Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук

На правах рукописи

Ряховский Илья Александрович

ГЕНЕРАЦИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ КНЧ/ОНЧ ИЗЛУЧЕНИЯ В ЛИТОСФЕРНО-АТМОСФЕРНО-ИОНОСФЕРНОЙ СИСТЕМЕ

Специальность 25.00.29-физика атмосферы и гидросферы

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель-

доктор физико-математических наук

Б.Г. Гаврилов

Москва

2014

Оглавление

Введение	4
1. Источники, распространение и регистрация КНЧ/ОНЧ излучения	10
1.1. Источники КНЧ/ОНЧ излучения	10
1.2. Геофизическая среда и распространение КНЧ/ОНЧ излучения	18
1.3. Приемники КНЧ/ОНЧ излучения	24
2. Измерительная аппаратура и методика обработки данных	26
2.1. Измерительная аппаратура	26
2.2. Проведение полевых измерений и методика обработки данных	33
3. Регистрация естественных источников КНЧ/ОНЧ излучения	35
3.1. Синхронная регистрация КНЧ/ОНЧ излучения на Земле и в верхней и	оносфере в
районе Байкальской рифтовой зоны	35
3.2. Пеленгация естественных источников КНЧ/ОНЧ излучения	52
4. Регистрация антропогенных источников КНЧ/ОНЧ излучения.	60
4.1. Регистрация сверхслабых сигналов на больших расстояниях от иог	носферного
источника.	61
4.2. Пеленгация сверхслабых сигналов от ионосферного источника на бол	ьших базах
	82
4.3. Пеленгация сверхслабых сверхслабых сигналов от ионосферного ис	точника на
малых базах	90

4.4. Влияние гелиогеофизических условий на генерацию КНЧ/О	НЧ сигналов во время
нагревных экспериментов.	95
Заключение	100
Список Литературы	101
Приложение	108

Введение

Настоящая работа посвящена изучению генерации и распространениию электромагнитного излучения крайне низких частот (КНЧ от 30 до 3000 Гц) и очень низких частот (ОНЧ от 3 до 30 кГц) в литосферно-атмосферно-ионосферной системе. Главной особенностью электромагнитного излучения КНЧ/ОНЧ диапазонов является возможность распространения в волноводе Земля — ионосфера на большие расстояния с малым затуханием. При волноводном распространении основное влияние на амплитудно-частотные характеристики КНЧ/ОНЧ сигналов оказывают стенки волновода, главным образом, D-слой ионосферы.

D-слой ионосферы сложен для изучения. Его исследование невозможно с помощью радиолокационных методов из-за низкой электронной концентрации. Исследования с помощью метеозондов (максимальная высота 30-40 км) и спутников (минимальная высота около 180 км) также невозможны, поскольку характерная высота слоя составляет 60-90 км. Эффективным методом изучения D-слоя является его мониторинг КНЧ/ОНЧ излучением, для которого D-слой является верхней стенкой волновода.

При распространении КНЧ/ОНЧ волны в волноводе Земля-ионосфера часть энергии этой волны проникает через ионосферу в вышележащие слои плазмосферы и магнитосферы. Механизмы такого проникновения недостаточно ясны, а одновременные измерения на поверхности Земли и на спутнике носят единичный характер. Одной из существующих гипотез является предположение о создании в нижней ионосфере областей неоднородностей, связанных с процессами в литосфере (тектонические разломы, проявления сейсмической активности и др.). Такие области могут также образовываться над зонами повышенной электромагнитной активности (промышленные центры, энергетические объекты, мощные радиостанции).

Источниками КНЧ/ОНЧ излучения являются как природные, так и техногенные процессы. Одним из основных естественных источников КНЧ/ОНЧ излучения являются молниевые разряды. Мощными антропогенными источниками КНЧ/ОНЧ излучения являются СДВ радиостанции и излучение передатчиков нагревных стендов. Для эффективного излучения СДВ радиостанции требуется создание антенных систем больших размеров, соизмеримых с длиной излучаемых волн (10-100 км). Одним из методов создания более компактных антенн в данном частотном диапазоне, является использование эффекта Г. Г. Гетманцева. Суть эффекта заключается в генерации электромагнитных волн ионосферными токами под воздействием на ионосферу модулированного коротковолнового (КВ) излучения. Действенность этого метода была неоднократно доказана исследованиями на нагревных стендах и, в частности, на наиболее мощных из них: Сура, НААRP, EISCAT. Однако, до сих пор нет однозначного объяснения механизмов генерации КНЧ/ОНЧ излучения при модификации ионосферы нагревными стендами. Излучение крайне нестабильно, а излучаемые сигналы имеют малую амплитуду.

Прием и пеленгация сверхслабого КНЧ/ОНЧ излучения на расстояниях порядка тысячи километров является сложной задачей. В частности, влияние ионосферы на амплитуднофазовые характеристики сигналов, как в месте работы нагревного стенда, так и на трассе распространения, изучено недостаточно. К настоящему времени известно только несколько экспериментов, в которых проведена регистрация сверхслабых КНЧ/ОНЧ сигналов от нагревных стендов на расстоянии более 1000 метров.

Необходимость решения вышеперечисленных научных и технических проблем связанных с регистрацией и пеленгацией сверхслабых сигналов КНЧ/ОНЧ диапазона обусловило актуальность выполненной работы. Работа включает в себя:

- 1. эксперименты, направленные на исследование связей между ионосферными неоднородностями и литосферной активностью;
- исследования характеристик вторичного КНЧ/ОНЧ излучения в экспериментах по модификации ионосферы на нагревных стендах и их зависимости от гелиогеофизических условий;
- 3. экспериментальные исследования влияния гелиогеофизических условий на трассе распространения КНЧ/ОНЧ сигнала на его амплитудно-фазовые характеристики;
- разработку принципов построения измерительных систем, обладающих высокой чувствительностью, широким динамическим диапазоном и высокой точностью временных привязок;
- разработку методик пеленгации источников КНЧ/ОНЧ излучения, необходимость которых обусловлена тем, что знание положения источника излучения позволяет связать параметры принятых сигналов с гелиогеофизическими условиями на трассе распространения сигнала.

Целью работы является исследование параметров КНЧ/ОНЧ излучения от источников естественного и техногенного происхождения, его распространения в литосферно-атмосферно-ионосферной системе (ЛИАС) и влияния гелиогеофизических факторов на амплитудно-фазовые характеристики этого излучения.

Для достижения поставленной цели были решены следующие научные и методические задачи:

- 1. исследована связь между КНЧ/ОНЧ излучением на поверхности Земли и в ионосфере в Байкальской рифтовой зоне;
- исследованы особенности волноводного распространения КНЧ/ОНЧ излучения от ионосферного источника;

- 3. разработана высокочувствительная аппаратура с низким уровнем собственных шумов и большим динамическим диапазоном;
- 4. отработана методика синхронных сетевых измерений сверхслабых сигналов КНЧ/ОНЧ диапазона и пеленгации источников КНЧ/ОНЧ излучения.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- впервые была осуществлена синхронная регистрация (на Земле и в ионосфере) сигналов КНЧ/ОНЧ диапазона от молниевых разрядов в Байкальской рифтовой зоне (БРЗ). В районе БРЗ обнаружена зона преимущественного проникновения КНЧ излучения в магнитосферу Земли;
- 2. разработана методика удаленной регистрации сверхслабых модуляционных КНЧ/ОНЧ сигналов в широком диапазоне частот во время экспериментов по искусственной модификации ионосферы. Показано многомодовое распространение сигналов в диапазоне частот 0.5-6.0 кГц.

Практическая ценность работы состоит в следующем:

- 1. Разработан и введен в эксплуатацию измерительный комплекс пространственнораспределенной системы радиомониторинга (ПРСР), обладающий рекордно низким уровнем собственных шумов, большим динамическим диапазоном и точностью временных привязок на уровне 30 нс;
- отработана методика пеленгации источников КНЧ/ОНЧ сигналов фазовыми методами, что позволяет в дальнейшем использовать эти источники в качестве инструмента для мониторинга состояния D-слоя ионосферы.

Достоверность полученных результатов обеспечивается большим объемом экспериментальных данных, полученных с использованием апробированных методик измерений, регистрации и обработки сигналов, тщательном анализе имеющихся

опубликованных материалов, сопоставлением полученных данных с существующими представлениями, результатами численных расчетов и аналитическими оценками.

На защиту выносятся следующие результаты:

- 1. В ходе исследования в Байкальской рифтовой зоне взаимосвязанных литосферноатмосферно-ионосферных явлений экспериментально установлено, что зарегистрированные на Земле и в верхней ионосфере сигналы КНЧ/ОНЧ диапазона имеют общий источник генерации — молниевые разряды. Обнаружена область аномального распространения КНЧ излучения из волновода Земля-ионосфера в верхнюю ионосферу.
- 2. Разработана аппаратура и методики регистрации сверхслабых сигналов (единицы фТл). Экспериментально показана возможность регистрации таких сигналов на расстоянии до 2000 км от источника.
- 3. По результатам измерений получена зависимость поляризации модуляционных сигналов от частоты (в диапазоне 0.5-6 кГц), которая подтвердила модели многогодового распространения сигналов КНЧ/ОНЧ диапазона от ионосферного источника.
- 4. Разработана методика пеленгации ионосферных источников КНЧ/ОНЧ излучения в условиях воздействия гелиогеофизических факторов на фазовые характеристики сигналов.

Результаты работы обсуждались и докладывались на следующих семинарах и конференциях:

- Научные конференции и семинары ИДГ РАН
- Доклад на X Международной Школе молодых ученых "Физика окружающей среды " им. А. Г. Колесника, г. Томск, 2012 год

- Конференция по триггерным эффектам в геосистемах, г.Москва, 2013 год
- Доклад на конференции COSPAR, Москва, 2014 год
- Доклад на конференции AGU Chapman Conference, Republic of Korea, 2014 год

1. Источники, распространение и регистрация КНЧ/ОНЧ излучения

1.1. Источники КНЧ/ОНЧ излучения

Интерес к электромагнитным волнам крайне низких частот (КНЧ от 30 до 3000 Гц) и очень низких частот (ОНЧ от 3 до 30 кГц) возник в начале 20 века, когда было установлено, что электромагнитные излучение данного диапазона может распространяться в волноводе Земля – ионосфера с очень малым ослаблением (порядка нескольких децибел на тысячу километров). Первоначально основным практическим применением данных диапазонов частот была межконтинентальная связь. В настоящее время этот диапазон частот используется для создания различных радионавигационных систем. Интерес к этой теме также связан с возможностью применения радиоволн этого диапазона для связи с погруженными подводными лодками, т.к. излучение может проникать на большие глубины в соленой, проводящей воде [1].

Существуют естественные и антропогенные источники КНЧ/ОНЧ излучения. К естественным источникам можно отнести молниевые разряды, извержения вулканов, пылевые бури и торнадо [1]. Большинство КНЧ и ОНЧ шумов генерируются молниевыми разрядами в глобальной электрической цепи [2]. Молния представляет собой мощный кратковременный разряд в атмосфере, длина которого обычно измеряется километрами. Наиболее часто молнии появляются внутри грозового облака и значительно реже между облаком и поверхностью Земли. Молнии появляются в атмосфере при напряженности электрического поля около 3 $\kappa B/c M$, что на порядок ниже значения напряженности поля для электрического пробоя воздуха при нормальных условиях ($E \sim 30~\kappa B/c M$) [3]. По современным данным, полученным с помощью спутников, которые могут обнаруживать молнии, в том числе и в местах, где не ведётся наземное наблюдение (в основном над поверхностью океанов), частота грозовых разрядов составляет в среднем 40 раз в секунду.

что соответствует примерно 1,4 миллиарда молний в год [4]. 75 % этих молний составляют разряды облако - облако, а оставшиеся 25% - разряды облако - Земля.

Наибольшая интенсивность гроз на земном шаре наблюдается в трех районах (или грозовых очагах): в Индонезийском (или Азиатском), Африканском и Американском (Центральная Америка и северная часть Южной Америки). Грозовая активность в двух последних секторах наиболее интенсивна (*Puc.1.1.1*)[5].

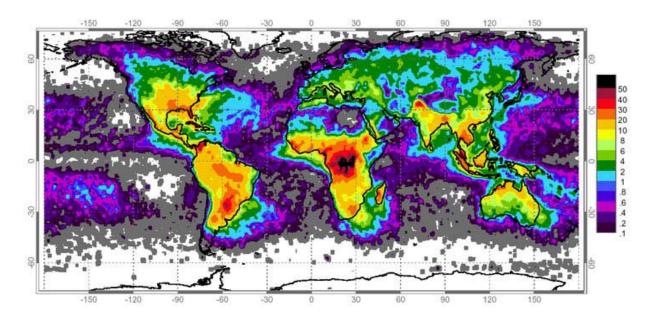


Рис. 1.1.1. Зоны наибольшей интенсивности грозовых разрядов на земном шаре.

Искусственные источники КНЧ/ОНЧ излучения можно разделить на два основных типа:

- 1. мощные передатчики с электрическими и магнитными антеннами;
- 2. мощные передатчики с беспроводными антеннами: нагревные стенды

При решении таких прикладных задач как межконтинентальная связь, навигация и др., встает вопрос об эффективности излучения. Для получения хороших излучательных характеристик размер антенны должен быть одного порядка с длиной излучаемой волны. ОНЧ излучение с частотами от 3 до 30 кГц имеет длину волны от 100 до 10 км, и это

предполагает, что эффективная ОНЧ антенна должна быть очень большой. Для КНЧ диапазона (от 3 до 3000 Гц с длинной волны от 100000 до 100 км соответственно) размер антенн должен быть порядка нескольких десятков километров.

