальние [2, 18], что

позволило изучить характеристики различных естественных ионосферных процессов. К ним относятся перемещающиеся ионосферные возмущения [16, 182], плазменные неоднородности в высоких широтах, стимулированные авроральными активациями, градиенты электронной концентрации, вызванные прохождением солнечного терминатора и лунной тенью во время солнечного затмения [23, 169].

Одни из первых наблюдений ВЧ сигналов при помощи приемно-измерительного комплекса (ПИК) были выполнены на УАС “Академик Вернадский”. В частности, в июле 2006 г. была проведена специальная измерительная кампания по регистрации сигналов, излучаемых тремя пробными передатчиками Института солнечно земной физики (ИСЗФ) СО РАН, которые располагались вблизи Иркутска ( $52,75^\circ$  с.ш.,  $103,63^\circ$  в.д.), Магадана ( $59,57^\circ$  с.ш.,  $150,47^\circ$  в.д.) и Норильска ( $69,12^\circ$  с.ш.,  $88,17^\circ$  в.д.). Ее целью являлось исследование условий распространения ВЧ сигналов в диапазоне  $5\div 20$  МГц на сверхдальних радиопереходах, включая как прямые, так и обратные. Анализ спектральных характеристик пробного излучения показал, что зависимости амплитуды сигналов от времени суток и частоты при отсутствии магнитных возмущений качественно совпадают с данными моделирования, полученными в ИСЗФ СО РАН в рамках волноводного механизма распространения ВЧ сигналов для международной справочной модели ионосферы IRI. Результаты этой измерительной кампании подробно представлены в работе [18].

Как уже отмечалось, данные сети ПИК могут быть также использованы для диагностики глобальных ионосферных возмущений, таких как например солнечное затмение (СЗ). Примером могут служить результаты эксперимента по ВЧ зондированию области СЗ 1 августа 2008 г. В качестве пробного излучения использовались ВЧ сигналы трех передатчиков ИСЗФ СО РАН, расположенных вблизи Иркутска, Магадана и Норильска (Россия). Прием сигналов осуществлялся вблизи Харькова на РАО им. С.Я. Брауде РИ НАНУ и на острове Свалбард, КХО (Норвегия). Таким образом, было организовано

шесть трасс зондирования, для каждой из которых наблюдались существенные вариации частоты пробных сигналов во время пересечения соответствующей радиолинии лунной тенью. Для всех радиотрасс обнаружены общие закономерности в поведении ДСЧ пробных сигналов. В частности, показано, что сдвиг частоты близок к нулю и обладает наибольшей скоростью изменения в момент максимальной затененности радиолинии. Обнаружено, что ДСЧ сигналов обратно пропорционально рабочей частоте. Это означает, что преобладающим механизмом его формирования во время затмения являлось изменение коэффициента преломления в нижней части ионосфере вдоль трассы распространения. Проведено моделирование вариаций ДСЧ, вызванного изменением интегральной освещенности радиотрасс во время СЗ, результаты которого качественно и количественно совпадают с экспериментальными данными. Более детально эти результаты изложены в работе [169].

Спектральный анализ ВЧ сигналов на сверхдальней радиолинии позволил обнаружить природный эффект кроссмодуляции пробного излучения и Шумановских резонансов СНЧ диапазона [183]. При исследовании нелинейных эффектов, стимулированных в ионосферной плазме мощным электромагнитным излучением нагревных стендов (НС), основное внимание уделялось изучению спектральных особенностей рассеяния ВЧ сигналов областью искусственной ионосферной турбулентности (ИИТ). В результате были изучены динамика стимулированных неоднородностей в режиме стационарного нагрева ионосферной плазмы [184], процессы релаксации, взаимодействие искусственных плазменных образований с крупномасштабными природными волновыми процессами [185]. Впервые были обнаружены и интерпретированы эффекты “радиального дрейфа” неоднородностей в области нагрева [29], “саморассеяние” мощного сигнала на им же созданных плазменных возмущениях [17, 186].

Для доплеровской диагностики ионосферы в РИ НАНУ было разработано несколько поколений специальных приемных систем. В

восьмидесятих годах прошлого столетия на Радиоастрономической обсерватории им. С. Я. Брауде РИ НАНУ (РАО) была установлена стационарная многоканальная когерентная приемная установка, успешно эксплуатировавшаяся во многих измерительных кампаниях [187]. Позднее было создано несколько мобильных приемных комплексов, хорошо зарекомендовавших себя в ходе морского трансатлантического перехода на УАС [188] и затем установленных на станции “Академик Вернадский” (УАС) [189]. Разработанные в РИ НАНУ методики многопозиционной доплероскопии ионосферы позволяют использовать для диагностики не только специальные передатчики, но и многочисленные широкоэмиттерные ВЧ станций. По данным Международного Союза Электросвязи (International Telecommunication Union) в мире функционирует свыше 5000 эмиттерных передатчиков. Это дает возможность, используя уже существующие источники пробного излучения, проводить доплеровские измерения практически в любом регионе земного шара. Особый интерес представляют исследования в высоких широтах, где ионосфера характеризуется сильной изменчивостью, вызванной высыпаниями потоков высокоэнергичных заряженных частиц из радиационных поясов Земли. Высокоширотная ионосфера используется многими исследовательскими группами, как “природная плазменная лаборатория”. В настоящее время два из четырех действующих нагревных стендов расположены в полярных областях. Это HAARP (The High Frequency Active Auroral Research Program, мощность 3,6 МВт, координаты 62,4° с.ш., 145,2° з.д., Аляска, США) и HC EISCAT (European Incoherent Scatter Scientific Association, мощность 1,2 МВт, 69,6° с.ш., 19,2° в.д., г. Тромсе, Норвегия). Одной из основных научных задач HC является создание “управляемых” режимов генерации ИИТ. Доплеровский метод ВЧ зондирования является эффективным способом экспериментального изучения динамики искусственной плазменной турбулентности и широко применяется на практике. В качестве зондирующих сигналов используется излучение пробных ВЧ передатчиков [29, 184] и самих нагревных стендов

[12]. Отметим, что информативность доплеровского метода существенно возрастает в случае применения нескольких пространственно-разнесенных приемных пунктов, объединенных в единую сеть. Опыт, накопленный в РИ НАНУ, и возможности современных компьютерных и сетевых технологий позволили автору разработать оригинальный компактный доплеровский приемно-измерительный комплекс (ПИК) на основе цифрового приемника фирмы WinRadio Communications. Первый опытный образец ПИК начал эксплуатироваться в 2006 г. на УАС. В 2007 г. в рамках программы “Ассоциированного членства Украины в EISCAT” аналогичный ПИК был установлен автором (см., рис. 2.7) на обсерватории им. Кйелла Хенриксена (КХО) на острове Свалбард (архипелаг Шпицберген) [173].

В настоящее время при активном участии автора создана сеть из девяти пространственно-разнесенных приемных ВЧ комплексов (см., рис 2.1., табл. 2.1), расположенных в высоких, средних и низких широтах, четыре из которых работают в режиме дистанционного интернет-управления. Результаты наблюдений с помощью этих установок автоматически обрабатываются и отображаются на веб-станции отдела Радиофизики геокосмоса РИ НАНУ <http://geospace.com.ua/data.html>.

Данный подраздел посвящен описанию аппаратного и программного обеспечения ПИК. Рассмотрены принципы построения сети многопозиционной доплеровской диагностики ионосферы, интернет – управления, трансляции, автоматической обработки и визуализации данных наблюдений. Рассмотрены перспективы развития сети, модернизации аппаратуры и методик обработки данных измерений.

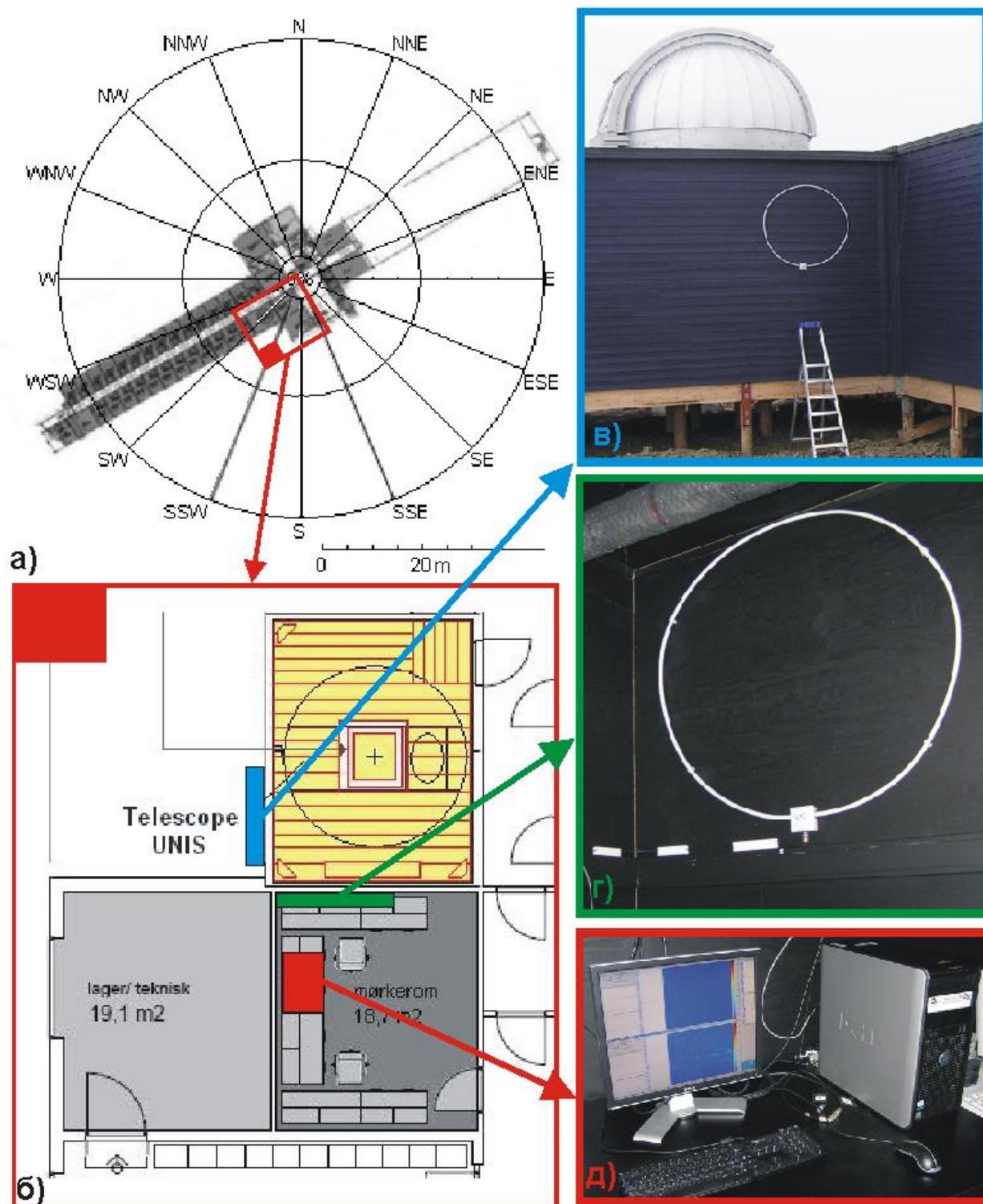


Рисунок 2.7 – Схема размещения приемного ВЧ комплекса в обсерватории КХО а) расположение обсерватории относительно сторон света; б) план лабораторного помещения и схема размещения элементов комплекса; в) антенна север-юг; г) антенна запад восток; д) управляющий компьютер

### 2.3.1. Аппаратное обеспечение ПИК и программа сбора данных

При создании приемно-измерительного комплекса автором учитывались следующие требования. Устройство должно быть мобильным с небольшим энергопотреблением и сравнительно невысокой стоимостью. Необходимо обеспечить реализацию принципов цифрового управления, записи и доступа к данным наблюдений, и пригодность для длительной автономной работы. Чтобы удовлетворить этим требованиям аппаратная часть ПИК была создана на базе стандартного ПК, работающего под управлением операционной системы Windows и серийно выпускаемых компонент. Все модули ПИК, кроме приемной антенны, смонтированы внутри системного блока компьютера, что обеспечивает компактность устройства. Возможности цифрового управления, записи и доступа к данным реализованы с помощью программного обеспечения (ПО), разработанного авторами. Регистрацию ВЧ сигналов обеспечивают цифровые приемные модули WR-G313i фирмы WinRadio Communications. В корпус ПК может быть установлено до 3-х устройств, что позволяет организовать столько же приемных каналов. Аппаратная часть комплекса также включает высокостабильный генератор опорной частоты 10 МГц и систему временной синхронизации данных на базе приемника GPS. Ниже рассмотрим более подробно каждый модуль комплекса.

Приемный модуль представляет собой плату, подключаемую к слоту расширения материнской платы настольного ПК. Функциональная схема WR-G313i представлена на рис. 2.8. Приемник WR-G313i реализован по супергетеродинной схеме с двумя аппаратными преобразованиями частоты. Третье преобразование является полностью цифровым и осуществляется при помощи встроенного сигнального процессора, предназначенного для демодуляции и передачи волновой формы сигнала в память ПК. Такая схема регистрации не использует вычислительных ресурсов компьютера и позволяет реализовать многоканальный ПИК на базе ПК средней производительности. Диапазон рабочих частот приемника 9 кГц-30 МГц. Основные технические характеристики WR-G313i приведены в таблице 2.4.

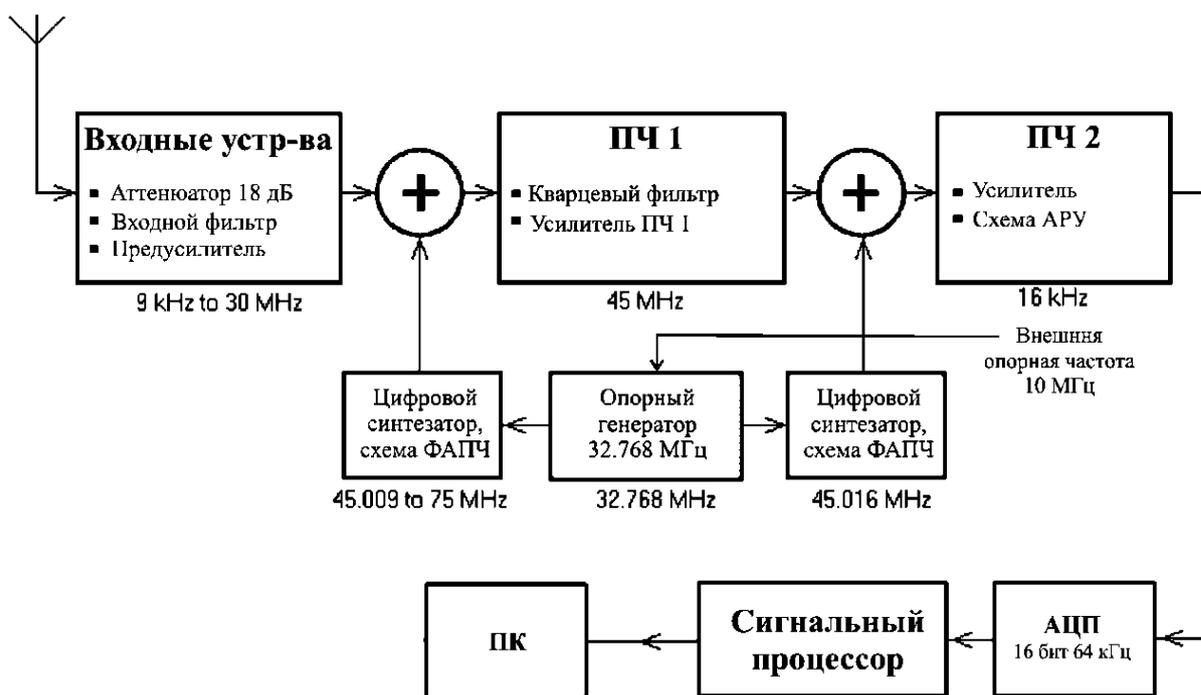


Рисунок 2.8 – Функциональная схема цифрового приемного модуля WR-G313i

Таблица 2.4 – Технические характеристики приемника WR-G313i

Диапазон рабочих частот	9 кГц – 30 МГц
Точность настройки частоты	1 Гц
Динамический диапазон	90 дБ (108 дБ с учетом аттенюатора)
Чувствительность	0,05 мкВ
Рабочие полосы частот	500 Гц, 1 кГц, 2 кГц, 4 кГц, 8 кГц, 16 кГц, 48 кГц
Промежуточные частоты:	
ПЧ1	45 МГц
ПЧ2	16 кГц (перестраиваемая 12-22 кГц)
Антенный вход	50 Ом
Форм-фактор	PCI 2.2 совместимая карта
Вес	330 г

В качестве генератора опорной частоты 10 МГц используется термостабилизированный кварцевый осциллятор ОСХО 131-1000 фирмы Isotemp Research inc., относительная нестабильность которого не хуже  $10^{-8}$ . Следует отметить, что аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) приемника WR G-313i не имеет внешнего запуска. Поэтому для временной синхронизации пространственно-разнесенных пунктов и привязки получаемых данных к единой шкале времени была разработана схема записи меток точного времени GPS приемника (импульсы PPS) непосредственно в файлы данных. Устройство собрано на базе микросхемы-мультиплексора AD8170 (250 MHz, 10nS Switching Multiplexers w/Amplifier) фирмы ANALOG DEVICES. Метки точного времени подаются в канал данных с периодичностью в 1 час.

В типовом ПИК используется активная рамочная антенна диаметром 1,5 м с широкополосным антенным усилителем. Коэффициент усиления составляет ~20 дБ в диапазоне частот 3-15 МГц. Рамочная антенна вместе с усилителем выполнена в герметичном варианте, что позволяет ее использовать в сложных климатических условиях Антарктики и Арктики. Возможна также установка антенн других типов (горизонтальный диполь, вертикальная штыревая антенна и др.).

Для управления ПИК и сбора данных автором создано приложение WinRadioMetr, разработанное на языке программирования C++. Приложение поддерживает независимую работу до 3-х приемных модулей WR-G313i одновременно. Процедура управляет частотой настройки (шаг перестройки 1 Гц), включением входного аттенюатора 18 дБ, коэффициентом усиления (диапазон от +20 до -90 дБ с шагом в 10 дБ), шириной полосы выходного цифрового фильтра (от 0,5 до 22 кГц) и частотой оцифровки сигнала (допустимые частоты оцифровки 1, 2, 4, 8, 16, 48 кГц). Программа также производит включение-выключение оцифровки и записи данных на жесткий диск ПК. Текущие режимы работы и параметры настройки приемных модулей,

а также вид спектра и огибающей сигнала отображаются в основном окне программы.

### 2.3.2. Система интернет-трансляции обработки и визуализации данных наблюдений

Приложение WinRadioMetr запускается при старте операционной системы, производит инициализацию приемных модулей и переводит ПИК в режим ожидания команд управления. Последние передаются процедуре из текстовых файлов-расписаний, составляемых оператором, в соответствии с специально разработанным для этой цели протоколом управления. Применение файлов-расписаний позволяет управлять ПИК, как с локального компьютера, так и удаленно по сети Интернет. В последнем случае необходимо обеспечить возможность передачи файлов расписаний с удаленного ПК, осуществляющего управление. Процедура WinRadioMetr генерирует несколько типов выходных файлов. Основными являются протоколы переключений и файлы данных, которые создаются во время сеанса записи и могут передаваться на удаленный управляющий компьютер по сети Интернет. Протоколы переключений сохраняют историю настроек приемных модулей. Файлы данных делятся на два типа – файлы волновых форм (“сырые” данные, используемые при обработке) и файлы визуализации (применяемые для отображения в сети Интернет компактные файлы, содержащие средние спектры и огибающие сигналов), что необходимо для восстановления фактического расписания работы. Существуют файлы данных двух типов, а именно, файлы “сырых” данных, сохраняющие волновые формы сигналов и файлы визуализации. Первые содержат полную информацию о сигнале и являются основными для обработки. Однако, из-за больших объемов, они не могут передаваться в режиме реального времени по “медленным” интернет линиям. Поэтому для оперативной визуализации сигналов используется второй тип файлов. Эти файлы визуализации содержат

средние спектры и огибающие сигналов, обновляющиеся каждые 12,288 секунды.

Четыре из девяти ВЧ установок, перечисленных в табл. 2.1 работают в режиме удаленного интернет-управления. Изложим принципы контроля работы ПИК из единого центра управления (ЦУП), организованного на базе сервера РИ НАНУ и предназначенного для управления сетью удаленных комплексов, а также сбора, обработки, хранения и визуализации данных. ЦУП также выполняет функции веб-сервера, что упрощает алгоритм публикации данных в сети Интернет. Отметим также, что кроме обработки и визуализации данных сети ВЧ приемников, ЦУП выполняет аналогичные функции для сенсоров НЧО РИ НАНУ и УНЧ-СНЧ установки, размещенной на обсерватории SOUSY (о. Свалбард, арх. Шпицберген).

Автоматический режим функционирования ПИК обеспечивается не только за счет взаимодействия с центром управления, но и благодаря работе программного обеспечения, на самих пунктах наблюдения. Блок-схема работы ПО всей системы в целом показана на рис. 2.9. Для удаленного управления и передачи данных на регистрирующих ПК установлено стандартное клиентское, а на сервере ЦУП серверное ПО, реализующее протокол sftp. Это позволяет получать файлы расписания в пунктах наблюдения и передавать файлы данных с ПК-клиентов на сервер ЦУП. Файлы расписания для всех пунктов наблюдения размещаются на ЦУП и далее специальное ПО с периодичностью в 5 с перемещает их на каждый из ПИК. Такой алгоритм управления упрощает работу оператора, избавляя его от необходимости обслуживать каждый приемный комплекс отдельно.

При регистрации сигналов нагревных стенов EISCAT и HAARP, когда расписание их работы заранее неизвестно, применяется алгоритм автоматического отслеживания частоты НС. Для этого на каждом ПИК используются процедуры, которые по протоколу http подключаются к интернет-серверам НС EISCAT и/или HAARP, анализируют информации о

текущих режимах работы станций и в “реальном времени” формируют соответствующие изменения расписания работы ПИК.

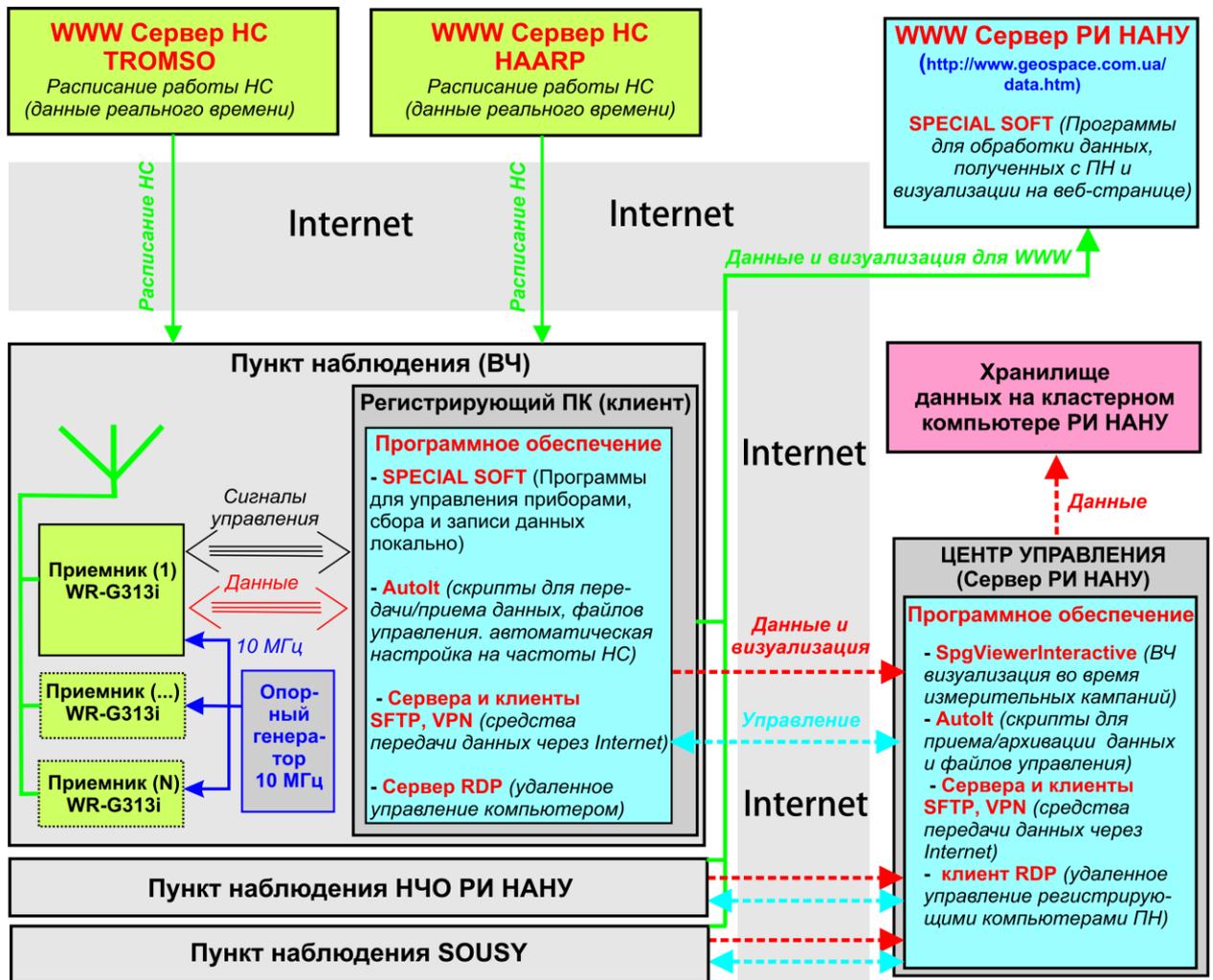


Рисунок 2.9 – Блок-схема, иллюстрирующая взаимодействие удаленных пунктов регистрации с центром управления, www сервером PI HANU и серверами нагревных станций HAARP и EISCAT

Передача данных на сервер ЦУП также автоматизирована. Специальное ПО постоянно синхронизирует текущие протоколы работы приемников и файлы визуализации, генерируемые на ПИК процедурой управления и сбора данных с архивами, которые размещены на сервере ЦУП. Таким образом, оператор сервера ЦУП может анализировать on-line информацию о работе

любого приемного пункта. Кроме того, на сервере ЦУП, который как уже отмечалось, является и веб-сервером, каждый час происходит стандартная обработка данных, в ходе которой рассчитываются суточные спектрограммы и временные зависимости амплитуд сигналов, а также создаются таблицы переключений режимов работы ПИК. Эта информация доступна в сети Интернет на веб-сайте РИ НАНУ. Кроме того, каждые сутки специальное ПО выполняет архивацию и передачу файлов “сырых” данных (волновых форм сигнала) в архив ЦУП. Такие записи в последующем используются для детальной обработки.

Схема функционирования сети автономных пунктов ВЧ регистрации обеспечивает их автоматическую работу, при которой функции оператора сведены к администрированию сервера ЦУП и генерации на нем файлов расписания работы для предстоящих измерений. Однако, при возникновении нештатных ситуаций на ПН, оператор имеет возможность перейти в режим удаленного управления регистрирующим компьютером любого ПИК, используя удаленный рабочий стол ОС Windows. В зависимости от конфигурации локальной сети ПИК, подключение по протоколу RDP осуществляется напрямую либо через VPN туннель, создаваемый между ЦУП и ПИК. Такой подход дает возможность, с одной стороны, оперативно устранять последствия возможных сбоев сценариев автоматической работы ПН, а, с другой, модифицировать и совершенствовать ПО сети пунктов ВЧ регистрации непосредственно с сервера ЦУП.

Рассматривая перспективы дальнейшего развития сети ПИК, следует отметить возможность добавления новых приемных пунктов, совершенствование аппаратного обеспечения приемных комплексов и увеличение числа используемых методик ионосферной диагностики. В РИ НАНУ разрабатывается новый вариант ПИК, позволяющий, кроме частотной и импульсной селекции, оценивать также углы прихода принимаемых сигналов – частотно-угловое зондирование ионосферы (ЧУЗИ) [190]. Такая возможность реализуется за счет применения метода доплеровской

интерферометрии [191] (в русскоязычной литературе его принято называть фазовой пеленгацией с доплеровской фильтрацией [181]). Углы прихода сигналов для каждой спектральной компоненты определяются по разности фаз сигналов, принятых тремя малоразмерными пространственно-разнесенными антеннами. Применение частотной, импульсной и угловой селекции сигналов позволит существенно расширить диагностические возможности рассмотренной сети приемных комплексов. Проведение с ее помощью измерений в северной Скандинавии может оказаться полезным дополнением к данным радара некогерентного рассеяния нового поколения, создаваемого в настоящее время в рамках перспективного проекта EISCAT 3D и ориентированного на восстановление характеристик объемных неоднородностей околоземной плазмы.

#### 2.4 Методика обработки и визуализации данных УНЧ-СНЧ

Спектральная и поляризационная методики были выбраны как основной способ обработки и визуализации данных, созданной сети магнитометров УНЧ-СНЧ диапазона (УАС, НЧО, SOUSY (Свалбард), ССО (Россия)). Эти методики внедрены в качестве базовых на всех обсерваториях, и используются для получения информации о состоянии шумановского и ионосферного альфвеновского резонаторов, а также источников их возбуждения. Такой подход применен для реализаций разной длительности от десятков секунд, часов, суток, месяцев, сезонов года до многолетних (одиннадцатилетних) периодов наблюдений.

Длительность стандартной одиночной записи составляет одни сутки. Во всех пунктах наблюдения регистрируются горизонтальные компоненты вариаций геомагнитного поля в направлениях географический “юг-север” -  $x$  и “запад-восток” -  $y$ . Суточные реализации разбиваются на 144 десятиминутные интервала, для каждого из которых вычисляются усредненные энергетические  $S_{xx}$ ,  $S_{yy}$ , и взаимные  $S_{xy}$  спектры

$$S_{ik}(f) = \frac{1}{N} \sum_{p=1}^N \tilde{H}_i^{(p)}(f) \tilde{H}_k^{(p)*}(f), \quad (2.1)$$

где  $i, k = x, y$ . Комплексные “мгновенные” спектры  $\tilde{H}_{i,k}^{(p)}(f)$  горизонтальных составляющих магнитного поля, во временных интервалах  $(p-1)T \leq t \leq pT$ ;  $p = 1, 2, \dots, N$ , определяются, как:

$$\tilde{H}_{i,k}^{(p)}(f) = \frac{1}{T} \int_{(p-1)T}^{pT} dt H_{i,k}(t) e^{-i2\pi ft} \quad (2.2)$$

Частота дискретизации спектров  $F_s$  определяется длиной единичной реализации  $T$  ( $F_s = 1/T$ ). Расчеты спектров проводятся в двух вариантах: первый  $F_s = 1$  Гц применяется для вычисления поляризационных параметров ШР (определяются параметры первых трех мод ШР), и второй  $F_s = 0.1$  Гц - для визуализации данных в виде суточных спектрограмм, вычисления вариаций частот максимумов ШР и расчета параметров ИАР. На УАС также осуществляется обработка данных с частотой дискретизации 0.01 Гц для мониторинга узкополосных излучения силовых сетей североамериканского континента (см., подраздел 6.2)

Типичная суточная спектрограмма сигналов показана на рис. 2.10, на котором верхняя панель соответствует сигналу в канале “юг-север”, нижняя - “запад-восток”. По горизонтальной оси отложено время - УТ, по вертикальной - частота. Цветовая гамма отображает спектральную плотность шумов в логарифмическом масштабе. На приведенном рисунке четко для обеих поляризаций прослеживаются первые пять мод ШР, а также несколько резонансных линий ИАР особенно четко проявляющихся в канале “юг-север”. Такой способ отображения является достаточно информативным и позволяет качественно оценить характерные особенности поведения УНЧ-СНЧ шумов,

идентифицировать помеховую обстановку и возможные аппаратные сбои. Такое наглядное представление для двух обсерваторий НЧО РИ НАНУ и SOUSY ежедневно визуализуется на веб-станции отдела Радиофизики геокосмоса РИ НАНУ <http://geospace.com.ua/data.html>.

Для расчета поляризационных параметров вычисляются вспомогательные характеристики - параметры Стокса:

$$I(f) \equiv S_{xx}(f) + S_{yy}(f), \quad Q(f) \equiv S_{xx}(f) - S_{yy}(f), \quad (2.3)$$

$$U(f) \equiv 2\operatorname{Re} S_{xy}(f), \quad V(f) \equiv 2\operatorname{Im} S_{xy}(f).$$

Затем с использованием известных соотношений [192] рассчитываются поляризационные параметры поля:

$$r = \frac{V}{\sqrt{Q^2 + U^2} + \sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}, \quad (2.4)$$

$$\left. \begin{array}{l} \sin(2\Psi) \\ \cos(2\Psi) \end{array} \right\} = \frac{1}{\sqrt{Q^2 + U^2}} \left\{ \begin{array}{l} U \\ Q \end{array} \right. \quad (2.5)$$

$$I_p = \sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}, \quad (2.6)$$

$$P = I_p / I. \quad (2.7)$$

Где:  $r$  - коэффициент эллиптичности, значение 0 соответствует линейной поляризации, 1 – круговой;  $\Psi$  – позиционный угол эллипса поляризации - ориентация большой полуоси эллипса, отсчитывается от направления на север

по часовой стрелке;  $I_p$  – интенсивность поляризованной компоненты излучения;  $P$  – степень поляризации.

Изучая изменения поляризационных параметров в течение суток, можно делать выводы о динамике активности источников возбуждения ШР. Так, например, нормаль к позиционному углу указывает направление на источник, полная интенсивность и интенсивность поляризованной компоненты характеризуют уровни мировой грозовой активности

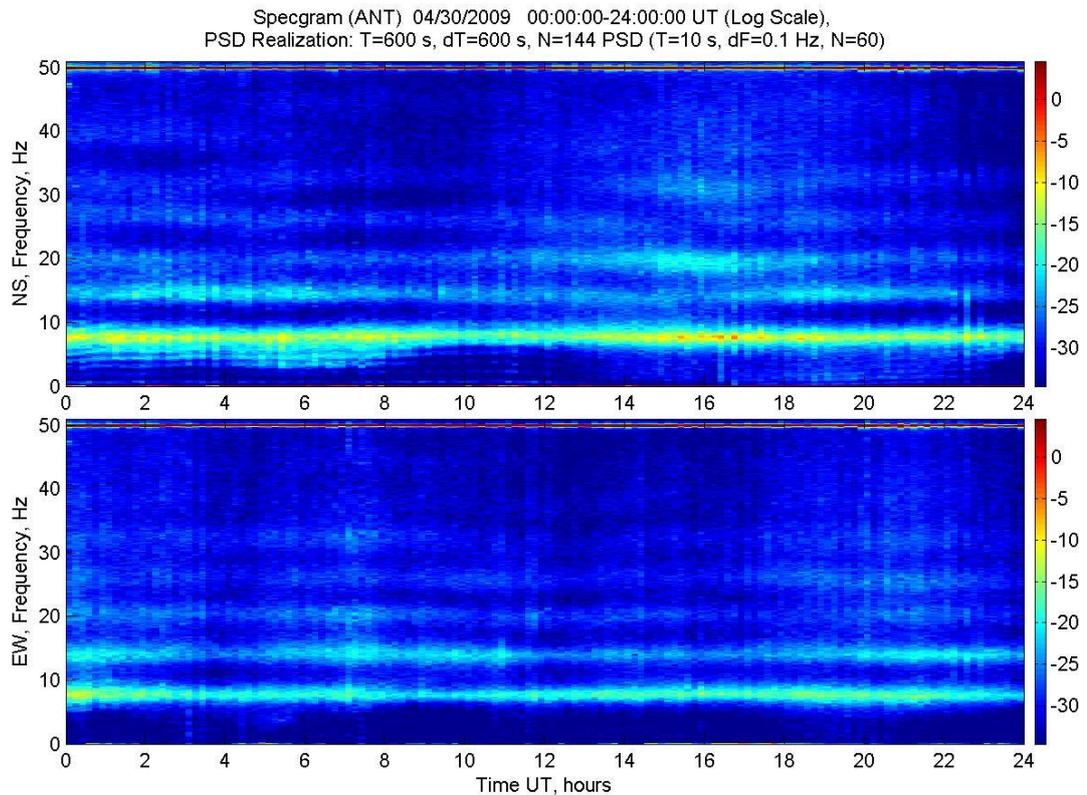


Рисунок 2.10 – Типичная суточная спектрограмма УНЧ-СНЧ сигналов

Для изучения более общих закономерностей поведения мировых грозowych центров, их сезонных и более продолжительных вариаций используются характеристики резонансных полей усредненные на суточных интервалах. Оптимальным периодом усреднения можно считать интервалы продолжительностью 1 месяц. Такого усреднения оказывается достаточно для выявления характерных сезонных, годовых и многолетних закономерностей.

Отдельно следует рассмотреть процедуру вычислений средних значений поляризионных параметров. На первом этапе усредняются квадратичные по полю величины – энергетические, взаимные спектры и параметры Стокса. На втором этапе рассчитываются средние поляризионные характеристики резонансных полей.

При вычислении средних значений целесообразно исключить из рассмотрения фрагменты регистраций с мощными помехами. Магнитные антенны имеют такую высокую чувствительность, что даже приближение человека на расстояние в несколько метров вызывает значительное искажение спектральных характеристик. Учитывая большой объем данных, которые получены за многие годы наблюдений, необходимо было разработать алгоритм, обеспечивающий автоматическую “выбраковку” сильно зашумленных реализаций. Для примера на рис 2.11 изображены 144 десятиминутные спектры, полученные 29-го июля 2008 года на НЧО. Все спектры можно условно разделить на две группы. Первая группа (обозначена синим цветом) имеет выраженный резонансный характер. Вторая (красная) отличается монотонным шумовым характером с повышенной спектральной плотностью во всей полосе анализа. Такое поведение спектров соответствует наличию типичных помех от близкого грозового фронта.

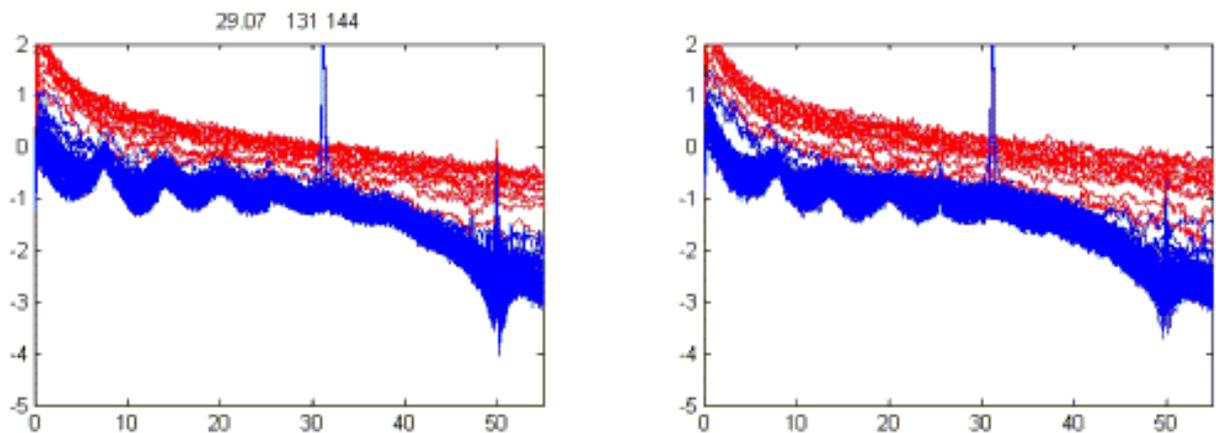


Рисунок 2.11 – Десятиминутные спектры от 29 июля 2008 г., канал “юг-север” слева, “запад-восток” - справа

Самым простым, но достаточно эффективным является способ отбраковки по критерию превышения порогового уровня спектральной плотности. Все спектры, для которых значение мощности в выбранной частотной полосе превышает заданный порог, считаются испорченными и исключаются из последующих расчетов. Уровень порога был подобран экспериментальным путем, в результате анализа усреднений с различными порогами отбраковки. На рис. 2.12 показаны усредненные суточные спектрограммы сигналов НЧО за июль 2008 года, без отбраковки - слева, и после процедуры отбраковки - справа. Разница, особенно в районе первого мода ШР, вполне очевидна. Рассмотренный выше алгоритм применяется для отбраковки помех, во всех пунктах наблюдения.

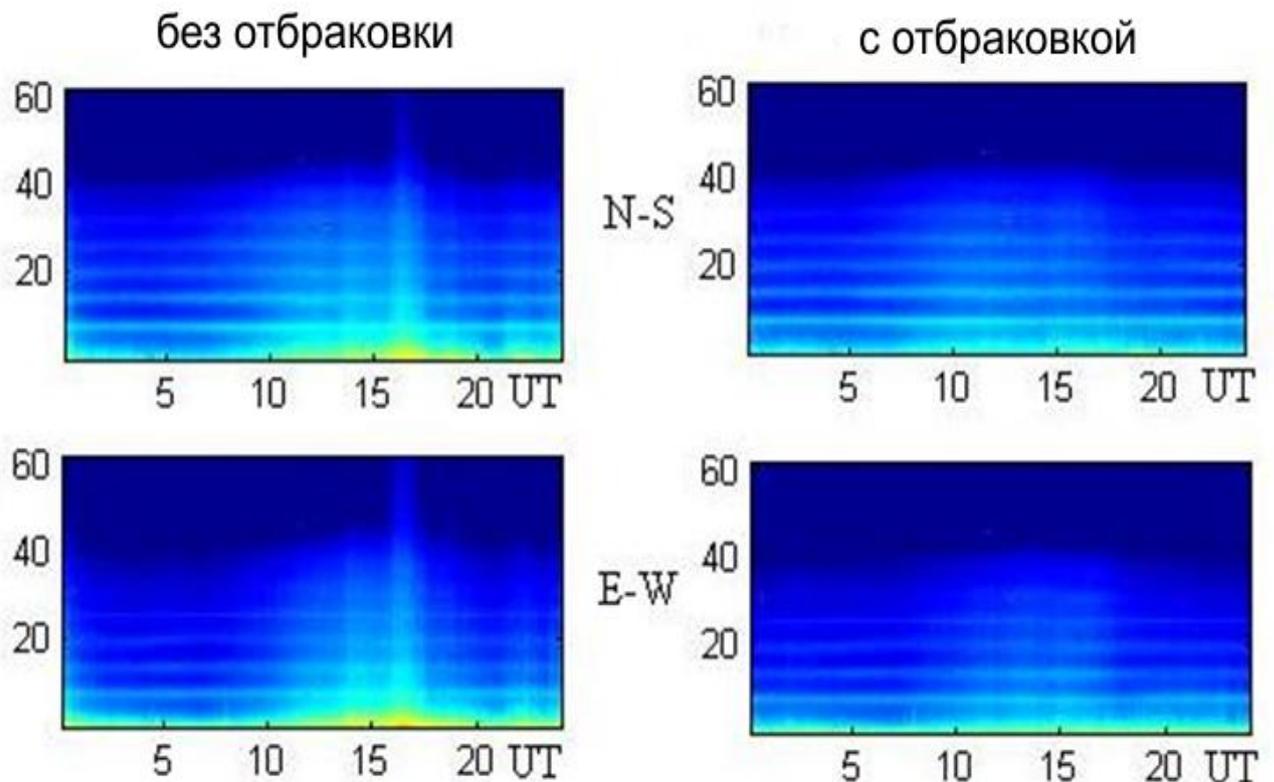


Рисунок 2.12 – Спектрограммы УНЧ-СНЧ шумов на НЧО для июля 2008 без выбраковки помех (слева) и с их исключением (справа).

### *Обработка УНЧ шумов.*

Для обработки данных ИАР использованы массивы спектров и поляризационных параметров, рассчитанные с частотным разрешением 0.1 Гц. Оператор с помощью специально разработанной компьютерной программы выделяет линии ИАР, которые автоматически оцифровываются (см., рис 2.13). При этом отдельно определяется частотный ход резонансных максимумов в каналах “юг-север” (красные кривые) и “запад-восток” (черные кривые). При определении средней разности частот между линиями ИАР –  $dF$  данные обоих каналов усредняются. Программа также автоматически определяет факт обнаружения ионосферных альфвеновских резонансов для каждого 10-ти минутного интервала регистрации. ИАР считается обнаруженным, если для данного интервала времени зафиксировано 3 или более резонансные линии. Кроме того, для пунктов наблюдения, где установлены ионосферные станции (УАС, SOUSY, ССО) оценивается величина критической частоты слоя F2 ионосферы –  $f_0F2$ . На выходе стандартной процедуры обработки для каждого 10-минутного интервала определяются: факт наличия ИАР, частотный ход резонансных линий в каналах “юг-север” и “запад-восток”, средняя разность резонансных частот -  $dF$ , критическая частота ионосферного слоя F2 -  $f_0F2$ .

Таким образом, для каждого пункта наблюдения формируется база данных спектральных и поляризационных параметров ШР и ИАР, которые хранятся на файл-сервере отдела радиофизики геокосмоса РИ НАНУ. Эти данные использовались для получения результатов, описанных в последующих разделах. Данные визуализации ШР и ИАР доступны в сети интернет по ссылке: <http://geospace.com.ua/data.html>

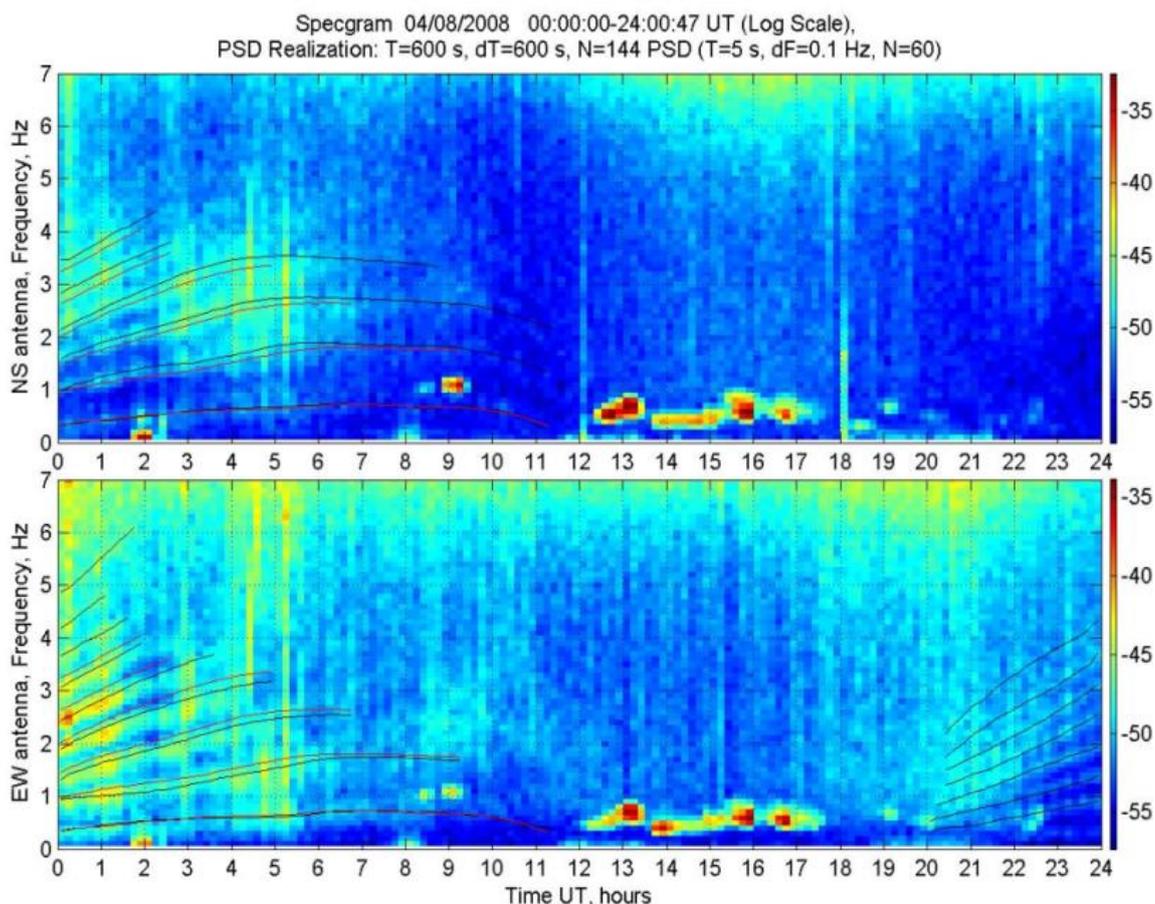


Рисунок 2.13 – Спектрограммы с выделенными линиями ИАР для 8 апреля 2008 г.

## Выводы Раздела 2

В разделе 2 представлены оригинальные измерительные комплексы, а также методики регистрации и обработки данных, используемые для непрерывного многопозиционного мониторинга характеристик УНЧ - СНЧ шумов и ВЧ сигналов. Большинство рассмотренных систем, методик измерений, регистраций и обработки данных были инсталлированы и эксплуатируются при непосредственном участии автора.

В разделе обоснованы преимущества высокоширотных областей и, в частности, Антарктического полуострова, как наиболее благоприятных регионов для постановки задач глобальной диагностики ионосферы и мировой грозовой активности. Рассмотрены структуры измерительных комплексов, созданных с участием автора. Представлены их технические характеристики,

сформулированы принципы мониторинговых режимов эксплуатации, а также очерчен круг задач, решаемых на электромагнитных обсерваториях РИ НАНУ в Антарктиде, Арктике и в Украине. Разработаны оригинальные системы автоматического сбора, Интернет трансляции, обработки и визуализации данных обсерватории НЧО РИ НАНУ, SOUSY и многопозиционной сети ВЧ приемников. Предложены оригинальные методики спектральной и поляризационной обработки данных УНЧ-СНЧ наблюдений, предназначенные для исследования свойств ШР и ИАР.

В целом комплекс программно–методических разработок автора позволил создать в Украине, Антарктиде, Арктике и в Сибири Интернет управляемую сеть приемных систем УНЧ, СНЧ и ВЧ диапазонов для глобальной диагностики ионосферы и мировой грозовой активности. Как будет показано в следующих разделах диссертации, с помощью такой сети удалось впервые исследовать многие электромагнитные низкочастотные процессы в околоземном пространстве.

## РАЗДЕЛ 3

## ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ШУМАНОВСКИХ РЕЗОНАНСОВ

В данном разделе исследованы свойства естественных СНЧ шумов в диапазоне частот шумановского резонанса (ШР). Как уже отмечалось ранее, шумановская резонансная система является глобальной, и электромагнитные поля в ней формируются мировой грозовой активностью, локализованной преимущественно в тропических регионах нашей планеты [75, 76]. По различным оценкам на земном шаре ежесекундно происходит от 40 [107] до 100 [75] молниевых разрядов, возбуждающих в сферической полости между поверхностью Земли и нижней ионосферой низкочастотные электромагнитные волны, которые распространяются с малым затуханием менее чем в 1 дБ/Мм [193]. Из-за высокой проводимости верхней и нижней границ такой сферической полости распространяющимися являются волны TEM поляризации, имеющие вертикальную электрическую и две горизонтальные магнитные компоненты. За счет низкого затухания электромагнитных волн, длина которых соизмерима с окружностью Земли, в такой полости формируется весьма добротная резонансная структура, названная в честь ее открывателя (Г. Шумана) Шумановским резонатором. Собственные частоты ШР для первых пяти резонансных мод составляют примерно 8, 14, 20, 26 и 32 Гц [75, 76]. Поскольку интенсивность мировых гроз является индикатором изменения температуры в тропическом регионе [129, 194] мониторинг ШР может стать эффективным инструментом отслеживания глобальных климатических изменений, что является сегодня актуальной проблемой для земной цивилизации. Кроме того, измерения характеристик резонансных колебаний позволяют контролировать глобальное состояние нижней ионосферы на высотах 60-80 км [195]. Следует отметить, что эта область ионосферы на сегодня по-прежнему остается наименее изученной из-за ограниченных возможностей других диагностических методов.

Чувствительность современных датчиков измерений электрических и магнитных полей СНЧ диапазона на поверхности Земли является достаточной для уверенной регистрации шумановских резонансов. Основным фактором, ограничивающим возможность мониторинга ШР, являются помехи природного и техногенного происхождения. К первым из них относятся широкополосное электромагнитное излучение “ближних” (до тысячи километров) молниевых разрядов. Ближние грозовые разряды существенно затрудняют регистрацию ШР в весенний, летний и осенний периоды в средних и низких широтах. В высоких широтах основной активной природной помехой в нижней части спектра ШР являются мощные магнитные бури. В промышленно развитых регионах существенной проблемой наблюдения ШР являются широкополосные и импульсные помехи от промышленных источников (систем производства, преобразования и транспортировки электроэнергии, излучения различных передающих устройств, электротранспорта и т.п.).

Поэтому для стабильной регистрации сигналов ШР очень важен оптимальный выбор места расположения шумановской обсерватории. Поскольку Антарктида характеризуется минимальным уровнем электромагнитных помех любых типов на Украинской антарктической станции (УАС) “Академик Вернадский” при участии автора был организован приемный пункт непрерывного мониторинга вариаций магнитных компонент полей ШР. На настоящий момент база данных наблюдений, полученных на УАС, превышает длительность полного 11-ти летнего цикла солнечной активности и является самым продолжительным непрерывным массивом регистраций такого типа, полученным в Антарктике. Основные результаты данного раздела базируются на основе анализа этого оригинального экспериментального материала.

В первом подразделе обсуждаются и интерпретируются суточно-сезонные зависимости интенсивности и пиковых частот ШР. Для их объяснения использованы изотропная модель одного точечного источника

описанная в монографии [76]. В подразделе 2 введена модель трех экваториальных источников в гиротропной полости Земля-ионосфера, разработанная автором статьи [117]. Применение этой модели позволило объяснить некоторые аномальные особенности вариаций поляризационных характеристик ШР полученные в эксперименте, что подтверждает необходимость учета гиротропии резонансной полости. В подразделе 3 анализируются вариаций интенсивностей и пиковых частот ШР, а также по данным наблюдений восстанавливаются времена кульминации активностей трех мировых грозных центров. Результаты наблюдений ШР сопоставляются с синхронными спутниковыми данными: оптическими регистрациями молниевых разрядов, индексами солнечной и авроральной активности, вариациями полного электронного содержания и наземными измерениями параметров ионосферы. В подразделе 4 рассмотрены возможные механизмы долгосрочных вариаций пиковых частот и интенсивностей, а также разработаны феноменологические модели, объясняющие обнаруженные в эксперименте изменения параметров ШР. В пятом подразделе изложена методика локации сверхмощных молниевых разрядов по данным магнитных наблюдений в СНЧ диапазоне. Для восстановления положений источников используются поляризационные характеристики и времена прихода СНЧ всплесков, измеренные в пространственно-разнесенных пунктах. В расчетах местоположения источников были учтены поправки к пеленгам, обусловленные гиротропией резонатора Земля-ионосфера. Основной массив данных был накоплен на Украинской антарктической станции “Академик Вернадский”. В работе также использованы регистрации, полученные на японской станции “Сиова” в Антарктике и на обсерватории Онагава (Япония), любезно предоставленные автору японскими коллегами. Проведено сопоставление полученных пространственных и пространственно-временных распределений сверхмощных молниевых разрядов с данными спутникового мониторинга молний в оптическом диапазоне.

Основные оригинальные результаты этого раздела опубликованы в статьях [1, 2, 4, 97, 196, 197], а также в материалах конференций [35, 36, 37, 97, 198, 199, 200, 201, 202, 203].

### 3.1 Сезонно-суточные зависимости интенсивности и пиковой частоты ШР

Для исследования сезонно-суточных характеристик ШР использовались регистрации горизонтальных магнитных компонент поля в направлениях географический юг-север (ЮС -  $x$ ) и запад-восток (ЗВ -  $y$ ), полученные в Антарктиде на станции “Академик Вернадский”. Методика спектральной и поляризационной обработки данных детально изложена в разделе 2. Информационными характеристиками ШР, являются усредненные для 10-ти минутных интервалов энергетические  $S_{xx}$ ,  $S_{yy}$  и взаимные  $S_{xy}$  спектры сигналов (144 спектра для каждых суток). Эти величины используются для расчета, пиковых частот  $f_{xx}$ ,  $f_{yy}$ , параметров Стокса ( $I = S_{xx} + S_{yy}$ ,  $Q = S_{xx} - S_{yy}$ ,  $U = 2\text{Re}S_{xy}$ ,  $V = 2\text{Im}S_{xy}$ ) [192], а также поляризационных характеристик (поляризованной части интенсивности -  $I_p$ , коэффициента эллиптичности -  $r$ , позиционного угла -  $\Psi$ , и степени поляризации -  $P$ ) для первых трех мод ШР [2, 4, 97]. Пиковые частоты ( $f_{xx}(t_i)$  и  $f_{yy}(t_i)$ ) для каждого 10-ти минутного интервала  $t_i$ ,  $i = 1 \dots 144$  рассчитываются методом “моментов” в соответствии с определением:

$$f_{xx,yy}(t_i) = \frac{\int_{f_0-\Delta f}^{f_0+\Delta f} f \cdot S_{xx,yy}(f, t_i) df}{\int_{f_0-\Delta f}^{f_0+\Delta f} S_{xx,yy}(f, t_i) df}, \quad (3.1)$$

где:  $S_{xx}(f, t_i)$  и  $S_{yy}(f, t_i)$  спектры мощности, рассчитываемыми с частотным разрешением 0.1 Гц (отметим, что для первого мода ШР  $f_0 = 7,8$  Гц, ширина

полосы интегрирования  $2\Delta f = 3$  Гц). Конечным результатом расчетов являлись ряды всех перечисленных выше параметров усредненные для каждого месяца.

Анализ сезонных и суточных зависимостей параметров ШР выполнен в [2, 4, 35, 97, 198] путем сопоставления наблюдаемых в эксперименте параметров с модельными. Для проведения таких вычисления существует большое число алгоритмов расчета и моделей источников, например описанных в [76, 119]. Простейшая модель мирового грозового центра - это точечный либо распределенный источник, который движется вслед за Солнцем вдоль линии экватора, кульминация активности соответствует 17-18 часам местного времени [108, 109, 110, 114, 116, 120]. Несмотря на кажущуюся простоту такого модельного представления, приближение одного источника оказывается весьма продуктивным для объяснения многих экспериментально наблюдаемых особенностей поведения полей ШР. В частности, она позволяет разделить эффекты движения источника от изменений в среде распространения. Более сложные модели предполагают наличие трех независимых источников грозовой активности, которые соответствуют трем экваториальным грозовым центрам [2, 111, 112, 118, 204]. Следует отметить, что более реалистичные эмпирические распределения грозовой активности достаточно сложны, как правило, они используются для интерпретации данных нескольких пространственно-разнесенных обсерваторий [203, 205].

Для анализа сезонных зависимостей поведения параметров ШР, которые описаны в работе [4], использовалась модель одного точечного источника [76]. На первом этапе рассчитывались спектры мощности горизонтального магнитного поля, созданного источником. Затем подбирались такие параметры источника и характеристики среды (нижней ионосферы), которые обеспечивают сезонные изменения спектральных характеристик (интенсивности и пиковых частот) подобных наблюдаемым. При выполнении расчетов предполагалось, что полость Земля-ионосфера является однородной по угловым координатам, а ионосферная плазма изотропна. Высотный профиль проводимости нижней ионосфере задавался моделью “колена”,

предложенной в работе [206]. Модель специально разрабатывалась для согласования расчетных пиковых частот и добротностей с данными наблюдений. В соответствии с моделью, вертикальный профиль проводимости в атмосфере на определенном уровне имеет перегиб (“колена”). Этот уровень называется высотой “колена” и обозначается как  $h_{KNEE}$ . Выше уровня колена, проводимость растет быстрее, чем ниже его.

Комплексная постоянная распространения радиоволн вычислялась по формуле:

$$\nu(f) = -1/2 + \sqrt{1/4 + (ka h_M / h_E)^2} . \quad (3.2)$$

Здесь:  $a$  - радиус Земли,  $k = \omega/c$  волновое число свободного пространства,  $\omega$  круговая частота;  $h_E$  и  $h_M$  соответствуют электрической и магнитной характеристическим высотам. В стандартной модели колена, описанной в [206] характеристические высоты комплексны и находятся из:

$$h_E(f) = h_{KNEE} + \zeta_a \ln(f/f_{KNEE}) + \frac{1}{2}(\zeta_a - \zeta_b) \ln[1 + (f/f_{KNEE})^2] + i[\pi\zeta_a/2 - (\zeta_a - \zeta_b) \arctg(f_{KNEE}/f)] , \quad (3.3)$$

$$h_M(f) = h_m^* - \zeta_m \ln(f/f_m^*) - i\zeta_m(f)\pi/2 . \quad (3.4)$$

В уравнении (3.3) высота колена определялась как  $h_{KNEE} = 55$  км,  $f_{KNEE} = 10$  Гц – опорная частота колена. Высотные масштабы профиля проводимости задавались как  $\zeta_a = 2.9$  км выше колена, и  $\zeta_b = 8,3$  км ниже уровня колена. В уравнении (3.4) использовались следующие параметры  $f_m^* = 8$  Гц и  $h_m^* = 96.5$  км. Высотный масштаб профиля вблизи магнитной высоты меняется с частотой как:  $\zeta_m = \zeta_m^* + b_m (1/f - 1/f_m^*)$ , где  $b_m = 20$  км, а  $\zeta_m^* = 4$  км. На нижней, “электрической высоте” ток проводимости равен току

смещения для данной частоты  $f$  [106]. Это означает, что здесь выполняются следующие условия:

$$\sigma(h_{KNEE}) = \sigma_{KNEE} = 2\pi f_{KNEE} \varepsilon_0 = 20\pi \varepsilon_0 \quad (3.5)$$

где  $\varepsilon_0 = 8.859 \cdot 10^{-12}$  Ф/м это диэлектрическая проницаемость вакуума. Верхняя, “магнитная характеристическая высота”  $h_m$  соответствует уровню диффузии электромагнитных полей в ионосферу. Магнитная высота находилась из [29]. Здесь справедливо следующее соотношение:

$$\sigma_M(h_M) = \frac{1}{8\mu_0\pi f_m^* \zeta_m^2} \quad (3.6)$$

где,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м - это магнитная проницаемость вакуума;  $\zeta_m$  характерный высотный масштаб экспоненциального профиля в окрестности высоты  $h_m$  [76]. Формула (3.6) физически означает, что высотный масштаб профиля равен длине электромагнитной волны в среде. Следует отметить, что постоянная распространения СНЧ волны зависит от многих факторов, главным из которых является высота колена.

Дальнейшие расчеты выполнялись в соответствии с моделью, разработанной профессором А.П. Николаенко. Описание модели и алгоритмы расчетов изложены в работах [2, 77, 106, 206]. Для набора дистанций источник - наблюдатель вычислялись спектры мощности электрических и магнитных полей, созданных молниевым разрядом - вертикальным электрическим диполем. Амплитуда токового момента источника задавалась одинаковой на всех частотах. Затем в координатах частота - дистанция строились двумерные профили интенсивности горизонтальной составляющей магнитного поля. Результаты такого расчета приведены на рис 3.1.а. По оси абсцисс отложена частота в окрестности первого мода ШР, а по оси ординат расстояние источник-наблюдатель в Мм (1 Мм = 1000 км). Интенсивность магнитного

поля показана степень почернение. Видно, что пиковая частота первого мода  $f_1$  и его интенсивность  $I_1$  меняются в зависимости от расстояния до источника.

Эти изменения представлены на рис. 3.1.б в виде кривых. Вдоль горизонтальной оси на рис. 3.1.б отложена дистанция  $D$  источник - наблюдатель в Мм. Для первого мода ШР пиковая частота показана на левой оси ординат, а нормализованная интенсивность магнитного поля отложена на правой оси в процентах. На рис. 3.1.б линия 1 (с квадратами) показывает аппроксимирующую функцию  $I_1(D) = \sin(\pi D/20) \cdot 100\%$ .

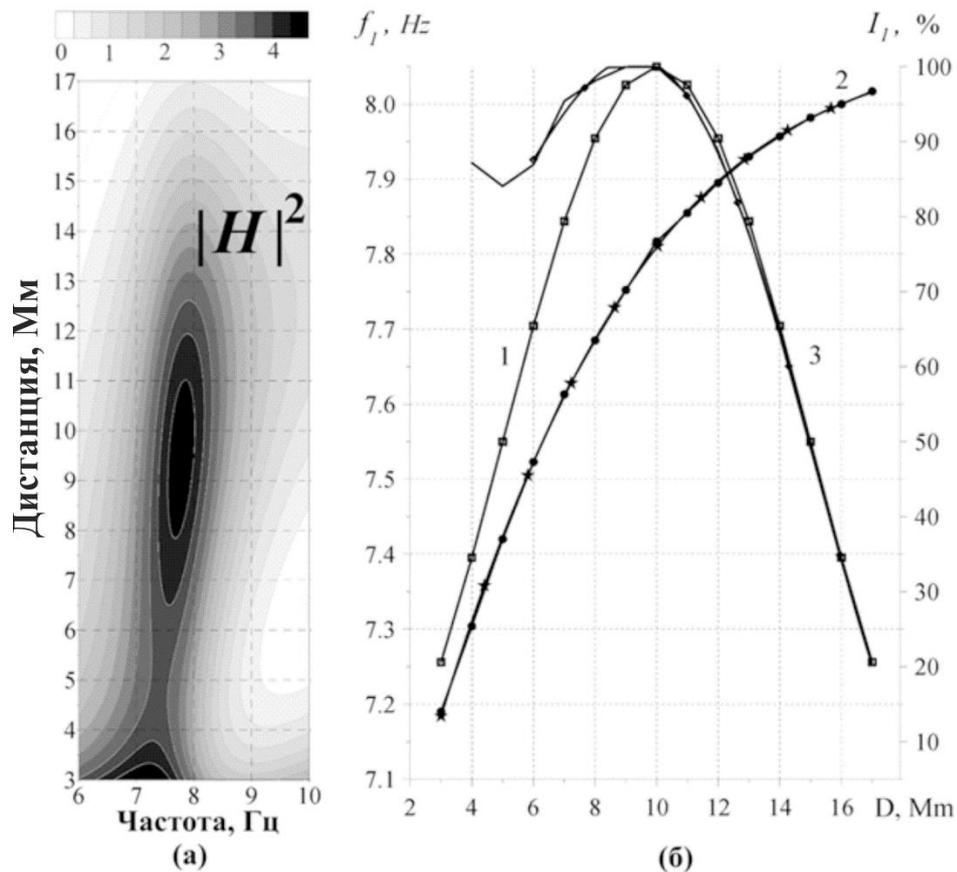


Рисунок 3.1 – (а) интенсивность резонансных сигналов в зависимости от частоты и дистанции; (б) дистанционные зависимости частоты и интенсивности первого мода ШР: кривая 1 - зависимость  $I_1(D) = \sin(\pi D/20) \cdot 100\%$ ; кривая 2 - пиковая частота; кривая 3 – интенсивность.

Сглаженные кривые 2 (с точками) и 3 (без маркеров) соответствуют расчетным изменениям пиковой частоты  $f_1(D)$  и напряженности магнитного поля  $I_1(D)$  первого мода ШР от дистанции. Также на рисунке показаны линии полиномиальной аппроксимации. Звездочками выделена кривая, которая аппроксимирует зависимость пиковой частоты от дистанции  $f_1(D)$  полиномом третьей степени. Ромбами отмечено представление зависимости интенсивности от дистанции  $I_1(D)$  в виде полинома четвертой степени. Аппроксимирующие кривые были вписаны по методике наименьших квадратов. Ниже приведены формулы для вычисления пиковой частоты (в герцах) и интенсивности (в %).

$$f_1(D) = a_0 + a_1 \cdot D + a_2 \cdot D^2 + a_3 \cdot D^3, \quad (3.7)$$

$$I_1(D) = b_0 + b_1 \cdot D + b_2 \cdot D^2 + b_3 \cdot D^3 + b_4 \cdot D^4. \quad (3.8)$$

Здесь,  $D$  это расстояние источник-наблюдатель в Мм,  $a_0 = 6,71336$ ,  $a_1 = 0,181732$ ,  $a_2 = -0,008612582$ ,  $a_3 = 0,0001477123$ , и  $b_0 = 115,548$ ,  $b_1 = -30,40512$ ,  $b_2 = 7,1121217$ ,  $b_3 = -0,56481212$ ,  $b_4 = 0,0133658$ . Далее формулы (3.7-3.8) использованы для интерпретации сезонных изменений ШР сигналов.

Исследование дрейфов источников проведено с использованием экспериментально оцененных характерных сезонных вариаций пиковых частот и интенсивностей резонансных сигналов. Как было показано в [197] кроме сезонных вариаций указанных параметров имеют место долгосрочные тренды в течение 11-летнего цикла солнечной активности, которые рассмотрены в следующем подразделе. Поэтому, для оценки сезонных вариаций целесообразно выбрать годовой интервал наблюдений для среднего уровня солнечной активности в 11-ти летнем цикле, равноудаленный по времени от максимумов (2002, 2013) и от минимума (2009 г.). Для анализа были использованы данные 2006 года. С помощью уравнения (3.7) значение

пиковых частот первого моды ШР 7,7; 7,8; 7,9; и 8,0 Гц были сопоставлены с расстояниями до источника 8,3; 12,2; 12,8; и 16 Мм соответственно. Результаты сравнения для наглядности приведены на рис. 3.2.

По оси абсцисс отложены месяца 2006 года. По оси ординат показаны значения наблюдаемых в эксперименте пиковых частот в Гц (левая ось) и соответствующие им расстояния в Мм (правая ось). Кривая 1 соответствует меридиональной компоненте поля юг-север  $H_{xx}$ , кривая 2 – долготной компоненте запад-восток  $H_{yy}$ .

Вариации частоты в модели точечного источника возникают из-за наличия сезонного дрейфа грозового центра. Сезонные дрейф на север четко прослеживается в летние для северного полушария месяцы, когда расстояние  $D$  от наблюдателя в Антарктике до центров мировых гроз увеличивается для обеих компонент магнитного поля. Расстояние оценивается как 14 Мм для компоненты поля юг-север, чувствительной к грозам на африканском континенте. Годовой дрейф этого источника достигает 2,4 Мм (более  $20^\circ$ ), что находится в хорошей соответствии с данными климатологии и независимых измерений сигналов ШР [110, 111, 113, 207]. Вариации для компоненты запад-восток, которой соответствуют американским и азиатским грозам, менее выражены и составляют около 1,5 Мм (или  $13^\circ$ ).

Следует отметить, что обе оценки расстояний превышают 10 Мм. Этот результат является неожиданным, так как такие большие расстояния не всегда соответствуют климатологическим данным. Возможно несколько причин этого несоответствия: (I) Различные способы оценки пиковой частоты. Значения частот могут отличаться от полученных путем вписывания резонансной кривой в наблюдаемые спектры. (II) Отклонения могут возникнуть из-за упрощенности ионосферной модели, которая, по-видимому, занижает величину пиковой частоты. (III). Применение одноточечной модели источника не учитывает реально существующее пространственное распределение грозовых источников.

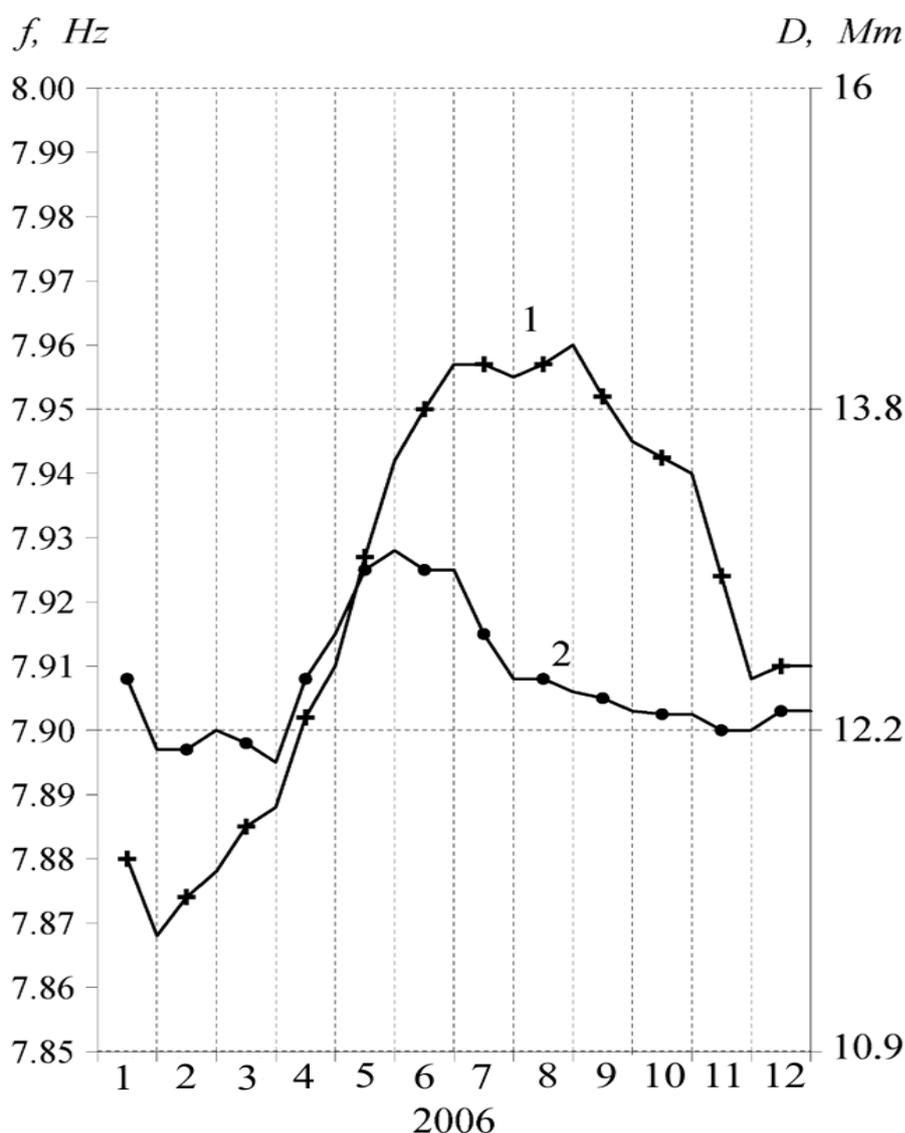


Рис. 3.2 – Сезонная зависимость пиковых частот первого максимума ШР в компонентах поля юг-север  $H_{xx}$  (кривая 1) и запад-восток  $H_{yy}$  (кривая 2) по данным измерений на УАС в 2006 году

В то же время вариации расстояний до источников, которые отображают их сезонный дрейф, являются вполне реалистичными. Наблюдения на УАС демонстрируют значительный дрейф глобальных гроз на север в период с июня по август. Эти результаты согласуются с климатологическими характеристиками, данными оптических спутниковых наблюдений за молниевыми вспышками и с результатами регистраций ШР в северном

полушарии [107, 111, 114, 116, 121, 194, 197, 208, 209]. Несмотря на применение для интерпретации такой довольно простой модели, можно отметить, как качественное, так и количественное, соответствие результатам наблюдений. Такое соответствие модельных расчетов с данными измерений, по-видимому, объясняется попаданием наблюдаемых пиковых частот в интервал расстояний до источника, где поведение функции  $f_1(D)$  близко к линейному. Стоит отметить, что подобные сезонные зависимости получены и при использовании модели трех источников, рассмотренной далее в этом подразделе, а также с результатами подобных модельных представлений использованных в работах [111, 112, 204]. В частности, в статье [112] использована методика, которая разделяет вариации в местном и мировом времени разработанная в [115].

Рисунок 3.3 демонстрирует сезонные вариации интенсивности первых мод ШР в течение 2006 года. По горизонтальной оси отложены месяцы 2006 года, а по вертикальной - показана интенсивность горизонтальной составляющей магнитного поля в условных единицах. Интенсивность резонансных сигналов (кривая 1) имеет максимум в летние месяцы (для северного полушария) и минимум зимой.

Модельная интенсивность (кривая 2) была получена из уравнения (3.8) с учетом расстояния до источника, которая определялась по величинам наблюдаемых пиковых частот с помощью формулы (3.7). Отметим, что кривая ведет себя парадоксальным образом, демонстрируя минимум в летние месяцы (июнь-август). Это несоответствие вполне естественно, поскольку предполагалось, что грозовой источник имеет постоянную интенсивность. Противоречие снимается путем введения источника переменной интенсивности, рост которой в летние месяцы, компенсирует уменьшение интенсивности, связанное с дрейфом источника с юга на север. Кривая 3 изображает величину мировой грозовой активности, которая обеспечивает наблюдаемые на УАС изменения интенсивности ШР, учитывая эффект сезонного дрейфа источника, определенный из изменения пиковых частот.

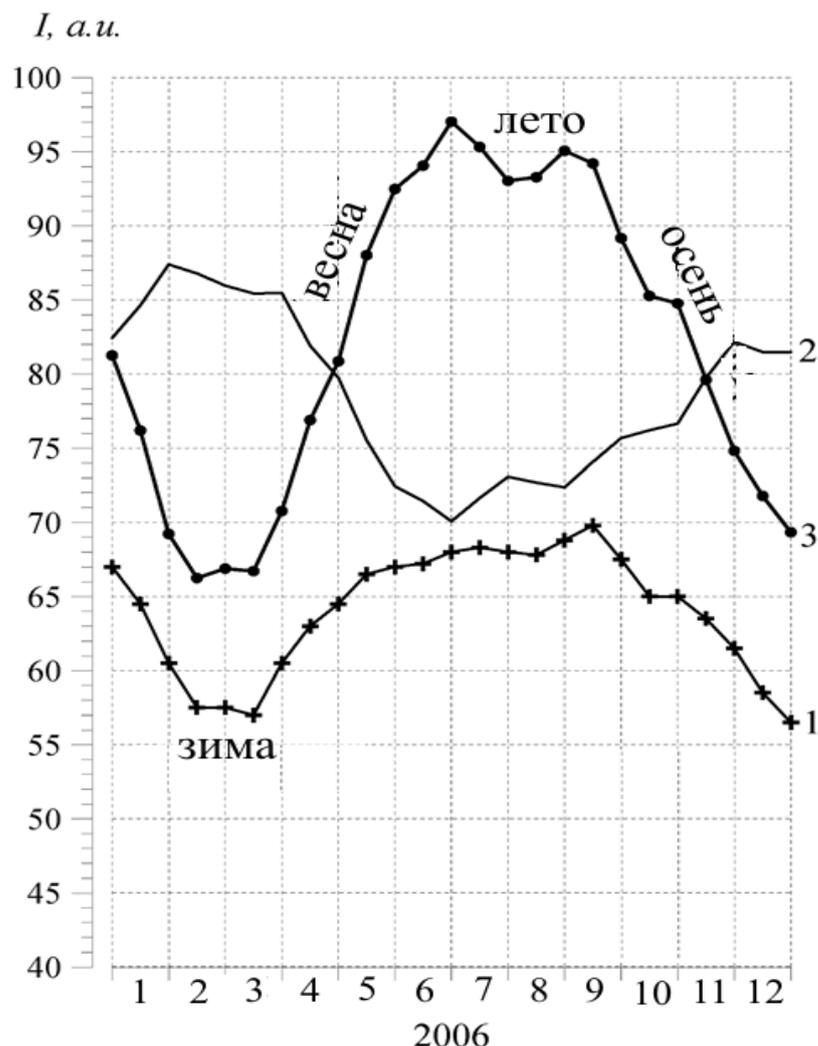


Рисунок 3.3 – Сезонные изменения полной интенсивности первого моды ШР: кривая 1 - данные наблюдений; кривая 2 - расчетные вариации по данным об изменении дистанции; кривая 3 - интенсивность глобальной грозовой активности оцененная по данным УАС)

Рис. 3.3 может быть использован для оценки продолжительности “электромагнитных сезонов” из записей сигналов ШР. “Электромагнитное лето” продолжается с июня по сентябрь. В этот период, расстояние источник-наблюдатель достигает максимума, а уровень глобальной грозовой активности является высоким. “Электромагнитное зима” длится с февраля по март. В это время расстояние источник-наблюдатель и уровень грозовой активности

минимальны. Также рис. 3.3 указаны интервалы, соответствующие “весне” и “осени”.

Из рисунка видно, что интенсивность мировых гроз, изменяется в течение года в 1,5 раза. Это хорошо согласуется с данными, полученными на других ШР обсерваториях [111, 120, 121, 194, 205, 208, 209]. Продолжительность “электромагнитного лета” составляет около 120 дней, в то время как “зима” длится около 60 дней. Весенний период примерно в два раза меньше, чем осенью. Неодинаковая продолжительность сезонов в данных ШР была отмечена в работах [111, 125, 205]. Все эти исследования были основаны на наблюдениях в северном полушарии и показали несколько иную продолжительность сезонов. Наблюдения вертикальной компоненты электрического поля в среднеширотной Европе показали большую продолжительность “электромагнитной зимы” (дрейф гроз на юг) по сравнению с “летом” (дрейф гроз на север) [111, 125]. Однако антарктические записи, в том числе и данные других авторов, представленные в работе [125], демонстрируют длительное “лето” и более короткую “зиму”. Для объяснения этого экспериментального факта необходимы дальнейшие сравнения с данными северного полушария. В любом случае нужно отметить, что антарктические данные качественно хорошо согласуются с оптическими наблюдениями из космоса со спутников OTD и LIS [107].

### 3.2 Суточно - сезонные зависимости поляризационных характеристик ШР

Суточно - сезонные изменения поляризационных характеристик резонатора были подробно исследованы в работах [2, 97] при непосредственном участии автора. Для их определения были рассчитаны параметры Стокса (2.3). Их использование позволяет получить более полную информацию о свойствах источников и характеристиках резонатора, что можно проиллюстрировать на примере рассмотрения и интерпретации типичных суточных зависимостей от мирового времени UT, соответствующих октябрю 2002 г (см., рис 3.4) приведенных в [97]. На рисунке изображены

интенсивности поляризованной компоненты  $I_p(t)$  и позиционного угла эллипса поляризации  $\Psi(t)$  для первых трех шумановских мод.

Вариации поляризационных параметров сигналов, наблюдаемые на УАС, могут быть непротиворечиво объяснены известными из литературы представлениями о суточных изменениях активности мировых грозových центров [75, 76, 77]. В интенсивностях поляризованной компоненты первой и третьей мод обращают на себя внимание 3 максимума, положения которых на временной оси совпадают с интервалами максимальной активности основных мировых грозových центров: азиатского (вблизи 09:00 UT), африканского (около 15:00 UT) и американского (вблизи 21:00 UT).

Месторасположение этих центров иллюстрирует карта, изображенная на рис. 3.4.в. При пересчете UT в местное время, указанные максимумы активности для каждого из центров приходятся на предзаходные периоды (17-18 LT), что хорошо согласуется с литературными данными [75, 76, 77]. Для второй моды ШР “африканский максимум” отсутствует в силу того, что дистанция от УАС до африканского центра близка к условиям формирования минимума интерференционного поля на соответствующей частоте. На кривых для позиционного угла эллипса поляризации первой и третьей мод отчетливо прослеживаются три характерных «ступеньки». Восстановленные по их положениям азимуты на источники оказываются близки к ожидаемым направлениям на азиатский, африканский и американский центры мировой грозовой активности соответственно.

Далее, в соответствии с [2, 198], проведен более углубленный анализ поляризационных характеристик сигналов ШР. Для этого использована асимптотическая теория полей ШР в гиротропной полости Земля-ионосфера, разработанная В.Г. Безродным и описанная в работах [112, 117]. Теория построена на математических представлениях, изложенных в [75, 210, 211]. В качестве малых параметров этой теории использованы изотропный

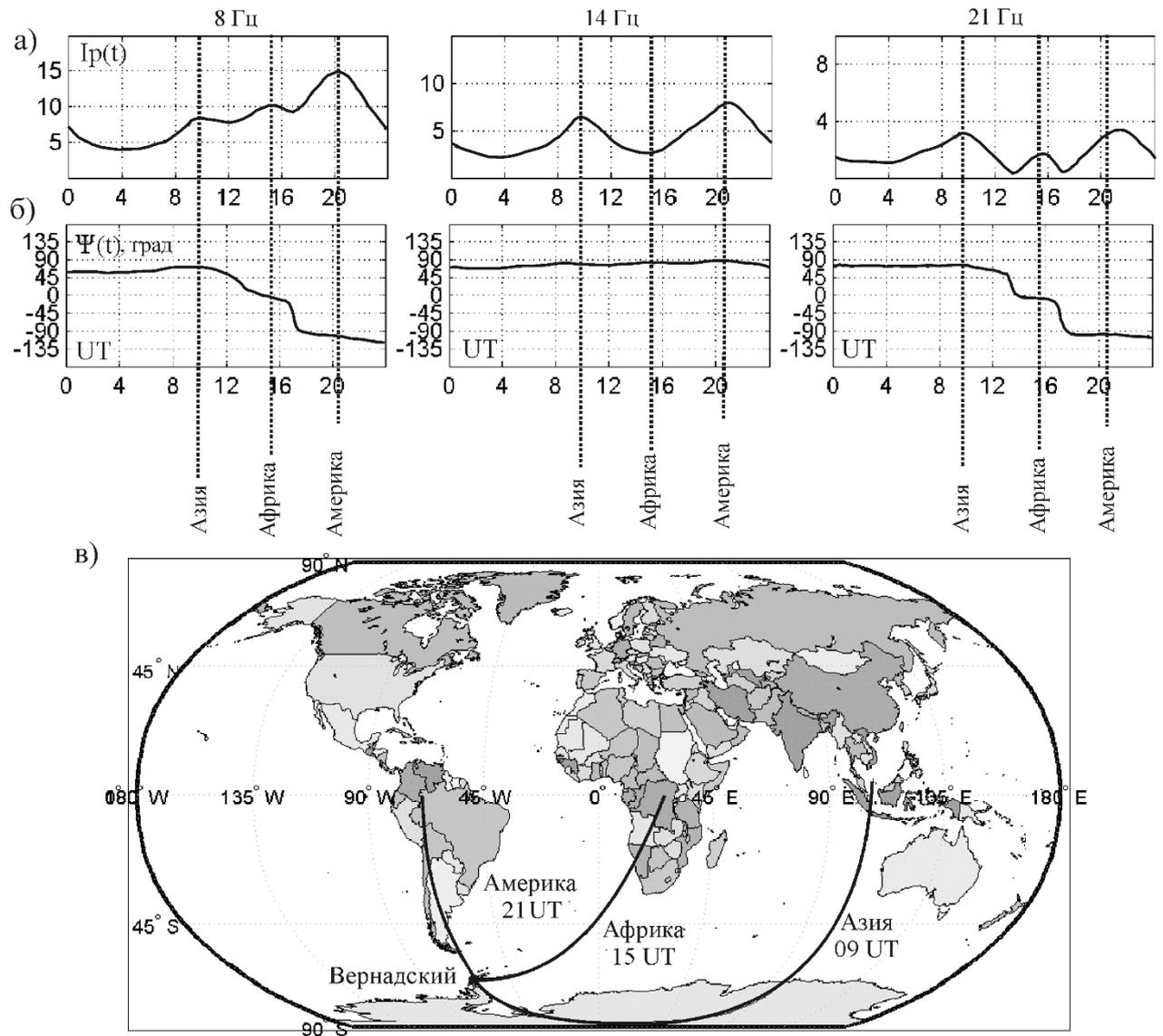


Рисунок 3.4 – а) Суточная зависимость  $I_p(t)$ , для 3-х мод ШР, октябрь 2002 г.; б) суточная зависимость  $\Psi(t)$ , октябрь 2002 г.; в) карта расположения мировых грозных центров

ионосферный импеданс  $z_0$ , а также соотношение  $z_2/z_1$  недиагонального и диагонального элементов матрицы поверхностного импеданса гиротропной ионосферы. Путем линеаризации уравнений по указанным параметрам получены явные выражения для горизонтальных магнитных компонент резонансных полей  $\vec{H}_j^g(f^{(n)})$ , возбуждаемых произвольно расположенным относительно наблюдателя источником номера  $j$  в гиротропной (верхний

индекс «g») полости Земля-ионосфера, через поля  $\vec{H}_j^i(f^{(n)})$  аналогичной изотропной (верхний индекс «i») полости. Показано, что эффект расщепления частот шумановских резонансов [75] в постоянном геомагнитном поле  $\vec{H}_0$  приводит к отличию фазовых скоростей и амплитуд собственных волн, распространяющихся вдоль экватора в направлениях с запада на восток и с востока на запад. Отличие фазовых скоростей проявляется при этом в “кажущемся” долготном смещении всех наземных источников излучения к Западу на угол  $0 < \Delta\varphi^{(n)} < 1$  (“гиротропной рефракции”), отличие амплитуд - в возбуждении эллиптической магнитной поляризации колебаний с  $|r(f^{(n)})| \sim \Delta\varphi^{(n)}$ . В промежутках между спектральными максимумами справедлива оценка  $|r| \rightarrow 0$ , т.е. поляризация  $\vec{H}_j^g$  близка к линейной. Величина смещения  $\Delta\varphi^{(n)}$  при этом не зависит от взаимного расположения источника и приемного пункта, а определяется только номером  $n$  резонансного максимума и параметром гиротропии  $\rho \equiv \omega_H / \nu_e$ , равным соотношению гирочастоты электронов и эффективной частоты их соударений с нейтралами на высотах ионосферной границы резонатора. Согласно [117], для первых трех шумановских частот справедлива оценка

$$\Delta\varphi^{(1,2,3)} \approx \begin{pmatrix} 0,75 \\ 0,312 \\ 0,145 \end{pmatrix} \frac{\rho}{1 + \sqrt{1 + \rho^2}}. \quad (3.10)$$

Для расчетов использована геоцентрическая сферическая система координат (см., рис 3.5) с полярной осью  $Z$ , ориентированной на географический север, источнику сопоставляются координаты  $\{\theta_j = \pi/2, \varphi_j\}$ , приемному пункту -  $\{\theta, \varphi\}$ . Направления  $\alpha_j$  на источник отсчитываются от севера, в качестве положительных приняты отсчеты по часовой стрелке.

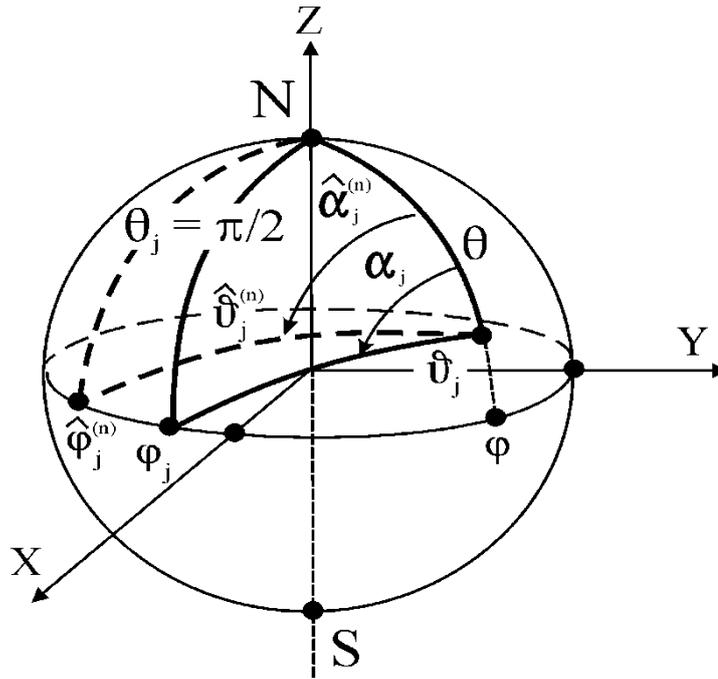


Рисунок 3.5 – Геоцентрическая сферическая система координат, используемая в расчетах. Введение истинных,  $\alpha_j, \vartheta_j$ , и “кажущихся”,  $\hat{\alpha}_j, \hat{\vartheta}_j$ , направлений и расстояний в гиротропной полости Земля-ионосфера

Углы  $\alpha_j$ , а также угловые расстояния  $\vartheta_j$  на поверхности сферы между пунктами излучения и приема связаны с координатами этих пунктов известными формулами:

$$\sin \alpha_j = -\frac{\sin(\varphi - \varphi_j)}{\sin \vartheta_j}, \quad \cos \alpha_j = -\frac{\cos \theta \cos(\varphi - \varphi_j)}{\sin \vartheta_j}, \quad (3.11)$$

$$\cos \vartheta_j = \sin \theta \cos(\varphi - \varphi_j). \quad (3.12)$$

Параметры Стокса шумановских резонансных полей, возбуждаемых в гиротропной полости Земля-ионосфера произвольным числом независимых грозовых центров, описываются в такой системе координат следующими соотношениями [117]:

$$I^g(f^{(n)}, t) = \sum_j I_j^g(f^{(n)}, t) \approx \sum_j \left\langle |\tilde{M}_j(t)|^2 \right\rangle \left| h_j^i(f^{(n)}, \hat{\vartheta}_j^{(n)}, z_1) \right|^2, \quad (3.13)$$

$$\left. \begin{array}{l} Q^g(f^{(n)}, t) \\ U^g(f^{(n)}, t) \\ V^g(f^{(n)}, t) \end{array} \right\} \approx - \sum_j I_j^g(f^{(n)}, t) \left\{ \begin{array}{l} \cos(2\hat{\alpha}_j^{(n)}), \\ \sin(2\hat{\alpha}_j^{(n)}), \\ 2\Delta\alpha_j^{(n)}, \end{array} \right. \quad (3.14)$$

$$\Delta\alpha_j^{(n)} \equiv \Delta\varphi^{(n)}(\cos\theta/\sin^2\vartheta_j) \approx -\Delta\varphi^{(n)}(\partial\alpha_j/\partial\varphi_j). \quad (3.15)$$

Здесь  $\tilde{M}_j$  - токовый момент  $j$ -го грозового центра,  $\langle \dots \rangle$  - знак статистического усреднения;  $|h_j^i(f^{(n)}, \hat{\vartheta}_j^{(n)}, z_1)|^2$  - интенсивность магнитной компоненты СНЧ поля частоты  $f^{(n)}$ , возбуждаемого единичным токовым моментом на расстоянии  $\hat{\vartheta}_j^{(n)}$  в изотропной полости с ионосферным импедансом  $z_1$ . Величины  $\hat{\alpha}_j^{(n)} \equiv \alpha_j + \Delta\alpha_j^{(n)}$  и  $\hat{\vartheta}_j^{(n)} \equiv \vartheta_j + \Delta\vartheta_j^{(n)}$  имеют смысл соответственно “кажущегося” направления и расстояния в гиротропном резонаторе Земля-ионосфера. Они определяются приведенными выше формулами (3.11), (3.12) после замены в них долготы излучающего центра  $\varphi_j$  на ее “смещенное” значение  $\hat{\varphi}_j^{(n)} \equiv \varphi_j - \Delta\varphi^{(n)}$ . В выражения для параметров Стокса введена также параметрическая зависимость от мирового времени  $t$ . Процесс формирования “кажущихся” направлений и расстояний под влиянием постоянного геомагнитного поля иллюстрирует рис. 3.5.