Для передатчиков ОНЧ диапазона, вертикальные монопольные антенны могут эффективно применяться на частотах выше 10 кГц. Данный тип антенн был основным для систем ОНЧ связи почти весь XX век [6]. Обычно для установки ОНЧ антенны используется естественные географические особенности [7,8]. Например, их подвешивали между фьордами в Норвегии и в потухшем вулкане на Гавайях. Так же существуют примеры создания петлевых антенн ОНЧ диапазона с использованием естественного рельефа местности [9]. Для реализации данной идеи Барр пропустил петлю через тоннель в горе и замкнул ее на вершине горы, через которую этот тоннель был прокопан. Длинна тоннеля составляла 1200 м, а высота горы 600 м. Таким образом, получившаяся антенна излучала 75 мВт на каждый 1 кВт подведенной мощности на частоте 10 кГц. Сигналы от данного передатчика принимались в широком диапазоне частот от 500 Гц до 60 кГц на расстоянии 200 км от передатчика [10]. Еще одним направлением в сознании ОНЧ антенн являются электрические однополярные антенны, запущенные на аэростатах [11]. С использованием аэростата была создана вертикальная электрическая ОНЧ антенна высотой примерно 3,8 км, излучающая на частоте 25,3 кГц с эффективностью 90% [12]. Предполагалось использовать данную антенну для излучения сигналов в КНЧ диапазоне. Но в результате экспериментов эффективность данных антенн для КНЧ диапазона оказалась порядка 1,6 Вт излучения с каждого мегаватта мощности, переданного в антенну. Различные конструкции ОНЧ антенн описаны в [13].

Несмотря на сложности, был создан ряд практических устройств, работающих в КНЧ/ОНЧ диапазоне. В этом диапазоне частот работают глобальные навигационные станции Альфа и Омега, созданные во второй половине 20 века. Навигационная система Омега являлась интернациональной системой, в то время как Альфа была создана и эксплуатировалась исключительно Советским Союзом.

Разработка Альфы была начата в 1962 году [14], а в 1972 году система была введена в эксплуатацию. Изначально система Альфа состояла из 3 передатчиков, расположенных в районе Новосибирска, Краснодара, Хабаровска. Эти передатчики излучают последовательности сигналов длительностью 3,6 с на частотах 11,905 кГц, 12,649 кГц и 14,881 кГц (*Puc. 1.1.2*).

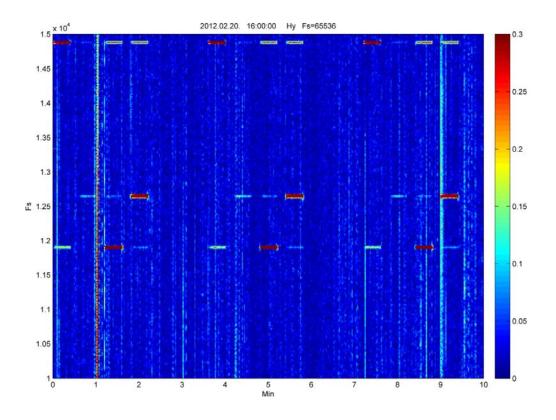


Рис. 1.1.2 Пример регистрации "Альфы" в геофизической обсерватории "Михнево".

Принцип работы данной системы основан на фазовом методе пеленгации сигналов. В точке приема, аппаратура измеряет набег фаз сигналов от навигационных передатчиков. По этим данным строится семейство гипербол и область их пересечения и является координатами источника. Подвижный объект всегда может определить своё местоположение,

если не теряет способность слежения за сигналами навигационных передатчиков. Точность определения местоположения не менее 2 морских миль, однако на высоких широтах и в полярных районах, где могут возникать внезапные фазовые аномалии, точность снижается до 7 морских миль. Оценочная мощность передатчиков составляет 50 кВт.

Работа навигационной системы "Омега" была основана на тех же принципах фазовой пеленгации, что и "Альфа". В состав данной системы входили 8 передатчиков с мощностью порядка 10 кВт, расположенных по всему миру. Точность данной системы составляла примерно 1 морскую милю. Из-за появления более точной системы спутниковой навигации GPS, система "Омега" была выведена из эксплуатации 30 сентября 1997 года.

На сегодняшний момент в ОНЧ диапазоне работает множество СДВ станций. В *таблице 1.1* приведены данные основных станций, работающих в ОНЧ диапазоне [15].

Таблица 1.1 Список основных ОНЧ станций.

СДВ станция	Частота, Гц	Бит-рейт	Широта	Долгота	Примечание
VTX	16300	200	08.387	77.753	Юг Индии
JXN	16400	200	59.910	10.520	Рядом с Осло
		200	66.970	13.880	Север Норвегии
		200	66.982	13.872	
VTX	17000	200	08.387	77.753	Юг Индии
HWU	18300	200	46.713	1.245	Центр Франции
GBZ	19580	200	54.912	-3.278	Англия, южнее Эдинбурга
NWC	19800	200	-21.816	114.166	Северо-запад Австралии
ICV	20270	200	40.923	9.731	Италия, Сардиния
FTA	20900	100	48.545	2.579	Франция, южнее Парижа
HWU	21750	200	46.713	1.245	Центр Франции

GQD	22100	100	54.732	-2.883	Англия, южнее Эдинбурга
DHO	23400	200	53.074	7.614	Германия, северо-запад
NAA	24000	200	44.645	-67.282	США, северо-восток
NPM	21400	200	21.420	-158.151	США, Перл-Харбор
TBB	26700	100	37.418	27.323	Турция, юго-запад
A-Nov	11905		55.756	84.448	Альфа, Новосибирск
	12649				
	14881				
A-Khab	11905		50.073	136.607	Альфа, Хабаровск
	12649				
	14881				
A-Krasn	11905		45.405	38.158	Альфа, Краснодар
	12649				
	14881				

Вертикальные электрические антенны неэффективны для КНЧ частот. В сравнении с ОНЧ антеннами они обладают гораздо меньшими собственными размерами по отношению к длине излучаемой волны. Также они имеют более высокое входное сопротивление. Таким образом, требуется более высоковольтный источник для обеспечения значительного тока в антенне. Наиболее амбициозная антенна такого типа была разработана в ходе проекта Sanguine. Разработка этой антенны подробно описана в [16]. Планируемая эффективность составляла 100 Вт на 1 МВт. Но, к сожалению, эта система так и не была создана. На текущий момент США имеет две КНЧ антенны: в штате Висконсин и в штате Мичиган. В качестве антенн используется горизонтальный проводник длиной порядка 150 км. Данные антенны работают синхронно для обеспечения глобальных коммуникаций. Система излучает 10 Вт на частоте 76 Гц [17].

Также в данном диапазоне частот работает российский КНЧ передатчик "Зевс" на Кольском полуострове. Данная система состоит из двух параллельных антенн длиной 60 км, подсоединенных к генератору, который обеспечивает ток от 200 до 300 А в частотном диапазоне от 20 до 250 Гц [18]. Российская система на 10 дБ мощнее, чем система США. Четкий сигнал от данной системы на частоте 82 Гц был зафиксирован даже в магнито-сопряженной точке [19].

По причине дороговизны, сложности изготовления и малой энергоэффективности только две страны в мире (СССР и США) смогли создать передатчики в КНЧ диапазоне. В 1974 году Гетманцевым был предложен новый принцип создания передатчика КНЧ/ОНЧ диапазонов [20]. Его суть заключалась в следующем: генерация электромагнитных волн ионосферными токами при воздействии на ионосферу модулированного коротковолнового радиоизлучения, обусловленная изменением этих токов с частотой колебаний, равной частоте модуляции коротковолнового радиоизлучения.

Для исследования механизмов генерации и влияния гелиогеофизических факторов на ее эффективность, во всем мире началось строительство специальных передатчиков — нагревных стендов. В настоящее время в мире используются 6 нагревных комплексов, основные характеристики (местоположение, эффективная мощность, диапазон несущих частот) которых приведены в *таблице 1.2*[21].

Табл. 1.2. Основные Технические характеристики различных нагревных комплексов.

Название, местоположение	Координаты	Год	Р _{эфф} , МВт	f, МГц
Аресибо, Пуэрто-Рико	18°N; 67°W	1976	160	3,1 - 8,3
"Сура", Н.Новгород, Россия	56°N; 44°E	1980	280	4,3 - 9,5
"Heating" EISCAT, Тромсё,	70°N; 19°E	1980	1200	3,8 -8,3

Норвегия				
HIPAS, Аляска, США	65°N; 147°E	1982	130	2,85; 4,53
HAARP, Аляска, США	66°N; 146°E	1999	3600	2,8 –10,0
SPEAR, Шпицберген, Англия	78°N; 16°E	2004	68	4,4 – 6,0

Одним из первых таких передатчиков в период с 1977 по 1980 был построен мощный нагревный стенд под полярным электроджетом рядом с г. Тромсе в северной Норвегии. Stubbe были проведены измерения в ближней зоне ОНЧ сигналов, излученных ионосферой над стендом. Амплитуда записанных сигналов составляла порядка 100 мВ/м на расстоянии 18 км от передатчика [22]. Первый надежный сигнал в ближней зоне был записан Вагт в Kiruna и Lycksele в Швеции, 205 и 554 км от передатчика соответственно [23].

В 1990-91 годах пр экспериментах на стенде HIPAS Banister зарегистрировал сигнал 154 Гц в Коннектикуте на расстоянии 5200 км от нагревного стенда, расположенного на Аляске [24].

Мнения ученых по поводу механизмов генерации КНЧ/ОНЧ излучения во время экспериментов по искусственной модификации ионосферы разнятся. Одним из обсуждаемых механизмов является наличие ионосферных токов, таких как экваториальный и авроральный электроджет [25-28]. Генерация КНЧ/ОНЧ излучения была подтверждена множественными экспериментами [29-32]. Второй механизм генерации основан на детектировании модуляционных частот плазменными неоднородностями и не требует присутствия ионосферных токов [33-35]. Хотя оба механизма были проверены экспериментально, эффективнее оказались эксперименты по модуляции ионосферных токов [36].

1.2. Геофизическая среда и распространение КНЧ/ОНЧ излучения

Электромагнитное излучение КНЧ/ОНЧ диапазонов распространяется в волноводе Земля - ионосфера на очень большие расстояния с очень малым ослаблением, а так же проникает в магнитосферу Земли, распространяясь вдоль силовых линей магнитного поля Земли (*Puc. 1.2.1*).

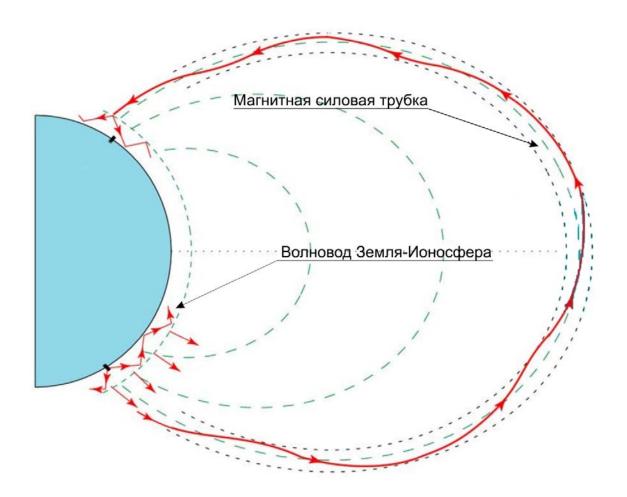


Рис. 1.2.1. Распространение КНЧ/ОНЧ излучения в волноводе Земля — ионосфера и вдоль силовых линей магнитного поля Земли

На данный момент в научной литературе можно встретить три основных теории распространения ОНЧ излучения в волноводе Земля - ионосфера. Основное отличие между ними - это различное описание границ волновода [37].

Ј. Galejs разработал теорию для поля, как вертикального, так и горизонтального диполя в свободном пространстве сферического волновода. В его теории земная и ионосферная границы волновода описаны с помощью импедансных граничных условий, которые и определяют коэффициенты ортогональных полей Е и Н (таким образом, поля за пределами волновода невозможно рассчитать) [38]. Основным недостатком этой работы является то, что в ней ионосфера рассматривается как слой с резкой границей (со свободным пространством под ним и однородной ионосферой над ним), хотя, хорошо известно, что ионосферная граница волновода существенно неоднородна.

Вторая теория волноводного распространения ОНЧ излучения была разработана Вайтом [39]. В своем решении для поля в свободном пространстве сферического волновода Вайт учитывает проводимость, диэлектрическую и магнитную проницаемости границ волновода, в отличие от импедансных граничных условий в теории J. Galejs. В его модели так же рассматриваются случаи, когда верхняя граница волновода состоит из нескольких слоев (тем самым моделируется слоистость ионосферы), однако, там не учитывается анизотропия ионосферы.

Наиболее полной можно считать Бадденовскую теорию распространения [40], в которой определяются границы волновода с помощью коэффициентов отражения. Таким образом, граница волновода может быть резкой, слоистой и даже анизотропной.

Уравнения Максвелла для волновода можно решить разностными методами, но в работах Вайта и Бадена используются так называемые аналитические разложения — модовая теория, суть которой заключается в том, что на фиксированной частоте f поле волновода можно разложить на последовательность независимых полевых структур (так называемых мод), которые распространяются с различными скоростями. Каждая из этих мод, кроме одной, зависит от частоты среза данного волновода $f_{cn} = nc/2h$, где h - высота волновода.

Если $f > f_{cn}$, то мода распространяется с групповой скоростью $v_{gn} = c \cdot \sqrt{1 - f_{cn}^2/f^2}$, если же $f < f_{cn}$, то мода является затухающей и сильно ослабляется с увеличением расстояния от источника. При волноводном распространении можно выделить два типа мод, зависящих от частоты среза волновода, transverse magnetic (ТМ) (магнитное поле перпендикулярно плоскости волновода $Puc.\ 1.2.2.a$) и transverse electric (ТЕ) (электрическое поле перпендикулярно плоскости волновода $Puc.\ 1.2.3.6$). И только электромагнитные волны, распространяющиеся в ТЕМ моде, не зависят от частоты среза волновода $Puc.\ 1.2.3.6$. [41].

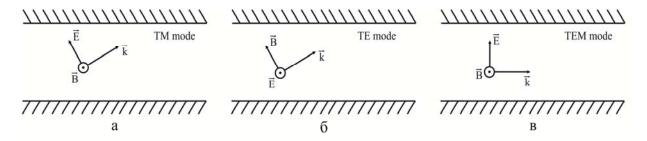


Рис. 1.2.2. Различные типы мод электромагнитных волн в волноводе.

Основное влияние на распространение КНЧ/ОНЧ излучение в волноводе Земля - ионосфера оказывает верхняя граница волновода - ионосфера. Уровень ионизации ионосферы очень сильно зависит от гелиогеофизических параметров и любое его изменение фактически приводит к изменению геометрии волновода. Существует множество работ о влиянии суточных, сезонных вариаций параметров нижних слоев ионосферы на амплитуду и фазу электромагнитного излучения (ЭМИ) КНЧ/ОНЧ диапазона, а так же изменении условий распространения при вариациях солнечной активности.

С 2012 года в геофизической обсерватории (ГФО) "Михнево" ведется наблюдение за амплитудно-фазовыми характеристиками сигналов от СДВ ДВ станций и влиянии на них гелиогеофизических условий. Параметры регистрируемых станций приведены в *таблице 1.1.* На *Puc. 1.2.3* приведен пример регистрации амплитуды сигналов от станций GBZ, JNX, GQD и HWU 19 ноября 2013 года. Из данного графика явно видны суточные вариации амплитуд

принимаемых сигналов. Провалы в районе 5 и 15 UT связаны с прохождением терминатора через трассу распространения, а резкое возмущение в районе 10 UT вызвано мощной рентгеновской вспышкой на солнце. Возрастание амплитуды сигналов в период рентгеновской вспышки объясняется возрастанием ионизации нижнего слоя ионосферы (D-слоя) и, как следствие, опусканием верхней границы волновода Земля - ионосфера и уменьшением поглощения сигналов.

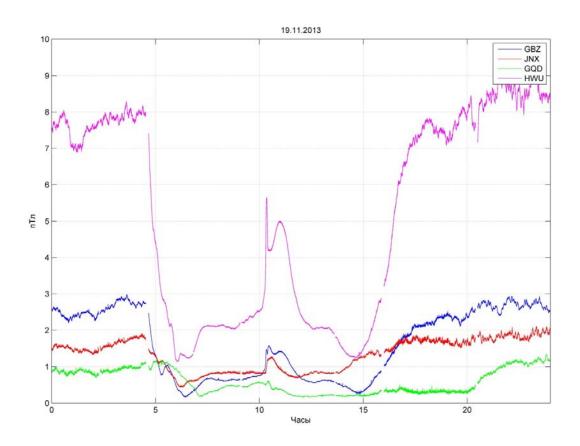


Рис. 1.2.3. Амплитуда сигналов СДВ стаций принятых в ГФО "Михнево" 19 ноября 2013 года

В случае генерации КНЧ/ОНЧ изучения молниевыми разрядами можно выделить три основных типа принимаемых сигналов [42,43]:

1. Сферики (Sheric в английской терминологии). Это сигнал, вызываемый молниевым разрядом. Он имеет вид короткого широкополосного импульса и на спектрограмме выглядит как вертикальная полоса (*Puc. 1.2.4*). На данной спектрограмме по оси абсцисс отложено время в секундах, по оси ординат - частота и цветом показана амплитуда сигнала. Сверху над спектрограммой изображена волновая форма сигналов, изображенных на спектрограмме.

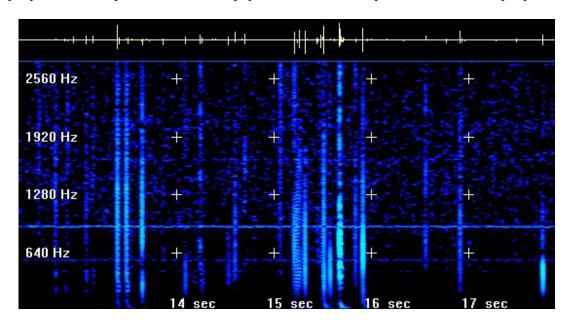


Рис. 1.2.4. Характерная спектрограмма сфериков.

2. Твики (Тweek в английской терминологии). Это электромагнитное излучение от молниевого разряда, прошедшее значительный путь в волноводе Земля-ионосфера, с многократными отражениями от стенок волновода. При этом сигналы подвержены дисперсии и на спектрограмме (*Puc. 1.2.5*) выглядят как вертикальные полосы в области высоких частот, которые имеют характерный загиб в районе 2 кГц.

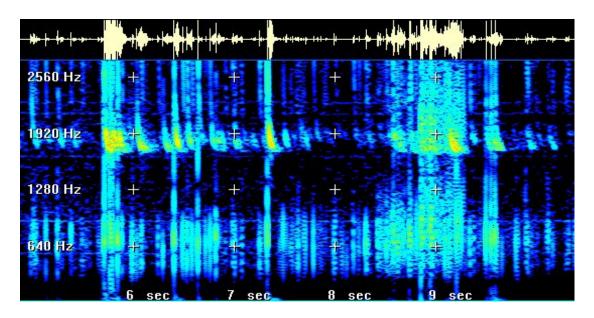


Рис. 1.2.5. Характерные спектрограммы твиков.

3. Вистлер или свист (Whistler в английской транскрипции). Вистлеры - это ЭМИ от молниевых разрядов, распространяющееся вдоль силовых линий магнитного поля Земли. Как правило, вистлеры регистрируются на искусственных спутниках Земли (ИСЗ) [44,45]. В результате того, что излучение преодолевает значительный путь в ионосфере - дисперсия данных сигналов гораздо больше, чем у твиков. На спектрограмме (*Puc. 1.2.6*) вистлер выглядит как длинная дуга.

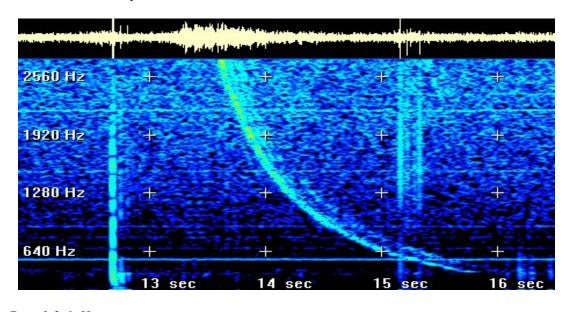


Рис. 1.2.6. Характерная спектрограмма вистлера.

1.3. Приемники КНЧ/ОНЧ излучения.

На данный момент существует множество измерительных систем, работающих в КНЧ/ОНЧ диапазоне. Они используются для решения как прикладных, так и исследовательских задач.

Среди прикладных задач важное место занимает задача локации грозовых облаков. Для решения этой проблемы созданы глобальные и национальные системы локации, такие как: World Wide Lightning Location Network, National Lightning Detection Network (NLDN) и др. [46].

Одной из первых систем, созданных для научных исследований, является система Atmospheric Weather Electromagnetic System for Observation, Modeling, and Education (AWESOME) [47]. В этой системе используются магнитные рамочные антенны различной геометрии и размеров. Все комплексы обеспечены GPS приемниками для обеспечения синхронных измерений (более подробно параметры системы AWESOME описаны в Главе 2).

Помимо наземных измерений электромагнитное излучение ОНЧ диапазона регистрируется и на искусственных спутниках Земли (ИСЗ). Специально для этих задач были созданы спутники "Demeter", "Чибис М" и комплекс измерительной аппаратуры "Обстановка", развернутый на МКС.

Французский спутник Demeter (Detection of Electro-Magnetic Emissions Transmitted from Earthquake Regions), относящийся к классу низкоорбитальных микроспутников (его вес 130 кг), с высотой орбиты 710 км и склонением 98.23° был запущен 29 июня 2004. Основной задачей данного спутника являлось изучение ионосферных неоднородностей и их связь с сейсмической и антропогенной активностью [48]. Для решения этих задач на его борту был размещен широкий спектр научной аппаратуры, позволяющей измерять шесть компонент электромагнитных полей (3 электрические и 3 магнитные) в широком частотном диапазоне и

определять параметры ионосферной плазмы, такие как: ионный состав, электронную плотность и температуру. Над сейсмически активными зонами на спутнике включался, так называемый, режим Burs mode с максимальной скоростью записи 1,7 Мбит/с, позволявшей получить волновые формы сигналов с частотой оцифровки до 18 кГц.

Микроспутник "Чибис М" (масса 34,4.кг) с высотой орбиты 500 км и наклонением 51,6°, предназначен для исследования физических процессов при атмосферных грозовых разрядах. Спутник был запущен 23 января 2011 года. В состав научной аппаратуры входят: рентген – гамма детектор РГД (диапазон рентгеновских и гамма излучений – 50-500 кЭв), ультрафиолетовый детектор ДУФ (диапазон ультрафиолетовых излучений – 300-450 нм) радиочастотный анализатор РЧА (20-50 МГц), камера оптического диапазона ЦФК (пространственное разрешение 300 м), магнитно-волновой комплекс МВК (0.1-40 кГц) [49].

Целью проекта "Обстановка", развернутого на борту международной космической станции (МКС), являются геофизические исследования плазменно-волновых процессов, связанных с магнитной обстановкой Земли. Вторая задача этого проекта - экологический мониторинг низкочастотных электромагнитных излучений антропогенного характера [50].

2. Измерительная аппаратура и методика обработки данных.

2.1. Измерительная аппаратура

Сложность измерений малых КНЧ/ОНЧ сигналов связана с большим количеством локальных антропогенных шумов, таких как промышленные сети, импульсные блоки питания и бесперебойники. Эти факторы требуют выбора места регистрации с наименьшим уровнем шумов и использование чувствительной аппаратуры с большим динамическим диапазоном.

В настоящее время для магнитометрических измерений в КНЧ/ОНЧ диапазонах используется два типа датчиков: магнитометры и рамочные антенны. В магнитометрах используются сердечники с высокой магнитной проницаемостью. Это позволяет сделать их компактными и при размещении избежать различных внешних нагрузок – ветровых, вибрационных, которые могут привести к паразитным сигналам на датчике. Но из-за большого количества витков у них высокое омическое сопротивление, что приводит к росту тепловых шумов на входе предусилителя. У рамочных антенн, за счет малого количества витков и относительно большого сечения провода сопротивление датчика можно сделать практически «нулевым», что резко снижает тепловые шумы на входе предусилителя. С другой стороны из-за больших размеров рамки возможно возникновение собственных колебаний конструкции за счет внешних нагрузок, как правило, ветровых, что может приводить к паразитным сигналам.

Одна из первых систем по регистрации КНЧ/ОНЧ излучения была создана в Стэнфордском университете группой Иннана и получила название Atmospheric Weather Electromagnetic System for Observation, Modeling, and Education (AWESOME) [47]. В качестве измерительных датчиков в данной системе используются рамочные антенны, выполненные в

виде равностороннего треугольника площадью от 1,69 м^2 до 25 м^2 . Чувствительность антенн составляет порядка нескольких ϕ Тл ($Puc.\ 2.1.1$).

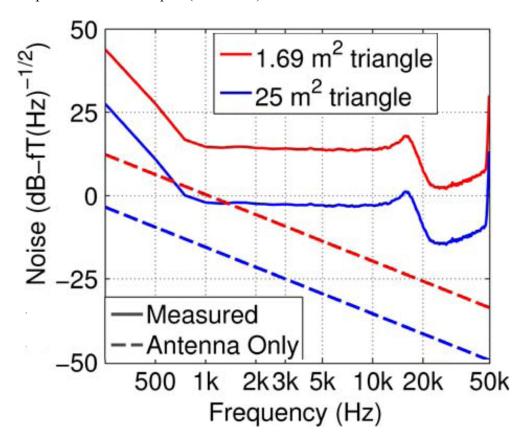


Рис. 2.1.1. Уровень собственных шумов антенн AWESOME

Оцифровка данных происходит с помощью шестнадцатиразрядного АЦП, а синхронизация данных по времени осуществляется с помощью GPS приемника.

В лаборатории литосферно-ионосферных связей ИДГ РАН был разработан комплекс измерения и мониторинга электромагнитных полей в виде пространственно-распределенной системы (ПРСР) измерительных средств, позволяющий проводить непрерывные синхронные измерения в ВЧ и КНЧ/ОНЧ диапазонах. При создании низкочастотной части комплекса учитывался опыт создателей системы AWESOME. В качестве датчиков в ПРСР используются магнитометры MFS-06 и MFS-07 и рамочные антенны «Плутон» и «Вистлер».

На *Puc.2.1.2* приведены амплитудно-частотные характеристики для магнитометров MFS-06 и MFS-07. Магнитометры характеризуются очень низким уровнем собственных шумов. График собственных шумов магнитометров, приведенных к единицам поля показан на *Puc. 2.1.3*.

На этом же рисунке приведена кривая уровня естественных вариаций магнитного поля в спокойный день.