Положительным значениям параметра  $V_j^g(f^{(n)}, t)$  отвечают взаимные фазовые смещения ортогональных магнитных компонент  $(\delta_x - \delta_y) > 0$ , которые при выбранной временной зависимости  $\sim \exp(i2\pi ft)$  приводят к вращению вектора  $\vec{H}_j^g$  в горизонтальной плоскости по часовой стрелке. Отрицательным  $V_j^g(f^{(n)}, t)$  отвечают фазовые смещения  $(\delta_x - \delta_y) < 0$  и противоположное направление вращения вектора  $\vec{H}_j^g$ . На этом основании из (3.14), (3.15)

непосредственно следует вывод о том, что вектор поляризации СНЧ полей, возбуждаемых экваториальными грозовыми центрами, должен вращаться по часовой стрелке при наблюдении шумановских резонансов в южном полушарии ( $\cos \theta < 0$ ), в противоположном направлении – при наблюдении в северном ( $\cos \theta > 0$ ).

Сформулированные выше результаты теоретического анализа использованы в [2, 198] для решения прямой и обратной задач поляризационной диагностики СНЧ шумов, измеряемых на Украинской антарктической станции "Академик Вернадский" и возбуждаемых мировыми грозовыми центрами. Предполагается, что мировая грозовая активность формируется совместным действием трех экваториальных грозовых центров,  $\theta_j = \pi/2$ :

- 1) африканского,  $\varphi_1 \approx 25^\circ$ ,
- 2) азиатского,  $\varphi_2 \approx 115^\circ$ ,
- 3) американского,  $\varphi_3 \approx -65^\circ$ .

Здесь  $\varphi_j$  - долгота, отсчитываемая от гринвичского меридиана, соответствующие координаты УАС равны  $\theta = 155,23^\circ$ ;  $\varphi = -64,25^\circ$ . Взаимное расположение приемного пункта и основных мировых грозовых центров иллюстрирует рис. 3.4.в. Возле каждого из центров указаны предполагаемые моменты их максимальной активности.

Сопоставление приведенных оценок свидетельствует о достаточно специфической геометрии расположения мировых грозовых центров. А именно: азиатский и американский центры разнесены по долготе относительно африканского в противоположных направлениях на приблизительно одинаковые угловые расстояния  $|\varphi_{2,3} - \varphi_1| \approx \pi/2$ , в результате чего находятся практически в антиподных друг к другу точках экватора. Из-за такого расположения они образуют единую дугу большого круга с произвольным приемным пунктом на земной поверхности, в связи с чем

всегда выполняется приближенное равенство  $\vartheta_2 + \vartheta_3 \approx \pi$ . В случае с УАС “Академик Вернадский” дополнительная специфика состоит в том, что долгота станции практически совпадает с долготой американского центра.

Исходя из приведенных оценок, необходимые для проведения поляризационных расчетов долготные параметры модели были выбраны такими:

$$\varphi - \varphi_1 \approx -\pi/2; \quad \varphi - \varphi_2 \approx -\pi; \quad \varphi - \varphi_3 \approx 0. \quad (3.16)$$

Согласно (3.11), (3.12) им соответствуют следующие направления на источники:  $\alpha_1 \approx \pi/2$ ,  $\alpha_2 \approx \pi$ ,  $\alpha_3 \approx 0$ . После подстановки (3.16) в соотношения (3.13) - (3.15) и их линеаризации по параметру  $\Delta\varphi^{(n)}$  получены выражения для параметров Стокса СНЧ излучения, возбуждаемого мировой грозовой активностью на частотах ШР и регистрируемого на УАС “Академик Вернадский”. Для трех первых резонансных частот ( $n \leq 3$ ) эти выражения имеют следующий вид:

$$\left. \begin{matrix} I(f^{(n)}, t) \\ Q(f^{(n)}, t) \end{matrix} \right\} \approx \left\{ A_1(t) [P'_n(0)]^2 \pm (A_2(t) + A_3(t)) [P'_n(\sin \theta)]^2 \cos^2 \theta \right\}, \quad (3.17)$$

$$\left. \begin{matrix} U(f^{(n)}, t) \\ V(f^{(n)}, t) \end{matrix} \right\} \approx \mp 2\Delta\varphi^{(n)} |\cos \theta| \left\{ A_1(t) [P'_n(0)]^2 \mp (A_2(t) + A_3(t)) [P'_n(\sin \theta)]^2 \right\}. \quad (3.18)$$

Здесь  $P_n(x)$  - полином Лежандра  $n$ -й степени,  $P'_n(x) \equiv dP_n(x)/dx$ ,  $A_j(t)$  - электромагнитная активность  $j$ -го грозового центра, введенная соотношением

$$A_j(t) \equiv \left[ \frac{(2n+1)c}{4\pi^2 a^3 f^{(n)} |z_1|} \right]^2 < |\tilde{M}_j(t)|^2 >, \quad (3.19)$$

где  $a$  - радиус Земли,  $c$  - скорость света. Нетрудно видеть, что характеристика  $A_j(t)$  имеет смысл спектральной интенсивности магнитной компоненты СНЧ шума частоты  $f^{(n)}$  в точке возбуждения. Она пропорциональна среднему квадрату токового момента единичного молниевых разряда, характерному для данного грозового центра, и текущей частоте разрядов в этом центре. Отметим, что согласно (3.17), (3.18) вклады 2-го и 3-го мировых грозовых центров в поляризационные характеристики возбуждаемых ими СНЧ полей принципиально нельзя различить между собой. Такой результат является следствием упомянутого выше антиподного характера взаимного расположения этих центров, приводящего к выполнению равенства

$$[P'_p(\cos \vartheta_3)]^2 \approx [P'_p(\cos(\pi - \vartheta_2))]^2 = [P'_p(\cos \vartheta_2)]^2 = [P'_p(\sin \theta)]^2 \quad (3.19)$$

Расчет поляризационных характеристик ШР, регистрируемых на УАС, осуществляется с использованием параметров Стокса (3.17), (3.18). Их подстановка в определения (ф-лы P2) для поляризационных характеристик ШР показывает, что параметры Стокса  $U$ ,  $V$  дают в них в общем случае квадратичные по  $\Delta\varphi^{(n)}$  вклады в радикалы  $\sqrt{Q^2 + U^2}$ ,  $\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}$ . По этой причине на всем протяжении суток, кроме окрестности моментов обращения в нуль параметра  $Q$  (такая ситуация соответствует равенству между собой интенсивностей  $A_1(t)[P'_n(0)]^2$  и  $(A_2(t) + A_3(t))[P'_n(\sin \theta)]^2 \cos^2 \theta$  полей, возбуждаемых в точке наблюдения соответственно африканским и совместным действием азиатского и американского грозовых центров), величины  $U$ ,  $V$  под знаками указанных радикалов могут быть опущены. Расчетные формулы при этом упрощаются и принимают вид

$$I_p(f^{(n)}, t) \approx |A_1(t)[P'_n(0)]^2 - (A_2(t) + A_3(t))[P'_n(\sin \theta)]^2 \cos^2 \theta|, \quad (3.20)$$

$$P(f^{(n)}, t) \approx \frac{|A_1(t)[P'_n(0)]^2 - (A_2(t) + A_3(t))[P'_n(\sin \theta)]^2 \cos^2 \theta|}{A_1(t)[P'_n(0)]^2 + (A_2(t) + A_3(t))[P'_n(\sin \theta)]^2 \cos^2 \theta}, \quad (3.21)$$

$$r(f^{(n)}, t) \approx \Delta\varphi^{(n)} |\cos \theta| \frac{A_1(t)[P'_n(0)]^2 + (A_2(t) + A_3(t))[P'_n(\sin \theta)]^2}{|A_1(t)[P'_n(0)]^2 - (A_2(t) + A_3(t))[P'_n(\sin \theta)]^2 \cos^2 \theta|}, \quad (3.22)$$

$$\Psi(f^{(n)}, t) \approx \begin{cases} (\pi/2) - \Delta\Psi(f^{(n)}, t), & A_1(t)[P'_n(0)]^2 < (A_2(t) + A_3(t))[P'_n(\sin \theta)]^2 \cos^2 \theta; \\ \Delta\Psi(f^{(n)}, t), & A_1(t)[P'_n(0)]^2 > (A_2(t) + A_3(t))[P'_n(\sin \theta)]^2 \cos^2 \theta, \end{cases} \quad (3.23)$$

$$\Delta\Psi(f^{(n)}, t) \equiv -\Delta\varphi^{(n)} |\cos \theta| \frac{A_1(t)[P'_n(0)]^2 - (A_2(t) + A_3(t))[P'_n(\sin \theta)]^2}{|A_1(t)[P'_n(0)]^2 - (A_2(t) + A_3(t))[P'_n(\sin \theta)]^2 \cos^2 \theta|}. \quad (3.24)$$

Из (3.20) - (3.22) следует, что ожидаемые значения степени поляризации и коэффициентов эллиптичности резонансных полей должны составлять величины  $P \sim 1$ ;  $0 < r \sim \Delta\varphi^{(n)} |\cos \theta|$  и испытывать суточные вариации, обусловленные перераспределением периодов активности между мировыми грозовыми центрами. Что же касается позиционного угла  $\Psi$ , то его отличия  $\Delta\Psi$  от ожидаемых “изотропных” значений  $\Psi^i = 0; \pi/2$  связаны с описанным ранее “кажущимся” смещением направлений на источники излучения в гиротропном резонаторе Земля-ионосфера. Эти смещения, подобно коэффициенту эллиптичности, оцениваются величинами  $\sim \Delta\varphi^{(n)} |\cos \theta|$  и варьируют в течение суток вместе с активностями грозовых центров.

Как обсуждалось выше, полученные соотношения теряют силу в моменты, когда интенсивности полей, приходящих на УАС с “африканского” направления, становятся равными суммарной интенсивности излучений, принимаемых с ортогональных к нему “азиатского” и “американского” направлений. В этом случае, с учетом равенств  $\sin \theta \approx 0,419$ ,  $|\cos \theta| \approx 0,908$ , из (ф-

лы P2), (3.17), (3.18) для искомым поляризационных характеристик следуют оценки

$$P(f^{(n)}, t_0) \approx 2\Delta\varphi^{(n)}, \quad r(f^{(n)}, t_0) \approx 0,91, \quad \Psi(f^{(n)}, t_0) \approx \pi/4. \quad (3.25)$$

Видно, что в указанные моменты времени коэффициент эллиптичности суммарного излучения рассматриваемых грозовых центров становится аномально большим, несмотря на сравнительно невысокие значения этой характеристики в парциальных полях каждого из центров. В рассматриваемой геометрии расположения мировых грозовых центров и приемного пункта на УАС поляризационные характеристики ШР могут быть использованы для решения обратной задачи восстановления параметров грозовой активности и резонатора Земля-ионосфера. Действительно, составление из приведенных параметров Стокса комбинаций  $I \pm Q$ ,  $U \pm V$  позволяет легко отделить в (3.17), (3.18) суммарную интенсивность полей азиатского и американского грозовых центров,  $(A_2(t) + A_3(t))[P'_n(\sin\theta)]^2 \cos^2\theta$ , от первого,  $A_1(t)[P'_n(0)]^2$ :

$$I(f^{(n)}, t) + Q(f^{(n)}, t) \approx 2A_1(t)[P'_n(0)]^2, \quad (3.26)$$

$$I(f^{(n)}, t) - Q(f^{(n)}, t) \approx 2(A_2(t) + A_3(t))[P'_n(\sin\theta)]^2 \cos^2\theta, \quad (3.27)$$

$$U(f^{(n)}, t) + V(f^{(n)}, t) = 4\Delta\varphi^{(n)}|\cos\theta|(A_2(t) + A_3(t))[P'_n(\sin\theta)]^2, \quad (3.28)$$

$$U(f^{(n)}, t) - V(f^{(n)}, t) = -4\Delta\varphi^{(n)}|\cos\theta|A_1(t)[P'_n(0)]^2. \quad (3.29)$$

Выражения (3.26) - (3.29) дополнительно упрощаются на первой частоте ШР  $f^{(1)}$ , поскольку значению  $n=1$  соответствуют  $P'_n(x) \equiv 1$ . Видно, что в этом случае (3.26), (3.27) могут быть использованы для определения суточного хода

как активностей отдельных грозовых центров,  $A_1(t)$ ,  $(A_2(t)+A_3(t))$ , так и интегральной грозовой активности,  $A_\Sigma(t) \equiv \sum_{j=1}^3 A_j(t)$ , на основе соотношений

$$A_1(t) = [I(f^{(1)}, t) + Q(f^{(1)}, t)]/2, \quad (3.30)$$

$$(A_2(t) + A_3(t)) = [I(f^{(1)}, t) - Q(f^{(1)}, t)]/(2\cos^2 \theta), \quad (3.31)$$

$$A_\Sigma(t) = [I(f^{(1)}, t)(1 + \cos^2 \theta) - Q(f^{(1)}, t)\sin^2 \theta]/(2\cos^2 \theta). \quad (3.32)$$

Дальнейшее сопоставление (3.27) с (3.28) и (3.26) с (3.29) позволяет также определить двумя альтернативными способами “кажущееся” долготное смещение грозовых центров на произвольной частоте  $f^{(n)}$ :

$$\Delta\varphi^{(n)}(t) = \frac{|\cos\theta|}{2} \frac{U(f^{(n)}, t) + V(f^{(n)}, t)}{I(f^{(n)}, t) - Q(f^{(n)}, t)} = -\frac{1}{2|\cos\theta|} \frac{U(f^{(n)}, t) - V(f^{(n)}, t)}{I(f^{(n)}, t) + Q(f^{(n)}, t)}. \quad (3.33)$$

Знание  $\Delta\varphi^{(n)}$  позволяет далее оценить на основании (3.10) как саму величину параметра гиротропии  $\rho$  на ионосферной границе резонатора  $z = h$ , так и непосредственно высоту  $h$  этой границы, исходя из принятого значения гирочастоты электронов в нижних слоях ионосферы,  $\omega_H \approx 8,4 \cdot 10^6 \text{ c}^{-1}$ , и известных литературных моделей высотного распределения частоты электронных столкновений,  $\nu_e = \nu_e(z)$ .

Теоретические расчеты поляризационных параметров ШР были сопоставлены с результатами непрерывных наблюдений, выполненных на УАС в 2001-2003 годах. Для более детального исследования таких закономерностей были построены усредненные суточные зависимости поляризационных характеристик резонансных полей, соответствующие четырем основным периодам годового солнечного цикла в южном полушарии:

- I – осеннее равноденствие (февраль-апрель);
- II – зимнее солнцестояние (май-июль);
- III – весеннее равноденствие (август-октябрь);
- IV – летнее солнцестояние (ноябрь-январь).

На рис 3.6-3.9 представлены суточные вариации параметров  $I(t)$ ,  $P(t)$ ,  $r(t)$ ,  $\Psi(t)$  магнитных компонент 3-х первых резонансных мод (8, 14, 20 Гц) СНЧ колебаний в перечисленные периоды 2001 -2003 г.г., а также соответствующие среднегодовые зависимости. Данные 2001 г. приведены штриховыми, 2002 г.- сплошными линиями, 2003 г.- штрих-пунктиром. Анализ сезонных зависимостей показывает, что кривые  $I(t)$ ,  $P(t)$ ,  $r(t)$  для одноименных периодов трех лет достаточно хорошо совпадают (вплоть до мелких деталей), указывая тем самым на высокую повторяемость средне-сезонных условий эксперимента от года к году. В то же время, они демонстрируют также циклические вариации таких условий от сезона к сезону.

Кривые интенсивности колебаний  $I(t)$  приведены на рис 3.6 в условных единицах, одинаковых для всех циклов измерений. Можно видеть, что максимальные суточные значения  $I(t)$  регистрировались на протяжении 3-х лет наблюдений в двух соседних периодах III (08-10), IV (11-01). То обстоятельство, что эта закономерность проявлялась одновременно на всех трех резонансных частотах, свидетельствует о ее связи не со свойствами ШР, а с сезонной зависимостью уровня мировой грозовой активности.

Кривые на частотах 8 Гц и 20 Гц имеют ярко выраженные максимумы вблизи 15 UT и 21 UT, обусловленные суточными периодами усиления активности соответственно африканского и американского грозовых центров (см., рис 3.4.в). Подъем вблизи ожидаемого момента максимальной активности азиатского центра, 9 UT, проявляется на них значительно слабее.

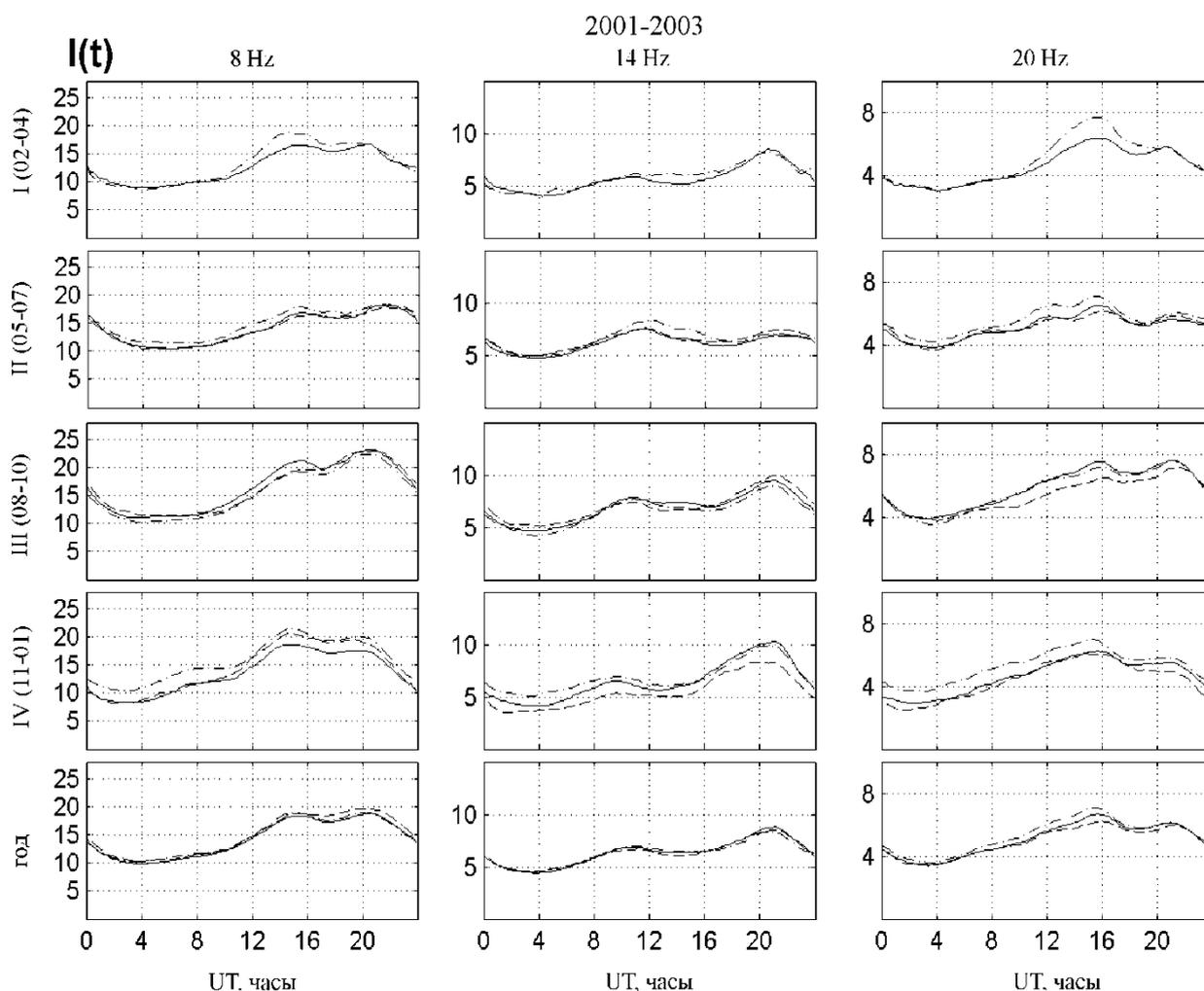


Рисунок 3.6 – Суточные вариации интенсивности резонансных колебаний на частотах 8; 14; 20 Гц, соответствующие четырем периодам годового солнечного цикла и среднегодовым данным 2001-2003 годов (штриховые линии – 2001 г., сплошные – 2002 г., штрих-пунктир – 2003 г.)

Отсутствие максимума около 15 UT на графиках интенсивности второй резонансной моды 14 Гц объясняется близостью дистанции между УАС “Академик Вернадский” и африканским грозovým центром к расстоянию, на котором в резонаторе Земля-ионосфера происходит формирование интерференционного минимума магнитной компоненты поля второй гармоник ШР.

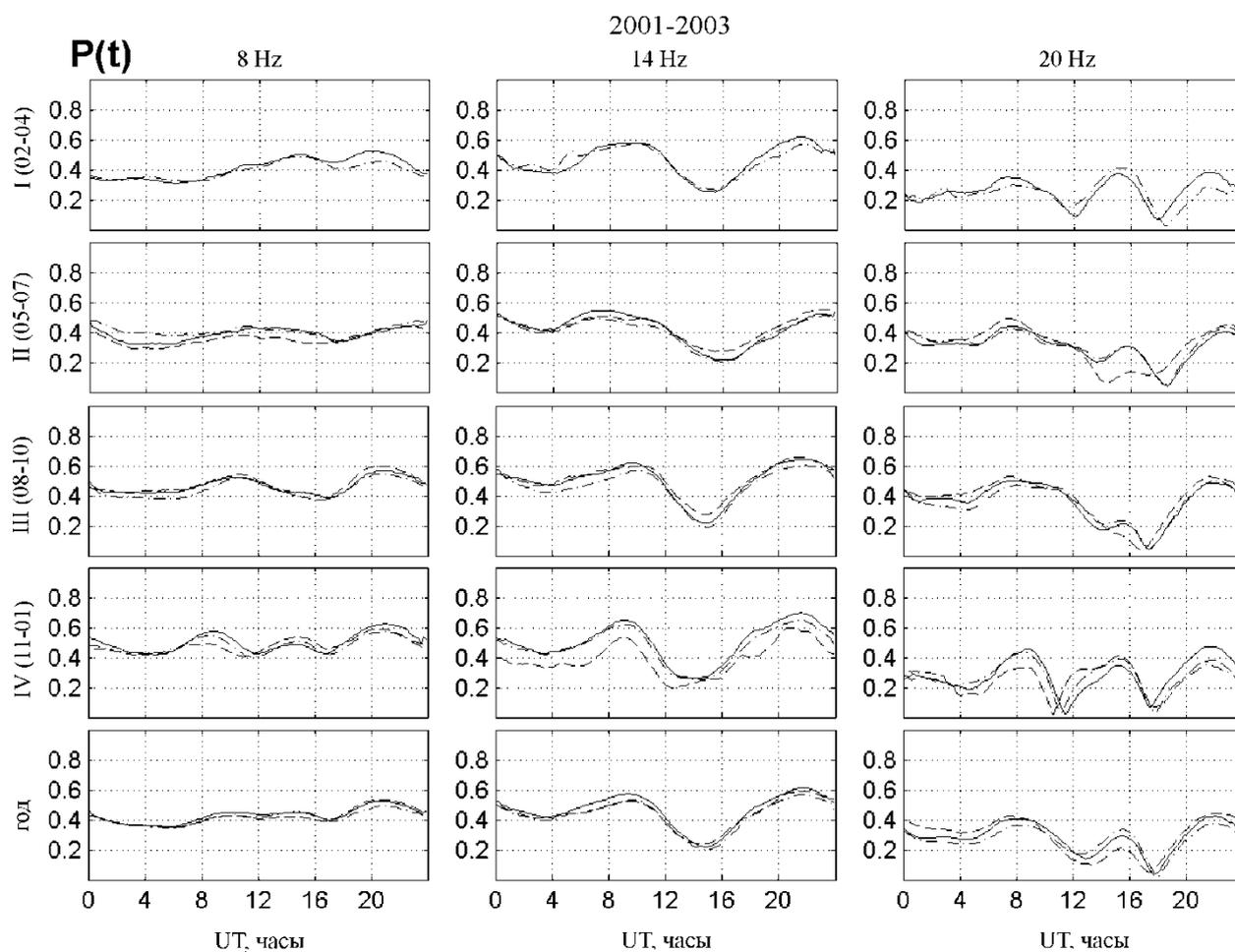


Рисунок 3.7 – Суточные вариации степени поляризации резонансных колебаний на частотах 8; 14; 20 Гц, соответствующие четырем периодам годового солнечного цикла и среднегодовым данным 2001-2003 годов (штриховые линии – 2001 г., сплошные – 2002 г., штрих-пунктир – 2003 г.)

На рис. 3.7. приведены графики суточных вариаций степени поляризации излучения  $P(t)$ . Следует указать, что согласно [192] электромагнитное поле единичного источника на произвольной фиксированной частоте является полностью поляризованным, и ему соответствует значение  $P(t) \equiv 1$ ; поляризация суммы полей равной интенсивности, приходящих одновременно с ортогональных направлений от двух статистически независимых источников, является стохастической и характеризуется значением  $P(t) \equiv 0$ . В силу таких свойств указанной

характеристики и с учетом взаимной статистической независимости излучений мировых грозových центров, кривые  $P(t)$  подчеркивают моменты кульминации активности каждого отдельного центра. Особенно отчетливо это наблюдается на частоте 20 Гц. Отметим, наконец, что на всех трех частотах степень поляризации излучения нигде не приближается к единице, что объективно свидетельствует о соизмеримости уровней активности всех мировых грозových центров на полном протяжении суточного периода.

На рис. 3.8. представлены кривые суточного хода коэффициента эллиптичности  $r(t)$ . Стоит напомнить, что значения  $|r|=0$  свидетельствуют о линейном характере поляризации излучения,  $|r|=1$  - о круговом. Положительному знаку  $r(t)$  соответствует вращение вектора  $\vec{H}$  в горизонтальной плоскости по часовой стрелке, отрицательному - в противоположном направлении. Можно видеть, что для первой резонансной моды во все сезоны года, в точном соответствии с положениями теоретической модели, значения коэффициента эллиптичности на протяжении суток остаются положительными. Для второй моды в среднегодовых данных, а также в периоды III(08-10) и IV(11-01) коэффициент эллиптичности ведет себя таким же образом, как и у первой, т.е. сохраняет положительный знак в течение всех суток.

В периоды же I(02-04) и II(05-07) на протяжении примерно 1/3 суточной записи он принимает малые отрицательные значения, свидетельствующие об изменении в это время направления вращения вектора магнитной поляризации на противоположное с приближением самого характера поляризации к линейному. Наблюдаемые абсолютные значения коэффициента эллиптичности второй моды, как и предсказывает теория, всегда ниже, чем у первой. Для третьей моды коэффициент эллиптичности во все сезоны года оказывается малым по абсолютной величине и знакопеременным в течение суток со среднесуточным значением, близким к нулю. Во все сезоны года коэффициент эллиптичности первой моды вблизи 17UT принимает аномально

большие значения, как это было описано ранее, состоит в равенстве в этот момент интенсивностей полей, приходящих с “африканского” и ортогональных ему “азиатского” и “американского” направлений.

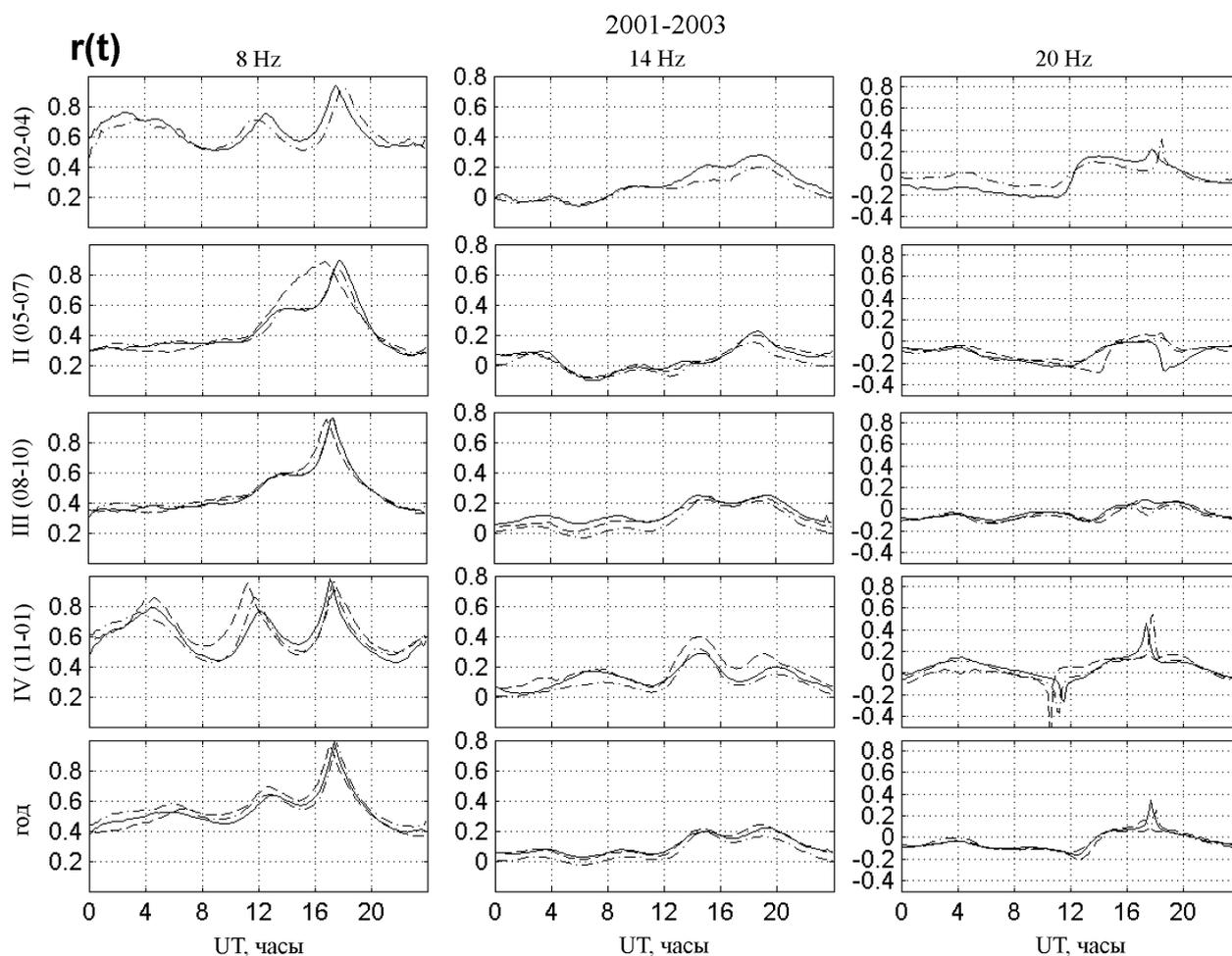


Рисунок 3.8 – Суточные вариации коэффициента эллиптичности резонансных колебаний на частотах 8; 14; 20 Гц, соответствующие четырем периодам годового солнечного цикла и среднегодовым данным 2001-2003 годов. (штриховые линии – 2001 г., сплошные – 2002 г., штрих-пунктир – 2003 г.)

Таким образом, экспериментальные суточные зависимости коэффициента эллиптичности двух первых мод демонстрируют в целом хорошее согласие с теоретической моделью. Среднесуточные значения коэффициента эллиптичности третьей моды во все сезоны года близки к нулю,

т.е. магнитная поляризация этой моды слабо отличается в среднем от линейной. Одной из возможных причин, отмеченного в периоды I(02-04) и II(05-07) отличия в поведении кривой  $r(t)$  второй моды от теоретически ожидаемого, может являться уменьшение в это время значений  $|r(t)|$  до уровня, не обеспечиваемого точностью приближенной расчетной модели. Другая причина, которая представляется более вероятной, состоит в сезонной широтной миграции мировых грозных центров, обсуждаемой в литературе [76, 77, 111, 212], которая в использованной теоретической модели не учитывалась.

На рис. 3.9. приведены кривые суточного хода позиционного угла  $\Psi(t)$  эллипса поляризации. Практическая неизменность на протяжении суток значений  $\Psi(t)$  второй моды во все периоды годового солнечного цикла обусловлена обсуждавшейся выше близостью дистанции между УАС "Академик Вернадский" и африканским грозным центром к величине характерного расстояния, на котором в резонаторе Земля-ионосфера происходит формирование интерференционного минимума магнитной компоненты поля указанной частоты. В силу такого месторасположения приемного пункта резонансное поле в нем формируется лишь излучениями азиатского и американского грозных центров, находящихся на одной дуге большого круга.

Графики  $\Psi(t)$  первой и третьей резонансных мод ведут себя иным образом, демонстрируя при этом два возможных типа суточного хода. Один из них состоит в плавном уменьшении на временном интервале 9 UT-15 UT позиционного угла от  $\Psi \approx (45^\circ - 90^\circ)$  до  $\Psi \approx 0$  с дальнейшим быстрым возвращением на интервале 17 UT-18 UT к исходным значениям. Этот тип поведения в точности соответствует предсказываемому теоретической моделью. Он устойчиво наблюдался на протяжении всех 3-х лет регистрации в равноденственный период III(08-10). Второй тип отличается от первого заменой возрастания  $\Psi(t)$  на интервале 17 UT-18 UT еще одной "ступенью"

убывания с выходом на значения  $\Psi \approx -(90^\circ - 135^\circ)$ , отличающиеся от исходных на величину, близкую к  $180^\circ$ . Он наблюдался в течение всех лет регистрации в смежные периоды IV(11-01) и I(02-04). В период солнцестояния II(05-07) и в среднегодовых данных наблюдались оба типа суточного хода  $\Psi(t)$ .

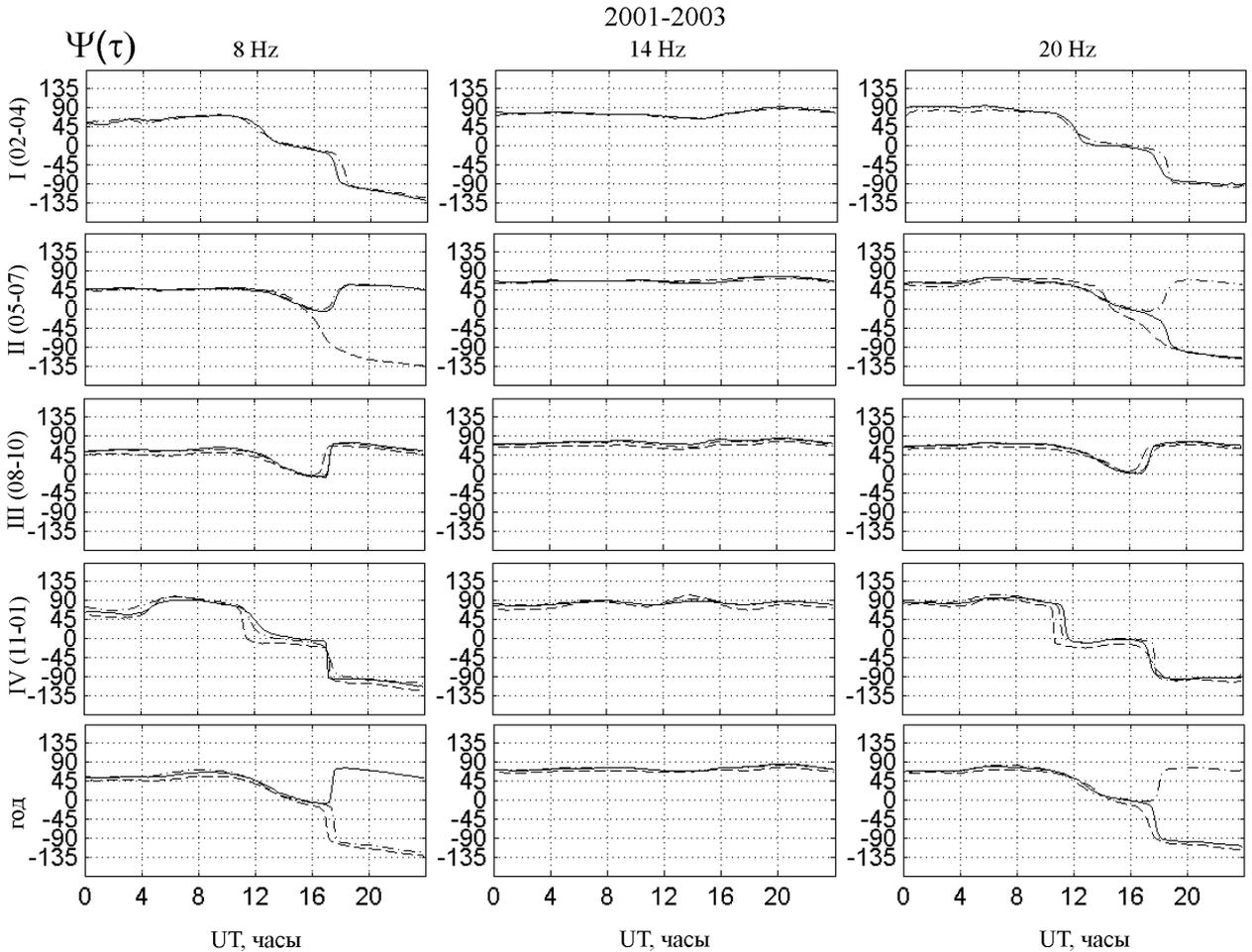


Рисунок 3.9 – Суточные вариации позиционного угла эллипса поляризации резонансных колебаний на частотах 8; 14; 20 Гц, соответствующие четырем периодам годового солнечного цикла и среднегодовым данным 2001-2003 годов (штриховые линии – 2001 г., сплошные – 2002 г., штрих-пунктир – 2003 г.)

Причина возникновения разных типов поведения позиционного угла, начиная с 17 UT, состоит в, уже обсуждавшемся ранее, равенстве в этот

момент интенсивностей излучений, приходящих в точку наблюдения с “африканского” и с ортогональных ему “азиатского” и “американского” направлений. С учетом статистической независимости таких излучений, поляризация их суммы является при этом стохастической, для которой само понятие позиционного угла эллипса поляризации не определено. Поэтому даже малые отличия в положениях мировых грозových центров от принятого в модели экваториального позиционирования (например, за счет их сезонной широтной миграции) могут служить в указанный момент определяющими факторами для реализации того или иного из двух возможных типов дальнейшего поведения функции  $\Psi(t)$ .

Далее изложены результаты решения обратной задачи дистанционной диагностики центров мировой грозовой активности и гиротропного резонатора Земля-ионосфера на основе анализа данных поляризационных измерений 2001-2003 г.г. Исходя из этих данных и формул (3.30) - (3.33), были восстановлены суточные зависимости поведения пяти параметров теоретической модели: уровней активности  $A_1$ ,  $(A_2 + A_3)$  мировых грозových центров, глобальной грозовой активности  $A_2$ , а также величин “кажущихся” долготных смещений  $\Delta\varphi^{(1)}$ ,  $\Delta\varphi^{(2)}$  источников на частотах первого и второго шумановских резонансов 8 Гц и 14 Гц. Результаты такого восстановления приведены на рис. 3.10. отдельно для четырех периодов годового солнечного цикла, а также для среднегодовых данных. Как и ранее, экспериментальные зависимости 2001 г. изображены штриховыми линиями, 2002 г. – сплошными, 2003 г. – штрих-пунктиром.

Кривые рис. 3.10.a иллюстрируют перераспределение уровня активности между основными мировыми центрами на протяжении суток и от периода к периоду года. Максимумы на кривых в окрестности 09.00 UT связаны с активизацией азиатского грозového центра, 15.00 UT – африканского, 21.00 UT – американского.

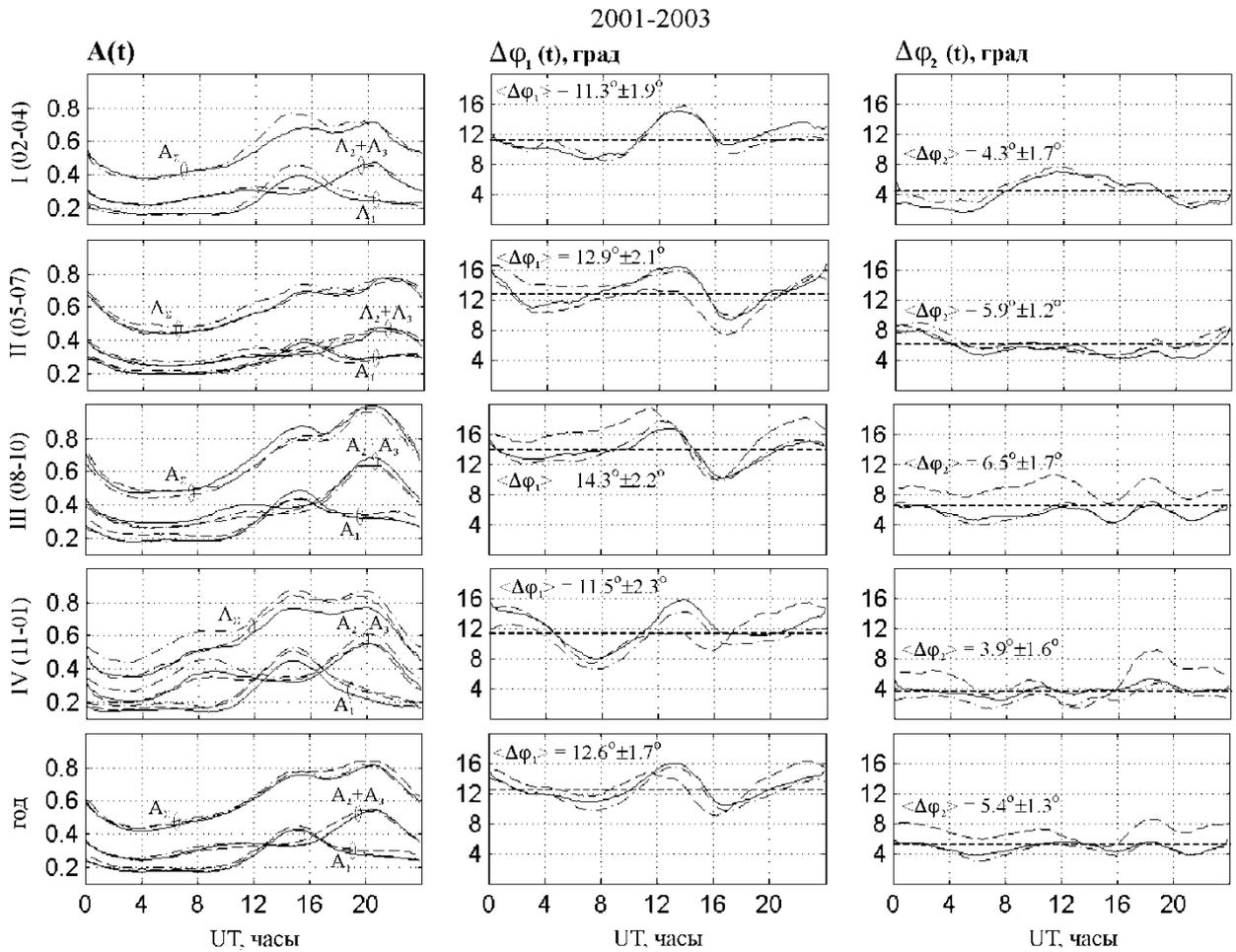


Рисунок 3.10 – Суточные вариации уровней активности основных мировых грозových центров, глобальной грозовой активности и ”кажущихся” долготных смещений источников излучения на частотах двух первых шумановских резонансов, восстановленные из поляризационных измерений 2001-2003 годов. (штриховые линии – 2001 г., сплошные – 2002 г., штрих-пунктир – 2003 г.)

Кривые рис. 3.10.б,в демонстрируют суточный ход ”кажущихся” долготных смещений  $\Delta\varphi^{(1,2)}$ . Используемая в расчетах асимптотическая теория [117] базируется, однако, на литературной модели [75] радиального геомагнитного поля  $\vec{H}_0$  в виде ”двух полушей”, которая не предполагает каких-либо изменений параметров  $\Delta\varphi^{(1,2)}$  в течение суток. По этой причине модельным значениям этих параметров сопоставляются их среднесуточные

экспериментальные оценки  $\overline{\Delta\varphi^{(1,2)}}$  (горизонтальные штриховые линии на рис 3.10.б,в). Временные вариации соответствующих экспериментальных данных, по-видимому, связаны с приближенным характером использованной теоретической модели и оцениваются величиной  $\sqrt{[\delta(\Delta\varphi^{(1,2)})]^2}$  среднеквадратичной ошибки определения искомых параметров. Обе указанные экспериментальные оценки, дополнительно усредненные по одноименным сезонам 3-х лет наблюдений, приведены на рис 3.10.б;в рядом с соответствующими кривыми.

Для количественного сопоставления между собой уровней активности отдельных грозовых центров в пределах одного сезона, а также изменений активности каждого из них от сезона к сезону в пределах все 3-х лет регистраций, были определены, по аналогии с  $\overline{\Delta\varphi^{(1,2)}}$ , также и среднесуточные значения  $\overline{A_1}$ ,  $\overline{(A_2 + A_3)}$ ,  $\overline{A_2}$ . Результаты такого определения представлены на рис 3.11. Из анализа приведенных кривых следует, что на протяжении всего рассматриваемого трехлетнего цикла регистраций суммарная грозовая активность двух центров, азиатского и американского, превышает активность африканского грозового центра. Видно также, что в 2001 и 2002 г. как активности, так и долготные смещения принимают максимальные значения в августе-октябре, минимальные – в феврале-апреле.

Поскольку “кажущиеся” смещения  $\Delta\varphi^{(1,2)}$  грозовых центров однозначно связаны с показателем гиротропии резонатора Земля-ионосфера  $\rho$  соотношением (3.10), правые шкалы двух нижних графиков пересчитаны к значениям этого параметра. Обращает на себя внимание, что независимые оценки  $\rho$ , полученные путем усреднения среднесуточных значений  $\overline{\Delta\varphi^{(1)}}$ ,  $\overline{\Delta\varphi^{(2)}}$  по всем периодам годового солнечного цикла трех лет регистрации (средние линии на двух нижних графиках), совпадают с точностью до третьего знака, что свидетельствует об адекватности в среднем теоретической модели описываемому явлению.

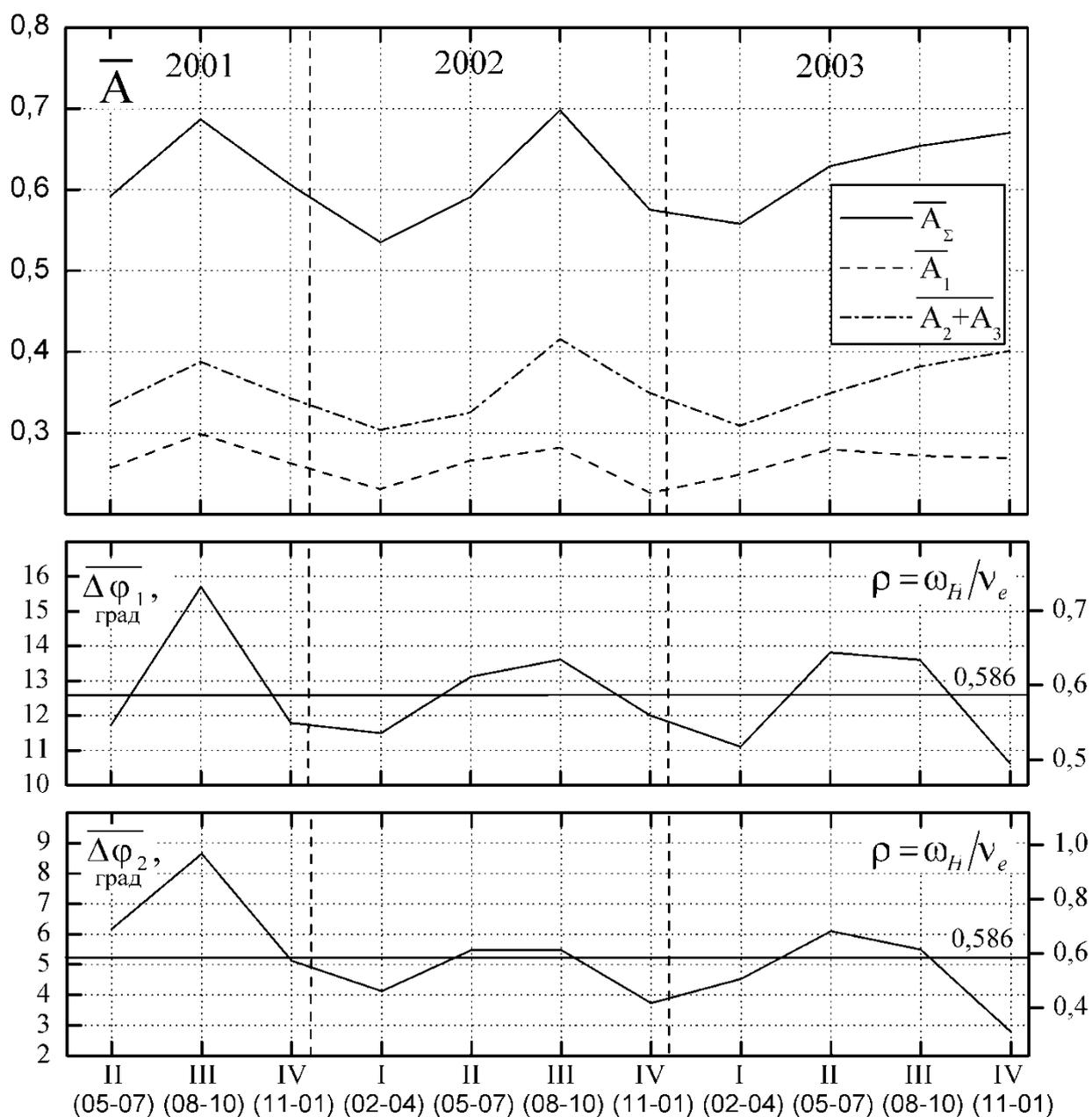


Рисунок 3.11 – Среднесуточные значения уровней активности основных мировых грозных центров, глобальной грозовой активности и “кажущихся” долготных смещений источников излучения на частотах двух первых шумановских резонансов, восстановленные из поляризационных измерений 2001-2003 годов

### 3.3 Изменения характеристик ШР в цикле солнечной активности

Как уже отмечалось ранее мониторинг параметров ШР, выполняется на УАС уже на протяжении полного цикла солнечной активности, что делает эти записи самым продолжительным массивом непрерывных регистраций сигналов ШР, полученным в Антарктике. Следует отметить, что хотя в работе [125] и анализируются подобные измерения, выполнявшиеся на обсерватории Arrival Heights (78°S, 167°E) с 1990 по 2000 годы, однако эти записи соответствуют только одному горизонтальному магнитному каналу и содержат несколько пропусков длительностью до года, когда измерения не проводились. Наличие непрерывных записей позволило автору выполнить анализ сигналов ШР на протяжении полного цикла солнечной активности [4, 36, 37, 197, 200, 201, 202]. Исследовались поведения интенсивностей и пиковых частот первого шумановского максимума, а также изменения активностей мировых грозных центров, рассчитанных по формулам (3.30-3.32). Использовались среднемесячные суточные вариации параметров ШР, рассчитанные для каждого месяца в течении солнечного цикла. На рис. 3.12 приведены суточные хода интенсивностей первого мода ШР с 2002 по 2012 годы.

Характер поведения интенсивностей на всем протяжении солнечного цикла соответствует зависимостям для 2001-2003 годов, проанализированным в предыдущем подразделе рис. 3.5-3.6. Видно, что суточный ход  $I$  и  $I_p$  хорошо повторяется из года в год, и имеет четко выраженный сезонный ход на протяжении всего солнечного цикла.

Рисунок также демонстрирует, что максимумы интенсивности для 3-х мировых центров лучше выражены в период с октября по март, чем с апреля по сентябрь. В то же время для оценок интенсивности индивидуальных грозных центров более целесообразно перейти к рассмотрению их активностей.

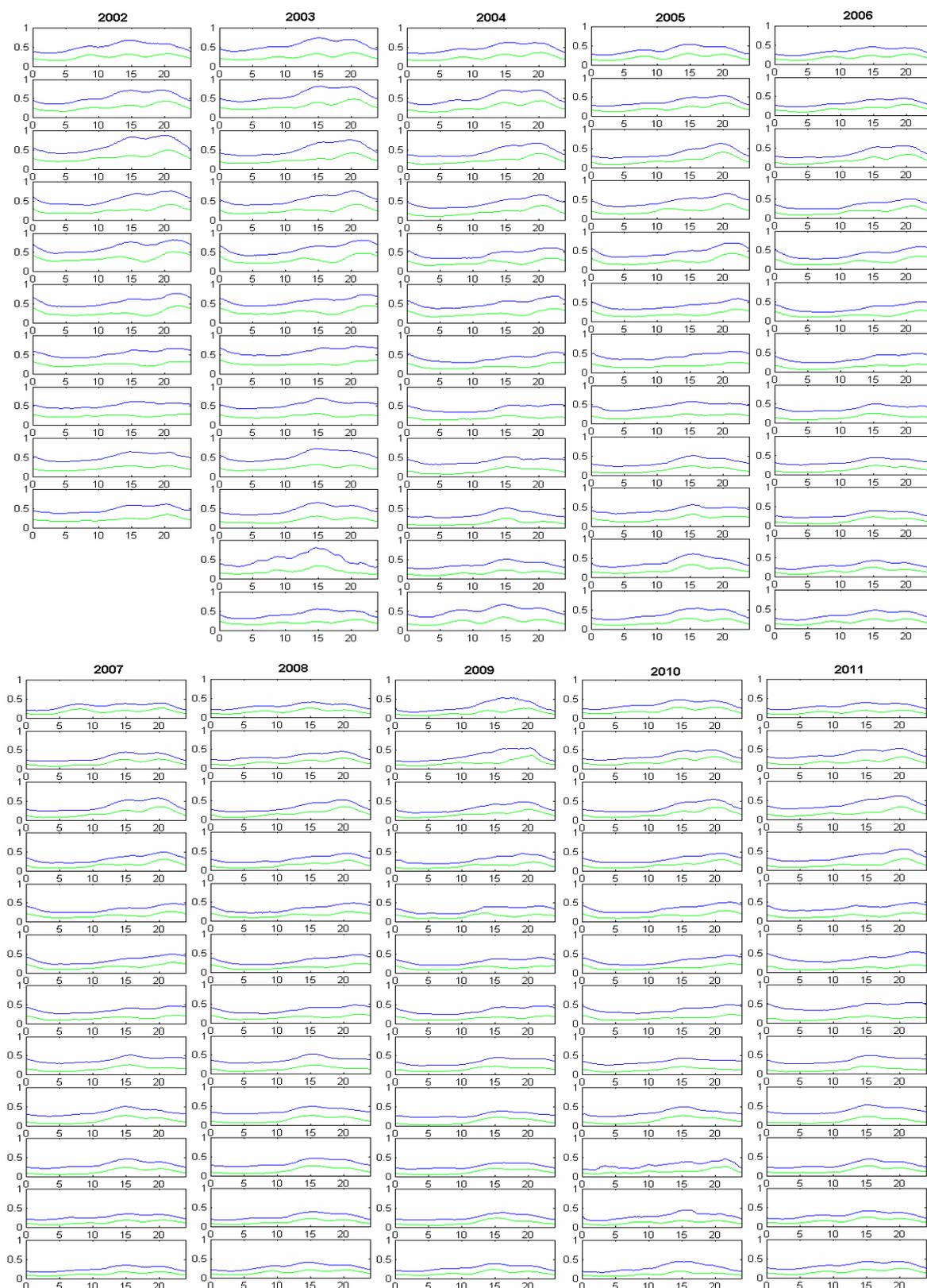


Рисунок 3.12 – Усредненные за месяц суточные зависимости интенсивности первого максимума ШР ( $I$  - синим,  $I_p$  - зеленым.). Нижняя строка каждой панели соответствует декабрю, верхняя - январю

Рис. 3.13 показывает хода: полной активности всех центров  $A_1+A_2+A_3$  (красным), активности африканского  $A_1$  (синим) и суммарной активности азиатского и американского центров  $A_2+A_3$  (зеленым). Сравнивая рис. 3.12 и рис. 3.13 видно, что на графиках активности значительно лучше, чем на кривых интенсивности выделяются кульминации мировых грозных центров. Кривая, активности африканского центра имеет один максимум в районе пятнадцати часов UT. Зависимость для суммарной активности азиатского и американского центров содержит два максимума. Обе кривые отображают особенности поведения грозных центров. Кульминация активности африканского центра более выражена в период сентябрь - май, почти вся активность продолжается с десяти до двадцати часов мирового времени, а максимум приходится на пятнадцать часов. Летом максимум (июнь - август) активности несколько уменьшается, но в то же время активность более равномерно распределяется в течение всех суток. Активность американского центра обычно кульминирует вблизи двадцати часов, а продолжительность периода кульминации в целом соответствует аналогичному периоду для африканского центра. Подобно африканскому, американский максимум слабее выражен летом. Следует отметить, что общей тенденцией для всех мировых грозных центров является более выраженная кульминация зимой по сравнению с летом.

Наиболее вероятной причиной этому факту является изменения площади грозных центров вследствие их сезонного дрейфа. Известно, что грозы летом смещаются по направлению к северному полюсу, а зимой к южному [76, 77, 111, 212]. Площадь суши, над которой в основном происходят грозы, к северу от экватора больше чем к югу. Поэтому летом при смещении гроз к северу площадь грозных центров увеличивается, а зимой при смещении к югу – уменьшается. Эта закономерность отмечена также и при наблюдении молниевых вспышек из космоса в оптическом диапазоне [107].



Рисунок 3.13. Усредненные за месяц суточные активности мировых грозовых центров ( $A_1 + A_2 + A_3$  (красным),  $A_1$  (синим),  $A_2 + A_3$  (зеленым)). Нижняя строка каждой панели соответствует декабрю, верхняя - январю

Второй максимум на кривой суммарной активности американского и азиатского центров, отвечающий за азиатский центр, в отличие от других, заметно меняет свое положение в течение года. Его положение смещается от восьми часов UT в ноябре - декабре до почти двенадцати часов UT в июле. Этот же эффект, но в несколько меньшей степени, относится и к времени кульминации двух других грозовых центров. На рис 3.14.а показаны вариации времени кульминации активности трех центров на протяжении солнечного цикла. Подобные вариации времени кульминации можно связать с сезонным дрейфом мировых грозовых центров. Поскольку, как уже отмечалось ранее, грозы возникают преимущественно над сушей [75, 76], а континенты вытянуты преимущественно с юго-востока на северо-запад, то дрейф грозовых источников, кроме широтной, имеет также и долготную составляющую. Зимой грозы находятся восточнее, а летом западнее. Поскольку известно, что максимум грозовой активности приходится приблизительно на 17:00 часов местного времени [75, 76] сезонное движение центров по долготе означает изменение времени кульминации в UT. Получить информацию о сезонных смещениях центров молниевой активности за период, соответствующий СНЧ наблюдениям на УАС, можно по данным оптических наблюдений молниевых вспышек из космоса. Для этого подходят данные спутника Lightning Imaging Sensor (LIS) ([http://ghrc.nsstc.nasa.gov/uso/ds\\_docs/lis/lis\\_dataset.html#2.1](http://ghrc.nsstc.nasa.gov/uso/ds_docs/lis/lis_dataset.html#2.1)), который с 1997 г., осуществляет мониторинг молниевых разрядов в широтном поясе  $\pm 35^\circ$  от экватора. Благодаря применению чувствительного оптического сенсора диапазона 777 нм и процессорной системы реального времени LIS отслеживает координаты до 90 % молниевых вспышек, находящихся в области обзора сенсора, даже в условиях фоновой солнечной “засветки” [89]. В сети Internet (<http://thunder.msfc.nasa.gov/data/query/distributions.html>) можно получить пространственные распределения количества молний, усредненные по годам и сезонам. Эти данные были использованы автором для оценки положений мировых грозовых центров для всех сезонов с 2002 по 2011 годы. Предполагалось, что положение каждого из 3-х мировых грозовых центров

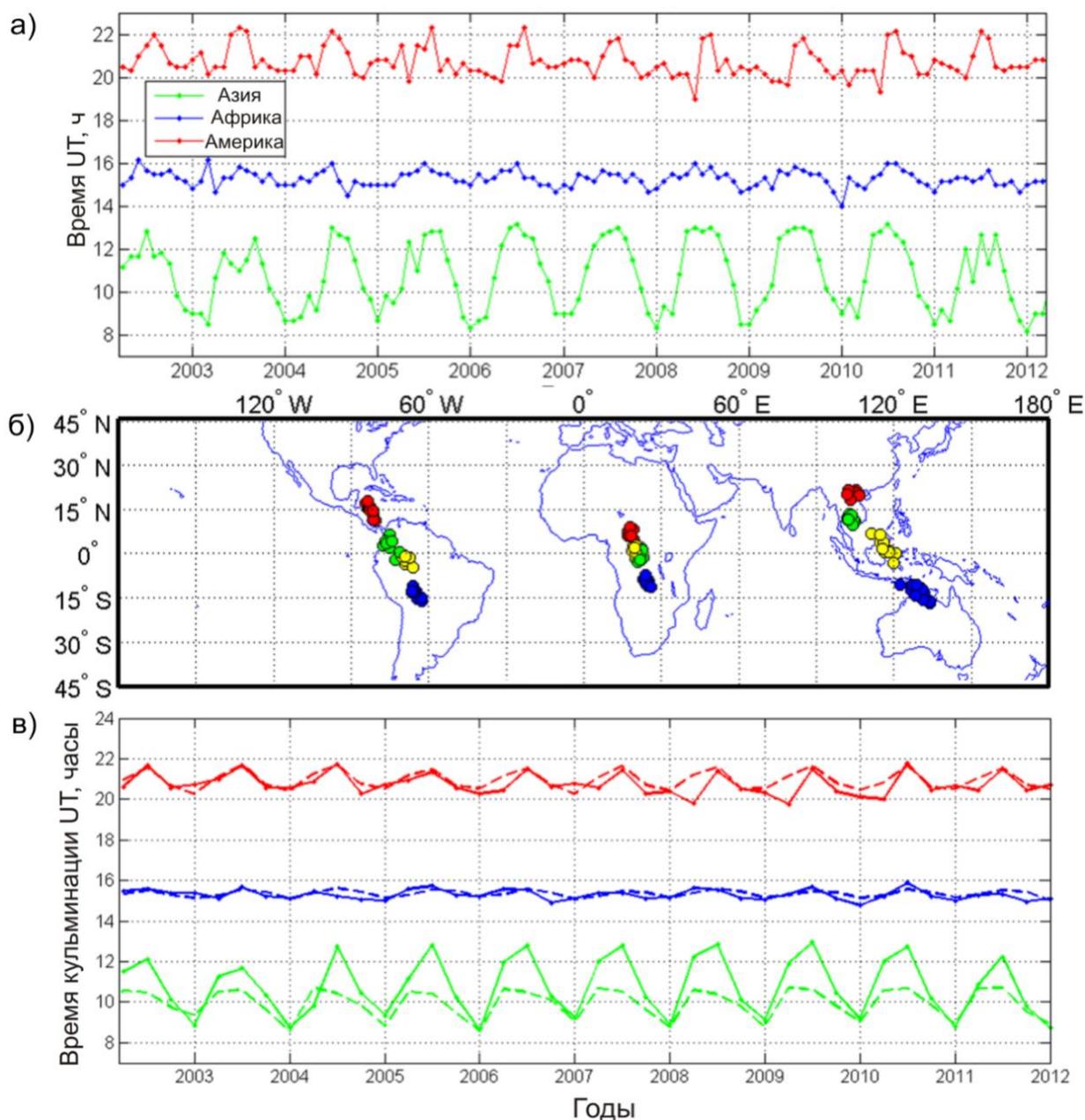


Рисунок 3.14 – а) среднемесячные времена кульминации активностей мировых грозных центров по данным СНЧ наблюдений на УАС; б) координаты “центров масс” грозовой активности по данным спутника LIS. Цветные точки соответствуют различным сезонам года: синий - зима, зеленый - весна, красный - лето, желтый – осень; в) средние за сезон времена кульминации активностей мировых грозных центров. Сплошная линия - по данным СНЧ наблюдений на УАС. Штриховая линия - по данным спутника LIS

соответствует “центрам масс”, рассчитанным для усредненного за сезон пространственного распределения молниевых разрядов. Данные вычислений приведены на рис 3.14.б.

Из рисунка видно, что для одинаковых сезонов разных лет центры формируют компактные группы, то есть траектории дрейфа практически не меняются из года в год. Далее времена кульминации, рассчитанные по спутниковым данным о долготном дрейфе центров, были сопоставлены с наблюдениями на УАС рис 3.14.а. Результаты приведены на рис 3.14.в. Видно, что изменения времен кульминации, оцененные различными методами для Африканского и Американского центра, совпадают как по амплитуде, так и по фазе. Для Азиатского центра кривые подобны по фазе, но по амплитуде вариация, полученная на УАС, примерно в два раза превышает данные спутника LIS. Причиной такой разницы в амплитуде является то, что спутник не фиксирует молнии, находящиеся вне широтного пояса  $\pm 35^\circ$  относительно экватора. В то же время летом большое количество молний наблюдается на Евразийском континенте значительно севернее и не может быть зафиксировано LIS.

Это наглядно демонстрирует распределение количества разрядов для лета 1996 г., (см., рис. 3.15), полученное спутником Optical Transient Detector (OTD) аналогичным LIS, который не имел широтных ограничения определения положений молниевых вспышек (<http://thunder.msfc.nasa.gov/data/OTDsummaries/index.html>). К сожалению, распределения, полученные OTD, не могут быть использованы для сопоставления с СНЧ данными УАС поскольку он закончил свою работу в 1999 году. Из анализа вариаций времен кульминации активностей мировых центров гроз можно заключить, что они вызваны сезонным дрейфом мировых грозных центров, и характеристики этого дрейфа не меняются на протяжении цикла солнечной активности.

Таким образом, наличие сезонного дрейфа источников подтверждается как результатами наблюдений на УАС, так и данными литературы, и он должен учитываться при моделировании грозовой активности. Анализ СНЧ

данных является эффективным способом мониторинга величин сезонных дрейфов гроз. Кроме того, как показано выше, оценки величин сезонного дрейфа по данным СНЧ наблюдений обладают большей достоверностью, чем существующие на сегодняшний день спутниковые средства диагностики в оптическом диапазоне.

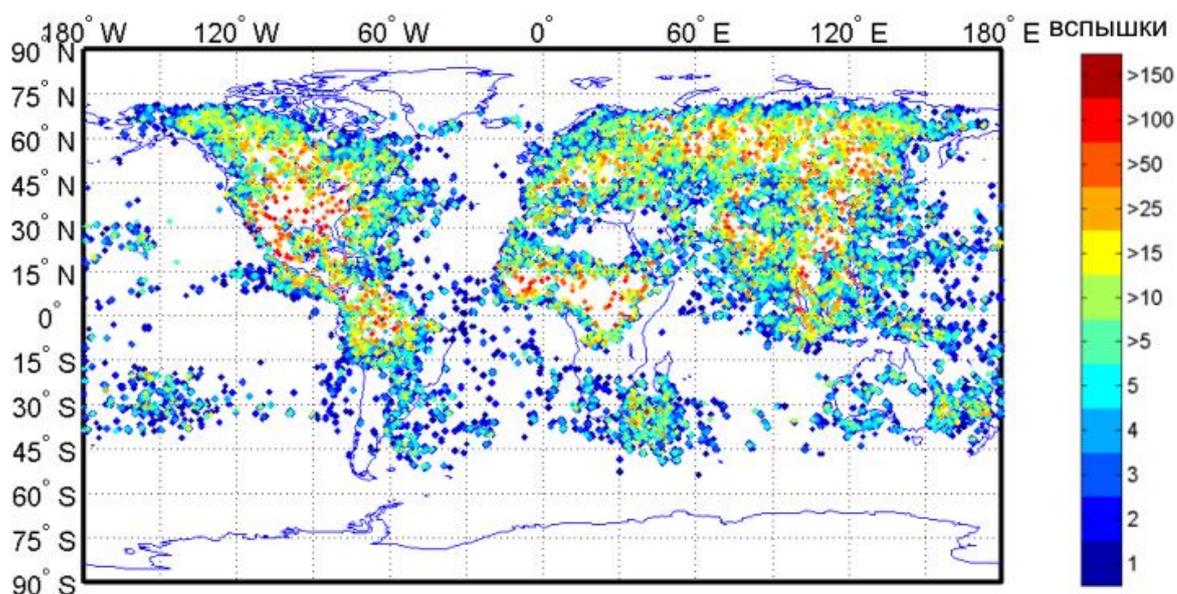


Рисунок 3.15 – Пространственное распределение количества вспышек молний летом 1996, по данным спутника OTD

Далее представлены результаты анализа пиковых частот и интенсивностей сигналов ШР по результатам изменений на УАС за время полного солнечного цикла. Следует отметить, что имеется несколько публикаций, в которых исследовано поведение пиковых частот максимумов ШР за время солнечного цикла. В этих работах подтверждено наличие долгосрочных изменений резонансных частот. Такие вариации могут быть связаны как с изменениями характеристик самого резонатора, так и с систематическими смещениями источников на протяжении солнечного цикла. Идентифицировать преобладающий механизм можно сравнив результаты синхронных наблюдений в разных полушариях. Синфазные вариации частот будут соответствовать изменениям в резонаторе, а противофазные -

смещениям центров. Результаты наблюдений показали, что как в северном [125, 213], так и в южном полушарии [125] пиковые частоты изменяются аналогичным образом синфазно с солнечной активностью. Это указывает на преобладание первого механизма – изменение свойств среды распространения (ионосферной границы резонатора) за время солнечного цикла. Следует отметить, что анализ изменений времен кульминации грозových центров по данным наблюдений на УАС, описанный выше, также не обнаруживает систематических смещений времен кульминаций. Однако это не означает, что долгосрочные систематические дрейфы источников полностью отсутствуют. Пиковые частоты ШР, наблюдаемые в разных полушариях [125, 213], демонстрируют тенденцию к синфазности, однако могут содержать также и некоторую противофазную компоненту. В то же время изменения времен кульминаций чувствительны к долготным дрейфам источника и поэтому систематические смещения вдоль меридиана могут слабо влиять на времена кульминаций. В дополнении к этому, в литературе существуют свидетельства долгосрочных систематических смещений положений мировых грозových центров. Например, авторы работы [214] связывают их с эффектом глобального потепления. Таким образом, механизмы, приводящие к появлению вариаций пиковых частот изучены недостаточно и требуют дополнительных как экспериментальных, так и теоретических исследований.

Анализ вариаций параметров ШР по данным наблюдений на УАС показал наличие, как систематических изменений пиковых частот, так и долгосрочной вариации интенсивности (см., рис 3.16.а-б). Оказалось, что все эти величины изменяются синхронно с индексами солнечной активности (см., рис 3.16.в). Стоит отметить, что экспериментальные данные о долгосрочных изменениях интенсивности, представленные автором в работах [36, 197, 200, 201] на момент публикации являлись первым литературным свидетельством непрерывных измерений такого типа, выполненных на протяжении полного цикла солнечной активности.

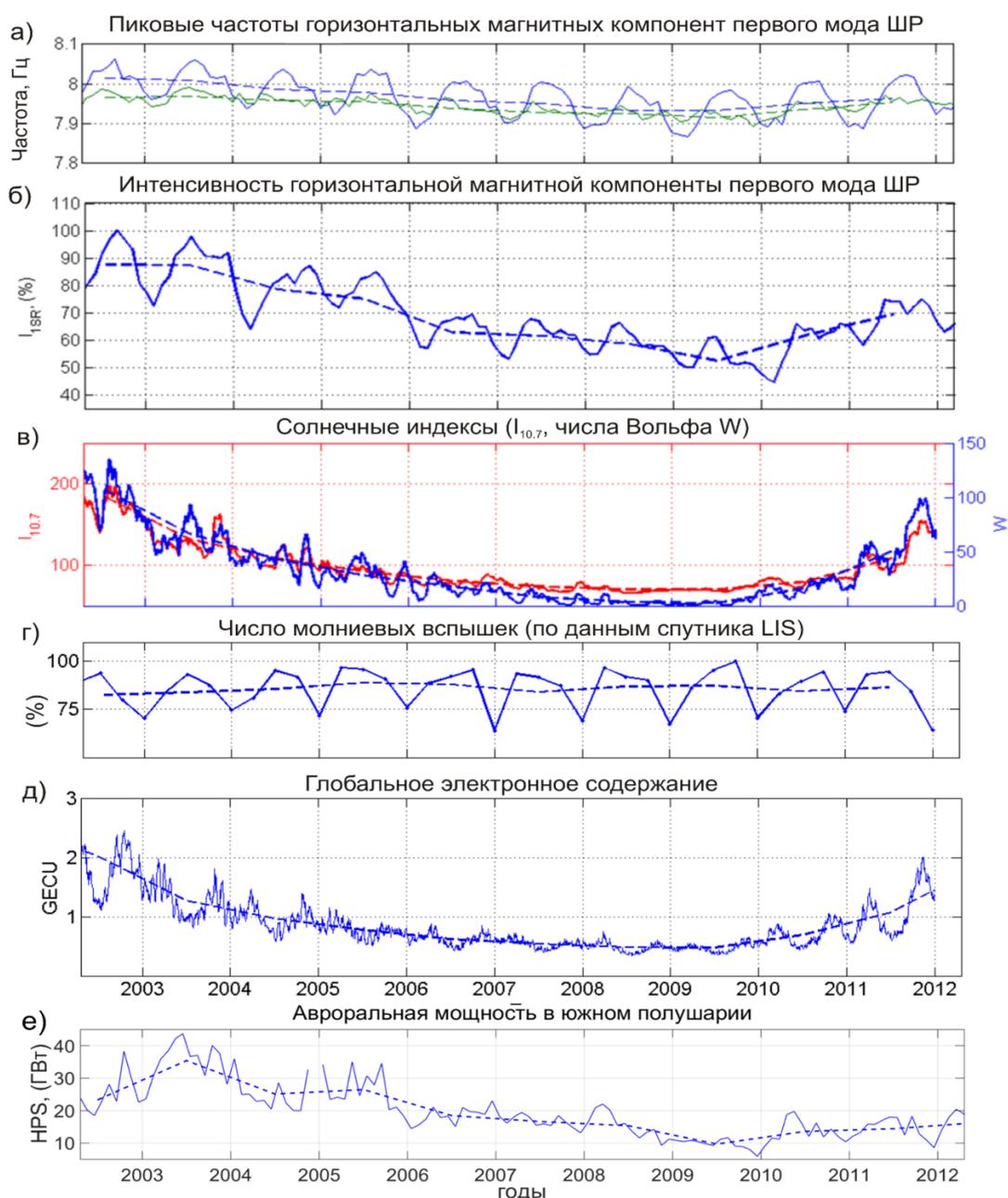


Рисунок 3.16 – Вариации за время солнечного цикла: а) пиковых частот первого мода ШР для магнитных компонент СЮ (синим) и ЗВ (зеленым) по данным УАС. б) нормированной интенсивности полной горизонтальной компоненты магнитного поля для первого мода ШР по данным УАС; в) солнечных индексов  $I_{10.7}$  (красным) и чисел Вольфа  $W$  (синим); г) нормированного числа молниевых вспышек по данным спутника LIS. Усредненная по сезонам (непрерывная) и среднегодовая (штриховая) линии; д) глобального электронного содержания; е) авроральная мощность для северного полушария. На панелях а), б), в), д) и е) среднемесячные

зависимости изображены непрерывными линиями, а среднегодовые – штриховыми.

Для определения механизма, вызывающего систематические вариации интенсивности сигналов ШР, были привлечены данные оптических измерений спутника LIS о распределениях молниевых вспышек в тропической зоне, усредненные по сезонам и годам (рис. 3.16.г). Как видно из рисунка на протяжении солнечного цикла среднегодовое число вспышек менялось не существенно.

Это указывает на изменение свойств резонатора Земля-ионосфера, как основную причину вариаций интенсивности. Следует также отметить, что активности грозových центров, рассчитанные по данным измерений на УАС, используя формулы (3.30-3.32), ведут себя аналогично интенсивностям и солнечным индексам. Это происходит потому, что кроме токовых моментов разрядов они согласно своему определению (3.19) содержат характеристики резонатора, которые изменяются в течении солнечного цикла.

Так, диагональный элемент матрицы поверхностного импеданса  $|z_1|$  гиротропной ионосферы записывается как:

$$z_1 = \frac{z_0}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \rho^2}} \quad (3.34)$$

где:  $z_0 = \sqrt{i\omega\nu_{eff}/\omega_0^2}$  - поверхностный импеданс изотропной ионосферы;

$\rho = \omega_r/\nu_{eff}$  - параметр гиротропии;

$\omega_r$  - радиальная составляющая гирочастоты электронов;

$\nu_{eff}$  - эффективная частота их столкновений;

$\omega_0$  - частота Ленгмюра на высоте верхней стенки резонатора.

В то время как большинство параметров ( $\omega_r, \nu_{eff}, \rho$ ), входящих в (3.34) мало меняются в течении солнечного цикла, величина  $\omega_0$  подвержена

значительным изменениям. Это иллюстрирует долгосрочная вариация глобального электронного содержания ионосферы (ГЕС) Земли, рассчитанная в соответствии с [215] и изображенная на рис. 3.16.д. Видно, что величина ГЕС в течение солнечного цикла ведет себя аналогично поведению интенсивности первого максимума ШР и индексам солнечной активности. Таким образом, определение активности грозового центра (3.19) включает также характеристики среды, которые, как показывают наблюдения, изменяются на протяжении солнечного цикла. Эти изменения должны быть учтены при расчетах мировой грозовой активности, выполняемых, например, для оценки эффектов глобального потепления.

#### 3.4 Возможные механизмы долгосрочных вариаций пиковых частот и интенсивностей

Далее проанализированы возможные механизмы, приводящие к долгосрочным вариациям пиковых частот и интенсивностей в зависимости от солнечной активности. Наиболее вероятная причина изменений частот и интенсивностей ШР, описана в [4] и связана с ионизацией ионосферы вблизи нижней электрической характеристической высоты, введенной в предыдущем подразделе выражением (3.3). Как известно [216, 217] ионизация на этих высотах поддерживается преимущественно за счет галактических космических лучей. При увеличении активности, средняя скорость солнечного ветра также увеличивается, и он “выдувает” галактическое излучение из Солнечной системы. Это так называемый Форбуш - эффект. Таким образом, активное Солнце которое, как известно, увеличивает плотность плазмы в средней и верхней ионосфере, при этом способствует уменьшению ионизации в нижней ионосфере в диапазоне высот важном для формирования ШР.

В качестве подтверждения такого механизма можно упомянуть, что долгосрочные антарктические измерения в диапазоне ОНЧ показали похожие изменения амплитуды радиосигналов ОНЧ станций и интенсивности

природных шумов [216, 218, 219, 220]. Аналогично поведению полей ШР, интенсивность ОНЧ шумов и амплитуда сигналов радиостанций увеличивается на 3-4 дБ синхронно с ростом солнечной активности. Современные аэрономические наблюдения также демонстрируют изменения плотности плазмы на высотах, близких к  $h_E$ . Расчеты, выполненные в работе [221] показали, что увеличение рентгеновского и гамма излучения модифицирует ионосферу на высотах ниже 65-70 км.

Следует также указать и другой возможный механизм влияния изменений солнечной активности на характеристики нижней ионосферы, который может приводить к долгосрочным вариациям параметров ШР. Речь идет о модификации параметров ионосферы вблизи верхней магнитной характеристической высоты  $h_M$  см., (3.4). Такой механизм был проанализирован и сопоставлен с данными долгосрочных наблюдений пиковых частот ШР в работе [125]. Известно, что вблизи магнитной характеристической высоты (диапазон высот  $\sim 90 - 100$  км) основным ионизирующим агентом [222, 223] является поток солнечного рентгеновского излучения в диапазоне 2 – 100 А. В время солнечного цикла этот поток изменяется на несколько порядков, что, как указывается в [125], может приводить к значительным (до 10 раз) вариациям проводимости на высоте 90 км. Такие существенные вариации проводимости, должны приводить к большим изменениям пиковых частот, чем это зафиксировано экспериментально. По-видимому, вклад в вариации параметров ШР вносят изменения свойств ионосферы вблизи обеих характеристических высот  $h_E$  и  $h_M$ , а вопрос о том какой механизм является преобладающим, нуждается в дополнительном экспериментальном и теоретическом исследовании.

Данные СНЧ наблюдений на УАС содержат информацию, как о пиковых частотах, так и об интенсивностях мод ШР. Поэтому, для уточнения механизмов, приводящих к долгосрочным изменениям параметров ШР, можно выполнить независимые модельные оценки изменений интенсивности и

пиковых частот, а затем сравнить полученные результаты. Такие расчеты выполнены в работе [4]. Для проведения вычислений использована модель изотропного резонатора Земля – ионосфера, введенная в предыдущем подразделе (см., выражения (3.2-3.6)). Согласно этой модели вариации пиковых частот и интенсивности связаны с изменением только одного параметра -  $h_{KNEE}$ . При этом изменяется только электрическая характеристическая высота  $h_E$ , вариации которой определяются величиной потока галактических космических лучей. При моделировании источника задавалось реалистичное распределение интенсивности мировых гроз, полученное космическим аппаратом ОТД [107]. Пространственное разрешение карты составляет  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ . ОТД данные использовались для расчета общего числа вспышек, приходящихся в год на каждую пространственную ячейку карты. Рассчитывалась полная энергия горизонтальной компоненты магнитного поля, произведенная каждой ячейкой (компоненты поля  $H_{xx}$  и  $H_{yy}$  на заданной частоте  $f$ ). Далее они умножались на общее количество вспышек для соответствующей ячейки. Результирующее поле рассчитывалось как суперпозиция полей от всех ячеек. Для вычислений использовались формулы, приведенные в разделе 4 книги [76]. Затем, частота менялась, вычислялась новая постоянная распространения  $\nu(f)$  (см., формулу (3.2)) и соответствующие компоненты полей. Повторение процедуры для сетки частот позволило соавторам работы [4] рассчитать спектры мощности компонент поля. Рассмотрены вариации  $h_{KNEE}$ , вызванные изменениями высоты колена от 45 до 65 км с шагом  $\delta h_{KNEE} = 1$  км, при стандартной величине  $h_{KNEE} = 55$  км. Все остальные параметры профиля проводимости задавались постоянными. После вычисления спектров мощности, они использовались для расчета карт напряженности магнитного поля в зависимости от частоты и высоты “колена”. Карты для компонент магнитного поля первого мода ШР  $H_{xx}$  и  $H_{yy}$  показаны на рис. 3.17.а.

Следует отметить, что небольшие изменения высоты “колена” приводят к заметным изменениям пиковых частот и мощности, оба параметра растут с повышением этой характеристической высоты. Как видно из рисунка, вариации пиковых частот двух ортогональных компонент поля ведут себя аналогично. Отклонение кривых возникает вследствие различных ориентаций магнитных сенсоров, диаграмма направленности которых в азимутальной плоскости имеет форму “восьмерки”.

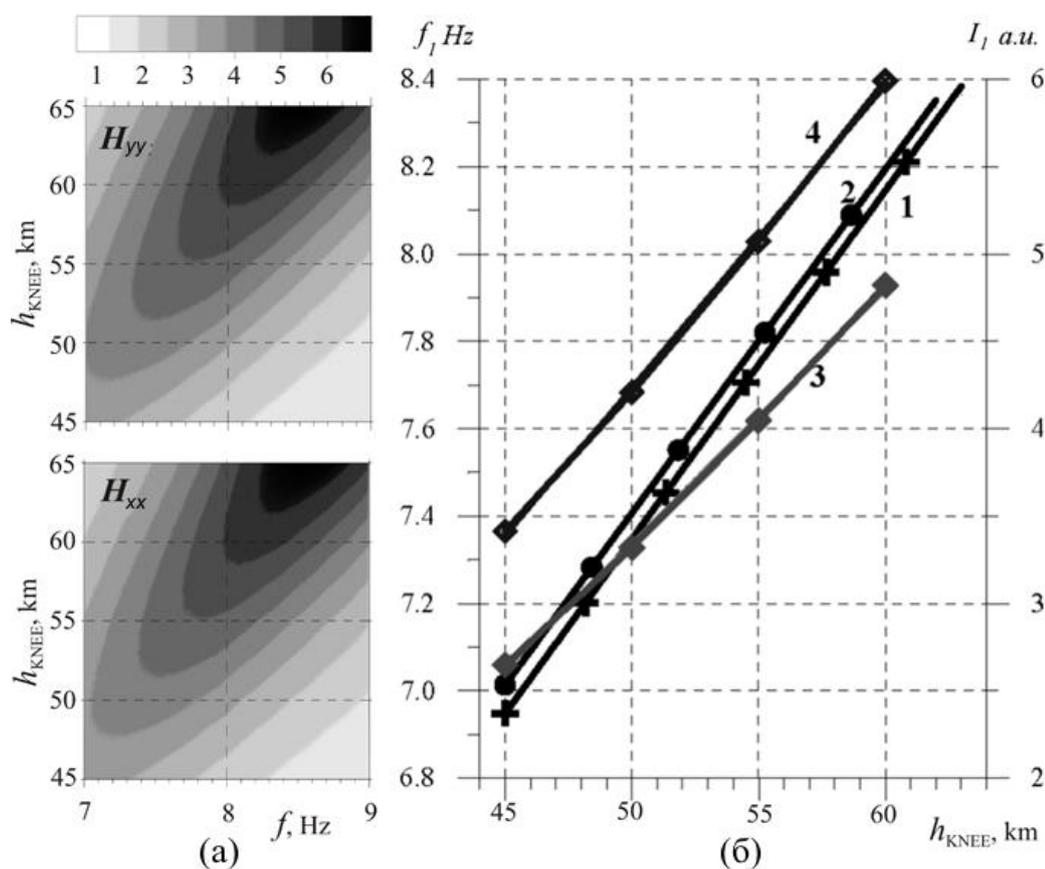


Рисунок 3.17 – (а) спектры мощности магнитной компоненты ШР сигналов в зависимости от изменений высоты колена; (б) зависимость пиковой частоты и интенсивности первого мода ШР от высоты колен: кривая 1 -  $f_1$  для компоненты поля  $H_{yy}$ ; кривая 2 -  $f_1$  для компоненты поля  $H_{xx}$ ; кривые 3 и 4 интенсивности компонент поля  $H_{xx}$  и  $H_{yy}$  соответственно.

В результате диаграмма направленности “сворачивается” с реальным распределением активности мировых гроз, а различные компоненты поля оказываются чувствительными к разным грозовым центрам. Интенсивности компонент, как и пиковые частоты, изменяются подобным образом, однако для разных компонент они достаточно сильно разнесены. Эти отклонения обусловлены наличием диаграмм направленности магнитных антенн: они возникают из-за разницы расстояний до источников поля в Африке (компонента СЮ), Америке и Юго-Восточной Азии (компонента ЗВ) в сочетании с изменениями активностей источников. Формулы для линейных функций, вписанных методом наименьших квадратов в модельные данные приведены ниже:

$$f_1 = c_0 + c_1 \cdot h_{KNEE} \quad (3.35)$$

$$I_1 = g_0 + g_1 \cdot h_{KNEE} \quad (3.36)$$

Коэффициенты в уравнении (3.35)  $c_0 = 3.35768$ ;  $c_1 = 7.98 \times 10^{-2}$  для компоненты поля  $H_{yy}$  и  $c_0 = 3.46903$ ;  $c_1 = 7.88 \times 10^{-2}$  для компоненты поля  $H_{xx}$ . Частота в уравнении (3.35) измеряется в герцах, а высота колена в километрах. Коэффициенты в уравнении (3.36)  $g_0 = -4.34928$ ;  $g_1 = 0.171802$  относятся к компоненте поля  $H_{yy}$ , а  $g_0 = -3.9003$ ;  $g_1 = 0.14492$  соответствуют компоненте  $H_{xx}$ .

Интенсивность в уравнении (3.36) измеряется в относительных единицах, а высота колена в километрах. Если усреднить коэффициенты  $g_k$  в уравнении (3.36) по компонентам поля и выразить модельную спектральную плотность в абсолютных единицах, то получатся следующие значения:  $g_0 = -0.467$ ;  $g_1 = 1.793 \times 10^{-2}$ . Эти коэффициенты обеспечивают представление интенсивности в  $(\text{пТл})^2/\text{Гц}$ , что позволяет провести сравнение модельных и экспериментальных данных.

Формулы (3.35-3.36) использованы для интерпретации долгосрочных вариаций пиковых частот и интенсивности, наблюдаемых на УАС (рис. 3.17.а,б). С их помощью получены три независимые оценки высоты колена, которые изображены на рис. 3.18. Рисунок демонстрирует существенные отклонения высот колена, рассчитанных из пиковых частот и интенсивности. При этом отличие кривых 1 и 2 весьма мало и составляет около 1 км при средней высоте колена около 57 км. Скорее всего, эти отклонения возникают из-за того, что реальное пространственное распределение грозовой активности известно недостаточно хорошо. В то же время, отклонение от средней высоты колена не превышает 1%, что можно считать неплохим совпадением.

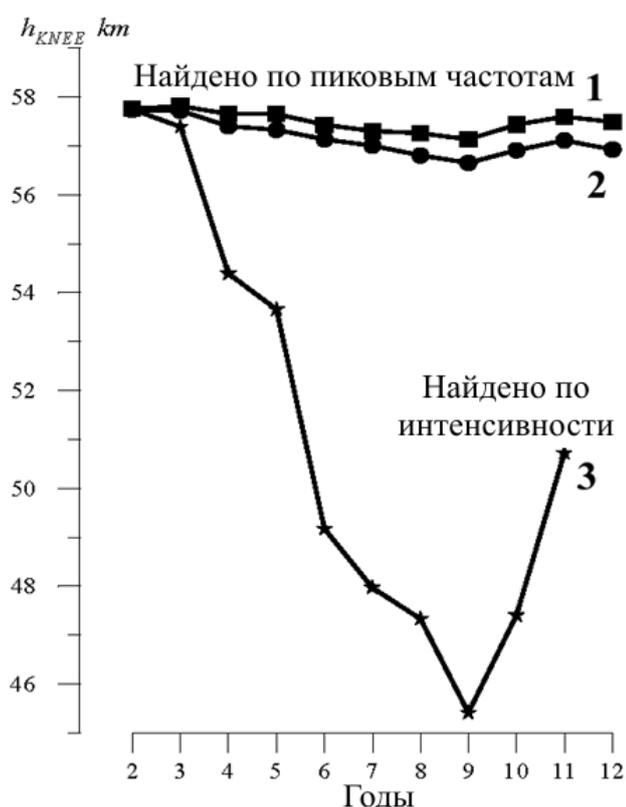


Рисунок 3.18 – Долговременные многолетние вариации высоты колена, полученные: 1 – из пиковой частоты компоненты  $H_{yy}$ ; кривая 2 – из пиковой частоты компоненты  $H_{xx}$ ; 3 - интенсивности горизонтального магнитного поля

Вариации  $h_{KNEE}$ , вычисленные по интенсивности, находятся за пределами реалистичных изменений для средних и низких широт. Однако, следует учитывать, что УАС находится в полярной области, где величина изменений высоты колена может быть больше, чем в средних и низких широтах, из-за влияния энергичных заряженных частиц, движущихся вдоль магнитных силовых линий [37] которые могут значительно модифицировать профиль проводимости в нижней ионосфере [224]. В то же время, эти изменения ограничены полярными районами, и не имеют отношения к поведению ионосферы в средних и низких широтах, а, следовательно, не могут быть объяснены в рамках используемой здесь планетарной модели ионосферы.

Величина вариации  $h_{KNEE}$  вычисленная по изменениям интенсивности ШР, которая значительная превышает аналогичные оценки по пиковым частотам, получена в предположении о фиксированной интенсивности глобальной грозовой активности. Это противоречие может быть устранено, если предположить, что наблюдаемое уменьшение интенсивности ШР связано как с уменьшением высоты колена  $h_{KNEE}$  на 1 км (что соответствует расчетам по вариациям пиковых частот), так и с падением интенсивности мировых гроз в минимуме солнечного цикла. Можно предположить, что переменная составляющая солнечного излучения способна привести к изменению температуры поверхности планеты, в первую очередь, температуры почвы на континентах, где сосредоточены грозы. Отношение между изменениями температуры поверхности в тропиках и кумулятивной интенсивности ШР сигналов проанализированы в работах [204, 225]. Согласно этому анализу имеет место высокая корреляция между сезонными изменениями интенсивности резонансных сигналов (шумановская обсерватория располагалась в Японии) и поверхностной температурой в средних широтах. В работах показано, что долгосрочные тренды интенсивности резонансов вели себя аналогично изменениям поверхностной температуры в тропическом поясе ( $\pm 20^\circ$  вокруг экватора). Их соотношение было близко к линейному, при

представлении интенсивности резонансов в логарифмической шкале. Коэффициент корреляции был равен 0,68 для серии данных продолжительностью в 43 месяца.