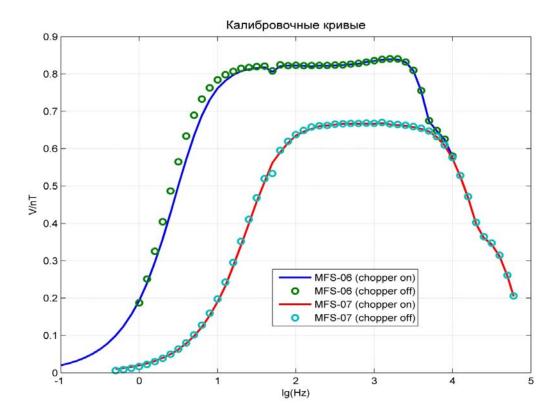


Рис.2.1.2. Амплитудно-частотные характеристики магнитометров MFS-06 и MFS-07

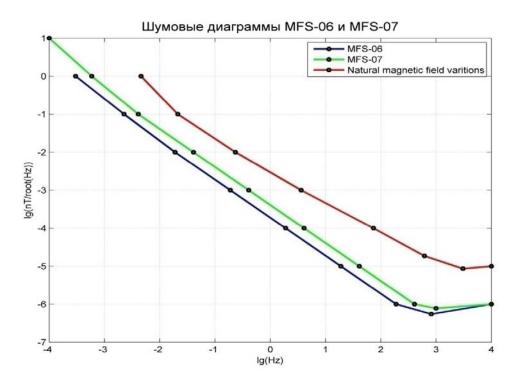


Рис.2.1.3. Уровень собственных шумов магнитометров MFS-06 и MFS-07 в сравнении с естественным фоном.

Рамочные антенны "Вистлер" и "Плутон" были разработаны в СКБ «Риап» по техническому заданию ИДГ РАН. Они обладают рекордной чувствительностью на уровне нескольких фТл. Внешне "Вистлер" и "Плутон" представляют собой шестиугольные рамочные антенны, которые вписывающиеся в окружности диаметра 1 и 2 метра соответственно *Рис. 2.1.4*.



Рис. 2.1.4. Рамочная антенна "Вистлер"

Основные характеристики датчиков приведены в сводной Таблице 2.1.

Таблица 2.1.

Индукционный магнитометр MFS-06	10 пТл/ $\sqrt{\Gamma \mu}$ на частоте 0.01 $\Gamma \mu$
	$0.1\ \text{пТл}/\sqrt{\Gamma \text{ц}}$ на частоте $1\ \Gamma \text{ц}$
	$1 \ \phi$ Тл $/\sqrt{\Gamma \mu}$ на частоте $1 \ \kappa \Gamma \mu$
	Частотный диапазон 0.00025-10000 Гц
Индукционный магнитометр MFS-07	30 пТл/ $\sqrt{\Gamma \mu}$ на частоте 0.01 $\Gamma \mu$
	$0.3\ \Pi T \pi / \sqrt{\Gamma \mu}$ на частоте 1 $\Gamma \mu$
	$0.8 \ \phi$ Тл/ $\sqrt{\Gamma_{\rm U}}$ на частоте 1 к $\Gamma_{\rm U}$
	Частотный диапазон 0.001-60000 Гц
Рамочная антенна "Вистлер"	Чувствительность — 0.4ϕ Тл/ $\sqrt{\Gamma \mu}$
	Частотный диапазон 800-100000 Гц

Рамочная антенна "Плутон"	Чувствительность — $0.5 \ \phi$ Тл/ $\sqrt{\Gamma \mu}$
	Частотный диапазон 800-30000 Гц

В измерительном комплексе ПРСР используется цифровой регистратор ADU-07 (производство фирмы Metronix), блок-схема которого приведена на *Puc 2.1.5*. Регистратор состоит из основной платы, на которой смонтированы источники питания, буферная память, и внешние интерфейсы USB. К плате подключаются аналого-цифровые преобразователи (АЦП) (10 шт), калибровочный генератор и GPS модуль (для синхронизации времени с точностью 30 нс и определения место положения измерительного комплекса). Управление и снятие информации с платы производится с помощью промышленного одноплатного маломощного компьютера, работающего под ОС Lunix. Характеристики ADU-07 приведены в *Таблице 2.2*.

Таблица 2.2.

Частотный диапазон	до 250 кГц
Количество каналов	От 1 до 10.
Процессор	Маломощный 32 битный компьютер.
Точность временной привязки	30 нс
Bec	6.5 кг
Питание	9B 18B
Низкочастотные каналы (НЧ)	5 НЧ каналов с частотой опроса до 2000 Гц
Высокочастотные каналы (ВЧ)	5 ВЧ каналов с частотой опроса до 250 кГц

Управление регистратором и снятие данных производится через WEB интерфейс по линии Ethernet с пропускной способностью 100 Mbit/s. С помощью Web интерфейса можно установить рабочие каналы, частоту оцифровки по каждому из них, задать план работы

любого канала, установить нужные фильтры, посмотреть состояние аккумуляторов и объем свободного места на флеш диске.

Все данные, представленные в этой работе, получены с помощью комплекса ПРСР.

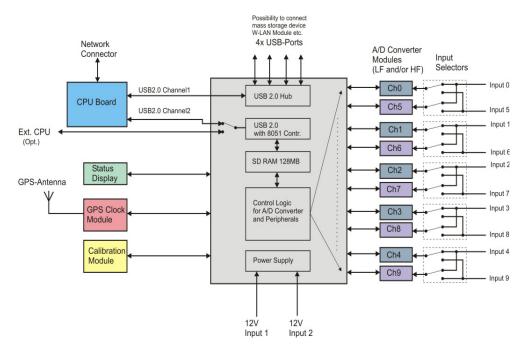


Рис 2.1.5 Блок-схема цифрового регистратора АDU-07.

2.2. Проведение полевых измерений и методика обработки данных

Во время поведения полевых измерений выбирались места с наименьшим уровнем шумов, оси датчиков как правило ориентировались в направлениях: магнитный Север-Юг, Восток-Запад и вертикально. Размещение датчиков схематично показано на *Puc. 2.2.1*. Но иногда для получения радиальных и тангенциальных компонент оси датчиков ориентировались на источник.

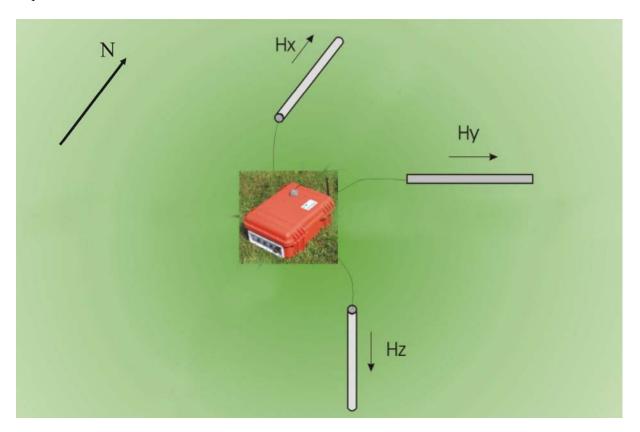


Рис. 2.2.1 Схема расположения измерительного комплекса при полевых измерений.

Данные, полученные с комплекса ПРСР, представляют из себя волновые формы с различными частотами оцифровки. Частоты оцифровки выбирались исходя из поставленных задач и необходимого частотного диапазона и составляли, как правило, от 8 до 65 кГц. Для визуализации данных использовалось быстрое преобразование Фурье (БПФ), с последующим построением трехмерных спектрограмм, на которых по оси абсцисс отложено время, на оси ординат частота, цветом показана интенсивность сигнала. Характерная спектрограмма

приведена на *Puc. 2.2.2.* В зависимости от задач и параметров ожидаемых сигналов брались различные выборки и перекрытия. Для уменьшения боковых лепестков в спектральных оценках (растекания спектра) и уменьшения высокочастотных шумов использовалась оконная функция Ханна.

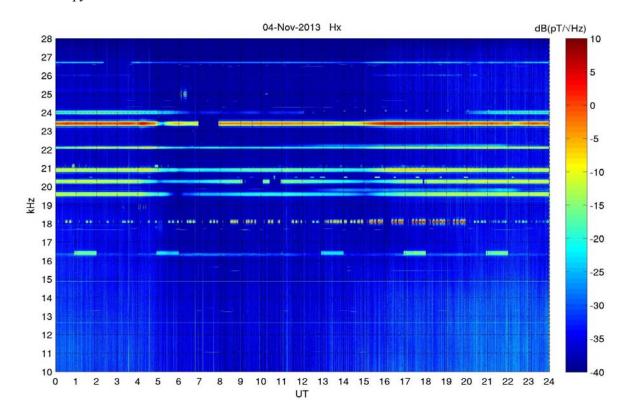


Рис. 2.2.2 Трехмерная спектрограмма построенная по данным, записанным 04.11.2013 в $\Gamma\Phi O$ "Михнево"

Если же, требовалось получить амплитуду и фазу сигнала на конкретной частоте и заданной полосе, то использовалась цифровая фильтрация полосовым или резонансным фильтром. Далее к временому ряду применяялось преобразование Гильберта,которое дает мгновенную амплитуду и полную фазу сигнала. Для получения вариации фазы требуется вычесть ωt, где ω - интересующая частота. Для оптимизации работы с полученными данными, в математической среде MatLab были разработан программный модуль ELF/VLF Viewer. Описание и текст программы приведены в Приложении.

3. Регистрация естественных источников КНЧ/ОНЧ излучения

3.1. Синхронная регистрация КНЧ/ОНЧ излучения на Земле и в верхней ионосфере в районе Байкальской рифтовой зоны

Проблема литосферно-атмосферно-ионосферных связей (ЛАИС) занимает важное место в геофизических исследованиях, что обусловлено как практическими задачами (прогноз землетрясений, влияние литосферных процессов на состояние ионосферы, влияние геомагнитных и ионосферных возмущений на энергетические и промышленные объекты), так и необходимостью решения фундаментальных задач, связанных с выявлением природы взаимосвязанных возмущений в литосферно-атмосферн-ионосферной системе. Ведущиеся в течение несколько десятилетий исследования проблемы ЛАИС привели к появлению большого количества гипотез и получению значительного экспериментального материала [51]. Неоднократно сообщалось, что ионосферные возмущения (вариации электрических и магнитных полей, плотности заряженной и нейтральной компоненты, возникновение или изменение параметров потоков захваченных и высыпающихся частиц) связаны с определенными процессами в литосфере, хотя механизм наблюдаемых эффектов не имеет общепринятого объяснения. Развитие ЭТОГО направления геофизики значительные трудности по той причине, что полученные экспериментальные данные о связи вариаций геофизических полей на и под поверхностью Земли с процессами в ионосфере часто противоречивы или условия получения таких данных не позволяют связать их однозначно с литосферно - ионосферным взаимодействием. Например, в [52, 53] рассматриваются литосферно-атмосферно-ионосферные процессы, которые, как считают авторы, можно считать предвестниками землетрясений, а в [54, 55] показано, что эффект изменения интенсивности электромагнитных эмиссий в ионосфере, связанный с землетрясениями, отсутствует или исчезающе мал. В этих условиях получение новых экспериментальных данных о связи электромагнитных возмущений и вариаций параметров ионосферы с литосферными структурами остается актуальным.

Стимулом и основой для проведения настоящих исследований стали имеющиеся в литературе данные о регистрации аномалий электромагнитных полей и излучений в ионосфере над структурными литосферными нарушениями. Электромагнитные возмущения в ионосфере, связанные с пролетом спутников над разломами и рифтовыми зонами как во время землетрясений или их подготовки, так и при отсутствии сейсмической активности, были обнаружены около 30 лет назад [56,57]. Устойчивые всплески интенсивности магнитной и электрической составляющих поля низкочастотных излучений (0.1–20 кГц) наблюдались на борту спутника "Интеркосмос 19" при его пролете над глубинными разломами литосферы: над Норвежским морем, Балтийским щитом, Баренцево-Карским шельфом и Западно-Сибирской низменностью. Появление сейсмо-ионосферных эффектов в низкочастотных шумах на высотах ионосферы объяснялось долготным дрейфом захваченных энергичных частиц внутреннего радиационного пояса, стационарное питч угловое распределение которых нарушается в результате рассеяния на флуктуациях электрического поля при их дрейфе через "зашумленную" магнитную силовую трубку, расположенную над эпицентром [58].

Эти результаты были подтверждены на большом экспериментальном материале по данным обработки измерительных данных, полученных на искусственных спутниках Земли DE_2 и Demeter [59]. Важной особенностью этих данных является обнаруженный рост интенсивности электрических полей и потоков заряженных частиц вне связи с землетрясениями. Выявленные в результате анализа этих данных зоны повышенной электромагнитной активности частично совпали с крупными промышленными центрами, энергетическими объектами, мощными радиостанциями. В тоже время, значительная часть

таких зон не связана с антропогенной деятельностью и расположена над крупными разломами земной коры. Одно из пятен повышенной электромагнитной активности было обнаружено над юго-западной частью Байкальской рифтовой зоны (БРЗ). Это обстоятельство стимулировало проведение комплексных исследований вариаций физических полей на поверхности Земли и в ионосфере в этой зоне с целью получения экспериментальных подтверждений наличия взаимосвязанных возмущений в литосферно-атмосферно-ионосферной системе.

Для проведения наземных измерений электромагнитных полей, акустических волн, эманаций радона, сейсмических и радиофизических наблюдений были организованы две экспедиции (в 2009 и 2010 гг.) в район Тункинской долины в юго-западной части БРЗ, который характеризуется развитой системой разломов земной коры.

Наземные измерения электромагнитных полей КНЧ/ОНЧ диапазона проводились в районе поселка Торы (51.82° С.Ш. 103.04° В.Д.) Точки измерения характеризовались крайне низким уровнем промышленных шумов, так как располагались на расстоянии порядка 10 км от ближайшей ЛЭП. Для наземных измерений использовался измерительный комплекс ПРСР. В состав комплекса входило оборудование немецкой фирмы Метроникс, а именно регистратор ADU-07 и магнитометры MFS-06 и MFS-07 (характеристики используемой аппаратуры приведены в главе №2).

Наряду с наземными измерениями осуществлялись синхронные измерения вариации электромагнитных сигналов в ионосфере на спутнике Demeter (высота орбиты 700 км). Проведение согласованных измерений было обеспечено использованием наземной и бортовой аппаратуры с близкими техническими характеристиками. Орбитальные измерения проводились на французском спутнике Demeter, специально разработанном для проведения исследований ЛИС [60]. Данный спутник имел на борту следующую научную аппаратуру:

- ІСЕ: три электрических сенсора с частотой оцифровки до 3.5 МГц;
- IMSC: три магнитометра работающих в диапазоне от нескольких Hz до 18 кГц;
- ІАР: ионный анализатор;
- IDP: детектор энергетических частиц;
- ISL: зонд Ленгмюра.

Для проведения измерений вариаций электромагнитных полей и параметров ионосферы, согласованных с наземными измерениями, бортовая аппаратура спутника при его пролетах над зоной наземных измерений (42-55 С.Ш., 92-112 В.Д.) включалась в режим быстрой записи (Burst mode), что позволило анализировать не только спектральные, но и волновые формы сигналов с трех-компонентного магнитометра с частотой оцифровки 2500 Гц.

За время экспедиции в августе 2009 года над зоной наземных измерений было 6 пролетов спутника 7, 10, 13, 14, 16 и 17 августа. Причем 3 пролета (7, 14, 17 августа) были дневными, а остальные 3 - ночными. На Рис. 3.1.1 приведены результаты синхронных наземных и орбитальных измерений во время пролета спутника 07.08.2009. На верхней панели приведена запись с ИСЗ Demeter, на нижней - запись с наземного комплекса за тот же промежуток времени. Запись на спутнике велась с 3:26 UT, и имела длительность составляла 200 сек. На записи, полученной в ходе наземных измерений, наблюдается 6 выбросов, значительно превышающих основной электромагнитный фон, на рисунке они помечены цифрами от 1 до 6. Часть из них явно соответствуют сигналам, записанным аппаратурой спутника "Деметер", например, событию №1. Самый большой выброс произошел примерно в 3:29:45 UT и имеет амплитуду более 130 пТл на «Деметере». Этот сигнал так же хорошо виден на записях Метроникса. На Рис. 3.1.2 приведены записи волновых форм «Деметера» (верхняя панель) и «Метроникса» (нижняя панель) в момент этого выброса в более крупном

временном масштабе. Импульс на "Деметере" представляет из себя колебания с затухающей частотой от примерно 700 Гц до 130 Гц и длительностью порядка 0.2 с. Импульс на Метрониксе фактически представляет из себя одно сильное колебание (с небольшим предвестником) длительностью около 0.03 с, т.е. почти на порядок короче. Развитие колебаний на "Деметере" было зафиксировано с некоторым временным смещением относительно импульса записанного на Метрониксе (задержка не более 5 мс – данный факт может быть связан с геометрией распространения).

Более наглядно это событие видно на спектрограммах, построенных по сигналам, полученным с «Деметера» и «Метроникса», на Рис. 3.1.3. и Рис. 3.1.4. соответственно (по оси абсцисс — время в секундах начиная с 3:00 UT, по оси ординат — частота в Гц, цветом показана амплитуда сигнала). На данных спектрах проявляется еще 2 сигнала, которых не было видно в явном виде на волновых формах.

На Рис. 3.1.5 приведены спектры первого события по каналу Ну. На верхней панели данные с «Деметера», на нижней с «Метроникса». На спектрограмме «Деметера» стрелками отмечены сигналы, которые коррелируют с событиями изображенными на спектрограмме «Метроникса». События, записанные на спутнике, на спектрограмме имеют характерную форму вистлеров, а события записанные на Земле форму сфериков. Так же видно, что временной промежуток t_1 между событиями 1 и 2 на спектрограмме «Деметера» совпадает с временным промежутком t_2 между событиями 4 и 5 в пределах точности измерения на спектрограмме «Метроникса». Аналогичная ситуация для временных промежутков t_3 и t_4 : t_3 = t_4 в пределах точности измерений. Из всего этого можно сделать вывод, что сигналы, зарегистрированные на спутнике и на Земле, имеют общий источник. А множественность данных событий и характерный вид их спектрограммы (амплитудно-частотные характеристики сигналов соответствующие сферикам, твикам и вистлерам) свидетельствуют

о том, что источником данного ЭМИ являются молнии. За время этого пролета "Деметера" каждое из 6 самых сильных событий показанных на рис. 3.1.1, записанных на Земле, коррелировало с событиями, записанными на спутнике, даже когда их не было видно в явном виде на волновой форме "Деметера". Например, событие № 4 (*Puc.3.1.6.-Puc. 3.1.8*).

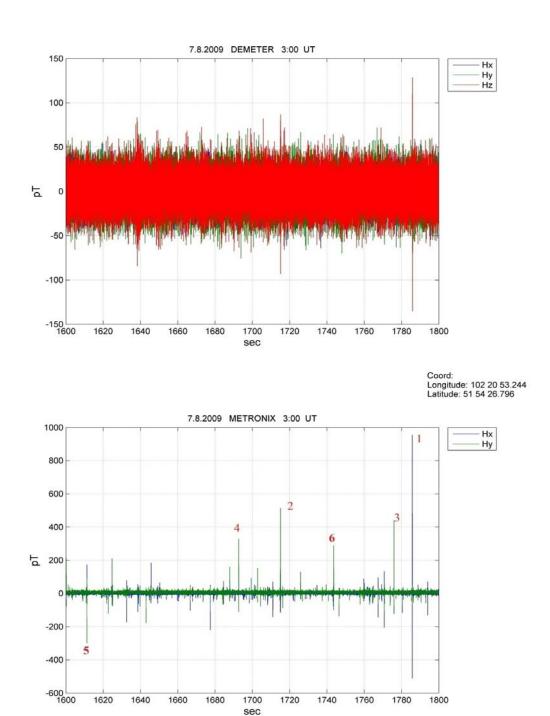
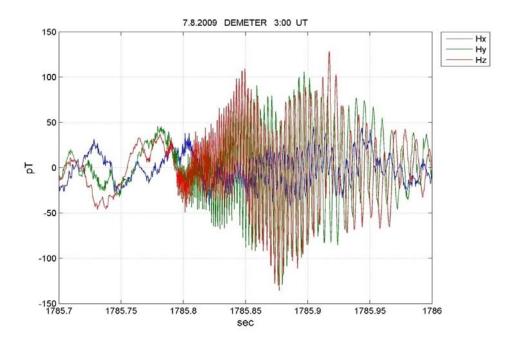


Рис. 3.1.1. Синхронная регистрация ЭМИ на спутнике Demeter (верхняя панель) и на земле (нижняя панель, красными цифрами отмечены события имеющие отклик на Demeter) 07.08.2009.



Coord: Longitude: 102 20 53.244 Latitude: 51 54 26.796

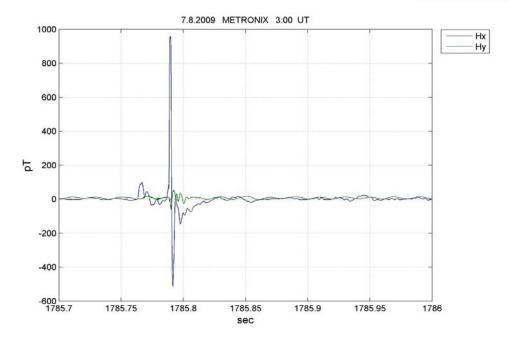


Рис. 3.1.2. Событие №1 в более крупном временном масштабе записанное на спутнике Demeter (верхняя панель) и на Метрониксе (нижняя панель).

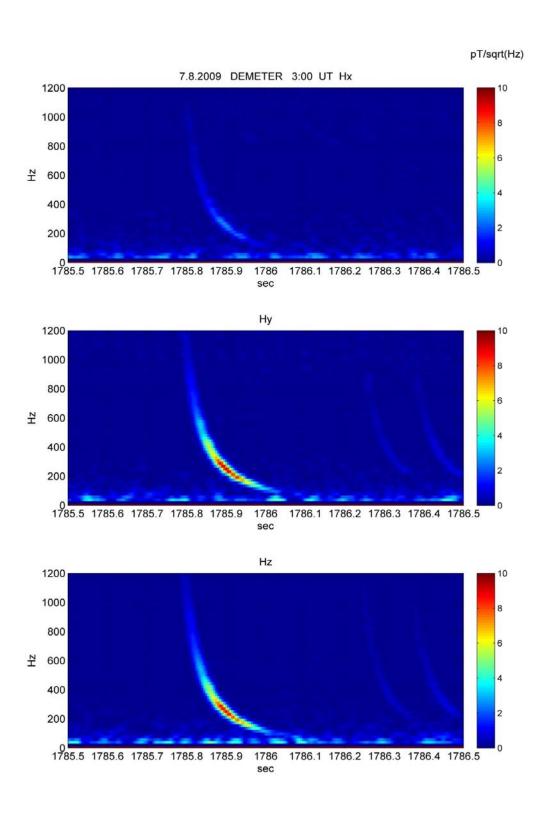
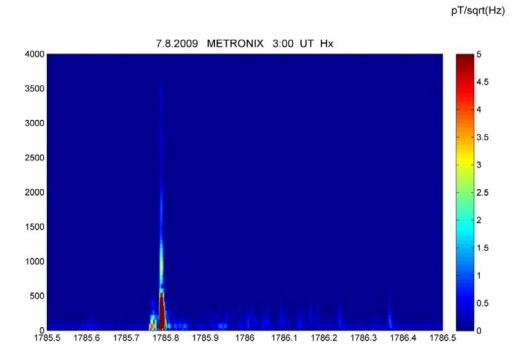


Рис. 3.1.3. Спектрограммы события №1, записанного на спутнике Demeter.



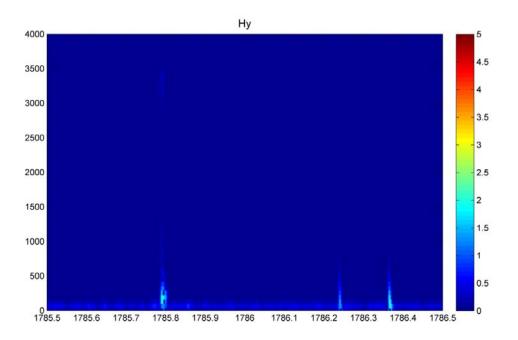


Рис 3.1.4. Спектрограммы события №1, зарегистрированного наземным комплексом Metronix.

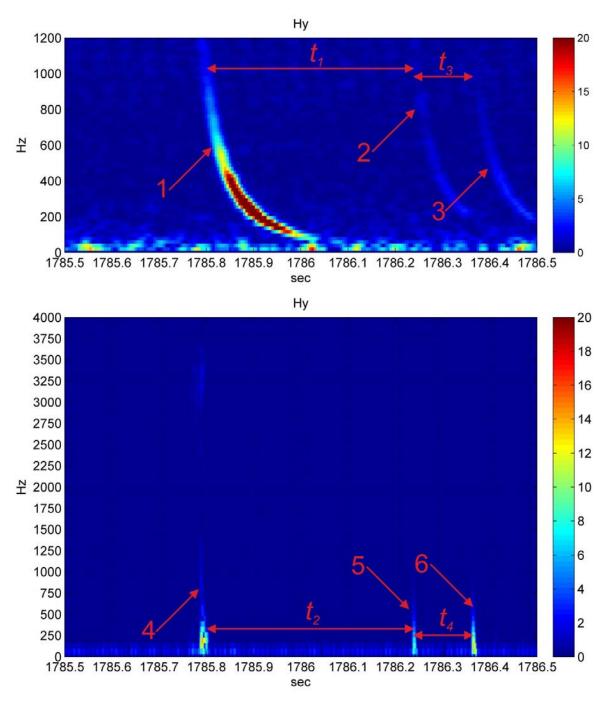
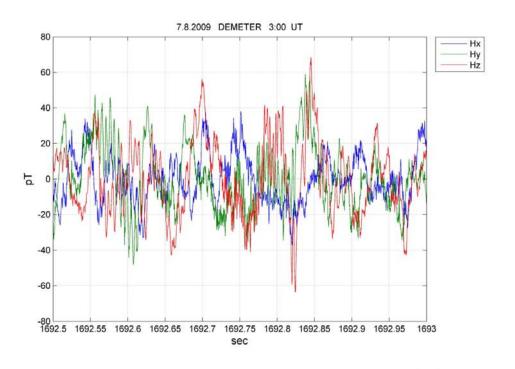


Рис. 3.1.5. Спектрограммы события №1, зарегистрированного по каналу Hy на спутнике "Деметер" (верхняя панель) и наземным комплексом Metronix (нижняя панель)