Этот результат использован для оценки возможных долгосрочных изменений температуры. Пусть, соотношение между температурой поверхности в тропиках и интенсивностью ШР сигналов, установленное в работах [204, 225], сохраняется независимо от обсерватории. Соответствующие данные приведены на рис. 3.19. (который взят из работы [204]). Кривая 1 соответствует изменению температуры почвы  $\Delta T^{\circ}\text{C}$  в тропическом поясе. Соответствующая долгосрочная вариация интенсивности сигнала ШР  $\Delta I$  изображена кривой 2 (интенсивность приведена в дБ). Линейная регрессия между интенсивностью ШР и температурой в тропиках (линия 3) определяется следующим соотношением:

$$\Delta T[^{\circ}\text{C}] = 0.0177 + 0.4845 \cdot \Delta I [\text{dB}] \quad (3.37)$$

Отметим, что эти результаты согласуются с данными авторов работы [219]. Выполненный в ней анализ долгосрочных изменений уровня естественных шумов в Антарктиде для ОНЧ диапазона вблизи частоты 10 кГц показал, что наблюдалось повышение интенсивности шумов на 10% ( $\sim 0,5$  дБ). Авторы связывали такое поведение с увеличением глобальной температуры на  $\sim 1^{\circ}\text{C}$ , в период повышения солнечной активности. Оценки (3.37) показывают, что изменение в интенсивности ШР на 1 дБ соответствует вариации поверхностной температуры в тропиках на  $\sim 0.5^{\circ}\text{C}$

Интенсивность первого мода ШР на УАС снизилась на  $\sim 3,2$  дБ с 2002 по 2009 годы синхронно с уменьшением солнечной активности (рис. 3.16.). Согласно формуле (3.37) это должно соответствовать уменьшению температуры в тропической зоне на  $\sim 1.6^{\circ}\text{C}$ , что является измеряемой величиной. Заметим, что это изменение относится к температуре почвы, в то

время как  $\sim 80\%$  тропической зоны занимают океаны. Поэтому уменьшение усредненной глобальной температуры можно оценить в  $\sim 0,3^\circ\text{C}$ , что также может быть измерено.

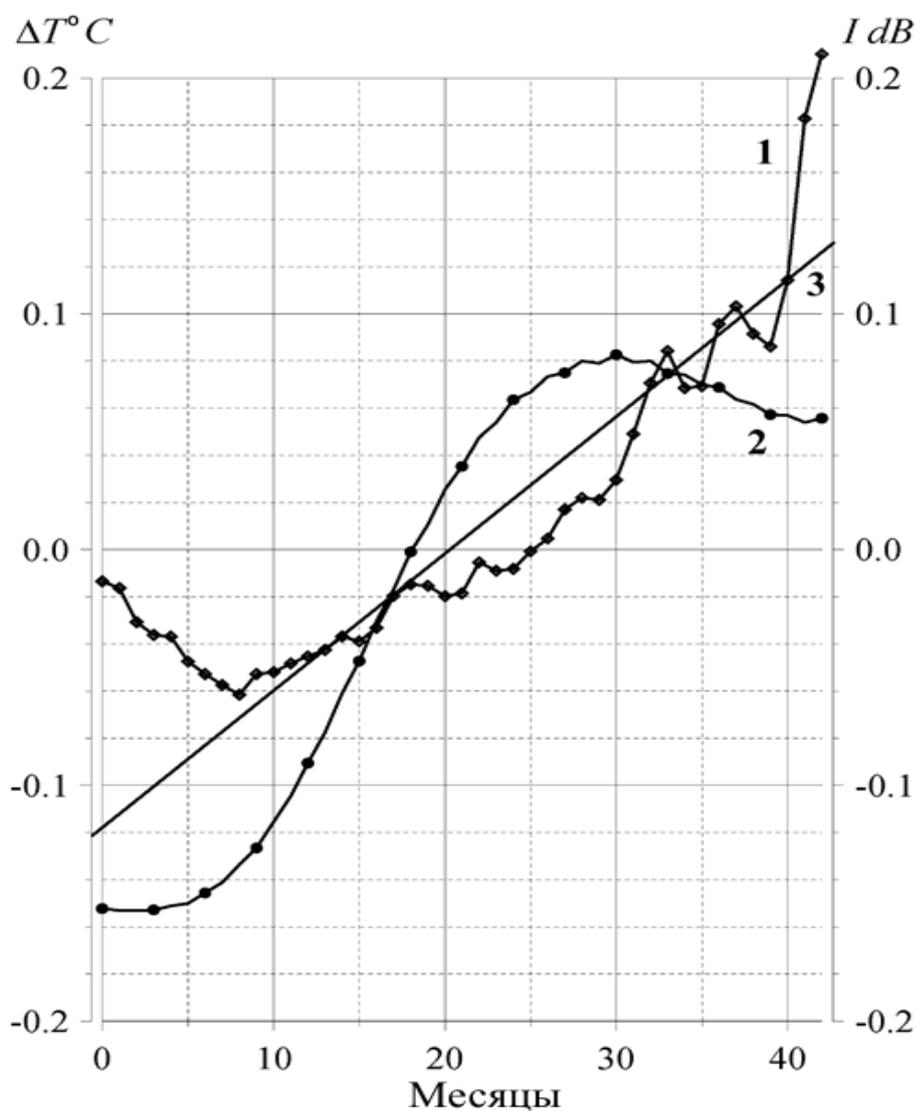


Рисунок 3.19 – Долговременные многолетние вариации: кривая 1 – температура почвы в экваториальной области; кривая 2 – кумулятивная интенсивность магнитной компоненты 1-го моду ШР, зарегистрированная в средних широтах; кривая 3 – аппроксимирующая функция найдена методом линейной регрессии (рисунок из работы [204])

Данная тенденция не имеет связи с глобальным потеплением или похолоданием, и представляет собой регулярные глобальные изменения

температуры почвы в тропиках, связанные с 11-летним циклом солнечной активности, которые не описаны в литературе и нуждаются в экспериментальном подтверждении.

Другой возможной причиной значительных изменений интенсивности ШР, полученных по данным измерений на УАС, как это уже ранее отмечалось в данном подразделе и описано в [37], могут быть локальные для УАС изменения характеристических высот, связанные с высыпаниями заряженных частиц в авроральной области. Как показано в работе [226] при учете неоднородности полости Земля-ионосфера вариации электрических и магнитных составляющих ШР полей определяются свойствами нижней ионосферы в окрестностях как источника, так и пункта наблюдения. На взятом из [37] рисунке 3.20 схематически изображены факторы, влияющие на верхнюю “магнитную” характеристическую высоту. Если в низких и средних широтах это преимущественно потоки солнечного рентгеновского излучения, то в высоких широтах большее влияние на высоты оказывают потоки заряженных частиц, движущиеся вдоль магнитных силовых линий. Протоны в основном ассоциируются с краткосрочными событиями случайной природы. Воздействие электронов на авроральные области в большей степени коррелирует с солнечным циклом и описывается величиной, называемой “авроральной мощностью” [227]. Авроральная мощность представляет собой оценку энергии высыпания энергичных частиц, измеряемую в Гигаваттах. Ее величина вычисляется по данным записей спектрометров (регистрируются электроны и ионы) над полярными областями на высотах порядка 850 км, осуществляемых спутниками DPMS и NOAA POES. Различают авроральную мощность северного HPN и южного полушарий HPS.

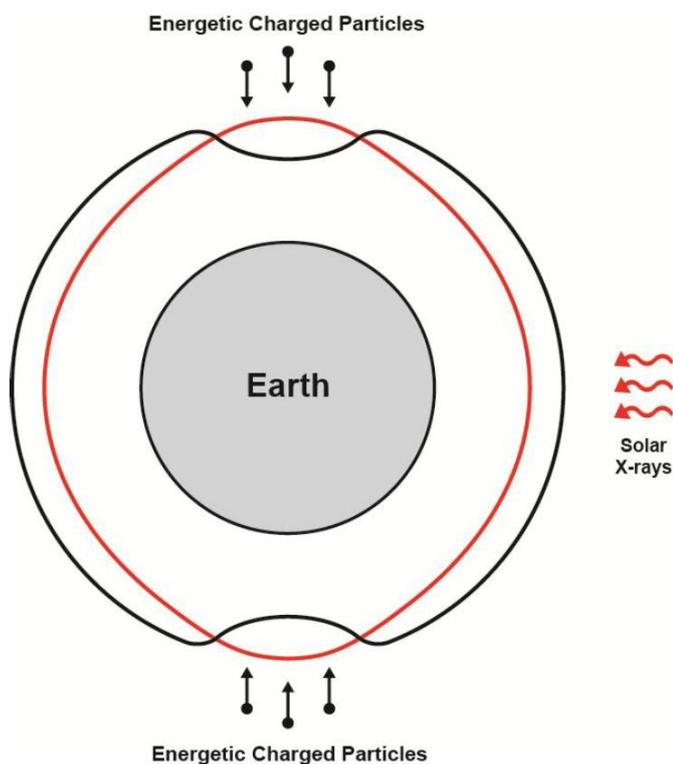


Рисунок 3.20 – Схема (взятая из [37]) модификации верхней характеристической высоты ионосферы за счет солнечного рентгеновского излучения (красная линия) и выпадения заряженных частиц (черная линия) в двух полярных регионах. Эти изменения высоты являются основным фактором, в среднем влияющим на интенсивность ШП во временном масштабе солнечного цикла

Используя данные, доступные в сети Интернет по ссылке <http://legacy-www.swpc.noaa.gov/ftplib/lists/hpi>, автором были оценены среднемесячные и среднегодовые вариации авроральной мощности южного полушария HPS за период, соответствующий ШП измерениям на УАС (см., рис. 3.16.е). Из рисунка видно, что изменения авроральной мощности являются значительными и хорошо коррелируют с долгосрочными вариациями параметров ШП (от максимума до минимума солнечного цикла HPS уменьшилось более чем в 3 раза). В то же время, начиная с минимума в 2009 г., HPS вырос не так сильно, как интенсивность ШП. Причиной этого несоответствия может быть то, что авроральная мощность оценивается по потоку электронов с энергиями меньше 20 КэВ, а основной вклад в изменения

проводимостей на высотах существенных для распространения ШР вносят электроны с энергиями 40 - 50 КэВ [224].

Приведенные в работе [37] наблюдательные данные о вариациях интенсивности магнитных компонент поля на частоте первого максимума ШР, полученные на обсерватории Род Айленд (Rhode Island) в средних широтах северного полушария ( $71.6^{\circ}\text{W}$ ,  $41.6^{\circ}\text{N}$ ) не демонстрируют таких значительных вариаций интенсивности, как обнаруженные на УАС (см., рис. 3.21). Незначительные изменения интенсивности, соответствующие вариации солнечной активности в одиннадцатилетнем цикле, наблюдаются там только в канале север-юг. Это может служить в пользу предположения о влиянии на интенсивность сигналов ШР на УАС локальных характеристик ионосферы в полярном регионе над станцией. В то же время, последнее предположение нуждается в дополнительном экспериментальном подтверждении поскольку из-за значительных пропусков данных на американской обсерватории их однозначная интерпретация затруднена. Важным представляется также усовершенствование феноменологической модели для учета влияния на характеристики ШР состояния локальной полярной ионосферы над УАС и выполнение соответствующих количественных оценок.

### 3.5 Поляризационная локация сверхмощных СНЧ всплесков

В предыдущих разделах рассматривалось и анализировалось интегральная составляющая СНЧ шумов в диапазоне ШР. В силу случайности моментов возникновения молниевых разрядов и их расположения, а также высокой частоты возникновения одиночных молний, импульс от каждого индивидуального разряда средней мощности на больших удалениях неразличим на общем шумоподобном фоне СНЧ излучения. Поэтому анализ шумовой составляющей сигналов позволяет оценивать только интегральные распределения грозовой активности по земному шару. Кроме в среднем стандартных молний, примерно несколько раз в минуту,

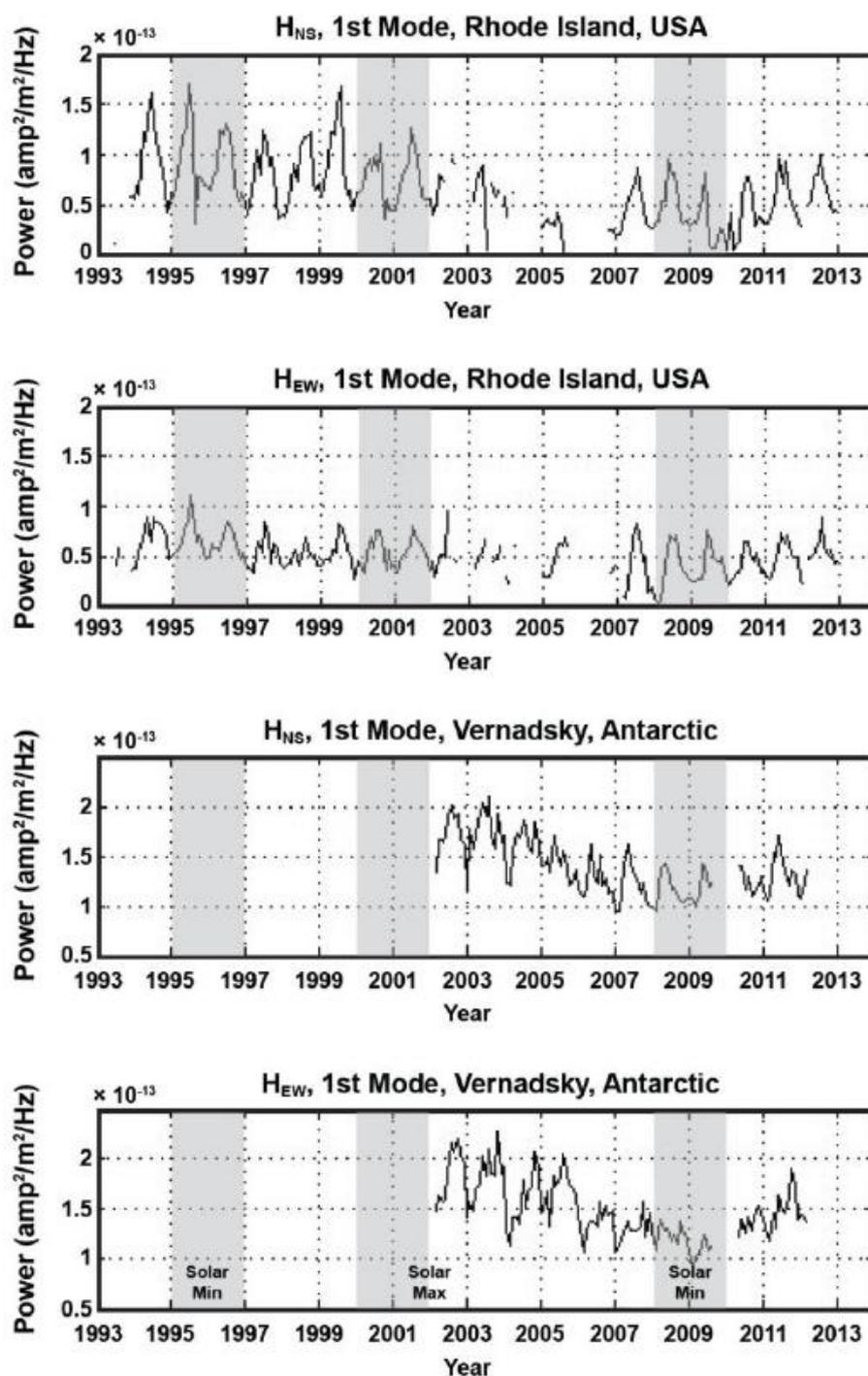


Рисунок 3.21 – Записи интенсивности горизонтальных магнитных компонент первой моды ШР вдоль направлений географические север-юг –  $H_{NS}$  и восток-запад -  $H_{WE}$ , полученные на обсерватории Род Айленд (США) и УАС (Антарктида). Рисунок взят из работы [37]

происходят сверхмощные разряды, называемые Q-всплесками, которые хорошо выделяются на общем шумовом фоне [133]. Исследования этих событий показывают, что Q-всплески в большом числе случаев можно связать со сверхмощными разрядами, такими как спрайты (sprite), голубые струи (blue jet) и эльфы (ELVES – “Emission of Light and Very Low Frequency Perturbations From Electro-magnetic Pulse Sources”) [228, 229]. Считается, что подобные события инициируются молниевыми разрядами и происходят над грозовыми облаками в термосфере, мезосфере и ионосфере на высотах от нескольких десятков, а в случае эльфов до ста и более километров. Первые оптические наблюдения разрядов были выполнены в 90-х годах прошлого века из космоса [230] и с поверхности земли [231]. По мере совершенствования оптических средств накоплено и проанализировано большое количество регистрации сверхмощных разрядов. Однако глобальные пространственные и временные распределения этих событий изучены еще недостаточно.

Для молниевых разрядов средней мощности, как уже отмечалось ранее, основными местами локализации являются три центра мировой грозовой активности, расположенные в приэкваториальных районах Юго-Восточной Азии, Африки и Америки. Максимум активности каждого из этих грозовых центров приходится на предзакатные часы местного времени [75, 76, 77]. Относительно небольшое число систематических данных о сверхмощной молниевой активности объясняется сложностью изучения этих событий в масштабах всей планеты. Непрерывный мониторинг спрайтов в оптическом диапазоне затруднен их коротким временем жизни – несколько десятков миллисекунд и менее, небольшим разносом по времени (несколько миллисекунд) между спрайтом и инициирующим его молниевым разрядом “облако-земля” [232]. Кроме того, возможности измерений в оптическом диапазоне с поверхности Земли ограничиваются облачным покровом, а при наблюдении из космоса – условиями освещенности. Подтверждением этому является, например то, что после открытия ELVES в 1990 году [233]

следующие успешные наблюдения были выполнены только через несколько лет [234].

Значительные успехи в понимании физики сверхмощных молниевых разрядов достигнуты при обработке наблюдений, проводимых одновременно в СНЧ и ОНЧ диапазонах. Используя данные, полученные в полосе частот 5 Гц-22 кГц, удается восстанавливать структуру токов молниевых разрядов и оценивать величину перенесенного им заряда [235, 236]. Синхронные оптические измерения дают информацию о временной эволюции светящихся областей сверхмощного разряда [237]. Однако, исследования в ОНЧ диапазоне имеют ограничения по дальности в связи с ростом затухания сигнала на этих частотах. Используя СНЧ данные, удастся диагностировать сверхмощные разряды на значительных расстояниях. Так, например, в работе [238] рассмотрен комбинированный метод СНЧ/ОНЧ, позволяющий обнаруживать сверхмощные события на расстояниях до 11 тыс. км от наблюдателя. Для получения глобальных распределений сверхмощных разрядов по всему Земному шару целесообразно использовать результаты наблюдений, производимых в СНЧ диапазоне. Тогда, ограничившись тремя [134, 136] либо даже двумя [135, 239] наблюдательными пунктами, можно оценивать планетарные распределения сверхмощной молниевой активности. В данном подразделе изложены материалы работ [1, 199] в которых реализовано восстановление пространственно-временных распределений сверхмощных разрядов. Для выполнения расчетов применена оригинальная методика поляризационной пеленгации источников всплесков, учитывающая поправки к пеленгам на источник, связанные с гиротропией резонатора Земля-ионосфера [117, 118]. Основной массив данных наблюдений накоплен на украинской антарктической станции “Академик Вернадский”. Также использованы данные двух японских измерительных установок расположенных в Антарктиде на станции “Сиова” и находящейся в Японии обсерватории Онагава. Эти данные были предоставлены нам японскими коллегами - соавторами публикаций [117, 118]. Использование двух

антарктических СНЧ установок обеспечивало минимальный уровень импульсных помех и шумов.

Приемный СНЧ комплекс, размещенный на УАС, уже описан в подразделе 2.Х, поэтому ниже кратко изложено описание японских установок. Как уже отмечалось, станция “Сиова” находится в Антарктиде, в высоких широтах (  $69.0^{\circ} S$ ,  $39.6^{\circ} E$  ), а обсерватория Онагава расположена в Японии в средних широтах (  $38.4^{\circ} N$ ,  $141.5^{\circ} E$  ). Оба измерительные комплексы оснащены идентичными горизонтальными магнитными индукционными зондами, которые сориентированы вдоль геомагнитных меридиана и параллели. Регистрировались  $H$  и  $D$  компоненты вариаций геомагнитного поля в полосе частот 1-100 Гц. В Антарктиде сигналы измерялись на острове Онгул, находящемся на расстоянии  $\sim 5$  км от основных помещений обсерватории, что обеспечивало дополнительную защиту от помех и давало возможность не применять режекцию излучений силовой установки станции на частотах сетевых гармоник. После усиления и передачи по системе телеметрии сигналы по каналам  $H$  и  $D$  совместно с IRIG-E временным кодом GPS приемника оцифровывались 16-ти разрядным АЦП с частотой 400 Гц. Запись временного кода GPS позволяла синхронизировать данные по шкале мирового времени (UT). На обсерватории Онагава основные отличия установки связаны с меньшим удалением сенсоров от компьютерной системы регистрации ( $\sim 200$  м) и использованием кабельной линии передачи данных. Из-за этого применялась аппаратная режекция гармоник силовой сети на частотах 50, 100 и 150 Гц. Кроме того, следует отметить больший уровень шумового фона и импульсных помех в Японии по сравнению с Антарктидой. Поэтому при выполнении совместной обработки данных в качестве основных использовались антарктические записи.

Для синхронной обработки были выбраны данные наблюдений с 27 по 30 октября 2002 г. Выбор такого временного интервала был обусловлен наличием для этого периода непрерывных суточных регистраций во всех трех наблюдательных пунктах. На первом этапе обработки, с целью исключения на

УАС влияния низкочастотных помех и гармоник местной силовой электросети, регистрации  $H_x(t)$ ,  $H_y(t)$  ортогональных магнитных компонент полей с датчиков юг-север и запад-восток были отфильтрованы цифровым полосовым фильтром 3-40 Гц и приведены к единой частоте дискретизации 100 Гц. Затем из всей совокупности данных были отобраны такие, для которых полная амплитуда горизонтальной компоненты магнитного поля,

$$H_{total}(t) = \sqrt{H_x^2(t) + H_y^2(t)}, \quad (3.38)$$

превышала заданную минимальную пороговую амплитуду  $H_{thr0} = 15$  пТл, а сами всплески в разных наблюдательных пунктах были разнесены во времени, не более чем на 0.08 сек. Такой разнос равен времени распространения СНЧ сигнала со скоростью 0.8 с [136, 240] между наиболее удаленными пунктами наблюдения УАС - Онагава (дистанция ~16600 км). Величина минимального порога  $H_{thr0}$  соответствовала приблизительно пятикратному превышению амплитуды всплеска над средними за сутки стандартами флуктуаций полной горизонтальной компоненты магнитного поля во всех наблюдательных пунктах.

Для определения координат источников всплесков применялась поляризационная обработка сигналов, суть которой состояла в следующем. По временным интервалам  $T = 1$  сек, содержащим всплески, строились комплексные спектры магнитных компонент сигналов в каждом из наблюдательных пунктов:

$$\tilde{H}_{x,y}(f) = \frac{1}{T} \int_0^T dt H_{x,y}(t) e^{-i2\pi ft} \equiv |\tilde{H}_{x,y}(f)| e^{i\delta_{x,y}(f)}, \quad (3.39)$$

где  $|\tilde{H}_{x,y}(f)|$  и  $\delta_{x,y}(f)$  спектральные амплитуды и фазы сигналов ортогональных компонент  $x$  и  $y$ . Затем рассчитывались параметры Стокса  $I(f)$ ,  $Q(f)$ ,  $U(f)$ ,  $V(f)$  [192]:

$$I(f) = |\tilde{H}_x(f)|^2 + |\tilde{H}_y(f)|^2, \quad Q(f) = |\tilde{H}_x(f)|^2 - |\tilde{H}_y(f)|^2, \quad (3.40)$$

$$U(f) = 2|\tilde{H}_x(f)\tilde{H}_y^*(f)|\cos(\delta_x - \delta_y), \quad V(f) = 2|\tilde{H}_x(f)\tilde{H}_y^*(f)|\sin(\delta_x - \delta_y).$$

В дальнейшем параметры Стокса использовались для определения коэффициента эллиптичности  $r(f)$  и позиционного угла эллипса поляризации  $\Psi(f)$ , в которые вычислялись в соответствии с (2.4-2.5). Как известно, абсолютная величина коэффициента эллиптичности определяется соотношением малой и большой полуосей эллипса поляризации, а знак - направлением вращения вектора поляризации. Во введенной ранее системе локальных декартовых координат  $(xy)$  положительным значениям  $r$  соответствует положительная разность фаз спектральных компонент,  $\delta_x - \delta_y > 0$ , приводящая к вращению вектора  $\tilde{\mathbf{H}}(f)$  по часовой стрелке, отрицательным  $r$  соответствует  $\delta_x - \delta_y < 0$  и вращение в противоположную сторону. Позиционный угол  $\Psi$  характеризует наклон большой оси эллипса поляризации к направлению на север, положительные значения отсчитывались по часовой стрелке.

Методики всех экспериментальных работ по пеленгации мировых грозных центров и сверхмощных молниевых разрядов в СНЧ диапазоне, известных из литературы, используют существенное упрощающее предположение о поперечном характере глобальных СНЧ полей. Такое предположение оправдано, однако, только в изотропном приближении, т.е. при достаточно слабом влиянии геомагнитного поля на свойства резонатора Земля-ионосфера. В этом случае, в связи с малостью высоты резонатора по

сравнению с длинами волн ШР и высокой проводимостью границ, эффективно возбуждаться в нем могут только СНЧ колебания ТМ-типа. Магнитная компонента таких колебаний поляризована линейно и ориентирована в горизонтальной плоскости по нормали к направлению на источник излучения [75]. В то же время целый ряд экспериментальных исследований (см., например, [2, 97, 241, 242]), убедительно демонстрирует эллиптический характер поляризации СНЧ полей в нижней, наиболее энергонесущей части диапазона. Такие поляризационные свойства сигналов обусловлены существенным влиянием постоянного геомагнитного поля и свидетельствуют о наличии у ШР полей заметной продольной составляющей, которая должна учитываться при восстановлении направления на источник по СНЧ данным.

Хотя сам факт отклонения нормали к фазовому фронту СНЧ колебаний в гиротропном резонаторе Земля-ионосфера от направления прихода волны был отмечен в литературе уже достаточно давно [75], однако количественное описание явления, рассмотренное ранее в этом разделе, было дано впоследствии в работах [2, 97]. Как описано ранее в данном разделе, гиротропия резонатора проявляется в “кажущемся” смещении всех источников излучения по долготе на угол  $\Delta\varphi(f)$  в сторону запада и в возбуждении эллиптической поляризации, которая также полностью описывается в терминах  $\Delta\varphi$ . Величина долготного смещения  $\Delta\varphi$  не зависит от координат источников и приемного пункта, а определяется лишь частотой СНЧ колебаний и соотношением гирочастоты электронов и частоты их соударений с нейтралами на высотах ионосферной границы резонатора. Также, связанное с гиротропией смещение  $\Delta\alpha_j(f)$  пеленга каждого  $j$ -го источника СНЧ излучения относительно его истинного значения  $\alpha_j$  и коэффициент эллиптичности  $r_j(f)$  равны между собой по величине, противоположны по знаку и описываются формулой,

$$r_j(f) = -\Delta\alpha_j(f) = -\Delta\varphi(f) \frac{\cos\theta - \cos\theta_j \cos\vartheta_j}{\sin^2 \vartheta_j} = -\Delta\varphi(f) \cos\beta_j \frac{\sin\theta_j}{\sin\vartheta_j}. \quad (3.41)$$

Здесь использована геоцентрическая сферическая система координат (см. рис. 3.22) с полярной осью Z, ориентированной на географический север, источнику сопоставляются координаты  $\{\theta_j, \varphi_j\}$ , приемному пункту -  $\{\theta, \varphi\}$ .

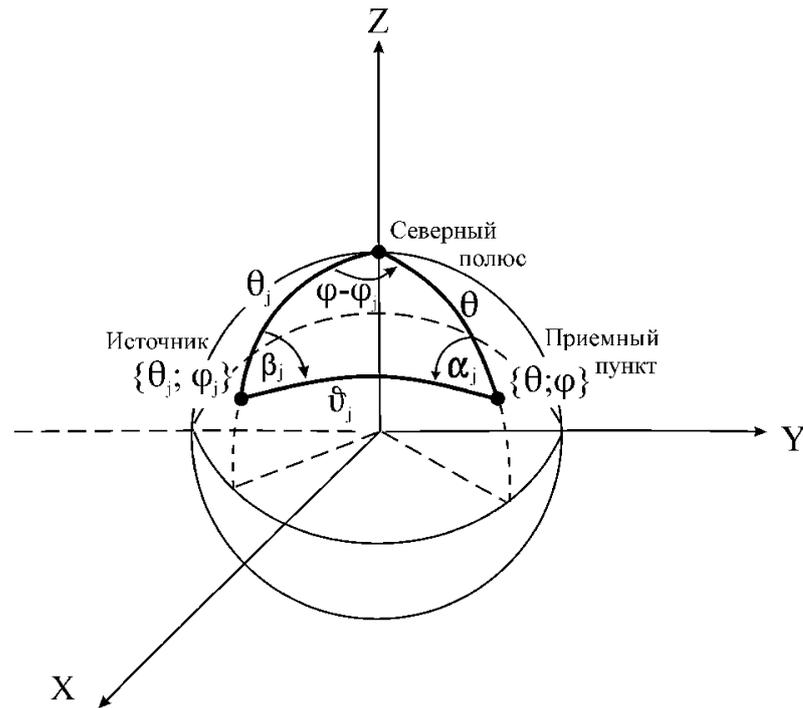


Рисунок 3.22 – Геоцентрическая сферическая система координат, используемая при расчете местоположений источников сверхмощных всплесков.

Направления на источник и на приемный пункт,  $\alpha_j, \beta_j$ , отсчитываются от севера, в качестве “положительных” приняты отсчеты по часовой стрелке. Указанные характеристики, а также угловое расстояние  $\vartheta_j$  между пунктами излучения и приема связаны с координатами этих пунктов известными соотношениями сферической тригонометрии:

$$\cos \alpha_j = \frac{\cos \theta_j - \cos \theta \cos \vartheta_j}{\sin \theta \sin \vartheta_j}, \quad \cos \beta_j = \frac{\cos \theta - \cos \theta_j \cos \vartheta_j}{\sin \theta_j \sin \vartheta_j},$$
(3.42)

$$\cos \vartheta_j = \cos \theta_j \cos \theta + \sin \theta_j \sin \theta \cos(\varphi - \varphi_j).$$

Как следует из формулы (3.41), значения  $r < 0$  (вращение вектора  $\tilde{\mathbf{H}}(f)$  против часовой стрелки) реализуются при углах  $\beta_j < \pi/2$ , значения  $r > 0$  (вращение по часовой стрелке) – при  $\beta_j > \pi/2$ . Линии смены знака  $r$  на поверхности сферы описываются, согласно (3.41-3.42), уравнением

$$\operatorname{tg} \theta_j = \operatorname{tg} \theta \cos(\varphi - \varphi_j).$$
(3.43)

Приведенные соотношения позволяют произвести коррекцию пеленга источника, восстановленного из СНЧ измерений. С ее учетом истинный пеленг источника  $\alpha_j$  может быть определен на основании формулы

$$\alpha_j(f) = \Psi_j(f) \pm \frac{\pi}{2} + r_j(f).$$
(3.44)

Выражение (3.44) определяет пеленг источника в локальной системе координат, связанной с ориентацией магнитных сенсоров в данном пункте наблюдения. Чтобы привести значение  $\alpha$  к единой “географической” координатной системе необходимо для пунктов Сиова и Онагава учесть величину склонения геомагнитного поля, определяющую угол поворота “геомагнитной” системы координат относительно “географической”. Следует также отметить, что величина  $\alpha$  определена с точностью до  $\pi$ . Поэтому она может быть использована для построения дуги большого круга, проходящего через точку наблюдения и источник, но не позволяет отделить прямой сигнал от кругосветного.

Выражения (ф-ла из P2, 3.38-3.44) использованы для определения коэффициентов эллиптичности и азимутов на источники всплесков с учетом поправки, вызванной гиротропией. Расчеты выполнялись для первой моды ШР. При определении пеленгов на источник и коэффициента эллиптичности использованы параметры Стокса, усредненные в интервале частот соответствующего спектрального максимума, 7-9 Гц. Координаты источников всплесков определялись методом триангуляции. Для каждого наблюдательного пункта восстанавливались дуги большого круга, соответствующие направлениям на источник, вычисленным согласно (3.44). Из-за наличия фоновых шумов определенные из эксперимента линии пеленга на источник, как правило, не пересекаются в одной точке. Поэтому оценивалось наиболее вероятное положение источника. Предполагалось, что ему соответствует минимум функционала невязок  $L_j^2$ , задаваемого как сумма квадратов расстояний  $L_{kj}(\theta_j, \varphi_j)$  от искомого положения  $j$ -го источника до линий пеленга восстановленных из  $k$ -ых пунктов наблюдения ( $k = 1, 2, 3$ ):

$$L_j^2 = \sum_{k=1}^3 L_{kj}^2(\theta_j, \varphi_j), \quad (3.45)$$

где  $\theta_j, \varphi_j$  - координаты  $j$ -го источника (широта и долгота). Минимизация функционала невязок (3.45) и определение наиболее вероятных координат источников осуществлялись численно. Для каждого всплеска рассчитывалось также среднее отклонение линий пеленга от наиболее вероятного положения источника  $l_j = \left( \sum_{k=1}^3 L_{kj}(\theta_j, \varphi_j) \right) / 3$ . Величины  $\langle l \rangle \sim 600$  км и  $\sigma_l = \sqrt{\langle (l_j - \langle l \rangle)^2 \rangle} \sim 500$  км, полученные путем усреднения по всем всплескам, зарегистрированным за время наблюдения, характеризуют среднюю ошибку определения положения источника. Рассчитывая ее как сумму  $\langle l \rangle + \sigma_l$ , получим оценку погрешности определения координат:  $\Delta D \sim 1100$  км. Она находится в хорошем соответствии с оценками погрешностей местоположений источников, выполненных

другими авторами по другим методикам и описанных в работах [134, 135, 136, 239]. Данная оценка достаточно эвристична. Для ее уточнения следует сопоставить координаты источников, восстановленных по описанной выше методике, с данными ОНЧ или оптических наблюдений, что является задачей будущих исследований. В то же время следует отметить достоинство рассмотренной методики, связанное с учетом “кажущегося” смещения линий пеленга на источник обусловленного гиротропией резонатора. Это смещение не учитывалось другими авторами, что должно было приводить к появлению систематической ошибки определения координат источников в их расчетах.

В силу сферической геометрии задачи, каждому положению источника соответствует его симметричный антипод. Выбор истинного положения из пары источник-антипод производился согласно методике, изложенной в работах [135, 136, 239], исходя из разности времен прихода переднего фронта импульса в приемные пункты. Для расчетов указанной разности использовались исходные широкополосные записи без цифровой фильтрации 3-40 Гц, которая приводит к уменьшению крутизны переднего фронта всплеска. Оценивая разность времен прихода импульса в два приемных пункта, и сопоставляя ее с различиями расстояний до источника и антипода, можно локализовать источник. В двухпозиционном варианте остается неоднозначность для разрядов, происходящих вблизи линии равных задержек до наблюдательных пунктов. При использовании трех приемных пунктов неоднозначность селекции источник - антипод отсутствует. Исключения составляют случаи, когда из-за недостаточной крутизны фронтов положение основного максимума не удастся определить с достаточной точностью. Такие всплески отбрасывались и в дальнейшем анализе не участвовали.

На рис. 3.23.а.д представлены кривые числа всплесков, зарегистрированных в пунктах наблюдения, амплитуда которых превышает пороговый уровень, отложенный по оси абсцисс. Кривые характеризуют скорость убывания числа всплесков с увеличением пороговой амплитуды. Рассматривались только антарктические установки, характеризовавшиеся минимальным уровнем импульсных и широкополосных помех. Результаты

приведены для диапазона амплитуд от 15 пТл до 65 пТл. При построении зависимостей рассматривались только те события, которые одновременно (на одно секундном интервале) наблюдались на обеих станциях, что уменьшало вероятность принятия локальной помехи за СНЧ всплеск.

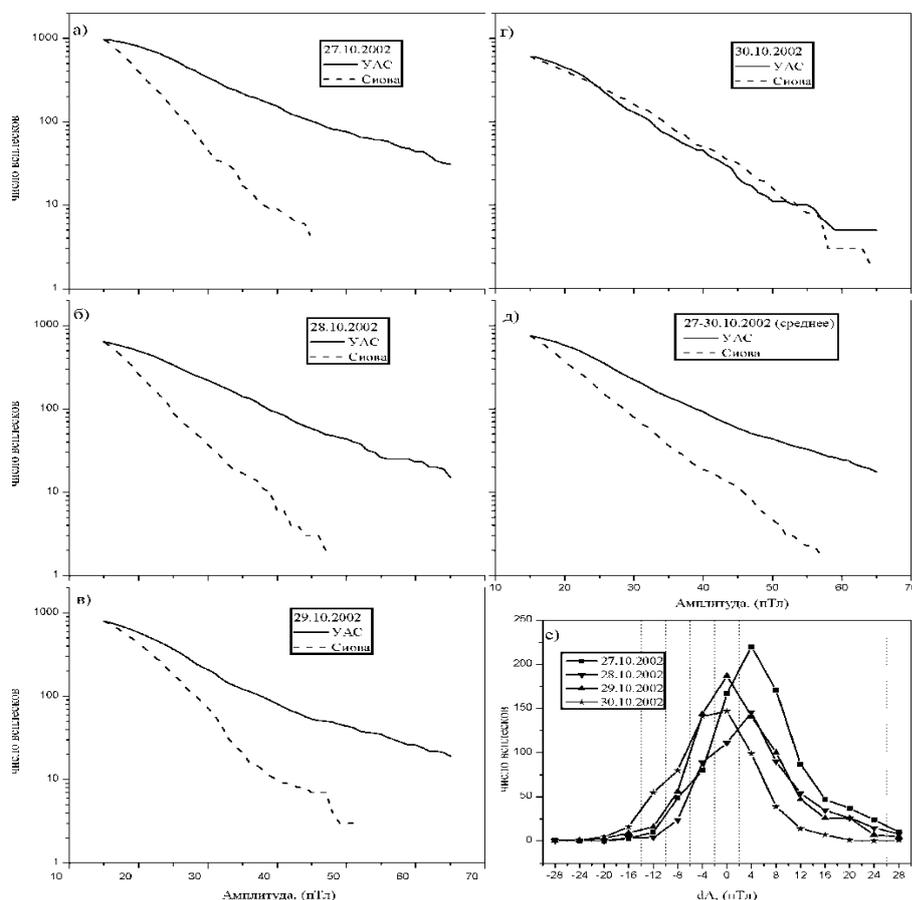


Рисунок 3.23 – Зависимость числа всплесков, регистрируемых на УАС и “Сиова”, от порогового уровня амплитуды (пТл) для: а) 27.10.2002; б) 28.10.2002; в) 29.10.2002; г) 30.10.2002; д) усредненные зависимости для 27-30.10.2002; е) гистограммы числа всплесков с одинаковой разностью амплитуд dA между УАС и Сиовой (шаг по амплитуде - 4 пТл).

На рис. 3.23.а-г показаны суточные зависимости с 27 по 30 октября 2002 г., на рис. 3.23.д – усредненная суточная зависимость для всего периода наблюдений. Как видно из рисунков, в среднем за сутки регистрируется около 800 “совпадающих по времени” сверхмощных всплесков с амплитудой больше 15 пТл. С увеличением пороговой амплитуды число всплесков экспоненциально

падает. Обращает на себя внимание тот факт, что различия в скоростях спадания числа всплесков наблюдаются как для разных суточных записей, так и в пределах одних и тех же суток, но для разных пунктов наблюдения. Так в период 27-29 октября скорость спадания числа всплесков для УАС выше, чем для «Сиова». В то же время, для 30 октября эти величины практически одинаковы в обоих наблюдательных пунктах. На рис. 3.23.е приведены полученные для суточных интервалов гистограммы числа всплесков с одинаковыми разностями амплитуд, регистрируемых на антарктических станциях «Академик Вернадский» и «Сиова».

Положительному смещению соответствует превышение амплитуды всплесков на УАС, отрицательному - на «Сиова». Видно, что 27-28 октября наблюдался «перекося» распределения в сторону УАС, для 30 октября - слабо выраженное смещение распределения в сторону «Сиова». 29 октября регистрировалась промежуточная форма распределения. Таким образом, анализ экспериментальных данных показывает, что наряду с общим для обоих пунктов экспоненциальным характером спадания количества всплесков с ростом пороговой амплитуды, наблюдаются различия в скоростях спадания и величинах амплитуд всплесков для разных пунктов и суток наблюдений.

Можно предположить, что несовпадения для разных суточных записей вызваны изменениями в активности разрядов ото дня ко дню, а отличия между станциями обусловлены различными расстояниями от наиболее активного для данных суток центра сверхмощных событий до пунктов наблюдения.

Рис. 3.24 иллюстрирует пространственные распределения разрядов, восстановленные с использованием описанного выше алгоритма многопозиционной поляризационно-временной селекции.

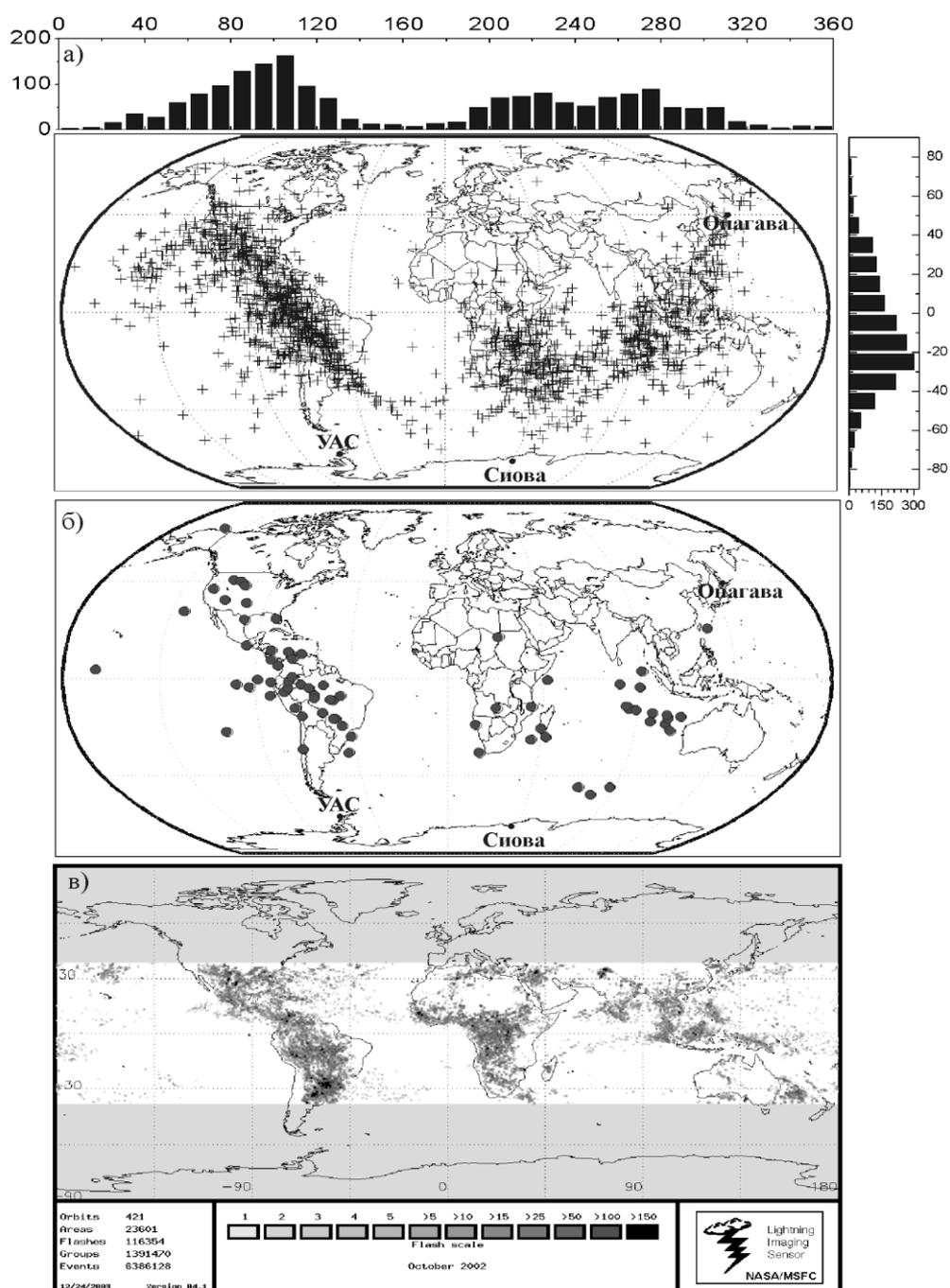


Рисунок 3.24 – Пространственные распределения молниевых разрядов: а) по данным СНЧ наблюдений 27-30 октября 2002 г. (всплески с амплитудой более 15 пТл); б) особо мощные события по данным СНЧ наблюдений за 27-30 октября (всплески с амплитудой на УАС более 60 пТл); в) спутниковые наблюдения в оптическом диапазоне, октябрь 2002 г., данные космического аппарата LIS

На рис. 3.24.а показаны положения источников всплесков с амплитудами более 15 пТл и соответствующие им гистограммы распределения числа источников по широте и долготе. На рис. 3.24.б изображены наиболее мощные события, амплитуда которых на УАС превысила 60 пТл. Видно, что источники группируются вблизи основных мировых грозовых центров. Для исследуемого временного интервала наиболее активным оказывается Американский центр (50.4 % от всех всплесков мощнее 15 пТл), за ним следует Африканский - 26.6 %, и Азиатский - 23 %. Из рис. 3.24.а видно, что УАС является ближайшим пунктом наблюдения к наиболее активному Американскому центру. Это может быть одной из причин описанного ранее эффекта превышения средней амплитуды всплесков на УАС над соответствующей характеристикой для станции “Сиова” (см. рис. 3.23).

Поскольку наблюдения осуществлялись при переходе от летних к зимним для северного полушария условиям, наблюдалось широтное смещение центров максимальной активности в южное полушарие [77, 110, 111, 136]. Как видно из рис. 3.24.а, максимальное число разрядов регистрировалось для диапазона широт 20-30° ю. ш., а широтный пояс, на который приходится основное количество источников, соответствует диапазону ( $-50^{\circ}, +40^{\circ}$ ) от экватора. На рис. 3.24.в приведено среднее для октября 2002 г. распределение числа грозовых разрядов, полученное по данным спутникового мониторинга в оптическом диапазоне (Рисунок получен из международной компьютерной сети Internet по адресу <http://thunder.msfc.nasa.gov/data/lisbrowse.html>).

Наблюдения производились с помощью космического аппарата LIS (Lightning Imaging Sensor) [89]. Видно, что места преимущественной локализации источников всплесков для Американского и Азиатского регионов (рис. 3.24.а) близки к положениям грозовых центров, восстановленных по данным оптических наблюдений (рис. 3.24.в). В то же время для Африканского региона сверхмощные молниевые разряды несколько смещены к юго-востоку. Наблюдаемые отличия могут быть обусловлены тем, что

распределения, изображенные на рис 3.24.а-б получены для сверхмощных событий, а карта на рис. 3.24.в, учитывает все молниевые разряды, зарегистрированные в оптическом диапазоне. Кроме того, определение местоположений разрядов по СНЧ данным выполнено только для 27-30 октября, а оптические измерения усреднены за весь октябрь 2002 г.

Рис. 3.25 демонстрирует пространственно-временные распределения источников всплесков с амплитудой более 15 пТл для 27-30 октября. При их расчете все сутки были разбиты на четыре интервала по 6 часов, для каждого из которых определялось пространственное распределение источников. Анализ данных, приведенных на рис. 3.25, показывает, что для каждого временного интервала существуют пространственные области преимущественной локализации источников мощных всплесков. Положения этих областей меняются в соответствии со сменой активностей мировых грозовых центров. Так число разрядов максимально в азиатском регионе с 6 UT до 12 UT (рис. 3.25.б), в африканском с 12 UT до 18 UT (рис. 3.25.в) и в американском с 18 UT до 24 UT (рис. 3.25.г). С 0 UT до 6 UT (рис. 3.25.а), когда ни один из мировых грозовых центров не находится в максимуме активности, источники всплесков формируют несколько областей. Основным остается Американский регион, как следствие кульминации активности этого грозового центра вблизи 21 UT.

Кроме того, разряды наблюдаются на юге, юго-востоке Африки и к юго-западу от Азиатского грозового центра. Несмотря на наличие для каждого временного интервала основного источника сверхмощных разрядов, они регистрируются и вблизи двух других мировых грозовых центров. Наблюдается также небольшое количество событий, удаленных от основных центров грозовой активности. Среди других особенностей расположения источников всплесков можно отметить широтное смещение активных зон в Азиатском и Африканском регионах к югу от экватора. В то же время для Американского региона, при некотором преобладании Южной Америки, активная область наблюдается и в Северной Америке.

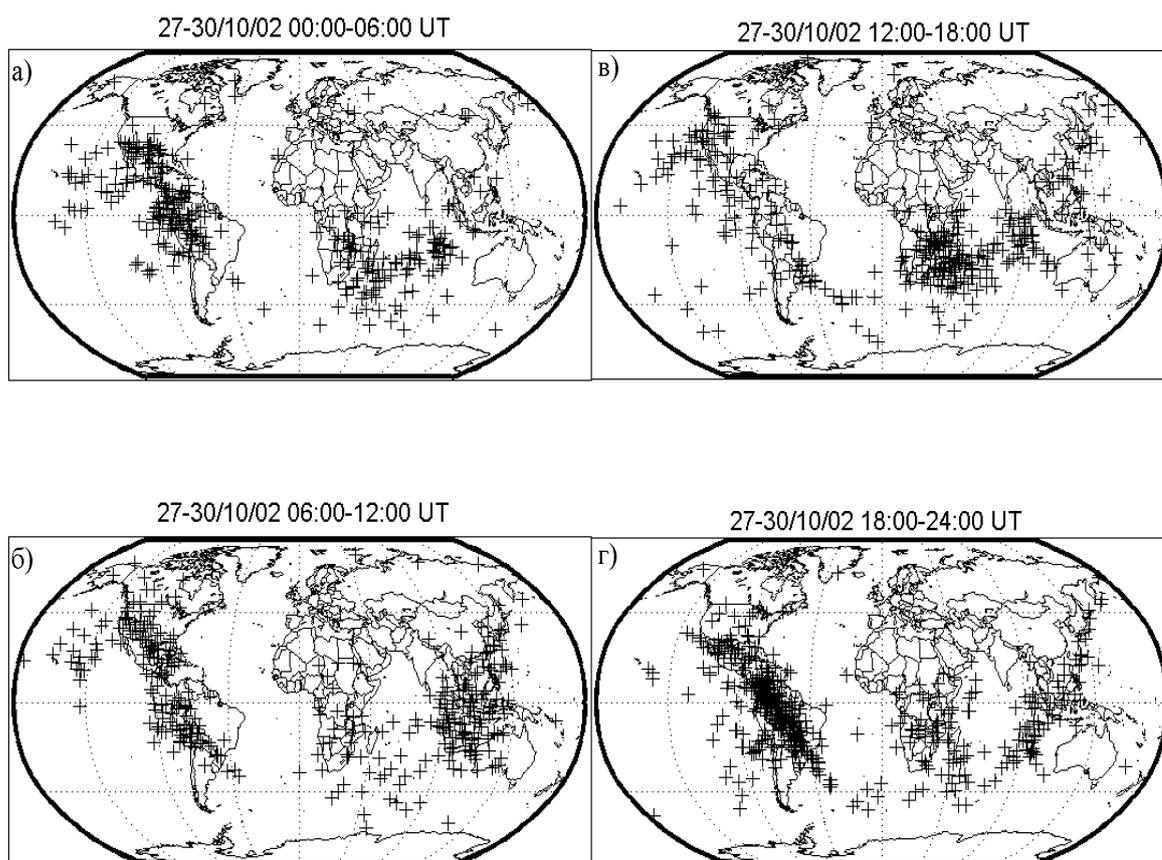


Рисунок 3.25 – Положения сверхмощных разрядов для 27-30 октября 2002 г. восстановленные для временных интервалов: а) 00:00-06:00 UT; б) 06:00-12:00 UT; в) 12:00-18:00 UT; г) 18:00-24:00 UT.

Отметим, что сходная геометрия активных областей присутствует и в картах, полученных в оптическом диапазоне (см., рис. 3.25.в). Таким образом, можно заключить, что пространственные положения и временной ход активностей мощных грозовых разрядов в целом повторяют соответствующие характеристики средней грозовой активности.

Далее рассмотрена величина “кажущегося” смещения координат источников всплесков, связанного с гиротропией резонатора Земля-ионосфера. Как указывалось выше, смещение  $\Delta\varphi(f)$  связано с коэффициентом эллиптичности  $r_j(f)$  соотношением (3.41). Расчеты  $\Delta\varphi$  на частоте первой моды ШР показали, что для 27-30 октября 2002 г., среднее

значение смещения  $\langle \Delta\varphi \rangle = 15.4^\circ$ , а его среднеквадратичное отклонение  $\sigma_{\Delta\varphi} = 2.7^\circ$ . Для широтного пояса ( $-50^\circ, +40^\circ$ ) от экватора, куда попадает большинство источников всплесков (см., рис. 3.24.а), это соответствует линейному смещению источника на 1100-1700 км. Данная величина несколько превышает оценку погрешности определения координат  $\Delta D \sim 1100$  км, следовательно, смещение достаточно значимо и должно учитываться при восстановлении координат источников сверхмощных молниевых разрядов.

### Выводы Раздела 3

В разделе 3 исследованы и представлены низкочастотные вариации характеристик полей ШР на временных интервалах - сутки, сезон, год и полный 11—ти летний цикл солнечной активности. Основным материалом для исследований был получен под руководством автора на Украинской антарктической станции “Академик Вернадский”. Следует отметить, рекордную продолжительность и непрерывность данных наблюдений, по минимальному числу пропусков они не имеют на сегодня аналогов в мире. Все регистрации СНЧ полей на УАС были подвергнуты “сквозной” спектральной и поляризационной обработке, выполненной по алгоритмам и пакетам прикладных программ разработанных автором и изложенных в предыдущем разделе. Полученные результаты применены для оценивания поведения характеристик мировой грозовой активности и резонансной полости Земля – ионосфера. Экспериментальные данные сопоставлены с рядом современных теоретических моделей ШР, учитывающих сезонные смещения источников и гиротропию резонатора. Основные результаты раздела состоят в следующем:

Подтверждена возможность применения модели точечного источника мировых гроз для интерпретации данных ШР наблюдений из одного пункта. Впервые экспериментально оценены величины сезонного дрейфа мировых грозových центров в меридиональном направлении. Установлены сезонные относительные изменения интенсивности грозовой активности в 1,5-2 раза.

Верификация полученных характеристик источников, проведенная по данным спутниковых измерений, показала правильность полученных оценок. Установлена длительность “электромагнитных сезонов”, которые соответствуют сезонным миграциям мировых гроз, и подтверждена их неодинаковая продолжительность.

Разработаны алгоритмы решения прямой и обратной задач поляризационной диагностики полей шумановских резонансов, возбуждаемых мировой грозовой активностью в гиротропной полости Земля-ионосфера. На основе указанных алгоритмов изучены суточные и сезонные вариации поляризационных характеристик СНЧ полей.

Впервые обнаружены и проанализированы особенности поведения степени поляризации, коэффициента эллиптичности и позиционного угла эллипса поляризации резонансных полей, физическая природа которых объяснена с привлечением представлений о гиротропии ШР.

На основании сопоставления экспериментальных оценок величин “кажущихся” долготных смещений источников и их хорошего соответствия расчетным параметрам подтверждена адекватность разработанной модели учета гиротропии резонансной полости.

Экспериментально исследовано поведение параметров ШР на протяжении полного 11-ти летнего цикла солнечной активности и показана высокая степень повторяемости их суточно-сезонных зависимостей. В ходе таких долговременных непрерывных измерений проанализировано поведение активностей мировых грозовых центров.

Впервые оценены времена кульминации мировых грозовых центров и величины их сезонных пространственных дрейфов. Обнаружена стабильность сезонных миграций источников гроз вне зависимости от фазы солнечного цикла.

Впервые выполнены непрерывные измерения многолетнего хода интенсивности 1-го максимума ШР и продемонстрирована его синфазность с активностью Солнца в 11-ти летнем цикле.

На основании сопоставления параметров ШР со спутниковыми данными о количестве молниевых вспышек, в среднем неизменных на протяжении солнечного цикла, сделан вывод об определяющей роли долгосрочных вариаций характеристик ионосферы на параметры сигналов ШР.

На основании модельных расчетов оценены изменения высоты ионосферы, приводящие к наблюдаемым вариациям пиковых частот и интенсивностей. Показано, что для согласования полученных оценок необходимо привлечение дополнительных механизмов, влияющих на интенсивность сигналов ШР. В качестве возможных гипотез высказаны два предположения природе таких механизмов (а) связанное с солнечным циклом периодическое изменение поверхностной температуры в тропическом поясе на  $0.3^{\circ}\text{C}$ ; (б) долгосрочные изменения параметров профиля проводимости полярной ионосферы над УАС под воздействием высыпаний электронов, модулируемых солнечной активностью.

Разработана и реализована поляризационная методика определения координат сверхмощных молниевых разрядов с учетом гиротропии резонатора, обусловленной влиянием магнитного поля Земли. На основе анализа трехпозиционных данных поляризационных СНЧ измерений впервые показано, что теоретически предсказанное систематическое смещение положений источников всплесков к западу, вызванное гиротропией, достигает для первой моды ШР заметную величину порядка  $15^{\circ}$  и должно учитываться при определении их координат.

Впервые оценены распределения скоростей спадания числа СНЧ всплесков в зависимости от их энергетики. Показано, что количество всплесков экспоненциально уменьшается с ростом их амплитуды.

Впервые проведено сопоставление пространственных и временных распределений сверхмощных разрядов со средней грозовой активностью. Показано, что для всего интервала наблюдений местоположения большинства сверхмощных событий и источников средней грозовой активности сходны.

## РАЗДЕЛ 4

### ИОНОСФЕРНЫЙ АЛЬФВЕНОВСКИЙ РЕЗОНАТОР

В данном разделе представлены результаты исследования поведения еще одного природного электромагнитного резонатора, который формируется в ионосфере. Речь идет об ионосферном альфвеновском резонаторе [78, 243]. Его существование обусловлено высотным профилем электронно-ионной плазмы с учетом влияния магнитного поля Земли. Собственными волнами такого резонатора являются МГД колебания в УНЧ диапазоне. Отражающими “стенками” ИАР являются области, в которых формируются резкие градиенты альфвеновской скорости МГД волн. Они расположены в нижней ионосфере (Е-слой) и во внешней ионосфере на высотах 1000-2000 км. Ионосферный альфвеновский резонатор формируется вдоль силовой трубки геомагнитного поля. Характерные периоды колебаний (доли секунд) и длины волн (тысяча – полторы тысячи километров) резонансных мод зависят от геомагнитной широты, состояния ионосферной плазмы, а, следовательно, от времени суток, сезона года и солнечной активности. Такие зависимости позволяют использовать поведение характеристик ИАР для контролирования состояния практически всей ионосферной толщи. Кроме ИАР в околоземной плазме существует структурно связанный с ним Магнитосферный резонатор (МР) [244]. Собственными модами МР являются альфвеновские волны и быстрый магнитный звук (БМЗ). В нем формируются объемные резонаторные системы (cavity resonances), ограниченные всей полостью внутренней магнитосферы. Вдоль силовых линий МПЗ возникают резонансные колебания известные как FLR (field line resonances) [48]. Структура FLR формируется отражением МГД волн от ионосферных границ в магнитосопреженных областях Южного и Северного полушарий. Собственные частоты МР- FLR варьируются в зависимости от геомагнитных широт и состояния околоземной плазмы от десятков до сотен миллигерц. Оба резонатора, ИАР и МР структурно связаны

общими границами, расположенными на высотах областей ионосферного “динамо тока”.

В первом подразделе представлена теоретическая модель распространения магнитогидродинамических волн в ионосфере и магнитосфере, позволяющая оценивать параметры резонансных систем ИАР и MP-FLR. Выполнены расчеты собственных частот обеих резонансных систем для двух “базовых” (дневной и ночной) моделей ионосферы, в которых по литературным данным табулированы профили электронной концентрации, эффективной массы ионов и частот соударений, а также использованы реалистичные данные, полученные путем ионосферного зондирования. Результаты оценок сопоставлены с данными наблюдений ИАР, выполненных на Украинской антарктической станции при разных уровнях геомагнитной активности. Во втором подразделе изучены характерные особенности поведения ИАР на суточном, сезонном и межгодовом интервалах, а также исследовано поведение резонансов в зависимости от солнечной и геомагнитной активности. В третьем подразделе проанализированы зависимости свойств ИАР от географического положения наблюдательных пунктов. Описан и экспериментально исследован неизвестный ранее эффект “высокодобротного” ИАР, когда резонансные спектральные линии высокого порядка регистрировались в широком диапазоне частот вплоть до 34 Гц. В четвертом подразделе представлен новый эффект “расщепления” низших мод ИАР, проведен анализ особенностей его поведения, определена зависимость параметров “расщепления” от солнечной активности в 11-ти летнем цикле, выполнена классификация фаз расщепления: развитие, стационарный участок и релаксация, а также обсуждены возможные механизмы возникновения обнаруженного эффекта. В пятом подразделе исследована связь характеристик ИАР с критической частотой ионосферного слоя F2, оцениваемой по данным ионосферного зондирования. В рамках простой феноменологической модели разработана методика оценки критической частоты ионосферного слоя F2 по величине средней разности частот между соседними резонансными модами.

Методика апробирована на данных долговременных наблюдений ИАР в Антарктиде, в Украине и в Восточной Сибири. Разработан и представлен алгоритм, позволяющий оценивать критические частоты ионосферы в любом регионе земного шара.

Основные оригинальные результаты этого раздела опубликованы в статьях [6, 26, 196, 245, 246, 247, 248, 249, 250], а также в доложены на многих научных конференциях [34, 35, 251, 252, 253, 254, 255, 256, 257, 258, 259, 260].

#### 4.1 Модель связанных МГД резонаторов

Для анализа физических эффектов, сопровождающих распространение МГД волн в магнитосфере и ионосфере Земли – в том числе в ИАР, – применяются многочисленные теоретические модели разной степени сложности. В зависимости от специфики задачи модель может абстрагироваться от тех или иных деталей пространственной структуры среды – например, при расчете длиннопериодных пульсаций толща ионосферы заменяется бесконечно тонкой анизотропной поверхностью, отделяющей околоземную плазму от нейтральной атмосферы. В других случаях рассматривается близкая к реальной конфигурация геомагнитного поля, но граничные условия не учитывают наличия нейтральной атмосферы вблизи поверхности Земли [48]. Подобные идеализации неприменимы при описании ИАР, поскольку длины собственных волн этого резонатора сравнимы с характерными пространственными масштабами изменения параметров среды распространения. Иными словами, модель волноведущей системы должна учитывать конечную толщину и внутреннюю структуру ее составных частей. Вместе с тем плоская геометрия [261] в ряде случаев оказывается достаточно адекватным представлением. В плоскостистой модели (так называемой *box model* [97]) можно учесть практически все подробности неоднородного распределения параметров среды. Например, в работе [262] собственные функции ИАР описаны аналитическими решениями волнового уравнения в

box model для специального координатного “профиля” коэффициента преломления. Наиболее полное описание ИАР как открытой дифракционной структуры было дано в работе [263] также в рамках box model. При этом использовались реалистичные распределения концентрации частиц и частот соударений в верхней ионосфере и в “холловском” слое, последовательно рассмотрена связь волновых МГД мод в ионосфере и их преобразование в электромагнитные волны в нейтральной атмосфере. Однако этот анализ являлся исключительно численным.

Рассмотренная в данном подразделе модель [245], разработанную В.Г. Сеницыным совместно с автором данной работы. Она имеет целью описать ИАР и MP-FLR как связанную систему. Для анализа спектра ее собственных колебаний использован полуаналитический подход, при котором координатная зависимость (профиль) коэффициента преломления волн, включая “потенциальную яму” в области ИАР, аппроксимируется функциями, допускающими замкнутое решение волнового уравнения.

#### 4.1.1 Основные соотношения

Основные соотношения, на которых основывается модель — это уравнения Максвелла для фурье-гармоник волнового поля, которые рассматриваются с учетом закона Ома:

$$\vec{j}(\vec{r}, \omega) = \sigma_0 \vec{E}_0 + \sigma_{\perp} \vec{E}_{\perp} - \sigma_H \left[ \vec{E}_{\perp}, \frac{\vec{B}_0}{B_0} \right], \quad (4.1)$$

в плазме ионосферы / магнитосферы ( $\vec{j}$  - плотность наведенного тока;  $\sigma_0(\vec{r}, \omega)$ ,  $\sigma_{\perp}(\vec{r}, \omega)$  и  $\sigma_H(\vec{r}, \omega)$  - соответственно продольная, педерсеновская и холловская проводимости плазмы; в нейтральной атмосфере ток  $\vec{j} = 0$ ). В модели используется декартова система координат, в которой ось  $x$  направлена на Север по географическому меридиану, ось  $y$  на Восток, а  $z$  вертикально

вниз. Начало отсчета по  $z$  соответствует сечению магнитосферы экваториальной плоскостью, так что на поверхности Земли  $z = \pm l/2$  в Южном и Северном полушариях ( $l$ -длина силовой линии геомагнитного поля на широте наблюдателя; линия предполагается выпрямленной и также направленной по вертикали). Векторы поля выражаются через потенциалы уиттекеровского типа [264, 265], которые связаны с обычными скалярным и векторным потенциалами как

$$\begin{aligned}\Phi &= i \frac{\omega}{c} \Psi \\ \vec{A} &= i \frac{\omega}{c} \vec{e}_z U + \text{rot}(\vec{e}_z V)\end{aligned}\quad (4.2)$$

(Здесь  $\vec{e}_z$  - единичный вектор вдоль оси  $z$ ). Удобство использования этих потенциалов состоит в том, что коэффициенты уравнений для  $\Psi$ ,  $U$  и  $V$  не содержат производных от параметров среды (проводимостей  $\sigma$ ), что позволяет аппроксимировать профили  $\sigma$  кусочно-непрерывными функциями. В низкочастотном приближении ( $\omega \ll \Omega_H$ , где  $\Omega_H$  - гирочастота ионов) получается систему уравнений для полевых потенциалов  $\Psi$ ,  $U$  и  $V$ . Предполагая свойства среды не зависящими от координат  $x$  и  $y$ , осуществляется переход к фурье-представлению по этим координатам, тогда

$\frac{\partial}{\partial x, \partial y} = ik_{x,y}$ , и потенциал  $U$  выражается через  $\frac{\partial \Psi}{\partial z}$ . С учетом неравенства  $|\sigma_0(\vec{r}, \omega)| \gg |\sigma_{\perp, H}(\vec{r}, \omega)|$  (МГД-приближение) связанные уравнения для  $\Psi$  и  $V$  принимают вид:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} + \left(1 + \frac{4\pi i \sigma_{\perp}}{\omega}\right) \Psi - i \frac{4\pi \omega \sigma_H}{c^2} V = 0, \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial z^2} + \frac{\omega^2}{c^2} \left( 1 + i \frac{4\pi\sigma_{\perp}}{\omega} - \frac{k_x^2 + k_y^2}{k_0^2} \right) V + i \frac{4\pi\omega\sigma_H}{c^2} \Psi = 0. \quad (4.4)$$

Фурье-компоненты проводимостей  $\sigma$  в общем случае комплексны, их реальные части определяются частотами соударений электронов и ионов в плазме, а соотношение абсолютных величин  $\sigma_{\perp}$  и  $\sigma_H$  изменяется с высотой. Выше  $F$ -области в ионосфере обычно  $|\sigma_H(\vec{r}, \omega)| \ll |\sigma_{\perp}(\vec{r}, \omega)|$ , при этом  $\frac{4\pi i \sigma_{\perp}}{\omega} \rightarrow \frac{c^2}{V_A^2}$ , где  $V_A = \frac{B_0}{(4\pi N_e m_i)^{1/2}}$  - альфвеновская скорость ( $m_i$  - эффективная ионная масса,  $N_e$  - концентрация заряженных частиц). Используемая модель высотного распределения коэффициента преломления альфвеновских волн  $c/V_A$  для одного полушария показана сплошными линиями на рис. 4.1. Штриховыми линиями представлены аппроксимации профиля  $c/V_A$ , используемые для численных расчетов. (Точнее говоря, на рисунке указаны границы областей, в пределах которых моделируются комплексные проводимости  $\sigma$ ). Здесь  $h_s$ -толщина нейтральной атмосферы от поверхности Земли до начала ионосферы. Выше уровня  $z = z_{sJ}$ , можно считать выполненным условие

$$|\sigma_H(\vec{r}, \omega)| \ll |\sigma_{\perp}(\vec{r}, \omega)|. \quad (4.5)$$

Наконец,  $z = z_K$  - условная граница между верхней ионосферой и магнитосферой, выше которой альфвеновская скорость считается постоянной. Численные значения параметров  $l$ ,  $h_s$ ,  $z_{sJ}$ ,  $z_K$  и  $V_A(z = z_K)$  определяются конкретным выбором широты точки наблюдения и видом высотных профилей электронной концентрации и частот соударений частиц для дневной или ночной ионосферы. Подстрочный индекс  $s$  указывает, к какой из

магнитосопреженных областей ионосферы относятся модельные параметры и решения уравнений ( $S$  – “Южное полушарие”). Аналогичная структура в противоположном полушарии ( $z < 0$ , индекс  $N$ ) в общем случае несимметрична. Систему (4.3–4.4) можно непосредственно интегрировать численными методами, либо исследовать аналитически для специальных видов зависимостей  $\sigma_{\perp}(z)$  и  $\sigma_H(z)$ . При  $z < z_{sJ}$  она распадается, вследствие (4.5), на два независимых уравнения, одно из которых описывает распространение альфвеновской волны, а второе – быстрой магнитозвуковой. Если принять для координатной зависимости коэффициента  $4\pi i \sigma_{\perp} / \omega$  аппроксимацию в виде параболической или линейно-ломаной функции, решения (4.3 – 4.4) запишутся в терминах функций Вебера или Эйри.

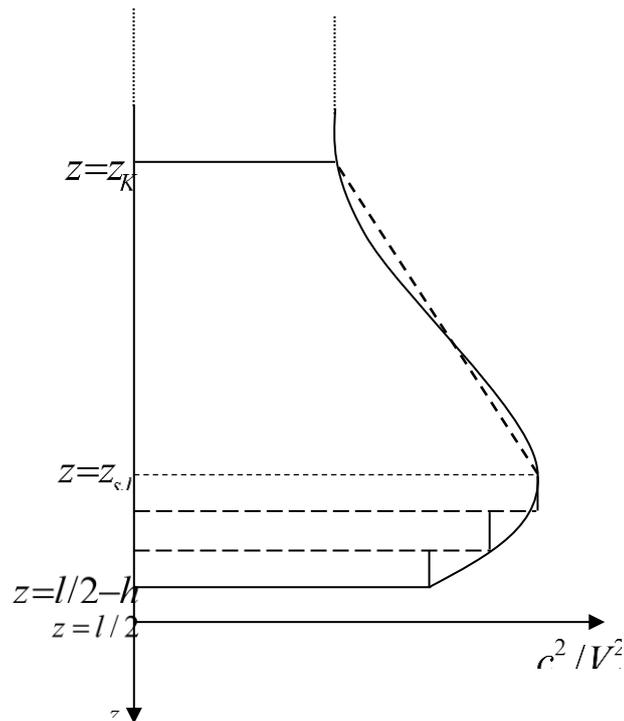


Рисунок 4.1 – Модель распределения альфвеновского коэффициента преломления по высоте (штриховыми линиями показана линейно-ломаная аппроксимация в области ИАР и “холловском” слое в нижней ионосфере)

Выбрав в области  $z_K < z < z_J$  линейную аппроксимацию (наклонная штриховая на рис. 4.1), можно записать, что:

$$\frac{V_{AJ}^2}{c^2} \left( i \cdot \frac{4\pi\sigma_{\perp}(\omega, z)}{\omega} \right) = \gamma(y_J - y) + \delta, \quad (4.6)$$

$y = \frac{\omega}{V_{AJ}} z$ ,  $V_{AJ} = V_A(z_{sJ})$ . Коэффициенты  $\gamma$  и  $\delta$  комплексны, но с уменьшением частоты соударений  $\delta$  стремится к предельному значению  $\delta \approx 1$ . Решения уравнений (4.3- 4.4) в промежутке  $z_K < z < z_J$  имеют вид:

$$\Psi_s = M \cdot Ai \left( \frac{\gamma(y - y_J) - \delta}{\gamma^{2/3}} \right) + N \cdot Bi \left( \frac{\gamma(y - y_J) - \delta}{\gamma^{2/3}} \right), \quad (4.7)$$

$$V_s = X \cdot Ai \left( \frac{\gamma(y - y_J) - \delta}{\gamma^{2/3}} + \frac{k_{\perp}^2 V_{AJ}^2}{\omega^2 \gamma^{2/3}} \right) + Y \cdot Bi \left( \frac{\gamma(y - y_J) - \delta}{\gamma^{2/3}} + \frac{k_{\perp}^2 V_{AJ}^2}{\omega^2 \gamma^{2/3}} \right). \quad (4.8)$$

В “холловском” слое  $z = z_{sJ} < z < z = l/2 - h_s$  волновые функции обеих МГД мод остаются связанными. Их можно выписать в явном виде, если коэффициенты (4.3-4.4) постоянны. Разбив эту область на несколько слоев, толщина которых мала по сравнению с предполагаемой длиной МГД волны в  $z$ -направлении, и полагая среду внутри слоя однородной, можно записать решения в каждом слое в виде:

$$\begin{aligned} \Psi_s^{(n)}(z) = & P_s^{(n)} e^{ik_0 \Gamma_{as}^{(n)}(z - z_{sn})} + Q_s^{(n)} e^{-ik_0 \Gamma_{as}^{(n)}(z - z_{sn})} + \\ & + i \xi^{(n)} \left\{ F_s^{(n)} e^{ik_0 \Gamma_{MS}^{(n)}(z - z_{sn})} + G_s^{(n)} e^{-ik_0 \Gamma_{MS}^{(n)}(z - z_{sn})} \right\}, \quad (4.9) \end{aligned}$$

$$V_S^{(n)}(z) = F_S^{(n)} e^{ik_0 \Gamma_{MS}^{(n)}(z - z_{sn})} + G_S^{(n)} e^{-ik_0 \Gamma_{MS}^{(n)}(z - z_{sn})} - \\ - i\eta^{(n)} \left\{ P_S^{(n)} e^{ik_0 \Gamma_{as}^{(n)}(z - z_{sn})} + Q_S^{(n)} e^{-ik_0 \Gamma_{as}^{(n)}(z - z_{sn})} \right\}, \quad (4.10)$$

где  $n$ -номер слоя,

$$k_0 = \frac{\omega}{c}; \quad \Gamma_{as}^2 = \left(1 + i \frac{4\pi}{\omega} \sigma_{\perp}^{(n)}\right) - \frac{(k_x^2 + k_y^2)}{2k_0^2} + \sqrt{\frac{(k_x^2 + k_y^2)^2}{4k_0^4} + \left(\frac{4\pi}{\omega} \sigma_H^{(n)}\right)^2}, \quad (4.11)$$

$$\Gamma_{MS}^2 = \left(1 + i \frac{4\pi}{\omega} \sigma_{\perp}^{(n)}\right) - \frac{(k_x^2 + k_y^2)}{2k_0^2} - \sqrt{\frac{(k_x^2 + k_y^2)^2}{4k_0^4} + \left(\frac{4\pi}{\omega} \sigma_H^{(n)}\right)^2}. \quad (4.12)$$

Коэффициенты  $\xi^{(n)}$  и  $\eta^{(n)}$  выражаются через проводимость Холла и учитывают связь магнитозвуковой -  $M$ , и альфвеновской -  $a$ , мод. Аналогичные выражения можно записать вблизи другого (“северного”) конца силовой трубки. В нейтральной атмосфере каждого из полушарий функции  $\Psi_{S,N}$  и  $V_{S,N}$ , удовлетворяющие импедансным условиям на поверхности Земли, имеют вид:

$$\Psi_{S,N} = \mp i \frac{c\kappa}{\omega} L_{S,N} \left\{ \sin\left(\kappa\left(\frac{l}{2} \mp z\right)\right) - i \frac{\omega}{c\kappa} Z_T^{S,N} \cos\left(\kappa\left(\frac{l}{2} \mp z\right)\right) \right\}, \quad (4.13)$$

$$\kappa = \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} - k_x^2 - k_y^2}$$

$$V_{S,N} = A_{S,N} \left\{ \cos\left(\kappa\left(\frac{l}{2} \mp z\right)\right) + i \frac{\omega}{c\kappa Z_T^{S,N}} \sin\left(\kappa\left(\frac{l}{2} \mp z\right)\right) \right\}, \quad (4.14)$$

где  $L_{S,N}$  и  $A_{S,N}$  – нормировочные константы,  $Z_T$  – поверхностный импеданс грунта.

#### 4.1.2 Собственные частоты ИАР и FLR

Спектр собственных МГД колебаний в системе ИАР+FLR можно получить, подчинив решения (4.7-4.10) граничным условиям. Приравнивая значения функций  $\Psi_{S,N}$ ,  $V_{S,N}$  и их производных при  $z = \pm(l/2 - h_{S,N})$  и далее на границах всех модельных слоев, можно выразить коэффициенты  $P$ ,  $Q$ ,  $F$ ,  $G$  и т.д. через четыре нормировочные константы,  $L_{S,N}$  и  $A_{S,N}$ . Детерминант системы линейных уравнений относительно этих констант как неизвестных позволяет записать в явном виде дисперсионное уравнение для собственных частот ”общего” резонатора. С другой стороны, “квантованные” состояния МГД поля в уединенном ИАР (без учета его связи с магнитосферным резонатором) можно рассчитать из упрощенного дисперсионного уравнения. Оно следует из условия, что на “верхней стенке”  $z = z_K$  отсутствуют волны, приходящие из магнитосферы:

$$Bi'(-\gamma^{-2/3}) + i \frac{V_{AJ}}{c} \gamma^{-1/3} Z_{eff} Bi(-\gamma^{-2/3}) = 0. \quad (4.15)$$

Здесь  $Z_{eff}$  - эффективный импеданс при  $z = z_{sJ}$ , определяемый соотношением

$$\frac{\partial \psi}{\partial z}(z = z_{sJ}) + i \frac{\omega}{c} Z_{eff} \psi(z = z_{sJ}) = 0. \quad (4.16)$$

Расчет этой величины при различных параметрах плазмы в “холловском” слое дает значения порядка  $|10^2|$ , и вследствие малости

$V_{AJ}/c \ll 1$  корни уравнения (4.15) должны быть близки к решениям  $Bi'(-\gamma^{-2/3}) = 0$ . Из этих уравнений следует неэквиливантность спектра волн в ИАР и конечное число дискретных решений. В (4.15) правильно отражается влияние импеданса нижней стенки резонатора, однако всех зависимостей характеристик ИАР от ионосферных параметров, отмеченных в эксперименте, простая модель не объясняет.

Полное дисперсионное уравнение ИАР+FLR исследовано численно для нескольких наборов значений основных параметров, отвечающих различным физическим условиям в ионосфере и магнитосфере. Все расчеты проведены для параметра Мак-Илвейна  $L=2.4$  (соответствующего расположению УАС), соответственно длина силовой линии  $l$  между магнитосопряженными точками составляет 29 000 км (для дипольной модели МПЗ). Значения комплексных проводимостей  $\sigma_{\perp}(z)$ ,  $\sigma_H(z)$  рассчитывались по стандартным формулам [266], исходя из двух “базовых” (дневной и ночной) моделей ионосферы и табулированных профилей электронной концентрации, эффективной массы ионов и частот соударений. Параметры “базовых” моделей для расчетов варьировались с учетом реальных данных вертикального зондирования в отдельные дни наблюдений: суточного хода критических частот и действующих высот для слоев  $F$  и  $E$ . В таблице 4.1 приведены результаты вычисления первых 22 собственных частот системы FLR+ ИАР для “базовой” ночной ионосферы: электронная концентрация на уровне  $h(z_{sJ}) = 350$  км в Южном полушарии принята равной  $2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ ; холловский слой в нижней части ионосферы моделирован тремя однородными участками на Юге и двумя на Севере; нейтральная атмосфера имеет толщины  $h_s = h_N = 100$  км. Уровню  $z = z_K$  соответствует величина  $l/2 - z_K = 900$  км, при этом  $N_e(z_K) = 10^4 \text{ см}^{-3}$ . Дискретные значения комплексных частот  $\omega_n$  определяются квантованными значениями  $\gamma$ , которые следуют из дисперсионного уравнения.

Таблица 4.1 – Собственные частоты системы ИАР+FLR для “базовой” ночной ионосферы, полученные в результате численных расчетов

$\omega_1=0.390887-i0.0236814$	$\omega_{12}=4.85488-i0.0376818$
$\omega_2=0.779721-i0.020862$	<b><math>\omega_{13}=5.20913-i0.0430088</math></b>
$\omega_3=1.16207-i0.0157328$	$\omega_{14}=5.53895-i0.0552568$
$\omega_4=1.52897-i0.0019362$	$\omega_{15}=5.53895-i0.0552568$
$\omega_5=2.09729-i0.0255453$	<b><math>\omega_{16}=6.55084-i0.0411979</math></b>
$\omega_6=2.42974-i0.0116326$	$\omega_{17}=6.92917-i0.036715$
<b><math>\omega_7=2.78468-i0.0265123</math></b>	$\omega_{18}=7.31353-i0.0342829$
$\omega_8=3.13503-i0.0380227$	$\omega_{19}=7.69995-i0.0329716$
$\omega_9=3.46819-i0.0490903$	$\omega_{20}=8.08576-i0.032397$
$\omega_{10}=4.13397-i0.0438794$	<b><math>\omega_{21}=8.4681-i0.0324725</math></b>
<b><math>\omega_{11}=4.49192-i0.0385936</math></b>	$\omega_{22}=8.84254-i0.0332987$

Большинство значений в Таблице относятся к FLR и приближенно соответствуют последовательности  $\text{Re } \omega_n = n \cdot (\pi V_A / l)$ , которая давала бы собственные частоты FLR при однородном распределении альфвеновской скорости в резонаторе и идеальных условиях на его границах. Выделенные шрифтом величины отвечают первым трем модам ионосферного альфвеновского резонатора (полное число таких корней дисперсионного уравнения при заданных параметрах модели равно 8). Они не укладываются в номенклатуру частот FLR и должны были бы нумероваться как  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  по числу вариаций соответствующей собственной функции на размере ИАР. Расположение корней дисперсионного уравнения на комплексной плоскости для этого набора модельных параметров показано на рис. 4.2

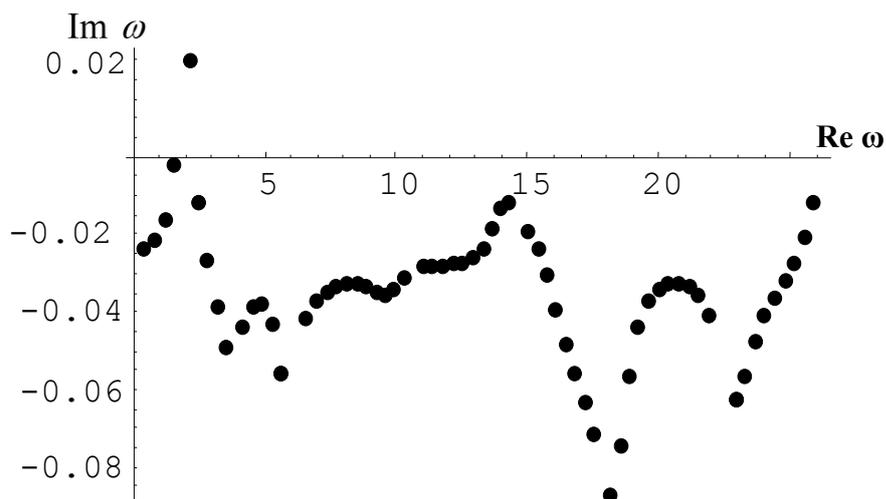


Рисунок 4.2 – Корни дисперсионного уравнения системы FLR+ ИАР для ночной модельной ионосферы:  $h(z_{sJ}) = 350$  km;  $N_e(z_{sJ}) = 2 \cdot 10^5$  cm<sup>-3</sup>;  $h_s = 100$  km;  $l/2 - z_K = 900$  km,  $N_e(z_K) = 10^4$  cm<sup>-3</sup>

При отсутствии связи между резонаторами на плоскости  $\omega$  находились бы две отдельные последовательности комплексных частот, FLR и ИАР, каждая с монотонно изменяющейся мнимой частью. Общая последовательность корней для взаимосвязанных резонаторов на графике начинается в области малых  $Re \omega$  собственными частотами низших мод FLR, и по мере приближения к частотам “захваченных” мод ИАР у  $\omega$  резко изменяется величина мнимой части.

Собственные частоты системы были рассчитаны для ряда наборов ионосферных параметров, соответствующих ночным и дневным условиям, что дало возможность моделировать суточные вариации частотного спектра. По сравнению с первым расчетным вариантом увеличение высоты  $H_K = l/2 - z_K$  при сохранении всех других параметров эквивалентно уменьшению градиента альфвеновской скорости в верхней части профиля. Это приводит к уменьшению числа захваченных в ИАР мод (шесть при  $H_K = 1100$  km и четыре при  $H_K = 1300$  km) и некоторому понижению каждой из частот ИАР. Одновременно увеличиваются частоты магнитосферного резонатора FLR.

Расчет для ночной ионосферы с уменьшенными значениями электронной плотности ( $N_e(z_{sJ})=1.5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ ;  $h(z_{sJ})$ ,  $h_s=h_N$  и  $H_K$ , как в первом варианте) дал меньшее число резонансных линий в ИАР (четыре), которые сдвинуты в сторону бóльших  $Re \omega$  и дальше отстоят друг от друга.

При переходе к дневным условиям понижение высоты максимума  $F$ -слоя (уровня  $h(z_{sJ})$ ) до 250 km приводит к немонотонной зависимости условий “захвата” волн в ИАР от электронной плотности вблизи максимума. В “базовой” дневной ионосфере с параметрами  $N_e(z_{sJ})=8 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ ;  $h(z_{sJ})=250 \text{ km}$ ,  $h_s=100 \text{ km}$ ;  $H_K=900 \text{ km}$  захвата МГД волн в ионосферный резонатор не происходит. При увеличении  $N_e(z_{sJ})$  до  $1.2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$  у дисперсионного уравнения появляется один корень, соответствующий моде ИАР, который исчезает, если концентрация возрастет еще на порядок величины.

#### 4.1.3 Сравнение модельных расчетов с экспериментом

Оценивание значений собственных частот ИАР, рассчитанных по данным ионосферного зондирования, позволяет интерпретировать изменение спектра ИАР в течение суток. Для сравнения расчета с экспериментом удобно использовать представление интенсивности сигнала в координатах частота – время, т.е. в форме динамического спектра. На рис. 4.3 можно проследить временную эволюцию спектра ИАР, измеренного 9 сентября 2005 г., на УАС.

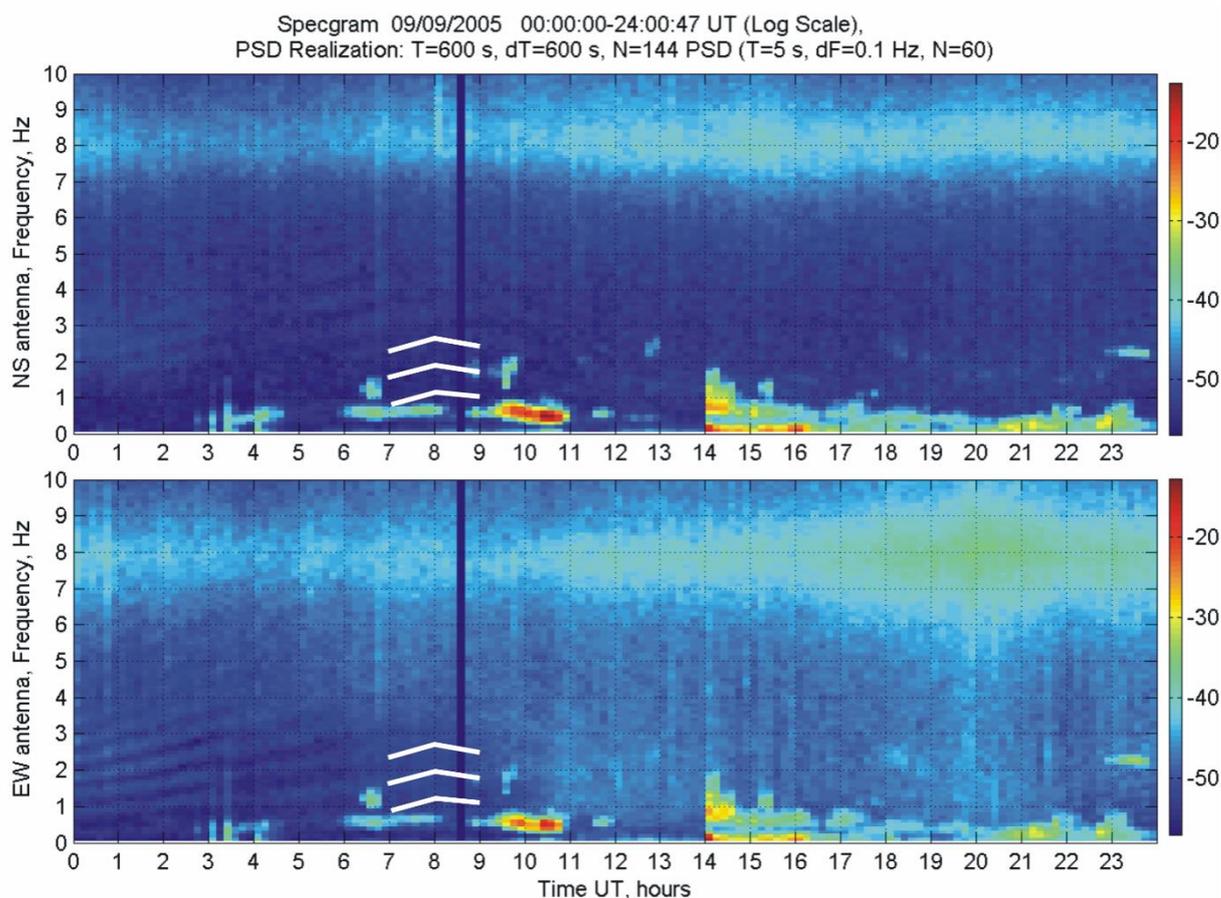


Рисунок 4.3 – Динамические спектры наземного магнитного отклика на МГД поле в ионосферном альфвеновском резонаторе и линия первой моды шумановского резонанса (приемные каналы NS и EW, данные получены на УАС). Запись в начальной фазе солнечного протонного события. В интервале 07 – 09 UT показан расчетный ход резонансных частот ИАР (белые линии) для параметров модели, соответствующих измерениям 09.09.2005

При переходе от ночных условий к утренним в обоих приемных каналах магнитометра присутствует до шести дискретных резонансных линий, которые медленно дрейфуют в сторону более высоких частот. Около 8 часов всемирного времени частотный дрейф изменяет направление, число наблюдаемых линий уменьшается, и примерно с 12 часов резонансные треки вообще пропадают. Восстановления эффекта в вечерние часы не происходит, так как к этому времени на регулярные изменения ионосферных параметров

накладывается влияние протонной вспышки. Вариации критических частот и эффективных высот  $E$ - и  $F$  слоев ионосферы, измеренные в этот же день станцией вертикального зондирования, показаны на рисунке 4.4.

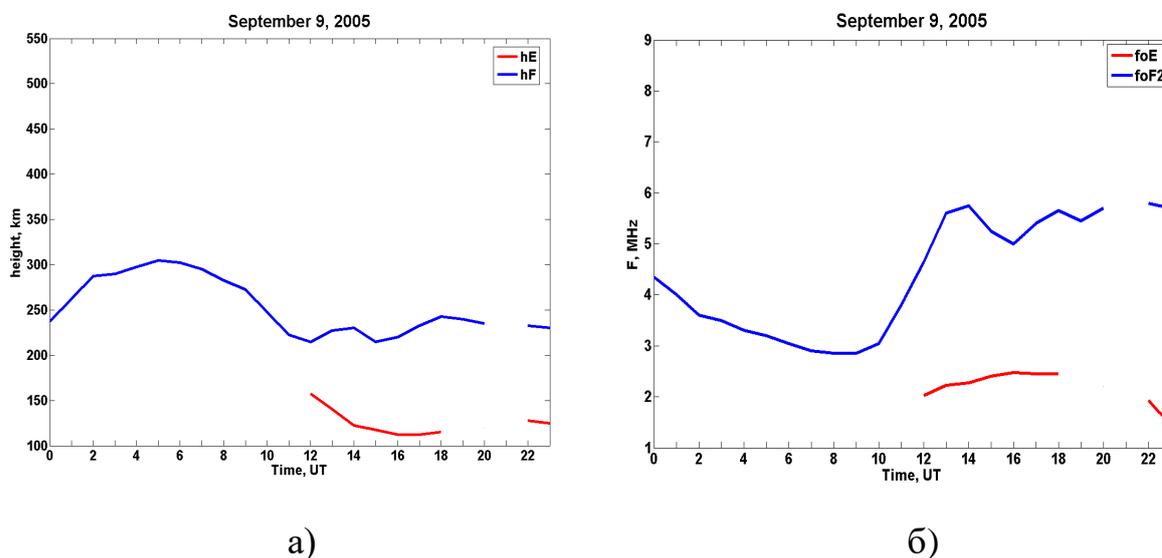


Рисунок 4.4 – Суточные вариации эффективных высот (а) и критических частот (б)  $F$  и  $E$  слоев ионосферы 9 сентября 2005 г. (данные ионозонда на УАС)

Используя значения  $h(z_{sJ})$  и  $N_e(z_{sJ})$ , соответствующие параметрам для 7, 8 и 9 часов из данных этих графиков, был построен расчетный временной ход (при  $h_s = 100$  km;  $H_K = 900$  km) частот ИАР, нанесенный белыми линиями на треки рис. 4.3. Качественное согласование с измеренным спектром очевидно. Мгновенные частоты резонансов в момент смены направления дрейфа (около 08 UT) практически совпадают. Величины частотного разноса между линиями и их число после этого момента соответствуют наблюдениям. Отсутствие дискретных треков на экспериментальном графике после 13 UT также согласуется с расчетом, описанным выше для дневных условий. Вследствие прихода в ионосферу протонного потока в слое  $F$  создалась дополнительная ионизация, и “дневные” условия продолжали существовать с 18 до 22 UT и дольше.