Coord: Longitude: 102 20 53.244 Latitude: 51 54 26.796

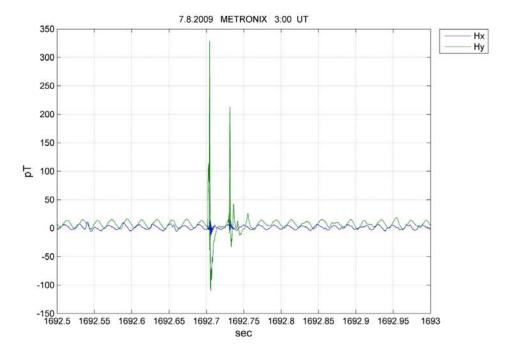


Рис. 3.1.6. Волновые формы события №4

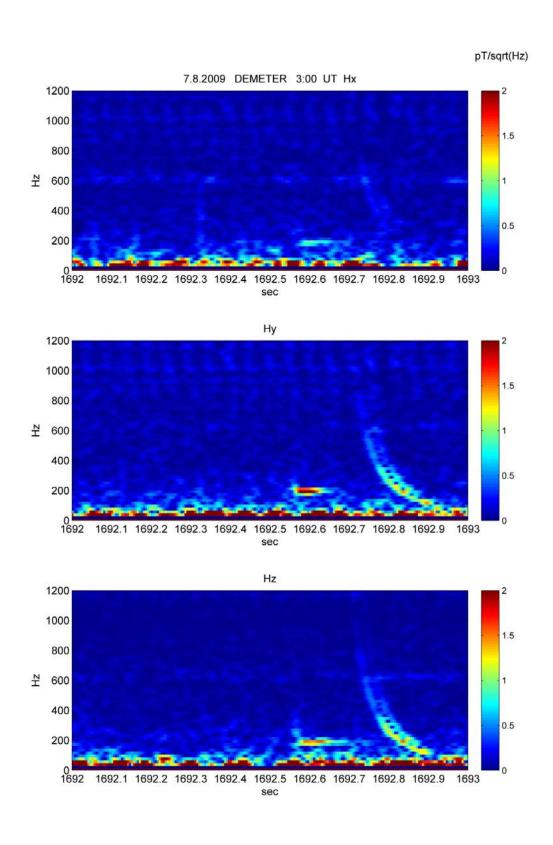
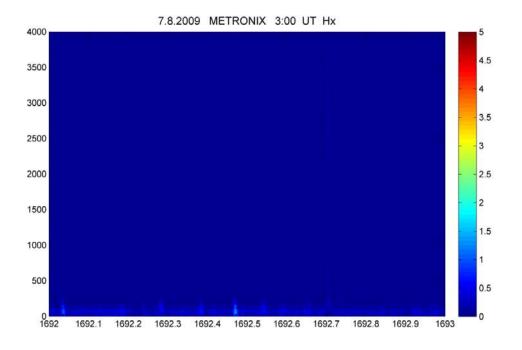


Рис. 3.1.7. Спектрограмма события №4 «Деметер».





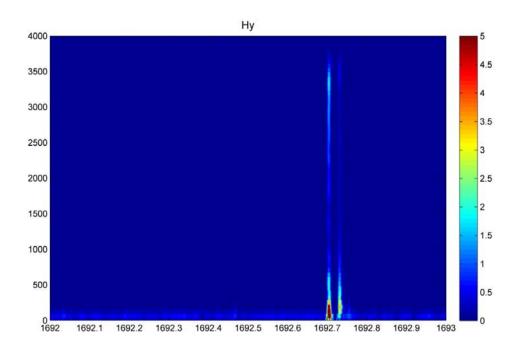


Рис. 3.1.8. Спектрограмма события №4 «Метроникс».

В ходе экспедиций в БРЗ за время каждого пролета спутника в среднем синхронно регистрировалось 4-5 событий с характерной спектральной формой сфериков. Появление данных сигналов на высоте пролета спутника Demeter (~700 км) обусловлено частичным проникновением КНЧ/ОНЧ излучения через верхнюю стенку волновода. Тот факт, что на спутнике было зарегистрированно большое количество сигналов КНЧ/ОНЧ диапазонов от молниевых разрядов позволил предположенть существование некой области в ионосфере (расположенной над зоной наземных измерений), через которую ЭМИ КНЧ/ОНЧ диапазонов проникает в магнитосферу Земли.

Для проверки данной гипотезы нами была проведена вторая экспедиция в БРЗ в июле 2010 года. Всего за период второй экспедиции в район БРЗ было 21 пролет спутника, причем из них 10 ночных и 11 дневных, что позволило статистически обработать данные полученные со спутника.

Алгоритм обработки заключался в следующем:

- 1. все данные были разделены на дневные и ночные;
- 2. из волновых форм выбирались все события, которые можно отнести к вистлерам и амплитуда которых превышала 65 пТл. Отселектированые события записывались в отдельную базу данных с координатами спутника в момент их регистрации;
- 3. далее наш квадрат (с широтами 42°-61° и долготами от 92° 111°) был разбит на ячейки величиной градус на градус. После этого число сигналов, зарегистрированных в каждой ячейке, нормировалось на общее время пролета спутника в пределах этой ячейки. Таким образом удалось получить среднюю частоту регистрации сигналов КНЧ/ОНЧ диапазона в данной ячейке.

Результаты обработки представлены на *Puc. 3.1.9*. Цветом показана частота регистрации сигналов на спутнике в ячейках сетки размером один на один градус. Из графиков видно, что

существует зона преимущественного проникновения КНЧ/ОНЧ излучения от молниевых разрядов в ионосферу Земли, расположенная в диапазоне $52^{\circ}-56^{\circ}$ С.Ш. $97^{\circ}-103^{\circ}$ В.Д. и занимает область $\sim 400 \times 500$ км.

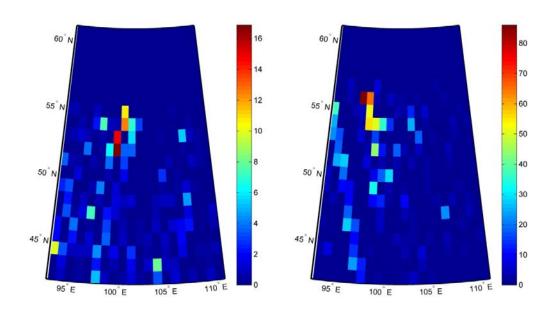


Рис. 3.1.9. Область исследования электромагнитных сигналов в БРЗ размером двадцать на двадцать градусов. Цветом показана частота регистрации сигналов на спутнике в ячейках сетки размером один на один градус.

Обнаружение области преимущественного проникновения электромагнитного излучения в верхнюю ионосферу над БРЗ позволяет говорить о возможной связи этой области с литосферными структурами. В то же время нельзя исключить и другие возможные объяснения данного явления. Сам факт обнаружения ионосферных неоднородностей над Байкальской рифтовой зоной представляется важным и нуждающимся в дальнейшем изучении.

В ходе данных экспедиций были получены следующие результаты:

- 1. обнаружены массовые корреляции сигналов КНЧ/ОНЧ диапазонов записанных на Земле и на орбите при синхронных измерениях в БРЗ;
- 2. обнаружена зона преимущественного проникновения КНЧ излучения от естественных источников из волновода в ионосферу.

3.2. Пеленгация естественных источников КНЧ/ОНЧ излучения

Исследование параметров КНЧ/ОНЧ излучения от молниевых разрядов может являться мощным инструментом изучения параметров D-слоя ионосферы. Но для проведения таких исследований необходимо знать координаты источника. Одним из способов определения координат источника является метод моноимпульсной пеленгации. Данная методика приведена в статьях ряда авторов [61]. Суть этой методики заключается в том, что по отношению амплитуд сигнала, записанных по ортогональным каналам, можно определить азимут на источник. В ходе экспедиций в БРЗ была предпринята попытка отработать методику моноимпульсной пеленгации молниевых разрядов с помощью одного измерительного пункта. На *Рис. 3.2.1*. приведены результаты пеленгации молниевых разрядов в районе БРЗ 11 июля 2010 года.

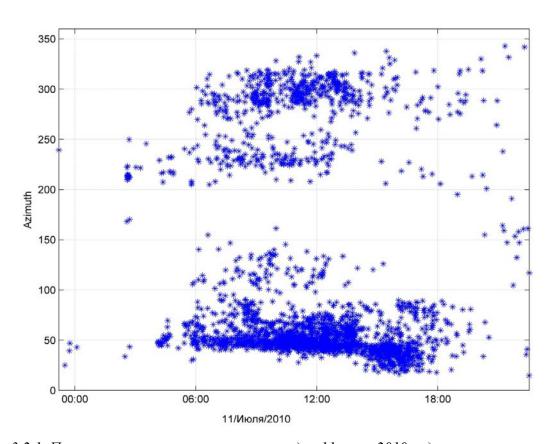


Рис. 3.2.1. Пример пеленгации молниевых разрядов 11 июля 2010 года

По оси абсцисс здесь отложено время в формате UT, по оси ординат - азимут на источник (молниевый разряд) в градусах относительно магнитного северного полюса. Видно, что преобладают два направления: с азимутом от 40 до 100 градусов и от 220 до 300 градусов. Эти направления соответствуют локальным максимумам грозовой активности. Один очаг грозовой активности расположен в Западносибирской равнине, второй очаг протянулся по меридиану от южных отрогов Большого и малого Хингана до севера Станового хребта, по параллели - с запада от Большого Хингана до южных отрогов Малого Хингана и Бурецкого креста на востоке [62].

Методика моноимпульсной пеленгации проста в использовании и не требует большого числа измерительной аппаратуры, но обладает малой точностью [63]. Для более точной локации отдельных молний требуется использовать пространственно-разнесенные синхронные измерения и определять координаты источника по времени прихода сигнала.

По результатам синхронных пространственно-разнесенных измерений в феврале 2013 года, была отработана методика пеленгации, когда проводились синхронные измерения вариаций электромагнитных полей в трех измерительных пунктах:

Название	Широта, С. Ш.	Долгота, В. Д.	Датчики	
ГФО «Михнево»	54.9572	37.7563	магнитометры MFS-07	
д. Дубна	55.1559	38.4325	антенны "Вистлер"	
Д Александровка	54.8960	35.0139	антенны "Вистлер"	

Схема расположения измерительных пунктов показана на *Рис. 3.2.2*. Измерения проводились с помощью измерительных комплексов ПРСР, описанных в главе 2. Запись велась с частотой оцифровки 65536 Гц.



Рис. 3.2.2. Схема расположения измерительных пунктов

Синхронные измерения в трех точках дают возможность лоцировать широкополосные электромагнитные сигналы от молниевых разрядов. На *Рис.3.2.3* приведены результаты синхронной записи во всех трех точках по каналу Нх сигнала записанного 16.02.2013 в 11:06:25 UT. Из этого графика явно следует, что во всех трех точках был записаны сигналы, имеющий общий источник. Так же из-за характерной формы сигнала можно сделать вывод, что источником данного сигнала является молния.

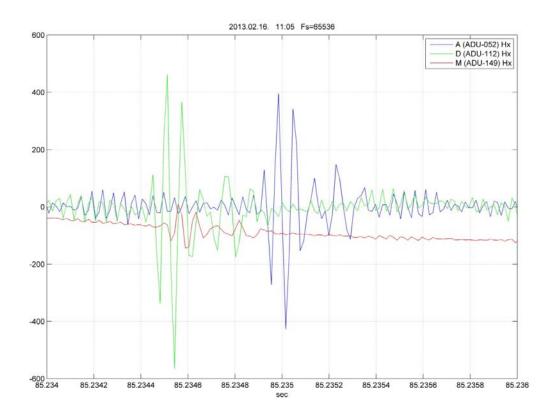


Рис. 3.2.3. Пример синхронной регистрации сигналов 16.02.2013

Методика определения пеленга имеет следующий алгоритм (рассмотрим его на примере этого сигнала):

- По каждому измерительному пункту бралась синхронная запись волновой формы длительностью 2 мс, так чтобы событие (сферик) располагался примерно по середине.
 Такая длительность записи была выбрана исходя из того соображения, что максимальное расстояние между измерительными пунктами составляет 222 км.
 Поэтому задержка прихода сигнала не может превышать 0,74 мс.
- 2. Методом кросс-корреляции определялись задержки прихода сигнала на измерительные пункты. В данном случае задержка сигнала в ГФО «Михнево» относительно д. Дубна составила 40 мкс, а в д. Александровка 470 мкс. Задержка сигнала в д. Александровка относительно ГФО «Михнево» составило 430 мкс.

3. Для каждой пары пунктов временные задержки прихода сигнала пересчитывались в разность расстояний до источника сигнала и строилась кривая на которой мог располагаться источник. Эта кривая представляет из себя гиперболу. Пересечение трех гипербол дает нам положение источника излучения (*Puc 3.2.4*).



Рис. 3.2.4. Область локализации молнии.

На *Рис.* 3.2.5-3.2.8 приведены некоторые результаты локации сигналов от молниевых разрядов, записанных 16.02.2013 с 11:05 до 11:10 UT. Молнии были зарегистрированы на расстояниях от 50 до 600 километров.



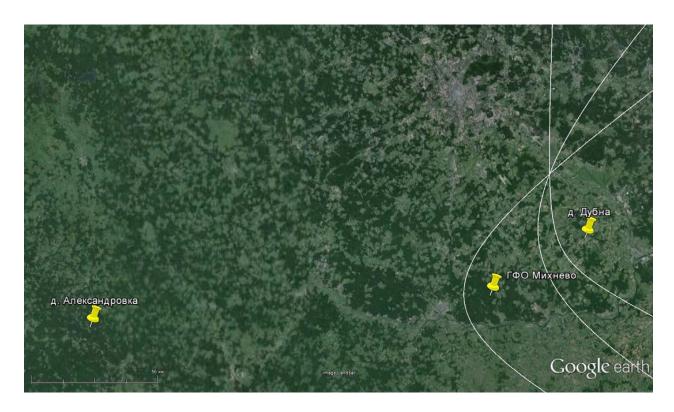
Рис. 3.2.5. Результат пеленгации молнии 11:06:31.03 UT



Рис. 3.2.6. Результат пеленгации молнии 11:06:45.37 UT



Рис. 3.2.7. Результат пеленгации молнии 11:07:53.59 UT



Puc. 3.2.8. Результат пеленгации молнии 11:08:07.53 UT

Сетевой способ локации молний показал свою эффективность и высокую точность. Всего за время измерений удалось лоцировать большое число молний (порядка 2-3 молний в секунду).