#### 4.2 Суточные и сезонные и периодичности поведения ИАР, зависимость от солнечной и геомагнитной активности

Несмотря на то, что модель ИАР, рассмотренная в предыдущем подразделе, позволяет подробно и полно описать характеристики резонансных сигналов, необходимость подстановки в нее большого числа входных параметров (профили электронной плотности вплоть до высот более тысячи километров, проводимости нижней ионосферной границы, критические частоты и высоты ионосферных слоев и т.д.), делают ее весьма сложной для практического использования. Поскольку большинство из упомянутых входных характеристик модели не в полной мере доступны, эмпирический подход в описании характерных суточных, сезонных и многолетних закономерностей поведения ИАР, а также их зависимостей от геомагнитной и солнечной активности становится актуальным.

Такие исследования были выполнены по данным системы глобального мониторинга электромагнитных полей УНЧ-СНЧ диапазона, созданной при участии автора и представленной в разделе 2. Базовым пунктом, где накоплен основной объем данных была УАС “Академик Вернадский”. Ниже представлены суточные, сезонные и многолетние (оцененные на протяжении полного солнечного цикла) закономерности поведения сигналов ИАР, полученные по результатам долгосрочных наблюдений на базовом пункте. В последствие эти результаты дополнены информацией, полученной во время синхронных наблюдений ИАР на Низкочастотной обсерватории РИ НАНУ (Украина) и Саянской солнечной обсерватории (ССО, Россия).

Данные измерений на УАС в режиме мониторинга начаты в 2002 г., и продолжают по настоящее время. По результатам непрерывных наблюдений анализировались вероятности регистрации эффекта ИАР и особенности поведения характеристик сигнала в различные сезоны года, времена суток и в разных геофизических условиях.

Из-за не идеальности нижней границы ИАР система стоячих МГД волн в резонаторе порождает наземный электромагнитный отклик, который проявляется на спектрограммах выходных сигналов магнитометра (каналы “север-юг” - NS и “восток-запад” - EW) как группа дискретных пиков в интервале частот 0.2-10 Гц, называемых резонансными структурами спектров (РСС). На рис. 4.5-4.7 представлены спектры УНЧ-СНЧ сигнала, рассчитанные в разное время суток 8 апреля 2005 г. (местное время LT в пункте наблюдения отличается от мирового, UT, на -4 часа).

Как видно, резонансные пики лишь приблизительно эквидистантны. Значения частот в максимумах в каждом из каналов могут не совпадать.

Временные вариации пиковых частот можно интерпретировать как дрейф спектральных линий со скоростью в единицы герц за час. Четкая дискретная структура наблюдается в канале NS только в ночное и утреннее время, а в канале EW также в вечерние часы. Такое поведение спектральных характеристик ИАР отмечено не только для индивидуальных записей в сентябре 2005 г., но типично для спокойных ионосферных условий.

В ходе анализа большого массива данных за осенне-зимний период 2005 г. и часть 2006 г. существенно уточнены выводы о суточных и сезонных закономерностях поведения ИАР, сделанные в пионерских работах [78, 267]. Как на средних, так и в высоких широтах резонансная структура спектра МГД-волн наблюдается преимущественно в зимнее время и в переходные периоды суток (утренние и вечерние часы) и исчезает днем (см. также реализацию спектра рис. 4.6). В южнополярном регионе были отмечены случаи повышенной стабильности явления, когда линии ИАР регистрировались непрерывно на протяжении нескольких суток. Особенностью таких записей было малое число дискретных линий (3-5) и значительный частотный разнос между ними (более 1 Гц).

Резонансная структура УНЧ-СНЧ волн в ионосфере регистрировалась наземными средствами в течение ~ 44% от полного времени наблюдений. Для исследования зависимостей от времени суток весь промежуток непрерывной регистрации был разбит на часовые интервалы, на каждом из которых

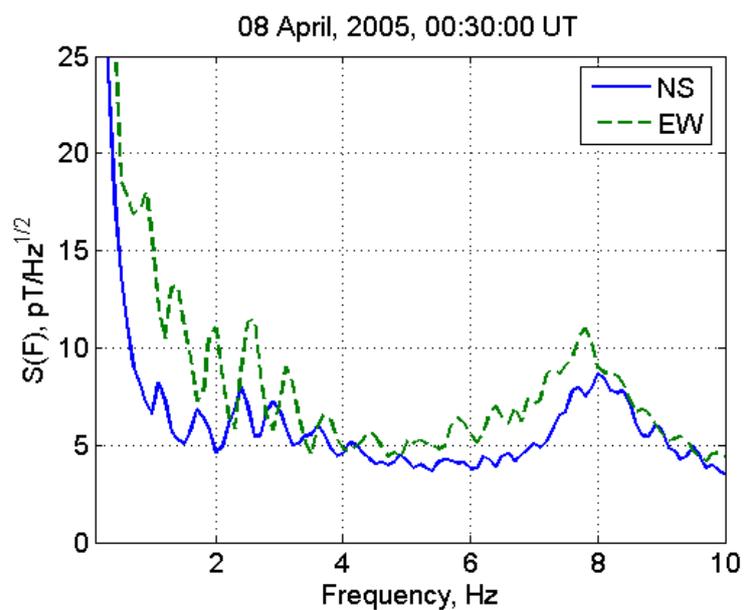


Рисунок 4.5 – Спектры УНЧ-СНЧ сигналов, принятых на УАС 7 апреля 2005 г. в 20:30 местного времени. Дискретные собственные частоты ИАР наблюдаются в обоих каналах в диапазоне 0.8–10 Гц, включая окрестность первого шумановского резонанса

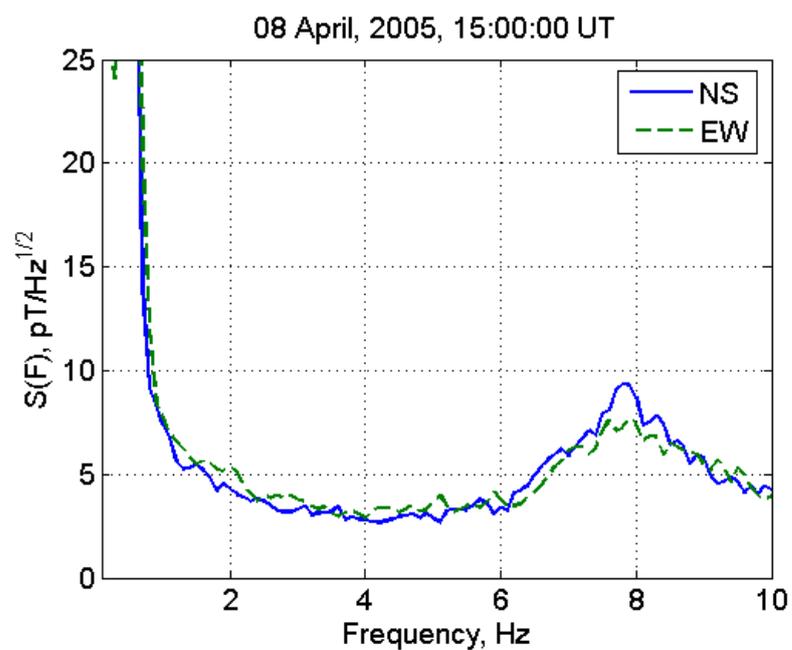


Рисунок 4.6 – Спектры УНЧ-СНЧ шума, принятого на УАС в дневное время 8 апреля 2005г.

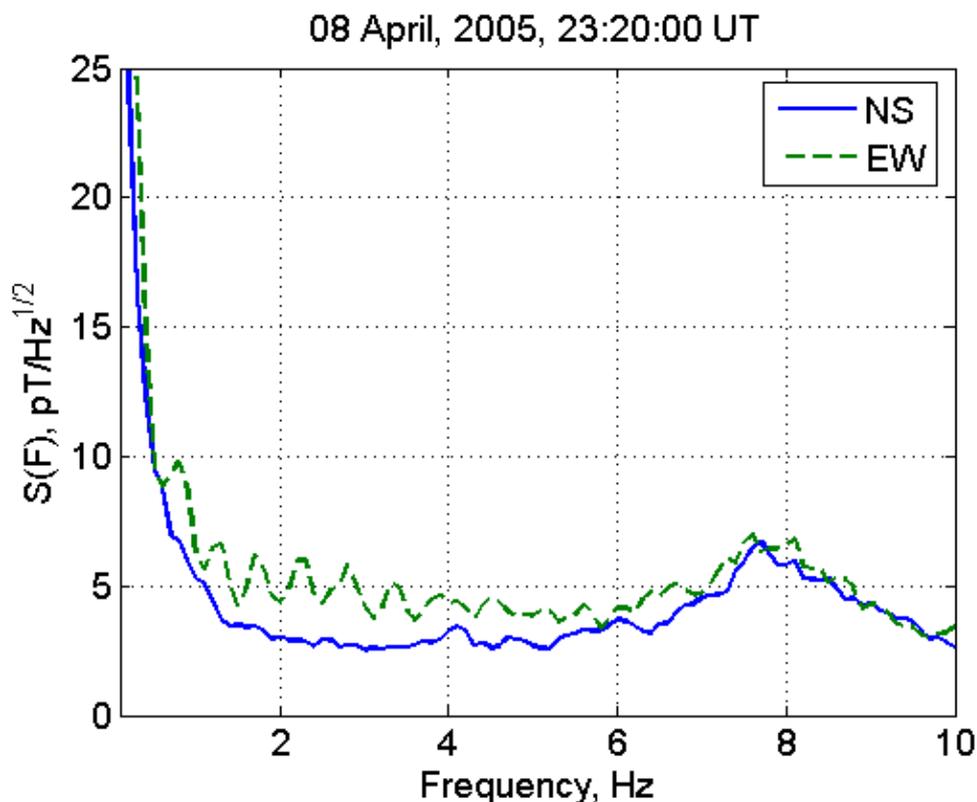


Рисунок 4.7 – Спектры УНЧ-СНЧ шума, принятого на УАС вечером 8 апреля 2005 г. (19:20 местного времени). Резонансная структура хорошо выражена только в приемном канале EW

определялось наличие или отсутствие линий ИАР в спектре, количество линий в спектрограмме и частотный разнос между соседними линиями

Большой массив наблюдательных данных позволяет сделать статистически достоверные выводы. На рис. 4.8 представлены усредненные за апрель – июнь 2005 г., суточные распределения двух параметров: “вероятности” (относительной частоты) регистрации дискретных линий в спектре и их среднего числа. Минимум функции распределения (на уровне 22-24%) имеет место с 18 до 20 UT, после чего отмечается резкий подъем значений частоты появления ИАР – до 60% к 02 UT (22 LT) – и постепенное уменьшение к 18 UT. Таким же образом изменяется среднее число

регистрируемых линий. Суточный ход среднего частотного расстояния между спектральными линиями ИАР показан на рис. 4.9. Как видно, разность частот  $dF$  в среднем не превышает 1.0 Гц. Отмечается максимум  $dF$  вблизи середины суток (утром по местному времени) и уменьшение в начале и в конце суточного интервала.

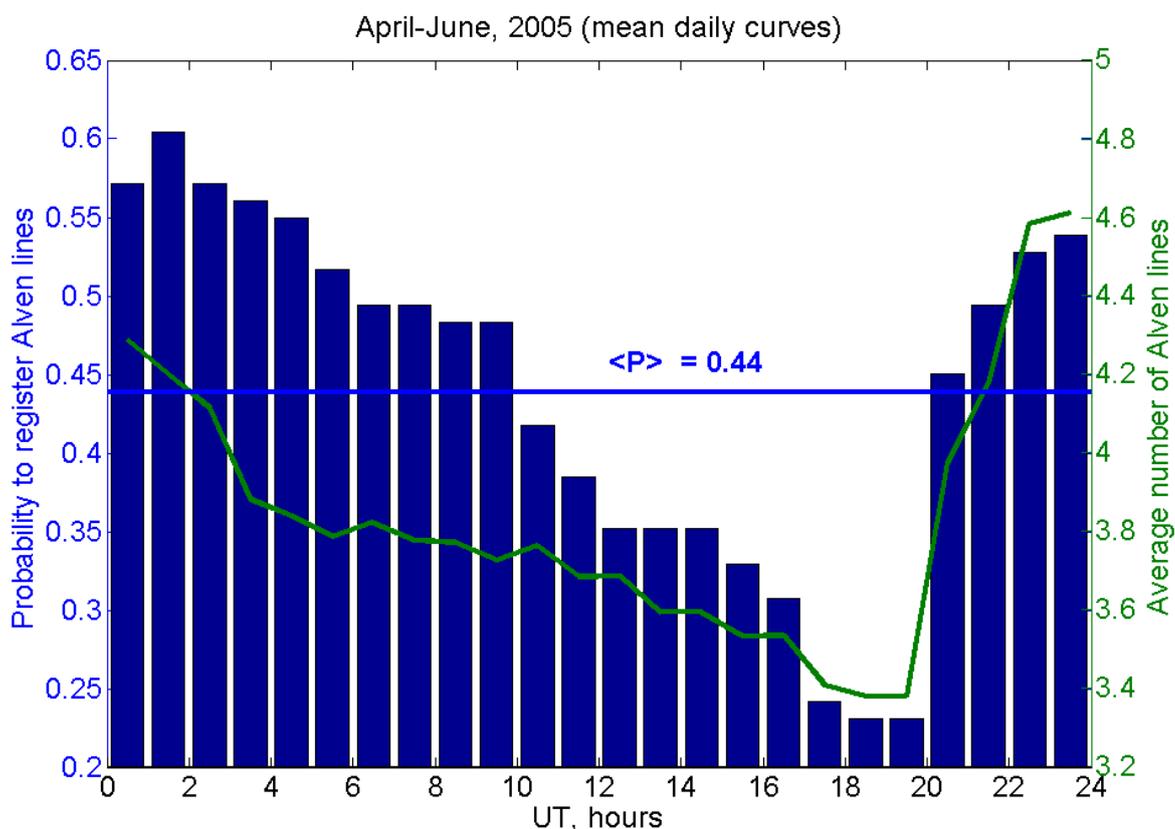


Рисунок 4.8 – Суточные распределения вероятности наземной регистрации ИАР (гистограмма, левая вертикальная шкала) и среднего числа регистрируемых резонансных линий (кривая линия, правая шкала).

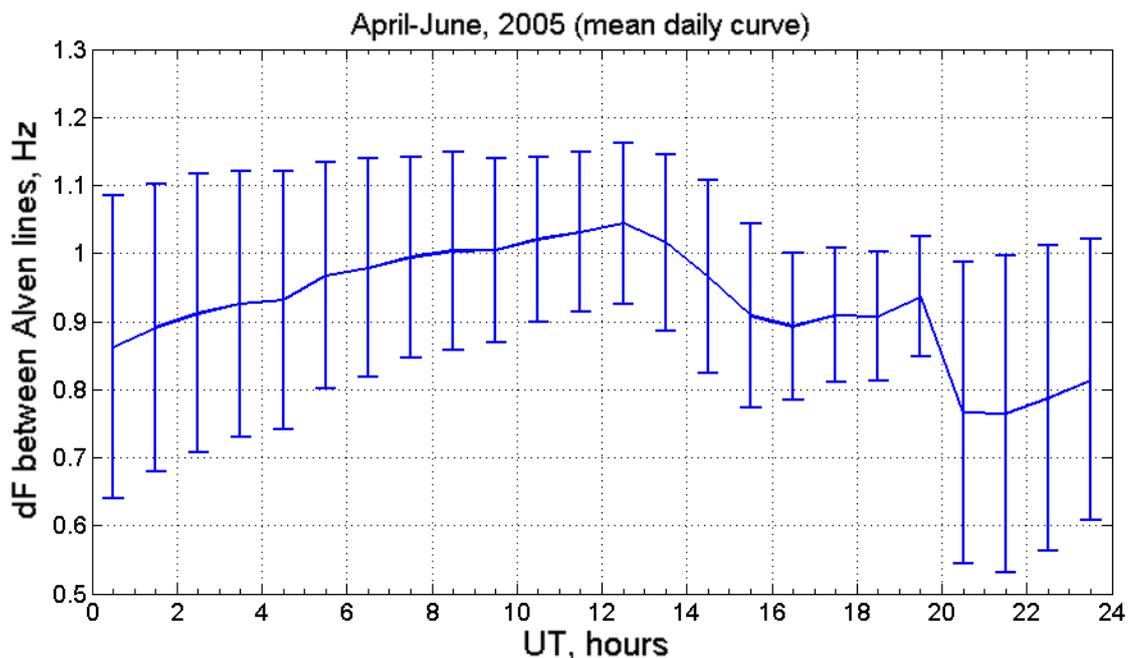


Рисунок 4.9 – Суточный ход среднего частотного разноса между линиями альфвеновского резонанса (в среднем за зимний период 2005 г.)

На диаграммах рис. 4.10 можно проследить сезонную зависимость вероятности наблюдения ИАР в сравнении с поведением критической частоты ионосферного слоя  $F$ . Из рис. 4.10 видно, что вероятность регистрации ИАР выше в зимние для южного полушария месяцы (июнь - август) и минимальна осенью и весной (апрель-май и сентябрь– ноябрь соответственно). В переходной период с конца весны (до декабря) на антарктической станции не было ни одного случая четкой регистрации ИАР. Очевидна связь такой зависимости с сезонной вариацией электронной плотности (и критической частоты  $f_{0F}$ ) в слое  $F$ , которая контролируется приходящим в ионосферу радиационным потоком. При спокойных условиях в геокосмосе (и отсутствии корпускулярных ионизирующих агентов) этот поток совпадает со средним потоком солнечного излучения (Рис. 4.10.б).

Отрицательная корреляция параметров ионосферного резонатора с электронной концентрацией вблизи максимума слоя [267] ранее считалась твердо установленным фактом, однако в действительности эта зависимость,

по меньшей мере, немонотонна (Рис. 4.11). Если  $f_{oF}$  становится выше 6 МГц, вероятность регистрации ИАР близка к нулю. Напротив, при малой плотности ионосферы вероятность возникновения дискретного спектра с ростом  $f_{oF}$  вначале увеличивается (Рис. 4.11). Кроме того, наблюдаемые характеристики ИАР определяются не только величиной  $f_{oF}$ , но высотами максимумов  $E$  и  $F$ , профилями ионной частоты соударений и параметрами “холловского” слоя, от которых зависит импеданс нижней “стенки” ИАР.

Как известно из литературы [268] с повышением локальной геомагнитной активности вероятность наблюдения ИАР резко падает. Это подтверждается измерениями на УАС. На рис. 4.12 представлена спектрограмма интенсивности сигнала 1-2 мая 2010 года.

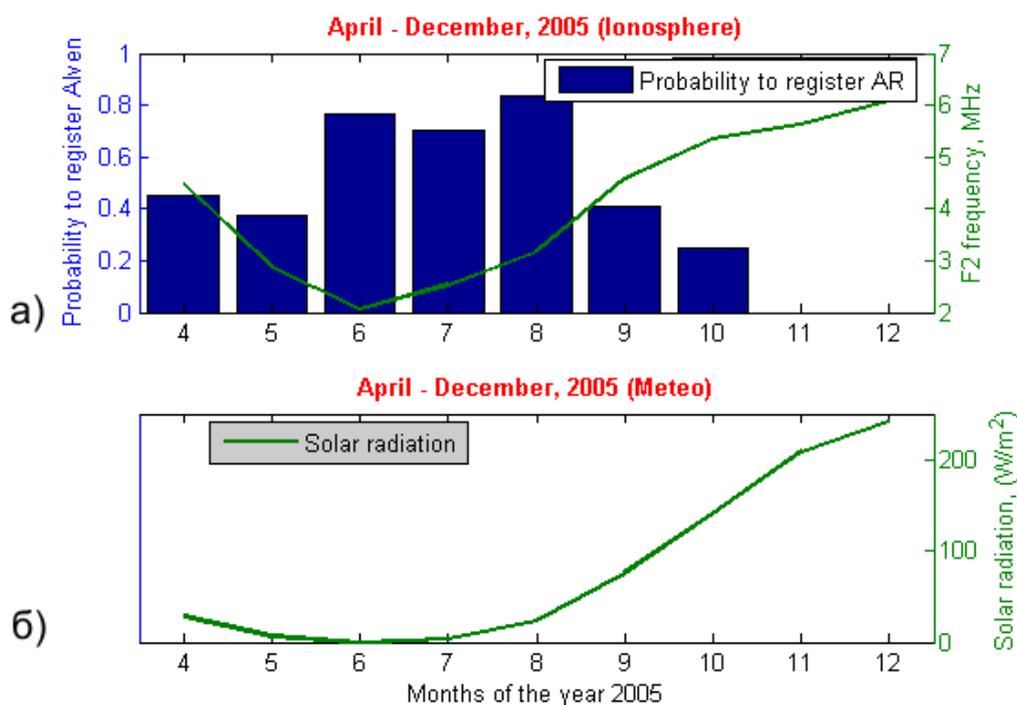


Рисунок 4.10 – (а) Относительная частота регистрации ИАР в разные месяцы 2005 г. (гистограмма, левая вертикальная шкала) в сравнении с критической частотой слоя F (кривая, отсчет значений по правой шкале); (б) сезонный ход среднемесячной величины радиационного потока Солнца (отсчет значений по правой шкале)

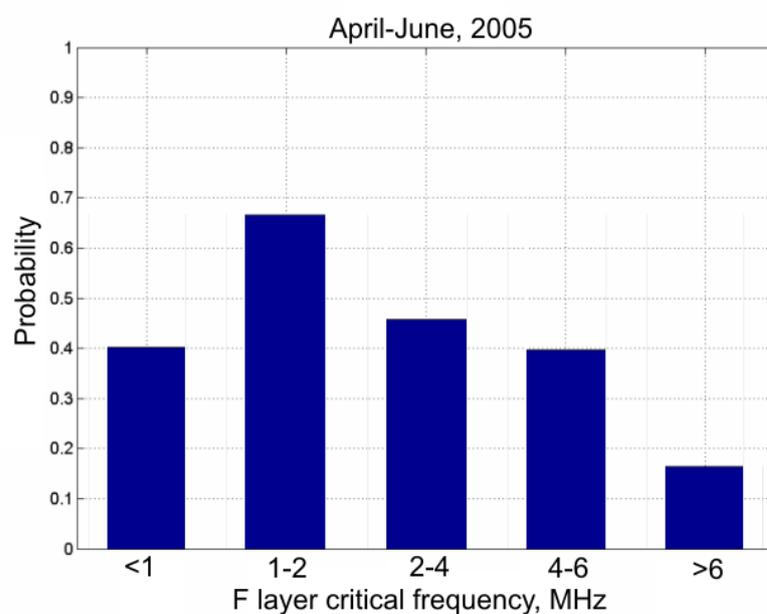


Рисунок 4.11 – Зависимость вероятности регистрации ИАР от критической частоты ионосферного слоя  $F$

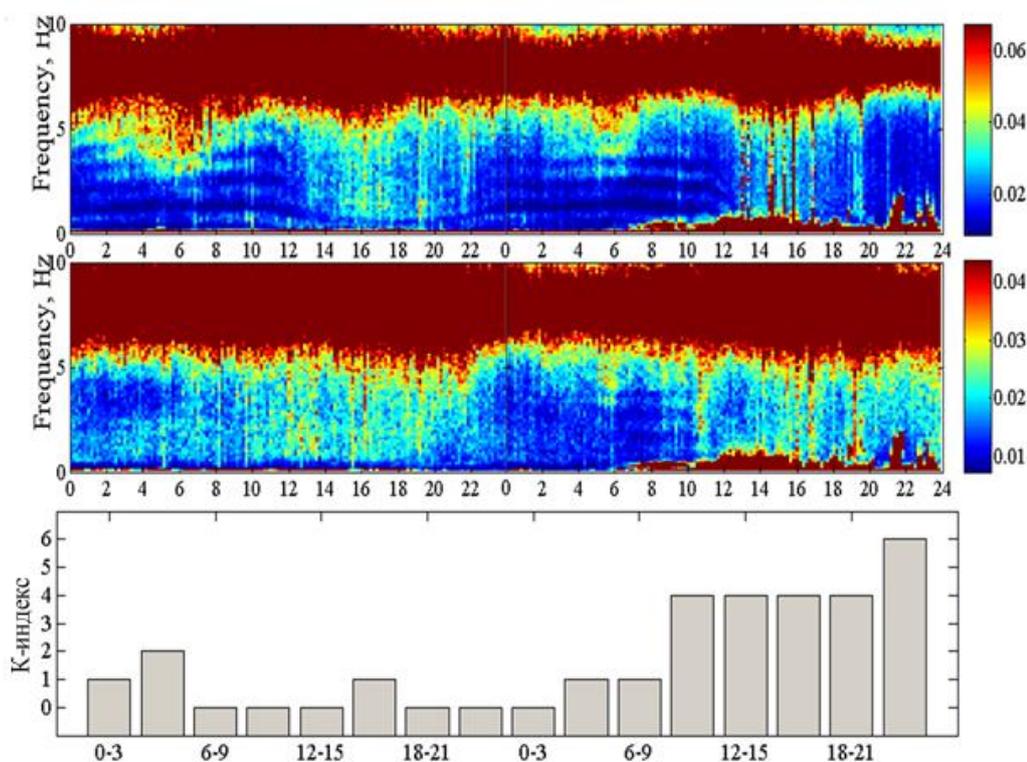


Рисунок 4.12 – Спектрограмма интенсивности сигнала вместе со значениями К-индекса, полученные на УАС 1-2.05.2010 г.

Четко видно РСС, которые соответствуют ИАР. 1 мая геомагнитная обстановка была спокойной (см., К-индексы на нижней панели рис. 4.12) и резонансные максимумы наблюдались в течение целых суток. 2 мая в районе 12 UT начались геомагнитные возмущения (К-индекс вырос до 4) и максимумы ИАР исчезли.

Однако, бывают случаи, когда при высоком уровне возмущений геомагнитного поля РСС, которые соответствуют ИАР, продолжают наблюдаться. На рис. 4.13 представлены спектрограмму интенсивности сигнала 10.07.2013, на которой четко видно РСС с 0 до 9 UT. В это время локальный К-индекс на УАС составлял 4-5 (см., рис. 4.13, нижняя панель).

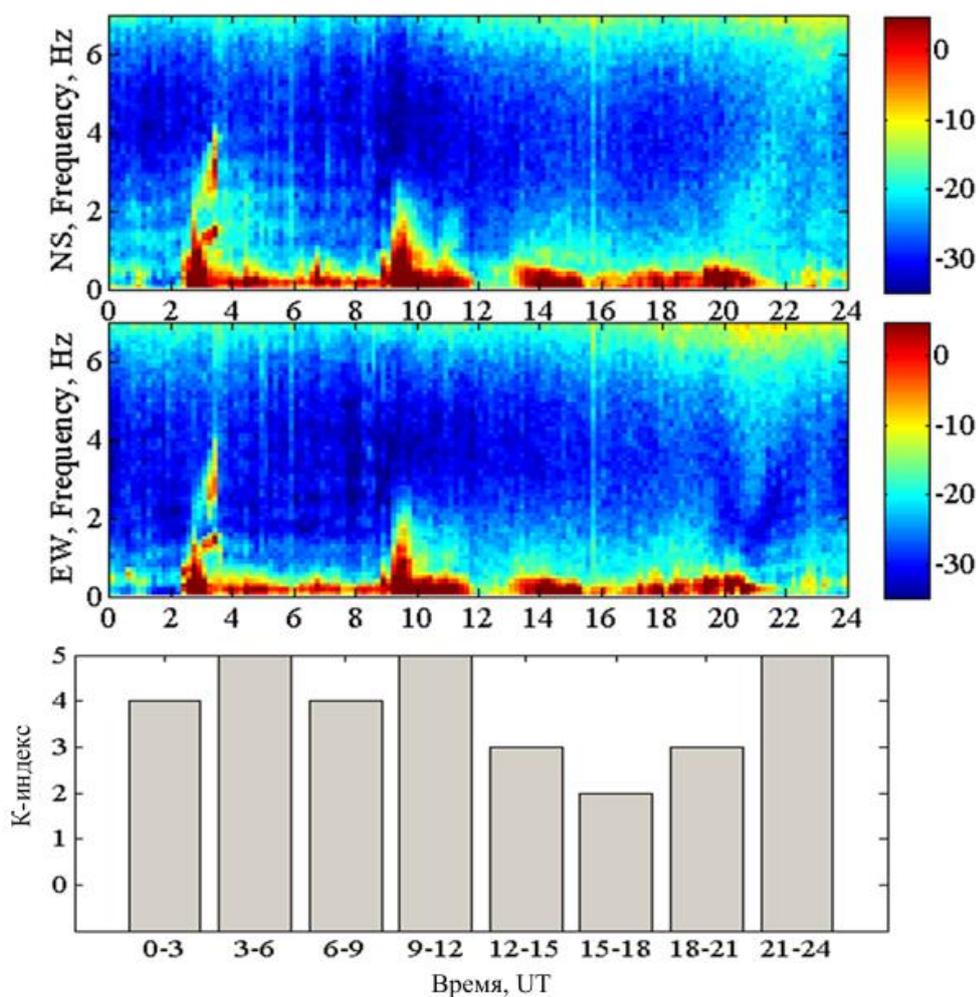


Рисунок 4.13 – Спектрограмма интенсивности сигнала вместе со значениями К-индекса, полученные на УАС за 10.07.2013 г.

Следовательно, при больших возмущениях геомагнитного поля возможно, как существование резонатора, так и наличие на его нижней границе условий для трансформации МГД волн в электромагнитные. Таким образом, влияние единичных событий увеличения корпускулярной активности Солнца на параметры ИАР не является однозначным и требует особого рассмотрения в каждом конкретном случае. В то же время, на больших временных интервалах корпускулярная активность Солнца и вероятность регистрации ИАР демонстрируют четкую отрицательную корреляционную связь. На рис. 4.14 показана зависимость среднегодовой вероятности регистрации ИАР и величины локального К-индекса на УАС (для удобства сравнения шкала К-индексов инвертирована).

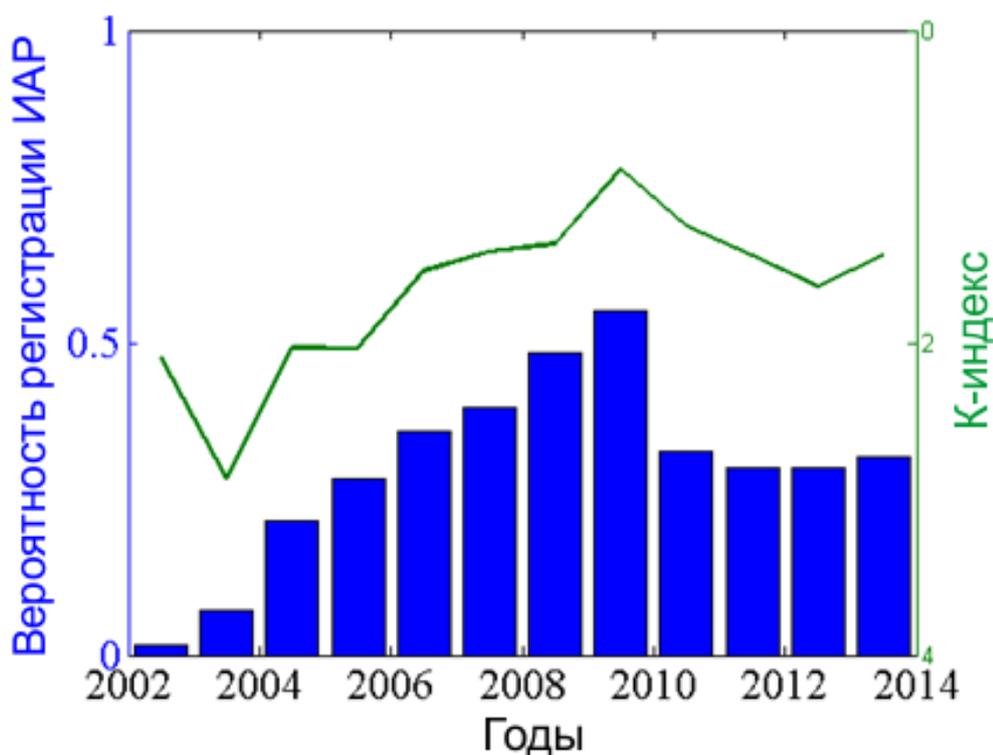


Рисунок 4.14 – Среднегодовые значения вероятности регистрации (столбики, левая ордината) и локальных К-индексов (линия, инвертированная правая ордината), рассчитанных на УАС

Наблюдается четкая тенденция, когда при уменьшении локальной геомагнитной активности увеличивается вероятность регистрации резонансов. Величина корреляции между среднегодовыми значениями К-индексов и вероятностью регистрации ИАР на УАС за период с 2002 по 2013 г., (полный солнечный цикл) составляет -0,87.

В то же время сопоставление динамических характеристик ИАР с единичными солнечными событиями (вспышками) не показало наличия какой-либо заметной реакции на эти спорадические события. На больших временных интервалах сопоставления вероятности регистрации ИАР с величиной потока рентгеновского излучения и числами Вольфа дает явную обратную зависимость (см., рис. 4.15).

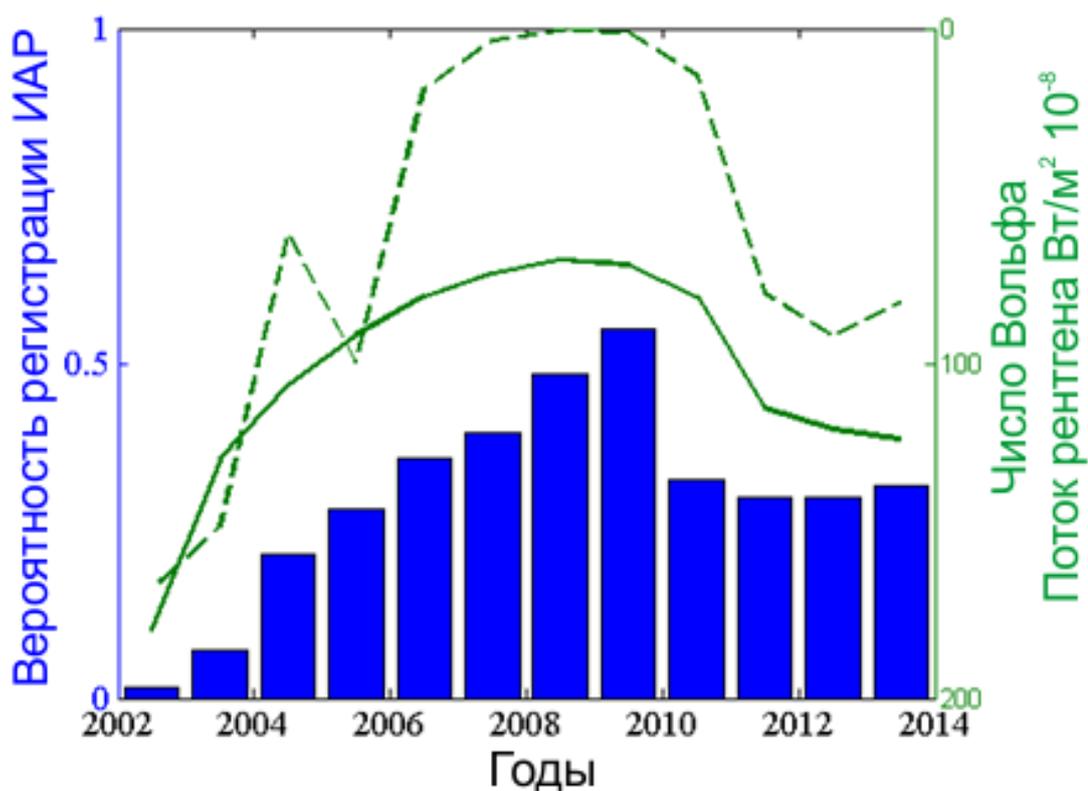


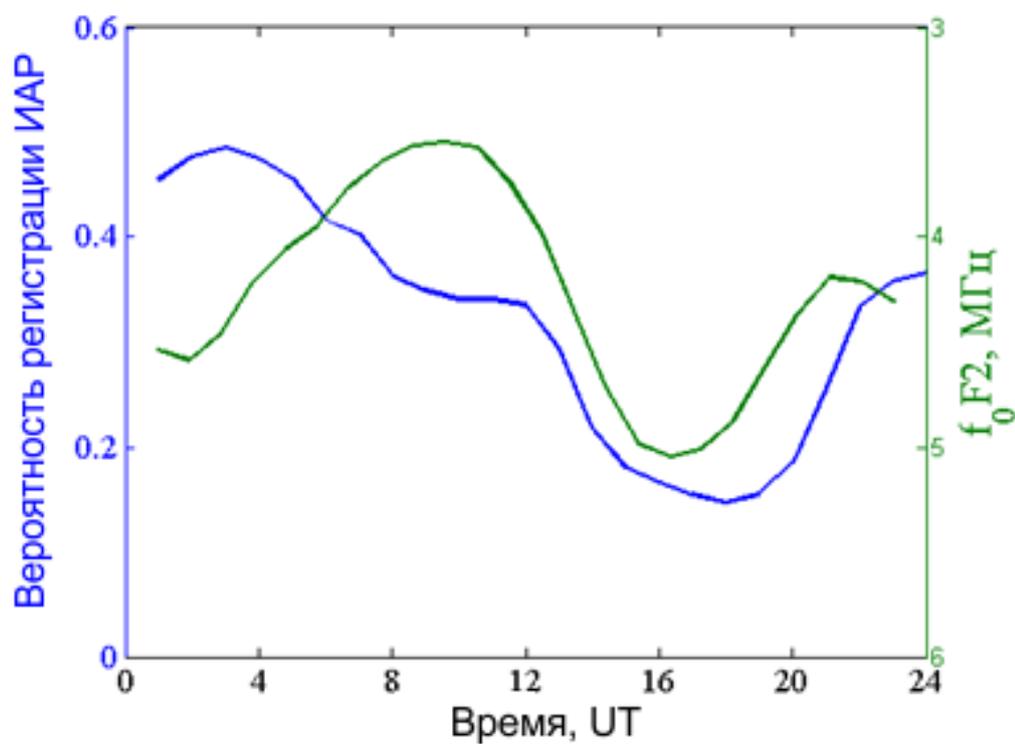
Рисунок 4.15 – Среднегодовые значения вероятности регистрации и (столбики, левая координата), числа Вольфа (сплошная линия, правая

инвертированная ордината) и поток рентгена (пунктирная кривая, правая инвертированная ордината)

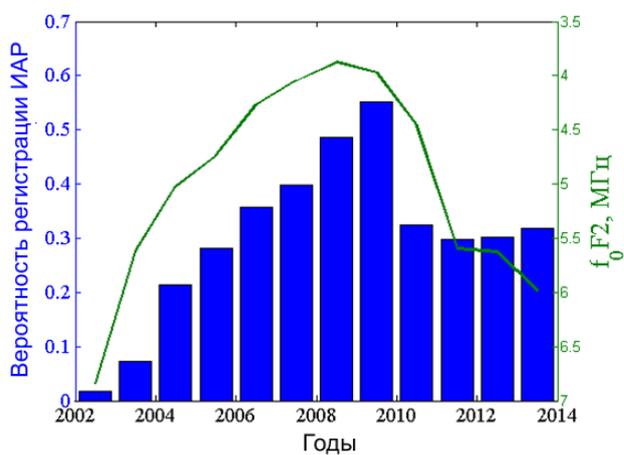
Оси значений потока рентгеновского излучения и чисел Вольфа инвертированная для удобства сравнения). Максимальные значения коэффициента корреляции составляют соответственно -0,90 и -0,85. Данные величины сопоставимы по значению с влиянием корпускулярной активности Солнца. Таким образом, выделить, какая долгосрочная активность Солнца (корпускулярная или радиационная) имеет большую значимость для ИАР на протяжении 11-ти летнего солнечного цикла, не представляется возможным и требует более детального анализа в будущем.

Отсутствие реакции ИАР на единичные солнечные события может означать, что волновая солнечная активность влияет на резонансы не напрямую, а косвенно, через характеристики околоземной плазмы. Как было показано в работе [26] критической частотой слоя F2 ионосферы полностью контролируется такой параметр ИАР как расстояние между резонансными максимумами. В данном подразделе было проведено сопоставление вероятности наблюдения РСС с величиной  $f_0F2$  и оказалось, что вероятность регистрации резонансов существенно зависит от критической частоты ионосферы. И, в отличие от связи непосредственно с радиационной активностью Солнца, эта зависимость проявляется на любом временном интервале: суточном, сезонном, межгодовом (см., рис. 4.16). Коэффициенты корреляции составляют -0,63, -0,81 и -0,81 соответственно.

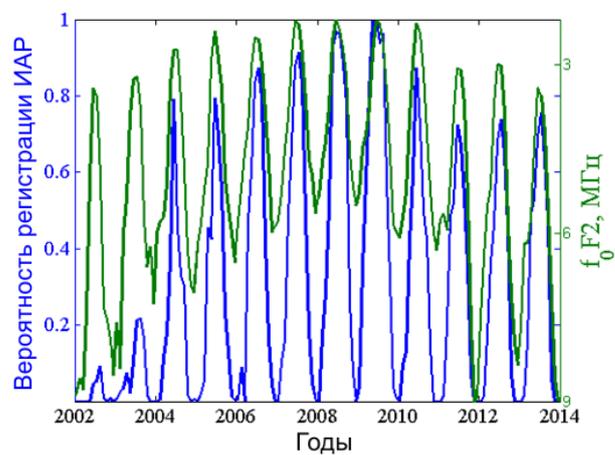
Таким образом, на коротких интервалах времени параметры ИАР контролируются радиационной активностью Солнца опосредованно через характеристики ионосферы, а также реагируют на единичные события корпускулярной активности (магнитные бури). На длительных интервалах времени корпускулярная активность Солнца также становится значимой для ИАР.



а)



б)



в)

Рисунок 4.16 – Вероятность регистрации (левая ось) и критическая частота ионосферы (правая ось) при: а) суточном, б) месячном, в) годовом усреднении

### 4.3. Сопоставление результатов многопозиционных наблюдений ИАР

Синхронные долговременные измерения характеристик ИАР в различных полушариях позволили разделить влияние локальных и глобальных факторов на поведение резонансных полей. Для анализа многопунктовых суточных и сезонных зависимостей были использованы записи 2010 г., когда имелись непрерывные массивы регистраций в 3-х пунктах: УАС, НЧО и Саянская солнечная обсерватория. Для этих пунктов была выполнена “сквозная” обработка УНЧ-СНЧ данных, в соответствии с алгоритмом, подробно описанном в разделе 2. Дополнительно оценивалась величина критической частоты слоя  $F2$  ионосферы -  $f^oF2$  по данным ионозондов. Таким образом, для каждого 10-ти минутного интервала определялись 3 параметра:  $dF$ ,  $f^oF2$  и факт наличия РСС.

Для всех пунктов наблюдались идентичные, четко выраженные сезонные и суточные зависимости в поведении параметров ИАР. На рис. 4.17 представлены вероятности регистрации ИАР. Максимум вероятности возбуждения резонатора приходится на локальную полночь, минимум – на полдень. Наблюдается плавное изменение вероятности в течении суток. Начало возрастания и спада зависит от локальных времен захода и восхода Солнца над пунктом наблюдения. Также отмечается четко выраженная зависимость вероятности регистрации по сезонам. Локальной зимой она очень высока и практически не зависит от времени суток. Весной резко падает и в полуденные часы ИАР не наблюдаются, летом резонансная структура видна только иногда в ночные часы. Осенью вероятность регистрации достаточно велика, но есть отчетливая разница между ночными и дневными часами. В то же время, наблюдаются и различия между пунктами наблюдения. Зимой вероятность регистрации на НЧО значительно ниже, чем на других станциях. Летом же наименьшая вероятность регистрации наблюдается на УАС.

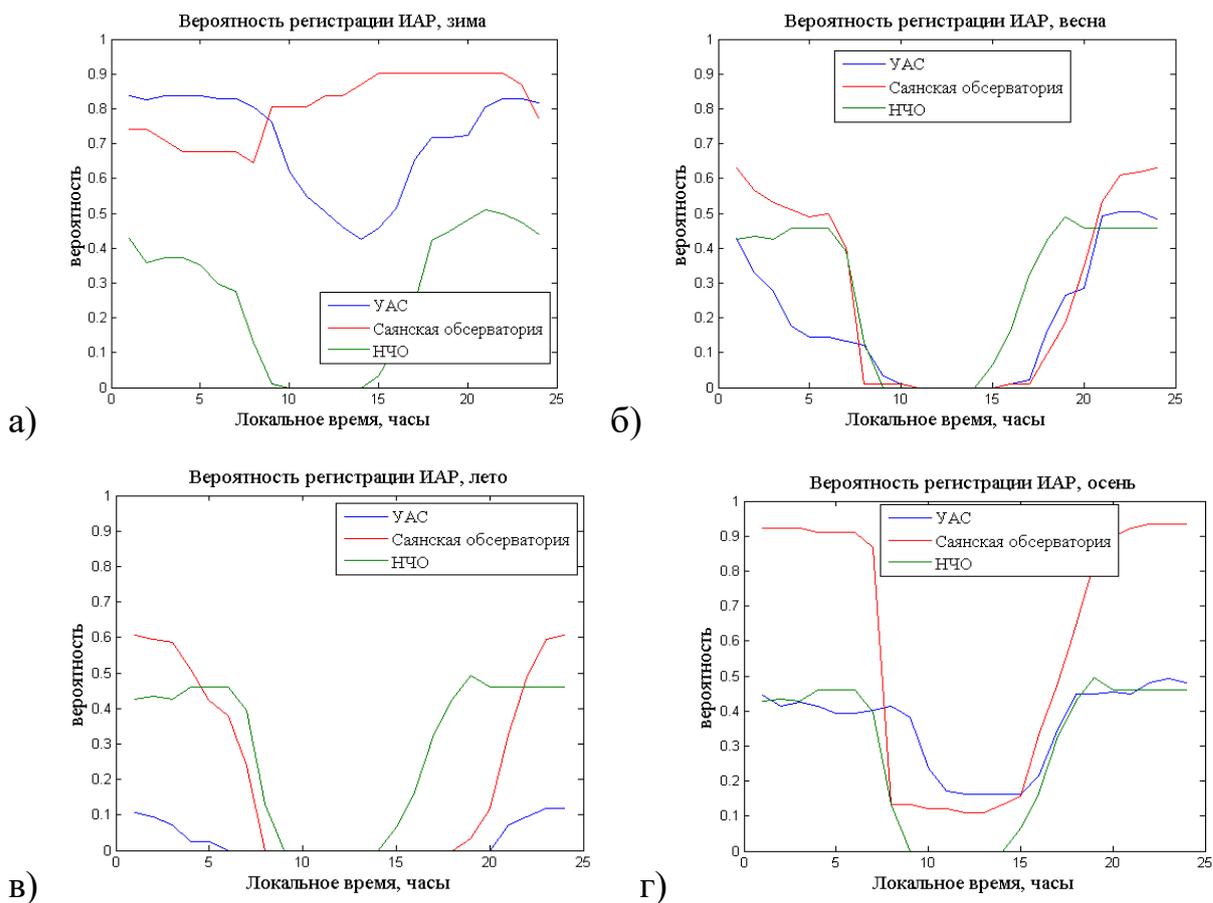


Рисунок 4.17 – Сезонно-суточные зависимости вероятности регистрации ИАР. Каждый график приведен для локального времени года: а) зима, б) весна, в) лето, г) осень. Цветом отмечена своя станция. По оси абсцисс отложено локальное время

Суточная зависимость частотного сдвига между резонансными модами  $dF$ , представленная на рис. 4.18, характеризуется плавным ростом с вечера к утру и быстрым уменьшением до минимума вблизи местного полудня. Так же, как и для вероятности регистрации, для  $dF$  имеет место сезонная зависимость: локальной зимой величина  $dF$  максимальна, затем происходит уменьшение к лету и увеличение осенью. Суточное поведение  $dF$  качественно похоже в каждом из пунктов. Также сопоставимы величины  $dF$ . Следует отметить наличие локального максимума в суточном ходе величины  $dF$  в районе 8-10 часов на УАС, который отсутствует в данных среднеширотных обсерваторий.

Также отличие наблюдается локальным летом, когда на Антарктическом полуострове существует аномалия в поведении критических частот: ночью они выше, чем днём [268]. Из-за этого величина  $dF$  оказывается ниже.

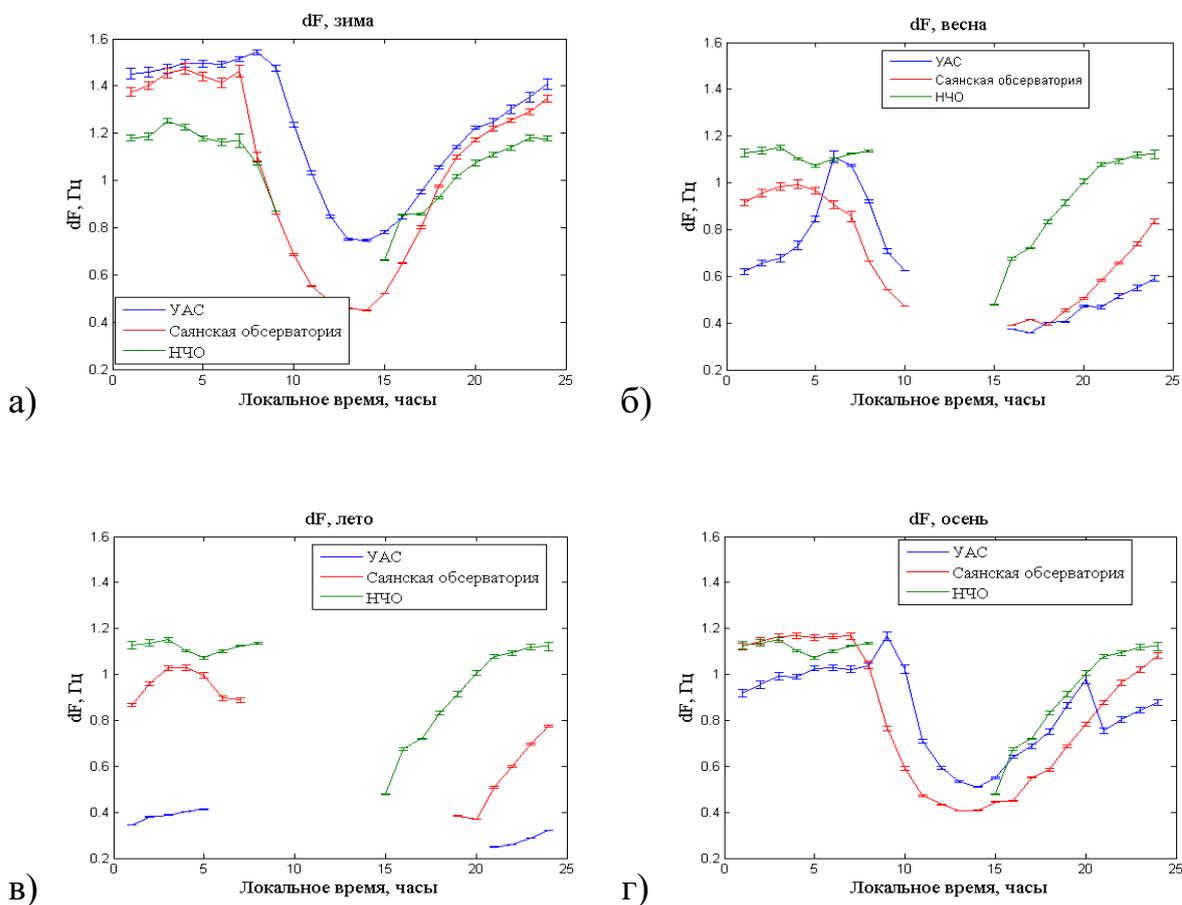


Рисунок 4.18 – Сезонно-суточные зависимости расстояния между соседними максимумами  $dF$ . Каждый график - это локальное время года: а) зима, б) весна, в) лето, г) осень. Цветом отмечены разные пункты наблюдения. По оси абсцисс отложено локальное время

В теоретических и экспериментальных работах, посвященных ИАР указывается, что резонансные пики РСС могут существовать в частотном диапазоне до 10 Гц. В то же время по данным наблюдений на УАС, НЧО и Саянской обсерватории РСС фиксировались на частотах вплоть до 30 Гц и более. На рис. 4.19 представлена спектрограмма, полученная на НЧО для

6.12.2007 года, когда РСС наблюдалась на рекордно высоких частотах (в интервале времени 00:00-05:00 UT до 34 Гц в канале “восток-запад”). В канале “север-юг” в это время и после 20:00 UT, линии ИАР наблюдались выше первого шумановского максимума до частот порядка 20 Гц.

На рис. 4.20 приведена гистограмма регистрации подобных РСС на трёх станциях по месяцам. На ней видно, что частота появления ИАР выше 10 Гц для каждой из станций различна. Даже на НЧО и Саянской обсерватории, несмотря на схожее сезонное поведение “высокочастотной” РСС, в одно и то же время они наблюдаются менее чем в 20% случаев. Таким образом, получено статистическое количественное подтверждение того, что характеристики ИАР зависят, в большей мере, не от глобальных ионосферных условий, а от состояния ионосферы над пунктом наблюдения.

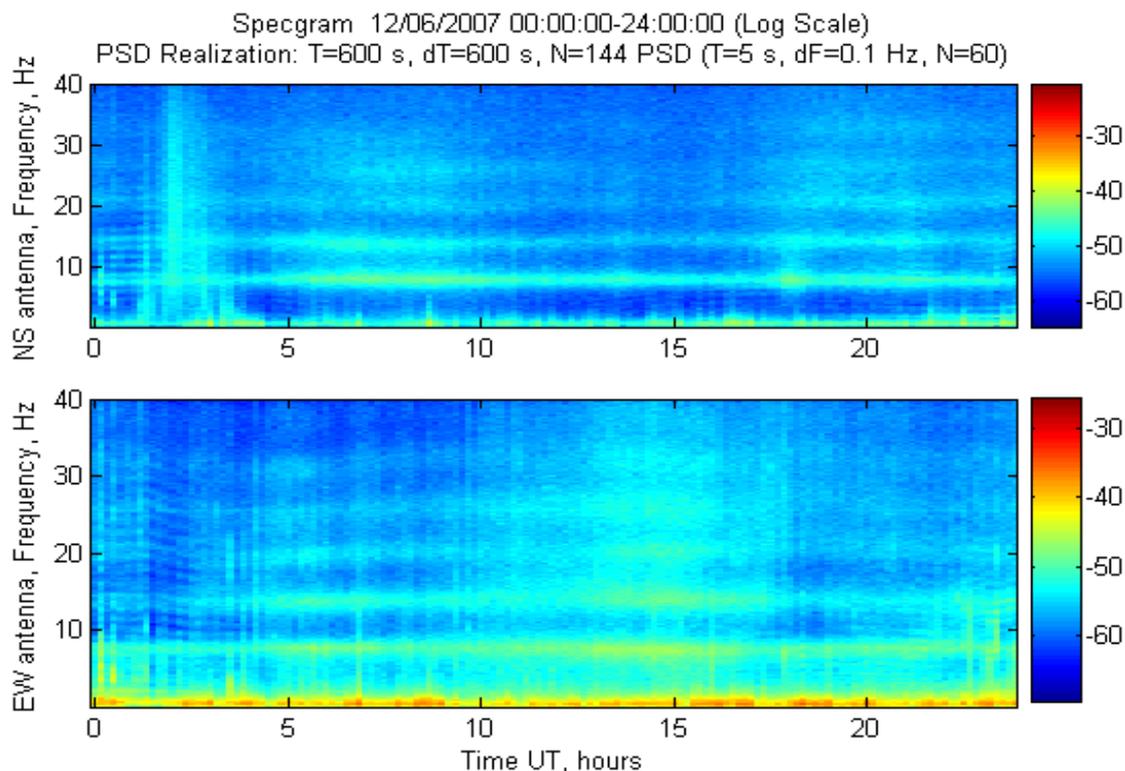


Рисунок 4.19 – Спектрограмма, полученная на НЧО 6.12.2007 г., когда РСС были зафиксированы на частотах до 34 Гц

Анализ связи параметров ИАР с геомагнитной активностью в целом подтвердил описанную в литературе [269] обратную зависимость между

вероятностью регистрации и К-индексом геомагнитной активности (см., рис. 4.21.а).

Однако по данным наблюдений на УАС, НЧО и Саянской обсерватории эта связь является менее выраженной, чем это описано в литературе.

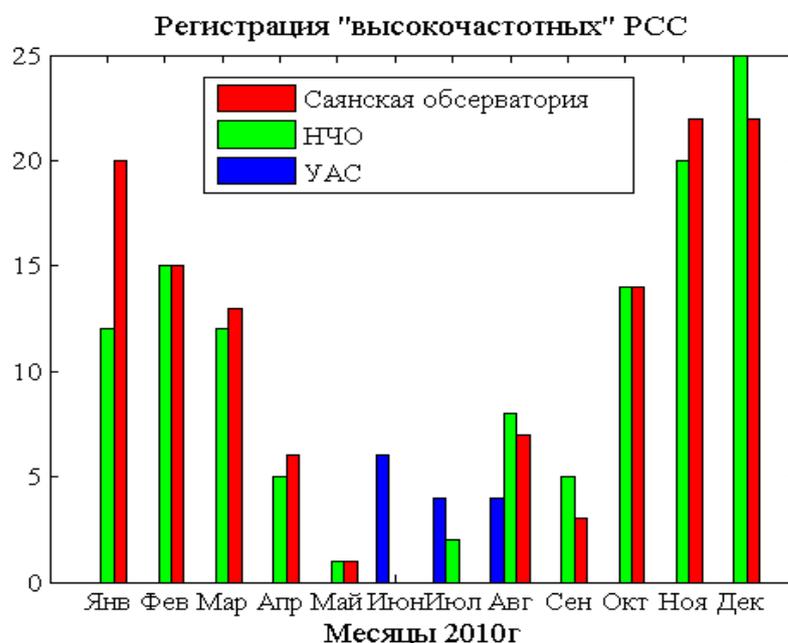


Рисунок 4.20 – Гистограмма регистрации “высокочастотных” РСС по трём станциям наблюдений. По оси абсцисс отложены месяцы 2010 года.

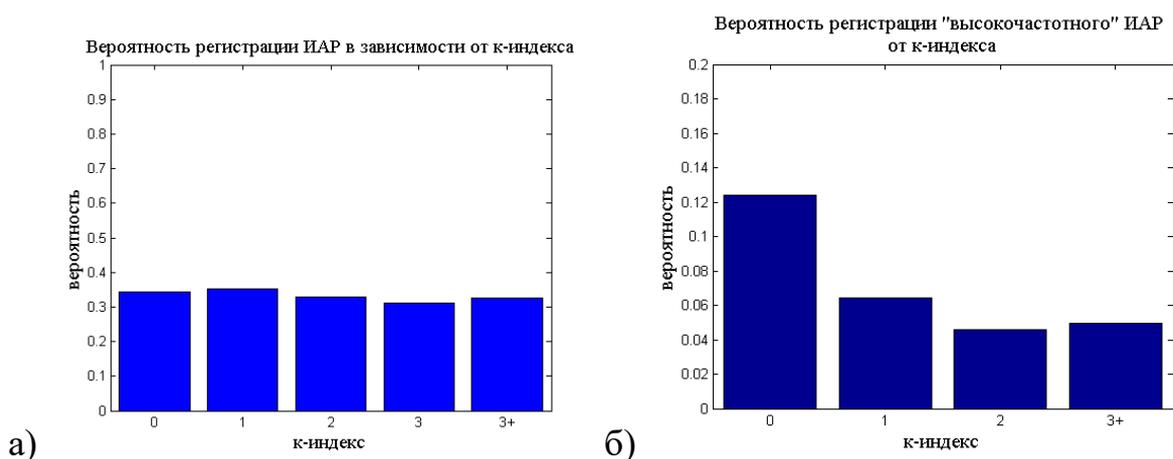


Рисунок 4.21 – Зависимость вероятности регистрации ИАР от К-индекса магнитной активности. а) регистрация РСС независимо от частотного диапазона, б) случаи регистрации “высокочастотной” РСС

В то же время уменьшение вероятности регистрации при К-индексе выше 3, не может считаться статистически достоверным, из-за малости общего числа случаев, когда реализовывались высокие индексы геомагнитной активности. В то же время в литературных источниках [269] описана более четкая обратная зависимость - чем выше К-индекс, тем ниже вероятность регистрации. Причина таких отличий может заключаться также в том, что большая часть описанных в подразделе результатов получена на высокоширотном пункте УАС. Принято считать, что основным источником для ИАР являются молниевые разряды. Однако в авроральных областях не исключена возможность генерации резонанса во время полярных активаций, интенсивность которых увеличивается при повышении магнитной активности. Для проверки этого предположения необходим специальный анализ экспериментального материала. Кроме того, в будущем, необходимо проверить статистическую достоверность полученных результатов на большем массиве данных.

Если проанализировать подобное распределение для “высокочастотных” мод РСС (рис. 4.21.б), то наблюдается четкая обратная зависимость, чем выше К-индекс, тем ниже вероятность регистрации ИАР. При этом следует иметь в виду, что 2010 год не был годом солнечного максимума, поэтому целесообразно обобщить этот результат и для максимума солнечной активности.

#### 4.4. Эффект расщепления резонансных мод ИАР

Анализ данных многопунктовых измерений выявил не известный ранее эффект расщепления низших мод ИАР (введем обозначение величины расщепления  $\Delta F_{spl}$ ). Наиболее контрастно этот эффект проявляется в частотно-временных зависимостях для коэффициента эллиптичности  $r(f,t)$ . В качестве примера на рис. 4.22 приведена суточная зависимость  $r(f,t)$ , построенная по данным ССО для 10 декабря 2010 г. Как видно из этой иллюстрации, начиная

с 12 UT (19 LT) моды ИАР расщепляются на два “сателлита”, расстояние между которыми плавно растет до 0.8-1 Гц в 20 UT (3 LT). К 24 UT (7 LT – локального времени) величина  $\Delta F_{spl}$  уменьшается.

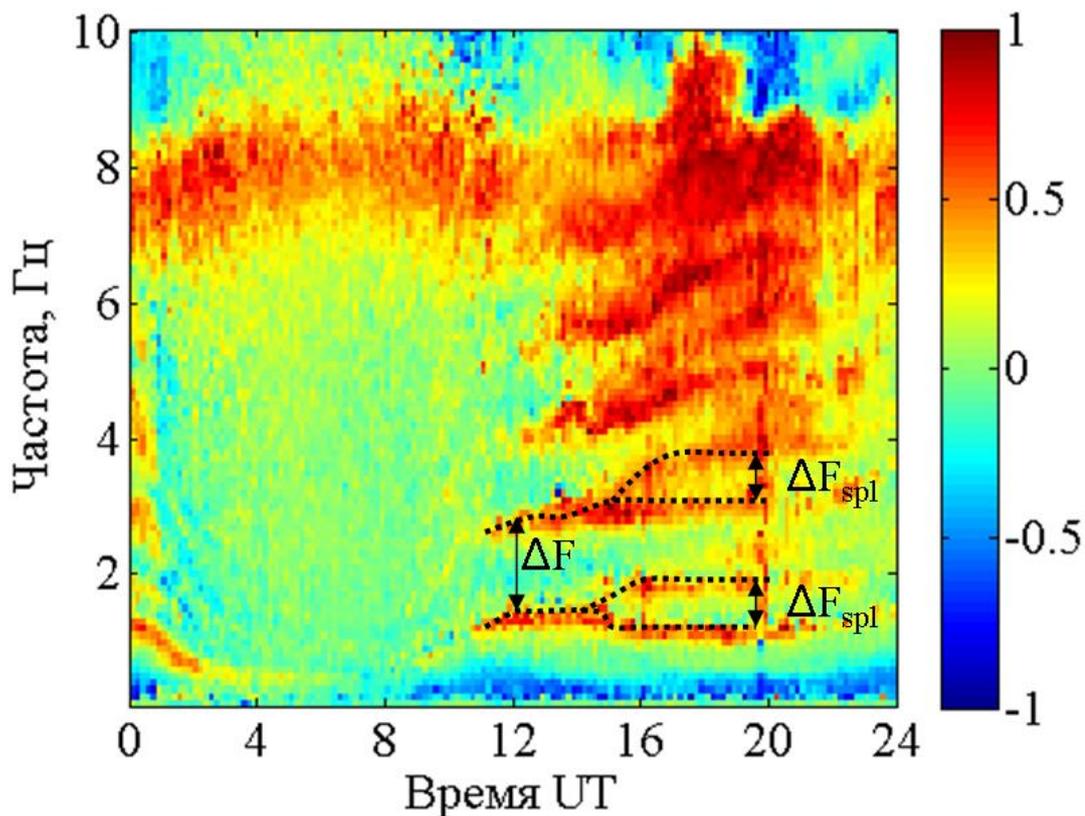


Рисунок 4.22 – Расщепление линий ИАР в коэффициенте эллиптичности. Данные ССО для 10/12/2010 г.

Эффект четко прослеживается для 3-х первых мод ИАР, причем с увеличением номера резонансного мода ИАР момент возникновения расщепления незначительно сдвигается в ночные часы. Оба “сателлита” и нерасщепленные участки линий ИАР имеют практически круговую поляризацию с направлением вращения по часовой стрелке (коэффициент эллиптичности близок к 1). Анализ данных показал, что другие поляризационные и спектральные характеристики ИАР на расщепленных участках суточной зависимости также являются идентичными и не могут быть использованы для селекции сателлитов. Такое поведение является типичным

для всех 104 событий расщепления, зарегистрированных на ССО и УАС за четыре года (с 2010 по 2013).

Результаты анализа суточных закономерностей в поведении расщепления на ССО и УАС представлены на рис. 4.23.а и 4.23.б. Сезонная вероятность регистрации расщепления и зависимость от 11-ти летнего цикла солнечной активности продемонстрированы на рис. 4.24.а и 4.24.б. Из рисунка 4.23 видно, что расщепление в обоих пунктах регистрируется только локальной ночью. Время наблюдения для большинства событий соответствует интервалу максимальной вероятности регистрации ИАР, который на ССО длится с 18 до 6 LT, а на УАС с 18 до 9 LT.

Разные длительности периода наблюдаемости связаны с большей продолжительностью ночи на УАС.

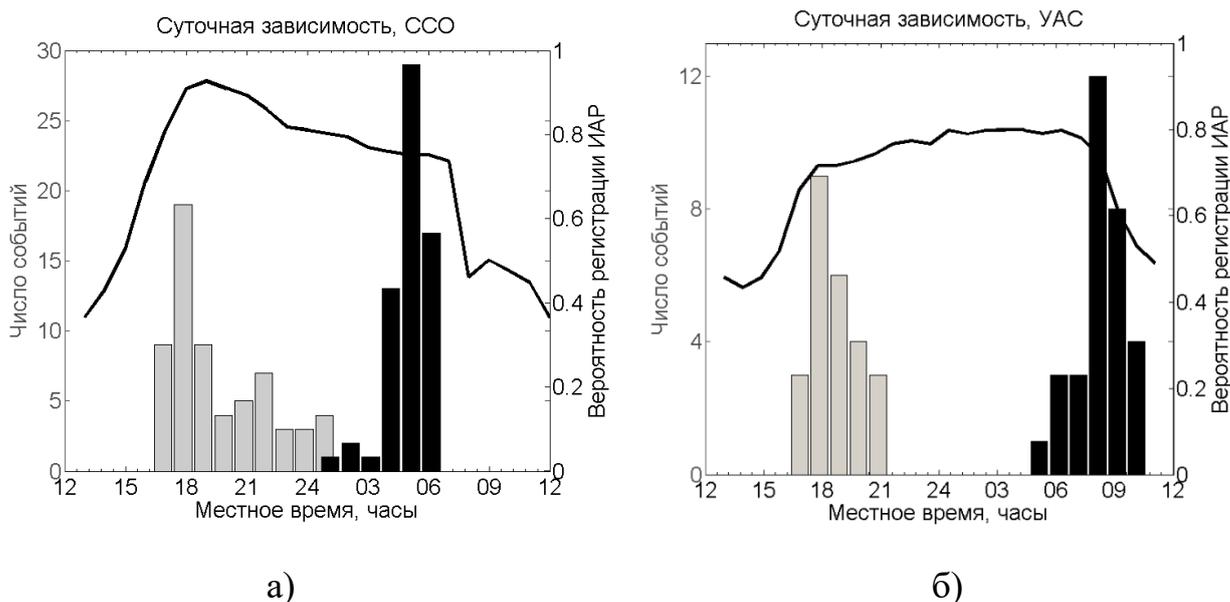
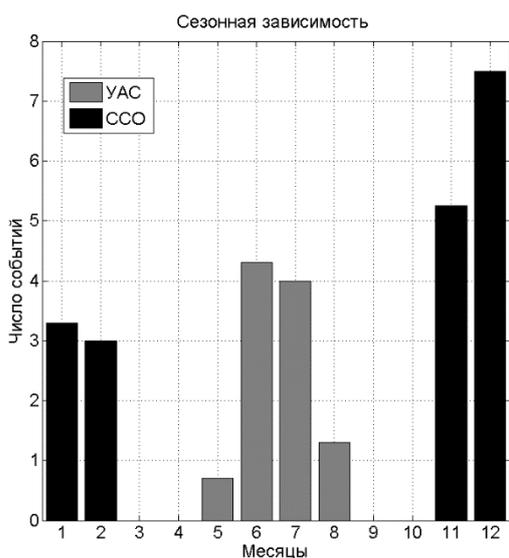
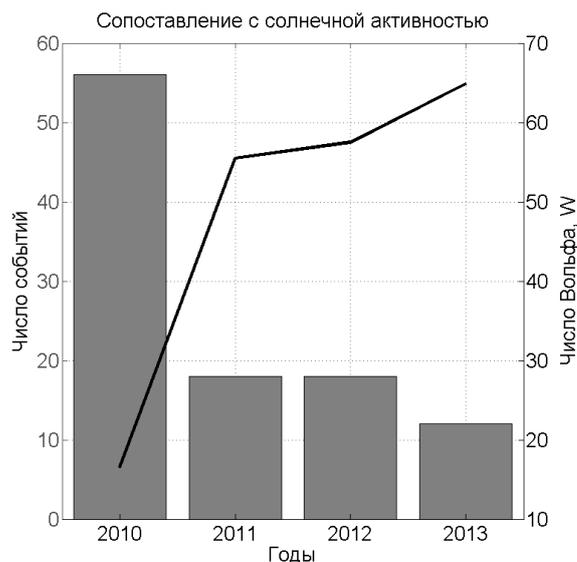


Рисунок 4.23 – Распределение числа случаев появления (серые столбики) и исчезновения (черные столбики) расщепления (левая ордината) и кривая вероятности регистрации ИАР (правая ордината) в зависимости от местного времени на ССО (а) и УАС (б)

Рисунок 4.24.а демонстрирует, что в обоих пунктах расщепление уверенно регистрируется только во время локальной зимы, а во все остальные сезоны года отсутствует. На рисунке 4.24.б показано распределение числа случаев расщепления в обоих пунктах для четырех лет наблюдений совместно со средним за год числом Вольфа  $W$ , которое характеризует солнечную активность в 11-ти летнем цикле.



а)



б)

Рисунок 4.24 – (а) Среднемесячное число событий расщепления на УАС и ССО; (б) общее число событий расщепления регистрируемых на ССО и УАС (столбики, левая ордината) в зависимости от среднегодового числа Вольфа,  $W$  (линия, правая ордината)

Отчетливо видно, что число зарегистрированных событий находится в обратной зависимости от солнечной активности. Выполненный анализ показывает, что суточные, сезонные и межгодовые зависимости “наблюдаемости” расщепления полностью соответствуют аналогичным кривым вероятности регистрации ИАР, однако для расщепления они выражены более четко. Отметим, что вследствие сложности регистрации этого эффекта в освещенное время суток, когда отдельные моды ИАР практически

сливаются, нельзя однозначно утверждать, что расщепление днем отсутствует. В то же время, отсутствие расщепления в другие сезоны года – весной, летом и осенью – является достоверным наблюдательным фактом, принципиальным для физической интерпретации такого поведения ИАР в глобальном масштабе.

В данном подразделе проанализирована также зависимость величины расщепления  $\Delta F_{spl}$  и соотношения величин -  $\Delta F_{spl}/dF$  от критической частоты ионосферы. С этой целью исследовано поведение усредненных зависимостей  $dF(t)$ ,  $\Delta F_{spl}(t)$ ,  $f_oF_2(t)$  (Рис. 4.25.а) и соотношение  $\Delta F_{spl}(t)/dF(t)$  (Рис 4.25.б) для всех случаев, когда расщепление наблюдалось в течение 10 часов и более.

Как видно из рисунка 4.25.а формы кривых для средней разности частот между модами ИАР  $dF(t)$  и величины расщепления  $\Delta F_{spl}(t)$  различаются.  $\Delta F_{spl}(t)$  характеризуется меньшим вечерним возрастанием, наличием практически стационарного ночного участка и значительным уменьшением в утренние часы. Рисунок 4.25.б демонстрирует, что величина расщепления  $\Delta F_{spl}(t)$ , нормированная на межмодовый частотный сдвиг  $dF(t)$  состоит из трех характерных участков, которые хорошо аппроксимируются линейными функциями. Это: участок развития расщепления 1 (~16-20 LT, когда относительная величина расщепления линейно растет), стационарный участок 2 (~20-02 LT, когда относительная величина расщепления не меняется) и участок релаксации 3 (~02-05 LT, когда относительная величина расщепления линейно уменьшается). Отметим, что на стационарном участке  $\Delta F_{spl}(t)/dF(t)$  с учетом доверительных интервалов не превышает значение 0.5 (не достигает половины межмодовой частотной разности, изображенной на рис. 4.25.б пунктирной линией). Можно констатировать, что моды не “перепутываются” и не взаимодействуют между собой.

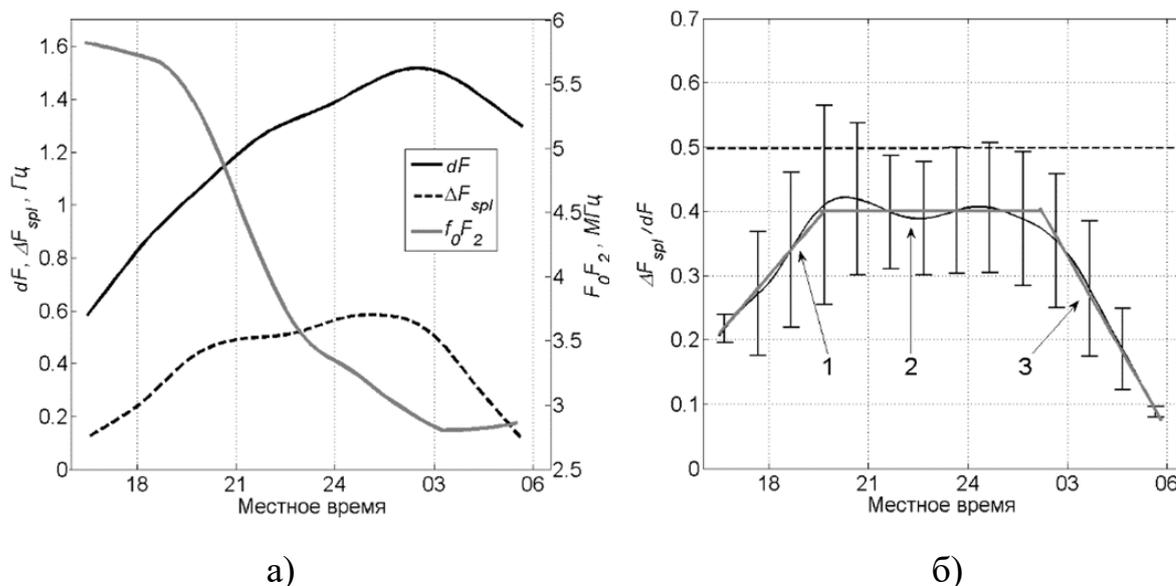


Рисунок 4.25 – (а) Сглаженные 3-х часовым окном и усредненные (по всем случаям расщепления длительностью 10 часов и более) зависимости для:  $dF(t)$ ,  $\Delta F_{spl}(t)$ ,  $f_0F_2(t)$ ; (б) сглаженная 3-х часовым окном зависимость  $\Delta F_{spl}(t)/dF(t)$  – черная кривая. Серыми отрезками показаны аппроксимации относительной величины расщепления на участках развития – 1, стационарного расщепления – 2 и релаксации – 3

Можно предложить несколько гипотез о механизме возникновения эффекта. Первая из них – это предположение о том, что расщепление связано с появлением двух эффективных отражающих границ в нижней ионосферной или верхней магнитосферной частях резонатора. Другой возможностью является появление резонансных условий для магнитозвуковых колебаний, распространяющихся в той же полости с отличающимися волновыми нормальными. Можно также допустить, что расщепление может формироваться одновременно для двух граничных условий “электрической” и “магнитной” стенок, вблизи пучности и узла стоячей альфвеновской волны. Такой механизм объясняет стабильность величины расщепления относительно номера резонансной моды. Наконец, в качестве еще одной гипотезы следует рассмотреть возможность просачивания резонансных колебаний из

магнитосопряженной области, обладающей другими условиями освещенности, отличающимися значениями критических частот и, как следствие, резонансными частотами.

#### 4.5 Методика восстановления критической частоты ионосферы по данным наблюдений ИАР

В литературе [243] описана связь между характеристиками ионосферы и параметрами ИАР, согласно которой расстояние между максимумами  $dF$  обратно пропорционально критической частоте слоя  $F_2$ , и высказано предположение, что эту зависимость можно использовать для оценки  $f_0F_2$  по данным анализа ИАР. Результаты анализа связи  $dF$  с критической частотой по данным регистрации РСС на большом массиве данных в нескольких пунктах наблюдения подтверждают такую возможность. Наличие ионозондов вблизи пунктов регистрации УАС и ССО позволило сопоставить выявленные закономерности поведения параметров РСС с критической частотой ионосферного слоя  $f_0F_2$ . Критическая частота ионосферы была выбрана для анализа, поскольку возможность ее оценки по наблюдениям ИАР представляет значительный практический интерес. С другой стороны, от  $f_0F_2$  зависит величина альфвеновского показателя преломления (см., первый подраздел данного раздела и работы [78, 243, 269]) и поэтому она должна существенно влиять на значения собственных частот ИАР. Проведенный анализ продемонстрировал, что как вероятность регистрации РСС, так и  $dF$  находятся в противофазе с  $f_0F_2$ . Наиболее показательной и хорошо оцениваемой количественно, оказалась зависимость величины  $dF$  от критической частоты слоя  $F_2$  ионосферы. Эта связь четко прослеживается на рис. 4.25, где представлены графики критической частоты ионосферы совместно с величиной частотного разноса между максимумами РСС для

годового (Рис 4.26.а) и суточного (Рис 4.26.б) интервалов. Сплошной линией показана критическая частота, пунктирной –  $dF$ .

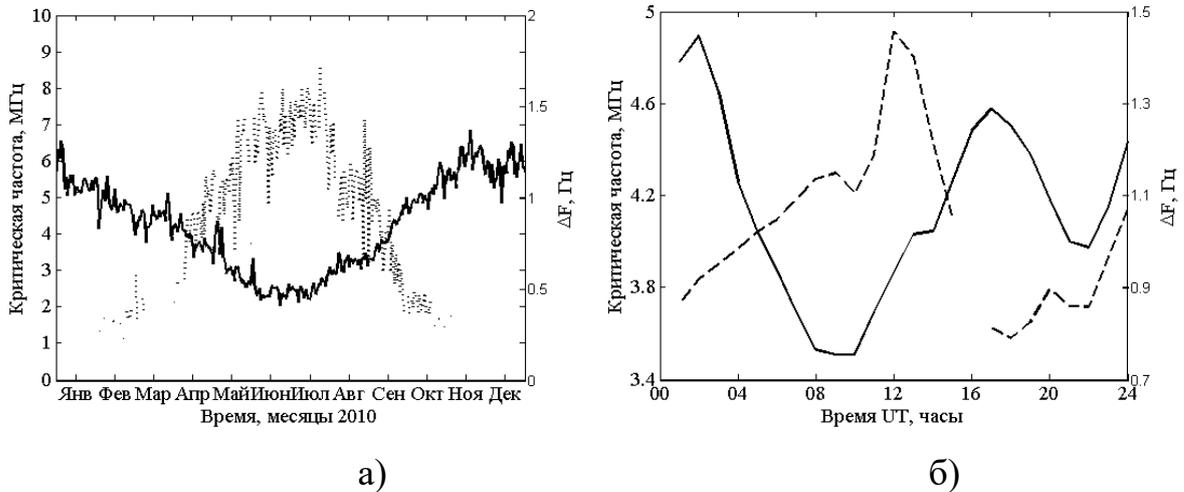


Рисунок 4.26 – Полученные на УАС зависимости для величин  $dF$  (пунктирные кривые) и  $f_0F_2$  (сплошные кривые). а) за 2010 год, б) среднесуточный график

Наличие явной зависимости между величиной  $dF$  и критической частотой ионосферы, позволило поставить и решить задачу об оценке критической частоты слоя  $F_2$ , по данным наблюдений РСС.

Согласно [243, 270]:

$$dF = \frac{c}{2n_A L}, \quad (4.17)$$

где  $c$  - скорость света;  $L = h + l$  - линейный размер резонатора, обусловленный толщиной главного ионосферного максимума -  $h$  и характерным масштабом спада альфвеновского показателя преломления выше максимума F2-слоя -  $l$ ;  $n_A$  - альфвеновский показатель преломления

$$n_A = \frac{c\sqrt{4\pi\rho}}{B_0} \propto \frac{\sqrt{M_{eff} \cdot N_e}}{B_0}. \quad (4.18)$$

Здесь:  $B_0$  - напряженность магнитного поля Земли;  $\rho$  и  $N_e$  - плотность плазмы и электронная концентрация;  $M_{eff}$  - эффективная масса ионов. Для упрощения дальнейших выкладок, следуя [243], будем считать, что электронная концентрация в ионосферном слое толщиной  $L$  не зависит от высоты и равна электронной концентрации в максимуме слоя F2 -  $N_{e_{max}}$  (т.е. ионосфера является однородной). Учтем также, что электронная концентрация является квадратичной функцией от плазменной частоты  $f_p$  [271]:

$$N_e = 0.0124 \cdot f_p^2. \quad (4.19)$$

Для электронной концентрации в максимуме слоя F2 -  $N_{e_{max}}$  можно написать следующее простое выражение:  $N_{e_{max}} = 0,0124(f_0 F2)^2$ . Таким образом, учитывая (4.18-4.19) и предполагая, что ионосферная плазма является однокомпонентной, получаем

$$n_A \propto \frac{f_0 F2}{B_0}. \quad (4.20)$$

Если считать, что линейные размеры резонатора меняются слабо, то, учитывая выражения (4.17-4.20), получим, что критическая частота слоя F2 обратно пропорциональна разнице частот между соседними резонансными максимумами. Откуда можно записать выражение для оценки критической частоты слоя F2 по измеряемым в эксперименте величинам  $dF$ :

$$f_0 F_2 = \alpha / dF. \quad (4.21)$$

В коэффициент  $\alpha$  явным образом входит величина геомагнитного поля. Для определения коэффициента пропорциональности в выражении (4.21) была построена экспериментальная зависимость критической частоты от  $dF$  в двух пунктах на УАС и на Саянской обсерватории. Для этого массив  $f_0F_2$  был разбит по диапазонам  $dF$  с шагом 0,1 Гц. Для каждого такого диапазона проводилось усреднение критических частот. Далее, была произведена замена переменных и построены графики в координатах  $f_0F_2 - 1/dF$ . В полученную кривую с помощью метода наименьших квадратов была вписана прямая, проходящая через начало координат. Наклон данной прямой определяет величину коэффициента  $\alpha$ . Для Саянской обсерватории он оказался равен  $\alpha_{Irk} = 3,45$ , а для УАС -  $\alpha_{UAS} = 2,2$ . После чего была проведена обратная замена переменных, и построен график модельной кривой (см., рис. 4.27).

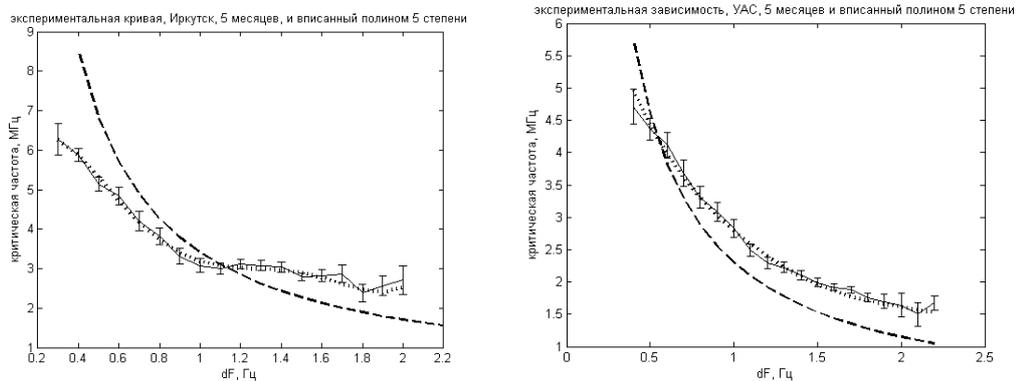


Рисунок 4.27 – Зависимости критической частоты  $f_0F_2$  от расстояний между максимумами, построенные по результатам анализа данных ИАР полученных на Саянской обсерватории (слева) и УАС (справа). Вертикальными линиями показаны доверительные интервалы. Также на графике приведены модельные кривые  $f_0F_2 = \alpha/dF$  (пунктирная линия) и вписанный полином 5-ой степени (точки)

Средние величины геомагнитного поля над Саянской обсерваторией и над УАС за рассматриваемый период составляют  $\langle B_{0,Irk} \rangle = 51418$  нТл и  $\langle B_{0,UAS} \rangle = 34156$  нТл соответственно (<http://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web>). Как следует из формулы (4.22), соотношение коэффициентов  $\alpha$  для двух пунктов должно равняться отношению величин локальных геомагнитных полей. Результаты расчета подтвердили это: отношение  $\alpha_{Irk}$  к  $\alpha_{UAS}$  с погрешностью менее 5% равно отношению  $\langle B_{0,Irk} \rangle$  к  $\langle B_{0,UAS} \rangle$ . Тем самым подтверждена адекватность используемой модели, что позволяет на практике проводить оценку критической частоты для произвольного пункта наблюдений ИАР, для которого известна величина магнитного поля.

Для проверки точности восстановления критической частоты ионосферы по данным анализа ИАР была проведена оценка  $f_0F_2$  над Саянской обсерваторией и УАС с помощью (4.21). Для верификации использовались данные за период с конца локальной осени по начало локальной весны, т.к. этот период характеризуется наибольшей вероятностью регистрации РСС. На рис. 4.28 показан пример такого восстановления (жирные пунктирные линии) для каждого из пунктов наблюдений вместе. Здесь же приведены критические частоты, полученной по данным ионозондов (сплошные линии). Наблюдается не только качественное сходство, но и хорошее количественное соответствие оцененных двумя способами значений критических частот.

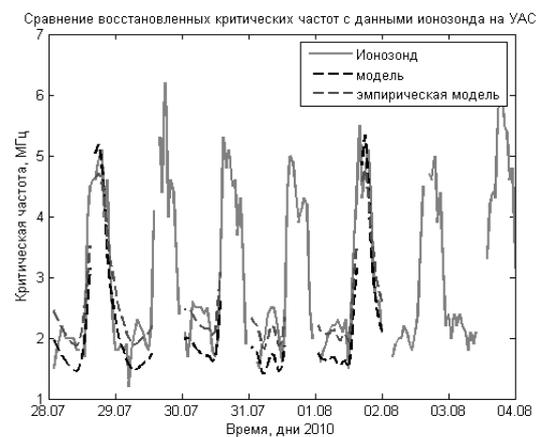
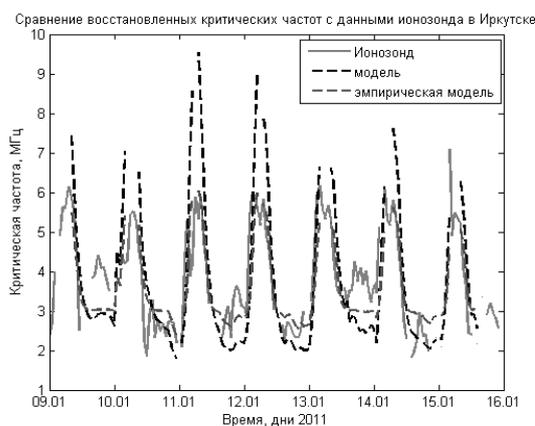


Рисунок 4.28 – Графики критических частот слоя F2 по данным ионозонда и восстановленные по модельному приближению и по эмпирической модели за несколько дней для Саянской обсерватории (слева) и для УАС (справа) Среднеквадратические отклонения разности сравниваемых величин для обоих пунктов не превышают сотни килогерц.

Для лучшего количественного подобиya восстанавливаемой по данным ИАР критической частоты относительно данных ионозонда была использована эмпирическая модель, в которой экспериментальная зависимость  $f_0F_2$  от  $dF$  представлялась в виде полинома. Оказалось, что нужно использовать полином пятой степени, чтобы модельная кривая не выходила за пределы доверительных интервалов (см., рис. 4.27). На рис. 4.28 приведён пример восстановления критической частоты с помощью полиномиального приближения (пунктирная линия). Применение аппроксимирующих кривых улучшает соответствие сравниваемых оценок критических частот.

#### Выводы Раздела 4

В разделе рассмотрена теоретическая модель магнитогидродинамических волн в структурно связанной системе двух резонаторных образований, свойства которых определяются направляющим действием геомагнитного поля - ионосферного альфвеновского и магнитосферного FLR резонаторов. С помощью данной модели рассчитаны значения собственных частот системы ИАР+FLR для ряда наборов ионосферных параметров, соответствующих ночным и дневным условиям, что дает возможность моделировать суточные вариации частотного спектра. Проведено сопоставление результатов моделирования с данными натурных наблюдений в Антарктике, которое продемонстрировало адекватность модели как для случая магнитоспокойных, так и для возмущенных геомагнитных условий.

Выполнено экспериментальное исследование и выявлены основные морфологические особенности поведения ИАР от времени суток, сезона года и солнечной активности на протяжении полного 11-ти летнего цикла, а также от спорадической активности Солнца. Показано, что в ионосферном альфвеновском резонаторе внешние возмущения типа протонной вспышки разрушают стоячую структуру волнового поля. Влияние дополнительной спорадической ионизации в слое F на пространственное распределение поля аналогично действию регулярных факторов – суточных вариаций электронной концентрации и высоты максимума слоя. Это позволяет использовать ИАР в роли “индикаторов” спорадической вспышечной активности Солнца.

Впервые проведён сравнительный анализ долгосрочных синхронных данных регистрации РСС в различных полушариях, выделены локальные особенности параметров резонанса, а также исследована их связь с состоянием геокосмоса. Показано, что качественно сезонно-суточное поведение характеристик ИАР одинаково во всех пунктах. Синхронный анализ параметров ИАР и локальных индексов геомагнитной активности K подтвердил описанную в литературе обратную зависимость для наблюдаемости РСС. В то же время для обнаруженного в работе нового эффекта “высокочастотных” РСС, обратная зависимость “наблюдаемости” от геомагнитной активности выражена четче, чем для всех случаев наблюдения резонансов не зависимо от частотного диапазона. Продемонстрировано, что альфвеновский резонанс зависит в большей степени от локальных характеристик среды над пунктами наблюдений, а не от глобального состояния ионосферы.

Изучено поведение тонкой спектральной структуры ИАР и обнаружен ранее неизвестный эффект расщепления низших резонансных мод. Исследованы суточные и сезонные закономерности “наблюдаемости” данного эффекта, а также его зависимость от фазы 11-ти летнего цикла солнечной активности. Проанализированы морфологические особенности поведения частоты расщепления и определены его основные фазы: развитие,

стационарный участок и релаксация. Предложены возможные механизмы возникновения эффекта расщепления.

Сопоставление результатов наблюдений ИАР с данными ионозондов, расположенных вблизи пунктов наблюдения, подтвердили наличие устойчивой зависимости частотного разнеса линий ИАР  $dF$  от критической частоты слоя F2 ионосферы. Разработана оригинальная методика оценки критической частоты слоя F2 по измеряемой в эксперименте величине межмодовой разности частот резонатора. Методика апробирована на многомесячных рядах данных регистраций ИАР полученных на нескольких пространственно-разнесенных приемных позициях. Показано, что модельное восстановление критической частоты может быть осуществлено для произвольного пункта земной поверхности, где проводится мониторинг ИАР.

## РАЗДЕЛ 5

### ГЛОБАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ РЕЗОНАТОРЫ, КАК ИНДИКАТОРЫ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

В предыдущих разделах 3 и 4 рассмотрены свойства шумановского и ионосферного альфвеновского резонаторов в зависимости от состояния ионосферы и геомагнитной активности. Проанализированы регулярные особенности поведения резонансов на суточном и годовом интервалах. Специальное внимание было уделено изучению влияния солнечной активности за время полного одиннадцатилетнего цикла. Установление ряда обнаруженных закономерностей позволило развить концепцию использования глобальных электромагнитных резонаторов как “индикаторов” состояния космической погоды. Действительно, взаимодействие корпускулярных и радиационных потоков энергии Солнца с магнитным полем и газо-плазменной оболочкой Земли существенно контролируют поведение резонаторов. Результаты наблюдений таких изменений могут быть использованы для диагностики и прогнозирования ионосферных процессов.

В первом подразделе подробно проанализированы эффекты сверхмощной геокосмической бури октября-ноября 2003 г., на параметры электромагнитных резонаторов и обоснован подход, в котором вариации параметров резонансных сигналов используются в качестве “индикаторов” состояния космической погоды. Во втором подразделе выявлены типичные отклики резонаторов на рентгеновские и протонные вспышки, а также возмущения геомагнитного поля. Предложены феноменологические модели поясняющие механизмы таких реакций. Это позволяет использовать данные мониторинга резонаторов как дополнение к спутниковым и традиционным наземным наблюдениям для патрулирования возмущений солнечной активности и изменений космической погоды. В третьем подразделе изучено влияние сейсмической активности на параметры естественных

низкочастотных электромагнитных шумов. Показано, что в диапазоне шумановских и ионосферных альфвеновских резонансов в процессе подготовки и во время землетрясения регистрируются изменения спектральных и поляризационных параметров сигналов, которые могут использоваться в качестве индикаторов сейсмических событий. В четвертом подразделе проанализированы результаты непрерывного годового мониторинга излучения энергосистем североамериканского континента на частоте 60 Гц, которые впервые зарегистрированы на Украинской антарктической станции “Академик Вернадский“. Изучены суточные и сезонные вариации параметров основной сетевой гармоники и широкополосного СНЧ фона. Установлена высокая степень корреляции интенсивности спектральной линии 60 Гц с суточным циклом генерирования объединенной энергосистемы США – Канады. Зарегистрировано систематическое уменьшение интенсивности линии в воскресные дни (“week end” эффект). Дистанционно из другого полушария идентифицирована крупная техногенная авария в энергосистеме США – Канада 14 августа 2003 г и динамика ее ликвидации. Показана возможность использования данных СНЧ мониторинга для контроля электромагнитного “загрязнения” Антарктики излучением энергосетей промышленно развитых регионов земного шара.

Основные оригинальные результаты этого раздела опубликованы в статьях [3, 5, 8, 245], а также в доложены на многочисленных научных конференций [35, 255, 272, 273, 274, 275].

### 5.1 Эффекты сверхмощной геокосмической бури октября-ноября 2003 г.

При исследовании влияния солнечных возмущений на параметры глобальных электромагнитных резонаторов Земли и состояние космической погоды наибольшее внимание следует уделить событиям с экстремально большим энерговыделением, для которых естественно ожидать

максимального эффекта на околоземную плазму. Таким событием за весь тринадцатилетний период наблюдений выполненных автором, безусловно, является сверхмощная геокосмическая буря, произошедшая в октябре-ноябре 2003 года, которая получила название “событие Хеллоуин” (“Halloween Event”) [276]. И хотя его анализу посвящено довольно много публикаций [277, 278, 279, 280], в диссертации рассмотрен ряд ранее неизвестных особенностей реакции ШР. В частности, впервые обнаружены и проанализированы аномальные изменения поляризационных характеристик резонансных полей.

Рис. 5.1 демонстрирует временные вариации интенсивности солнечного излучения разных диапазонов и поток галактических космических лучей в течение нескольких недель октября и ноября 2003 года, во время геокосмической бури.

Поток рентгеновского излучения в диапазоне 0,1-0,8 нм увеличился более чем на два порядка на временном интервале около двух недель с 18 октября по 4 ноября, что является беспрецедентным увеличением за все время существования спутников GOES [279, 280]. 3 ноября рентгеновский датчик вошел в насыщение, при потоке излучения соответствующем вспышке класса X-28. Последующий анализ показал, что истинный класс вспышки необходимо повысить до X-45. Средний поток рентгеновского излучения соответствовал величине  $2.7 \times 10^{-6}$  Вт/м<sup>2</sup>, что более чем на 2 порядка превышает средний уровень  $1 \times 10^{-8}$  Вт/м<sup>2</sup>, наблюдавший до и после возмущения. Пик потока солнечных протонов зафиксирован 25 октября, через семь дней после начала увеличения рентгеновской активности. Поток солнечных протонов с энергиями  $> 10$  МэВ, увеличился более чем на четыре порядка с  $10^{-1}$  до  $10^3$  протонов / (см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup> рад<sup>-1</sup>) с максимальным значением 29 октября.

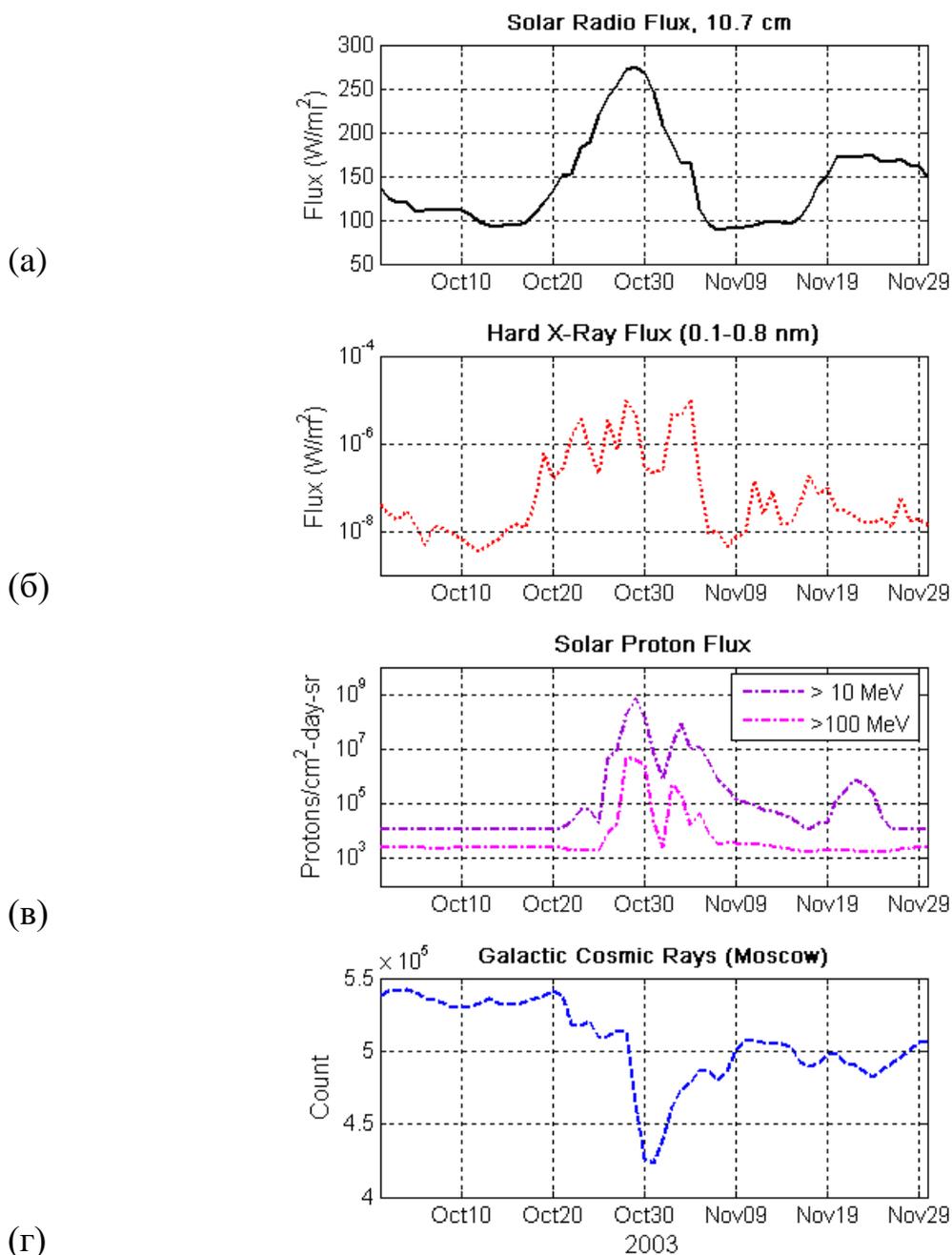


Рисунок 5.1 – Временной ход: (а) солнечного радиоизлучения на частоте 10.7 см, (б) солнечного рентгеновского излучения 0.1-0.8 нм (данные GOES), (в) потока протонов от Солнца (в двух диапазонах энергий >10 МэВ и >100 МэВ, (г) поток галактических космических лучей; для “события Хеллоуин” (рисунок приведен в соответствии с [5]).

На рис. 5.2 приведено сопоставление вариаций потока солнечного излучения во время “события Хеллоуин” (справа) и в течении 11-ти летнего солнечного цикла (слева). Сверху изображены потоки излучения на частоте 10.7 см, а снизу интенсивность рентгеновского излучения с длиной волны 0.1-0.8 нм. Из рисунка видно, что “события Хеллоуин” для рассмотренных диапазонов частот представляет собой укороченную во времени и увеличенную по амплитуде копию 11-ти летней вариации. В то же время следует отметить, что поток протонов ведет себя отличным образом от радиационной компоненты. Во время бури он существенно варьируется на три – четыре порядка, в то время как за период всего одиннадцатилетнего цикла наблюдается только несколько эпизодических повышений потока протонов в среднем на 2 порядка [281].

В качестве базового массива данных, для анализа влияния геокосмической бури на параметры резонансных полей взяты результаты измерений на Украинской антарктической станции “Академик Вернадский”. Также были использованы СНЧ наблюдения, полученные на обсерваториях: Nagycenk (Венгрия, 47.6 с.ш., 16.7 в.д.), Mitzpe Ramon (Израиль, 30.6 с.ш., 34.8 в.д.) и Parkfield (Калифорния, США, 35.9 с.ш., 120.40 з.д.). На первой и второй выполнялись измерения вертикальной компоненты электрического поля  $E_z$ . На второй и третьей в дополнении к этому регистрировались вариации горизонтальных магнитных компонент в направлениях “север-юг” ( $H_{NS}$ ) и “восток-запад” ( $H_{EW}$ ). На УАС анализировались как спектральные, так и поляризационные характеристики сигнала, рассчитанные в соответствии с алгоритмом, изложенным в разделе 2 (2.1-2.7). В остальных пунктах измерения для анализа были доступны спектральные параметры: интенсивности, пиковые частоты и ширины спектров мод ШР.

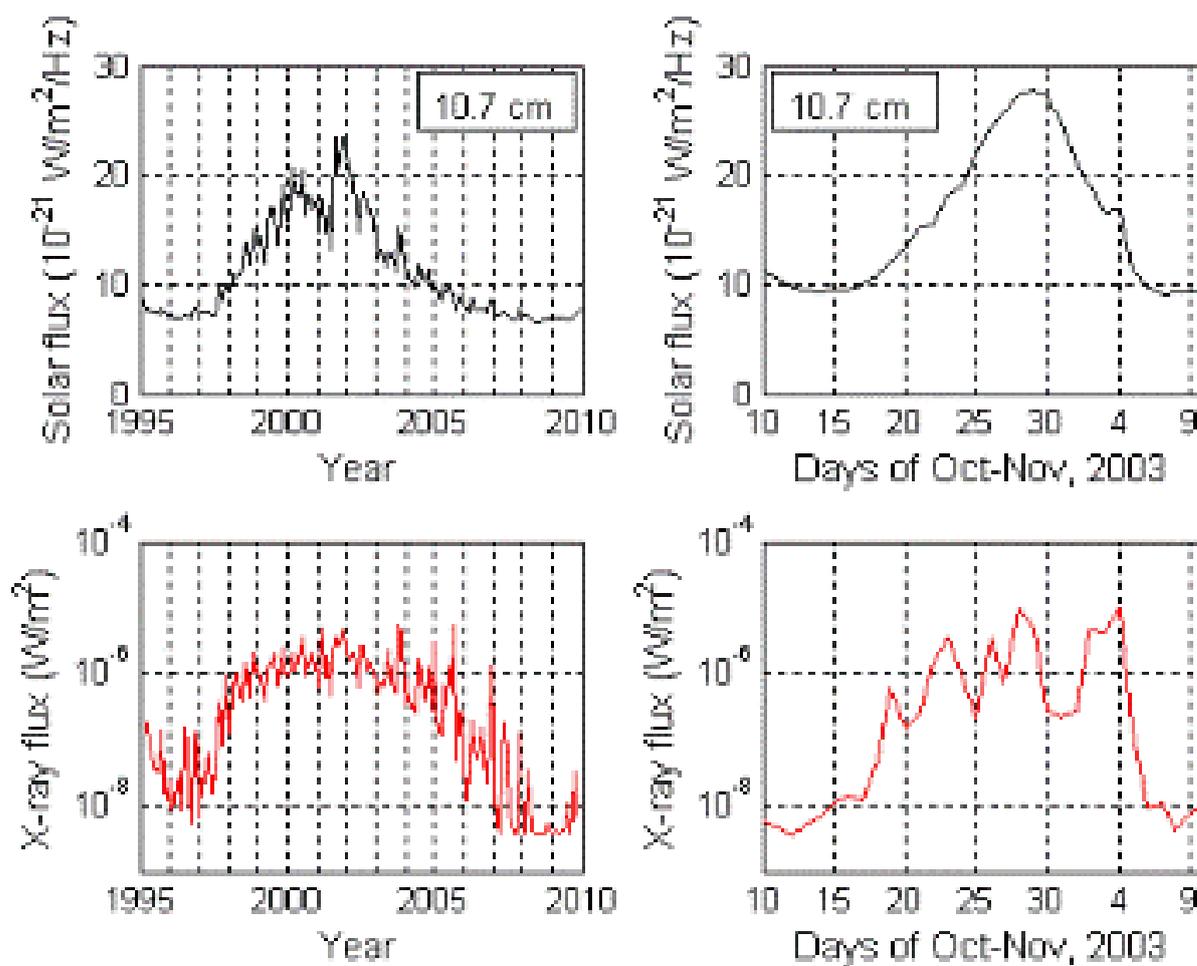


Рисунок 5.2 – Сравнение вариаций солнечного излучения на долгосрочном (11-ти летний цикл, слева) и краткосрочном (“события Хеллоуин”, справа) интервалах. Вверху – поток излучения на частоте 10.7 см; внизу – поток солнечного рентгеновского излучения в диапазоне 0.1-0.8 нм. (рисунок приведен в соответствии с [5])

Среднесуточные вариации параметров ШР на УАС совместно с изменениями потоков солнечного излучения и галактических космических лучей представлены на рис. 5.3. для главной фазы бури (11 октября – 10 ноября). В параметрах ШР обращает на себя внимание явно выраженное увеличение пиковых частот обоих компонент во время рентгеновского события и уменьшение коэффициента эллиптичности, совпавшее с максимумом потока солнечного рентгена и закончившееся с началом

протонного события. Также можно отметить уменьшение ширины спектра компонент ШР во время повышения рентгеновского потока, за исключением максимумов потока протонов, когда ширина спектра временно увеличивалась. Интенсивность горизонтальной компоненты магнитного поля ШР имела незначительный положительный тренд, а вариации в целом были подобны изменениям рентгеновского потока. В других пунктах наблюдения спектральные параметры ШР демонстрировали похожие тенденции. Пиковые частоты доступны для анализа во всех пунктах наблюдения. Данные об изменениях частот представлены на рис. 5.4.а (УАС), рис. 5.4.б (Mitzpe Ramon), рис. 5.4.в (Parkfield) и рис. 5.4.г (Nagysenk) совместно с потоком солнечного рентгена.

Из рисунка видно, что пиковые частоты обоих горизонтальных компонент вариаций магнитного поля для первой моды ШР, измеренные на обсерваториях, УАС, Mitzpe Ramon, Parkfield и пиковые частоты вариаций электрических компонент поля первых двух мод ШР на обсерватории Nagysenk хорошо согласуются между собой, и соответствуют изменениям рентгеновского потока от Солнца в диапазоне 1-8 А. Синхронный характер изменений пиковых частот для значительно разнесенных пунктов наблюдения, находящихся в различных полушариях, подтверждает глобальный характер изменения резонансных частот. Отметим также, что вариация потока солнечных протонов (Рис. 5.1.в и Рис 5.3.д) во время рассматриваемой геокосмической бури имеет другую динамику.

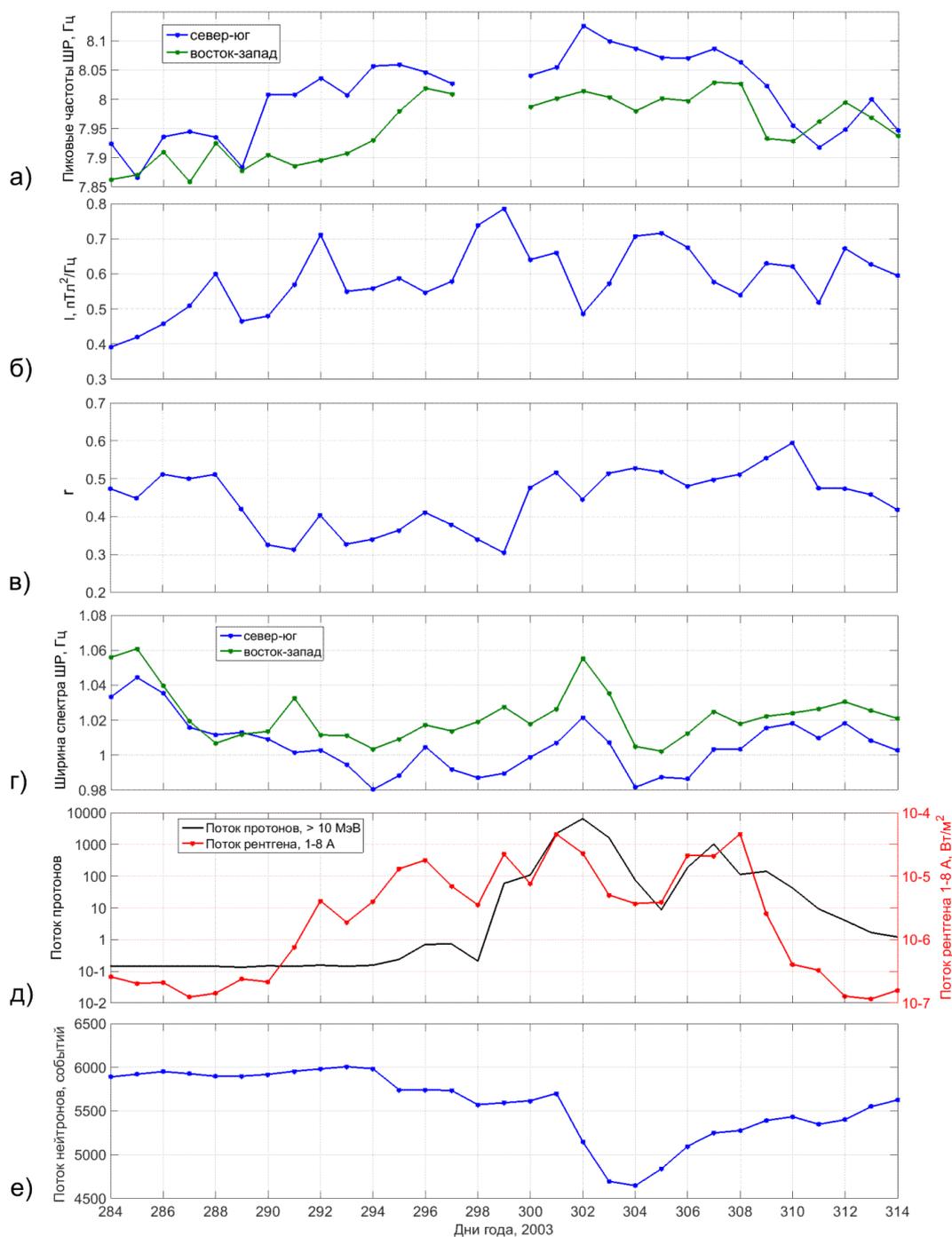


Рисунок 5.3 – Главная фаза “события Хеллоуин” (10 октября – 10 ноября). Данные наблюдений первого мода ШР, измеренные на УАС: (а) пиковые частоты в каналах “север-юг” и “восток-запад”; (б) полная интенсивность горизонтальной компоненты вариаций магнитного поля; (в) коэффициент эллиптичности; (г) ширина спектра компонент “север-юг” и “восток-запад”; (д) поток солнечных протонов с энергиями более 10 МэВ и рентгена 1-8 А; (е) число отсчетов нейтронного телескопа Оулу (величина, пропорциональная потоку ГКЛ)

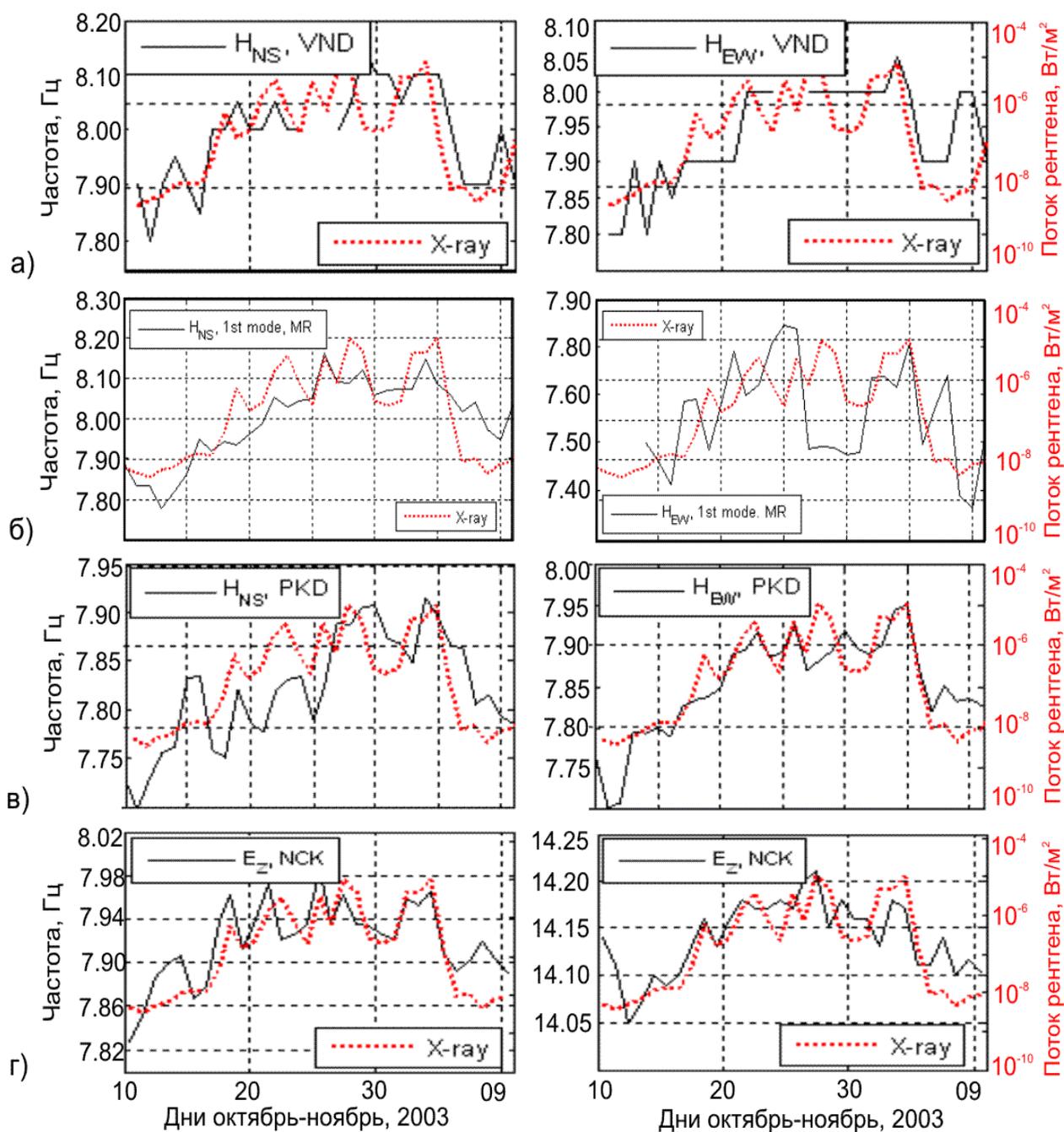


Рисунок 5.4 – Среднесуточные значения пиковых частот максимумов ШР (черная кривая) совместно с потоком рентгеновского излучения 0.1-0.8 нм (красная линия) в период с 10 октября по 10 ноября 2003 г., для (а) УАС, магнитные компоненты; (б) Mitzpe Ramon, магнитные компоненты; (в) Parkfield, магнитные компоненты; (г) Nagусenk, электрическая компонента мода 1 и 2.

Протонная вспышка начинается на четыре дня позднее рентгеновского возмущения, а ее основной максимум смещен на один день относительно рентгеновского. Влияние протонной вспышки на частоты ШР можно выделить для обсерватории Mitzpe Ramon в магнитной компоненте “восток-запад”, когда при максимальном потоке протонов в течении нескольких дней наблюдалось значительное уменьшение пиковой частоты.

Изменения ширины спектра шумановских максимумов, которые как это показано в [75, 76, 206] обратно пропорциональны добротности  $Q$ , доступны для обсерваторий УАС (Рис. 5.5.а) и Parkfield (Рис. 5.5.б). Видно, что их поведение качественно совпадает, как и для обоих магнитных компонент, так и для двух пунктов наблюдения, разнесенных на  $\sim 12$  Мм. На всех кривых наблюдается увеличение ширины спектра (уменьшение добротности), которое совпадает с максимумом потока протонов, зарегистрированным 29 октября. В это же время наблюдается минимум интенсивности как электрической компоненты поля, по данным обсерватории Nagycenk, так и горизонтального магнитного поля по записям на УАС для первого мода ШР (Рис. 5.5.в). Анализ поведения интенсивности электрической и магнитных компонент для этих обсерваторий, разнесенных на  $\sim 14$  Мм показал большую степень их подобия друг другу и сходства с вариацией потока солнечного рентгена (Рис. 5.5.г). Таким образом, данные наблюдений свидетельствуют о значительной роли вариаций рентгеновского излучения на параметры ШР.

Переходя к интерпретации описанных выше особенностей поведения ШР, остановимся на механизмах влияния солнечного излучения различных диапазонов на плазму нижней ионосферы. Для каждого диапазона существуют характерные высоты, на которых воздействие на околоземную плазму максимально. Знание высоты взаимодействия существенно при интерпретации шумановских записей [75, 76, 106, 206, 222, 223]. Несмотря на то, что особенности взаимодействия солнечного излучения с нижней ионосферой рассмотрены для протонов в [282], для электронов в [283] и для

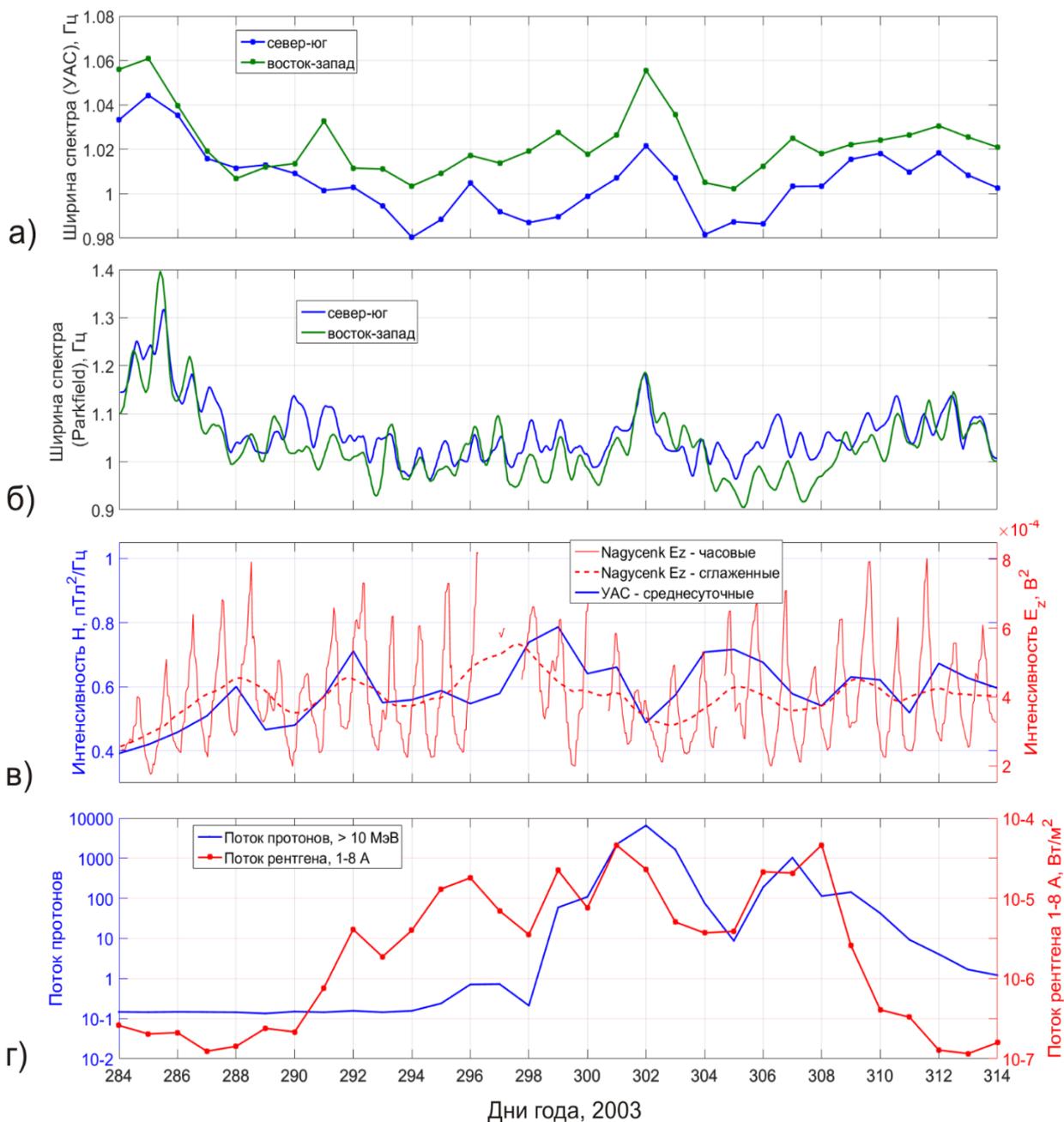


Рисунок 5.5 – (а) ширины спектров первого мода ШР компонент “север-юг” и “восток-запад”, УАС (б) ширины спектров первого мода ШР компонент “север-юг” и “восток-запад”, Parkfield; (в) интенсивность горизонтального магнитного поля первой моды ШР на УАС и интенсивность вертикальной компоненты электрического поля, Nagysenk и (г) поток солнечного рентгена 1-8 А и поток протонов с энергиями > 10 МэВ.

рентгеновского излучения в [223, 283, 284], эти результаты не были в полной мере использованы при интерпретации шумановских эффектов.

Обобщая результаты работ, выделим характеристические высоты взаимодействия. Для протонов с энергиями 1 МэВ высота ионосферной реакции составляет  $\sim 90$  км, с энергиями 10 МэВ  $\sim 70$  км и с энергиями 100 МэВ  $\sim 35$  км. Электроны воздействуют на более высокие ионосферные слои (2 КэВ  $\sim 130$  км, 10 КэВ  $\sim 105$  км, 20 КэВ  $\sim 130$  км, 100 КэВ  $\sim 85$  км). Рентгеновское излучение в диапазоне длин волн 1-8 А (0.1-0.8 нм) модифицирует ионосферу на высотах  $\sim 90$  км. Следует отметить, что излучение различных диапазонов оказывает влияние и на всю ионосферную толщу выше характеристических высот (например, протоны с энергиями 100 МэВ, проходя уровень 90 км, модифицируют плазму и там), однако такое воздействие незначительно по сравнению с эффектом на характеристической высоте и в первом приближении может не рассматриваться.

При интерпретации вариаций измеренных параметров ШР использована однородная модель “колена” [206]. В соответствии с ней отклик параметры сигналов ШР, как это уже было описано в разделе 3 (3.2-3.4), определяются четырьмя физическими величинами: электрической  $h_E$  и магнитной  $h_M$  характеристическими высотами и соответствующими эффективными масштабами профилей проводимости  $\zeta_e$  и  $\zeta_m$  на этих высотах. Связь основных определяемых в эксперименте параметров ШР – пиковых частот  $f_n$  и добротности  $Q_n$  с характеристическими высотами и масштабами может быть описан, в соответствии с [206], как:

$$f_n \approx f_h^{(0)} \sqrt{\frac{h_E(f_n)}{h_M(f_n)}}, \quad \text{где } f_h^{(0)} = \left( \frac{c}{2\pi a} \right) \sqrt{n \cdot (n+1)}, \quad (5.1)$$

$$Q_n = \frac{2}{\pi \cdot \gamma_n}, \quad \text{где } \gamma_n \approx \left( \frac{\zeta_e(f_n)}{h_E(f_n)} + \frac{\zeta_m(f_n)}{h_M(f_n)} \right), \quad (5.2)$$

Здесь:  $c$  – скорость света,  $a$  – радиус Земли,  $n$  – номер мода ШР. Увеличение потока протонов и рентгеновского излучения приводит к уменьшению электрической и магнитной характеристических высот соответственно. Из (5.1) следует что увеличение потока протонов ведет к уменьшению пиковой частоты, а рентгена напротив, к ее увеличению. В то же время повышенные интенсивности как потока протонов, так и потока рентгена, при условии, что все остальные параметры профилей проводимости остаются неизменными, уменьшают добротность резонатора (5.2). Однако, следует отметить, что параметры ШР зависят также и от масштабов профилей проводимости. Например, в работе [125] было показано, что уменьшение магнитной характеристической высоты, происходящее одновременно с уменьшением масштаба соответствующего профиля проводимости может привести к увеличению добротности и увеличению интенсивности сигнала ШР.

Для оценок изменений интенсивности, вызванных изменениями потока солнечного излучения, можно воспользоваться символическими соотношениями (5.3-5.5), введенными в [285] и базирующимися на описании распространения ШР [286] в терминах телеграфных уравнений:

$$E_r(f; S \rightarrow O) \sim M_s(f) \frac{h_M(S)}{h_E(S)} \frac{1}{h_E(O)} [U(S \rightarrow O)], \quad (5.3)$$

$$H_\varphi(f; S \rightarrow O) \sim M_s(f) \frac{h_M(S)}{h_E(S)} \left[ \frac{1}{h_M(O)} \frac{\partial U(S \rightarrow O)}{\partial \theta} \right], \quad (5.4)$$

$$H_\theta(f; S \rightarrow O) \sim M_s(f) \frac{h_M(S)}{h_E(S)} \frac{1}{h_M(O)} \frac{\partial \tilde{U}(S \rightarrow O)}{\partial \varphi}, \quad (5.5)$$

Здесь:  $E_r$ ,  $H_\varphi$ ,  $H_\theta$  - компоненты вертикального электрического и горизонтального магнитного полей,  $M_S$  – токовый момент молниевых разрядов, функция  $U$  определяет дистанционную зависимость постоянной распространения, а помещенные в скобки индексы ( $S$ ) и ( $O$ ) указывают на принадлежность величины к источнику либо пункту наблюдения соответственно. Анализ выражений (5.3-5.5) показывает, что изменения характеристических высот вблизи источника и наблюдателя оказывают различное влияние на амплитуды компонент ШР. Например, уменьшение магнитной характеристической частоты вблизи источника уменьшает интенсивность магнитных компонент поля, а вблизи наблюдателя наоборот их увеличивает.

Используя выражения (5.1-5.5) удается непротиворечиво объяснить большинство особенностей поведения параметров ШР, выявленных во время наблюдения “события Хеллоуин”. Высокая корреляция пиковых частот и изменений потока солнечного рентгеновского излучения (см., рис. 5.4) объясняется тем, что с увеличением потока рентгена уменьшается магнитная характеристической высоты  $h_M$  и в соответствии с (5.1) увеличивается пиковая частота. Значения изменений пиковых частот на различных обсерваториях приведены в таблице 5.1. Приведенные в таблице 5.1 величины находятся в хорошем соответствии с оценками изменений пиковых частот за время полного солнечного цикла под воздействием рентгеновского излучения, приведенными в работе [125]. Такое сопоставление является уместным, поскольку, как видно из рисунка 5.2, за время солнечного цикла и в течении “события Хеллоуин” изменения потока рентгеновского излучения были соизмеримы.

В то же время следует отметить, что если для солнечного цикла продолжительность протонных вспышек была несоизмеримо меньшей длительности цикла и они не могли оказать существенного влияния на

частоты, то во время “события Хеллоуин” интенсивная протонная вспышка наблюдалась в течении нескольких дней и должна быть учтена.

Таблица 5.1 – Изменения пиковых частот во время “события Хеллоуин” по данным различных обсерваторий

Обсерватория	$H_{NS}^{(1)}$ , Гц	$H_{EW}^{(1)}$ , Гц	$E_z^{(1)}$ , Гц	$E_{ZS}^{(2)}$ , Гц
УАС	+0.1 Гц	+0.1 Гц	нет данных	нет данных
Mitzpe Ramon	+0.2 Гц	+0.2 Гц	+0.2 Гц	+0.3 Гц
Parkfield	+0.1 Гц	+0.1 Гц	нет данных	нет данных
Nagysenk	нет данных	нет данных	+0.1 Гц	+0.1 Гц

Ее влияние лучше всего прослеживается в записях канала “восток-запад” на обсерватории Mitzpe Ramon, когда там в течении нескольких дней пиковая частота снизилась на  $\sim 0.2$  Гц (см., рис. 5.4.б). Этот же эффект, но в меньшей степени прослеживается и для других пунктов наблюдения. Уменьшение частот максимумов ШР во время протонной вспышки объясняется уменьшением электрической характеристической высоты под воздействием увеличения потока протонов. Поскольку эффект проникновения протонов максимален в полярных широтах, где линии магнитного поля, вдоль которых движутся протоны наиболее близки к вертикали, уменьшение частот ШР должно сильнее проявляться для траекторий распространения сигналов ШР, проходящих через эти области. Так как каналы регистрации магнитной компоненты “восток-запад” наиболее чувствительны к сигналам ШР, распространяющимся вдоль меридиана и проходящим через авроральные области, то уменьшение частот в них во время протонной вспышки является ожидаемым и соответствует рассмотренному выше механизму.

Следует отметить, что протонные вспышки также сопровождаются уменьшением интенсивности магнитных и электрических компонент ШР (см., рис. 5.5.в) и увеличением ширины спектров (уменьшением добротности) на

частоте первой моды ШР (см., рис. 5.5.а-б). Это соответствует предложенному феноменологическому механизму взаимодействия и может быть описано выражениями (5.2-5.5). В то же время необходимо отметить, что за исключением промежутка максимума протонной вспышки, среднесуточные интенсивности как электрической компоненты поля на обсерватории Nagycenk, так и магнитной компоненты на УАС в высокой степени скоррелированы с изменениями потока солнечного рентгеновского излучения. Таким образом, основным фактором, определявшим поведение как вариации пиковых частот, так и интенсивностей во время “события Хеллоуин” можно считать изменения потока рентгеновского излучения. В то же время следует отметить, что, несмотря на наличие корреляции обоих параметров ШР с величиной рентгеновского потока, изменения частот проявляются лучше, чем вариации интенсивности. Это свидетельствует об относительно незначительном влиянии существенных вариаций радиационных и корпускулярных потоков от Солнца на интенсивность сигналов ШР. Таким образом, интенсивность ШР оказывается параметром, основное воздействие на который оказывают изменения активности источника, а влиянием среды можно в первом приближении пренебречь. В этом смысле идея автора [129] о возможности использования интенсивности ШР в роли индикатора долгосрочных изменений температуры Земли получает дополнительное экспериментальное подтверждение.

Анализ поведения параметров ШР во время “события Хеллоуин” также выявил эффект уменьшения среднесуточной величины коэффициента эллиптичности во время увеличения потока солнечного рентгеновского излучения. Как видно из рис. 5.3.в коэффициент эллиптичности уменьшился синхронно с увеличением потока рентгеновского излучения, начиная с 17 октября и вновь начал увеличиваться 27 октября, в момент начала протонной вспышки. Во время протонной вспышки коэффициент эллиптичности оставался на невозмущенном уровне, не смотря на увеличенный поток рентгеновского излучения. Можно предположить, что во время

рентгеновского события коэффициент эллиптичности уменьшается за счет увеличения проводимости в области магнитной характеристической высоты, а протонная вспышка компенсирует это увеличение путем понижения нижней характеристической высоты и роста потерь в резонаторе.

Таким образом, выполненный в работе анализ показывает, что пиковые частоты, ширины спектров, интенсивности и коэффициент эллиптичности сигналов ШР достаточно сильно меняется во время экстремальных солнечных возмущений. Анализируя характер изменений параметров ШР можно оценить тип возмущений и определить преобладающий частотный диапазон возмущения (протонная или рентгеновская вспышка). Следовательно, ШР могут рассматриваться в роли индикаторов и даже средств диагностики экстремальных солнечных возмущений.

Принимая во внимание, что сверхмощные события, подобные “событию Хеллоуин” случаются крайне редко в следующем пункте будут рассмотрены менее мощные протонные и рентгеновские события.

## 5.2 Реакция электромагнитных резонаторов на протонные и рентгеновские вспышки на Солнце

В данном пункте изучено влияние протонных событий и рентгеновских вспышек на параметры СНЧ шумов. В литературе имеются данные о различных тенденциях поведения шумановских сигналов во время вспышек на Солнце. Так в работе [122] исследованы изменения пиковых частот ШР во время девяти протонных событий и показано что для всех вспышек вариации частоты были положительными. В то же время как результаты настоящей работы, изложенные в предыдущем пункте, так и другие приведенные в литературе теоретические и экспериментальные материалы [287, 288] свидетельствуют об отрицательных вариациях частоты. Для разрешения этого противоречия можно высказать несколько гипотез. (а) максимум потока протонов соответствовал частицам с энергиями существенно меньшими

10 МэВ, из-за чего модификация ионосферы происходила на высоте верхнего характеристического слоя, уменьшение высоты которого приводит к увеличению пиковых частот (см., формулу (5.1)); (б) поскольку для рассмотренных в [122] протонных событий анализ изменений рентгеновского потока не проводился, положительные изменения частоты могли быть связаны с рентгеновскими вспышками, сопровождавшими протонные события; (в) вследствие недостаточного временного разрешения измерений частот ШП эффекты рентгеновских и протонных вспышек не были разделены. Оправданность двух последних гипотез подтверждается результатами работ [124, 289], в которых подробно анализируется поведение характеристик ШП во время рентгеновских вспышек и следующих непосредственно за ними протонных событий. В них показано, что достаточно короткие рентгеновские вспышки чаще всего сопровождаются увеличением частоты ШП, а протонные события ее уменьшением. Однако поскольку продолжительность протонных событий, как правило, больше рентгеновских, среднесуточные частоты для комбинированных событий (которые анализировались в [122]) могут демонстрировать отрицательную вариацию. Таким образом, получение и анализ большого экспериментального массива данных наблюдений ШП во время солнечных событий является весьма актуальной и насущной задачей.

В работе изучены характеристики СНЧ сигналов, измеренных на УАС, соответствующие мощным солнечным возмущениям, произошедшими с марта 2002 по март 2012 года. Для проведения анализа отобраны протонные события с энергиями больше  $10^3$  протонов / ( $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{рад}^{-1}$ ) и рентгеновские вспышки X класса и выше, Всего рассмотрено 8 протонных событий и 79 рентгеновских вспышек. В работе [245] подробно проанализированы СНЧ эффекты протонного события, произошедшего 7-15 сентября 2005 г. В 17:00 UT 07.09.05 геофизический спутник GOES зафиксировал рентгеновский всплеск класса X17, а 08.09.05 последовало протонное событие ([ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR\\_DATA/Satellite\\_ENVIRONMENT/](ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/Satellite_ENVIRONMENT/)).

Максимум потока высокоэнергичных протонов (энергии выше 10 МэВ) был

зарегистрирован вблизи орбиты Земли в 04:25 UT 11 сентября, величина его составила  $1880$  протонов /  $(\text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{рад}^{-1})$  (*p.f.u.*).

На Рис. 5.6. представлен временной ход ряда параметров СНЧ поля в резонаторе Земля – ионосфера во время вспышки, расчет которых предусмотрен программой стандартной обработки записей (2.1-2.7). К ним относятся интенсивность поля первой моды  $I$ , степень поляризованности  $P$ , коэффициент эллиптичности  $r$  и пиковые частоты первой резонансной моды в каналах “север-

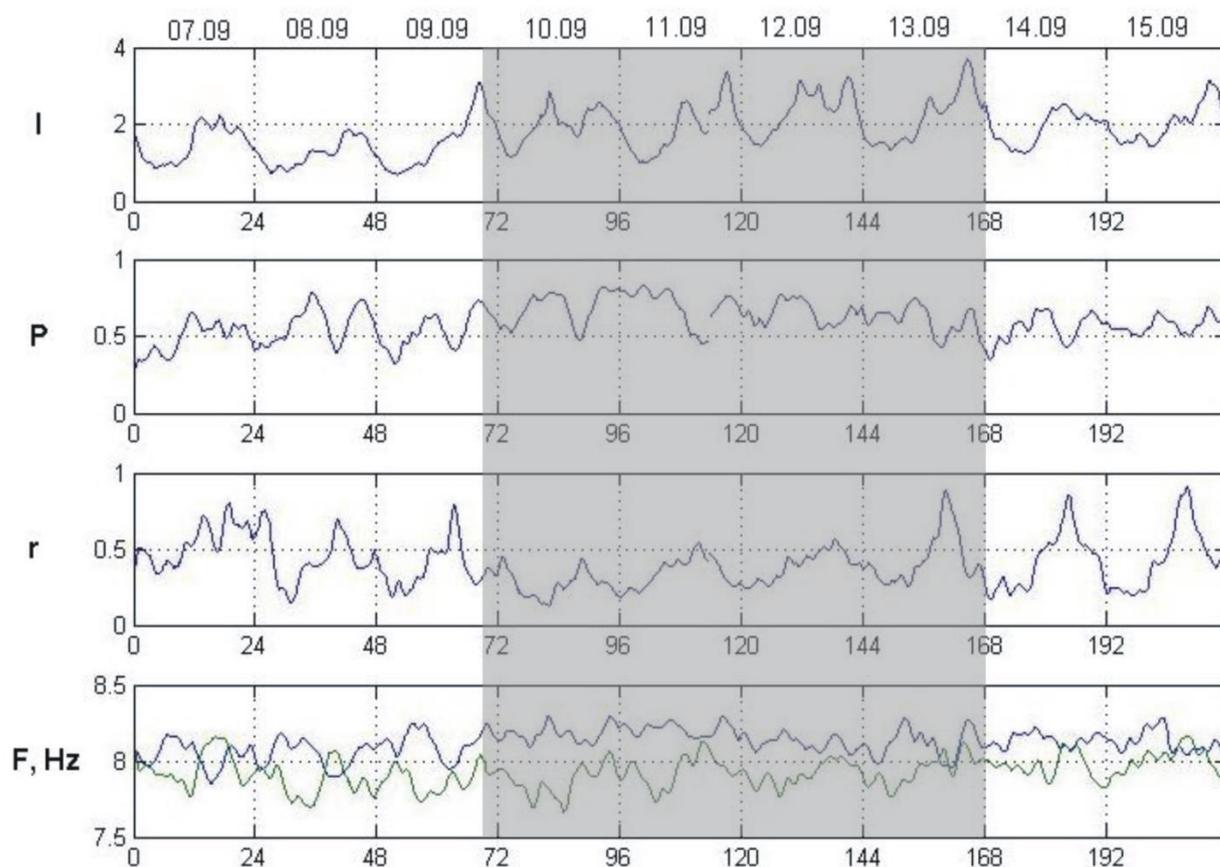


Рисунок 5.6 – Вариации параметров поля шумановского резонанса во время протонной вспышки на Солнце 7 – 15 сентября 2005 г. Максимум потока частиц с энергией выше 10 МэВ ( $1880$  *p.f.u.*) зарегистрирован 11.09.2005 г.

юг” и “восток-запад”. Отсчет времени (в часах вдоль горизонтальной оси) начинается в 00 LT 07.09.05. С 09.09.05 по 13.09.05 включительно. Временные

зависимости всех анализируемых параметров демонстрируют заметные отклонения от среднего хода. Увеличивалась интенсивность и поляризационное отношение (заметим, что такое же увеличение наблюдается при регулярном сезонном возрастании критической частоты  $F$ -слоя). Уменьшилась величина отношения малой полуоси эллипса к большой. Заметим, что уменьшение  $r$  началось, как и для описанного в предыдущем пункте “события Хеллоуин” раньше максимума протонного события и, по-видимому, связано с увеличением потока рентгеновского излучения Солнца. Усилился эффект “разбегания” пиковых значений частоты резонансного мода в ортогональных каналах регистрации горизонтальных магнитных составляющих. При этом увеличилось величина пиковой частоты в канале “север-юг”, в то время как в канале “восток-запад” частота изменилась слабо.

Интенсивность указанных явлений оказалась весьма зависимой от сезона года – т.е. от общего “фоновое” состояния ионосферы. При анализе тех же параметров поля ШР во время солнечной вспышки 11-27 января 2005 г., произошедшей в летний (для Антарктики, где расположен пункт наблюдения) период, заметных изменений ни в частотах первой резонансной моды  $f_1$ , ни в ее поляризационных характеристиках зафиксировано не было. При этом плотность протонного потока высокоэнергичных частиц была существенно выше, чем в сентябре и составляла 4390 p.f.u. Несколько магнитных бурь, последовавших за этим событием, также вызвали лишь незначительные изменения, и только в одном параметре поляризации – коэффициенте эллиптичности  $r$ . С другой стороны, влияние умеренных магнитных возмущений, связанных с летними вспышками 2006 г. (06.12.06 – 13/14.12.06), отчетливо проявлялись как в вариациях частоты  $f_1$ , так и в коэффициенте эллиптичности.

Реакцию ионосферного альфвеновского резонатора на “событие Хеллоуин” (октябрь-ноябрь 2003 г.) и магнитные возмущения, произошедшие в январе 2005г. и декабре 2006 г. проследить не удалось, поскольку в весенне-летний (для Антарктики) период обычно отсутствует сам эффект ИАР. Отклик ИАР на изменения космической погоды исследован на примере протонной вспышки 08-

14.09.05 и сопутствующей ей магнитной бури. До прихода горячих частиц на уровень земной орбиты наблюдался обычный суточный ход числа линий ИАР и среднего частотного разноса между ними (Рис. 5.7). Максимальное число линий возрастало в период с 7 по 9 сентября вслед за уменьшением среднесуточной критической частоты  $f_{oF}$ . Резкое увеличение  $f_{oF}$  09.09.05, связанное с приходом в ионосферу значительного числа энергичных протонов, нарушило условия для захвата волн резонатором. Контроль критических частот  $F$  и  $E$  слоев ионосферы, непрерывно осуществляемый с помощью ионозонда, показал, что в максимальную фазу протонной вспышки  $E$ -слой практически отсутствовал, и в 2005 г. такое состояние над УАС продолжалось с 10 по 16 сентября. Подобное пропадание сигнала ИАР во время солнечных и геомагнитных возмущений является характерным и прослеживается для большинства проанализированных возмущенных дней.

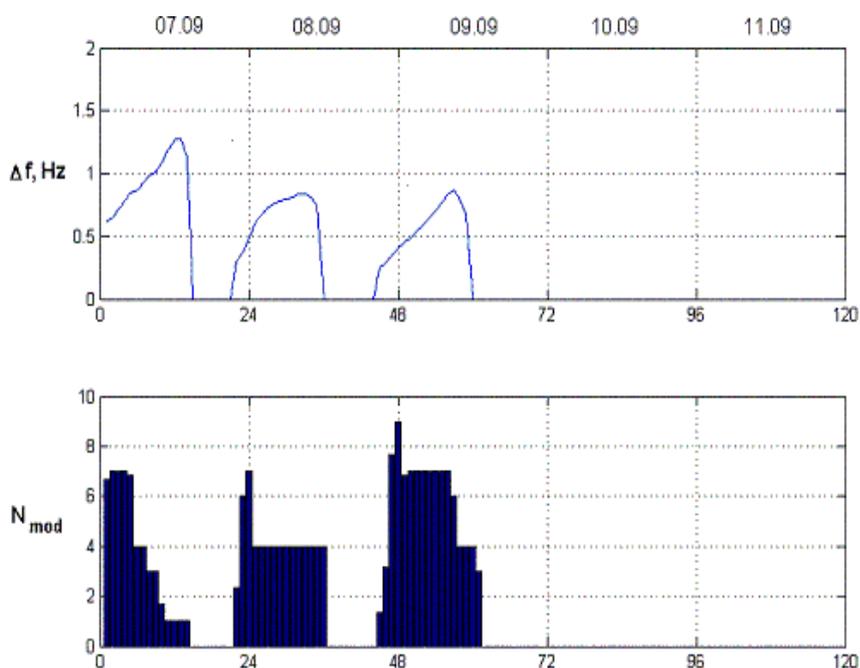


Рисунок 5.7 – Суточные вариации среднего частотного разноса между линиями ИАР и количества регистрируемых линий до и во время солнечной вспышки 07 - 15.09.2005 г.

Далее рассмотрим реакцию параметров ШР на солнечные рентгеновские вспышки X класса и более мощные. Все перечисленные выше спектральные и поляризационные параметры ШР, полученные со стандартным темпом в 10 мин были проанализированы для каждой из 79 рентгеновских вспышек. Явная реакция на вспышку обнаружена у 29 событий (36.8% от всех событий) и только для пиковых частот.

При этом вариации частоты у всех 29 событий были положительными. Более того, для оставшихся 50 рентгеновских событий также наблюдались положительные вариации частоты, однако их величина не превышала стандарт флуктуаций пиковых частот за сутки, что не позволяло однозначно связать их с рентгеновской вспышкой. Таким образом, ни для одного из рассмотренных событий не наблюдалось отрицательной вариации частоты. В целом наличие реакции на рентгеновское событие зависело от мощности вспышки. При повышении класса рентгеновской вспышки относительная доля событий, для которых отмечались вариации пиковых частот, возрастала. Так в выделенный интервал времени произошло 39 событий класса выше X2 и для 19 из них (48.7%) наблюдалась реакция. Для событий класса X3 и выше эти величины были 23 и 16 (69.6%) соответственно. В то же время нельзя считать, что вероятность регистрации вариаций частоты зависит только от интенсивности рентгеновского события. Так для 10 рентгеновских событий класса ниже X2 присутствовала реакция пиковых частот на вспышку и напротив, для 10 событий мощнее X2 реакция отсутствовала. На рис. 5.8 и 5.9 показаны характерные примеры рентгеновских вспышек, сопровождавшиеся вариациями пиковых частот. Отметим, что в обоих случаях после рентгеновского события наблюдались протонные вспышки. При этом для события 24 августа 2002 г. протонная вспышка сопровождалась уменьшением пиковой частоты относительно медианного значения, которое наблюдалось в канале “восток-запад” с 02 до 10 UT. Отметим, что данный канал более чувствителен к сигналам ШР распространяющимся вдоль меридиана и проходящих через авроральные области обоих полушарий, где проникновение энергичных протонов в нижнюю ионосферу максимально. В то же время для рентгеновского события 13 декабря 2006 года уменьшение пиковых частот ШР во время протонной вспышки зафиксировано не было, несмотря на то, что интенсивность потока протонов была даже несколько выше чем во время предыдущего события.

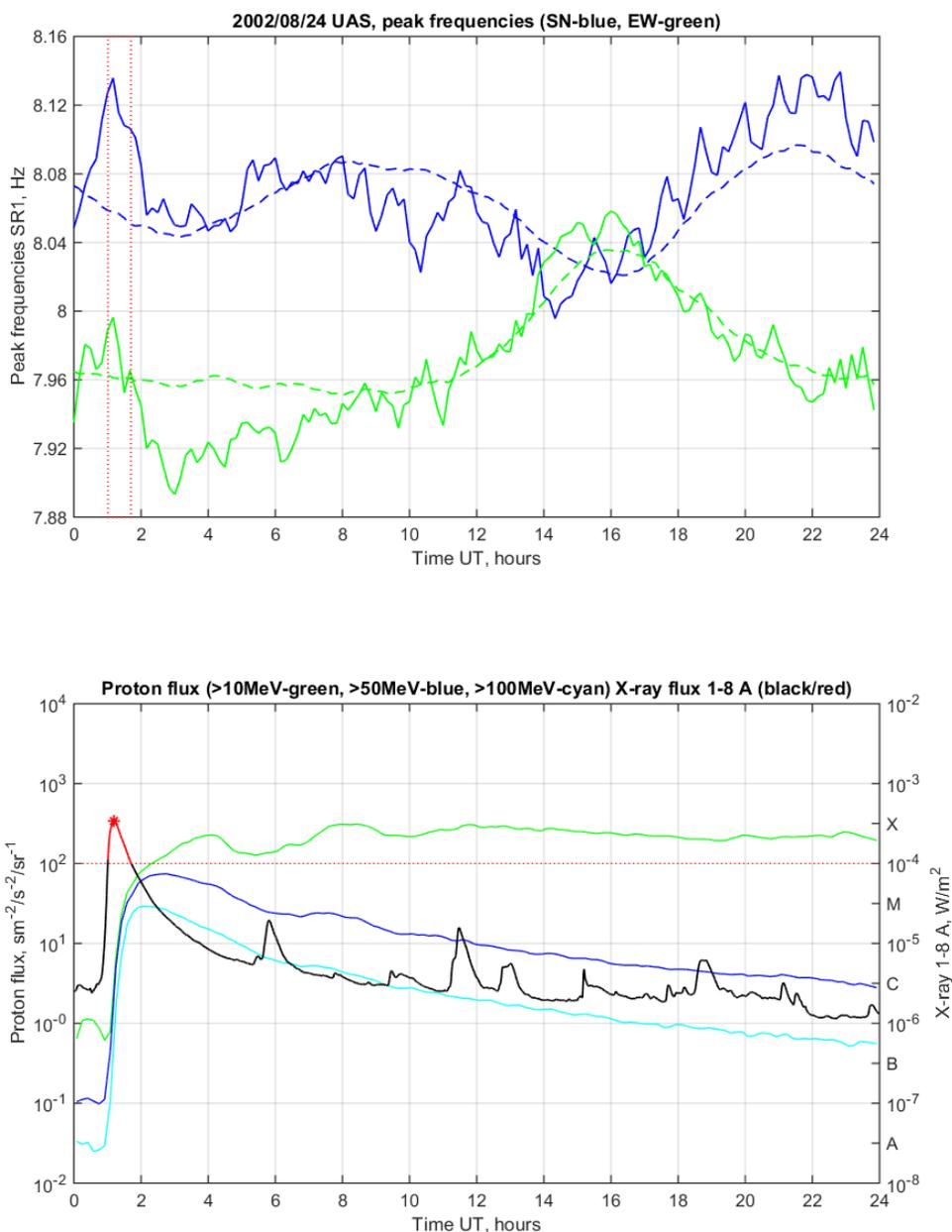


Рисунок 5.8 – Вариации пиковых частот во время рентгеновской вспышки класса X3.2 24 августа 2002 г. На верхней панели пиковые частоты в канале “север-юг” (синим) и “восток-запад” (зеленым). Пунктиром показан среднемесячный медианный ход пиковых частот. На нижней панели в логарифмическом масштабе представлен поток рентгена в диапазоне 1-8 А (черным) и поток протонов с энергиями выше 10 МэВ (зеленым), 50 МэВ (синим), 100 МэВ (голубым)

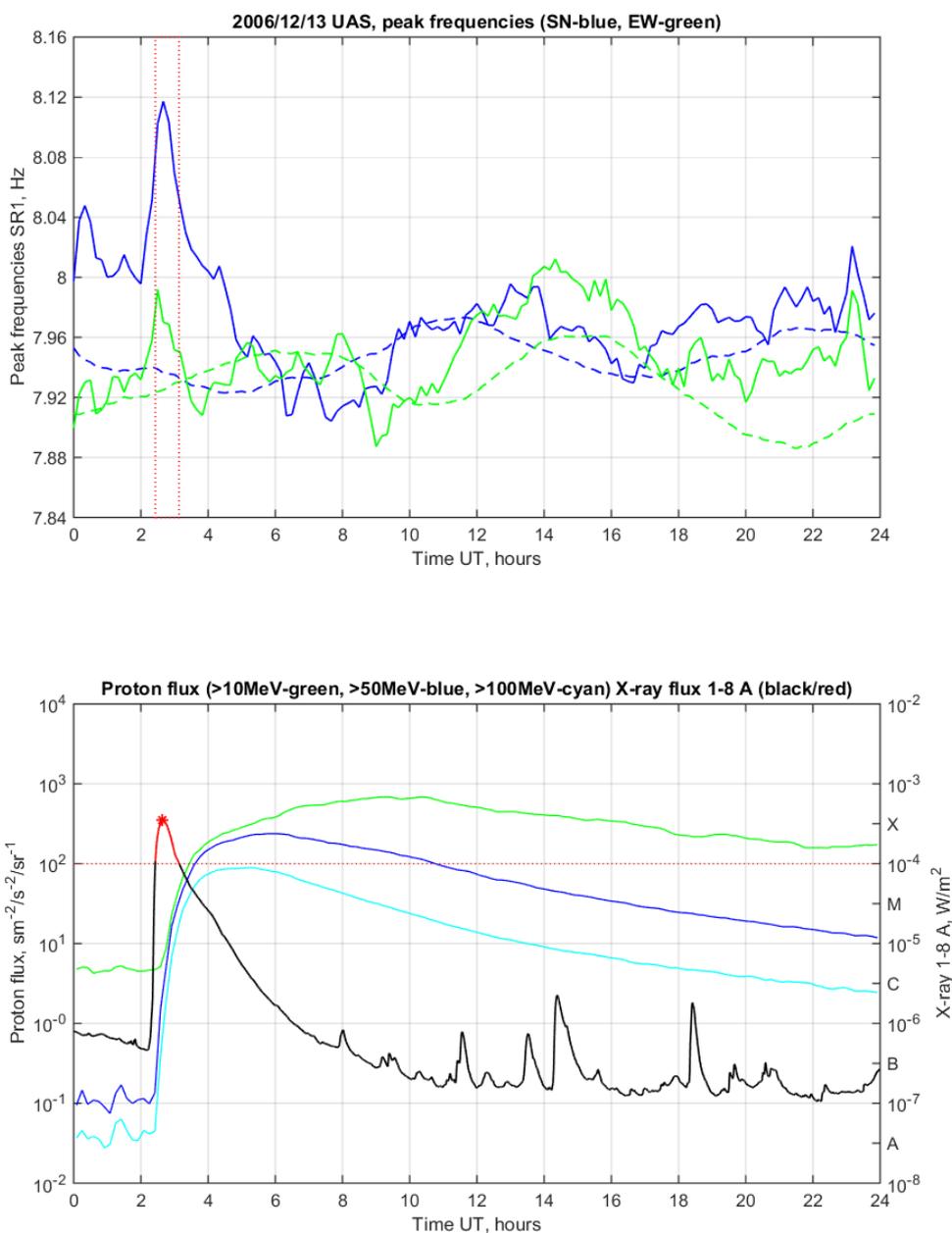


Рисунок 5.9 – Вариации пиковых частот во время рентгеновской вспышки класса X3.4 13 декабря 2006 г. На верхней панели пиковые частоты в канале “север-юг” (синим) и “восток-запад” (зеленым). Пунктиром показан среднемесячный медианный ход пиковых частот. На нижней панели в логарифмическом масштабе изображены поток рентгена в диапазоне 1-8 А (черным) и поток протонов с энергиями выше 10 МэВ (зеленым), 50 МэВ (синим), 100 МэВ (голубым)

Таким образом, результаты наблюдений указывают на то, что рентгеновские события всегда приводят к увеличению пиковых частот, а это вероятнее всего связано с понижением высоты верхнего характеристического слоя ионосферы и увеличения проводимости этой области ионосферы. Реакция параметров ШР на протонные вспышки не является однозначной и должна исследоваться индивидуально для каждого протонного события.

### 5.3 Проявления сейсмической активности в электромагнитном излучении УНЧ-СНЧ диапазона

Кроме средства диагностики эффектов в геокосмосе, стимулированных солнечной активностью, излучение УНЧ-СНЧ диапазона может быть использовано в роли индикаторов мощных наземных процессов. Пожалуй, наибольший практический и научный интерес по понятным причинам вызывает возможная связь УНЧ-СНЧ эффектов с сейсмической активностью. В литературе имеется большое количество свидетельств такой связи [127, 290, 291, 292, 293], однако, несмотря на существенные усилия, прилагаемые к изучению и интерпретации явлений в УНЧ-СНЧ диапазонах, позиционируемых как предвестники землетрясений, их физические механизмы еще далеки от окончательного осмысления. В этом пункте представлены результаты специальной обработки данных, собранных в ходе мониторинга электромагнитной активности в УНЧ-СНЧ диапазоне, направленной на поиск проявлений сейсмической активности. Наблюдения проводились вблизи антарктического полуострова на УАС [3] “тихом” в смысле электромагнитного фонового шума и в сейсмоактивном регионе Индии [251].

При поиске электромагнитных проявлений землетрясений спектральные и поляризационные свойства УНЧ-СНЧ шумов исследуются по двум причинам. С одной стороны, естественное низкочастотное электромагнитное

излучение, формируемое в магнитосфере и атмосфере, образует фон, на котором необходимо обнаружить сейсмические сигналы. С другой стороны, параметры сигналов электромагнитных резонаторов могут сами нести отпечаток сейсмической активности [293, 294]. Данные УНЧ-СНЧ регистраций на УАС содержат волновые формы нескольких явлений: шумановские и ионосферные альфвеновские резонансы, а также микропульсации геомагнитного поля класса PC1. С целью поиска сейсмогенных сигналов были проанализированы особенности ШР и ИАР, которые были изучены во все сезоны года, периоды дня, а также для различных условий геофизической возмущенности. Выполненный анализ показал, что спектральное окно между  $\approx 0,3$  Гц и 6 Гц наиболее удобно для круглосуточного мониторинга сейсмогенных сигналов. Действительно, единственный «регулярный сигнал» присутствующий в данной полосе это отклик ИАР, который может быть легко выделен благодаря своим характерным поляризационным и спектральным свойствам, что позволяет производить поиск эффектов любого другого рода на его фоне. С другой стороны, отклонения параметров поляризации ИАР от “стандартного” поведения, могут быть надежно выявлены и проанализированы с точки зрения их возможной связи с сейсмической активностью.

Для изучения возможности обнаружения низкочастотных электромагнитных эффектов связанных с сейсмической активностью был выполнен обзор землетрясений с магнитудой  $M > 5$ , которые произошли вблизи Антарктического полуострова. Согласно списку мощных землетрясений [[https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_21st-century\\_earthquakes](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_21st-century_earthquakes)] Геологической службы США - USGS (United States Geological Survey) - за период с 2002 по 2012 год произошло только одно событие этой категории. Его магнитуда составила  $M = 7.1$ . Эпицентр землетрясения 20 августа 2006 г. (на  $61.02^\circ$  ю.ш.,  $34.37^\circ$  в.д.) находился вблизи группы Южных Сандвичевых островов в море Скотия, на расстоянии порядка 1800 км., от УАС, где выполнялись наблюдения. УНЧ-СНЧ записи анализировались для периода с

18 августа по 22 августа. Динамические периодограммы интенсивности сигнала и поляризационных параметров в пределах 0.1 – 10 Гц представлены для этих дат на рис. 5.10. Вариации интенсивностей  $I$ ,  $I_p$  и  $I - I_p$  18 августа, 21 августа и 22, и в первой половине 19 августа можно считать типичными, несмотря на средний уровень геомагнитной возмущенности.

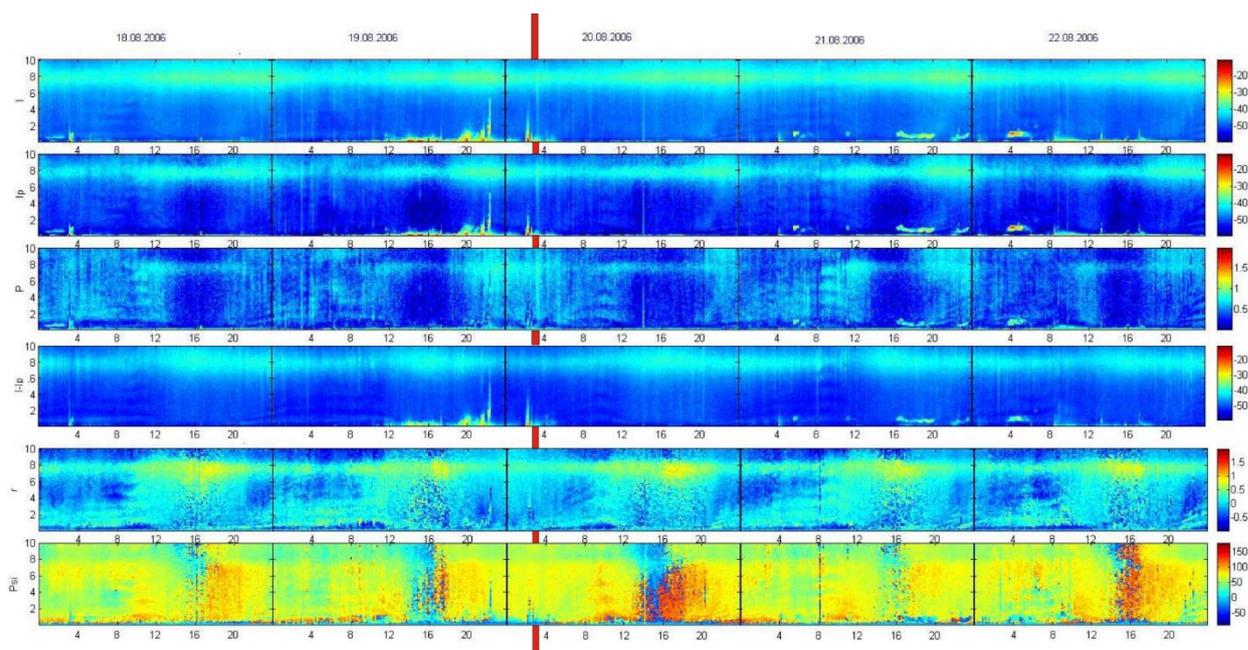


Рисунок 5.10 – Динамические периодограммы интенсивности сигнала  $I$  и поляризационных параметров  $I$ ,  $I_p$ ,  $P$ ,  $I - I_p$ ,  $r$ , и  $\psi$ , зарегистрированные на станции “Академик Вернадский” 18-22 августа во время землетрясения в море Скотия (момент основного толчка 03:42 UT, 20 августа 2006 г., показан красными столбиками между панелями рисунка)

Из рисунка видно, что за несколько часов до основного толчка (03:42 UT, 20 августа) дискретные линии ИАР исчезли, и их не было видно даже в степени поляризованности  $P$ , которая, как правило, характеризуется высокой контрастностью сигнала ИАР. Эффект подавление резонансных колебаний ИАР во время землетрясений был отмечено ранее другими авторами (например [294]). В то же время, период, предшествующий

землетрясению, характеризовался широкополосным излучением в диапазоне ИАР, которое отчетливо фиксируется в спектрах обеих поляризованных и неполяризованных интенсивностей (отмечены эффекты в  $\approx 22$  часов 19 августа и 2:30 UT августа 20).

Непосредственно перед землетрясением с 03:20 UT до 03:30 UT 20 августа наблюдалась существенная аномалия спектральных характеристик сигнала в диапазоне ШР, представленная на рис., 5.11.

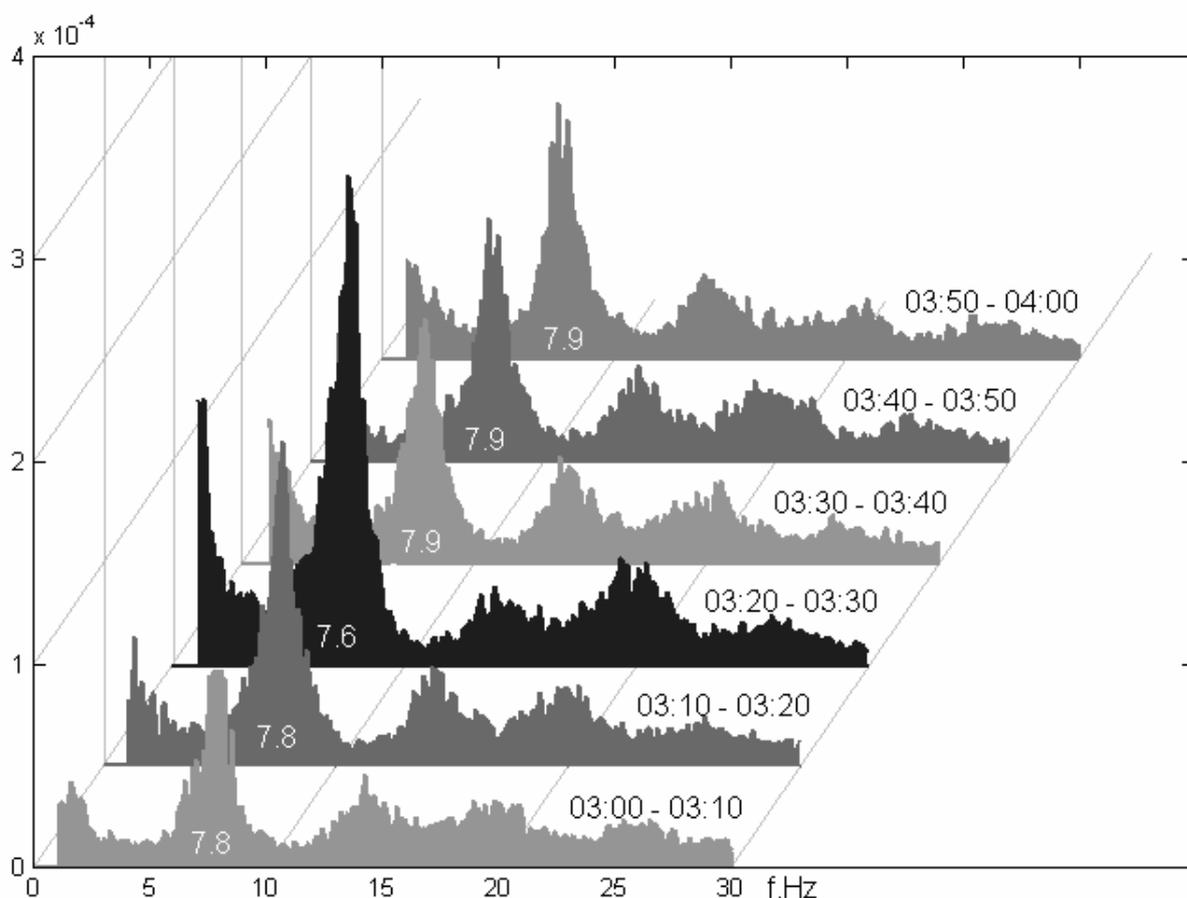


Рисунок 5.11 – Последовательность спектров мощности полной горизонтальной компоненты магнитного поля во время землетрясения 20 августа 2006 г., по данным измерений на УАС “Академик Вернадский”

Рисунок 5.11 демонстрирует последовательность усредненных по 10-ти минутным интервалам спектров мощности полной горизонтальной

компоненты магнитного поля в диапазоне 1-30 Гц. Черным цветом отмечен аномальный спектр, для которого зафиксировано существенное увеличение интенсивности 1-го и 3-го мода ШР, а также уменьшение пиковой частоты от среднесуточных значений 7.8-7.9 Гц до 7.6 Гц. В то же время амплитуды 2-ой и 3-ей моды ШР и поляризационные параметры, включая неполяризованную интенсивность  $I-I_p$ , практически не изменились.

Таким образом, аномальное поведение сигналов в диапазоне ШР не вызывает сомнения, однако существует вопрос о возможной его связи с сейсмической активностью и ее механизмах. Можно предложить два возможных физических механизма аномалии. Согласно одному из них, магнитометры фиксируют некоторое дополнительное электромагнитное излучение, приходящее в виде поверхностной волны от источника, находящегося в непосредственной близости от эпицентра землетрясения (активная помеха). Другой механизм предполагает изменение условий распространения природных СНЧ шумов, которые могут возникнуть в результате сейсмически индуцированных изменений в ионосфере (пассивная помеха). В первом случае электромагнитное излучение, будет выглядеть как аддитивная добавка к природным СНЧ сигналам, что приведет к повышению спектральной интенсивности на всех частотах. Спектральное распределение этого сигнала можно оценить следующим образом. Из-за высокой проводимости пород земной коры  $\sigma$  в СНЧ диапазоне, поглощение  $\alpha$  сейсмогенного излучения с частотой  $f$  будет изменяться, как:

$$\alpha = \frac{2\pi f}{c} \cdot \operatorname{Im} \sqrt{\varepsilon' + \frac{i \cdot 2\sigma}{f}} \approx \frac{2\pi}{c} \sqrt{\sigma f}, \quad (5.6)$$

где:  $\varepsilon'$  является действительная часть диэлектрической проницаемости горной породы, а  $c$  – скорость света. Это предполагает медленное монотонное уменьшение дополнительной интенсивности,  $I_+ = \exp(-\alpha L)$ , с ростом

частоты. Очевидно, что такой закон дисперсии имеет мало общего с селективным усилением только нечетными пиков Шумана, которые были зарегистрированы экспериментально.

Возможные физические механизмы аномального поведения СНЧ сигналов, вызванные изменениями в ионосфере сейсмической природы обсуждалась в литературе (см., [77, 295] и цитированные в них источники). Как известно, три центра мировой грозовой активности, находящиеся в экваториальной зоне, являются основными источниками сигналов ШР. Совокупный эффект американских, азиатских и африканских центров в спектральных и поляризационных параметрах СНЧ шумов и его зависимость от “географии” источников, описан в разделе 3 и изложен в [2, 296]. Согласно этому анализу, станция “Академик Вернадский” расположена относительно Африканского грозового центра так, что все четные моды ШР находятся в минимуме интерференционного распределения поля, это приводит к их подавлению. Эпицентр землетрясения 20 августа находился на дуге большого круга, соединяющего УАС и африканский грозовой центр. Следовательно, если предположить, что землетрясение изменило ионосферу над эпицентром, то этот эффект, как и выявлено в эксперименте, должен проявляться для четных мод ШР и отсутствовать для нечетных.

Рассмотрим возможные вариации амплитуд и пиковых частот, вызванные землетрясением. Как известно [75, 76, 117], влияние ионосферы на распределение поля в полости Земля-ионосфера может быть описано в терминах эквивалентной высоты резкой границы ионосферы и поверхностного импеданса на этом уровне. Если предположить, что землетрясение производит некоторую дополнительную ионизацию в ионосфере, например из-за повышенной эманации радиоактивных газов, то тем самым локально уменьшается ее эффективная высота  $h$  и увеличивается пиковая частота  $\omega_n$ :

$$\omega_n = \omega_{n0} \left(1 - \frac{c|Z|}{4h\omega_{n0}}\right), \quad (5.7)$$

где:  $\omega_{n0} = c/a \cdot \sqrt{n \cdot (n+1)}$  -  $n$ -ая резонансная частота для идеальной полости (идеально проводящие концентрические сферические границы);  $a$  - радиус Земли и  $Z$  – импеданс ионосферной границы полости. Соответственно, амплитуда поля должна возрасть. Таким образом, тенденция поведения обоих параметров согласуется с наблюдениями. Стоит отметить, что пока изменения параметров ШР, могут быть использованы только как качественные индикаторы подготовки землетрясения, а количественный анализ эффекта требует более строгого физического моделирования.

Таким образом, в результате анализа установлено что: (а) дискретная резонансная структура спектров ИАР подавлялась незадолго до сейсмического события и восстанавливалась через несколько часов после него; (б) спектральные параметры ШР показали четкую реакцию на удаленное землетрясение, в виде увеличения амплитуды первого резонансного мода на 30% и понижения пиковой частоты на 4% за 15-20 минут до сейсмического толчка; (в) поляризационная структура широкополосной компоненты СНЧ шума фиксировавшаяся за несколько часов до землетрясения заметно отличалась от “нормальной” в диапазоне частот  $10^{-1}$ -10 Гц.

#### 5.4 Наблюдения излучения энергосистем Североамериканского континента в Антарктике, “уикэнд эффект”

Известно, что одним из главных источников техногенных помех в СНЧ диапазоне волн (3-300 Гц) является “паразитное” излучение энергосистем, генерирующих, транспортирующих и потребляющих электроэнергию. Частоты основных гармоник электросистем в восточном полушарии составляют 50 Гц, а в западном - 60 Гц. Наибольшее число генерирующих станций и потребителей электроэнергии расположены в среднеширотном

поясе северного полушария. Полная по всему земному шару энергия электростанций, производимая за год, оценивается примерно - 18.2 Твтчас ( $6.5 \cdot 10^{16}$  Дж). Приблизительно 60% производимой электроэнергии приходится на евроазиатский регионы с частотой сети 50 Гц. Североамериканский континент, Бразилия и Япония производят и транспортируют электроэнергию на частоте 60 Гц. Большинство потерь электроэнергии на излучение происходит при ее транспортировке в магистральных линиях электропередач. В соответствии со средними оценками они составляют примерно 0,1 %. Таким образом, приближенно можно считать, что в СНЧ диапазоне на Земле непрерывно “работает” распределенная сеть излучающих “передатчиков” с ежегодным энерговыделением порядка  $6,5 \cdot 10^{13}$  Дж [<http://earthtrends.wri.org>]. И хотя эффективность излучения в этом частотном диапазоне крайне низка, электромагнитные сигналы на частотах 50/60 Гц и их гармоники распространяются на глобальные расстояния в волноводном канале Земля – ионосфера с малыми потерями и могут быть зарегистрированы в любом регионе земного шара. Сигналы гармоник устойчиво наблюдаются на расстояниях до несколько десятков – сотен километров от источника, распространяясь, по-видимому, поверхностной волной [297, 298]. В литературе также описаны случаи регистрации линий с частотным разносом равным или близким к 50 и 60 Гц на значительных удалениях (тысячи километров) от областей энергопроизводства и линий электропередач. Высшие гармоники наблюдаются преимущественно в ОНЧ диапазоне на частотах от десятых килогерца до нескольких килогерц. Мощные производители и потребители электроэнергии за счет нелинейности входных и выходных устройств могут “запитывать” магнитосферный канал для распространения высших гармоник энергосетей. Свидетельством этому являются наблюдения периодических последовательностей спектральных линий на поверхности Земли [299, 300, 301] и на борту космических аппаратов [302, 303]. Известны случаи синхронного обнаружения подобных сигналов на земной поверхности и в космическом пространстве [304]. В то же время, для

большого числа наблюдений спектральные линии регистрируются эпизодически, а частотный разнос между ними отличается от 50/100 и 60/120 Гц [305, 306], что не позволяет достоверно связать такие сигналы с излучением энергосетей. Некоторые авторы [307] регистрируют понижение вероятности наблюдения техногенных излучений в выходные дни по сравнению с рабочими, что связывается с известным эффектом уменьшения энергопроизводства в выходные (“эффект конца недели”). В то же время, другие исследователи свидетельствуют, что проявление “эффекта конца недели” при наблюдении линий не является статистически достоверным [308, 309]. Имеются данные об увеличении амплитуды наблюдаемых линий [304] и уменьшения вероятности их регистрации [303] с увеличением уровня геомагнитной активности. В то же время, в известной автору литературе отсутствуют данные систематических экспериментальных исследований распространения фундаментальной гармоники силовой сети (50 либо 60 Гц) на значительные расстояния (более 10 000 км). Это, по-видимому, вызвано сложностью выделения СНЧ сигналов удаленных силовых сетей на фоне местных помех техногенного и природного происхождения. В то же время подобные измерения являются полезными как с точки зрения дистанционного контроля источников генерации, так и для решения задачи диагностики канала распространения. Для обнаружения априорно слабых излучений удаленных силовых энергосетей целесообразно размещать приемный пункт в зонах с минимальным уровнем техногенных и природных шумов. Такому критерию удовлетворяет СНЧ обсерватория, размещенная на Украинской антарктической станции (УАС) “Академик Вернадский”, на которой с 2002 г. осуществляется непрерывный мониторинг излучения в СНЧ диапазоне волн. В ходе систематических наблюдений на УАС устойчиво зарегистрирована узкополосная линия на частоте 60 Гц [8, 129]. В данном подразделе выполнен анализ энергетических, спектральных и поляризационных характеристик излучения удаленных электросетей, проведено их сопоставление с независимыми показателями энергопроизводства на Североамериканском

континенте. Получены подтверждения того, что источником излучения линии 60 Гц, наблюдаемой на УАС, является энергосистема США-Канады. В ходе систематического “патруля” интенсивности излучения этой системы зарегистрирована крупная техногенная авария в северо-восточной части Америки 14 августа 2003 года и изучена динамика ее ликвидации.

Обсуждаемые в пункте результаты получены путем обработки данных УНЧ-СНЧ магнитометра, размещенного на УАС и входящего в глобальную сеть, описанную в разделе 2. Предварительная обработка данных выполнялась непосредственно на станции. Она включала построение суточных спектрограмм сигнала в диапазоне шумановских и альфвеновских резонансов (0-50 Гц) и определение поляризационных характеристик 3-х первых шумановских мод, (подробнее см., разделы 2 и 3). Исследование “паразитных” излучений мировых энергосистем проводилось вблизи частоты 60 Гц, поскольку дизель генератор на УАС работал на частоте 50 Гц и создавал мощную местную помеху, не позволявшую проводить анализ излучения удаленных источников на этой же частоте. Для выделения сетевых гармоник анализировались средние спектры шумов в полосе 59-61 Гц с частотным разрешением 0.01 Гц. Текущие спектры рассчитывались по единичным реализациям длительностью 100 сек, усреднение проводилось по 2-х часовым интервалам. На рис. 5.12, в качестве примера в режиме “водопада” представлена характерная суточная спектрограмма сигнала в канале магнитометра “запад-восток”.

Как видно из рисунка 5.12, на частоте 60 Гц уверенно регистрируется узкополосный спектральный максимум с заметным превышением уровня шумов. Для подробного анализа поведения спектрального максимума на частоте 60 Гц был выбран годичный временной интервал непрерывных наблюдений с 01.03.2003 г. по 29.02.2004 г. Анализ спектрограмм сигнала показал, что линия 60 Гц регистрировалась круглосуточно и превышала шумовой фон на 2-5 дБ. Максимальный уровень сигнала наблюдался в канале

“запад-восток”. Ширина спектральной линии по уровню половинной мощности не превышала одной десятой герца.

Обработка данных включала этапы спектрального и поляризационного анализа. На первом этапе обработки непрерывные суточные записи разбивалась на временные интервалы длительностью по 2 часа. Для каждого двухчасового интервала строились средние комплексные спектры сигналов для обеих ортогональных компонент вариаций магнитного поля. Спектры с разрешением по частоте 0.01 Гц использовались для обнаружения узкополосной линии и оценки ее интенсивности. Разрешение 0.1 Гц применялось для вычисления поляризационных параметров и дальнейшего решения пеленгационной задачи.

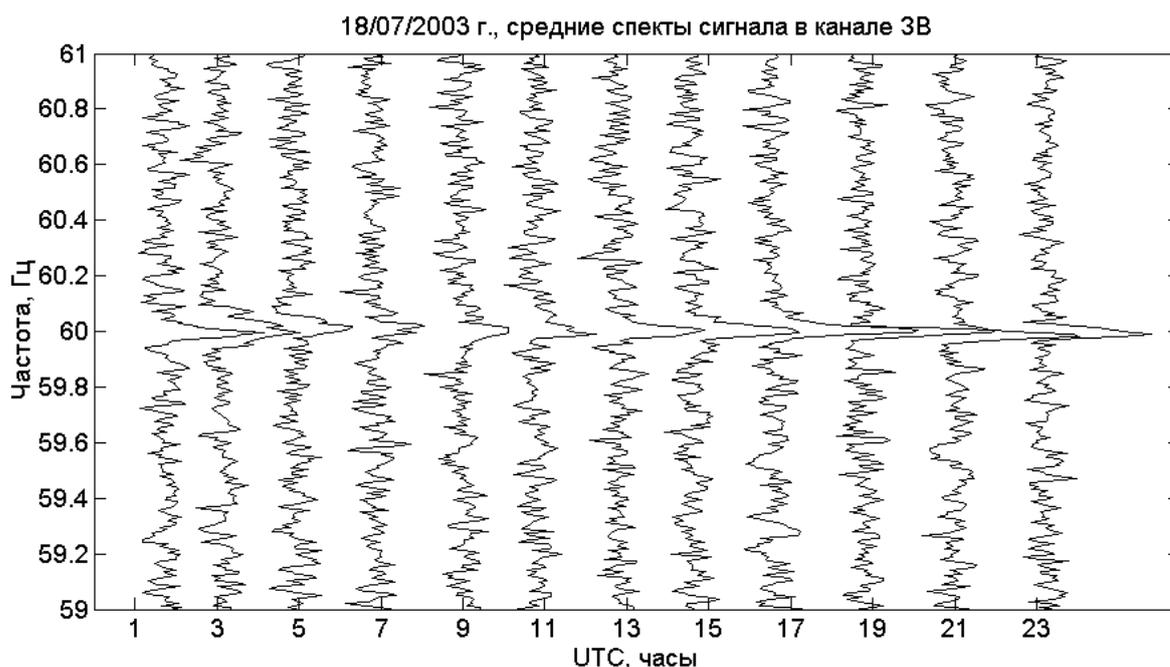


Рисунок 5.12 – Средние спектры сигнала для 18 июля 2003 г., в канале “запад-восток”. Время накопления каждого усредненного спектра 2 часа, разрешение по частоте 0.01 Гц

Поляризационная обработка была основана на вычислении параметров Стокса электромагнитного поля [186] и осуществлялась по методике,

изложенной в разделе 2. При расчетах использовались значения средних энергетических спектров,  $S_{xx}(f)$ ,  $S_{yy}(f)$ , а также модуля  $S_{xy}(f)$  и фазы  $\delta_{xy}(f)$  среднего взаимного спектра (здесь  $x$  соответствует каналу “юг-север”, а  $y$  – “запад-восток”). Параметры Стокса рассчитывались по формулам (2.3).

Для каждого 2-х часового интервала анализа принималось решение об обнаружении линии. Линия считалась обнаруженной в случае, когда величина максимума суммарной спектральной интенсивности  $I_{60} = I(f)|_{f=60 \text{ Гц}}$  в 2 и более раза превосходила интенсивность шумового фона в полосе частот 59-61 Гц. Интенсивность фона  $I_b$  оценивалась как среднее значение суммарной спектральной интенсивности в полосе частот 59-61 Гц, исключая спектральные составляющие узкополосной “полезной” линии. Для временных интервалов, на которых линия считалась обнаруженной, кроме ее интенсивности  $I_{60}$  в соответствии с (2.6) вычислялись величины коэффициента эллиптичности  $r_{60}$  и позиционного угла эллипса поляризации  $\Psi_{60}$ . ( $r_{60} = r(f)|_{f=60 \text{ Гц}}$  и  $\Psi_{60} = \Psi(f)|_{f=60 \text{ Гц}}$ ).

Результаты поляризационной обработки показали, что для всего годового цикла наблюдений величина коэффициента эллиптичности не превосходит 0.2 (среднее за год значение  $\langle r_{60} \rangle = 0.05$  при среднеквадратичном отклонении  $\langle \sigma_{r_{60}} \rangle = 0.15$ ). Это свидетельствует о близости поляризации излучения к линейной и позволяет пренебречь влиянием магнитного поля Земли, полагая процесс распространения электромагнитных волн на этих частотах изотропным [2, 117]. Поскольку для УАС выполняется условие волновой зоны (дистанция передатчик-приемник  $D \gg \Lambda/2\pi$ , где  $\Lambda$  - длина волны сигнала). Будем полагать, что сигнал распространяется в точку приема по волноводу Земля-ионосфера. Тогда, воспользовавшись поперечным характером электромагнитной волны, можно считать, что направление на

область излучения,  $A_{60}$ , будет соответствовать нормали к большой оси эллипса поляризации [186]:

$$A_{60} = \Psi_{60} \pm 90^{\circ}. \quad (5.8)$$

Выражения (2.1-2.7) были использованы для определения направления на источник. Среднее за год значение позиционного угла оказалось равным  $70.1^{\circ} \pm 11^{\circ}$ , соответственно азимут прямого и “зеркального” источников варьировался в пределах  $161.1^{\circ} \pm 11^{\circ}$  и  $-19.9^{\circ} \pm 11^{\circ}$  (угловая координата в горизонтальной плоскости отсчитывалась по часовой стрелке от географического севера). Азимут  $-19.9^{\circ}$  соответствует направлению на восточную часть североамериканского континента, где расположено более 80% мощностей объединенной энергосистемы США – Канады. Логично предположить, что данная удаленная силовая сеть является источником излучения узкополосной линии на частоте 60 Гц, наблюдаемой на УАС. В соответствии с этой гипотезой при вычислении азимута в выражении (5.8) использован знак минус. На рис. 5.13., представлен годовой ход наблюдаемых азимутов на излучающую область.

Точки на графике обозначают среднемесячные значения азимута, а вертикальные отрезки соответствуют 95% доверительным интервалам оценки направления на источник, определяемым согласно известной методике, изложенной в [310]. Штрихпунктирные горизонтальные линии 1 и 2 задаются азимутами на восточное и западное побережья Северной Америки. Сектор углов, ограниченный линиями 1 и 3, соответствует объединенной энергосистеме Востока (Eastern Interconnection), где генерируется около 54% от мирового производства электроэнергии с частотой 60 Гц [311].