В результате проведенных экспериментов получены следующие результаты:

- 1. Применение метода моноимпульсной пеленгации позволяет определить положение источника. Однако это метод обладает малой точностью.
- 2. Разработана практическая методика пеленгации импульсных источников КНЧ/ОНЧ излучения по времени прихода сигнала с помощью пространственно-распределенных измерительных пунктов. Показано, что эта методика обладает высокой точностью.

4. Регистрация антропогенных источников КНЧ/ОНЧ излучения.

Основными искусственными источниками КНЧ/ОНЧ излучения являются СДВ станции и электромагнитное излучение, возникающее во время экспериментов по искусственной модификации ионосферы нагревными стендами.

Эффект переизлучения ионосферой модуляционных частот при воздействии на нее мощного модуляционного КВ излучения был подтвержден в 1974 году, однако известны только единичные случаи удаленной регистрации низкочастотных сигналов обусловленных этим эффектом.

Для исследования влияния геофизических условий на амплитудно-фазовые характеристики сигнала в качестве источника КНЧ/ОНЧ излучения были проведены эксперименты на нагревном стенд EISCAT heater, расположенный на севере Норвегии в точке с координатами: 69.58° северной широты и 19.21° восточной долготы.

Стенд представляет собой мощный передатчик, работающий на фазированную антенную решетку. Поскольку переизлученные сигналы имеют малую амплитуду, нами использовалась высокочувствительный измерительный комплекс ПРСР, обладающий чувствительностью на уровне единиц фТл (подробное описание комплекса ПРСР дано в Главе 2).

Наши эксперименты состояли из трех нагревных кампаний:

- 1. Февраль 2012
- 2. Октябрь 2012
- 3. Февраль 2013

4.1. Регистрация сверхслабых сигналов на больших расстояниях от ионосферного источника.

Целью эксперимента проводимого в феврале 2012 года являлось подтверждение эффекта Гетманцева, и определение возможности удаленной регистрации КНЧ/ОНЧ излучения на больших расстояниях от источника. Измерения проводились в геофизической обсерватории (ГФО) "Михнево" (координаты: 54.9572° С.Ш. и 37.7563° В.Д.) *Рис.4.1.1*. Расстояние от точки измерения до нагревного стенда EISCAT составляло 1885 км, азимут на нагревный стенд - 327.5 градуса.



Рис. 4.1.1. Схема постановки эксперимента. Февраль 2012 года.

Для регистрации использовался измерительный комплекс ПРСР в составе регистратора ADU-07 и двух индукционных магнитометров MFS-07, сориентированных осями в направлении магнитный Север-Юг, Запад-Восток и вертикально.

Стенд работал с модуляцией (по нашей программе) 20, 25 и 27 февраля. Режимы работы стенда, а также результаты регистрации приведены в *таблице 4.1.1.* Звздочками отмечены

сеансы, когда был зарегистрирован сигнал по соответствующему каналу. В ходе данного эксперимента стенд работал со следующими модуляционными частотами: 517, 1017, 2017, 3017, 4017 и 6017 Гц. Нам удалось зарегистрировать все модуляционные частоты.

20 февраля 2012 года с 16:10 до 18:25 стенд работал в режиме 5 минут нагрев / 5 минут пауза с частотой модуляции 2017 Гц (см. Табл. 4.1.1.).

Спектрограммы сигналов с магнитометров MFS-07 по каналам Нх и Ну (магнитный Север-Юг, Запад-Восток соответственно) приведены на рис.4.1.2-4.1.4. На спектрограммах по оси абсцисс отложено время, по оси ординат — частота, цветом показана амплитуда принятых сигналов. На рис. 4.1.5 показана амплитуда сигнала на частоте 2017 Гц в зависимости от времени по каналам Нх и Ну. Из данного графика видно, что амплитуда сигналов записанных по каналу Нх в 2-3 раза превышает амплитуду сигналов, полученных по каналу Ну.

25 февраля с 17:36 до 19:36 стенд работал 12-ти минутными циклами: 7 минут нагрев / 5 минут пауза. Нагрев, в свою очередь состоял из 2-х частей: первые 2 минуты осуществлялась модуляция с частотой 2017 Гц, в последующие 5 минут одной из следующих 5-и частот – 517 Гц, 1017 Гц, 3017 Гц, 4017 Гц и 6017 Гц (*Табл. 4.1.1.*). На *рис. 4.1.6-4.1.*7 приведены спектры сигналов на частоте 2017 Гц по 3-м каналам. Для построения спектров брались выборки 128 секунд и перекрытие с шагом 30 секунд. На полученных спектрах сигналы с трудом просматриваются по каналам Нх и Ну на частоте 2017 Гц в период с 19:12 по 19:14 UT. По каналу Н*z* (*Рис. 4.1.8*) сигнала практически нет.

На *рис.* 4.1.9-4.1.13 приведены спектрограммы сигнала на частотах 517, 1017, 3017, 4017, 6017 Гц, зарегистрированных 25 февраля 2012 года. С 17:38 до 17:43 UT модуляционный сигнал с частотой 517 Гц зарегистрирован не был ни по одному из каналов (*Puc.* 4.1.9). В период с 17:50 до 17:55 UT удалось зарегистрировать сигнал на частоте 1017 Гц по каналу Ну (*Puc.* 4.1.10). С 18:02 до 18:07 UT был зарегистрирован сигнал на частоте

3017 Гц по обоим каналам (*Puc. 4.1.11*). Расщепление сигнала связано с сигнатурой передатчика, а именно с особенностью формирования модулирующей частоты задающим генератором. Сигнал на частоте 4017 Гц был зарегистрирован по обеим каналам (*Puc. 4.1.12*), а сигнал на частоте 6017 Гц только по каналу Нх (*Puc. 4.1.13*).

27 февраля удалось зарегистрировать следующие модуляционные частоты:

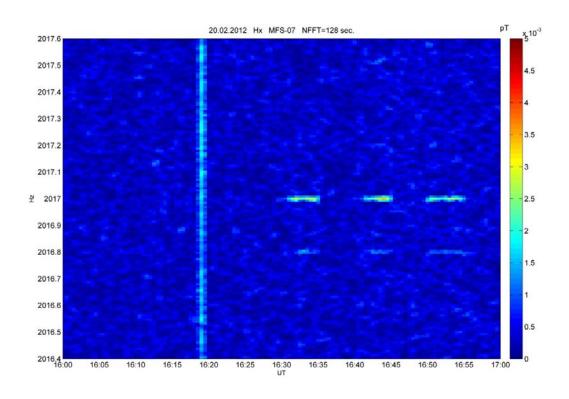
517 и 4017 Гц (Рис. 4.1.14-4.1.15).

Табл. 4.1.1.

				Результаты	
20.02.2012				регистрации	
Частота					
несущей,	Модуляция,	Время начала,	Время окончания,		
МΓц	Гц	UT	UT	Канал Нх	Канал Ну
4.04	2017	16:10	16:15		
4.04	2017	16:20	16:25		
4.04	2017	16:30	16:35	*	
4.04	2017	16:40	16:45	*	
4.04	2017	16:50	16:55	*	
4.04	2017	17:00	17:05		
4.04	2017	17:10	17:15		
4.04	2017	17:20	17:25	*	
4.04	2017	17:30	17:35	*	*
4.04	2017	17:40	17:45	*	*
4.04	2017	17:50	17:55	*	*

4.04	2017	18:00	18:05	*	*
4.04	2017	18:10	18:15	*	*
4.04	2017	18:20	18:25	*	*
25.02.20)12				
4.04	2017	17:36	17:38		
4.04	517	17:38	17:43		
4.04	2017	17:48	17:50		
4.04	1017	17:50	17:55		*
4.04	2017	18:00	18:02		
4.04	3017	18:02	18:07	*	*
4.04	2017	18:12	18:14	*	*
4.04	4017	18:14	18:19	*	*
4.04	2017	18:24	18:26		
4.04	6017	18:26	18:31	*	
4.04	2017	18:36	18:38		
4.04	517	18:38	18:43		
4.04	2017	18:48	18:50		
4.04	1017	18:50	18:55		
4.04	2017	19:00	19:02		
4.04	3017	19:02	19:07	*	*
4.04	2017	19:12	19:14	*	*
4.04	4017	19:14	19:19	*	
4.04	2017	19:24	19:26		

4.04	6017	19:26	19:31		
27.02.20	12	I			
4.04	2017	15:00	15:02		
4.04	517	15:02	15:07	*	*
4.04	2017	15:12	15:14		
4.04	1017	15:14	15:19		
4.04	2017	15:24	15:26		
4.04	3017	15:26	15:31		
4.04	2017	15:36	15:38		
4.04	4017	15:38	15:43	*	*
4.04	2017	15:48	15:50		
4.04	6017	15:50	15:55		
4.04	2017	16:00	16:02		
4.04	517	16:02	16:07		*
4.04	2017	16:12	16:14		
4.04	1017	16:14	16:19		*
4.04	2017	16:24	16:26		



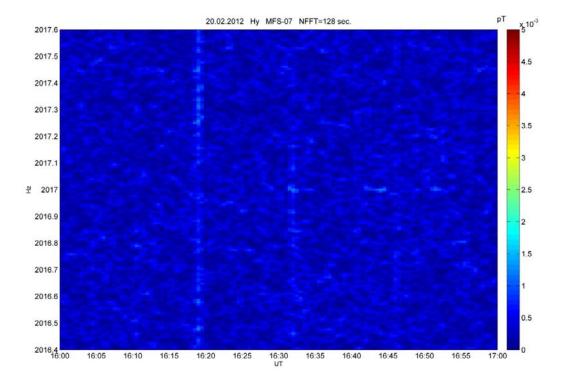
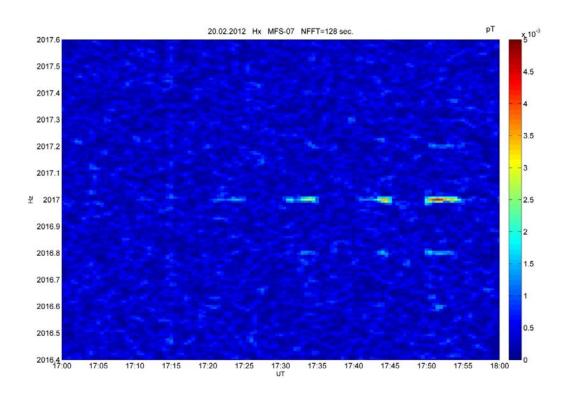
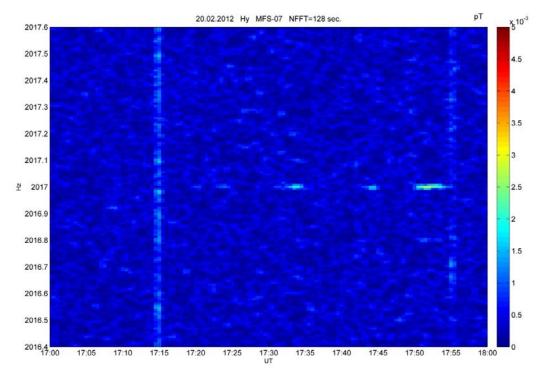
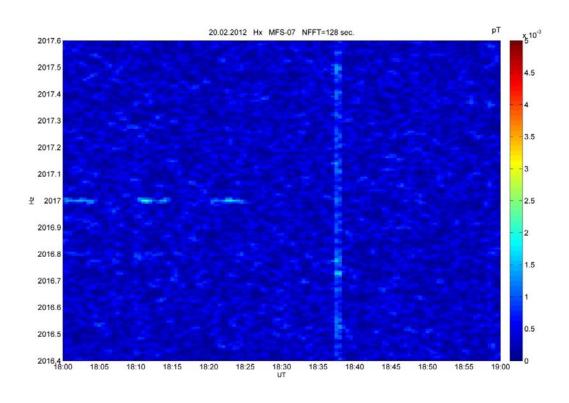


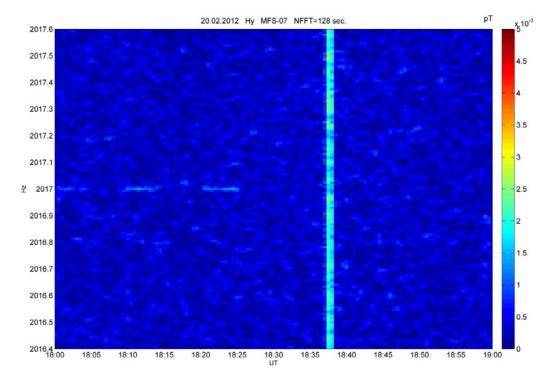
Рис. 4.1.2 Регистрация сигналов на частоте 2017 Гц в период с 16:00 до 17:00 UT 20 февраля 2012 года





 $Puc.\ 4.1.3.\ Peгистрация\ cuгналов\ на частоте 2017\ \Gamma$ ц в период с 17:00 до 18:00 UT 20 февраля 2012 года