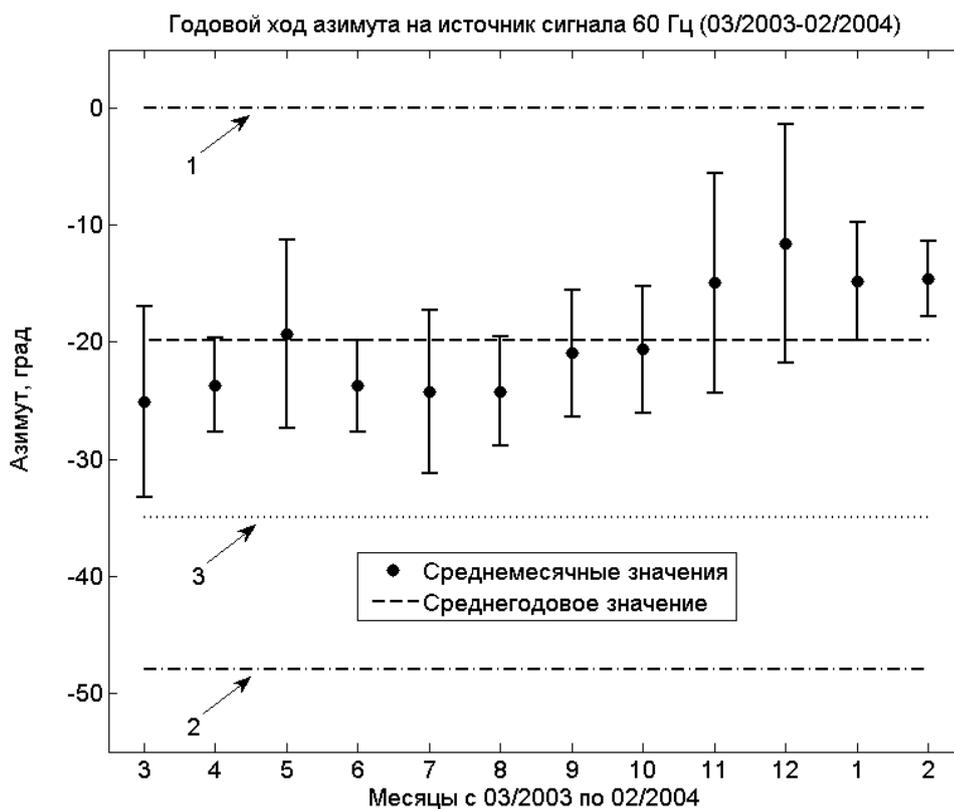


Рисунок 5.13 – Годовой ход азимута на источник линии 60 Гц, наблюдаемой на УАС, для 03/2003-02/2004 г.

Отметим, что для всего интервала наблюдений оценки направления на источник, рассчитанные с 95% вероятностью, не выходят за пределы данного сектора. Среднее за год значение пеленга определяет направление на центр области излучения, которая задается большим числом произвольно ориентированных в горизонтальной плоскости индивидуальных источников - линий электропередач. При среднегодовом значении азимута  $-19.9^\circ$  эффективный центр области приблизительно соответствует центру объединенной энергосистемы Востока. Это позволило считать источником возбуждения линии 60 Гц энергосистему США - Канады.

Несмотря на приведенные выше свидетельства обнаружения излучения энергосистемой североамериканского континента, необходимо полностью исключить возможность ее генерации локальными источниками на УАС. Для

окончательного выяснения природы излучения с 30 января по 01 февраля 2003 г. был проведен специальный контрольный эксперимент по регистрации сигнала в пункте, далеко вынесенном за пределы станции. Переносной приемный СНЧ комплекс в составе магнитометра Lem112A и регистрирующего компьютера был размещен в аварийном доме “Rasmussen hut” на расстоянии около 12 км к востоку от УАС. Система автономного электропитания включала в себя источник бесперебойного питания и два внешних аккумулятора большой емкости. Это позволило провести 31 января 2003 г., два цикла измерений: 00:07:23-12:08:03 UT и 15:55:16-24:00:00 UT. Система электропитания, компьютер и блок электроники магнитометра были размещены внутри аварийного дома (Рис. 5.14), а магнитные датчики были установлены на удалении приблизительно 20 м в восточном направлении. Ориентация датчиков относительно сторон света была сохранена такой же как на УАС с точностью до единиц градусов. Следует отметить, что штатно вблизи ОНЧ павильона зонды расположены приблизительно в 20 м к югу от павильона. Таким образом, штатная ориентация зондов относительно регистрирующей аппаратуры существенно отличается от примененной в выездном эксперименте. Такое расположение аппаратуры было выбрано сознательно, чтобы в случае генерации линии 60 Гц самой регистрирующей аппаратурой сильно изменить позиционный угол излучения.

Спектральная поляризационная обработка проведенных выездных записей выявила хорошо выраженную узкополосную линию 60 Гц, с характеристиками аналогичными наблюдаемым в ОНЧ павильоне. Поскольку интенсивность регистрируемой линии не изменилась при удалении приемной системы от станции на 12 км, аппаратный источник излучения на УАС с частотой 60 Гц можно надежно исключить. Отсутствие значимых изменений поляризационных параметров в удаленном эксперименте позволяет исключить также выносную регистрирующую аппаратуру как возможный источник.

Как уже отмечалось, значение пеленга на источник в выездном эксперименте не выходило из сектора направлений на североамериканский континент. Таким образом, возможность генерации излучения на частоте 60 Гц местными источниками была полностью исключена.



Рисунок 5.14 – Аварийный домик Rasmussen hut с установленным внутри магнитометрическим оборудованием.

Кривые на рис. 5.15 характеризуют поведение интенсивности линии 60 Гц -  $I_{60}$  и СНЧ фона -  $I_b$  для годового интервала анализа с марта 2003 года по февраль 2004 года. Из рисунка 5.15 видно, что временные зависимости интенсивности для сигнала и фона демонстрируют синхронное поведение на суточном, интервале. Максимум интенсивности приходится на ночные (UTC) часы, а минимум соответствует утреннему времени. При этом, среднесуточная вариация интенсивности линии (около  $0.047$  пТл<sup>2</sup>/Гц, при глубине модуляции

порядка 38%) более чем в три раза превышает вариацию фона (порядка  $0.013 \text{ пТл}^2/\text{Гц}$ ) и запаздывает относительно последней на несколько часов. Анализ сезонных зависимостей показывает, что на годовом интервале интенсивность линии зимой несколько ниже, чем для летних месяцев, в то время как интенсивность фона не демонстрирует каких-либо явных сезонных закономерностей.

Следует отметить, что только суточная вариация интенсивности линии показывает размах в несколько раз большей величины доверительных интервалов и может считаться статистически достоверной. Амплитуды суточной вариации фона и обеих сезонных зависимостей сопоставимы с характерными величинами доверительных интервалов.

Для объяснения природы суточной вариации интенсивности линии сопоставим ее с уровнем энергопроизводства в США. На рис. 5.16.а штриховой линией показаны мощность производства электроэнергии объединенной системой PJM, которая является частью объединенной энергосистемы Востока, и, как уже отмечалось, производит большую часть электроэнергии в США - Канаде [311]. На этом же рисунке сплошной линией показаны сглаженные шестичасовым окном вариации интенсивности линии 60 Гц, по данным наблюдений на УАС (сплошная кривая). Обе зависимости демонстрируют высокое подобие. Величина коэффициента взаимной корреляции между интенсивностью линии и кривой энергопроизводства равна 0.92, что свидетельствует о правильной идентификации области излучения.

Для обеих кривых хорошо прослеживаются суточная и недельная периодичности. Максимумы соответствуют вечерним часам по местному времени источника ( $LT=UTC-4$  часа). Минимумы приходятся на ночные и утренние часы. В установленной недельной зависимости (с 18 – 24 августа) отчетливо наблюдается уменьшение интенсивности в воскресные дни (23-24 августа), по сравнению с рабочими днями недели, обусловленное снижением производства и потребления электроэнергии.

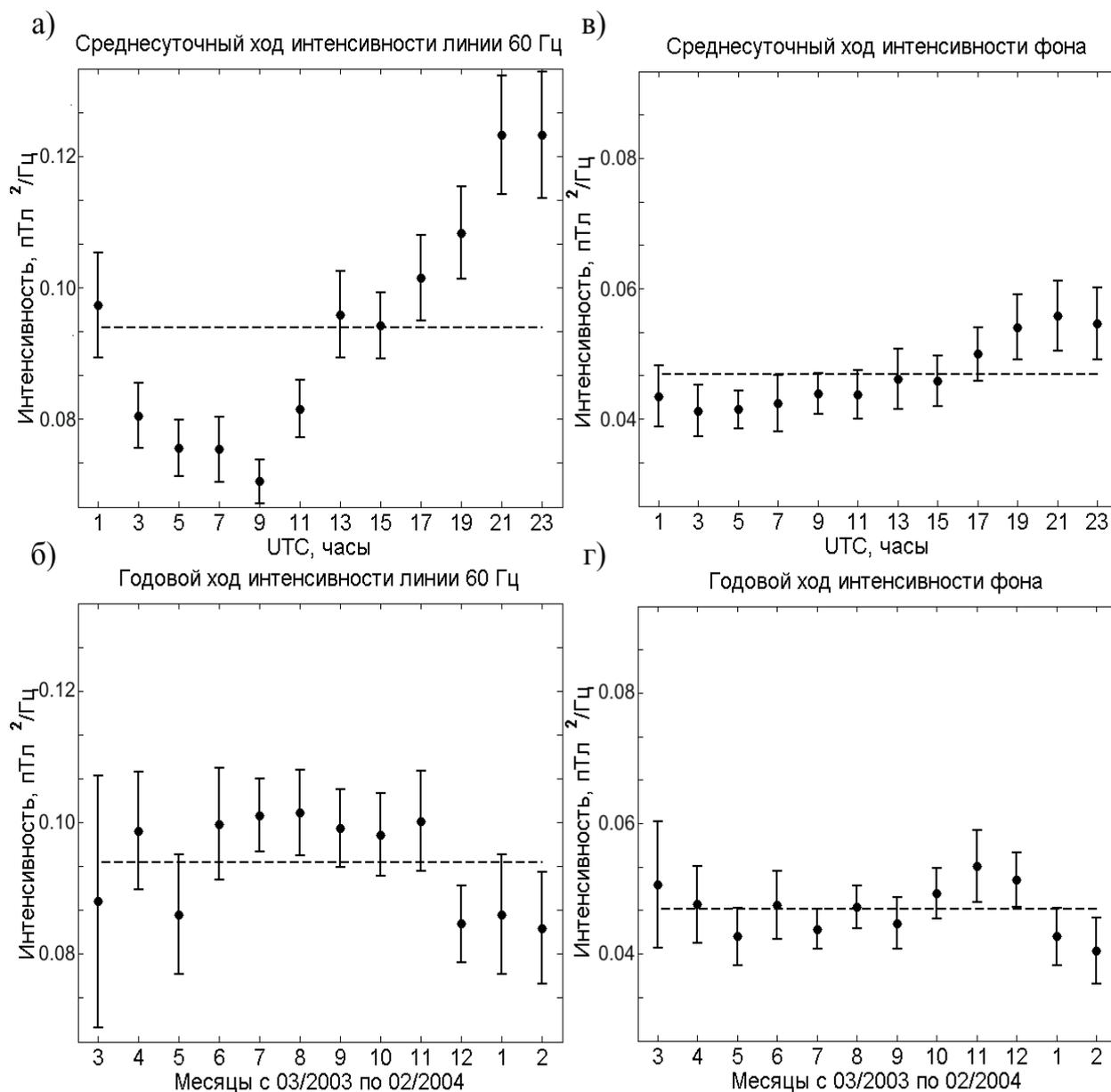


Рисунок 5.15 – Суточные и сезонные зависимости интенсивности СНЧ сигналов в окрестности частоты 60 Гц для интервала анализа 03/2003-02/2004: а) среднесуточный ход интенсивности линии 60 Гц; б) годовой ход интенсивности линии 60 Гц; в) среднесуточный ход интенсивности фона; г) годовой ход интенсивности фона. Точки на графике обозначают средние значения интенсивности, а вертикальные отрезки соответствуют 95% доверительным интервалам оценки

“Эффект конца недели” отчетливо прослеживается в поведении интенсивности линии в течение всего года. Рис. 5.16.б демонстрирует усредненную за год зависимость изменений относительной интенсивности излучения на частоте 60 Гц для каждого дня недели. Видно, что интенсивность линии в выходные дни в среднем на 10-15% ниже, чем в будни.

Интересно также отметить, что среднесуточные зависимости поведения интенсивности узкополосного излучения и фона демонстрируют сходные периодичности (см., рис. 5.15.а, рис. 5.15.в). По-видимому, к природному “широкополосному” СНЧ фону добавляется техногенная составляющая, обусловленная широкополосным излучением импульсных переходных процессов при подключении и отключении генерирующих и потребляющих энергосистем.

На рис. 5.17 показаны суточные кривые интенсивности линии 60 Гц, по данным регистраций на УАС, во время масштабной аварии в системе энергоснабжения на северо-востоке США 14 – 15 августа 2003 г [311]. Отключения электросетей начались около 18 часов, авария продолжалась почти сутки. Приведенные зависимости демонстрируют, что после начала аварийных отключений произошло резкое уменьшение интенсивности излучения на частоте 60 Гц. Вместо главного суточного максимума, который хорошо прослеживается для 13-го и 15-го августа, наблюдался минимум интенсивности.

Анализ СНЧ сигналов, зарегистрированных на УАС с марта 2003 г., по февраль 2004 г., позволяет сделать вывод о том, что узкополосная линия с частотой 60 Гц возбуждается объединенной энергосистемой США - Канады. Обработка и интерпретация данных за годовой период наблюдений продемонстрировала повторяемость основных характеристик линии – устойчивую наблюдаемость сигнала, стабильность частоты максимума, узкополосность спектра, малую величину коэффициента эллиптичности, фиксированный азимутальный сектор расположения источников. Выявленные суточные и недельные закономерности поведения интенсивности

узкополосной составляющей излучения преимущественно порождены характеристиками источника. Основным каналом распространения излучения на первой гармонике является волновод Земля-ионосфера.

Таким образом, в данном пункте работы проанализированы систематические регистрации вариаций горизонтальных магнитных компонент сигналов в СНЧ диапазоне волн, полученные на УАС. Показано, что в течение всего времени наблюдений (начиная с 2002 года) в окрестности гармоники силовой сети 60 Гц устойчиво регистрируется узкополосная спектральная линия. Преимущественный пеленг на источники излучения совпадает с направлением на восточную часть Североамериканского континента, где производится около 54% электроэнергии с частотой генерации 60 Гц. Продемонстрирована высокая степень соответствия интенсивности сигнала, регистрируемого на УАС, суточному и недельному циклам производства электроэнергии. Показано, что уровень электромагнитного фона в СНЧ диапазоне также зависит от мощности производимой и потребляемой электроэнергии. По данным дистанционного мониторинга интенсивности излучения на частоте 60 Гц из Антарктики зарегистрирована крупная авария в системе производства электроэнергии в США и Канаде 14 августа 2003 г.

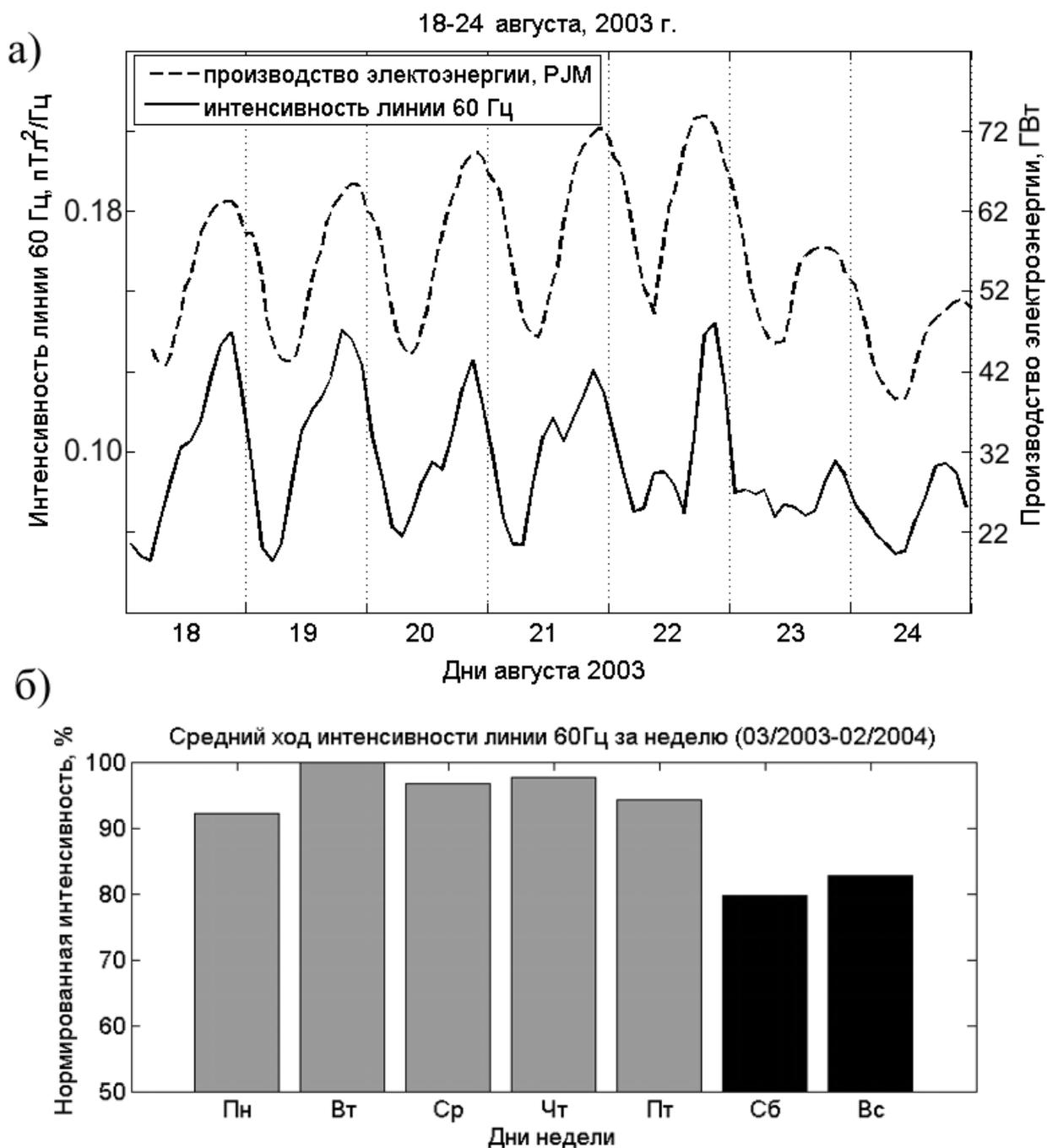


Рисунок 5.16 – а) Ход интенсивности линии 60 Гц по данным наблюдений на УАС (непрерывная кривая) совместно с зависимостью производства электроэнергии энергосистемой PJM (штриховая кривая) для недельного интервала 18-24 августа 2003 г.; б) Усредненный для годового интервала 03/2003-02/2004 ход интенсивности линии 60 Гц за неделю.

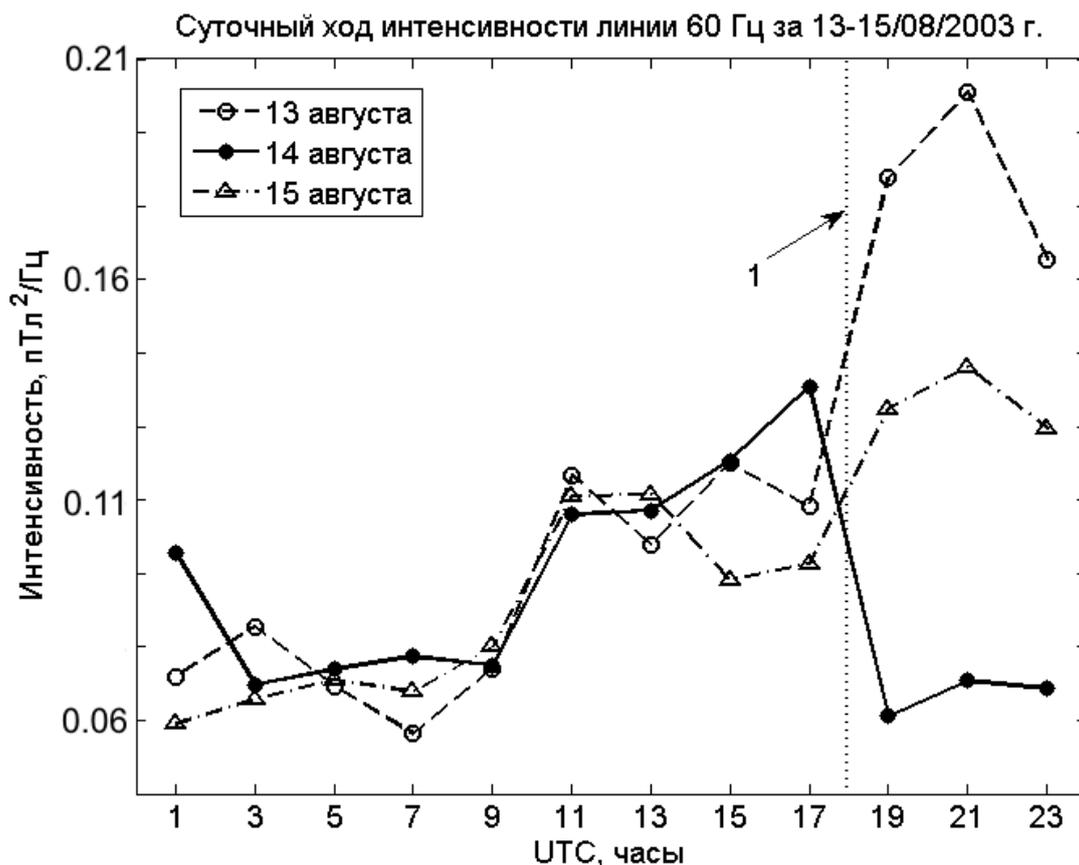


Рисунок 5.17 – Суточные зависимости интенсивности линии 60 Гц для 13-15 августа 2003 г. Пунктирная вертикальная линия 1 соответствует началу аварийных отключений в энергосистеме США - Канады 14 августа 2003 г.

### Выводы Раздела 5

В разделе 5 продемонстрировано то, каким образом регистрация электромагнитных полей и сигналов, распространявшихся в полости Земля-ионосфера и на ионосферных высотах, позволяет осуществлять диагностику низкочастотных процессов, происходящих в геокосмосе, атмосфере и на поверхности Земли. При этом шумановский и ионосферный альфвеновский резонаторы рассматриваются в роли индикаторов космической погоды, мониторинг которых позволяет контролировать состояние околоземной плазмы и процессов, происходящих на земной поверхности.

В разделе подробно проанализировано влияние сверхмощной геокосмической бури октября-ноября 2003 года на электромагнитное окружение земли, определены и исследованы механизмы воздействия солнечного излучения различных диапазонов волн на характеристики геокосмоса.

Проанализированы механизмы влияния мощных протонных и рентгеновских вспышек, происходящих в течении солнечного цикла на характеристики резонансов, что позволяет использовать последние для диагностики событий на Солнце и состояния космической погоды.

Изучены электромагнитные проявления сейсмической активности в параметрах резонаторов и выявлены эффекты, которые могут рассматриваться в роли предвестников землетрясений.

Проанализированы суточные и сезонные вариации параметров основной сетевой гармоника и широкополосного СНЧ фона излучение силовых сетей североамериканского континента, наблюдаемые в Антарктике. Зарегистрировано систематическое уменьшение интенсивности линии 60 Гц в воскресные дни, подробно проанализирована крупная авария в энергосистеме США – Канада 14 августа 2003 г. Показана возможность использования данных СНЧ мониторинга для контроля электромагнитного “загрязнения” Антарктики излучением энергосетей промышленно развитых регионов земного шара.

## РАЗДЕЛ 6

### МНОГОПОЗИЦИОННАЯ РАДИОДИАГНОСТИКА НИЗКОЧАСТОТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ИОНОСФЕРЕ

Описанные во втором разделе работы экспериментальные установки для многопозиционной и многочастотной диагностики ионосферных процессов, работающие в УНЧ, СНЧ, ВЧ и УВЧ диапазонах позволили провести исследования широкого круга низкочастотных ионосферных процессов. Часть полученных результатов была уже изложена в разделах 2-6. Данный раздел посвящен анализу взаимодействия ВЧ сигналов с областью искусственной ионосферной турбулентности, создаваемой в ионосфере излучением специальных мощных ВЧ передатчиков – нагревных стенов (НС). Известные локализация возмущенной области и время существования позволяют ее использовать в качестве “маркера” для изучения природных и стимулированных низкочастотных процессов в ионосферной плазме. К первым из относятся, солнечный терминатор, внутренние волны – АГВ/ПИВ, магнитогидродинамические колебания плазмы, термосферные ветры, коллективные дрейфы плазмы в скрещенных электрическом и магнитном полях. Заметим, что характерный пространственный масштаб перечисленных явлений значительно превышает размер самого “маркера” - возмущенной области, которая как “целое” повторяет динамику вынуждающего фактора. Ко второй группе низкочастотных процессов следует отнести специфические проявления динамики плазмы в самой “нагретой” области, отличные от фоновых свойств невозмущенной ионосферы. Предметом исследований являются различного вида плазменные неустойчивости, времена развития и релаксации искусственной ионосферной турбулентности, стимулированные дрейфы неоднородностей, ускорение ионно-звуковых волн вызванное принудительным нагревом плазмы. В последние годы надежно установлены крупномасштабные проявления мощного ВЧ воздействия, такие как рост

ионизации, возбуждение АГВ/ПИВ, спорадические слои [46, 312, 313, 314, 315, 316, 317]

Эксперименты по модификации ионосферы ВЧ излучением проводились с начала 70-х годов [318, 319, 320]. При отражении мощной радиоволны в ионосфере генерируется широкий спектр неоднородностей электронной плотности с пространственными масштабами от сантиметров до десятков километров, мелкомасштабные флуктуации плазмы носят турбулентный характер и называются искусственной ионосферной турбулентностью (ИИТ). Неоднородности возникают за счет различного вида неустойчивостей, развивающихся в области нелинейного взаимодействия ионосферной плазмы с волной накачки. Как правило, они локализованы по высоте в слое с характерной толщиной десятки километров, расположенном между высотами верхнего гибридного резонанса и высотой отражения [312]. НС способны осуществлять контролируемое воздействие на ионосферу, что позволяет рассматривать ее как природную плазменную лабораторию, и изучать процессы недоступные для воспроизведения в наземных условиях [321].

В первом подразделе изучено явление открытого ранее эффекта “расщепления” доплеровских спектров сигналов, рассеянных ИИТ. Автором впервые идентифицирован механизм ответственный за возникновение этого явления, а также проведено численное моделирование процессов дрейфовых движений рассеивателей, демонстрирующее количественное соответствие предложенной модели радиального дрейфа данным наблюдений. Во втором подразделе рассмотрены методики использования данных ракурсного рассеяния ВЧ сигналов для идентификации и оценки параметров ионосферных неоднородностей различных масштабов – регулярных дрейфовых движений, перемещающихся ионосферных возмущений и магнитогидродинамических волновых процессов. В третьем подразделе представлены методики картографирования ионосферных возмущений с использованием данных региональных сетей ГНСС приемников. В четвертом подразделе проанализированы результаты нескольких специальных экспериментов по

изучению эффектов сверхдальнего приема ВЧ сигналов самого мощного в мире нагревного стенда ХААРП, а также предложен наиболее вероятный механизм распространения – канализация основной энергии сигнала в межслоевой ионосферный волновод.

Основные оригинальные результаты этого раздела опубликованы в статьях [13, 14, 15, 19, 24, 25, 28, 29, 248, 322], а также в материалах конференций [20, 27, 323, 324, 325, 326, 327].

### 6.1 Радиальный дрейф стимулированных мелкомасштабных ионосферных неоднородностей

В данном подразделе рассмотрена динамика ионосферных неоднородностей мелких масштабов. Эти неоднородности относятся к классу магнитоориентированных неоднородностей (МОН). За счет замагниченности плазмы на высотах нагрева ионосферы характерный поперечный к МПЗ масштаб МОН меньше или соизмерим с длиной волны накачки (доли метров – десятки метров). Их продольные масштабы вдоль силовых линий магнитного поля могут достигать нескольких километров [328, 329]. Для исследования МОН эффективно используются методы резонансного рассеяния ВЧ и УВЧ сигналов на ИИТ. Поскольку стимулированные неоднородности ориентированы вдоль магнитного поля, они могут быть обнаружены путем радарных наблюдений, в которых луч “зрения” локатора ортогонален линиям геомагнитного поля в области рассеяния. Это условие создает анизотропию рассеяния и носит название ракурсного рассеяния (РР). Индикатриса рассеяния в ракурсном направлении имеет ярко выраженный “резонансный” максимум по сравнению с изотропным случаем. Для искусственно стимулированных в ионосфере МОН коэффициент усиления достигает десятков децибел. Этот эффект впервые наблюдался в семидесятые годы на нагревной установке расположенной вблизи г. Платтевилля (Колорадо) [330, 328]. Радарные установки, использовавшиеся в этих экспериментах, работали в частотном диапазоне 15-435 МГц, что

соответствовало резонансным поперечным размерам МОН 0.3-10 м. Подобные радарные измерения в КВ и УКВ диапазонах волн проводились впоследствии и для других нагревных установок, расположенных в Аресибо (Пуэрто Рико) [331] и Тромсе (Норвегия) [332].

С вводом в строй в Советском Союзе нагревного стенда (НС) “Сура” [333] и крупнейшей в декаметровом диапазоне ФАР радиотелескопа УТР-2 [334] стало возможным использования “тандема” этих инструментов для радарных исследований МОН. Одним из зарегистрированных в непрерывном режиме работы нагревного стенда “Сура” эффектов было обнаружение “расщепления” доплеровских спектров ракурсно рассеянных на МОН сигналов [335, 336]. Для объяснения этого эффекта было высказано несколько гипотез (см. работы [335, 336, 337]). Рассматривались следующие альтернативные механизмы: радиальный дрейф неоднородностей от центра к периферии возмущенной области (ВО) [335], циркуляционные движения рассеивателей вокруг центра ВО [336], и, наконец, расщепление фазовой скорости возмущений в модели тепловой параметрической неустойчивости (ТПН) (двухмодовый режим генерации) [336, 337]. Для идентификации реальных движений МОН возникла необходимость создания специального импульсного когерентного ВЧ локатора, позволяющего исследовать спектральную структуру сигналов, рассеянных от разных участков возмущенной области. Такой импульсный ВЧ радар с участием автора был создан [338] и его использование позволило установить механизм, ответственный за эффект расщепления спектров рассеяния [28, 29, 323].

#### 6.1.1 Измерительные установки и методика проведения наблюдений

Модификация ионосферы осуществлялась нагревным стендом “Сура”, расположенным вблизи г. Нижний Новгород (56,13° с.ш.; 46,10° в.д., наклонение МПЗ 71°). Передающий блок НС состоял из трех идентичных передатчиков ВЧ диапазона мощностью 250 кВт каждый. Эффективная площадь передающей ФАР оценивалась примерно в  $3 \times 10^4 \text{ м}^2$ . Установка позволяла излучать “О” или “Х” моды одновременно на трех нагревных

частотах в диапазоне от 4.3 МГц до 9 МГц. При совместной когерентной работе трех передатчиков на одной частоте максимальная эффективная мощность излучения “Суры” достигала  $P_{\max} \sim 300$  МВт. Стимулированные МОН генерировались на высотах F-области ионосферы (200-300 км).

Зондирование ионосферной турбулентности осуществлялось с помощью многопозиционного когерентного ВЧ радара Радиоастрономического института НАН Украины [338]. В качестве приемной антенны радара использовалась ФАР УТР-2, расположенная на расстоянии около 950 км к юго-западу от НС ( $49,65^\circ$  с.ш.;  $36,93^\circ$  в.д.). ФАР имела Т-образную конфигурацию и состояла из двух электрически управляемых с точностью до  $0.1^\circ$  антенных решеток Север-Юг и Запад-Восток (около 2-х и 1-го км в длину соответственно). Система фазирования позволяла формировать многолучевую диаграмму направленности из 5-ти лепестков решетки Север-Юг (СЮ1-СЮ5) и ортогонального им луча антенны Запад-Восток (ЗВ). Антенная система обеспечивала угловое разрешение  $\sim 0.7^\circ - 2^\circ$  в рабочем диапазоне частот 10-30 МГц. Многоканальная когерентная приемная система радара позволяла осуществлять одновременную регистрацию пробных импульсных и квазинепрерывных сигналов для всех лучей радиотелескопа. Долговременная относительная нестабильность частоты приемной системы была порядка  $10^{-9}$ . В качестве источника пробных сигналов использовался специально созданный высокостабильный исследовательский импульсный передатчик Харьковского госуниверситета [338]. Передатчик располагался примерно в 40 км западнее приемной позиции ( $49,62^\circ$  с.ш.;  $36,32^\circ$  в.д.). Передающая антенна представляла собой 8-ми элементную вертикальную ФАР, ориентированную на возмущенную область, с коэффициентом усиления  $\sim 15-20$  Дб. В рабочем диапазоне частот 10-25 МГц эффективная мощность излучения оценивалась примерно  $\sim 60-70$  кВт (длительность импульса 100 мкс. частота повторений 25 Гц). Передатчик работал на одной из фиксированных частот: 16.020 МГц или 20.130 МГц, которые обеспечивали превышение уровня максимально применимых частот (МПЧ) на радиолиниях передатчик – МОН и МОН – УТР-2.

С учетом рефракции в ионосфере условия ракурсного рассеяния на МОН выполнялись для высот 200-300 км над НС. При реализации ракурсности уровень рассеянного на МОН пробного сигнала, принятого на позиции УТР-2, на 25-40 дБ превышал уровень шумов. Этот факт наряду с высоким пространственным разрешением и стабильностью приемной и передающей аппаратуры позволял осуществлять анализ тонкой структуры доплеровских спектров пробных сигналов, рассеянных различными участками возмущенной области ионосферы. Как известно, доплеровское смещение частоты (ДСЧ)  $f_d$  прямо пропорционально скалярному произведению вектора скорости движения рассеивателей  $\vec{V}_d$  на вектор рассеяния  $\vec{q}$ :

$$f_d = \frac{1}{2\pi} \vec{V}_d \vec{q}. \quad (6.1)$$

Точное знание геометрии рассеяния позволяет по измерениям ДСЧ восстанавливать скорости движения МОН. Погрешности оценки скорости движения неоднородностей определялась формой спектра рассеянного сигнала и составляла величину примерно 0.2 м/сек. Разрешение по дистанции определялось длительностью импульса и было порядка 15 км. Пространственная селекция по поперечным координатам обеспечивалась угловой шириной ДН УТР-2 и дальностью до НС и менялась в зависимости от рабочей частоты от 10 до 20 км. Характерный горизонтальный размер модифицированной области ионосферы существенно превосходил эти масштабы и примерно определялся шириной ДН “Суры” на высоте F-области (~100 км) [312]. Селекция рассеянного сигнала по всем трем координатам позволяла восстанавливать динамическое распределение скоростей МОН внутри возмущенной области.

### 6.1.2 Результаты наблюдений

Анализ приводимых ниже данных ограничен рассмотрением эффекта расщепления. Пример такого эффекта приведен на Рис. 6.1.а (рисунок взят из работы [336]).

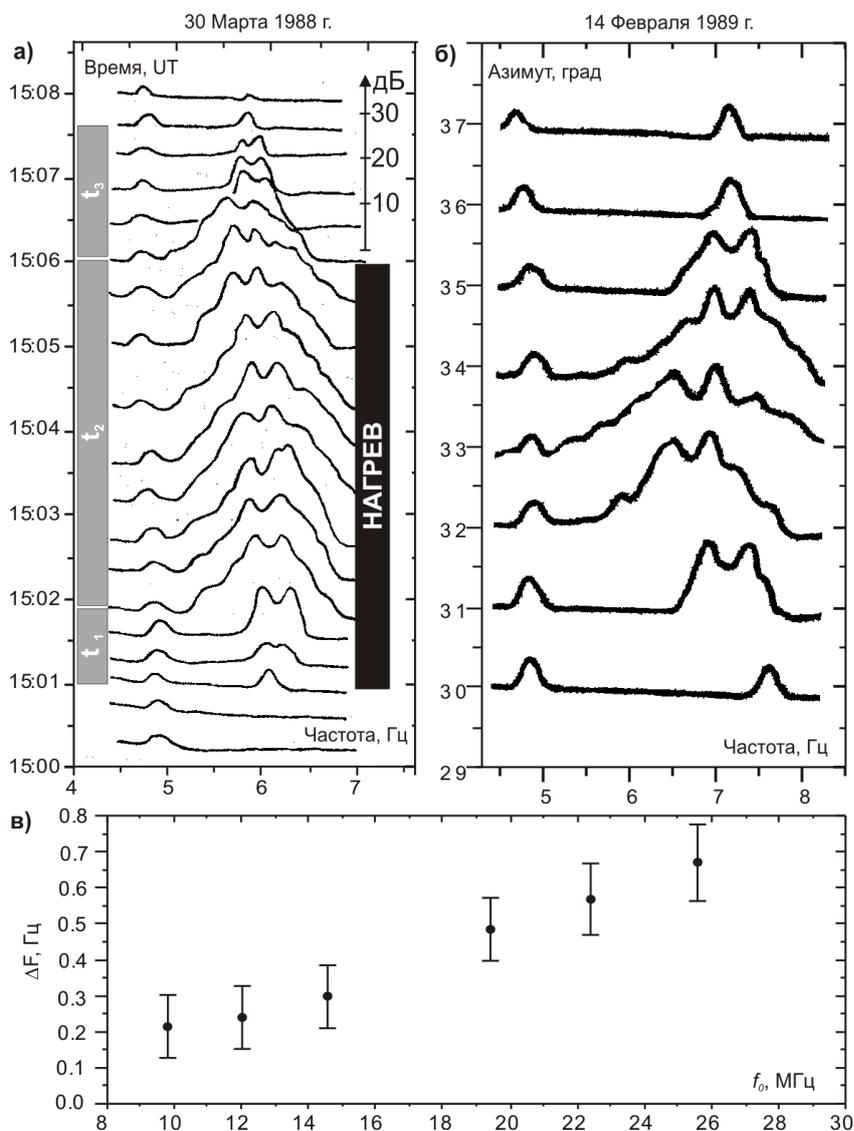


Рисунок 6.1 – а) расщепление спектров рассеянного сигнала (пробная частота  $f=15$  МГц). Луч СЮ4; б) азимутальная зависимость спектров рассеяния (пробная частота  $f=23$  МГц), луч ЗВ; в) зависимость величины расщепления спектров рассеянного сигнала  $\Delta F$  от частоты пробного сигнала  $f_0$

На рисунке показаны усредненные по 10-ти секундным интервалам спектры пробного сигнала, изображенные в режиме “водопада”. Спектры содержат две компоненты: сигнал на прямой трассе РВМ – УТР-2 (частота  $\sim 5$  Гц), и рассеяние на МОН (частота  $\sim 6$  Гц). Хорошо видно расщепление спектров рассеянного на МОН сигнала, которое на стационарном участке нагрева достигает величины  $\sim 0.5$  Гц. Сдвиг частоты рассеянного сигнала относительно несущей на рис. 1.а состоит из аппаратного смещения ( $\sim 5$  Гц), и реального ДСЧ за счет крупномасштабных дрейфов всего ВО как целого ( $\sim 1$  Гц). Наличие аппаратного смещения необходимо для определения знака ДСЧ и задается схемой преобразования частоты использованного приемного комплекса.

Данные наблюдений показали, что эффект расщепления состоял из трех фаз: развития, стационарной фазы и релаксации. Фаза развития начиналась с момента включения нагрева, и длилась несколько секунд (интервал  $t_1$  на рис. 6.1.а). Во время этой фазы величина расщепления  $\Delta F$  увеличивалась до  $\Delta F_{\max}$ . Далее следовала стационарная фаза (интервал  $t_2$ ), продолжавшаяся до конца нагрева, когда величина расщепления практически не менялась. После выключения НС величина расщепления за несколько десятков секунд уменьшалась до нуля (интервал  $t_3$ ) – стадия релаксации.

На рис. 6.1.б изображены спектры рассеянного сигнала во время азимутального сканирования возмущенной области диаграммой направленности ЗВ УТР-2 практически поперек ВО в горизонтальной плоскости (рисунок взят из работы [336]). Сканирование выполнялось в течение 2-х минут на стационарном участке нагрева. Темп сканирования - 15 сек, шаг по азимуту -  $1^\circ$ . Из рисунка видно, что максимальная величина расщепления наблюдалась для центра рассеивающего объема (азимут  $33^\circ$ - $34^\circ$ , см., рис. 6.1.б). По мере отворота ДН от центра к периферии ВО величина расщепления уменьшалась и на границах области спектры рассеянного сигнала становились “одномодовыми”.

Наличие большого объема данных многолетних наблюдений позволило провести исследование около 800 сеансов зондирования ИОН в непрерывном режиме. Результаты статистического анализа не обнаружили особых ионосферных условий, либо режимов нагрева, которые бы приводили к более частому возникновению расщепления или влияли бы на его величину -  $\Delta F$ . Отличительной особенностью поведения расщепления спектра рассеянного сигнала являлась линейная зависимость  $\Delta F$  от частоты пробного излучения (см., рис. 6.1.в).

Для осуществления дальностной селекции была выполнена обработка данных, полученных в ходе измерительной кампании, проведенной в марте 1995 г. [338]. Выбор экспериментального материала был обусловлен наличием относительно большого объема данных (несколько часов регистраций) и разнообразием режимов нагрева в этом цикле наблюдений. Из всего имеющегося массива данных отбирались те сеансы нагрева, для которых соотношение сигнал-шум было достаточным для надежной регистрации эффекта расщепления. Всего для анализа было отобрано 30 сеансов нагрева, удовлетворяющих описанным выше критериям. В 57% случаев (17 циклов нагрева) был зарегистрирован эффект расщепления доплеровских спектров, в 43% случаев (13 циклов нагрева) расщепление отсутствовало. Величина расщепления лежала в диапазоне 0.5-0.8 Гц.

Типичные результаты обработки одного из нагревных циклов приведены на рис. 6.2. Модификация ионосферы осуществлялась "О" модой на частоте 5.270 МГц. Мощность нагрева  $\sim 0.2P_{\max}$ . Частота пробного излучения радара 16.020 МГц. На рис. 6.2.а изображены усредненные за время стационарного нагрева спектры ракурсно рассеянного сигнала, построенные в режиме "водопада" в зависимости от дальности. Рис. 6.2.б содержит распределение интенсивности рассеяния по дистанции. Каждый спектр соответствует рассеянию с одной дистанции в диапазоне 915-1080 км с шагом 14 км (на рисунке по вертикальной оси отложена дистанция, по горизонтальной – ДСЧ). На рис. 6.2.в показан нормированный спектр,

усредненный по всему диапазону дистанций. Из рисунка видно, что усредненный по дистанциям спектр содержит два максимума на доплеровских частотах порядка 4.7 Гц и 5.2 Гц. В то же время из дистанционной зависимости (рис. 6.2.а) следует, что расщепление спектров имеет место только для центра области (дистанции 995-1010 км). Для дистанций, меньших 995 км и больших 1010 км, спектры пробных сигналов “одноمودовые” со смещенными частотами максимумов  $\sim 5.2$  Гц и  $\sim 4.7$  Гц соответственно.

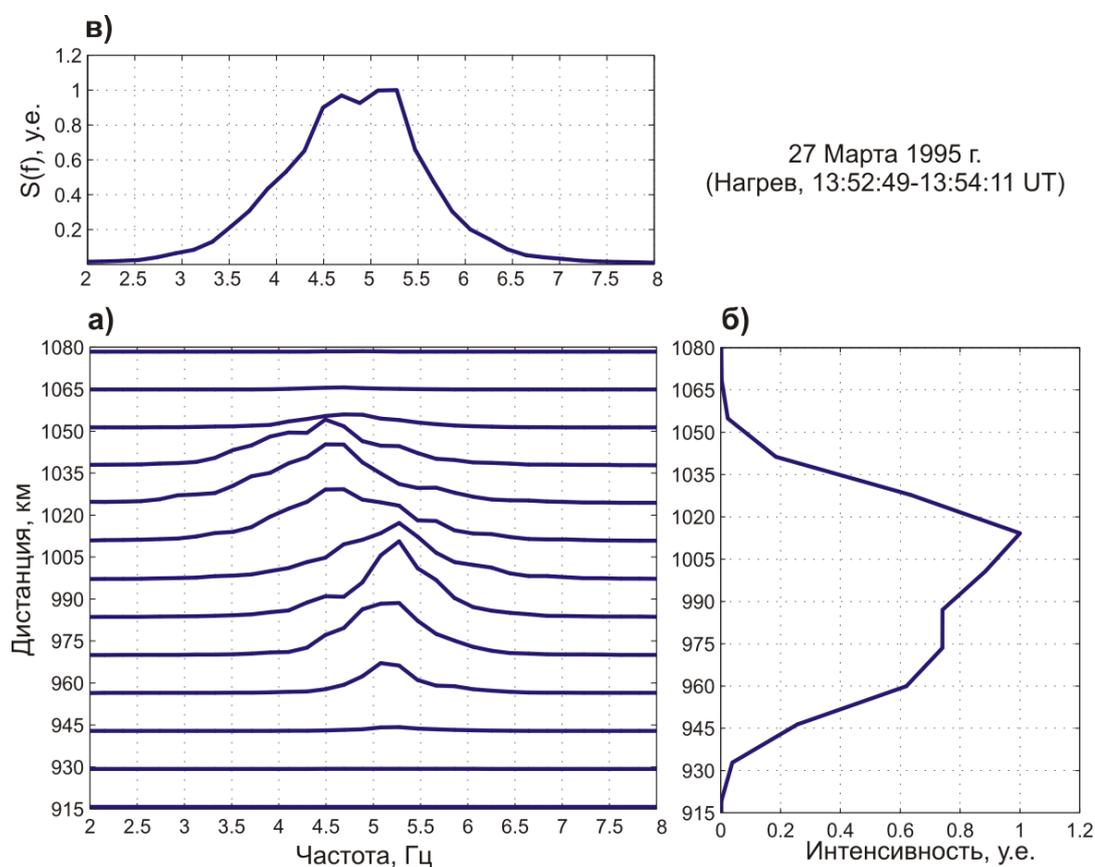


Рисунок 6.2 – а) зависимость спектров рассеянного сигнала от дистанции; б) интенсивность рассеянного сигнала как функция дистанции; в) усредненный по всему ВО спектр рассеянного сигнала

Во всех случаях, когда фиксировался эффект расщепления, зависимость ДСЧ от дистанции оказывалась идентичной изображенной на рис. 6.2.а.

“Двухмодовый” спектр регистрировался с дистанций, для которых интенсивность ракурсно рассеянного сигнала была максимальной. В большинстве случаев максимум рассеяния соответствовал дистанциям непосредственно над нагревной установкой. В спектрах сигналов от ближнего и дальнего по отношению к наблюдателю “краев” области присутствовал только один спутник с большим и меньшим значением ДСЧ, соответственно (см., рис. 6.2).

Использование импульсной методики зондирования позволяло исследовать дистанционные зависимости спектров на различных фазах нагрева. Для продолжительных нагревов, длительность которых превышала характерное время установления расщепления, вид дистанционной зависимости спектров для стационарного участка и релаксации расщепления была идентичной. Отличия заключались только в величине  $\Delta F$ , которая была максимальной на стационарном участке. Для стадии релаксации и коротких нагревов, длительность которых была меньше или соизмеримой с характерным временем установления расщепления, наблюдалась иная картина. На рис. 6.3 показаны дистанционные зависимости спектров рассеянных сигналов на различных стадиях короткого нагрева.

Видно, что на начальном этапе нагрева (рис. 6.3.а), величина расщепления меньше, чем на конечном (рис. 6.3.б). На стадии релаксации (рис. 6.3.в-6.3.г) наблюдалось изменение знака расщепления (меньшие ДСЧ от ближнего края области и большие от дальнего, см., рис. 6.3.в), а затем уменьшение его величины (рис. 6.3.г). Как уже отмечалось, длительность стадий установления и релаксации составляла несколько десятков секунд.

### 6.1.3 Интерпретация результатов наблюдений

Полученная в эксперименте зависимость спектров ракурсно рассеянного сигнала от дистанции (рис. 6.2) свидетельствует о том, что расщепление наблюдается для относительно небольшого участка вблизи центра ВО, а на “краях” области присутствует только один из спутников.

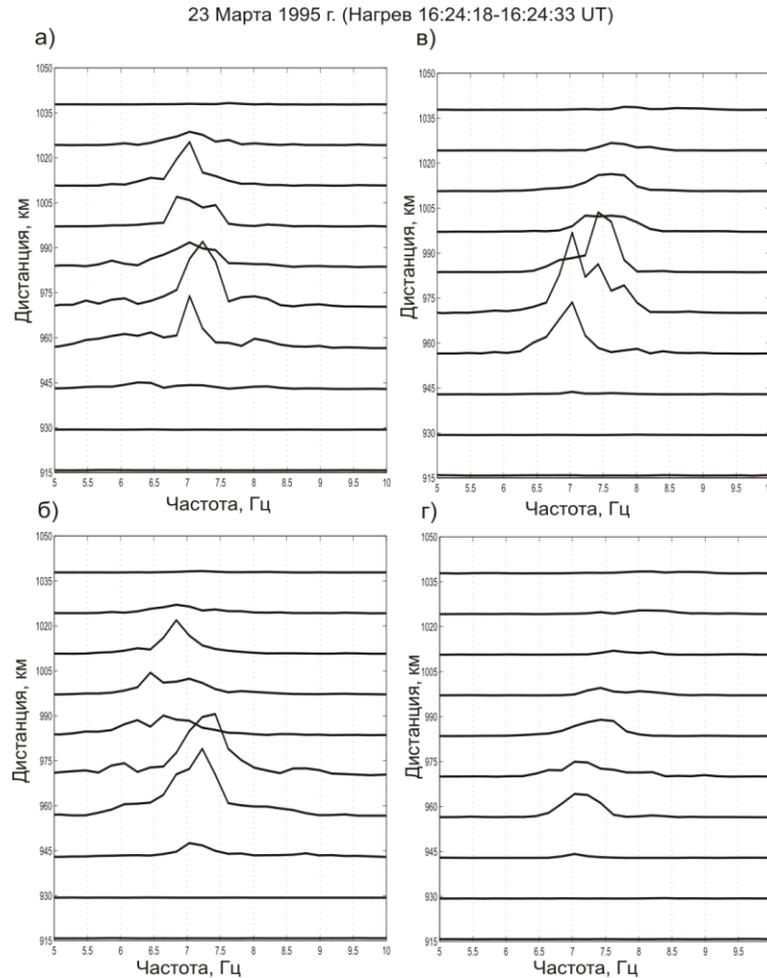


Рисунок 6.3 – Дистанционные зависимости спектров рассеянного сигнала на разных стадиях нагрева длительностью 15 сек: а) развитие (0-10 сек); б) стационарный нагрев (5-15 сек); в) релаксация (15-25 сек); г) релаксация (25-35 сек). Частота зондирования 20.130 МГц. Луч СЮ5

Поскольку двухмодовый механизм генерации ТПН требует расщепления фазовой скорости возмущений во всем ВО (см. [337]), то его можно исключить из возможных причин возникновения расщепления. Рассмотрим теперь случаи циркуляционного движения и радиального дрейфа рассеивателей. Заметим, что в эксперименте наблюдается проекция скорости движения неоднородностей на вектор рассеяния  $\vec{q}$  ( $\vec{q} = \vec{k}_s - \vec{k}_l$  где:  $\vec{k}_s$  - волновой вектор рассеянной волны,  $\vec{k}_l$  - волновой вектор падающей волны). В то же

время, при ракурсном рассеянии возможные отличия направления  $\vec{q}$  от перпендикуляра к  $\vec{B}$  обратно пропорциональны коэффициенту анизотропии рассеивателей. Поскольку (как это известно, из имеющихся в литературе данных радарных [328] и ракетных измерений [329]) величина коэффициента анизотропии для исследуемого масштаба стимулируемых нагревом неоднородностей весьма велика и может достигать  $10^4$  (см. [329]), то вектор  $\vec{q}$  можно считать строго ортогональным  $\vec{B}$ . Следовательно, наблюдаемое ДСЧ будет определяться только компонентами скорости рассеивателей, ортогональными геомагнитному полю. Это позволяет для качественного описания наблюдений использовать двумерную модель, где движения рассеивателей происходят в плоскости, ортогональной  $\vec{B}$ .

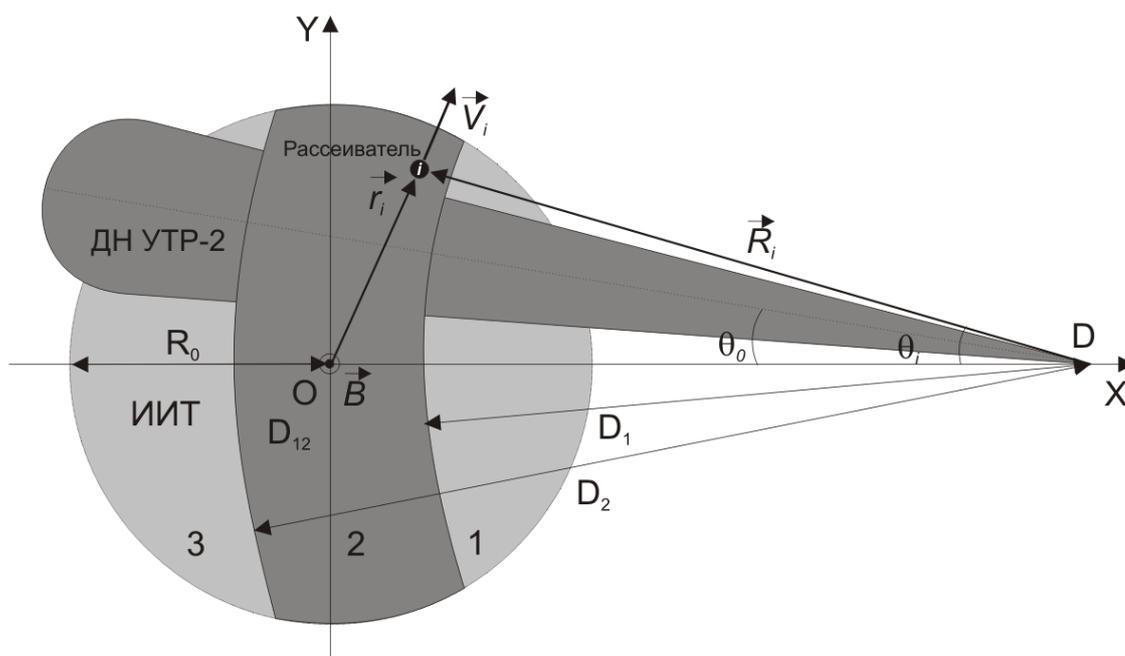


Рисунок 6.4 – Модель рассеяния

Введем следующую модель рассеяния: ВО задан в виде круга радиуса  $R_0$ , центр которого находится в начале координат (см., рис. 6.4). Приемный и передающий пункты совпадают и расположены на оси ОХ на расстоянии  $D$  от центра ВО. ВО содержит  $N$  (несколько десятков тысяч) случайно расположенных, равномерно распределенных в пространстве идентичных

рассеивателей с характерным поперечным масштабом  $l_{\perp}$  порядка половины длины волны пробного излучения ( $l_{\perp} \sim \lambda/2$ ). Положение каждого рассеивателя описывается радиус-вектором  $\vec{r}_i$  и азимутом из точки приема  $\theta_i$ , а скорость определяется вектором  $\vec{V}_i$ . ДН передатчика ориентирована на центр ВО. Угол между максимумом главного лепестка ДН приемника и направлением на центр ВО из приемного пункта равен  $\theta_0$ . Поляризационными эффектами для простоты будем пренебрегать. Тогда, следуя [339], в приближении однократного рассеяния сигнал в точке приема может быть записан как суперпозиция полей от элементарных рассеивателей:

$$s(t) = \sum_{i=1}^N A \cdot \frac{U_{tr}(\theta_i) \cdot U_{rec}(\theta_i, \theta_0) \cdot \sigma_i^{\frac{1}{2}}}{|\vec{R}_i|^2} \cdot \exp\{j[\Omega_i t - \Psi_{0i}]\}, \quad (6.2)$$

$$\Omega_i = \omega_0 + (\vec{q}_i \cdot \vec{V}_i), \quad (6.3)$$

где:  $A$ - амплитуда зондирующего сигнала;  $\omega_0 = 2\pi \cdot c/\lambda$ - круговая частота сигнала ( $c$ - скорость света);  $\vec{q}_i$ - вектор рассеяния,  $\sigma_i$ - поперечник рассеяния и  $\vec{V}_i$ - скорость  $i$ -го рассеивателя;  $U_{tr}(\theta_i)$  и  $U_{rec}(\theta_i, \theta_0)$ - ДН передатчика и приемника соответственно;  $\Psi_{0i} = 4\pi|\vec{R}_i|/\lambda$ .

$$U_{tr}(\theta_i) = \frac{\sin[\pi d_{tr}/\lambda \cdot \sin(\theta_i)]}{\pi d_{tr}/\lambda \cdot \sin(\theta_i)}, \quad (6.4)$$

$$U_{rec}(\theta_i, \theta_0) = \frac{\sin[\pi d_{rec}/\lambda \cdot \sin(\theta_i - \theta_0)]}{\pi d_{rec}/\lambda \cdot \sin(\theta_i - \theta_0)}, \quad (6.5)$$

здесь:  $d_r$  и  $d_{rec}$  - апертуры передающей и приемной ФАР соответственно. Заметим, что поскольку ракурсные условия в одинаковой мере выполняются для любой точки внутри ВО, то поперечники рассеяния  $\sigma_i$  можно считать одинаковыми для всех рассеивателей.

Для вычисления сигнала, пришедшего из диапазона дистанций  $(D_1, D_2)$ , следует в (6.2) осуществлять суммирование не по всем рассеивателям, а только по расположенным в области  $D_{12}$  (см., рис. 6.4).

Выражения (6.2-6.5) были использованы в задаче численного моделирования рассеяния пробных волн на МОН возбуждаемых НС “Сура”. При моделировании рассматривались два случая: радиальный дрейф рассеивателей и их циркуляционное движение. В случае радиального дрейфа полагалось, что вектор  $\vec{V}_i$  направлен вдоль радиуса ВО от центра к периферии, а величина скорости для каждого рассеивателя постоянна  $|\vec{V}_i| = V_r$ . При циркуляционном движении считалось, что все рассеиватели вращаются вокруг центра ВО с постоянной угловой скоростью  $\vec{\omega}$ . В этом случае  $\vec{V}_i$  направлен перпендикулярно радиус-вектору  $\vec{r}_i$  и определяется выражением  $\vec{V}_i = \vec{\omega} \times \vec{r}_i$ . На рис. 6.5 приведены модельные спектры рассеянного сигнала для случаев радиального дрейфа и циклического вращения. Видно, что для радиального дрейфа рассеивателей наблюдалось хорошее качественное соответствие результатов моделирования (рис. 6.5.а-6.5.в) и данных наблюдений (рис. 6.2.а, 6.1.б). При циклическом движении рассеивателей модельные спектры (рис. 6.5.б, 6.5.г) существенно отличались от экспериментальных (рис. 6.2.а, 6.2.б). Для радиального дрейфа объяснить наблюдаемые в эксперименте эффекты можно и из простых геометрических соображений. Разобьем ВО на три части: ближний к наблюдателю “край” области (участок 1 на рис. 6.4), “центр” (участок 2) и дальний “край” (участок 3), соответствующих “соседним” импульсным объемам при импульсном режиме зондирования. В этом случае имеется возможность анализа спектров рассеянного сигнала отдельно для каждого из участков. Понятно, что на “краях” области имеет место движение рассеивателей преимущественно в одном направлении: на наблюдателя (участок 1) или от наблюдателя (участок 3). Поэтому спектры от

этих участков будут иметь один максимум с большим и меньшим ДСЧ соответственно.

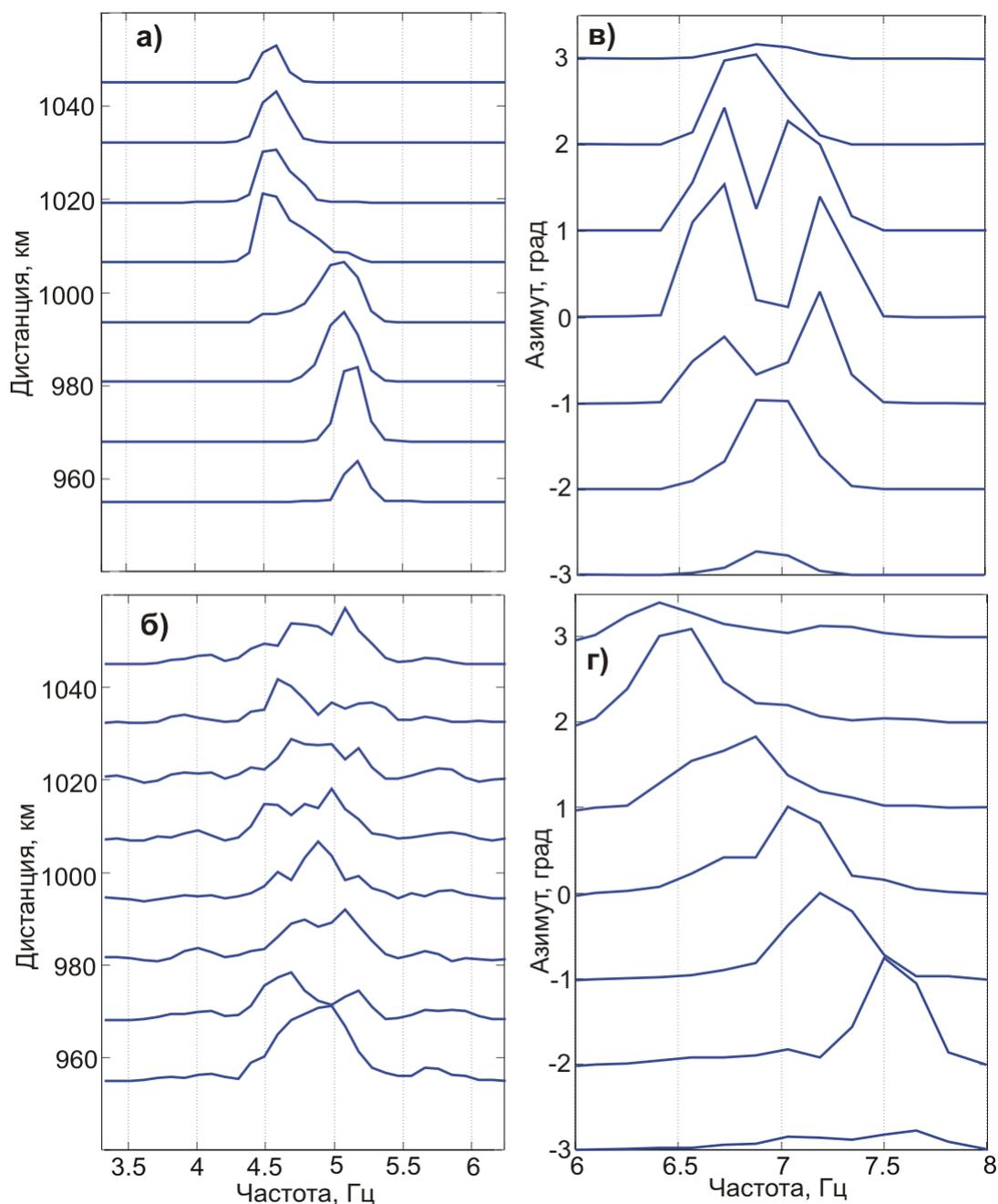


Рисунок 6.5 – Модельные спектры рассеянных сигналов: а) дистанционная зависимость для радиального дрейфа ( $V_r = 4$  м/сек,  $f = 16.020$  МГц); б) дистанционная зависимость для циклического движения ( $\omega = 0.0005$  рад/сек,  $f = 16.020$  МГц); в) азимутальная зависимость для радиального дрейфа

(радиальный дрейф,  $V_r = 2$  м/сек,  $f = 23.0$  МГц); г) азимутальная зависимость для циклического движения ( $\omega = 0.0001$  рад/сек,  $f = 23.0$  МГц)

Поскольку условный “центр” области, от которого в рассматриваемом модельном представлении происходит радиальное “растекание” рассеивателей, содержится внутри участка 2, то в последнем присутствуют движения как к наблюдателю так и от него. Вследствие того, что сигнал суммируется по всему импульсному объему спектр рассеянного сигнала от участка 2 будет “двухмодовым”. В случае непрерывного излучения пробного передатчика в приемном пункте суммируются сигналы рассеянные от всей возмущенной области (участки 1-3), что также формирует “двухмодовый” спектр. Аналогично можно объяснить и результаты азимутального сканирования. Когда ДН приемной ФАР ориентирована на центр области, векторы радиальной скорости практически параллельны вектору рассеяния и величина расщепления максимальна. Любые “отвороты” ДН от центра области ведут к увеличению углов между векторами скорости и вектором рассеяния и, следовательно, к уменьшению расщепления. На “краю” области вектор скорости ортогонален вектору рассеяния и расщепление отсутствует. Таким образом, адекватной феноменологической моделью движений, стимулированных нагревом рассеивателей, способной объяснить описанные в работе эффекты, является радиальный дрейф плазменных неоднородностей от центра к периферии возмущенного объема. Величину скорости радиального дрейфа рассеивателей  $V_r$ , в соответствии с (6.1), можно оценить как:

$$V_r = \frac{1}{2} \frac{\Delta F}{|\vec{q}|}, \quad (6.6)$$

здесь:  $\Delta F$  - величина расщепления,  $|\vec{q}|$  - модуль вектора рассеяния. В соответствии с данными наблюдений (см., рис. 6.1.в) в диапазоне частот

10-26 МГц (что соответствует поперечным масштабам МОН  $l_{\perp} \sim 5-15$  м)  $\Delta F$  линейно возрастает с частотой зондирования  $f_0$ . В то же время модуль вектора рассеяния также прямо пропорционален  $f_0$ . Таким образом, для наблюдаемого диапазона поперечных масштабов МОН, скорость радиального дрейфа можно считать постоянной. Оценки, проведенные по данным наблюдений в КН и импульсном режиме зондирования, дают для  $V_r$  величину порядка 2-4 м/сек.

Напомним, что поиск особых режимов нагрева либо ионосферных условий, которые бы вызывали расщепление спектров рассеянных сигналов, выполненный по большому массиву наблюдательных данных (около 800 сеансов нагрева) непрерывного и импульсного зондирования, не дал положительных результатов. В то же время расщепление спектров регистрировалось более чем в 50% отобранных для статистического анализа сеансов нагрева. Поскольку для значительного количества сеансов в силу различных причин (малое соотношение сигнал-шум, очень широкие спектры рассеянного сигнала, слишком короткие нагревы и т.п.) не удавалось надежно регистрировать расщепление, и они не участвовали в анализе, этот процент в действительности может быть еще большим. Таким образом, радиальный дрейф неоднородностей от центра к периферии нагретой области ионосферы перпендикулярно магнитному полю существует в большинстве сеансов нагрева и, по-видимому, не требует специальных условий для своего возникновения.

Одним из наиболее интересных результатов является наличие перпендикулярной геомагнитному полю  $\vec{V}$  компоненты скорости движения рассеивателей. Известно, что на высотах F-области ионосферы, где частоты соударений невелики по сравнению с гирочастотами, транспорт плазмы в модифицированной КВ нагретом области ионосферы происходит преимущественно параллельно геомагнитному полю [340]. Регистрация движений, перпендикулярных  $\vec{B}$ , требует в будущем разработки соответствующей теоретической модели радиального дрейфа.

## 6.2 Диагностика ионосферных процессов методом многопозиционного и многочастотного приема рассеянных ВЧ сигналов

### 6.2.1 ВЧ сигналы, рассеянные на естественных неоднородностях

Описанная в главе 2 сеть пространственно разнесенных ВЧ приемников является эффективным средством радиодиагностики неоднородной структуры ионосферы и ее низкочастотной динамики. Для иллюстрации этого утверждения проанализируем результаты, полученные 14 марта 2010 г., в ходе измерительной кампании с НС Тромсе [325].

Регистрация излучения накачки НС Тромсе осуществлялась в 2-х пунктах: обсерватория НЧО (Украина) и Иркутск (Россия). Геометрия эксперимента представлена на рис. 6.6.

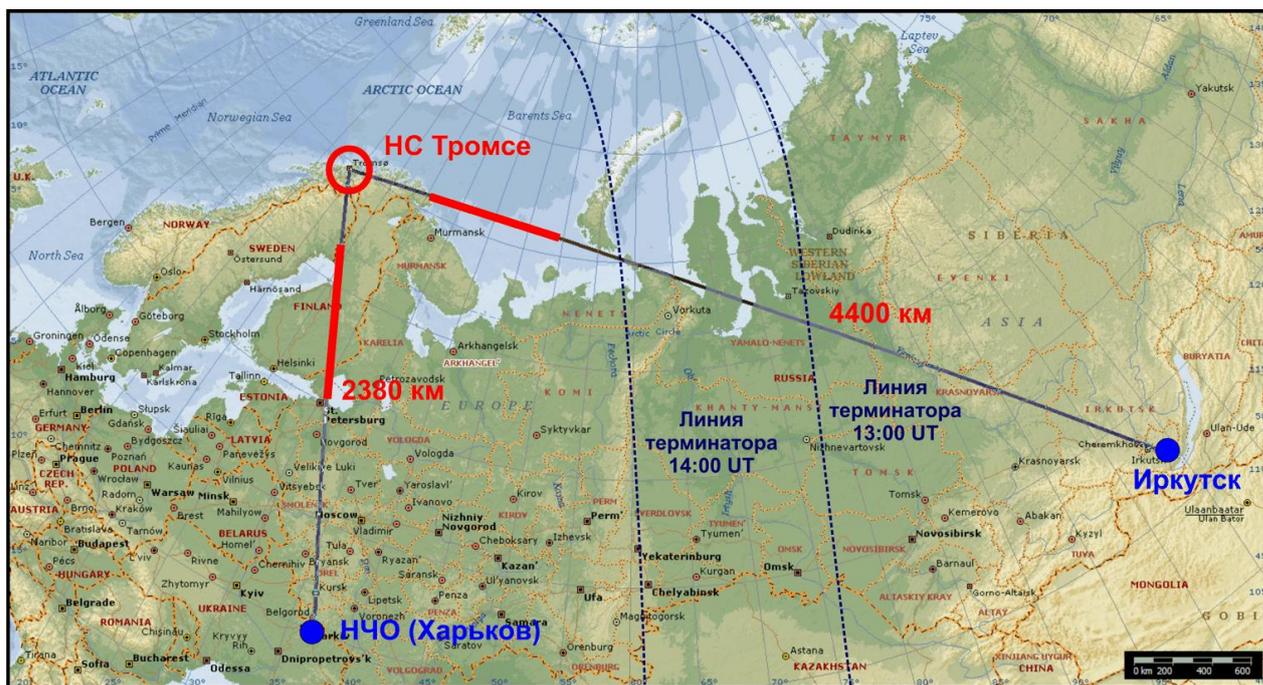


Рисунок 6.6 – Карта, иллюстрирующая положение передающего и приемных пунктов во время измерений 14 марта 2010 г.

Из рисунка видно, что трасса Тромсе-НЧО является квазимеридиональной, а ориентация трассы Тромсе-Иркутск близка к широтной. Отметим, что

анализируемый интервал времени 13:00-14:00 UT относится к дневным условиям освещенности для первой трассы. В Иркутске временная сдвигка с Тромсе составляет +7 часов, что соответствует ночному локальному времени наблюдений в приемном пункте (21:00-22:00 LT). Как видно из рисунка 6.6, в анализируемый интервал времени линия солнечного терминатора проходит вблизи середины радиотрассы Тромсе-Иркутск и практически ортогональна ей. Можно считать, что первый “скачек” на радиолинии происходит в освещенных условиях, а второй – в ночных (послезаходных). В интервале времени 13:00-14:00 UT сигнал НС Тромсе регистрировался в обоих пунктах наблюдения, на НЧО с превышением над шумами на 30-40 дБ, в Иркутске – порядка 10 дБ. При этом в течение всего дня в пункте Иркутск сигнал НС наблюдался только при переходе к ночным условиям в точке приема. Для 14-го марта с 12:30 UT до 14:00 UT, когда дистанция первого скачка соответствовала вечерним, а второго скачка – ночным условиям и поглощение в нижней ионосфере существенно уменьшалось. Таким образом, определяющее влияние на интенсивность сигналов в точках приема оказывают условия распространения. Спектрограммы сигналов для НЧО и Иркутск приведены на рис. 6.7.

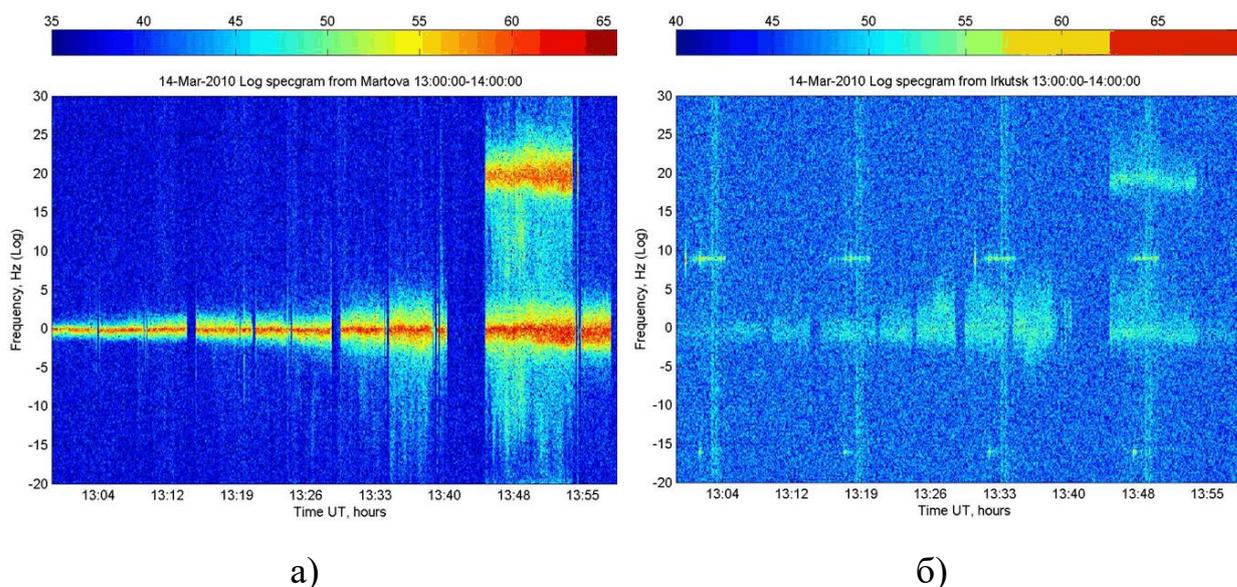
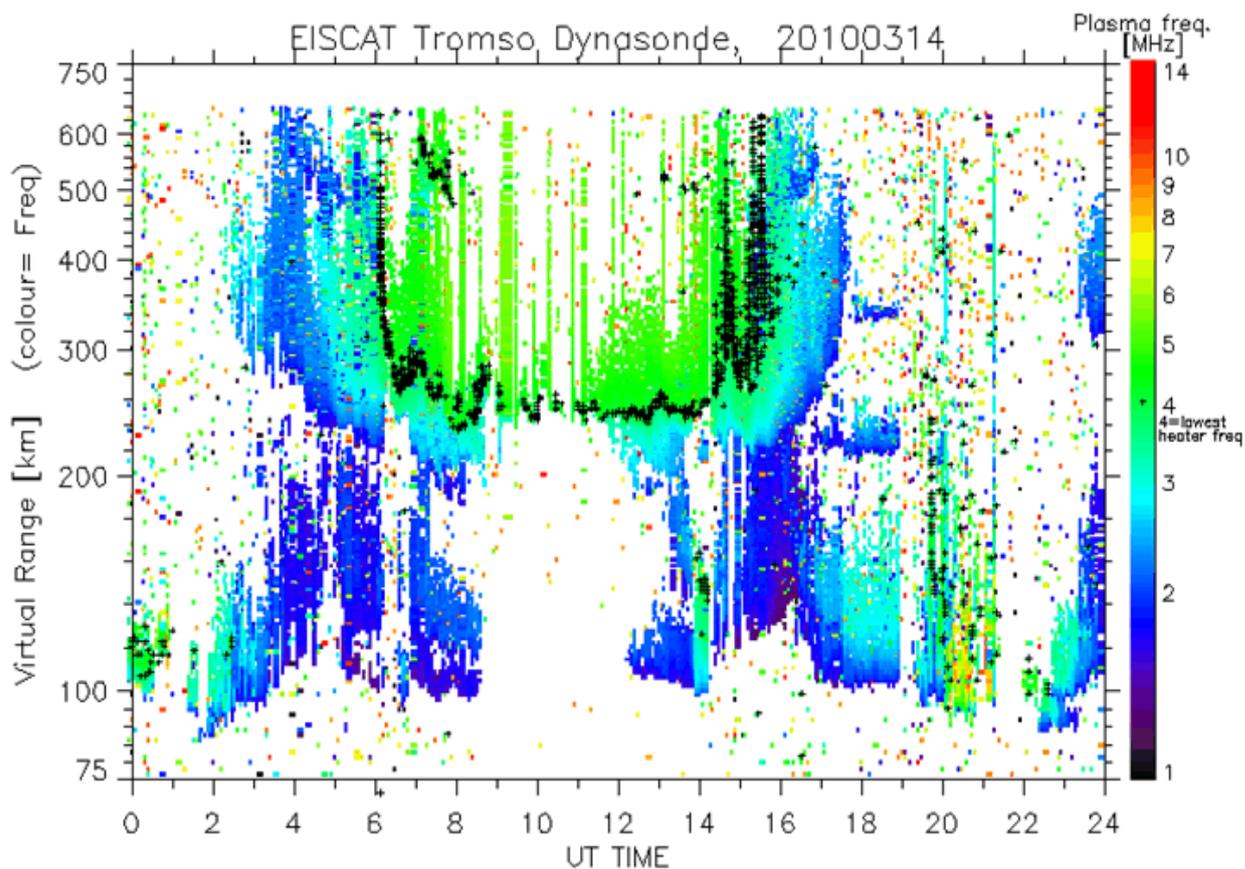


Рисунок 6.7 – Спектрограмма сигнала НС Тромсе в пунктах: а) НЧО; б) Иркутск

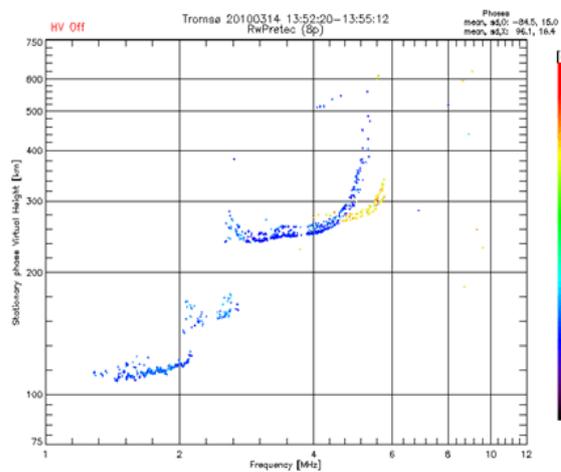
Их анализ выявил сходство поведения спектральных характеристик сигналов. Для обоих пунктов можно выделить узкополосные и широкополосные составляющие. Узкополосные составляющие практически не смещены относительно рабочих частот НС, а ширины их спектров составляют около 1 Гц. Широкополосная компонента возникает приблизительно в 13:20 UT для пункта Иркутск и в 13:25 для пункта Мартовья. В Иркутске она наблюдается при положительных относительно частот НС отстройках ДСЧ в полосе [+1Гц +8 Гц], а в Мартовья отстройки отрицательные – порядка [-16 Гц -2 Гц]. Широкополосная компонента прослеживается до 13:50 UT, после чего ее интенсивность в обоих пунктах синхронно резко уменьшается

При интерпретации результатов наблюдений будем считать, что узкополосная компонента сигнала возникает в результате скачкового распространения сигналов, излучаемых боковыми лепестками диаграммы направленности антенны НС в направлении приемных пунктов. Широкополосную составляющую будем связывать с рассеянием пробных радиоволн на ионосферных неоднородностях. Неоднородности могут быть стимулированы нагревом и возникать непосредственно в модифицированной области ионосферы за счет механизма саморассеяния [186, 341]. Другой возможностью является рассеяние на естественных возмущениях непосредственно над НС, так и в стороне от него. Используемые приемные системы не позволяют проводить пространственную селекцию сигналов. Однако, поскольку в двух пунктах с большим пространственным разносом широкополосные компоненты наблюдаются в совпадающие интервалы времени и исчезают практически синхронно (с интервалом в 1 минуту), разумно предположить, что рассеяние происходит непосредственно над НС (красная окружность на рис. 6.6) или на восходящем участке траектории первого скачка трассы НС – наблюдатель (участки траекторий красного цвета, приведенные на рисунке). В случае возникновения турбулентности,

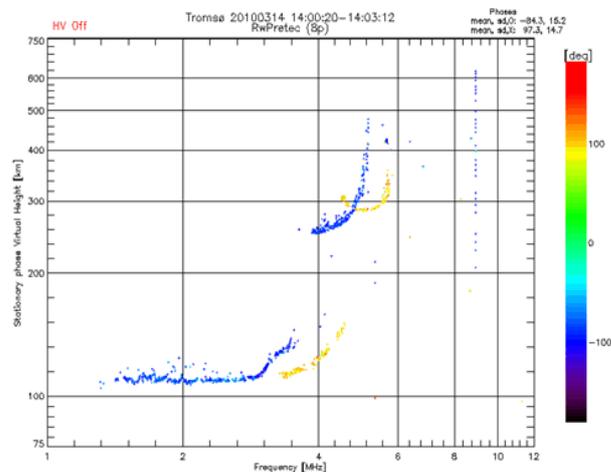
стимулированной нагревом, можно ожидать наличия связи параметров рассеянного сигнала с режимами работы НС. В случае естественных неоднородностей основными факторами, влияющими на сигналы в точках приема, будут: изменение интенсивности естественных неоднородностей и их индикатрисы рассеяния, а также ионосферные условия на трассе. Исследование параметров сигналов в пунктах приема в период 13:00-14:00 UT часов не выявило нелинейной связи характеристик широкополосных компонент с мощностью и режимами нагрева. В то же время, при анализе ионосферных условий по данным ионозонда Тромсе было выявлено, что начиная с 12:30 UT над нагревным стендом значительно увеличилась электронная концентрация в нижней ионосфере (высоты 110-170 км, рис. 6.8.а). При этом с 12:30 до 13:30 плазменная частота оставалась на уровне около 2 МГц, после 13:30 в диапазоне высот 130-170 км (Е-область) частота выросла более чем до 4 МГц, что превысило значение нагревной частоты и оставалась на этом уровне вплоть до 14:30. Кроме того, ионограммы демонстрируют возникновение после 13:20 UT в диапазоне высот 130-200 км на частотах до 2.5-3 МГц диффузных ионосферных слоев, соответствующих отражениям от авроральных областей. Эти образования прослеживаются вплоть до 13:50-14:00 UT. Начиная с 13:50 над НС на высоте 110-120 км развивается мощный слой Es. Его частота в 14:00 UT достигает 4-4.5 МГц (рис 6.8.б-6.8.в).



a)



б)



в)

Рисунок 6.8 – а) суточное высотное распределение плазменной частоты 14 марта 2010 г., по данным ионозонда Тромсе; б) ионограмма 13:52:20-13:55:12 UT; в) ионограмма 14:00:20-14:03:12 UT

Поскольку время существования диффузных ионосферных образований полностью совпадает со временем наблюдения широкополосных компонент в обоих пунктах, то с большой степенью вероятностью они возникают вследствие рассеяния волны накачки на диффузных ионосферных слоях. То, что интенсивность и моменты возникновения диффузных слоев не коррелируют с режимами работы НС свидетельствует, что данные образования, не стимулированы нагревом, а возникают вследствие высыпания энергичных частиц.

Переходя к интерпретации ДСЧ широкополосных составляющих, отметим, что они могут быть обусловлены как изменениями показателя преломления на общем для обеих радиолиний восходящем участке траектории, так и физическим движением рассеивателей. В первом случае ДСЧ должен быть одинаковым для обеих радиотрасс. Однако в эксперименте знак ДСЧ разный (Рис. 6.7). Объяснить разный знак вариаций ДСЧ можно в предположении о рассеянии сигнала на неоднородностях над НС (красная окружность на рис. 6.6), движущихся в горизонтальном направлении. Оценки скорости движения неоднородностей, исходя из величины наблюдаемых ДСЧ, дают для трассы Тромсе-НЧО оценку лучевой скорости порядка  $-100$  м/сек (неоднородности удаляются от наблюдателя) и около  $+60$  м/сек для трассы Тромсе-Иркутск (неоднородности приближаются к пункту наблюдения). Учитывая ориентацию радиотрасс можно оценить скорость и направление движения неоднородностей. Скорость имеет величину примерно  $130$  м/сек, а направление движения практически меридиональное с юга на север (угол  $7^\circ$  по часовой стрелке от направления на север). Такие скорости дрейфа в условиях субполярного региона представляются вполне реалистичными. Поскольку наблюдения происходили на следующие сутки после геомагнитных возмущений, можно предположить, что горизонтальный дрейф в меридиональном направлении связан с “переносом” плазмы из средних широт в авроральные, после восстановления уровня геомагнитной активности к невозмущенному состоянию.

### 6.2.2 Диагностика неоднородностей в области ИИТ методом ракурсного рассеяния ВЧ сигналов

Кроме диагностики регулярных дрейфовых движений прием ВЧ сигналов рассеянных на ионосферных неоднородностях позволяет производить исследования волновых возмущений ионосферы таких, как перемещающиеся ионосферные возмущения и магнитогидродинамические волны [45, 51, 52]. Удобным средством для выполнения исследований служит разнесенный прием ВЧ сигналов, рассеянных неоднородностями в области искусственной ионосферной турбулентности. ИИТ создаются контролируемым образом и в заданной области пространства, что существенно упрощает методику диагностики. При этом возмущенная область выполняет роль своеобразного “маркера”, который перемещаясь синхронно с природным волновым ионосферным возмущением, является индикатором таких движений. Регистрация ДСЧ пробных ВЧ сигналов, рассеянных в области ИИТ из нескольких пространственно разнесенных пунктов позволяет определять проекции скоростей движения неоднородностей на вектор рассеяния и рассчитывать таким образом трехмерный вектор скорости.

Рассмотрим методику разнесенного приема ВЧ сигналов, рассеянных ИИТ на примере выполненной при участии автора нагревной кампании с НС “Сура” (Россия) 10-20 августа 2004 г. [15, 25]. Геометрия эксперимента представлена на рис. 6.9. Три когерентных КВ приемника размещались вблизи Харькова, Ростова на Дону и Санкт-Петербурга. В качестве источников пробных сигналов использовались широкоэмиттерные станции, расположенные вблизи Москвы, Серпухова и Армавира. Расположение передающих и приемных позиций приведены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Расположение передающих и приемных позиций.

Расположение передающих и приемных позиций		Координаты		Рабочие частоты, МГц	Расстояние до НС, км
		Широта, с.ш.	Долгота, в.д.		
Пер.	Москва	55.8	38.3	14 996	490
	Серпухов	55.0	37.5	11 630	550
	Армавир	45.0	39.5	15 455	1320
Пр.	Харьков	49.6	36.9		945
	Ростов на Дону	47.2	39.7		1080
	С.Петербург	60.5	30.5		1030

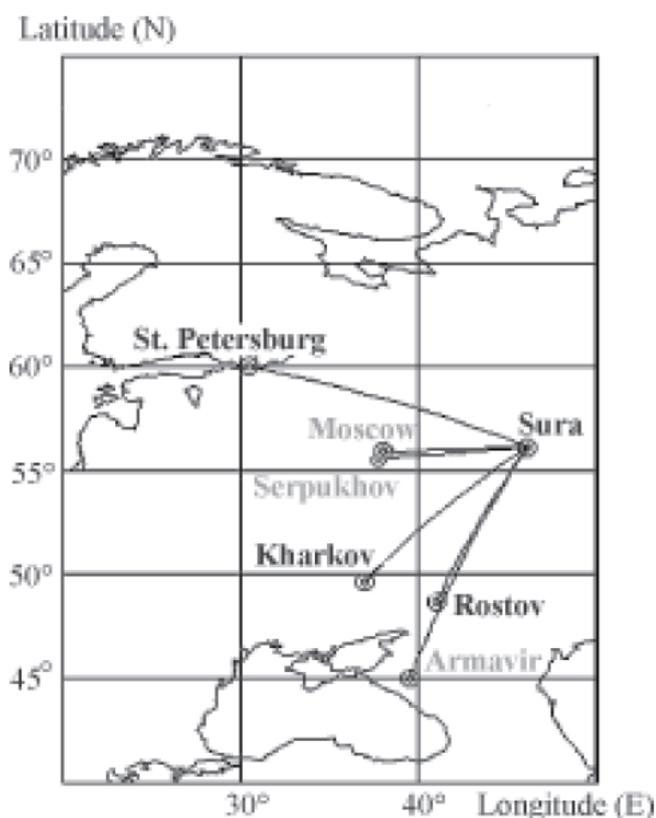


Рисунок 6.9 – Геометрия эксперимента с НС “Сура” 10-20 августа 2004 г. Положения широковещательных станций (излучавших “пробные” сигналы) и приемных позиций показаны серым и черным цветом соответственно (рисунок приведен в соответствии с [15])

Сигналы, рассеянные ИИТ надежно фиксировались 13, 15, 17, 18, 19 и 20 августа. При этом наиболее благоприятные условия для регистрации ПИВ имели место 19 и 20 августа. В эти дни по данным вертикального зондирования критические частоты над НС превышали нагревные, а также отсутствовал спорадический слой E<sub>s</sub>. Таким образом, можно заключить, что рассеяние пробных сигналов происходило преимущественно на высотах ионосферного слоя F2. 19 августа был магнитоспокойным днем (индекс K<sub>p</sub>=1), 20 августа условия были магнитовозмущенными (K<sub>p</sub>=3-4).

На рис. 6.10 в качестве примера показаны спектрограммы пробных ВЧ сигналов, синхронно зарегистрированные в Санкт-Петербурге, Харькове и Ростове на Дону (рисунок приведен в соответствии с [15]). Эти данные могут быть использованы для определения проекции вектора скорости рассеивателей  $V_{\Delta k}$  ИИТ на вектор рассеяния  $\Delta \vec{k} = \vec{k}_s - \vec{k}_0$  равный разности волновых векторов рассеянной  $\vec{k}_s$  и падающей  $\vec{k}_0$  волн. Проекция согласно [342] определяется выражением:

$$V_{\Delta k} = \frac{F_d}{F} \cdot \frac{c}{2 \cdot \sin(\theta/2)}, \quad (7.7)$$

где,  $F_d$  - ДСЧ,  $F$  – частота пробного излучения,  $\theta$  - угол рассеяния (между векторами  $\vec{k}_s$  и  $\vec{k}_0$ ).

Одновременные измерения доплеровских сдвигов частоты для двух радиотрасс,  $F_{d1}$  и  $F_{d2}$ , а также значений углов рассеяния,  $\theta_1$  и  $\theta_2$ , вычисленных в сферической геометрии позволяет восстановить проекции скоростей  $V_1$  и  $V_2$ , по формуле (7.7), а после этого перейти к вычислению горизонтальной скорости движения рассеивателей  $V$  и ее азимута  $Az_V$ :

$$V = V_2 \cdot \cos\{ \arctg[(\cos \alpha - \beta)/\sin \alpha] \}, \quad (7.8)$$

$$Az_v = Az_{K1} - \arctg[(\cos \alpha - \beta)/\sin \alpha], \quad (7.9)$$

Где:  $\beta = V_1/V_2$ ;  $\alpha = |Az_{K1} - Az_{K2}|$  - угол между азимутами векторов рассеяния  $\Delta \vec{k}_1$  и  $\Delta \vec{k}_2$  для первой и второй радиотрассы соответственно. Для определения скорости движения ПИВ можно, согласно [181] воспользоваться выражением:

$$V = \frac{2\pi \cdot h_0 \sqrt{M/2h}}{T}, \quad (7.10)$$

где:  $M = T(f_{d \max} - f_{d \min})\lambda/2\pi$ ;  $T$  - период волнового возмущения;  $(f_{d \max} - f_{d \min})$  - амплитуда изменения ДСЧ;  $\lambda$  - длина волны пробного передатчика ВЧ;  $h_0$  - высота ВО.

Выражения (7.7-7.10) были использованы для расчета скоростей движения и азимутов для 19-го и 20-го августа (для последней даты результаты изображены на рис. 6.11). В соответствии с выполненными оценками 19 августа 2004 года ПИВ перемещались в северо-восточном направлении со скоростью около 40-80 м/с. 20 августа 2004 года было три независимых пары радиотрасс, что позволило осуществить три независимые оценки скорости. Как видно из рис. 6.11 они неплохо согласуются между собой. 20 августа 2004 года ПИВ распространялись в юго-западном направлении со скоростью порядка 60-150 м/с.

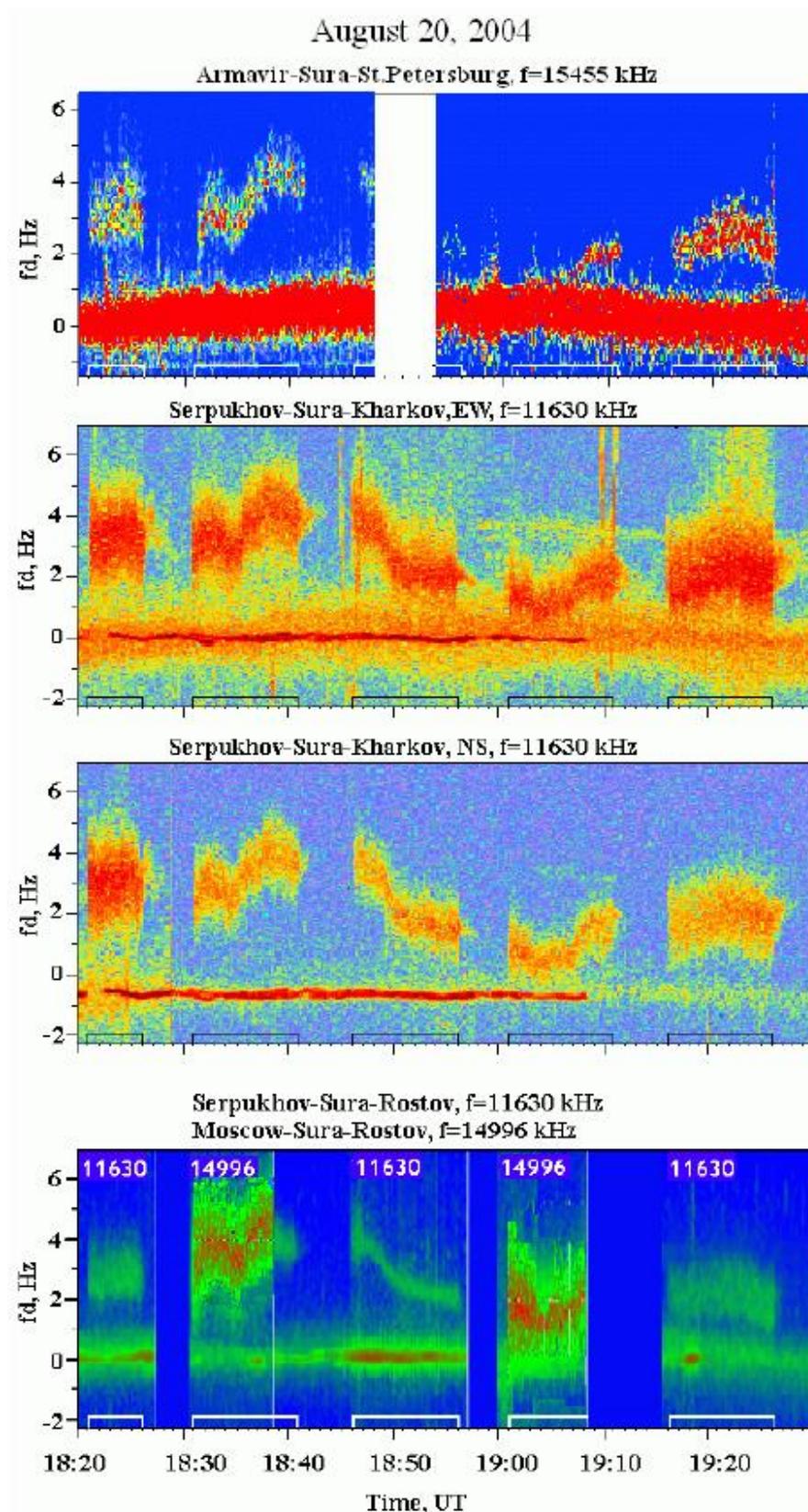


Рисунок 6.10 – Динамические спектры пробных ВЧ сигналов для 20 августа 2004 года с 18:20 до 19:30 UT. Наблюдения на трассах: Армавир-Сура-

С.Петербург (частота -15 455 кГц) , Серпухов-Сура-Харьков (11 630 кГц) антенны ЗВ и СЮ ФАР УТР-2, и Серпухов (Москва) - Сура-Ростов (11 630 и 14 996 кГц). Прямые сигналы для каждой трассы имеют нулевые доплеровские сдвиги частоты. Интервалы “нагревов” ионосферы отмечены столбиками на оси времени. Частота волны накачки НС задавалась равной 4785 кГц. Диаграмма направленности НС была отклонена на  $12^\circ$  к югу от зенита (рисунок приведен в соответствии с [25])

Принимая во внимание, что ПИВ среднего масштаба, в отличие от крупномасштабных, не распространяются на значительные расстояния, можно ожидать, что источник, отвечающий за волновые возмущения с периодом  $\sim 20$  мин, наблюдавшиеся 19 августа в магнитоспокойных условиях, располагался в среднеширотной термосфере. В то же время 20 августа в возмущенных геомагнитных условиях регистрировался более долгопериодный ПИВ (период  $\sim 45$  мин). Можно предположить, что в этот день источник волновых возмущений находился в авроральной области.

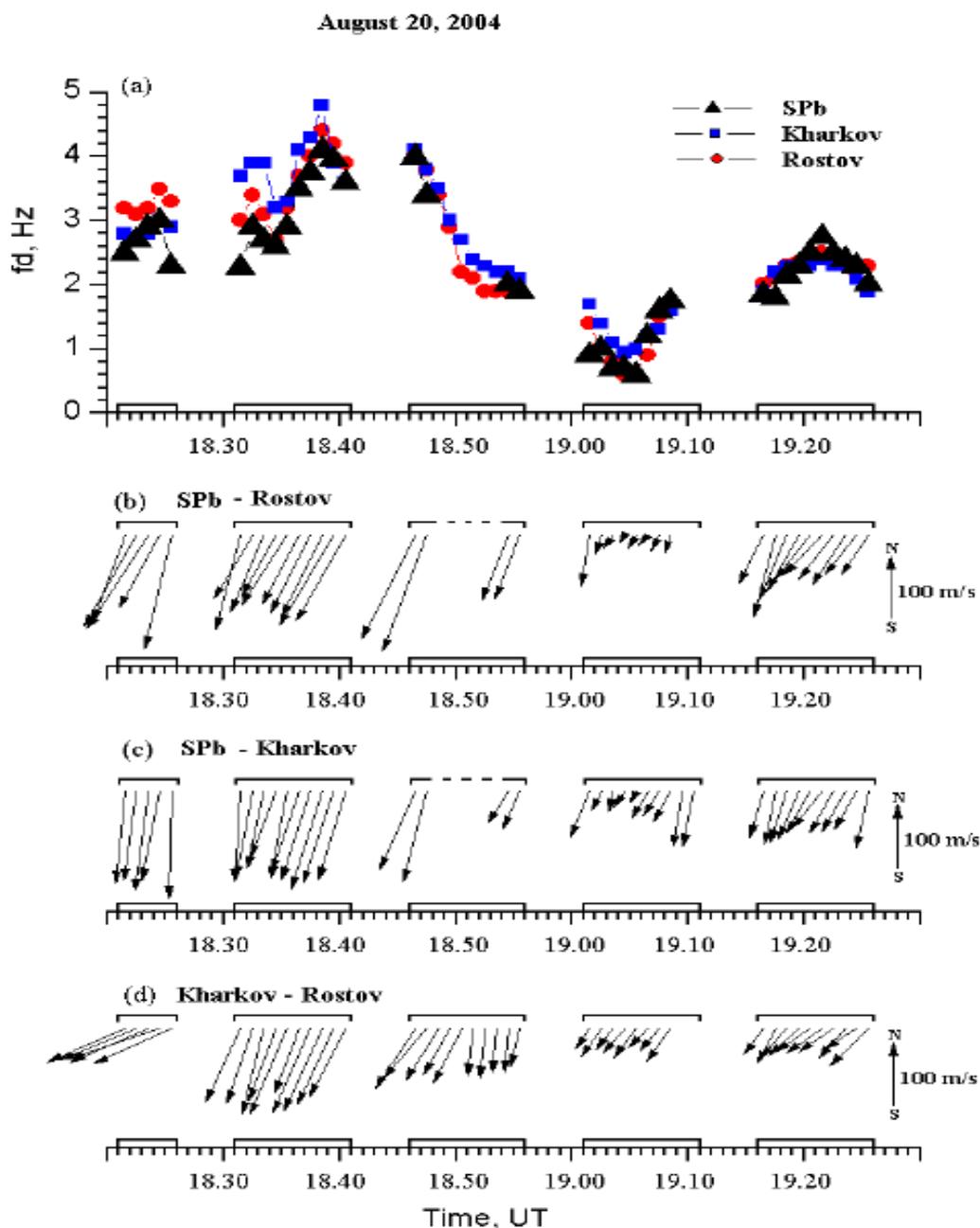


Рис. 6.11 – (а) значения ДСЧ усредненные по 1-минутным интервалам для пробных ВЧ сигналов рассеянных ИИТ на трассах Армавир-Сура-С.Петербург, Серпухов-Сура-Харьков и Серпухов(Москва)-Сура-Ростов, измеренные в ходе нагревной компании 20 августа 2004 года; (б) вектора скоростей, рассчитанные для пары трасс с приемными позициями С.Петербург и Ростове; (с) то же, что и (б), но и для С.Петербурга и Харькова; (д) то же, что и (б, с), но для Харькова и Ростова (рисунок приведен в соответствии с [25])

Кроме изучения ПИВ, и связанных с ними акустико-гравитационных волн данные ракурсного рассеяния пробных ВЧ сигналов могут быть использованы для диагностики процессов в диапазоне геомагнитных пульсаций [248]. Данные измерений показывают, что достаточно часто “медленные” с периодами в десятки минут вариации ДСЧ, связанные с ПИВ, модулируются “быстрыми” квазипериодами в десятки секунд. Такие вариации соответствуют периодам резонансных микропульсаций магнитного поля классов Pc3-Pc4 (20-80 сек). Наблюдения этих процессов, выполненные в [338] показали, что они соответствуют прохождению на ионосферных высотах магнитогидродинамических волн, регистрируемые наземными магнитометрами. Этот факт может быть проиллюстрирован рисунком 6.12, на котором показаны спектрограммы пробных ВЧ сигналов станции RBM (частота 9.996 МГц – рис 6.12.а, частота 14.996 МГц – рис 6.12.в) и вещательного передатчика, расположенного вблизи г. Серпухова (частота 11,630 МГц – рис 6.12.б). Здесь же приведены вариации горизонтальной  $Y$  компоненты геомагнитного поля на поверхности Земли, измеренной на магнитной обсерватории Борок, находящейся на расстоянии порядка 500 км к северо-западу от НС.

Воспользовавшись выражением (6.1), зная ДСЧ рассеянных сигналов, не трудно рассчитать величину проекции скорости дрейфа неоднородностей на вектор рассеяния на высотах ИИТ. Значения скорости, оцененные таким образом из экспериментальных данных для разных частот зондирования и пробных передатчиков приведены в таблице 6.2.

Соответствие полученных скоростей литературным данным [45 ,51], а также близость величин скорости, полученных для разных пробных частот, свидетельствует о правдоподобности оценок.

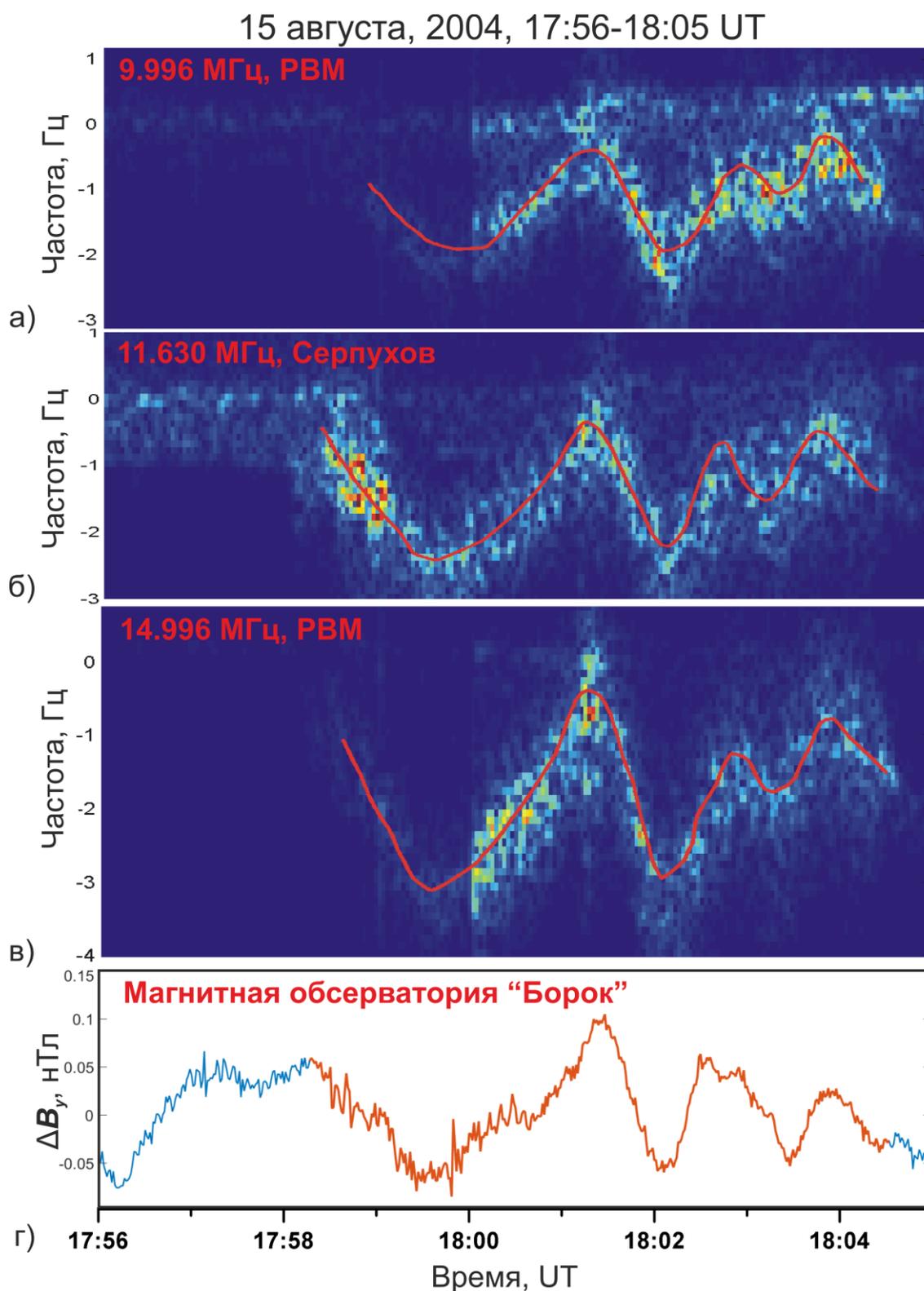


Рисунок 6.12 – Спектрограммы пробных ВЧ сигналов: а) RBM, 9.996 МГц б) Серпухов, 11.630 МГц в) RBM, 14.996 МГц г) вариация горизонтальной Y компоненты геомагнитного поля на поверхности Земли, измеренная выполнены на магнитной обсерватории Борок

Таблица 6.2 – Расчет амплитуды вариаций скорости (по вариациям ДСЧ) для сеанса 15.08.2004, 17:56-18:05 UT

Станция	Частота, МГц	$Fd$ , Гц	$V$ , м/сек	$E$ , мВ/м
РВМ	9996	1.75	92.3	1.61
	14.996	2.65	98.9	1.73
Серпухов	11.630	2	96.0	1.67

Известно, что на высотах F2 слоя плазма является “замагниченной”, а движения рассеивателей происходят преимущественно поперек геомагнитного поля в соответствии с механизмом дрейфа плазмы в скрещенных электрическом и магнитном полях. Скорость этих движений согласно [343] определяется как:

$$\vec{V} = c \frac{[\vec{E}\vec{H}_0]}{H_0^2}, \quad (6.11)$$

где,  $\vec{E}$ ,  $\vec{H}_0$  - вектора напряженности электрического и среднего геомагнитного поля в ионосфере соответственно,  $c$  – скорость света. Воспользовавшись выражениями (6.1, 7.11) можно использовать наземные магнитометрические записи совместно с ВЧ данными о ДСЧ ракурсно рассеянных сигналов для оценки величин вариаций электрических полей МГД волн, распространяющихся на высотах ИИТ [248]. Соответствующие оценки для рассмотренного выше фрагмента записей приведены в таблице 6.2. Они соответствуют результатам известным из литературы [45, 51], что подтверждает применимость данной методики для оценки величин полей и токов МГД волн в верхней ионосфере.

### 6.3. Диагностика волновых возмущений ионосферы методом радиопросвечивания сигналами ГНСС

Исследование неоднородностей ионосферы с использованием ГНСС имеет почти двадцатилетнюю историю. Усилиями отдельных исследователей и международных организаций созданы глобальные и региональные карты полного электронного содержания, доступные в сети Интернет [344]. Эти карты широко используются для исследования ионосферных процессов с периодами от суток до десятка лет. Однако изучение быстрых динамических процессов и плазменных неоднородностей среднего масштаба от десятков до сотен километров требует более детального пространственно-временного разрешения, чем в глобальных картах ПЭС. В ряде стран прилагаются усилия для создания методик построения карт ПЭС с разрешением около 50 километров, которые, однако, пока недостаточно эффективны [345, 346, 347].

Исследования пространственной структуры среднemasштабных неоднородностей ионосферы могут также быть проведены с помощью метода радиотомографии с характерным горизонтальным разрешением в несколько десятков километров [345, 348, 349]. Томография предоставляет большой объем информации, однако верификация полученных результатов проблематична в связи с фрагментарностью таких наблюдений, сложностью и неоднозначностью алгоритмов обработки. Попытки сравнить результаты томографии с распределением электронного содержания, рассчитанным, например, по яркости ночного свечения в ионосфере [349] нельзя считать убедительными. Сами авторы работы [349], и большинство других исследователей, обращаются для апробации томографического воспроизведения к глобальным картам ПЭС [347, 348, 350, 351].

В данном подразделе представлен оригинальный алгоритм диагностики неоднородностей ионосферы на основании карт полного электронного содержания по данным густой сети постоянно действующих приемников ГНСС [27]. При построении алгоритма, прежде всего, были определены

требования к величине пространственного разрешения. С одной стороны, она должна быть технически достижимая, а, с другой принципиально необходимая для диагностики среднемасштабных неоднородностей. ПЭС как интегральный параметр, который определяется вдоль лучевой траектории “спутник-приемник” не может существенно изменяться при смещении траектории на расстояние, значительно меньше, чем длина пути в ионосфере. Эквивалентная толщина ионосферы оценивается величиной порядка 200-300 километров [352], поэтому для двух траекторий, отстоящих друг от друга на расстоянии нескольких десятков километров, можно предположить близость ПЭС.

Приведенные выше качественные соображения были проверены с помощью данных национальных региональных (украинской и польской) сетей перманентных станций ГНСС. На рис. 6.13 показано расположение станций этих сетей. При выборе пары станций на различных расстояниях от единиц до сотен километров были вычислены корреляционные функции вариаций ПЭС для спутников с малыми зенитными углами. Расстояние между лучевыми траекториями в этом случае равно расстоянию между станциями. На рис. 6.14 показаны типичные графики пространственной корреляционной функции и спектры изотропных вариаций ПЭС, характерные для спокойных геофизических условий. Аргументом корреляционной функции является расстояние между лучевыми траекториями.

Из приведенных графиков видно, что разнос траекторий на сто километров уменьшает степень корреляции вариаций ПЭС в два раза, а на расстояниях меньших пятидесяти километров вариации ПЭС практически совпадают. Таким образом, целесообразно принять пятьдесят километров как необходимое пространственное разрешение региональных карт ПЭС.

Традиционно при построении карт ПЭС используется модель ионосферы в виде тонкого фазового экрана. Электронное содержание, вычисляется по данным приемников ГНСС, вдоль луча зрения “спутник-приемник”, характеризующегося отличными от нуля азимутом и зенитным углом. Для отображения ПЭС в виде географической карты текущие значения

проєцируються на сферическую поверхню моделююцюю ионосферу в виде тонкого слоя [344, 346, 347, 350, 351, 353]. Неоднозначность выбора радиуса такой сферической оболочки является источником неопределенности координат подионосферных точек, относительное положение которых для различных спутников и пунктов наблюдений, меняется в зависимости от выбранной высоты ионосферного слоя. Это приводит к тому, что вид локальной карты, построенной по нескольким спутникам, существенно зависит от выбора высоты слоя [354].

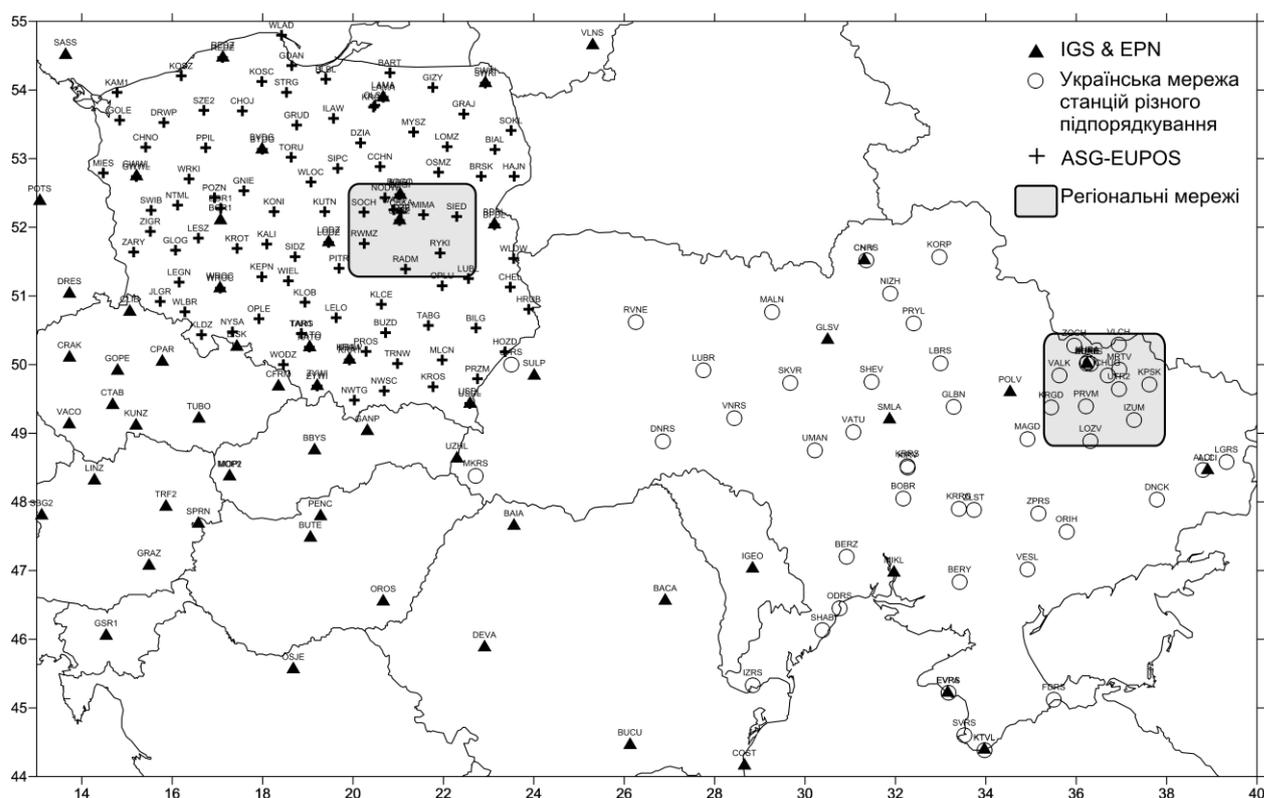


Рисунок 6.13 – Карта национальных сетей станций ГНСС, украинской и польской ASG-EUPOS, а также международных сетей IGS и EPN.

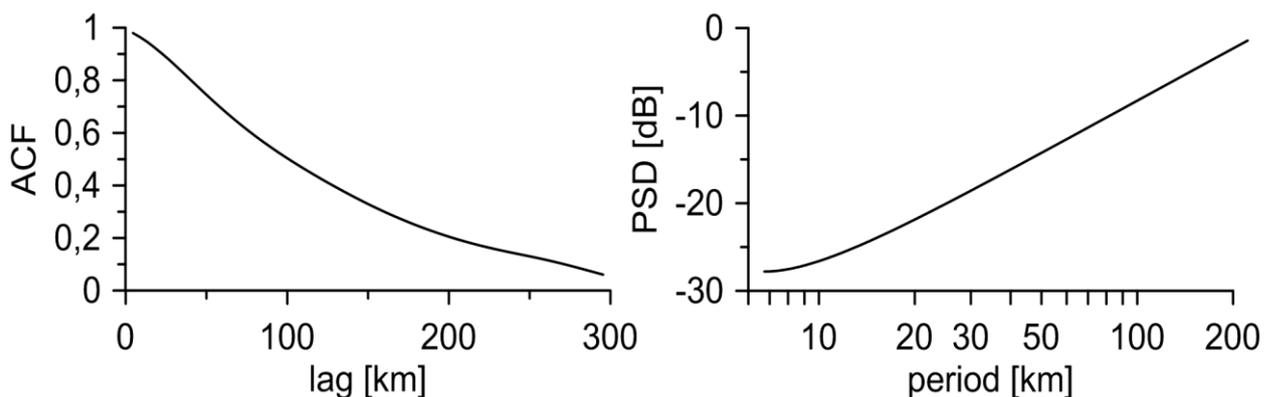


Рисунок 6.14 – Пространственная автокорреляционная функция (слева) и спектр (справа) вариаций ПЭС в региональном масштабе в спокойных геофизических условиях.

Совсем другая ситуация реализуется при использовании в традиционном методе восстановления ПЭС для всех пунктов наблюдения данных одного спутника. Такая методика предложена Е.М. Занимонским совместно с автором данной работы [354]. Взаимное расположение подионосферных точек сохраняется при варьировании высоты слоя, однако изменяется положение центра картины и ее масштаб в зависимости от зенитного угла спутника. Пространственные структуры ионосферных неоднородностей, имеют практически одинаковый вид в диапазоне высот от 100 км до 450 км.

Искажение карт в модели тонкого слоя появляются не только из-за неоднозначности выбора высоты слоя, но и из-за использования упрощенной проектирующей функции – которая необходима для пересчета ПЭС вдоль луча зрения “спутник-приемник” в вертикальный ПЭС [355]. Для коррекции этих искажений алгоритм предполагает отказаться от модели тонкого слоя и оценивать ПЭС только в вертикальном направлении, используя данные со спутников, находящихся вблизи зенита [353]. В этом случае ПЭС измеряется

непосредственно над приемниками, а пространственное разрешение определяется расстоянием между ними.

Построение карт происходит без усреднения во времени, поэтому временная разрешающая способность определяется исключительно интервалом между данными, накапливаемыми в приемниках. В зависимости от сети он варьируется от одной до тридцати секунд. В качестве примера работы алгоритма далее рассмотрены несколько карт вариаций ПЭС, построенных по данным центральноевропейских перманентных станций ГНСС и польской сети ASG-EUPOS [356] (данные польской сети обработаны совместно с коллегами из Военно-Технической Академии, Варшава [357]). Расчеты были проведены для ряда суточных циклов наблюдения, выполненных при разных уровнях геомагнитной активности. На рис. 6.15.а показана карта вариаций ПЭС, полученная для 6:17 UT (здесь и далее используется время UT) в магнитоспокойный день 28 сентября 2015 ( $K_p = 0$ ). На рис. 6.15.б это же событие представлено в виде “водопада” (слева) и изображенной в условных цветах последовательности профилей вариаций ПЭС (справа) рассчитанных вдоль 53 параллели с 06:00 до 6:33 UT. Приведенные рисунки могут быть интерпретированы как распространение в ионосфере ПИВ со скоростью около 70 м/с в восточном направлении (вектор скорости изображен на рис. 6.15.а красной стрелкой) в течение более получаса со средним пространственным периодом около 200 км. Оцененные параметры ПИВ соответствуют теоретическим и экспериментальным результатам, доступным в литературе [358, 359].

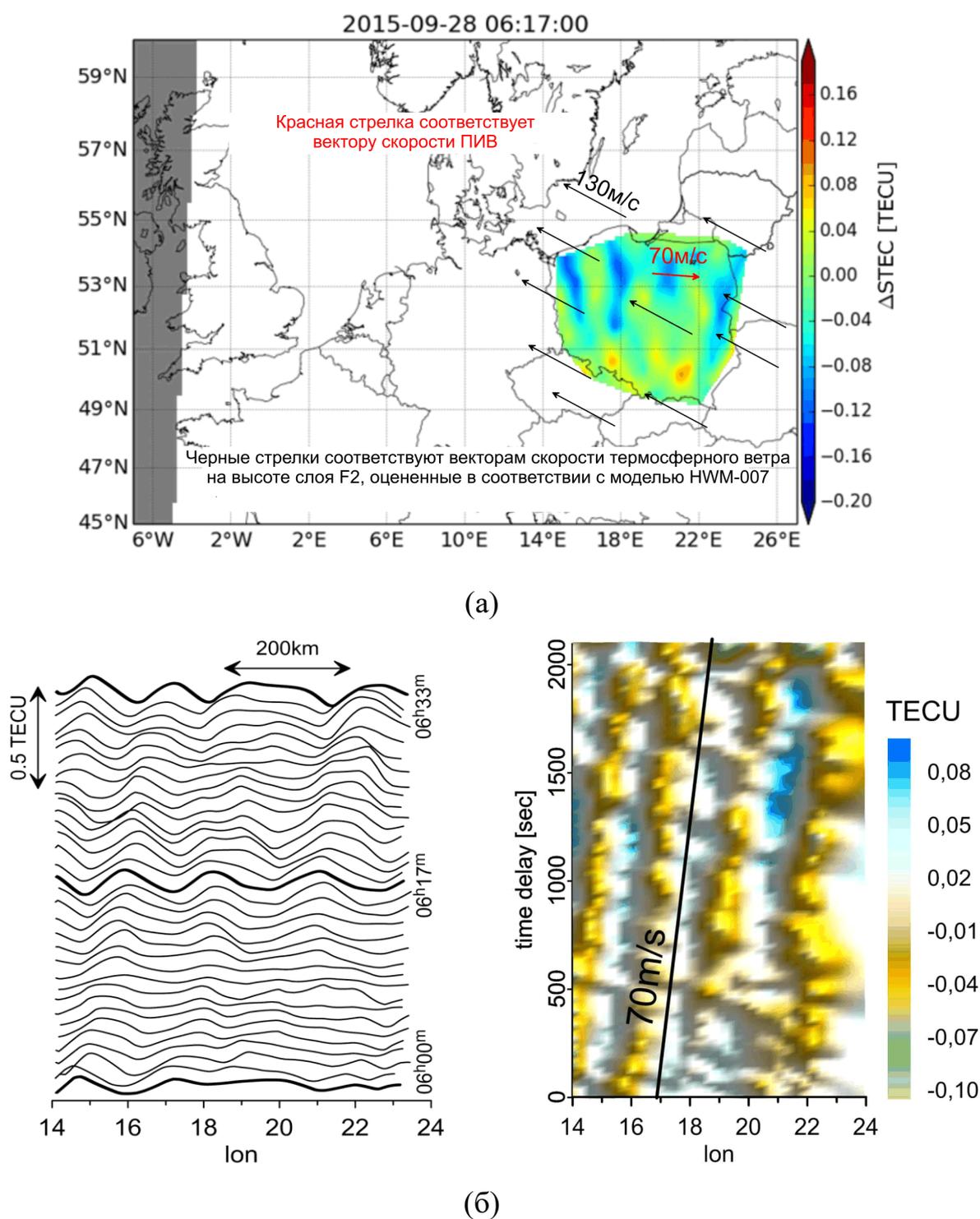


Рисунок 6.15 – (а) Карта вариаций ПЭС (STEC) над Польшей восстановленная для 28 сентября 2015 г., 06:17 UT. Стрелками изображены вектора скорости ПИВ и термосферного ветра на высоте максимума слоя F<sub>2</sub>, оцененного в соответствии с моделью HWM-07; (б) профили вариаций ПЭС вдоль 53 параллели с 06:00 до 6:33 UT 28 сентября 2015 в форме “водопада” (слева) и в

виде двумерного распределения в координатах “расстояние-время” (справа). Жирной линией показан волновой фронт ПИВ

Анализ карт ПЭС, подобных изображенным на рис. 6.16 позволяет высказать несколько гипотез о природе источника ионосферного возмущения. Первая – это генерация ПИВ солнечным терминатором. Возможность “терминаторной” генерации ПИВ широко освещена в литературе в ряде теоретических и экспериментальных работ [67, 358, 359]. В пользу данного предположения свидетельствует близость направления движения ПИВ по отношению к нормали для утреннего терминатора. Другая гипотеза связана с возможностью генерации ПИВ термосферными ветрами. Как видно из рис 6.15.а ПИВ движется против направления термосферного ветра (направление которого на высоте слоя F2 оценивалось в соответствии с моделью HWM-07 [360]). Отметим, что движения волновых возмущений в противоположном направлении, по отношению к термосферному ветру, отмечалось в большом числе экспериментальных работ [361, 362, 363, 364]. Для определения какой из предложенных механизмов генерации ПИВ был преобладающим необходимо проведение дополнительных исследований и получение большего объема данных наблюдений.

На рис 6.16 представлены результаты картографирования ионосферных неоднородностей, полученные в условиях сильных геомагнитных возмущений ( $K_p = 8$ ). Для этого были проанализированы ионосферные события во время бури в день “Св. Патрика” [365]. Возмущения во время главной фазы бури, с 16 до 18 часов 17 марта 2015 характеризовались значительными вариациями ПЭС, на два порядка большими, чем в спокойные дни. На рис 6.16 приведены профили вариаций ПЭС вдоль 53 параллели в форме “водопада” и в виде двумерного распределения в координатах “расстояние-время” для фрагмента с 16:34 до 16:50 UT. Этот интервал был выбран потому, что в его ходе сохранялась относительная стабильность вида карты. В другие моменты времени главной фазы бури форма вариаций существенно менялась каждые несколько минут.

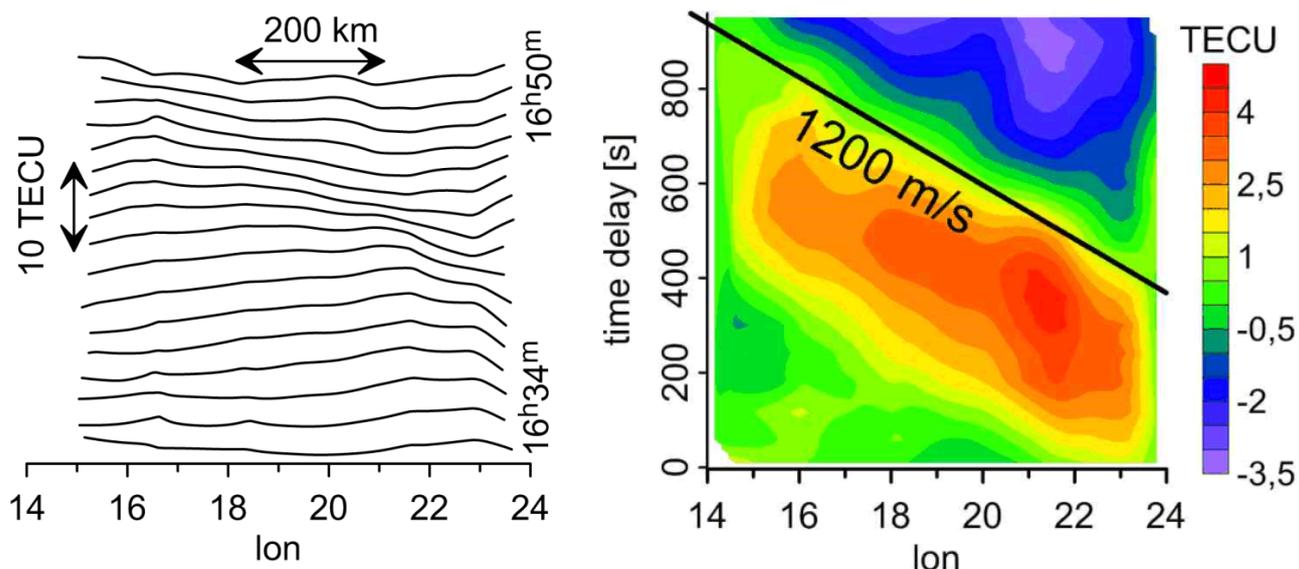


Рисунок 6.16 – Профили вариаций ПЭС вдоль 53 параллели с 16:34 до 16:50 UT 17 марта 2015 в форме “водопада” (слева) и в виде двумерного распределения в координатах “расстояние-время” (справа). Скорость перемещения “квазиволновых” возмущений в юго-западном направлении составляла около 1200 м/с

Зарегистрировано возмущения перемещалось с кажущейся скоростью около 1 200 м/с, что значительно большей скорости звука на ионосферных высотах. Таким образом, эффект скорее всего связан с пространственно-временными изменениями потока ионизирующего агента, который создавал избыточную по сравнению со спокойными условиями, концентрацию электронов.

Следует отметить, что рассмотренные выше примеры приведены для демонстрации работоспособности и возможностей применения новой методики ионосферной диагностики. Проведение систематического ионосферного мониторинга с ее помощью станет возможной после автоматизации разработанных методик, которую автор планирует реализовать в ближайшем будущем.

#### 6.4 Изучение механизмов сверхдальнего распространения ВЧ сигналов

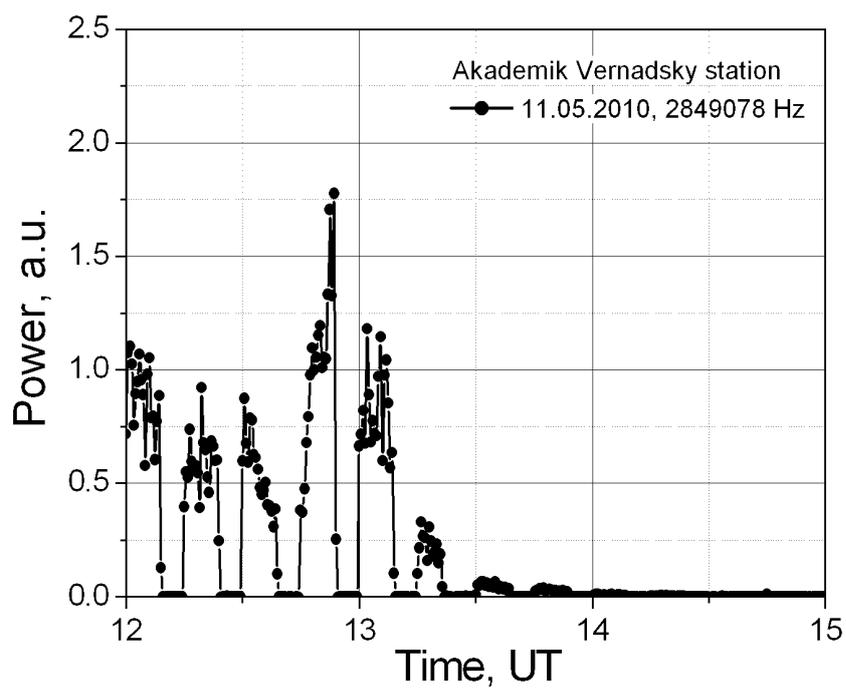
Стандартным способом распространения ВЧ радиоизлучения на дальние и сверхдальние расстояния считается так называемый “скачковый” механизм при котором радиосигнал испытывает несколько последовательных отражений от ионосферы и земной поверхности [52, 366]. При этом каждый скачок приводит к уменьшению амплитуды радиоволны возникающему в основном из-за ее поглощения в нижней ионосфере и рассеяния от земной поверхности. В то же время наличие в ионосфере E и F слоев, разделенных “долиной”, (областью высот, где электронная концентрация имеет межслоевой минимум) делает возможным распространение энергии в ионосферном волноводе [367, 368]. Волноводное распространение энергетически гораздо эффективнее скачкового, поскольку прохождение через поглощающую область ионосферы происходит только вблизи передатчика и приемника, а отражения от земной поверхности отсутствуют. Главная проблема практического использования межслоевого ионосферного волновода состоит в трудности его управляемой запитки с поверхности Земли и последующего вывода энергии на Землю. Распространяющиеся с малым затуханием моды в таком волноводе имеют скользкие углы возвышения, и их эмиссия с поверхности под такими углами невозможна. Кроме того, необходимое для формирования волновода существование E – слоя, для скользких траекторий оказывает действие отражающего барьера, экранирующего проникновение поля в область “долины”.

В данном подразделе возможность “запитки” межслоевого волновода реализована с использованием искусственной ионосферной турбулентности, создаваемой мощным ВЧ нагревом ионосферы. В специально организованных, с участием автора, экспериментальных кампаниях был задействован крупнейший в мире нагревный стенд HAARP (Аляска, США) и приемные пункты РИ НАНУ, описанные в разделе 2. Эксперименты были

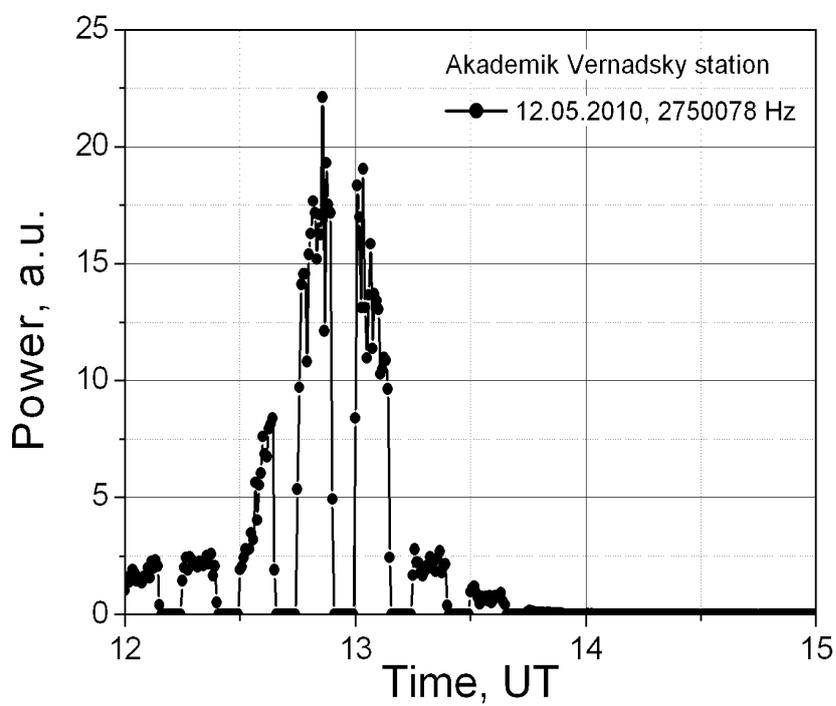
проведены совместно с коллегами из Мерилендского университета (США). Института Солнечно – земной физики (г. Иркутск, Россия).

Другим возможным сценарием реализации волноводного механизма может быть распространение сигналов вдоль линии солнечного терминатора. Как известно, на ионосферных высотах терминатор является источником протяженных градиентов электронной концентрации, оказывающих существенное влияние на параметры ВЧ сигналов, распространяющихся на дальние и сверхдальние расстояния [67]. Такие градиенты могут создавать предпосылки для улучшения условий распространения ВЧ сигналов вдоль терминатора, а также способствовать вводу и выводу энергии в межслоевой волновод. В данном подразделе проанализированы результаты измерений, выполненных 11,12 мая и 2, 3 августа 2010 г., на УАС и в Иркутске, когда радиотрасса ХААРП-УАС проходила точно по линии солнечного терминатора близи 13:00 UT для всех дней наблюдений, а ориентация трассы ХААРП-Иркутск была близка к линии терминатора [327].

На рис. 6.17 а, б в относительных единицах приведены временные зависимости интенсивности сигналов принятых на УАС 11, 12 мая на частоте нагрева после вычитания из них интенсивности шума соответствующего датам измерений. На обеих зависимостях абсолютный максимум мощности принятых сигналов наблюдается практически в одно и то же время - в 12:44 UT 11 мая и в 12:42 UT 12 мая. Это время достаточно близко к времени прохождения терминатора по поверхности Земли. По-видимому, наблюдаемый максимум и является проявлением “терминаторного” эффекта канализации энергии ВЧ сигналов для данных радиотрасс.



a)



б)

Рисунок 6.17 – Временная зависимость мощности сигналов на частоте нагрева, принятых на УАС 11 и 12 мая, отн.е.

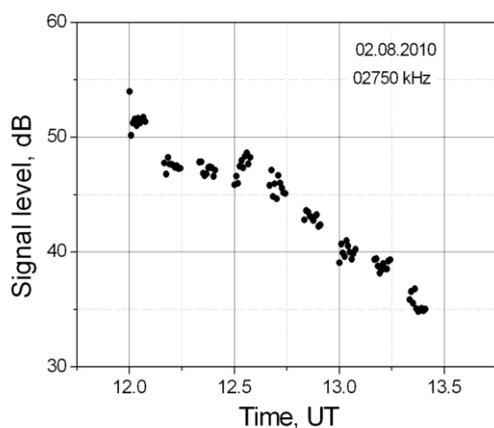
При качественном совпадении временного хода зависимостей абсолютные значения заметно отличались. Так мощность сигнала 12 мая в 12:00 UT превышает мощность, принятую в это же время 11 мая, примерно в 3 раза, а в максимуме превышает соответствующее значение от 11 мая более, чем на порядок. Противоположный эффект наблюдался в конце сеанса, когда абсолютное значение мощности принятого сигнала 12 мая было меньше, чем в предыдущий день. Так 11 мая нагревный сигнал всё время эксперимента (до 14:24 UT) превышал уровень шума, а 12 мая он стал ниже шумов после 14:09 UT и больше до конца сеанса измерений (14:54 UT) не принимался. (Уровень шумов оба дня измерений практически совпадал.) Описанные факты свидетельствуют, скорее всего, о нестационарности ионосферных процессов.

Наблюдения на УАС 02 и 03 августа были обработаны в соответствии с алгоритмами, применявшимися 11 и 12 мая. Значения уровней сигналов НС ХААРП на более высоких нагревной и пробной частотах (6777078 Гц и 8089078 Гц) представлены на рис. 6.18. Уровень сигнала нагрева 02.08.2010 почти монотонно убывает с 12:00 до 13:25. Слабо выраженный локальный максимум отмечается в 12:30. В сигнале нагрева 03.08.2010 регистрируются 3 максимума (сеансы 11:10, 12:10, а также в 12:40-12:50). Уровень пробных сигналов 2-го августа постоянно падает до 11:30, после чего резко возрастает на 20-30 дБ к 11:45. Начиная с 11:45 фиксируется монотонный спад вплоть до 15:00. Далее сигналы регистрируются на уровне шума, и временами становятся меньше шумов. Во второй день измерений уровень пробных сигналов начинает расти сразу после 11:00, достигая первого максимума около 11:45–11:55 но на меньшем, чем в предыдущие сутки уровне. Далее наблюдается второй максимум уровней пробных сигналов, около 12:45 на частоте 6777078 Гц и с 12:50 до 13:30 на частоте 8089078 Гц.

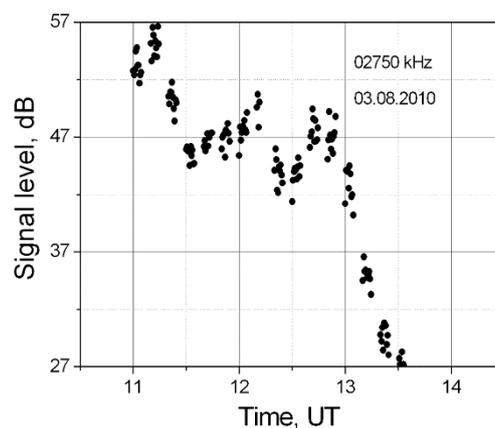
Стоит отметить также различия модового состава сигналов на нагревной и пробных частотах. Нагревный сигнал для обоих дней наблюдения является одномодовым. Для пробных сигналов 2-го и 3-го августа характерно появление 2-го спектрального максимума с ДСЧ около +4 Гц (см. Рис. 6.19). На меньшей пробной частоте дополнительный максимум появляется раньше, чем на более высокой. Для частоты 6777078 Гц 2-го августа максимум регистрируется с 10:40 и 3-го августа с 11:10. Максимальная мощность сигнала для обоих дней наблюдается в 11:40. При этом интенсивность появившегося спектрального максимума с положительным ДСЧ выше, чем интенсивность основного максимума (см. Рис 6.19).

На пробной частоте 8089078 Гц дополнительный максимум возникает после 11:40. Анализ величины ДСЧ максимумов на обеих пробных частотах не выявил его явной зависимости от частоты сигнала.

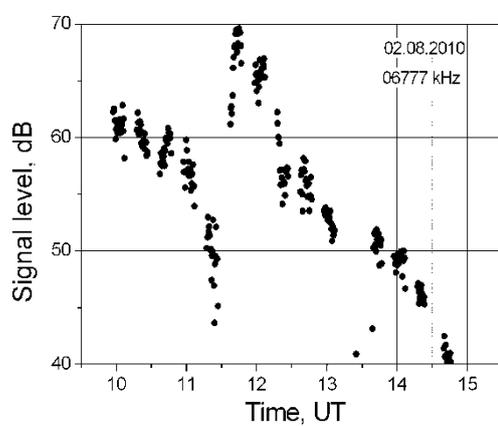
Наблюдения в Иркутске 11 и 12 мая проводились как для нагревных, так и для пробных частот, однако, 11 мая сигналы НС НААРР не были зарегистрированы из-за высокого уровня местных помех. 12 мая сигналы были обнаружены на пробной частоте 8089078 Гц с 11:00 до 15:00 UT. Сигнал на частоте нагрева 2750078 Гц принят не был. Данные об интенсивности сигнала с компенсацией шума  $I_s - I_n$  представлены на рис. 6.20.



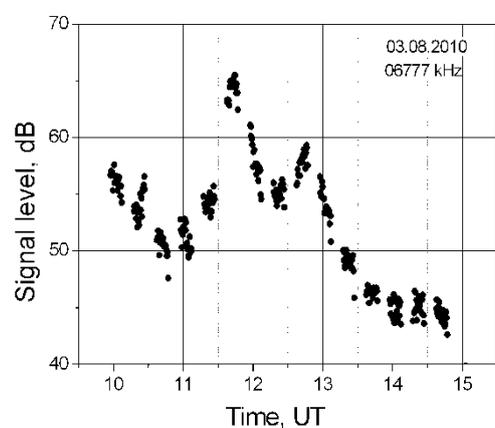
а)



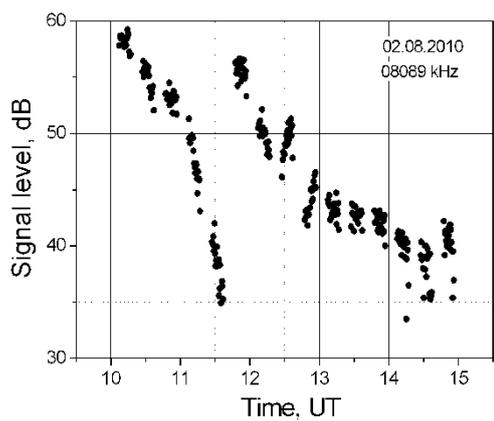
б)



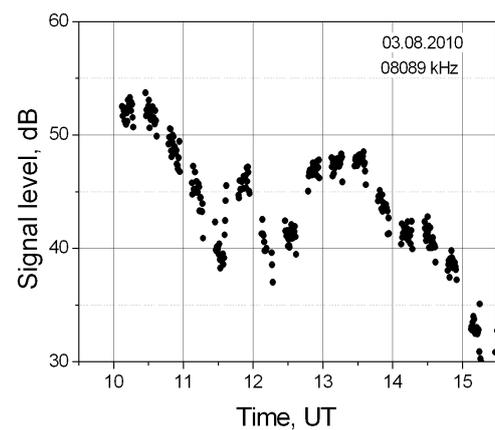
в)



г)

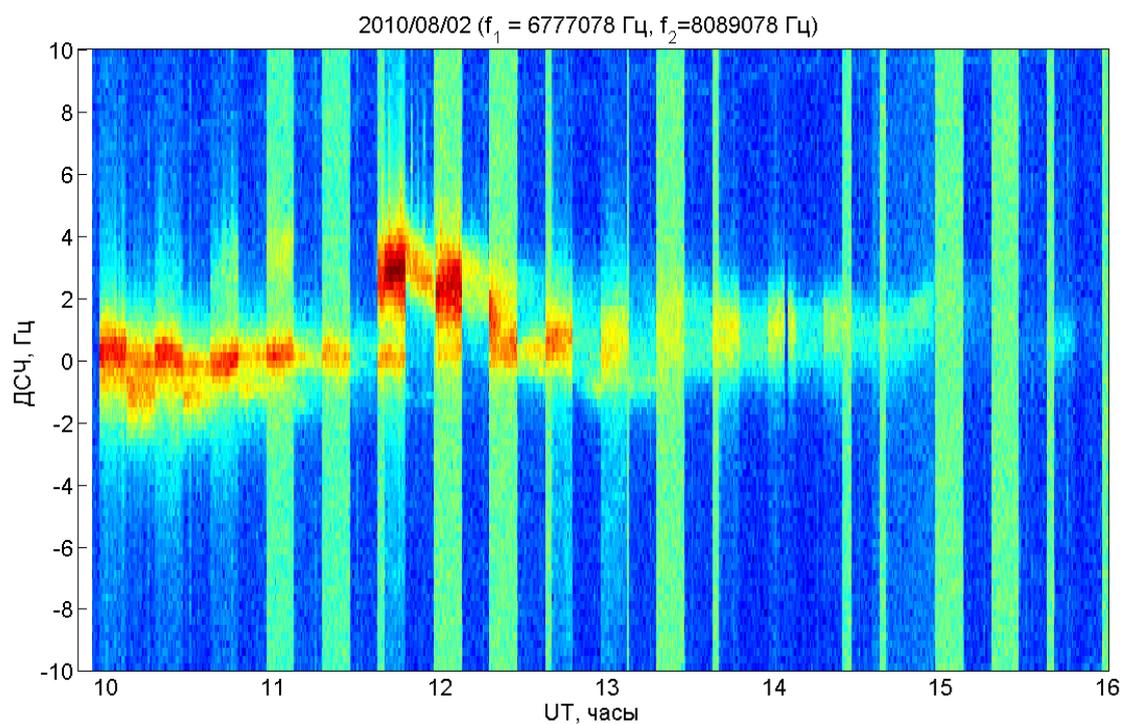


д)

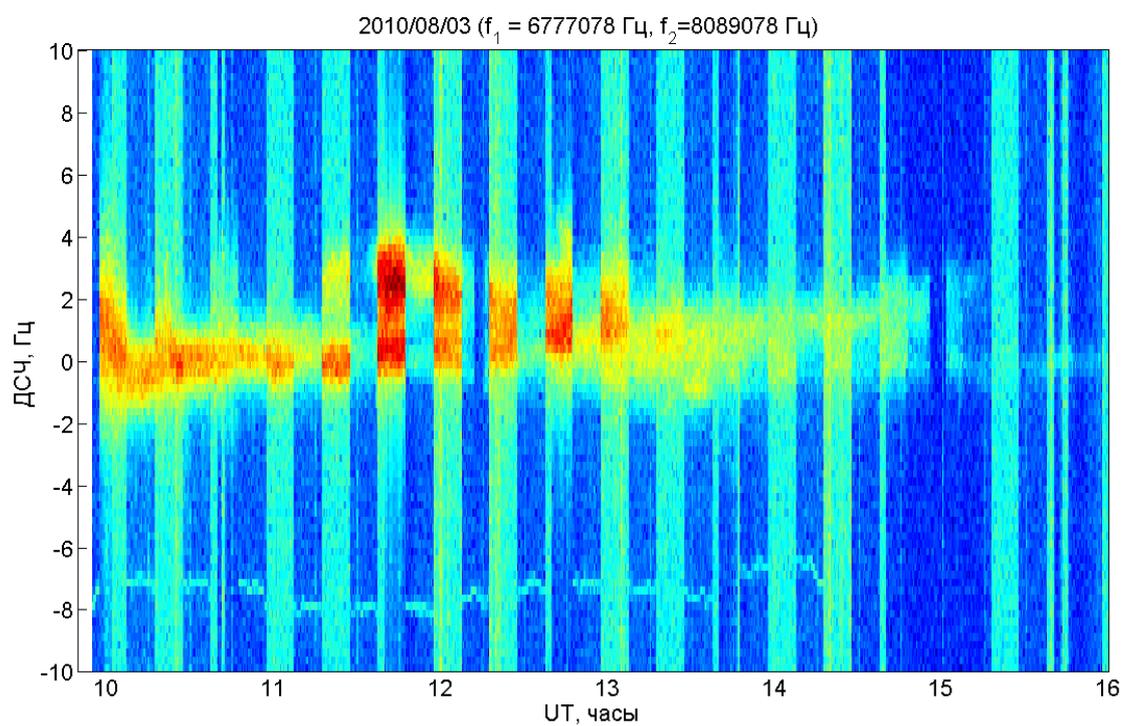


е)

Рисунок 6.18 – Вариации мощности сигналов НС НААРП 02.08.2010 (а, в, д – 02.08.2010, б, г, е – 03.08.2010). Частоты: а, б 2750078; в, г – 6777078 Гц; д, е – 08089078 Гц



а)



б)

Рисунок 6.19 – Спектрограммы сигналов для пробных частот (с 09:57:30 УТ излучалась частота 6777078 Гц, затем в 10:07:30 УТ - 8089078 Гц и далее

значения частот циклически повторялись с темпом 10 мин) а) 02.08.2010; б) 03.08.2010 г.

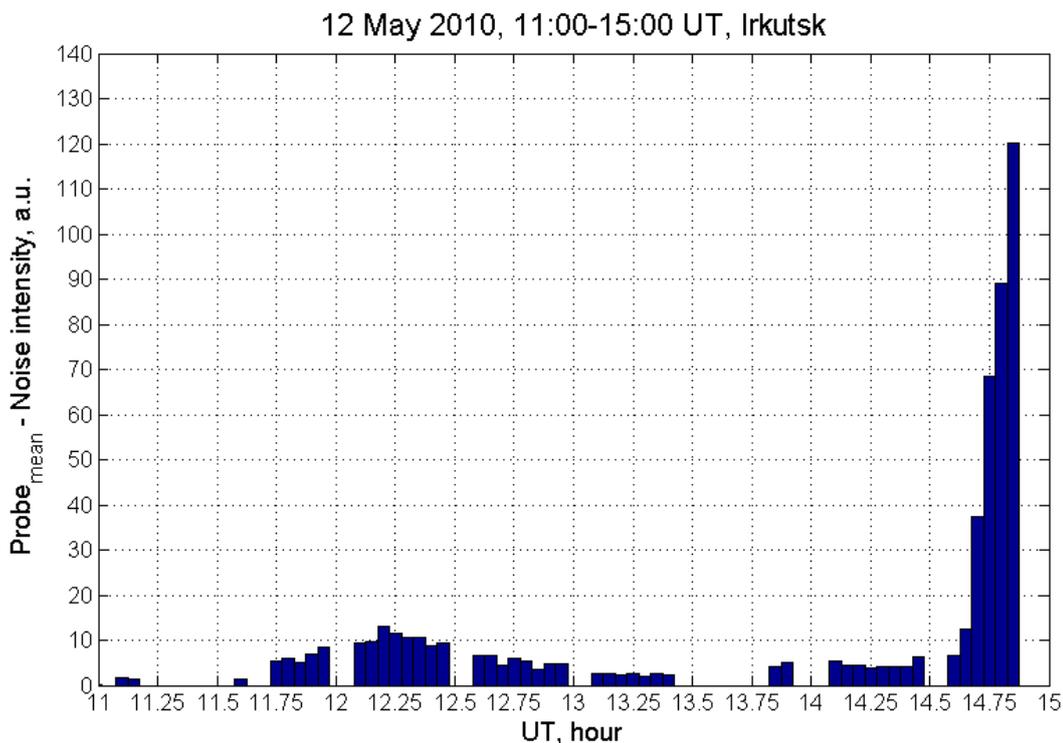


Рисунок 6.20 – Интенсивность сигнала пробной частоты 8089,078 кГц минус интенсивность шума  $I_s - I_n$  для 12 мая 2010 г., 11:00-15:00 UT. Пункт наблюдения Иркутск

Из рисунка виден относительно небольшой, но надежно регистрируемый локальный максимум интенсивности пробного сигнала в 12:15 UT, который можно рассматривать как возможный момент возникновения “терминаторного” эффекта. В это время передающий пункт находится в тени, а приемный на свету. Однако, если рассматривать условия освещенности в ионосфере, то все участки трассы выше 85 км освещены Солнцем. Резкий подъем интенсивности сигнала после 14:40 UT связан, по-видимому, с переходом значительного участка радиотрассы к ночным

условиям распространения с соответствующим уменьшением поглощения в нижней ионосфере.

02 и 03 августа в Иркутске наблюдения выполнялись в режиме переключений между нагревной и двумя пробными частотами. При анализе данных следует отметить, что прохождение линии заходного солнечного терминатора через иркутский пункт приема соответствовало 13:30 UT. На рис. 6.21 представлены восстановленные интенсивности и ДСЧ нагревного и пробных сигналов для обоих дней наблюдения. Из рисунков видно, что поведение энергетических и спектральных характеристик нагревных и пробных сигналов для обоих дней наблюдений в целом подобно.

Анализ доплеровских сдвигов частоты ВЧ сигналов показал следующее. За время эксперимента фиксировался монотонный рост ДСЧ. Для нагревного цикла 02.08.2010 ДСЧ флуктуирует вблизи нуля, а для измерений 03.08.2010 зарегистрирован быстрый рост ДСЧ с незначительных отрицательных значений до +1.5 Гц в 13:20. Для обоих дней измерений частотный спектр сигнала был преимущественно одномодовым.

Анализ энергетических и спектральных характеристик сигналов, измеренных 11-12 мая и 02-03 августа в пунктах наблюдения УАС и Иркутск показал наличие “терминаторного эффекта”, выражающегося в увеличении интенсивности пробного сигнала за несколько десятков минут до прохождения линии терминатора через пункты приема по поверхности Земли. Эффект наиболее заметно проявляется на низких частотах (нагревные частоты: 275078 Гц, 2849078 Гц и 3390078 Гц) и в меньшей степени выражен для более высоких частот (пробные частоты: 6777078 Гц, 8089078 Гц, 8099078 Гц). Выявлены существенные отличия наблюдаемых “терминаторных эффектов” ото дня ко дню, что, по-видимому, связано с изменением ионосферных и геомагнитных условий.

В поведении интенсивности ВЧ сигнала 03.08.2010 на нагревной частоте 2750078 Гц наблюдается четко выраженный максимум в 13:00. В другой день 02.08.2010 максимум ярко не выражен, однако нельзя наверняка утверждать,

что максимум вблизи 13:00 отсутствовал. 03.08.2010 на пробной частоте 6777078 Гц зарегистрирован максимум вблизи 14:30, а на частоте 8089078 Гц отмечены два максимума: вблизи 14:00 и вблизи 15:00.

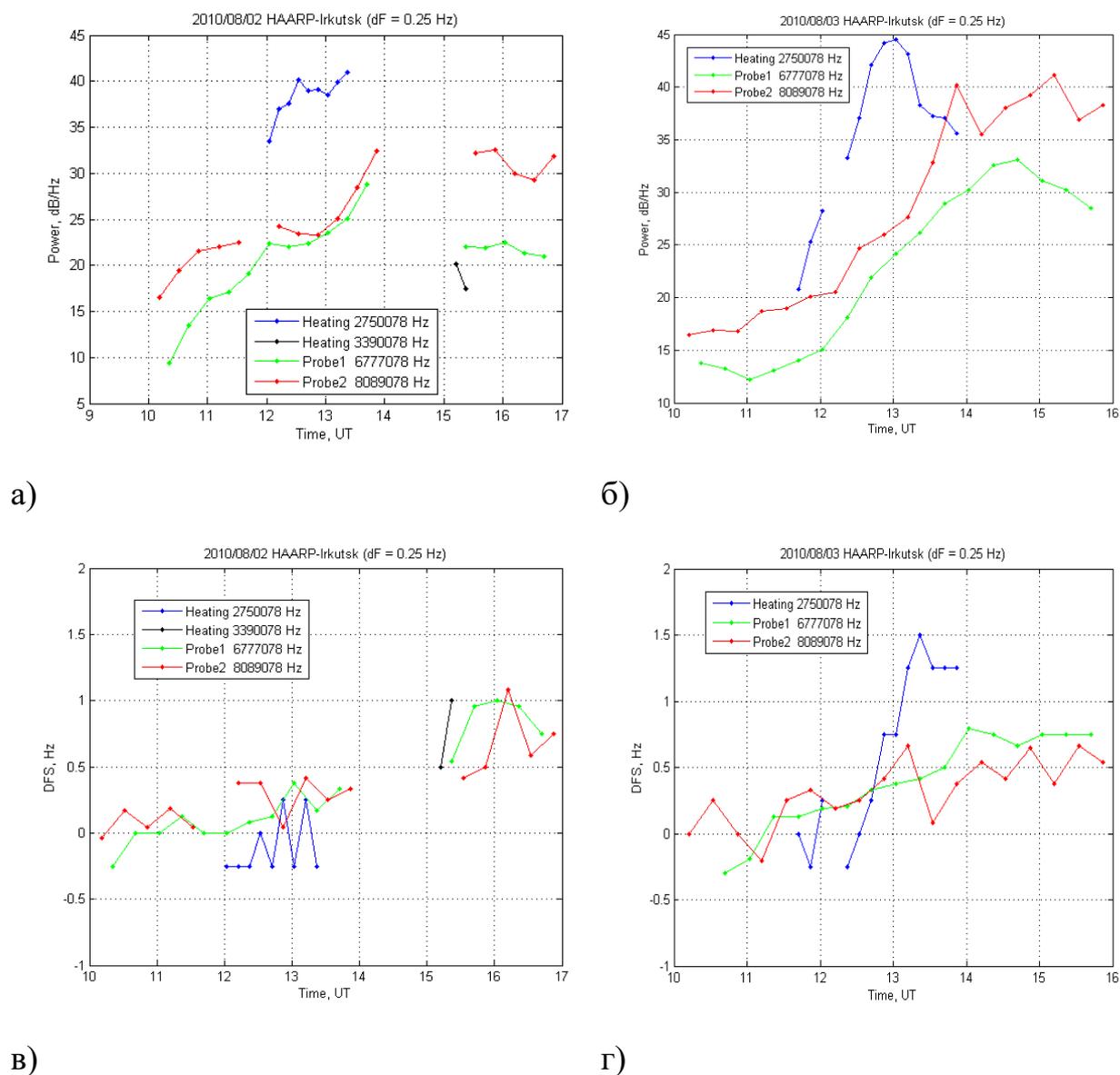


Рисунок 6.21 – Интенсивности и доплеровские смещения частоты нагревных и пробных сигналов на разных частотах для двух дней измерений: а) 02.08.2010, б) 03.08.2010; ДСЧ - в) 02.08.2010, г) 03.08.2010

Ионосферные условия над пунктами наблюдений и условия на трассе распространения ВЧ сигналов исследованы для основного пункта наблюдения

– УАС. Основные характеристики, которая оценивалась по данным вертикального зондирования – это критические частоты  $F_0F_2$  и высотные профили электронной концентрации вдоль трассы распространения сигнала.

В качестве информационных параметров, отображающих состояние ионосферы, использовались: а) данные о высотных профилях электронной концентрации, полученные по справочной модели ионосферы International Reference Ionosphere-IRI-2007 [[http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri\\_vitmo.html](http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri_vitmo.html)]. б) данные наиболее близких к ней станций вертикального зондирования ионосферы, описанные в таблице 6.3.

Таблица 6.3 – Координаты станций ВЗИ, используемых при моделировании.

Индекс станции ВЗИ	Название станции ВЗИ	Широта	Долгота
<u>BC840</u>	BOULDER	40.00° с.ш.	105.30° з.д.
<u>CO764</u>	COLLEGE AK	64.90° с.ш.	148.00° з.д.
<u>GA762</u>	GAKONA	62.38° с.ш.	145.00° з.д.
<u>JI91J</u>	JICAMARCA	02.00° ю.ш.	076.80° з.д.
<u>PSJ5J</u>	PORT STANLEY	51.60° ю.ш.	057.90° з.д.
<u>PA836</u>	PT ARGUELLO	34.80° ю.ш.	120.50° з.д.
<u>J6N</u>	ARGENTINE ISLANDS	65.25° ю.ш.	064.23° з.д.

Особое внимание было уделено данным станций ВЗИ расположенных непосредственно в передающем и приемном пунктах, а также данным дигизондов PA836, JI91J и PSJ5J – первый практически находится на трассе, а два остальных – наименее удалены от нее (Рис. 6.22). Для оценки ионосферных условий рассчитывалась траектория распространения сигналов от нагревного стенда (ХААРП) до УАС.

Для оценки профилей  $N_e(h,l,t)$  (здесь:  $h$  - высота,  $l$  - расстояние вдоль радиотрассы от пункта ХААРП,  $t$  - время) по данным ВЗИ использовалась

модель IRI без учета спорадических факторов (текущих характеристик солнечной активности). Модельные оценки профилей  $N_e(h,l,t)$  получены только для одного дня наблюдений – 11 мая 2010 г. С учетом того, что особый интерес вызывал интервал высот между E и F2 – слоями, профили электронной концентрации рассчитывались в диапазоне высот от 80 до 480 км с шагом дискретизации по высоте равным 4 км.

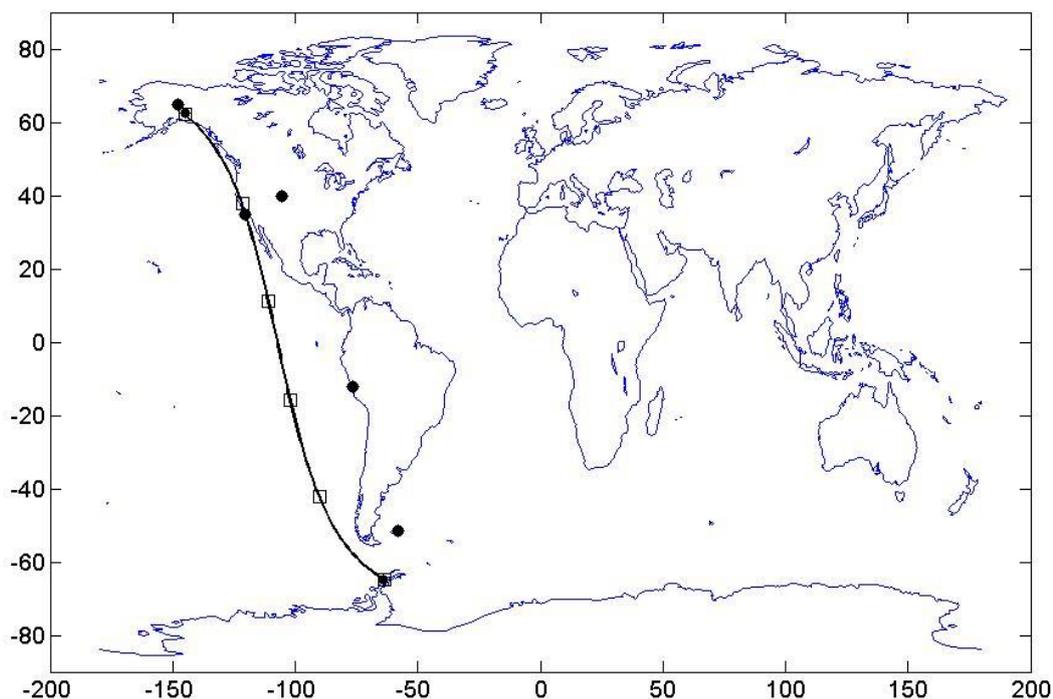


Рисунок 6.22 – Траектория распространения КВ сигнала HAARP-UAS (УАС). Белые квадраты вдоль траектории – “контрольные” точки, черные кружки – расположение станций ВЗИ

На рисунках Рис 6.23 показаны высотные распределения плазменной частоты  $f_p$ , рассчитанные по модельным профилям электронной концентрации для 6-ти эквидистантных точек вдоль трассы с шагом 20% (3122 км) согласно формуле:

$$f_p = \frac{\sqrt{80.8 \cdot N_e}}{10^6} [MHz]. \quad (6.12)$$

Динамика изменения плазменной частоты слоев E и F2 отображена в таблице 6.4.

Таблица. 6.4 – Динамика изменения величины  $f_p$  для слоев E и F2 и межслоевой полости, по данным 11.05.2010 г.

	<i>Время, UT</i>	<i>10:00</i>	<i>11:00</i>	<i>12:00</i>	<i>12:30</i>	<i>13:00</i>	<i>13:30</i>	<i>14</i>
E	min (МГц)	0.4	0.4	0.4	0.55	1.1	1.45	1.65
	max (МГц)	0.55	0.65	0.85	1.05	1.25	1.8	2.25
Долина	min (МГц)	0.2	0.25	0.3	0.45	0.95	1.4	1.55
	max (МГц)	0.53	0.6	0.8	0.95	1.2	1.65	2.1
F2	min (МГц)	2.7	3.15	3.4	3.4	3.45	3.5	3.7
	max (МГц)	4.1	4.0	4.5	5.35	6.35	7.35	8.2

Как видно из рисунка и таблицы “долина” наиболее четко выражена в интервале с 10:00 до 14:00 UT, как раз во время проведения эксперимента.

Отметим, что согласно модельным представлением профили  $N_e(h,l,t)$  на высотах существования долины (E и низ F2 области ионосферы) были наиболее однородны вдоль всей трассы с 12:00 до 13:30 UT. Максимальная идентичность профилей с достаточно четко выраженной “долиной” наблюдалось в 13:00 UT, т.е. в момент прохождения линии терминатора вдоль трассы по поверхности Земли, что может служить качественным объяснением регистрации в эксперименте максимума интенсивности нагревного сигнала НС в это же время.

Другая возможностью “запитки” межслоевого ионосферного волновода может реализоваться за счет наличия ионосферных природных плазменных неоднородностей вблизи передающего пункта, либо искусственной

ионосферной турбулентности стимулированной самим НС. Последняя возможность получила название саморассеяния [13, 14, 186, 341]. Далее описан эксперимент по регистрации излучения НС ХАРПП на УАС когда распространение не гидировалось терминатором, однако сигнал с большой вероятностью распространялся межслоевым волноводом [19].

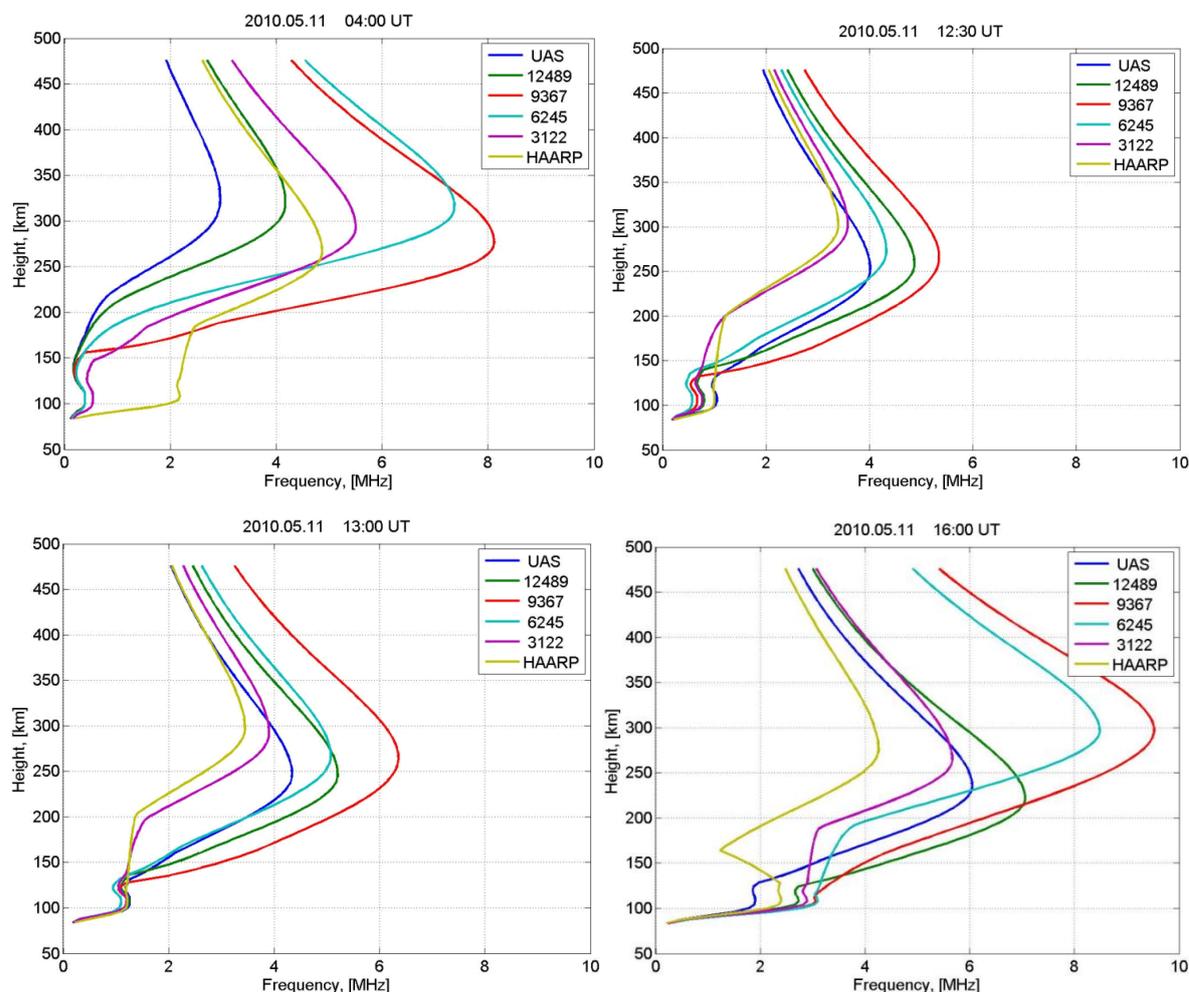


Рисунок 6.23 Высотные профили частоты отражения в 6 эквидистантных точках вдоль трассы распространения сигнала 11.05.10 для моментов времени: 4:00, 12:30, 13:00, 16:00 UT, рассчитанные согласно модели IRI

Измерения осуществлялись 6 августа 2014 г. С 02:55 по 03:15 UT частота НС  $f_h$  с шагом по времени в 2 минуты, а по частоте в 30 кГц изменялась от 5670 до 5940 МГц. При этом каждый 2-х минутный интервал начинался 20 секундной паузой, а затем интенсивность сигнала каждые 10 сек

ступенчато увеличивалась от 10% до 100% мощности НС. Параллельно с регистрацией нагревного сигнала на УАС, вблизи НС фиксировалось искусственное радиоизлучение ионосферы (ИРИ) [369]. Спектральная структура ИРИ характеризуется амплитудами сдвинутого вниз по частоте весьма узкополосного максимума (СВМ – downshifted maximum, DM) и широкого, сдвинутого вверх максимума (ШСВМ - broad upshifted maximum, BUM). Характерный вид СВМ и ШСВМ показан на рисунке 6.24, который демонстрирует спектры мощности, построенные для диапазона  $-50 \div +150$  кГц относительно частоты нагревного сигнала НААРР. Измерения выполнены при излучении нагревной частоты 5.67 МГц. СВМ сдвинут относительно нагревной частоты на -10 кГц. ШСВМ наблюдается в диапазоне частот  $+30 \div +130$  кГц.

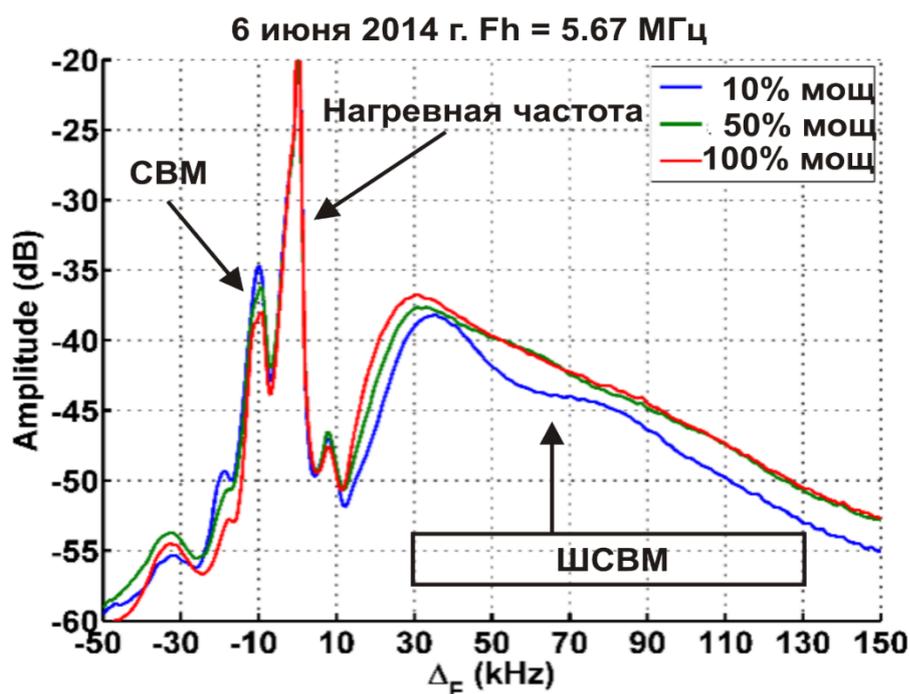


Рисунок 6.24 – Спектры мощности сигнала НААРР (06/06/2014, частота нагрева 5.67 МГц), построенные для различных уровней мощности нагрева

Данные усреднялись в пределах 10-секундных интервалов с постоянной эффективной излучаемой мощностью (синяя линия – 10% от максимальной

мощности НААРР, зеленая – 50%, красная – 100%). Видно, что при превышении 50% мощности НААРР достигается насыщение спектральной зависимости ИРИ, когда дальнейшее увеличение уровня сигнала накачки не изменяет форму спектра.

Для изучения поведения амплитуд СВМ и ШСВМ были проанализированы спектры ИРИ для всех 10-ти зондирующих частот (в диапазоне 5670 ÷ 5940 кГц) и определены их зависимости от частоты НС. Эти результаты приведены на рис. 6.25.

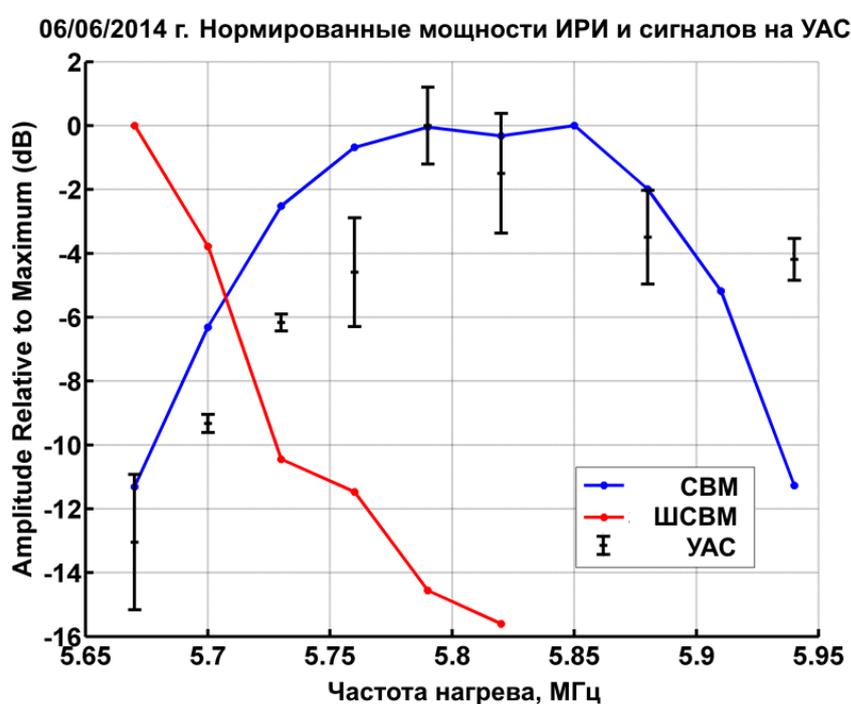


Рисунок 6.25 – 06/06/2014 г. Нормированные на максимум амплитуды ИРИ, измененные вблизи НААРР (ШСВМ – красная кривая, СВМ – синяя кривая) совместно с относительными амплитудами сигнала на несущей частоте НС, наблюдавшимися на УАС (доверительные 95% интервалы показаны черными вертикальными отрезками)

Как видно из рисунка амплитуда ШСВМ монотонно уменьшается, что приводит к полному исчезновению максимума при частоте НС 5850 кГц. Для

объяснения этого факта отметим, что скорость роста ШСВМ, согласно [370] может быть оценена как  $\gamma \sim 1/\sqrt{f_{UH}^2 - f_{EB}^2}$ . В нашем случае частота верхнего гибридного резонанса равна частоте нагрева  $f_{UH} = f_h$ , что позволяет оценить амплитуду ШСВМ как  $\gamma \sim 1/(f_h - 4f_{cb})$ . Поскольку при этом всегда выполняется соотношение  $f_h > 4f_{cb}$ , так как  $4 \cdot f_{ce} \approx 5.6 \text{ МГц}$ , то амплитуда ШСВМ постоянно убывает. Здесь:  $f_{cb}$  - гирочастота электронов,  $f_{EB}$  - электронная частота Бернштайна.

При интерпретации экспериментальной зависимости поведения СВМ воспользуемся тем, что согласно данным литературы [371] СВМ исчезает на частоте гирогармоник, после чего с ростом частоты нагревного излучения его амплитуда увеличивается. Это объясняет наблюдаемый в эксперименте рост амплитуды СВМ вплоть до  $f_h = 5850 \text{ кГц}$ . При дальнейшем увеличении частоты нагрева частота волны накачки становится больше критической для слоя F<sub>2</sub> ионосферы, что приводит к уменьшению эффективности нагрева, а, следовательно, и амплитуды СВМ.

Амплитуда сигнала НААРР, принятого на УАС ведет себя подобно величине СВМ. При интерпретации этой зависимости рассмотрим возможные способы распространения сигналов по сверхдальней трассе НААРР – УАС. При скачковом механизме распространения сигналы, попадают в приемный пункт после нескольких отражений от ионосферы и земной поверхности вдоль трассы распространения. Характеристики таких сигналов зависят от параметров ионосферы во всех точках отражения, т.е. определяются условиями распространения вдоль всей радиолинии. При распространении сигнала в межслоевом волноводе влияние условий на трассе распространения минимально. Поэтому свойства сигнала в точке приема будут определяться в основном областью ИИТ, расположенной над НС. Анализ изменения интенсивности ВЧ сигнала, принятого на УАС свидетельствует в пользу преобладания волноводного механизма распространения. Действительно,

относительно незначительные изменения частоты нагрева (от 5670 кГц в начале до 5940 кГц в конце измерений) не должны существенно влиять на интенсивность сигнала при скачковом механизме и тем более приводить к немонотонной зависимости интенсивности от времени. В то же время данные измерений ИРИ показывают, что наблюдаемая на УАС вариация интенсивности излучения НС может быть связана с изменением характеристик рассеивателей в области ИИТ. В диапазоне частот 5670-5850 кГц, когда в спектре ИРИ преобладает ШСВМ в ИИТ, генерируются в основном сверхмалые неоднородности (масштаб порядка 10 см) которые не могут эффективно рассеивать сигналы декаметрового излучения НС. На частоте 5850 кГц регистрируется рост СВМ, который сопровождается развитием интенсивных плазменных неоднородностей с характерным масштабом 7-30 м [372]. Такие неоднородности гораздо более эффективно рассеивают сигналы НС, “запыхивая” в частности волноводный канал, что приводит к увеличению интенсивности сигнала на контрольной сверхдлинной радиолинии НААРР- УАС. Наконец, при еще большем увеличении частоты НС, когда интенсивность СВМ уменьшается из-за превышения частоты сигнала накачки уровень критической частоты слоя  $F_2$  эффективность нагрева, интенсивность неоднородностей, мощность рассеяния на них резко падают и, следовательно, амплитуда сигнала, измеренного на УАС, уменьшается. Эффект канализации энергии в волноводе исчезает. Таким образом, можно управляемым образом “запыхивать” межслоевой ионосферный волновод, оптимизируя условия распространения ВЧ сигналов на сверхдальних радиолиниях.

#### Выводы Раздела 6

В разделе 6 представлены результаты и методики радиодиагностики низкочастотных ионосферных процессов полученные при помощи экспериментальных установок, описанных в разделе 2 и данных рутинных

измерений стандартных региональных сетей ГНСС приемников. Основные результаты раздела состоят в следующем:

Предложен новый механизм и физическая модель радиального дрейфа плазмы в модифицируемой ВЧ нагревом области ионосферы. Выполненные численные расчеты и их соответствие данным измерений, подтвердили адекватность модели и позволили определить параметры дрейфа, а именно: в диапазоне поперечных масштабов МОН от 5 до 15 м скорость радиальных движений не зависит от масштаба неоднородностей и составляет величину 2-4 м/сек; расщепление достигает стационарного значения через несколько десятков секунд после включения нагрева и остается неизменным до его выключения; для коротких нагревов (10-15 сек) на этапе релаксации МОН происходит изменение направления радиального дрейфа (сжатие области); для длинных нагревов (несколько минут - десятки минут) изменение направления движения неоднородностей на фазе релаксации не выявлено; расщепление наблюдается более чем в половине сеансов ионосферной модификации и не требует специфических условий для возникновения.

Область ИИТ может рассматриваться как удобный индикатор динамики поведения ионосферной плазмы, позволяющий идентифицировать низкочастотные ионосферные процессы такие, как дрейфовые движения и волновые возмущения (ПИВ/АГВ, МГД волны). При участии автора разработаны и апробированы новые методики диагностики этих процессов использующие данные многопозиционного и многочастотного приема ВЧ сигналов, ракурсно рассеянные в ИИТ. Эти методики позволяют восстанавливать скорости плазменных возмущений и вариации электрических полей на ионосферных высотах.

Представлена новая методика картографирования вариаций полного электронного содержания ионосферы по данным рутинных измерений региональных сетей ГНСС приемников. Ее эффективность подтверждена региональными пространственно-временными распределениями ПЭС, восстановленными для различных уровней геомагнитной возмущенности.

Полученные результаты позволили определить динамику поведения, пространственные и временные характеристики волновых возмущений ионосферы, а также возможные источники возмущений.

При проведении специальных экспериментов по приему ВЧ сигналов крупнейшего нагревного стенда HAARP изучены механизмы распространения на сверхдальние расстояния. Путем модельных оценок и сопоставления данных многопозиционного и многочастотного приема сигналов НС подтверждена возможность распространения ВЧ сигналов на глобальные расстояния по межслоевому ионосферному волноводу, а также выделены ионосферные условия благоприятные для реализации такого механизма. Установлены оптимальные режимы нагрева для эффективной “запитки” межслоевого ионосферного волновода.

## ВЫВОДЫ

Основные результаты диссертационной работы состоят в следующем:

1. Впервые реализован оригинальный подход использования природных электромагнитных резонаторов Земли в роли "индикаторов" состояния космической погоды. В рамках этого подхода установлены реакции шумановского и ионосферного альфвеновского резонаторов на регулярную и спорадическую активности в полном 11-ти летнем солнечном цикле. Разработаны упрощенные физические модели, объясняющие механизмы взаимодействия радиационных и корпускулярных потоков солнечной энергии с околоземной плазмой. Диагностированы возмущения в околоземном пространстве, стимулированные спорадической солнечной активностью.

2. Построена и введена в эксплуатацию глобальная сеть Интернет - управляемых приемных систем УНЧ, СНЧ и ВЧ диапазонов для дистанционной диагностики ионосферы и глобальной грозовой активности. Приемные комплексы, расположенные в Украине, Антарктиде, Арктике, Африке и в Сибири и работают в непрерывном режиме. Создана уникальная многолетняя база данных многопозиционных наблюдений, которая используется для моделирования процессов в околоземном плазменном окружении Земли учеными Украины, США и Европы.

3. Проведено картографирование сверхмощных молниевых разрядов с использованием данных синхронных трехпозиционных наблюдений СНЧ шумов на двух антарктических станциях и обсерватории в Японии. При выполнении картографирования разработана и применена оригинальная методика поляризационной пеленгации источников, учитывающая гиротропию ионосферы. Показано, что наибольшее количество экстремально сильных разрядов сосредоточено вблизи экваториальных центров мировой грозовой активности. Данные такого картографирования верифицированы

путем их сравнения с результатами глобального спутникового мониторинга молниевых разрядов.

4. Экспериментально обнаружен и исследован новый эффект "расщепления" спектральных максимумов ионосферного альфвеновского резонанса, определены условия его возникновения, предложены возможные механизмы, объясняющие обогащение модового состава резонатора. Установлена и апробирована в различных регионах земного шара новая методика, позволяющую рассчитывать критическую частоту ионосферного слоя F2 по данным мониторинга характеристик ИАР в любом регионе планеты.

5. Разработана и реализована новая методика спектрально-поляризационной диагностики в Антарктиде уровней "паразитного" излучения систем, генерирующих потребляющих и транспортирующих электроэнергию в промышленно развитых регионах земного шара. На годовом массиве данных непрерывных измерений мощности излучения линий электропередач с частотой 60 Гц продемонстрирован "weekend" эффект в поведении уровней континентального энергопотребления. Зарегистрирована крупная авария мощнейшей энергосети США - Канада и проанализирована динамика ее развития. Оценен уровень загрязнения электромагнитного окружения Антарктики излучением энергосетей других континентов.

6. Впервые область искусственной ионосферной турбулентности, созданная мощным ВЧ нагревом на частоте вблизи четвертой гирогармоники электронов, использованная для управляемой "запитки" межслоевого (E - F) ионосферного волновода. Пространственно-временные свойства искусственной ионосферной турбулентности контролировались изменениями уровня сигнала "накачки" в Антарктиде и динамикой спектра стимулированного электромагнитного излучения вблизи нагревного стенда HAARP, расположенного на Аляске. Установлена зависимость между неоднородностями метровых-декаметровых масштабов и спектральной структуре стимулированной электромагнитной эмиссии ионосферы.

7. Впервые данная физическая интерпретация низкочастотного эффекта "расщепления" спектра пробного ВЧ сигнала, рассеянного на искусственной ионосферной турбулентности. Построена модель радиального дрейфа стимулированных неоднородностей от центра к периферии нагретой области, оценены скорости их движения в условиях стационарного нагрева ионосферы и на стадии релаксации.

8. Разработана и реализована оригинальная методика построения региональных карт вариаций полного электронного содержания по данным "региональных" сетей ГНСС приемников, которая позволила выявлять и наглядно отобразить природные низкочастотные возмущения в геокосмосе на ионосферных высотах, такие как атмосферные гравитационные волны, и исследовать источники их возбуждения: солнечный терминатор, магнитные бури и сопровождающие их высыпания энергичных частиц из радиационных поясов Земли.

9. Создано и внедрено в эксплуатацию аппаратно-программное обеспечение для шести радиофизических сенсоров "Комплекса электромагнитного зондирования окружающего пространства" Низкочастотной обсерватории РИ НАНУ, которая является объектом национального достояния Украины. Обеспечено непрерывное многолетнее функционирование Комплекса в режиме Интернет - доступа, обработки и отображения данных в реальном времени на WEB - сайте <<http://geospace.com.ua>>

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 
1. Определение местоположений сверхмощных молниевых разрядов на основе поляризационных магнитных измерений в диапазоне шумановских резонансов / А.В. Колосков, О.В. Буданов, В.Г. Безродный [и др.] // Радиофизика и Радиоастрономия. – 2004. – Т. 10, № 4. – С. 391–403.
  2. Поляризационный мониторинг шумановских резонансов в Антарктике и восстановление характеристик мировой грозовой активности / А.В. Колосков В.Г. Безродный, О.В. Буданов [и др.] // Радиофизика и Радиоастрономия. – 2005. – Т. 10, № 1. – С. 11-29.
  3. The ELF Band as a Possible Spectral Window for Seismo-Ionospheric Diagnostics / V. Bezrodny, O. Budanov, A. Koloskov [et al.] // Sun and Geosphere. – 2007. – V. 2, N 2. – P. 34-39.
  4. 11-year solar cycle in Schumann resonance data as observed in Antarctica / A.P. Nickolaenko, A.V. Koloskov, M. Hayakawa [et al.] // Sun and Geosphere, – T.15, №1, – 2015, – P. 39-49.
  5. Effects of Energetic Solar Emissions on the Earth–Ionosphere Cavity of Schumann Resonances /G. Satori, E. Williams, C. Price [et al.]// Surv Geophys, Published online: 28 March 2016. – P. 1-33 DOI 10.1007/s10712-016-9369-z.
  6. Baru N.A. Observations and analysis of the Ionospheric Alfvén resonance mode structure in a complete 11-year solar cycle / N.A. Baru, A.V. Koloskov, Y.M. Yampolsky [et al.] // Sun and Geosphere. – T.16, №1. – 2016, P. 49-54.
  7. Koloskov O. Using the electronic geophysical database from station Akademik Vernadsky for the analysis of Alfvén resonance observations / O. Koloskov// Міжнародна наукова конференція "Україна в Антарктиці – національні пріоритети і глобальна інтеграція" ІАС2008, Тези, , 23-25 травня 2008 року, м. Київ, Україна. – С. 58.

- 
8. Колосков А.В. Наблюдения излучения энергосистем Североамериканского континента в Антарктике / А.В. Колосков, Ю.М. Ямпольский // Радиоп физика и радиоастрономия. – 2009. – Т. 14, № 4. – С. 367-376.
  9. Глубинные электромагнитные зондирования литосферы восточной части Балтийского (Фенноскандинавского) щита в поле мощных контролируемых источников и промышленных ЛЭП (эксперимент “FENICS”) / А.А. Жамалетдинов, А.Н. Шевцов, Т.Г. Короткова [и др.] // Физика Земли. – 2011. – № 1. – С. 1–23.
  10. Study of Interaction of ELF–ULF Range (0.1–200 Hz) Electromagnetic Waves with the Earth’s Crust and the Ionosphere in the Field of Industrial Power Transmission Lines (FENICS Experiment) / A.A. Zhamaletdinov, A.N. Shevtsov, E.P. Velikhov [et al.] // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. – 2015. – Vol. 51, No. 8, P. 826–857. – ISSN 0001-4338.
  11. Вариации СДВ радиосигналов при восходе солнца в Антарктиде / Р.С. Шубова, В.Г. Безродный, А.В. Колосков [и др.] // Радиоп физика и Радиоастрономия. – 2000. – Т. 5, № 4. – С. 337-347.
  12. Frequency-and-angular HF sounding and ISR diagnostics of TIDs / V.G. Galushko , V.S. Beley, A.V. Koloskov [et al.] // *Radio Science*. – vol. 38, №. 6. – 2003. – P. 1102-1112. doi: 10.1029/2002/RS002861.
  13. О возможном механизме «эффекта саморассеяния» мощных ВЧ сигналов в ионосфере / В.Г. Галушко, В.Г. Безродный, А.В. Колосков [и др.] // Радиоп физика и Радиоастрономия. – 2012. – Т. 17, № 2. – С. 112-124.
  14. HF wave scattering by field-aligned plasma irregularities considering refraction in the ionosphere / V.G. Galushko, V.G. Bezrodny, A.V. Koloskov [et al.] // *Radio Science*. – 2013. – V 48. – P. 180–189. doi: 10.1029/2012RS005072.
  15. Optical and RF diagnostics of the ionosphere over the Sura facility: Review of results./ L.M. Kagan, M.J. Nicolls, M.C.Kelley [et al.] // Радиоп физика и Радиоастрономия. – 2006. – Т. 11, № 3. – С 221-241.

- 
16. Bistatic HF diagnostics of TIDs over the Antarctic Peninsula / V.G. Galushko, A.S. Kashcheyev, S.B. Kashcheyev [et al.] // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. – 2007. – № 69. – P. 403-410.
17. Self-Scattering of the HF Heater Emissions Observed at Geographically Dispersed Receiving Sites / V.G. Galushko, A.V. Koloskov, V.V. Paznukhov [et al.] // *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. – 2008. – V. 50, № 6. – P. 155-161.
18. Экспериментальные исследования спектральных характеристик КВ сигналов на дальних и сверхдальних трассах / С.Б. Кащеев, А.В. Колосков, А.В. Зализовский [и др.] // *Радиофизика и Радиоастрономия*. – 2009. – Т. 14, № 1. – С. 12-25.
19. Studies of the ionospheric turbulence excited by the fourth gyroharmonic at HAARP. / A. Najmi, G. Milikh, Y.M. Yampolski [et al.] // *J. Geophys. Res. Space Physics*. – 2015. – V. 120, T. 8. – С. 6646–6660. doi:10.1002/2015JA021341.
20. A New Approach to HF Sounding and Visualization of Wavelike Ionospheric Disturbances / V.S. Beley, V.G. Galushko, A.V. Koloskov [et al.] // *XXV General Assembly of URSI, August 17-24*. – 2002. – Maastricht, P. 109.
21. Spatial features of Doppler spectra from HF heaters / V.G. Galushko, K. Groves, A.V. Koloskov [et al.] // *XXIX URSI General Assembly, August 7-16, 2008: Abstracts*. Chicago, Illinois, USA. – 2008. – P. 263.
22. Двухпозиционное КВ рассеяние взволнованной морской поверхностью. Часть 2, эксперимент / А.С. Кащеев, С.Б. Кащеев, А.В. Колосков [и др.] // *Радиофизика и Радиоастрономия*. – 2003. – Т. 8, № 3. – С. 242-252.
23. Доплеровская селекция КВ-радиосигналов на сверхдальних трассах. / А.В. Зализовский, В.Г. Галушко, А.С. Кащеев [и др.] // *Геомагнетизм и астрономия*. – 2007. – Т. 47, № 5. – С. 674-684.
24. О форме пространственного спектра искусственных ионосферных неоднородностей, возбуждаемых мощным КВ радиоизлучением / Е.Н. Мясников, Н.В. Муравьева, Е.Н. Сергеев [и др.] // *Известия ВУЗОВ Радиофизика*. – 2001. – Т. 44, № 11. – С. 903-917.

- 
25. Probing of medium-scale traveling ionospheric disturbances using HF-induced scatter targets / N.F. Blagoveshchenskaya, T.D. Borisova, V.A. Kornienko [et al.] // *Annales Geophysicae*. – 2006. – № 2. – P. 2333–2345.
26. Бару Н.А. / Методика оценки критической частоты слоя F2 по разности собственных частот ионосферных альфвеновских резонансов. / А.В. Колосков, Ю.М. Ямпольский, А.Ю. Пашинин // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2014. – Т. 19, № 2, С. 151 – 159.
27. Measurements of TIDs parameters based on dense national GNSS networks in Central Europe [Electronic resource] / G. Nykiel, M. Figurski, A.V. Koloskov [et al.] // *EUREF 2016 Symposium, Donostia San Sebastian May 25th – 27th*. – 2016. – P. 1.
28. Радиальный дрейф искусственной ионосферной турбулентности поперек геомагнитного поля / А.В. Колосков, В.С. Белей, Лейзер Т.Б [и др.] // *Радиофизика и Радиоастрономия*. – 1999. –Т. 4, № 3. – С. 247 – 260.
29. HF pump-induced scale radial drift of small scale magnetic field-aligned density striation / A.V. Koloskov, T.B. Leiser , Yu.M. Yampolski // *Journal of Geophysical Research*. – 2002. – V. 107, № A7. – P. 1726 – 1735.
30. Electromagnetic pump-excited large scale motion of small scale magnetic field-aligned density irregularities transverse to the magnetic field in the ionosphere / A.V. Koloskov, T.B. Leyser, Yu.M. Yampolski [et al.] // *2000 International Congress on plasma physics (October 23-27, 2000, Quebec City, Canada), Abstracts of contributed papers*. – P. 96.
31. Сеть Интернет-управляемых ВЧ приемников для ионосферных исследований / А.В. Колосков, Ю.М. Ямпольский, А.В. Зализовский [и др.] // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2014. – Т. 19, № 4, С. 324 – 335.
32. Koloskov A.V. / Internet controlled HF receiver for ionospheric research in polar regions / A.V. Koloskov // *International Antarctic Conference IAC2009. International Polar Year in Ukraine: results and horizons. May 22-24, 2009 – Kharkiv, Ukraine, P.24.*

- 
33. Creation of a multi-position system of HF diagnostics of dynamic processes in the polar ionosphere / A.V. Koloskov, Y.M. Yampolsky, C. La Hoz [et al.] // International School-Conference. Remote Radio Sounding Of The Ionosphere. Book of abstracts. Maly Mayak (Big Alushta), Crimea, Ukraine. September, 30 – October, 4. – 2013. – P. 32.
34. Низкочастотная обсерватория РИ НАН Украины – полигон для исследования электромагнитного климата Земли / А.В. Колосков, А.С. Кащеев, Л.Н. Литвиненко [и др.] // Друга Всеукраїнська конференція з запрошенням закордонних учасників: “Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки GEO-UA 2010”. Матеріали доповідей, м. Київ, 14 –17 червня 2010 р. – С. 80-81.
35. Колосков А.В. / Низкочастотные электромагнитные поля в околоземном пространстве. (Лекция) / А.В. Колосков, Ю.М. Ямпольский // Международная байкальская молодежная научная школа по Фундаментальной физике. БШФФ-2011, “Взаимодействие полей и излучения с веществом”, 19-24 сентября, Иркутск 2011. Тезисы докладов. – С. 6.
36. Koloskov A.V. / Long-term monitoring of the Schumann resonance signals from Antarctica [Electronic resource] / A.V. Koloskov, O.V. Budanov, Yu.M. Yampolski // XXXI General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science Union Radio Scientifique Internationale, August 17-23, 2014 Beijing, China, (CIE). – 4 p., 978-1-4673-5225-3/14/\$31.00 ©2014 IEEE.
37. Global Circuit Response to the 11-Year Solar Cycle: Changes in Source or in Medium? [Electronic resource] / E. Williams, A. Guha, R. Boldi [et al.] // XV International Conference on Atmospheric Electricity, 15-20 June 2014; Norman, Oklahoma, U.S.A. – 2014. –12 p.
38. Investigations of HAARP emission on super long radio paths (review) [Electronic resource] / Y. Yampolski, A. Zalizovski, A. Koloskov [et al.] // Bridging the gap between applications and research involving ionospheric and space weather disciplines: 14th International Ionospheric Effects Symposium IES-2015: 12-14

---

May 2015 CrownePlaza Hotel, Old Town, Alexandria, VA, USA. Proceedings.; review. – Alexandria., 2015. – 8 p.

39. en.wiktionary.org [электронный ресурс] A multilingual free encyclopedia / Geospace. Режим доступа: <https://en.wiktionary.org/wiki/geospace> (дата обращения: 15.05.2016).

40. Сергеев В.А Магнитосфера Земли / В.А. Сергеев, Н.А. Цыганенко – М.: Наука, 1980. - 173 с.

41. Казимировский Э.Л. Движения в ионосфере / Э.Л. Казимировский, В.Д. Кокоуров // Новосибирск: Наука, 1979. – 334 с.

42. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы / Л.Ф. Черногор // Радиофизика и радиоастрономия. – 2003. - Т. 8, № 1,- С. 59 – 106.

43. Связь атмосферной и космической погодных систем / Ю.М. Ямпольский, А.В. Зализовский, Е.М. Занимонский, [и др.] // Космічна наука і технологія – 2008. – Т. 14, № 5. – С. 6-36.

44. Черногор Л. Ф. Физика и экология катастроф [Монография] / Л.Ф. Черногор. – Х.: ХНУ имени В.Н. Каразина. - 2012. – 556 с.

45. Харгривс Дж.К. Верхняя атмосфера и солнечно-земные связи (Введение в физику околоземной космической среды) / Дж. К. Харгривс – Ленинград: Гидрометеиздат. – 1982. – 290 с.

46. Черногор Л. Ф. Физика геокосмических бурь [Монография] / Черногор Л.Ф., Домнин И.Ф. – Х.: ХНУ им. В.Н. Каразина, Институт ионосферы НАН и МОН Украины. – 2014. – 408 с.

47. Heikkila W. Earth's Magnetosphere / Heikkila W. – Elsevier Science. –2011. – 536 p.

48. Kivelson M.G. Coupling of global magnetospheric MHD eigenmodes to field line resonances / M.G. Kivelson, D.J. Southwood // J.Geophys.Res. – 1986. – Vol. 91,P. 4345.

49. Гульельми А.В. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы / А.В. Гульельми, В.А. Троицкая – М.: «Наука». – 1973. – 208 с.

- 
50. Cárdenasa F.M. / The grand aurorae borealis seen in Colombia in 1859 / F.M. Cárdenasa, S.C. Sánchez, S.V. Domínguez // *Advances in Space Research* 57 (1). – 2016. – P. 257–267. doi:10.1016/j.asr.2015.08.026.
51. Брюнелли Б. Е. Физика ионосферы / Б.Е. Брюнелли, А. А. Намгаладзе – М.: Наука. – 1988. – 528 с.
52. Davies K. *Ionospheric Radio* / K. Davies – Peter Peregrinus Ltd., London, UK, 1990. – 580 p.
53. Silberstein R. The Current Nomenclature of the Ionospheric Layers / R. Silberstein – *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1959. – Vol. 13. – P. 382.
54. Gardner F.F. / Study of the ionospheric D-region using partial reflections / F.F. Gardner, J.L. Pawsey // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1953. – Vol. 3, № 8. – P. 321-324.
55. Гармаш К.П. / Профили электронной концентрации D-области ионосферы в спокойных и возмущенных условиях по данным частичных отражений / К.П. Гармаш, Л.Ф. Черногор // *Геомагнетизм и аэрономия.* – 1996. – Т. 36. № 2. – С. 75-81.
56. Беликович В.В. / Исследование ионосферы методом частичных отражений / В.В. Беликович, В.Д. Вяхирев, Е.Е. Калинина // *Геомагнетизм и аэрономия.* – 2004. – Т. 44, № 2. – С. 189–194.
57. Little C.G. / The Riometer A Device for the Continuous Measurements of Ionospheric Absorption / C.G. Little, H. Leinbach // *Proc. IRE.* – 1959. – № 47. – P. 315.
58. Беликович В.В. / Исследование нижней части D области ионосферы с помощью искусственных периодических неоднородностей / В.В. Беликович, Е.А. Бенедиктов // *Изв. вузов. Радиофизика.* – 1986. – Т. 29, № 11. – С. 1283 – 1296.
59. Kennelly A.E. On Elevation of Electrically Conducting Strata of the Earth's Atmosphere / A.E. Kennelly // *Electr. World and Eng.* – 1902. – № 15, – P. 473.
60. Heaviside O. / *Telegraphy* / O. Heaviside // *Enciclopedia Britannica*, 10<sup>th</sup> ed. – 1902. – № 33 – P. 215.

- 
61. Акасофу С.И. Солнечно-земная физика / С.И. Акасофу, С. Чепмен – Ч.1. – М.: Мир. – 1974. – 382 с.
62. Акасофу С.И. Солнечно-земная физика / С.И. Акасофу, С. Чепмен – Ч.2. – М.: Мир. – 1975. – 504 с.
63. Гершман Б.Н. Динамика ионосферной плазмы / Б.Н. Гершман – М.: Наука. – 1974. – 256 с.
64. Кореньков Ю.Н. Влияние движений в нейтральной атмосфере на сезонно-суточное поведение слоя  $E_s$ . / Ю.Н. Кореньков // Геомагнетизм и Аэронавигация. – 1979. – Т. 19, № 1. – С. 27 – 33.
65. Кореньков Ю.Н. Формирование и динамика слоя металлических ионов под действием нестационарной зональной компоненты нейтрального ветра / Ю.Н. Кореньков // Ионосферные исследования. М.: Наука. – 1987. – № 42., С. 81 – 89.
66. Kohl H. Atmospheric winds between 100 and 700 km and their effects on the ionosphere / H. Kohl, J.W. King // J. Atmos. Terr. Phys. – 1967. – V.29. – P. 1045 – 1062.
67. Сомсиков В.М. Солнечный терминатор и динамика атмосферы. / В.М. Сомсиков // Алма-Ата: Наука Каз. ССР. – 1983. – 192 с.
68. Holton J.R. An Introduction to Dynamic Meteorology. 5<sup>th</sup> edition, Elsevier / J.R. Holton, G.J. Hakim. – 2013. – 532 p.
69. Francis S.H. / Global propagation of atmospheric gravity waves: a review / S.H. Francis // Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics. – 1975. – Vol. 37. – P. 1011-1054.
70. Beley V.S. / Traveling ionospheric disturbance diagnostics using HF signal trajectory parameter variations / V.S. Beley, V.G. Galushko, Y.M. Yampolski // Radio Sci. – 1995. – Vol.30, №6. – P.1739-1752.
71. Гуревич А.В. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере / А.В. Гуревич, Б.А. Шварцбург // Москва: Наука. – 1973. – 272 с.
72. Bauer P. / Theory of waves incoherently scattered / P. Bauer // Phil. Trans. Roy. Soc. London. F. – 1975. – Vol. 280. – P. 167–191.

- 
73. Studies of the ionosphere and neutral atmosphere using artificial periodic inhomogeneities in the ionospheric plasma / N.V. Bakhmet'eva, V.V. Belikovich, E.A. Benediktov [et al.] // *Radio Sci.* – 1998. – Vol. 33. № 3. – P. 583–595.
74. Атмосфера. Справочник (справочные данные, модели) / [Ред. коллегия: Ю.С. Седунов, С.И. Авдюшин, Е.П. Борисенков [и др.] – Ленинград: Гидрометеоиздат. – 1991. – 509 с.
75. Блюх П.В. Глобальные электромагнитные резонансы в полости Земля – ионосфера / П.В. Блюх, А.П. Николаенко, Ю.Ф. Филиппов // Киев: Наукова Думка. – 1977. – 199 с.
76. Nickolaenko A.P. Resonances in the Earth-ionosphere Cavity / Nickolaenko A.P., M. Hayakawa // *Kluwer Academic Publishers, Dordrecht* – 2002.
77. Nickolaenko A.P. / Schumann resonance for tyros: Essentials of global electromagnetic resonance in the Earth–ionosphere cavity / A.P. Nickolaenko, M. Hayakawa // *Springer Geophysics Series XI.* – 2014. – P. 348.
78. Belyaev P.P. / First evidence at high latitude for the ionospheric Alfvén resonator / P.P. Belyaev, T. Bosinger, S.V. Isaev, J. Kangas // *J.Geophys.Res.* – 1999. – Vol. 104, P. 4305.
79. Surkov V. Ultra and Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields / V.Surkov, Hayakawa M. // *Springer Geophysics.* – 2014. – 486 p. doi:10.1007/978-4-431-54367-1.
80. Чижевский А.Л. Эпидемиологические катастрофы и периодическая деятельность Солнца / А.Л. Чижевский – Москва. – 1930. – 334 с.
81. Love J.J / The USGS Geomagnetism Program and Its Role in Space Weather Monitoring / J.J. Love, C.A. Finn // *Space Weather.* – 2011. – № 9. – S07001. doi:10.1029/2011SW000684.
82. Love J.J / An International Network of Magnetic Observatories/ J.J. Love, A. Chulliat // *Eos Trans. AGU.* – 2013. – V. 94, № 42. – P. 373-384.
83. Pfaff R.F. Measurement Techniques in Space Plasmas / R.F. Pfaff, J.E. Borovsky, D.T. Young // *AGU.* – 1998. – P. 355.

- 
84. The Large Angle Spectroscopic Coronagraph (LASCO). / G.E. Brueckner , R.A. Howard, M.J. Koomen // Solar Physicas. – 1995. – V. 162, n. 1. – P 357-402.
85. The NOAA Goes-12 Solar X-Ray Imager (SXI) 1. Instrument, Operations, and Data. / S.M. Hill, V.J. Pizzo , C.C. Balch [et. al] //. Solar Physicas. – 1995. – V. 226, n. 2. – P 255-281.
86. The future of NPOESS: results of the NUNN–MCCURDY review of NOAA’s weather satellite program / Committee on Science House of Representatives, one hundred ninth congress. Second session. – June 8, 2006. – Serial . № 109–53, 86 p.
87. National Environmental Satellite Data and Information Service News Release, “The National Polar-orbiting Operational Satellite System (NPOESS),” Public Affairs, 6 January 1999, p. 1
88. The Optical Transient Detector (OTD) / H.J. Christian , K.T. Driscoll, S.J. Goodman [et. al] // Proceedings of the 10th International Conference on Atmospheric Electricity. Osaka, Japan, June 10-14. 1996; Osaka. – 1996. – P. 368-371.
89. The Lightning Imaging Sensor / H.J. Christian, R.J. Blakeslee, S.J. Goodman [et. al] // Proceedings of the 11th International Conference on Atmospheric Electricity. Guntersville, Alabama. June 7 – 11, 1999; Alabama. – 1999. – P. 746–749.
90. Bibl K. / The Universal Digital Ionosonde / K. Bibl , B.W. Reinisch // Radio Science. – 1978. – Vol. 13, № 3. – P. 519 –530.
91. Reinisch B.W. / Global Ionospheric Radio Observatory (GIRO) / B.W. Reinisch, I.A. Galkin // Earth Planets Space. – 2011, Vol. 63. – P. 377–381.
92. Эванс Дж.В. / Теоретические и практические вопросы исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн / Дж.В. Эванс // ТИИЭР. – 1969. – Т.57, №4. – С. 139-175.
93. Farley D.T. / Incoherent Scatter Radar Probing. p. 415-439// in book. H. Kohl, R. Ruster, K. Schlegel // Modern Ionospheric Science. – 1996. European Geophysical Society, Katlenburg-Lindau, FRG. – P. 551 – 568.

- 
94. Дзюбанов Д. А./ Исследование и моделирование вариаций параметров ионосферной плазмы в период минимума 23-го цикла солнечной активности / Д.А. Дзюбанов, М.В. Ляшенко, Л.Ф. Черногор // *Космічна наука і технологія*. – 2008. – Т. 14, № 1. – С. 44 – 56.
95. A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements / A.J. Mannucci, B.D. Wilson, D.N. Yuan [et. al] // *Radio Sci.* – 1998. – Vol.33. – P. 565 – 582.
96. Monitoring ionospheric space weather with the Super Dual Auroral Radar Network (SuperDARN) / J.B.H. Baker, J.M. Ruohoniemi, A.J. Ribeiro [et. al] // *Proceedings of the 2010 IEEE Radar Conference*. – 2010. – P. 1414 – 1417 ISBN 978-1-4244-5811-0, ISSN 1097-5659.
97. Электромагнитное окружение Земли в СНЧ-диапазоне / В.Г. Безродный, О.В. Буданов, Колосков А.В. [и др.] // *Космічна наука та технологія*. – 2003. – Т. 9, № 5/6. – С. 117-123.
98. FitzGerald G. F. / On the period of vibration of electrical disturbances upon the Earth / G.F. FitzGerald // *Br. Assoc. Adv. Sci.* – 1893. – Rep. 63. – 682 p.
99. Tesla N. / The transmission of electrical energy without wires as a means of furthering world peace. / N. Tesla // *Electrical World and Engineer*, January 7. – 1905. – P. 21–24.
100. Tesla N. / U.S. Patent No. 787, 412 (April 18, 1905).
101. Jackson J. D. / Examples of the zeroth theorem of the history of science / J.D. Jackson // *American Journal of Physics*. – 2008. – V. 76, N. 8. – P. 704 – 719.
102. Schumann W.O. / Über die strahlungslosen Eigenschwingungen einer leitenden Kugel, die von einer Luftschicht und einer Ionosphärenhülle umgeben ist / W.O. Schumann // *Zeitschrift und Naturforschung 7a*. – 1952. – P. 149 – 154.
103. Balser M. / Measurement of the spectrum of radio noise from 50 to 100 c/s. / M. Balser, C. Wagner // *Journal of Research of the National Bureau of Standards 64D*. – 1960. – P. 415–418 doi:10.6028/jres.064d.050.
104. Jones D.L. / Sending signals to submarines / D.L. Jones // *New Scientist*. 1985. – V. 26. – P. 37-41.

- 
105. Fraser-Smith A.C./ Reception of ELF signals at antipodal distances/ A.C. Fraser-Smith // *Radio Science*. – 1998. – V. 33, № 1. – P. 83 – 88.
106. Greifinger C. / Approximate method for determining ELF eigen-values in the Earth-ionosphere waveguide/ C. Greifinger , P. Greifinger // *Radio Sci.* 1978. – Vol. 13. – P. 831–837.
107. Christian H.J./ (2003), Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector/ H.J. Christian // *J. Geophys. Res.*.. –2003. – 108(D1), P.4005. doi:10.1029/2002JD002347.
108. О возможности выбора модели мировой грозовой активности по наблюдениям шумановского резонанса / В.Н. Бормотов, Б.В. Лазебный, А.П. Николаенко [и др.] // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 1972. – Т. 12, № 1. – С. 135–136.
109. Nickolaenko A.P./ Study of the annual changes of global lightning distribution and frequency variations of the first Schumann resonance mode / A.P. Nickolaenko, L.M. Rabinowicz // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*.. – 1995. – Vol. 57(11). – P. 1345-1348.
110. Parameters of global thunderstorm activity deduced from the long-term Schumann resonance records / A.P. Nickolaenko , G. Sátori, V. Ziegler [et al.] // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*.. –1998. – Vol. 60(3). – P. 387-399.
111. Sátori G./ On the dynamics of the North – South seasonal migration of global lightning / G. Sátori, E.R. Williams, D.J. Boccippio // *AGU Fall Meeting, San Francisco, December 8-12, abstract no.: AE32A-0167*. – 2003.
112. The effect of a gamma ray flare on Schumann resonances / A.P. Nickolaenko, I.G. Kudintseva, O. Pechony [et. al] // *Ann. Geophys.*.. – 2012. – Vol. 30. – P.1321-1329 doi:10.5194/angeo-30-1321-2012.
113. Nickolaenko A.P./ Model variations of Schumann resonance based on Optical Transient Detector maps of global lightning activity / A.P. Nickolaenko, O. Pechony, C. Price // *J. Geophys. Res.*.. – 2006. –Vol. 111. –D23102. doi:10.1029/2005JD006844.

- 
114. Pechony O./ Modeling and simulations of Schumann resonance parameters observed at the Mitzpe Ramon field station (Study of the day-night asymmetry influence on Schumann resonance amplitude records)/ O. Pechony // Ph.D. thesis, Tel-Aviv University, Israel. –2007. – P. 92.
115. Sentman D.D. / Simultaneous observation of Schumann resonances in California and Australia: evidence for intensity modulation by local height of D region/ D.D. Sentman, B.J. Fraser // J. Geophys. Res.. – 1991. – Vol. 96(9). – P. 15973 – 15984.
116. Pechony O./ Relative importance of the day-night asymmetry in Schumann resonance amplitude records/ O. Pechony, C. Price, A.P. Nickolaenko // Radio Sci.. – 2007. – Vol. 42. – RS2S06. doi:10.10212/2006RS003456.
117. Безродный В.Г./ Асимптотическая теория полей шумановских резонансов в гиротропной полости Земля-ионосфера/ В.Г. Безродный // Радиофизика и Радиоастрономия. – 2004. – Вып. 9, № 4. – С. 375 – 390.
118. Bezrodny V.G./ Magnetic polarization of the Schumann resonances: An asymptotic theory / V.G. Bezrodny // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2007. – Vol. 69, № 9. – P. 995-1008. doi: 10.1016/j.jastp.2007.03.007.
119. Williams E.R. / Distinguishing ionospheric models using Schumann resonance spectra / E.R. Williams, V.C. Mushtak, A.P. Nickolaenko // Journal of Geophysical Research. – 2006. – Vol. 111. – D16107. doi:10.1029/2005JD006944.
120. Universal and local time variations deduced from simultaneous Schumann resonance records at three widely separated observatories / A.P. Nickolaenko, E.I. Yatsevich, A.V. Shvets [et. al] // Radio Sci.. – 2011. – Vol. 46. – Williams E.R., Mushtak V.C., Nickolaenko A.P.: RS5003. doi:10.1029/2011RS004663.
121. Shvets A.V. / Global lightning activity on the basis of inversions of natural ELF electromagnetic data observed at multiple stations around the world / A.V. Shvets, M. Hayakawa // Survey Geophys.. – 2011. – Vol. 32(6). – P. 705-732. doi:10.1007/s10712-011-9135-1.

- 
122. Schlegel K. /Schumann resonance parameter changes during high-energy particle precipitation / K. Schlegel, M. Füllekrug // *J. Geophys. Res.*. –1999. – Vol. 104. – P. 10111-10118.
123. Nickolaenko A.P. / Polar non-uniformity of ionosphere related to solar proton events/ A.P. Nickolaenko, L.M. Rabinowicz, A.V. Shvets // *Telecommun Radio Eng.*. – 2008. – Vol. 67(5). P. 413–435.
124. Schumann resonance frequency increase during solar X-ray bursts. / V.C. Roldugin, Y.P. Maltsev, A.N. Vasiljev [et. al] // *J. Geophys. Res.*. –2004. Vol. 109. – A01216. doi: 743 10.1029/2003JA010019.
125. Sători G. / Response of the Earth – ionosphere cavity resonator to the 11-year solar cycle in X-radiation/ G. Sători, E.R. Williams, V. Mushtak // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*. –2005. – Vol. 67. – P. 553-561. doi:10.1016/j.jastp.2004.12.006.
126. Hayakawa M. / Seismo-electromagnetics as a new field of radiophysics: electromagnetic phenomena associated with earthquakes / M. Hayakawa, O.A. Molchanov // *Radio Sci Bull.* – 2007. – Vol. 320. – P. 8 – 17.
127. Hayakawa M./ Anomalous effect in Schumann resonance phenomena observed in Japan, possibly associated with the Chi-chi earthquake in Taiwan / M. Hayakawa, K. Ohta, A.P. Nickolaenko , Y. Ando // *Ann Geophysicae.* –2005. – Vol. 23. – P. 1335–1346.
128. Anomalous ELF phenomena in the Schumann resonance band as observed at Moshiri (Japan) in possible association with an earthquake in Taiwan [Electronic resource] / M. Hayakawa, A.P. Nickolaenko, M. Sekiguchi [et. al] // *Nat Hazards Earth Syst Sci.*. –2008. – Vol. 8. – P. 1309–1316. [www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/8/1309/2008/](http://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/8/1309/2008/)
129. Williams E.R. / The Schumann resonance: A global tropical thermometer / E.R. Williams // *Science.* – 1992. – Vol. 256. –P. 1184-1187.
130. Climate sensitivity: Analysis of feedback mechanisms/ J. Hansen, A. Lacis, D. Rind [et. al] // In J. E. Hansen and T. Takahashi, eds. *Climate Processes and Climate Sensitivity.* – 1984. – AGU Geophysical Monograph Series 29. – P. 130–163. doi:10.1029/gm029p0130.

- 
131. Rind D./ Just add water vapor/ D. Rind // *Science* 28. –1998. – Vol. 5380. – P. 1152–1153. doi:10.1126/science.281.5380.1152.
132. Price C. / Evidence for a link between global lightning activity and upper tropospheric water vapor / C. Price // *Nature*. – 2000. – Vol. 406 (6793). – P. 290–293. doi:10.1038/35018543.
133. Ogawa T. / Observations of natural ELF and VLF electromagnetic noises by using ball antennas / T. Ogawa, Y. Tanaka, T. Miura [et al.] // *J Geomagn Geoelectr.* – 1966. – Vol. 18. – P. 443–454.
134. Füllecrug M. / Global triangulation of intense lightning discharges / M. Füllecrug, S. Constable // *Geophys. Res. Lett.* – 2000. – Vol. 27. – P. 333-336.
135. Validation of sprite-inducing cloud-to-ground lightning based on ELF observations at Syowa station in Antarctica/ M. Sato, H. Fukunishi, M. Kikuchi [et. al] // *Atmos. Solar-Terr. Phys.* – 2003. – Vol. – 65. – P. 607-614.
136. Global distribution of intense lightning discharges and their seasonal variations / M. Sato, Y. Takahashi, A. Yoshida [et al.] // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 41. – 2008. – Vol. 234011. – P.10. doi:10.1088/0022-3727/41/23/234011.
137. The ionospheric Alfvén resonator / P.P. Belyaev, S.V. Polyakov, V.O. Rapoport [et al.] // *J Atmos Terr Phys.* – 1990. – Vol. 52. – P. 781–787.
138. Parks J.K. *Physics of Space Plasmas. An Introduction* / J.K. Parks. – University of Washington, Seattle. Washington: Addison-Wesley Publishing Company. – 1991. – 538 p.
139. Поляков С.В. / О свойствах ионосферного альвеновского резонатора. — / С.В. Поляков // Симпозиум КАПГ по солнечно-земной физике.: Тезисы докладов. Часть III. — М.: Наука. – 1976. – С. 72-73.
140. Поляков С.В. / Ионосферный альвеновский резонатор / С.В. Поляков, В.О. Рапопорт // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 1981. – Т. 21. № 5. – С. 816 – 822.
141. The ionospheric Alfvén resonator / P.P. Belyaev, S.V. Polyakov, V.O. Rapoport // *J. Atmos. Terr. Phys.*. – 1990. – V. 52, № 9. – P. 781-788.

- 
142. Lysak R.L. / Feedback instability of the ionospheric resonator cavity / R.L. Lysak // *J Geophys Res.* –1991. –Vol. 96. –P. 1553–1568.
143. Trakhtengertz V.Y. / Turbulent Alfvén boundary layer in the polar ionosphere, 1, excitation conditions and energetic/ V.Y. Trakhtengertz, A.Y. Feldstein // *J Geophys Res.* – 1991. – Vol. 96. – P. 19,363–19,374.
144. Hickey K. / Ground-based observations of ionospheric Alfvén resonator bands / K. Hickey, D.D. Sentman, M.J. Heavner // *EOS Trans AGU 77(46, Fall Meeting Supplementary).* – 1996. – F 92.
145. Spectral properties of the ionospheric Alfvén resonator observed at a low-latitude station (L D 1:3) / T. Bösinger, C. Haldoupis, P.P. Belyaev [et. al] // *J Geophys Res.* – 2002. – Vol. 107. – P. 1281. doi:10.1029/2001JA005076.
146. Ionospheric Alfvén resonance at middle latitudes: results of observations at Kamchatka / O.A. Molchanov, A.Y. Schekotov, E.N. Fedorov [et al.] // *Phys Chem Earth Parts A/B/C.* – 2004. – Vol. 29. – P. 649–655.
147. Hebden S.R. / Quantitative analysis of the diurnal evolution of ionospheric Alfvén resonator magnetic resonance features and calculation of changing IAR parameters./ S.R. Hebden, T.R. Robinson, D.M. Wright [et. al] // *Ann Geophys.* – Vol. 23. – P. 1711–172.
148. Morphology of the spectral resonance structure of the electromagnetic background noise in the range of 0:1 4 Hz at L D 5:2 / A.G.Yahnin, N.V.Semenova, A.A. Ostapenko [et. al] // *Ann Geophys.* – 2003. – Vol. 21. –779–786.
149. Semenova N.V. / Diurnal behavior of the ionospheric Alfvén resonator signatures as observed at high latitude observatory Barentsburg / N.V. Semenova, A.G. Yahnin // *Ann Geophys.* – 2008. – Vol. 26. – P. 2245–2251.
150. Grzesiak M. / Ionospheric Alfvén resonator as seen by Freja satellite / M. Grzesiak // *Geophys Res Lett.* –2000. – Vol. 27. – P. 923–926.
151. Fast observations of the inertial Alfvén waves in the dayside aurora / C.C. Chaston, C.W. Carlson, W.J. Peria [et. al] // *Geophys Res Lett.* – 1999. – Vol. 26. – P. 647–650.

- 
152. Properties of small-scale Alfvén waves and accelerated electrons from FAST / C.C. Chaston, J.W. Bonnell, C.W. Carlson [et. al] // *J Geophys Res.* –2003. – Vol. 108. –P.8003. doi:10.1029/2002JA009420.
153. Electric field signatures of the IAR and Schumann resonance in the upper ionosphere detected by Chibis-M microsatellite / D. Dudkin, V. Pilipenko, V. Korepanov [et. al] // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* – 2014. – Vol 117. – P. 81–87
154. Excitation of the ionospheric resonance cavity by neutral winds at middle latitudes / V.V. Surkov, O.A. Pokhotelov, M. Parrot [et. al] // *Ann Geophysicae.* – 2004. – Vol. 22. – P. 2877–2889.
155. Sukhorukov A.I./ Excitation of the ionospheric Alfvén resonator by strong lightning discharges/ A.I. Sukhorukov, P. Stubbe // *Geophys Res Lett.* – 1997. – Vol. 24. – P. 829–832.
156. Demekhov A.G. / Pc 1 waves and ionospheric Alfvén resonator: generation or filtration? / A.G. Demekhov, V.Y. Trakhtengertz , T. Bösinger // *Geophys Res Lett.* –2000. – Vol. 27(23). – P. 3805–3808.
157. An energy source for the mid-latitude IAR: world thunderstorm centers, nearby discharges or neutral wind fluctuations? / E. Fedorov, A.Yu. Schekotov, O.A. Molchanov [et. al] // *Phys Chem Earth.* – 2006. – Vol. 31. – P. 462–468.
158. Ionospheric Alfvén resonator excitation due to nearby thunderstorms / V.V. Surkov, M. Hayakawa, A.Y. Schekotov [et. al] // *J Geophys Res.* – 2006. – Vol. 111. – A01303. doi:10.1029/2005JA011320.
159. Demekhov A.G./ Coupling at the atmosphere–ionosphere–magnetosphere interface and resonant phenomena in the ULF range / A.G. Demekhov // *Space Sci.* –2000. Rev. doi:10.1007/s11214-011-9832-6.
160. ULF impulsive magnetic response at mid-latitudes to lightning activity / A.Yu. Schekotov, V. Pilipenko, K. Shiokawa [et al.] // *Earth Planets Space.* – 2011. – Vol. 63. – P.1–10.

- 
161. Поляризационные характеристики низкочастотных резонансов в полости Земля–ионосфера / А.П. Николаенко, Л.М. Рабинович, А.В. Швец [и др.] // Изв. Вузов, Радиофизика. – 2004. – XLVII. – 4. – С. 267-291.
162. Hunsucker R.D./ Atmospheric gravity waves generated in the high-latitude ionosphere / R.D. Hunsucker // A review, Rev. Geophys. –1982. – Vol. 20(2). – P. 293–315, doi:10.1029/RG020i002p00293.
163. Nonlinear disturbances in the ionosphere due to acoustic gravity waves / A.K. Nekrasov, S.L. Shalimov, P.K. Shukla [et al.] // Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics. – 1995. – Vol. 57, I 7. – P. 737–741.
164. Chao-Song H. / Weak nonlinear theory of the ionospheric response to atmospheric gravity waves in the F-region / H. Chao-Song, Li Jun// Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics. – 1991. – V. 53, I. 10.P. 903-908.
165. K.C. Yeh / Propagation of gravity wave spectra in the thermosphere/ K.C. Yeh, C.H. Liu, A.L. Hearn // J. Geophys. Res. –1979. – Vol. 84(A3). P.834–838. doi:10.1029/JA084iA03p00834.
166. Hines C.O./ Propagation velocities and speeds in ionospheric waves: A review / C.O. Hines // Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics. – 1974. – V. 36, I. 7. – P. 1179-1204.
167. Hocke K. / A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances 1982-1995 / K. Hocke, K. Schlegel // Annales Geophysicae. – 1996. – V. 14, I. 9. – P. 917-940.
168. Roble R.G. / A thermosphere-ionosphere-mesosphere-electrodynamics general circulation model (time-GCM): Equinox solar cycle minimum simulations (30–500 km). / R.G. Roble, E.C. Ridley // Geophysical Research Letters. – 1994. – V. 21, I. 6. – P. 417-420. doi: 10.1029/93GL03391.
169. Радиозондирование морской поверхности в ходе 7-ой украинской антарктической экспедиции / А.С. Кащеев, С.Б. Кащеев, А.В. Колосков [и др.] // Украинский Антарктический журнал. – 2003. – № 1. – С. 37-46.

- 
170. Вариации частоты КВ сигналов на протяженных трассах во время солнечного затмения / А.В. Зализовский, А.В. Колосков, В.Г. Галушко [и др.] // Радиопизика и радиоастрономия. – 2009. – Т. 14, № 4. – С. 353-366.
171. Мониторинг природных и техногенных возмущений электромагнитного окружения Земли в сверхнизкочастотном диапазоне / Ю.М. Ямпольский, Л.Н.Литвиненко, В.Е. Пазнухов [и др.] // Цільова комплексна програма фундаментальних досліджень “Наукові основи, методичне, технічне та інформаційне забезпечення створення системи моніторингу геосистем на території України (GEO-UA)”. К. НАН України. – 2010. – 160 с.
172. 3-D radar imaging of a modified ionospheric region / V.S. Beley, K.M. Groves, A.V. Koloskov [и др.] // Presentations from the Fifth Annual RF Ionospheric Interactions Workshop, Santa Fe, New Mexico. – 18 24 April. 1999. – Vol. 2. – P. 378-385.
173. Автоматизированный приемный КВ комплекс для дистанционных ионосферных наблюдений в Арктике, Испытания и перспективы использования / А.В. Колосков, В.Г. Галушко, А.С. Кащеев [и др.] // 7 Українська конференція з космічних досліджень, Збірник тез. – 3-8 вересня 2007 р., Крим, Євпаторія, НЦУВКЗ. – С. 80.
174. Колосков А.В. / Аналогово-цифровые методы регистрации доплеровских спектров КВ-сигналов / А.В. Колосков, Ю.М. Ямпольский // Международная Байкальская молодёжная научная школа по фундаментальной физике. Труды. X конференции молодых ученых “Современные проблемы в астрофизике и физике космической плазмы”, Иркутск. – 2007. – С. 142-146.
175. Kascheev A.S. / Automatic remote control, data acquisition and data transmission system as an element of USMS / A.S. Kascheev, A.V. Koloskov, Y.M. Yampolsky // 9th Ukrainian Conference on Space Research, Yevpatoriya, Crimea. – 2009. – P. 37.
176. Многофункциональные приемные комплексы ВЧ диапазона для исследования динамических процессов в ионосфере [Электронный ресурс] / С.Б. Кащеев, В.Г. Галушко, А.В. Колосков // Первая Украинская конференция

---

“Электромагнитные методы исследования окружающего пространства”, Харьков, 25-27 сентября 2012, Сборник тезисов докладов; Харьков. – 2012. – С. 133-135.

177. Прототип веб-сайта электромагнитной обсерватории на УАС / А.В. Колосков, А.С. Кашеев, Л.А. Бондаренко [и др.] // VI Міжнародна Антарктична Конференція., м. Київ, Україна, 15-17, травня 2013 р. Тези. – Київ. – 2013. – С. 337-338.

178. Приемно-измерительный комплекс СНЧ диапазона с УКВ ретранслятором / В.Е. Пазнухов, О.В. Буданов, А.Г. Рохман // Радиопизика и радиоастрономия. – 2010. – Т. 15, № 1. – С. 31 – 41.

179. Calibration errors on experimental slant total electron content determined with GPS / L. Ciraolo, F. Azpilicueta, C. Brunini [et. al] // Journal of Geodesy. – 2007. – Vol. 81. – P. 111-120. doi: 10.1007/s00190-006-0093-1.

180. Bennett J.A. / Doppler shift formulas for waves in the ionosphere / J.A. Bennett // Radio Science. – 1976. – Vol. 11, № 7. - P. 621-627.

181. Афраймович Э.Л. Интерференционные методы радиозондирования ионосферы / Э.Л. Афраймович // М.: Наука. – 1982. – 198 с.

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

183. Non-linear interaction between Schumann resonances and HF Signals / Y.M. Yampolski, P.V. Bliokh, V.S. Beley [et. al] // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 1997. - V. 59, №. 3. - P. 335-342.

184. Bistatic HF radar diagnostics induced field-aligned irregularities / Yu.M. Yampolski, V.S. Beley, A.V. Koloskov [et. al] // Journal of Geophysical Research. – 1997. - V. 102, № A4. - P. 7461-7467.

185. HF radar observations of decaying artificial field-aligned irregularities / D.L. Hysell, M.C. Kelley, Y.M. Yampolski [et. al] // Journal of Geophysical Research. – 1996. - V. 101, № A12. - P. 26981-26993.

- 
186. Спектральные особенности КВ сигнала нагревного стенда EISCAT в Европе и Антарктике / А.В. Зализовский, В.Г. Галушко, С.Б. Кашеев [и др.] // Радиофизика и радио-астрономия. – 2004. - Т. 9, № 3. – С. 261-273.
187. Галушко В.Г. / Измерительный комплекс для исследования флуктуаций КВ радиосигналов. Препр./ В.Г.Галушко, Л.М.Рабинович, Ю.М.Ямпольский / ИРЭ АН УССР. – 1981. № 182. – Харьков. – 16 с.
188. Дистанционное КВ рассеяние взволнованной морской поверхностью Часть 2, эксперимент / А.С. Кашеев, С.Б. Кашеев , А.В. Колосков [и др.] // Радиофизика и Радиоастрономия. – 2003. - Т. 8, № 3. - С. 242-252.
189. Приемный комплекс для частотно-углового зондирования ионосферных возмущений в Антарктиде/ И.И. Пикулик, С.Б. Кашеев, В.Г. Галушко // Украинский Антарктический журнал. – 2003. № 1. - С. 61-69.
190. Мобильный комплекс для частотно-углового зондирования ионосферы / В.Г.Галушко, А.С.Кашеев, С.Б.Кашеев [и др.] // Радиофизика и радиоастрономия. – 2014. – Т. 19, № 2. – С. 142–150.
191. Bible K. / Universal digital ionosonde / K. Bible , V.W. Reinisch // Radio Science. – 1978. V. 13, № 3. - P. 519-530.
192. Борн М. Основы оптики./ М. Борн, Э. Вольф // М: Наука. – 1970. – 855 с.
193. Longrange communications at extremely low frequencies, / S.L. Bernstein, M.L. Burrous , J.E. Evans [et. al] //Proc. IEEE. –1974. – Vol. 62. – 292–312.
194. Williams E.R. / Lightning and Climate / E.R. Williams // Franklin Lecture at AGU Fall Meeting, San Francisco, December 5; San Francisco. – 2012.
195. Füllekrug M. / Global ionospheric D-layer height monitoring / M. Füllekrug, A.C. Fraser-Smith, K. Schlegel // Europhys. Lett. – 2002. – Vol. 59 (4). – P. 626 – 632.
196. Двухпозиционный (Антарктида-Украина) мониторинг глобальных электромагнитных резонансов Земли / А.В. Колосков, Н.А. Бару, О.В. Буданов [и др.] // Украинский Антарктический журнал. – 2011/2012. – № 10-11. – С. 121-127.

- 
197. Диагностика глобальной грозовой активности на основе многолетнего мониторинга сигналов шумановского резонанса на УАС Академик Вернадский / А.В. Колосков, Н.А. Бару, О.В. Буданов [и др.] // УАЖ. – 2013. – №12. – С. 170-176.
198. Recovering parameters of global thunderstorm activity from polarization characteristics of Schumann resonances measured at UAS Abstracts / A.V. Koloskov, V.G. Bezrodny, O.V. Budanov [et al.] // Second Ukrainian Antarctic Meeting, 2UAM2004, Kyiv, Ukraine. – June 22-24, 2004. – (PS6). – P. 69.
199. Location of superpowerful thunderstorms through polarization measurements of ELF signals in Antarctica Abstracts / A.V. Koloskov, O.V. Budanov, V.G. Bezrodny [et al.] // Second Ukrainian Antarctic Meeting, 2UAM2004, Kyiv, Ukraine. – June 22-24, 2004. – (PS12). – P. 75.
200. Диагностика глобальной грозовой активности на основе многолетнего мониторинга сигналов шумановского резонанса на УАС / А.В. Колосков, О.В. Буданов, В.Г. Безродный [и др.] // VI Міжнародна Антарктична Конференція., м. Київ, Україна, 15-17, травня 2013, Тези; Київ – 2013. – С. 294-297.
201. Мониторинг сигналов шумановских резонансов в Антарктике в 11-ти летнем цикле солнечной активности Глобальная электрическая цепь / А.В. Колосков, В.Г. Безродный, О.В. Буданов [и др.] // Материалы Всероссийской Конференции. Борок. Россия. 28 октября – 1 ноября 2013. Тезисы докладов; Борок. – 2013. – С. 106.
202. Особенности поведения характеристик шумановских резонансов в полном цикле солнечной активности / А.В. Колосков, О.В. Буданов, Ю.М. Ямпольский [и др.] // XXIV Всероссийская научная конференция "Распространение радиоволн", Иркутск. – 29 июня – 5 июля 2014. – Труды конференции; Иркутск – 2014. – Т. II. – С. 251 – 254.
203. Inversion of Multi-Station Schumann Resonance Background Records for Global Lightning Activity in Absolute Units [Electronic resource] / E. Williams, V.C. Mushtak, A. Guha [et. al] // AGU Fall Meeting. – 15-19 December 2014. –

---

San Francisco. – 2014. – 1 p.

<https://agu.confex.com/agu/fm14/meetingapp.cgi#Paper/28321>

204. Evidence on a link between the intensity of Schumann resonance and global surface temperature/ M. Sekiguchi, M. Hayakawa, A.P. Nickolaenko [et al.] // Ann. Geophys. – 2006. – Vol. 24. – P. 1809-1817.

205. A.V. Shvets / Variations of the global lightning distribution revealed from three-station Schumann resonance measurements / A.V. Shvets, Y. Hobara, M. Hayakawa // Journal of Geophysical Research. –2010. – Vol. 115. – A12316. doi:10.1029/2010JA015851.

206. Mushtak V.C. / ELF propagation parameters for uniform models of the Earth-ionosphere waveguide / V.C. Mushtak, E.R. Williams // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. – 2010. – Vol. 64. – P. 1989-2001.

207. Hayakawa M. / Diurnal variations of electric activity of global thunderstorms deduced from OTD data/ M. Hayakawa, M. Sekiguchi, A.P. Nickolaenko // J. Atmos. Electricity. – 2005. – Vol. 25(2). – P. 55-68.

208. Sátori G. / Schumann resonance signatures of global lightning activity, in: / G. Sátori, V. Mushtak, E.R. Williams // Betz, H.D. – 2012.

209. Recent studies of Schumann resonance and ELF transients, in: Wood / M. Hayakawa, A.P. Nickolaenko, A.V. Shvets [et al.] //, M.D. (Ed.) Lightning: Properties, Formation and Types, Nova Sci. Pub., New York. –2011. – Chapter 3. – P. 39-71.

210. Обнаружение расщепления собственных частот шумановских резонансов / А.П. Николаенко, Л.М. Рабинович, А.В. Швец [и др.] // Радиофизика и электроника. – 2002. – Вып. 7, № 3, С. 498 – 508.

211. Поляризационные характеристики низкочастотных резонансов / А.П. Николаенко, Л.М. Рабинович, А.В. Швец [и др.] // Изв. Вузов. Радиофизика. – 2004. – Вып 47, № 4. – С. 267-291.

212. Yang H. / Seasonal variations of global lightning activity extracted from Schumann resonances using a genetic algorithm method / H. Yang, V.P. Pasko,

---

G. Sa'tori // J. Geophys. Res. – 2009. – Vol. 114, D01103, P.10. doi:10.1029/2008JD009961.

213. Ondraskova A. / significant decrease of the fundamental Schumann resonance frequency during the solar cycle minimum of 2008-9 as observed at Modra Observatory / A. Ondraskova, S. Sevcik, P.A. Kostecky // Contributions to Geophysics and Geodesy. – 2009. – Vol. 39/4. – P. 345–354.

214. Signature of global warming in global lightning position, In:Szerk./ G. Sátori, V. Mushtak, E.R. Williams [et al.] // Pinto O Proceeding of the 14th ICAE, Global Lightning and Climate.Rio de Janeiro, Brazilia. – 2011.08.08-2011.08.12. Rio de Janeiro. – P. 1-4.

215. Глобальное электронное содержание в 23-м цикле солнечной активности / Э.Л. Афраимович, Э.И. Астафьева [и др.] // Геомагнетизм и аэрономия. – 2008. – Том 48, № 2. – С. 195-208.

216. Watt A.D./ VLF radio engineering / A.D. Watt // Pergamon Press, Oxford, New York, Paris. – 1967. – P. 703.

217. Viggiano A.A. / Ion Chemistry and Composition of the Atmosphere. Ch.1, in Handbook of Atmospheric Electrodynamics / A.A. Viggiano, F. Arnold // CRC Press, Boca Raton – London – Tokyo. – 1995. – Vol.1. – P. 1-25.

218. Флуктуации сверхдлинных радиоволн в волноводе Земля – ионосфера / В.Г. Безродный, П.В. Блюх, Р.С. Шубова [и др.] // М.: Наука. – 1984. – 234 с.

219. A 25-year record of 10 kHz radio noise in Antarctica: Implications for tropical lightning levels / N.W. Watkins, M.A. Clilverd, A.J. Smith [et al.] // Geophysical Research Letters. – 1998. – Vol. 25 (23). – P. 4353 – 4356.

220. Thomson N.R. / Solar cycle changes in daytime VLF subionospheric attenuation / N.R. Thomson, M.A. Clilverd // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. – 2000. – Vol. 62. – P. 601 – 608.

221. Massive disturbance of the daytime lower ionosphere by the giant X-ray flare from magnetar SGR 1806–20 / U.S. Inan, N.G. Lehtinen, R.C. Moore [et. al] // Geophys. Res. Lett. – 2007. – Vol. 34. – L08103. doi:10.1029/2006GL029145.

- 
222. Sentman D.D. / Approximate Schumann resonance parameters for a two-scale-height ionosphere / D.D. Sentman // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. – 1990. – Vol. 52. – P. 35–46.
223. Hargreaves J.K. / *The Solar-Terrestrial Environment* / J.K. Hargreaves // Cambridge University Press, Cambridge. – 1992. – 420 p.
224. Whitten R.C. / *Physics of the Lower Ionosphere* / R.C. Whitten, I.G. Poppoff // Prentice-Hall. – 1965. – 232 p.
225. Секигучи М. / Связь интенсивности шумановского резонанса со средней глобальной температурой суши / М. Секигучи, М. Хайакава, Я. Хобара [и др.] // *Радиофизика и электроника*. – 2004. – Т. 9, № 2. – С. 383-391.
226. Greifinger P. / The lower characteristic ELF altitude of the Earth-ionosphere waveguide: Schumann resonance observations and aeronomical estimates / P. Greifinger, V. Mushtak, E. Williams //, 6th International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology, St Petersburg State Electrotechnical University, St. Petersburg, Russia, June. – St Petersburg. – 2005.
227. Seasonal, Kp, solar wind, and solar flux variations in long-term single-pass satellite estimates of electron and ion auroral hemispheric power / B.A. Emery, V. Coumans, D.S. Evans [et. al] // *J. Geophys. Res.* – Vol. 113. – A06311. doi:10.1029/2007JA012866.
228. Sprites, ELF Transients, and Positive Ground Strokes / D.J. Boccippio, E.R. Williams, S.J. Heckman [et. al] // *Science*. – 1995. – Vol. 269 (5227). – P. 1088–1091. doi:10.1126/science.269.5227.1088. PMID 17755531.
229. Fullekrug M. / Special issue on sprites, elves and their global activities / M. Fullekrug, Y. Takahashi // *Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics*. – 2003. – Vol. 65 (5). – P. 497.
230. Boeck W.L. / Lightning observations from the STS-32 space shuttle mission / W.L. Boeck, O.H. Vaughan // *EOS Trans. AGU*. – 1990. – Vol. 71. – P. 1241.
231. Franz R.C. / Television Image of a large upward electrical discharge above a thunderstorm / R.C. Franz, R.J. Nemzek, J.R. Winckler // *Science*. – 1990. – Vol. 249. – P. 48-51.

- 
232. Lyons W.A./ Sprite observations above the U.S. High Plains in relation to their parent thunderstorm systems / W.A. Lyons // *J. Geophys. Res.* – 1996. – v. 101. – P. 29,641-29,652.
233. Lightning induced brightening in the airglow layer / W.L. Boeck, O.H. Vaughan, R.J. Blakeslee [et. al] // *Geophys. Res. Lett.* – 1992. – Vol. 19. – P. 99.
234. Lyons W.A. / The Colorado SPRITES'95 campaign: Initial results / W.A. Lyons, T.E. Nelson // *EOS Trans. AGU.* – 1995. – Vol. 76. – P. 113.
235. Cummer S.A. / Measurement of charge transfer in spriteproducing lightning using ELF radio atmospherics/ S.A. Cummer, U.S. Inan // *Geophys. Res. Lett.* – 1997. – V. 24. – P. 1731-1734.
236. Cummer S.A. / ELF radiation produced by electrical currents in sprites/ S.A. Cummer, U.S. Inan, T.F. Bell [et al.] // *Geophys. Res. Lett.* – 1998. – V. 25. – P. 1281-1284.
237. Cummer, S.A. / Ubmillisecond resolution lightning currents and sprite 24 development: Observations and implications. / S.A. Cummer, M. Stanley // *Geophys. Res. Lett.* – 1999. – V. 26. – P. 3205-3208.
238. Price C. / Improved ELF/VLF method for globally geolocating sprite-producing lightning/ C. Price, M. Asfur, W. Lyons [et al.] // *Geophys. Res. Lett.* 2002, v. 29, 1031, doi:10.1029/2001GL013519.
239. Sato M. / Global sprite occurrence locations and rates derived from triangulation of transient Schumann resonance events / M. Sato, Fukunishi H. // *Geophys. Res. Lett.* – 2003. – V. 30. – P. 1859-1862.
240. Fullekrug S. / Excitation of Earth-ionosphere cavity resonances by sprite-associated lightning flashes / Fullekrug S., Reising S.C. // *Geophys. Res. Lett.* – 1998. –Vol. 25. P. 4145.
241. SentmanD.D. / Detection of elliptical polarization and mode splitting in discrete Schumann resonance excitations// D.D. Sentman / *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* – 1989. – V. 51. – P. 507-519.

- 
242. Николаенко А.П. / Суточные вариации пиковых частот Шумановского резонанса в полости земля - гиротропная ионосфера //Радиофизика и электроника / А.П. Николаенко, Л.М. Рабинович // 2003. – Т. 8, № 3. – С. 357-365.
243. Экспериментальные исследования резонансной структуры спектра атмосферного электромагнитного шумового фона в диапазоне короткопериодных геомагнитных пульсаций / П.П. Беляев, С.В. Поляков, В.О. Рапопорт [и др.] // Известия высших учебных заведений. – 1989. – Т. 32, №6. - С. 663 –672.
244. Леонович А.С. / Динамика мелкомасштабных альфвеновских волн в магнитосферном резонаторе / А.С. Леонович , В.А. Мазур // Физика плазмы. – 1987. – Т.13, Вып.7. – Р. 800 – 810.
245. Околоземные резонаторы СНЧ-волн как индикаторы космической погоды/ А.В. Колосков, В.Г. Сеницын, Н.Н. Герасимова [и др.] // Космічна наука і технологія. – 2008. – Т. 14, № 5. – С. 49 –64.
246. Колосков А.В. / Определение критической частоты F-слоя по данным наблюдений ионосферного альфвеновского резонанса / А.В. Колосков, Н.А. Бару // Украинский Антарктический журнал. – 2011/2012а. – № 10-11. – С. 114 – 120.
247. Бару Н.А. / Зависимость характеристик ионосферного альфвеновского резонанса от состояния геокосмоса по данным синхронных наблюдений в Антарктике и Евразии / Н.А. Бару, А.В. Колосков, Р.А. Рахматулин // Украинский Антарктический журнал. – 2013. – № 12. – С. 177 – 185.
248. Исследования МГД-колебаний внутренней магнитосферы Земли в космическом проекте РЕЗОНАНС / О.К. Черемных, Ю.М. Ямпольский, А.В. Агапитов [и др.] // Космічна наука і технологія. – 2013. – Т. 19, № 2. – С. 5 – 42.
249. Наблюдаемость ионосферных альфвеновских резонансов в Антарктике в полном цикле солнечной активности и «эффект расщепления» / Н.А. Бару,

---

А.В. Колосков, Ю.М. Ямпольский [и др.] // Украинский Антарктический журнал. – 2014. – №13. – С. 124 –132.

250. Бару Н.А. / Эффект расщепления модовой структуры ионосферного альвеновского резонатора / Н.А. Бару, А.В. Колосков, Ю.М. Ямпольский // Космічна наука і технологія. – 2015. – Т. 21, № 1. – С. 58 –63.

251. Бару Н.А. / Исследование связи вариаций электромагнитных полей УНЧ-СНЧ диапазона с сейсмической активностью / Н.А. Бару, А.В. Колосков // Конференция молодых ученых: “Дистанционное радиозондирование ионосферы”. – 6-9 апреля 2010., материалы конференции – Харьков, Украина. –2010. – С. 43.

252. Бару Н.А. /Synchronous observations of the spectral structure of Ionospheric Alfvén resonances in Ukraine and in the Antarctic Peninsula region / Н.А. Бару, А.В. Колосков //10th Ukrainian Conference on Space Research, Yevpatoria, Crimea. – 2010. – P. 80.

253. Бару Н.А. / Восстановление критической частоты слоя F2 по данным анализа собственных частот ионосферного альвеновского резонанса / Н.А. Бару, А.В. Колосков // Конференция молодых учёных «Дистанционное радиозондирование ионосферы». Сборник тезисов, Харьков, Украина. – 2011. – С. 51.

254. Бару Н.А. / Определение критической частоты F-слоя по данным наблюдений ионосферного альвеновского резонанса / Н.А. Бару, А.В. Колосков // V Міжнародна Антарктична Конференція., м. Київ, Україна. – 17-19 травня 2011. – Тези. – С. 150-152.

255. Бару Н.А. / Диагностика параметров ионосферы по данным мониторинга ионосферного альвеновского резонанса / Н.А. Бару, А.В. Колосков // 11th Ukrainian Conference on Space Research, Yevpatoria, Crimea. – 2011. – P. 17.

256. Бару Н.А. / Многопозиционные наблюдения сигналов ионосферного альвеновского резонанса [Электронный ресурс]/ Н.А. Бару, А.В. Колосков, Р.А. Рахматулин // Первая Украинская конференция “Электромагнитные

---

методы исследования окружающего пространства”, Харьков. – 25-27 сентября 2012. – Сборник тезисов докладов. – С. 133-135.

257. Бару Н.А. /. Зависимость характеристик ионосферного альфвеновского резонанса от состояния геокосмоса по данным синхронных наблюдений в Антарктике и Евразии / Н.А. Бару, А.В. Колосков, Р.А. Рахматулин // VI Міжнародна Антарктична Конференція., м. Київ, Україна. – 15-17 травня 2013. – Тези. – С. 238-241.

258. Investigation of the ionospheric Alfvén resonator characteristics using data of observation in Antarctica and Eurasia / N.A. Baru, A.V. Koloskov, Yu.M. Yampolskiy [et al.] // International School-Conference. Remote Radio Sounding Of The Ionosphere. Book of abstracts. Maly Mayak (Big Alushta), Crimea, Ukraine. September, 30 – October, 4, 2013. – P. 32.

259. Наблюдения Ионосферного Альфвеновского Резонанса (ИАР) сетью пространственно-разнесенных магнитометров. Глобальная электрическая цепь / Н.А.Бару, А.В.Колосков, Ю.М.Ямпольский [и др.] // Материалы Всероссийской Конференции. Борок. Россия. – 28 октября – 1 ноября 2013. – С. 118.

260. Многопозиционные исследования ионосферного альфвеновского резонатора / А.В.Колосков, Ю.М.Ямпольский, Р.А.Рахматулин, [и др.] // XXIV Всероссийская научная конференция "Распространение радиоволн", Иркутск. – 29 июня – 5 июля 2014. – Труды конференции. – Т. II. – С. 255 – 258.

261. Ляцкий В.Б. Магнитосферно-ионосферное взаимодействие / В.Б. Ляцкий, Ю.П. Мальцев // М: «Наука». – 1983. – 192 с.

262. Lysak R.L. / Feedback instability of the ionospheric resonant cavity/ R.L.Lysak // J. Geophys. Res. – 1991. – Vol. 96, № A2. –P. 1553 – 1568.

263. Руденко Г.В. / Численное исследование альфвеновского резонатора в ионосфере / Г.В. Руденко // Изв. ВУЗ – Радиофизика. – 1990. – Т. 33, № 2. С. 155 – 163.

- 
264. Nisbet. A. / Electromagnetic Potentials in a Heterogeneous Non-Conducting Medium / A.Nisbet // Proceedings of the Royal Society of London. – 1957. – Vol. A240, № 1222. – P. 375.
265. Синицын В.Г. / Потенциалы Герца для неоднородной среды / В.Г. Синицын // Радиотехника и электроника. – 1992. – Т. 37, Вып. 9. – С. 1537 – 1543.
266. Hanson W.B./ Structure of the ionosphere / W.B. Hanson // Satellite Environment Handbook, Stanford Univ.Press. – 1965. – 192 p.
267. Экспериментальные исследования резонансной структуры спектра атмосферного электромагнитного шумового фона в диапазоне короткопериодных геомагнитных пульсаций. Препринт № 230 / П.П. Беляев, С.В. Поляков, В.О. Рапопорт [и др.] // НИРФИ, Горький. – 1987.
268. Pavlov A.V. / Anomalous variations of NmF2 over the Argentine Islands: a statistical study / A.V. Pavlov, N.M. Pavlova // Annales Geophysicae. – 2009. – № 27. – P. 1363-1375.
269. Solar cycle variations in the ionospheric Alfvén resonator 1985-1995 / P.P. Belyaev, S.V. Polyakov, E.N. Ermakova [et al.] // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2000. – Vol. 62. – P. 239-248.
270. Modelling the diurnal evolution of the resonance spectral structure of the atmospheric noise background in the Pc 1 frequency range / A.G. Demekhov, P.P. Belyaev, S.V. Isaev [et. al] // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2000. – Vol. 62. – P. 257-265.
271. Jayachandran B. /Climatology of ionospheric slab thickness / B. Jayachandran, T.N. Krishnankutty, T.L. Gulyaeva // Annales Geophysicae. – 2004. – Vol. 22. – P. 25 – 33.
272. Дистанционная радиодиагностика из Антарктики природных и техногенных источников излучения в СНЧ-диапазоне волн. / А.В. Колосков, В.Г. Безродный, О.В. Буданов [и др.] // Программа и тезисы докладов. Международная байкальская молодежная научная школа по фундаментальной

---

физике. VII конференция молодых ученых “Взаимодействие полей и излучения с веществом”, 13-18 сентября, Иркутск. – 2004. – С. 30.

273. Низкочастотные волны в атмосфере и ближнем космосе./ В.Г. Синицин, Литвиненко Л.Н., А.В. Колосков [и др.] // Первая научная конференция «Наука про Землю та Космос – суспільству». – Киев, 25-27 июня. – 2007.

274. Мониторинг низкочастотных электромагнитных полей на Украинской антарктической станции [Электронный ресурс]/ А.В. Колосков, В.Г. Безродный, О.В. Буданов [и др.] // Первая Украинская конференция “Электромагнитные методы исследования окружающего пространства”, Сборник тезисов докладов, Харьков, 25-27 сентября 2012. – С. 122.

275. Геокосмические исследования на УАС в 23 – 24 циклах солнечной активности / Ю.М. Ямпольский, А.В. Колосков, А.В. Зализовский [и др.] // Антарктичні дослідження: нові горизонти та пріоритети: VII Міжнародна антарктична конференція, 12-14 травня 2015 р. – Тези. – Київ. – 2015. – С 24 – 27.

276. An extreme distortion of 674 the Van Allen belt arising from the Halloween solar storm in 2003 / D.N. Baker, S.G. Kanekal, Li X. [et. al] // Nature. – 2004. – Vol. 432. – P. 878-881.

277. NOAA Technical Memorandum OAR SEC-88: HALLOWEEN SPACE WEATHER STORMS OF 2003. Boulder, Colorado: NOAA Office of Oceanic and Atmospheric Research. June 2004. – P. 51.

278. Webb D. F./ Spacecraft and Ground Anomalies Related to the October-November 2003 Solar Activity / D. F. Webb, J.H. Allen // Space Weather. – 2004. –2. P. n/a. doi:10.1029/2004SW000075.

279. Lopez R.E. (2004) Sun unleashes Halloween storm / R.E. Lopez, D.N. Baker, J. Allen // EOS. – 2004. – Vol. 85. – P. 105-108.

280. Thomson N.R. / Ionosphere gives size of greatest solar flare / N.R. Thomson, C.J. Rodger, R.L. Dowden // 765 Geophys. Res. Lett. – 2004. – Vol. 31. – P. 6803. doi: 10.1029/2003GL019345.

- 
281. Feynman J. / New interplanetary proton fluence model / J. Feynman, T.P. Armstrong, L. Dao-Gibner [et. al] // J. Spacecraft. – 1990. – Vol. 27. – P. 403–410.
282. Reid G.C./ Solar Energetic Particles and their Effects on the Terrestrial Environment / G.C. Reid // In: The Physics of the Sun. Elsevier. – 1986. Vol. III. – P. 251 – 278.
283. Rees M.H. / Physics and Chemistry of the Upper Atmosphere, 1st ed. Cambridge University Press. – 1989.
284. Richmond A.D. / Geomagnetic crochets and associated ionosphere current systems / A.D. Richmond, S.V. Venkateswaran // Radio Science. – 1971. – Vol 6. – P. 139 –164.
285. Greifinger P. / The lower characteristic ELF altitude of the Earth ionosphere waveguide: Schumann resonance observations and aeronomical estimates / P. Greifinger, V. Mushtak, E. Williams // 6<sup>th</sup> International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology, St. Petersburg State Electrotechnical University. – 2005.
286. Kirillov V.V. / Two-dimensional theory of ELF electromagnetic wave propagation in the Earth-ionosphere waveguide / V.V. Kirillov // Radio Physics and Quantum Electronics. – 1996. – Vol. 39. – P. 737-743.
287. Madden T. / Low-frequency electromagnetic oscillations of the Earth ionosphere cavity / T. Madden, W. Thompson // Reviews of Geophysics. – 1965. – Vol. 3. – P. 211-254.
288. Nelson P.H. / Ionospheric perturbations and Schumann resonance 713 data. Project NR-371-401 / P.H. Nelson // Geophysics Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge. – 1964.
289. Proton events and X-ray flares in the last three solar cycles / A. Belov, Garcia H., V. Kurt [et. al] // Cosmic Research. – 2005. – Vol. 43. – P. 165 –178.
290. Low-frequency magnetic field measurements near the epicenter of the Ms 7.1 Loma Prieta earthquake / A.C. Fraser-Smith, A. Bernardi, A.R. McGill [et. al] // Geophys. Res. Lett. – 1990. – Vol. 17. – P. 1465 – 1468.

- 
291. Hayakawa M. / Seismo-electromagnetics as a new field of radiophysics: electromagnetic phenomena associated with earthquakes / M. Hayakawa, O.A. Molchanov // Radio Sci Bull. – 2007. – Vol. 320. – P. 8–17.
292. Interpretation in terms of gyrotropic waves of Schumann-resonance-like line emissions observed at Nakatsugawa in possible association with nearby Japanese earthquakes / M. Hayakawa, K. Ohta, V.M. Sorokin [et. al] // J Atmos Solar-Terr Phys. – 2010. – Vol. 72. – P. 1292 – 1298.
293. ULF/ELF magnetic field variations from atmosphere induced by seismicity / A.Y. Schekotov, O.A. Molchanov, M. Hayakawa [et. al] // Radio Sci. – 2007. – Vol. 42. – RS6S90. doi:10.1029/2005RS003441.
294. On the earthquake effects in the regime of ionospheric Alfvén resonances / A. Guglielmi, B. Potapov, M. Tsegmed [et. al] // Physics and Chemistry of the Earth. – 2006. – Vol. 31. – P. 469 – 472.
295. Hayakawa M. / Atmospheric and ionospheric electromagnetic phenomena associated with earthquakes / M. Hayakawa // Tokyo: Terra Scientific Publ.Co. – 1999.
296. Bezrodny V.G. / Experimental and theoretical studies of the Schumann resonance magnetic polarization in the gyrotropic Earth-Ionosphere cavity / V.G. Bezrodny, O.V. Budanov, A.V. Koloskov [et. al] // Digest of 16th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, February 13-18, 2005. – Zurich, Switzerland. – P. 63 – 68.
297. Manninen J. / Features of power line harmonic radiation (PLHR) related narrow band ELF-emissions at very high latitudes / J. Manninen, A. Oikarinen, T. Turunen // VLF Workshop 2004, Sodankylä Geophysical Observatory, 27th September – 1st October 2004. – P. 44.
298. Oikarinen A. / Daily variation of PLHR doublets detected in Northern Finland / A. Oikarinen, J. Manninen, T. Turunen // VLF Workshop 2004, Sodankylä Geophysical Observatory, 27th September – 1st October 2004 - P. 46.

- 
299. VLF line radiation in the Earth's magnetosphere and its association with power system radiation / R.A. Helliwell, J.P. Katsufakis, T.F. Bell [et. al] // *J. Geophys. Res.*, - 1975. – Vol. 80, - P. 4249–4258.
300. Park C.G. / Magnetospheric effects of power line radiation / C.G. Park, R.A. Helliwell // *Science*. – 1978. – Vol. 200, - P. 727–730.
301. Matthews J.P. / Magnetospheric VLF line radiation observed at Halley, Antarctica / J.P. Matthews, K. Yearby // *Planet. Space Sci.* – 1978. – Vol. 29. - P. 97–106.
302. Parrot M. / Observations of Power Line Harmonic Radiation by the Low-Altitude AUREOL 3 Satellite / M. Parrot // *J. Geophys. Res.* – 1994. – Vol. 99(A3). - P. 3961–3969.
303. Power line harmonic radiation: A systematic study using DEMETER spacecraft / F. Nemec, O. Santolík, M. Parrot [et. al] // *Advances in Space Research*. – 2007. – Vol. 40. - P. 398–403.
304. Simultaneous observation on board a satellite and on the ground of large-scale magnetospheric line radiation / M. Parrot, J. Manninen, O. Santolík [et. al] // *Geophysical Research Letters*. – 2007. – V. 34. – L19102. doi:10.1029/2007GL030630.
305. Bullough K. / Atmospheric Electrodynamics / K. Bullough // *Power Line Harmonic Radiation: Sources and Environmental Effects*. - 1995. – V. 2. – CRC Press, Boca Ralton, Fla., Ch., - P. 291–332.
306. Power line harmonic radiation (PLHR) observed by the DEMETER spacecraft / F. Nemec, O. Santolík, M. Parrot [et. al] // *J. Geophys. Res.* – 2006. – Vol. 111. – A04308. doi:10.1029/2005JA011480.
307. Park C.G. / Sunday decreases in magnetospheric VLF wave activity / C.G. Park, T.R. Miller // *J. Geophys. Res.* - 1979. – 84. – P. 943–950.
308. Is magnetospheric line radiation man-made? / C.J. Rodger, M.A. Clilverd, K. Yearby [et. al] // *J. Geophys. Res.* – 2000. – Vol. 105. - P. 15981– 15990.

- 
309. Does the magnetosphere behave differently on weekends? / A. Karinen, K. Mursula, T. Ulich [et. al] // *Ann. Geophysicae*. – 2002. – Vol. 20 (8). - P. 1137 – 1142.
310. Бендат Дж. Прикладной анализ случайных данных/ Дж. Бендат, А. Пирсол // - М: Мир. – 1989. – 540 с.
311. U.S.-Canada Power System Outage Task Force. Final Report on the August 14, 2003 Blackout in the United States and Canada: Causes and Recommendations April 2004. (<https://reports.energy.gov/BlackoutFinal-Web.pdf>)
312. Искусственная ионосферная турбулентность (обзор) / Л.М. Ерухимов, С.А. Метелев, Е.Н. Мясников [и др.] // *Изв., ВУЗов Радиофизика*. –1987. – Т. 30, № 2. – С. 208 – 225.
313. Фролов В. Л. / Пространственная структура возмущений плотности плазмы, индуцируемых в ионосфере при ее модификации мощными КВ-радиоволнами: обзор результатов экспериментальных исследований /. В.Л. Фролов // *Солнечно-земная физика*. – 2015. – Т. 1. №. 2. – С. 22-48. doi:10.12737/10383.
314. Черногор Л.Ф. Физика мощного радиоизлучения в геокосмосе: Монография / Л.Ф. Черногор // Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина. – 2014. – 448 с.
315. F2-region atmospheric gravity waves due to high-power HF heating and subauroral polarization streams / E. Mishin, E. Sutton, G. Milikh [et. al] // *Geophysical Research Letters*. – 2012. – Vol. 39. – L11101. doi:10.1029/2012GL052004.
316. E.V. Mishin / On the onset of HF induced airglow at HAARP / E.V. Mishin, W.J. Bruke, T. Pedersen // *Journal of Geophys. Res.* – 2004. – Vol. 109. – A02305, doi:10.1029/2003JA010205.
317. Artificial ionospheric layers driven by high-frequency radiowaves: An assessment / E. Mishin, B. Watkins, N. Lehtinen [et. al] // *J. Geophys. Res. Space Physics*. – 2016. – P. 121, doi:10.1002/2015JA021823.

- 
318. Ultaut, W.F. / Some ionosonde observations of ionosphere modification by very high power, high frequency ground-based transmissions/ W.F. Ultaut, E.J. Violette, A.K. Paul // J. Geophys. Res. – 1970. – Vol. 75 – P. 6429-6435.
319. Gordon, W.E. / Ionospheric heating at Aresibo: First test / W.E. Gordon, R. Showen, H.C. Carlson // J. Geophys. Res. – 1971. – Vol. 76. – P. 7801-7813.
320. Шлюгер И.С. / Само модуляция мощного электромагнитного импульса, отраженного от верхних слоев ионосферы / И.С. Шлюгер // Письма в ЖЭТФ. – 1974. – Т. 19. – С. 247.
321. Ерухимов Л.М. / Ионосфера как плазменная лаборатория / Л.М. Ерухимов, Л.Г. Генкин // Изв. вузов. Радиофизика. – 1992. – Т. 35, № 11/12. – С. 363-387.
322. Зализовский А.В. / Исследования в Антарктиде частотно-временных характеристик ВЧ сигналов на сверхдальних радиопутьях / А.В. Зализовский, А.В. Колосков, Ю.М. Ямпольский // Украинский Антарктический журнал. – 2015. – № 14. – С. 124 – 137.
323. Observations of pump-induced large scale radial drift of small scale striations transverse to the geomagnetic field at Sura / T.B. Leyser, A.V. Koloskov, Yu.M. Yampolski [et. al] // RF Ionospheric Interactions Workshop, Santa Fe, New Mexico, 29 April - 2 May. – 2001.
324. Doppler spectra of powerful HF signals as observed at different radio paths / Yu. Yampolski, K. Groves, V. Galushko [et. al] // Proceedings of the 14th Annual RF Ionospheric Interactions Workshop, Boulder, CO, USA, April 22-25, 2008.
325. 3D diagnostics of natural and stimulated polar ionospheric inhomogeneities / A.V. Zalizovski, Yu.M. Yampolski, A.V. Koloskov [et. al] // 16th International EISCAT symposium, 12-16 August 2013, Lancaster UK. ([http://eiscat2013.lancs.ac.uk/wp-content/uploads/2013/08/1\\_Zalizovski\\_Zalizovski\\_EISCAT\\_S1.pdf](http://eiscat2013.lancs.ac.uk/wp-content/uploads/2013/08/1_Zalizovski_Zalizovski_EISCAT_S1.pdf)).
326. Studies of the Ionospheric Turbulence Excited by the Fourth Gyroharmonic at HAARP / G. Milikh, A. Najmi, A. Mahmoudian [et. al] // AGU Fall Meeting, 15-19

---

December 2014, San Francisco, 1 p. (electronic resource: <https://agu.confex.com/agu/fm14/meetingapp.cgi#Paper/16268>).

327. Диагностика полярных ионосферных неоднородностей на станции Академик Вернадский с использованием сверхдальних ВЧ радиолоний / А.В. Зализовский, Ю.М. Ямпольский, С.Б. Кащеев [и др.] // Антарктичні дослідження: нові горизонти та пріоритети: VII Міжнародна антарктична конференція, 12-14 травня 2015 р.: Тези. – Київ. – 2015. – С 118 –119.

328. Minkoff, J. / Radio frequency scattering from ionospheric volume, 1, VHF/UHF field-aligned and plasma-line backscatter measurement / J. Minkoff, P. Kugelmann, I. Weisman // Radio Sci. – 1974. – Vol. 9, № 11. – P. 941-955.

329. Density depletions at the 10-m scale induced by the Arecibo heater / M.C. Kelley, T.L. Arce, J. Salowey [et. al] // J. Geophys. Res. – 1995. – Vol. 100, № A9. – p. 17367-17376.

330. Fialer, H.F. / Field-aligned scattering from a heated region of the ionosphere – Observations at HF and VHF / H.F. Fialer // Radio Sci. – 1974. – Vol. 9, № 11. – P. 923-940.

331. The temporal Evolution of 3-m Scintillations in the Modified Ionosphere / A.J. Coster, F.T. Djuth, R.J. Jost [et. al] // J. Geophys. Res. – 1985. – Vol. 90, № A3. – P. 2807-2818.

332. Observations of HF backscatter associated with the heating experiment at Tromsø / A. Hedberg, A. Derblom, B. Thide [et. al] // Radio Sci. – 1983. – Vol. 18. – P. 840-850.

333. Экспериментальный комплекс “Сура” для исследования искусственных возмущений ионосферы / И.Ф. Белов, В.В. Бычков, Г.Г. Гетманцев [и др.] // Препринт НИРФИ. Горький. – 1983. – № 167. – 27 с.

334. Брауде С.Я. / Радиотелескоп декаметрового диапазона волн УТР-2. Антенны / С.Я. Брауде, А.В. Мень, Л.Г. Содин // Москва. Связь. – 1978. – С. 3-15.

- 
335. Yampolski Yu.M./ The artificial ionospheric turbulence spectral and statistical characteristics / Yu.M. Yampolski // *Annales Geophysicae. Suppl. to vol 9. (EGS XVI General Assembly, Wiesbaden)*. – 1991. – P. 331-332.
336. Обзор результатов рассеяния коротких волн искусственной ионосферной турбулентностью, полученных с помощью фазированной решетки УТР-2 / В.В. Авдеев, В.С. Белей, А.Ф. Беленов [и др.] // *Изв., ВУЗов Радиофизика*. – 1994. – Т. 37, № 4. – С. 479-492.
337. Караштин А.Н. / Ионосфера и взаимодействие декаметровых радиоволн с плазмой / А.Н. Караштин, М.Ш. Цимринг // *Москва. Измиран*. – 1989. – С. 67.
338. Bistatic HF radar diagnostics of induced field-aligned irregularities / Yu.M. Yampolski, V.S. Beley, S.B. Kascheev [et. al] // *J. Geoph. Res.* 102, n. A4, 1997, p. 7461-7467.
339. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику / С.М. Рытов, Ю.А. Кравцов, В.И. Татарский // *М: Наука*. – 1984. – Т. 2. – 463 с.
340. Robinson T.R. / The heating of the high latitude ionosphere by high power radio waves / T.R. Robinson // *Phys. Rep.* – 1979. – P. 79.
341. Self-scattering of a powerful HF radio wave on stimulated ionospheric turbulence / V.G. Galushko, A.V. Koloskov, V.V. Paznukhov [et al.] // *Radio Science*. – 2009. – Vol 44. – RS3010, doi:10.1029/2008RS004111, 1-12.
342. Гершман Б.Н. Волновые явления в ионосфере и космической плазме / Б.Н. Гершман, Л.М. Ерухимов, Ю.Я. Яшин // *М.: Наука*. – 1984. – 392 с.
343. Франк-Каменецкий Д.А. Лекции по физике плазмы/ Д.А. Франк-Каменецкий // *М: Атомиздат*. – 1968. – 286с.
344. The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998 / M. Hernández-Pajares, J.M. Juan, J. Sanz [et. al] // *Journal of Geodesy*. – 2009. – Vol. 83. –P. 263-275. doi: 10.1007/s00190-008-0266-1.
345. A GPS based three-dimensional ionospheric imaging tool: Process and assessment / C. Stoll, S. Schluter, S. Heise [et. al] // *Adv. Space Res.* – 2006. – Vol. 38, Is. 11. – P.2313-2317.

- 
346. Жалило А.А./ Повышение точности дифференциального одночастотного ГНСС позиционирования путём сетевой коррекции ионосферных погрешностей / А.А. Жалило, Е.А. Бессонов // Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник «Радиотехника». – 2012. – №169. – С. 302-314.
347. Validation of approximation techniques for local TEC mapping / A. Krypiak, P. Gregorzcyk, D. Wielgosz, [et. al] // Acta Geodyn. Geomater. – 2013. – Vol. 10, №. 3 (171). – P. 275-283.
348. Спутниковое радиозондирование и радиотомография ионосферы / В.Е. Куницын, Е.Д. Терещенко, Е.С. Андреева [и др.] // УФН. – 2010 – Vol. 180, Is. 5. – С. 548-553.
349. Исследование высокоширотной ионосферы по данным УФ-спектрометрии, глобальным ионосферным картам GIM и высокоорбитальной радиотомографии / Е.С. Андреева, С.А. Калашникова, В.Е. Куницын [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2013. – Т. 10, № 1. – С. 103-111.
350. Near real-time ionospheric monitoring over Europe at the Royal Observatory of Belgium using GNSS data / N. Bergeot, J-M. Chevalier, C. Bruyninx [et al.] // J. Space Weather Space Clim. –2014. –Vol. 4. – A31. <http://dx.doi.org/10.1051/swsc/2014028>.
351. Regional Ionosphere Modeling Using Smoothed Pseudoranges / P. Wielgosz, I. Kashani, D. Grejner-Brzezinska [et. al] // 5th International Antarctic Geodesy Symposium (AGS'03), Lviv, Ukraine, 15-17 Sept. 2003: SCAR Report– Cambridge, UK. – 2005. – № 23. – P. 37 – 41.
352. Fox M.W. / Ionospheric equivalent slab thickness and its modeling applications / M.W. Fox, M. Mendillo, J.A. Klobuchar // Radio Sci. – 1991. – Vol. 26. –P. 429 – 438.
353. Многопозиционная диагностика среднеширотной ионосферы по данным региональной сети приемников ГНСС / Е.М. Занимонский, Л.Н. Литвиненко,

---

Ю.М. Ямпольский [и др.] // Космічна наука і технологія. – 2015. –Т. 21, № 1. – С. 78-83.

354. Возможности и проблемы использования локальных ионосферных карт по данным ГНСС / Е.М. Занимонский, А.И. Горб, В.Н. Лисаченко [et. al] // 5-й Международный радиоэлектронный форум МРФ-2014. Сборник научных трудов: материалы форума в 4-х томах. – 2014.– Т. 1. – Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ. – С. 199-201.

355. A comprehensive evaluation of the errors inherent in the use of a two-dimensional shell for modeling the ionosphere / D.A. Smith, E.A. Araujo-Pradere, C. Minter [et. al] // Radio Sci. –2008. –Vol. 43, RS6008. doi:10.1029/2007RS003769.

356. ASG-EUPOS densification of EUREF permanent network on the territory of Poland / J. Bosy, A. Oruba, W. Graszka [et. al] // Reports on Geodesy. – 2008. – Vol. 2, №. 85. – P. 105 – 112.

357. Zanimonskiy Y.M. / Modeling of TEC Variations Based on Signals from Near Zenith GNSS Satellite Observed by Dense Regional Network / Y.M. Zanimonskiy, G. Nykiel, A.V. Paznukhov [et. al] // ION International Technical Meeting. January 25–28, 2016, Monterey, California. Abstract submitted and accepted.

358. Сомсиков В.М. / Волны в атмосфере, обусловленные солнечным терминатором / В.М. Сомсиков // Геомагнетизм и аэрномия –1991. –Vol. 31, № 1. –P. 1-12.

359. Перемещающиеся волновые пакеты, генерируемые солнечным терминатором в верхней атмосфере / Э.Л. Афраймович, И.К. Едемский, С.В. Воейков, [и др.] // Оптика атмосферы и океана. – 2009. –Т. 22, №8. –С. 753-759.

360. Drob D.P./ An update to the Horizontal Wind Model (HWM): The quiet time thermosphere / D.P. Drob // Earth and Space Science. –2015. – Vol. 2. – P. 301–319. doi: 10.1002/2014EA000089.

- 
361. Федоренко А.К. / Влияние ветра на свойства акустико-гравитационных волн в полярной ионосфере / А.К. Федоренко, Е.И. Крючков // Радиофизика и радиоастрономия. – 2011. – Т. 16, №2. – С. 154-163.
362. Waldock J.A. / HF Doppler observations of medium-scale travelling ionospheric disturbances observed at midlatitudes / J.A. Waldock, T.B. Jones // J. Atmos. Terr. Phys. – 1986. – Vol 48. – P. 245-260.
363. A dominant acoustic-gravity mode in the polar thermosphere / A.K. Fedorenko, A.V. Bessalova, O.K. Cheremnykh [et. al] // Ann. Geophys. –2015. – Vol. 33. – P. 101–108. doi:10.5194/angeo-33-101-2015.
364. Statistical characteristics of medium-scale traveling ionospheric disturbances revealed from the Hokkaido East and Ekaterinburg HF radar data. Earth / A.V. Oinats, N. Nishitani, P. Ponomarenko [et. al] // Planets and Space. – 2016. – Vol. 68. – P. 8 DOI 10.1186/s40623-016-0390-8.
365. Cherniak I. Dependence of the high-latitude plasma irregularities on the auroral activity indices: a case study of 17 March 2015 geomagnetic storm / I. Cherniak, I. Zakharenkova // Earth, Planets and Space. – 2015. –Vol. 67. – 151. doi: 10.1186/s40623-015-0316-x.
366. Гуревич А.В. / Сверхдальнее распространение коротких радиоволн / А.В. Гуревич, Е.Е. Цедилина. – М.: Наука. – 1979. – 250 с.
367. Erukhimov L.M. / Radio-wave propagation in an ionospheric wave channel / L.M. Erukhimov, S.N. Matyugin, V.P. Uryadov // Radiophys. Quantum Electron. – 1975. – Vol. 18(9). – P. 958–963. doi:10.1007/BF01038191.
368. Гуревич А.В. / Теоретические исследования сверхдального распространения коротких радиоволн / А.В. Гуревич, Е.Е. Цедилина // Успехи физических наук. – 1975. – Т. 116, Вып. 3. – С. 540-543.
369. Thidé B. / Observations of Stimulated Scattering of a Strong High-Frequency Radio Wave in the Ionosphere / B. Thidé, H. Kopka, P. Stubbe // Physical Review Letters. –1982. – Vol. 49 (21). – P. 1561–1564. doi:10.1103/PhysRevLett.49.1561.

---

370. Huang J. / A theoretical model for the broad upshifted maximum in the stimulated electromagnetic emission spectrum / J. Huang, S.P. Kuo // J. Geophys. Res. – 1994. – Vol. 99. – P. 19569 – 19576.

371. Kotov P.V. / Spectra of stimulated electromagnetic emission of the ionosphere upon sweeping of the pump wave frequency near gyroharmonics. I. Experimental results / P.V. Kotov, E.N. Sergeev, S.M. Grach // Radiophys Quantum Electronic. – 2008. – Vol. 51. – P. 417-430. doi: 10.1007/s11141-008-9043-5.

372. Unprecedentedly strong and narrow electromagnetic emissions stimulated by HF radio waves in the ionosphere / L. Norin, T.B. Leyser, E. Nordblad [et. al] // Phys. Rev. Lett. – 2009. – Vol. 102. – P. 065003. doi: 10.1103/PhysRevLett.102.065003.