 $Puc.\ 4.1.4.\ Peгистрация\ cuгналов\ на частоте 2017\ \Gamma$ ц в период с 18:00 до $19:00\ UT\ 20$ февраля $2012\ года$

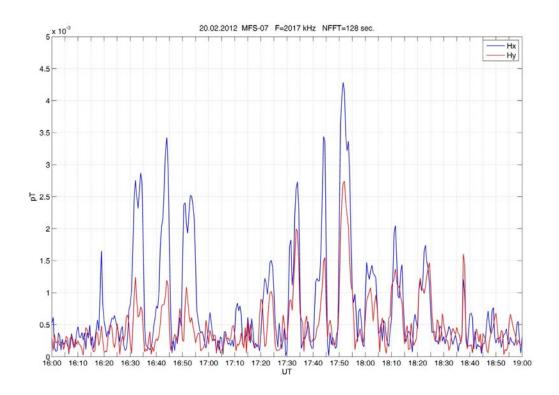


Рис. 4.1.5. Амплитуды сигналов на частоте 2017 Γ ц, записанные по каналу Hx - синяя кривая и каналу Hy - красная кривая в период с 16:00 до 19:00 UT 20 февраля 2012 года

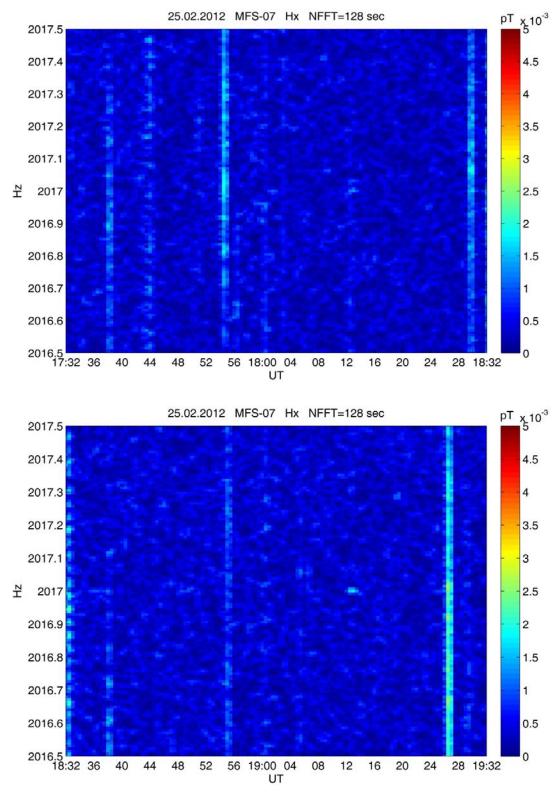


Рис. 4.1.6. Регистрация сигналов на частоте 2017 Гц по каналу Нх в период с 17:32 до 19:32 UT 25 февраля 2012 года. Сигналы зарегистрированы не были.

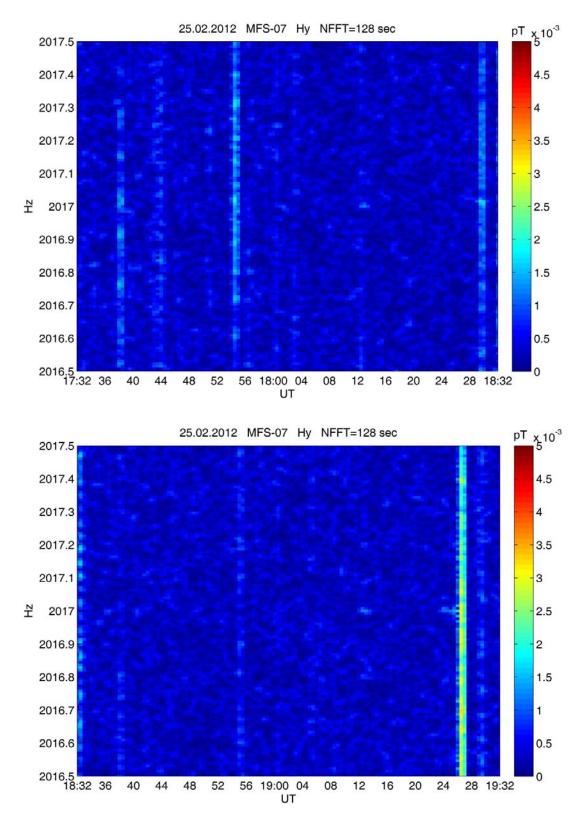


Рис. 4.1.7. Регистрация сигналов на частоте 2017 Гц по каналу Ну в период с 17:32 до 19:32 UT 25 февраля 2012 года. Сигналы зарегистрированы не были.

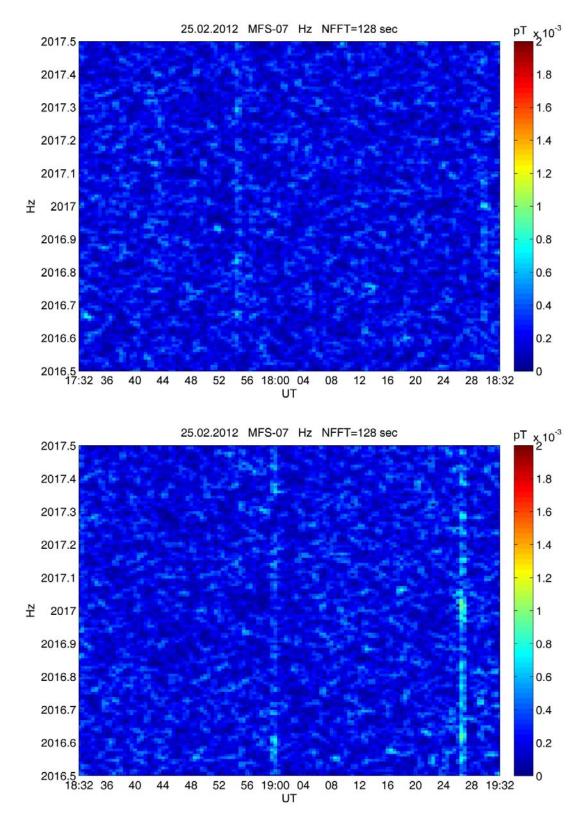
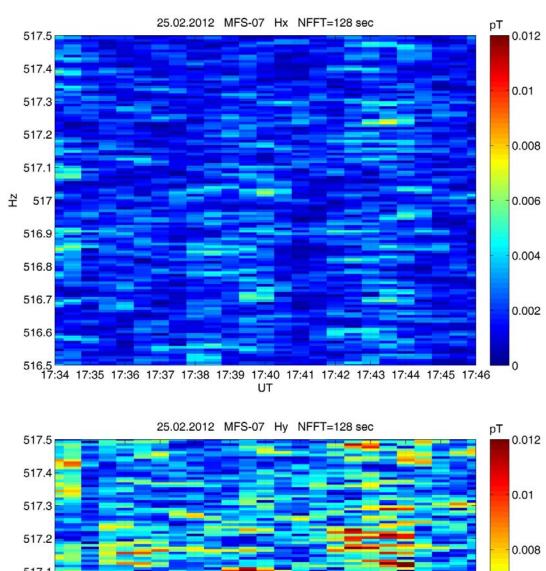
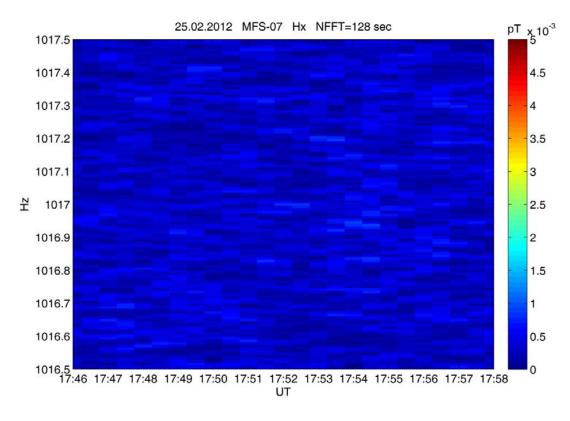


Рис. 4.1.8. Регистрация сигналов на частоте 2017 Гц по каналу Hz в период с 17:32 до 19:32 UT 25 февраля 2012 года. Сигналы зарегистрированы не были.



517.4
517.3
517.2
517.1
\$\tilde{\text{T}}\$
517.
\$\tilde{\text{T}}\$
516.5
17:34 17:35 17:36 17:37 17:38 17:39 17:40 17:41 17:42 17:43 17:44 17:45 17:46 UT

Рис. 4.1.9. Регистрация сигналов на частоте 517 Гц в период с 17:34 до 17:46 UT 25 февраля 2012 года. Сигналы зарегистрированы не были.



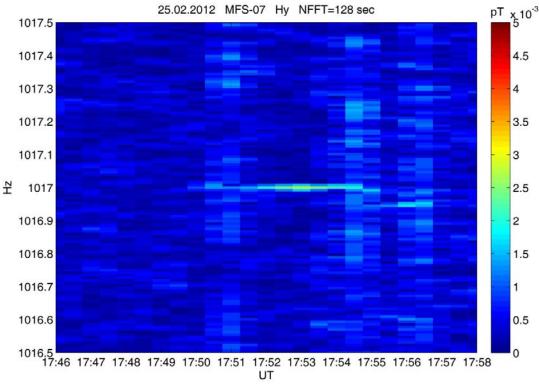
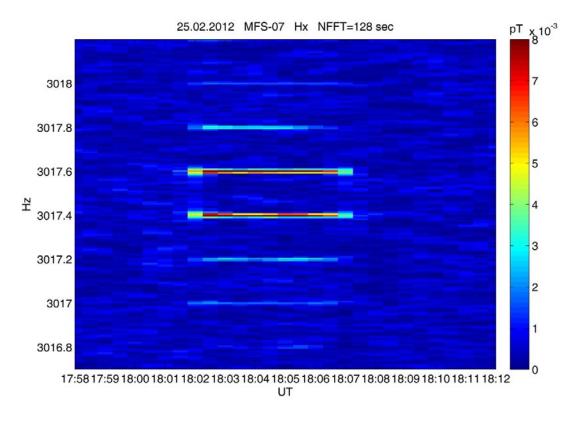


Рис. 4.1.10. Регистрация сигналов на частоте 1017 Гц 25 февраля 2012 года в период с 17:32 до 19:32 UT



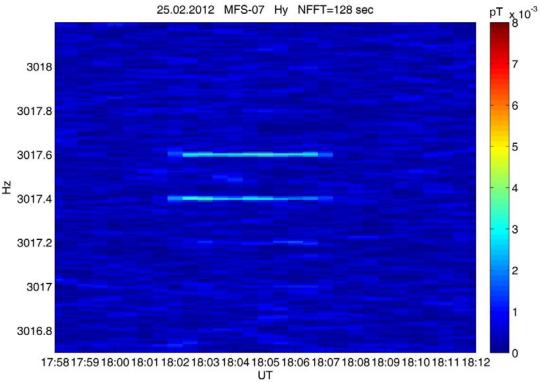
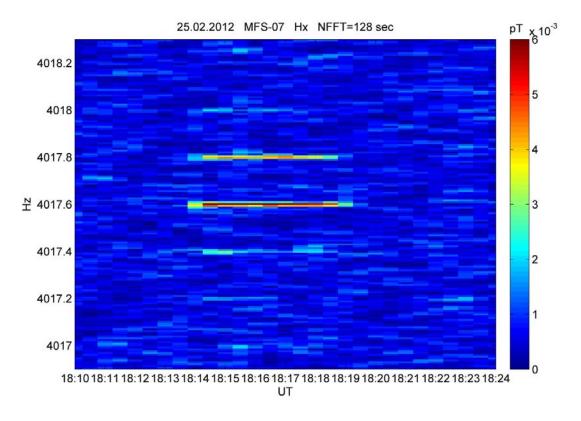
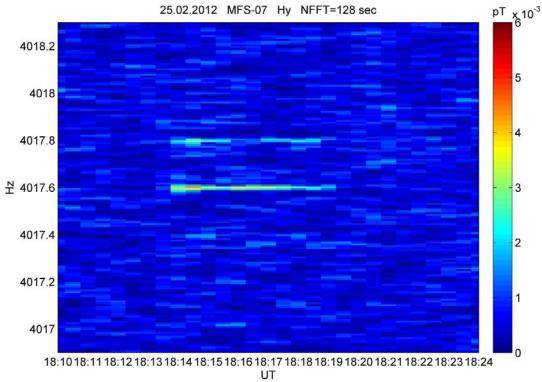
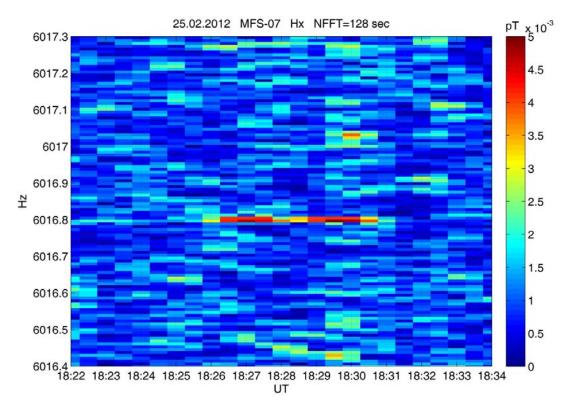


Рис. 4.1.11. Регистрация сигналов на частоте 3017 Гц 25 февраля 2012 года в период с 18:02 до 18:07 UT





 $Puc.\ 4.1.12.\ Peгистрация\ сигналов на частоте 4017\ \Gamma$ ų 25 февраля 2012 года в период с 18:14 до $18:19\ UT$



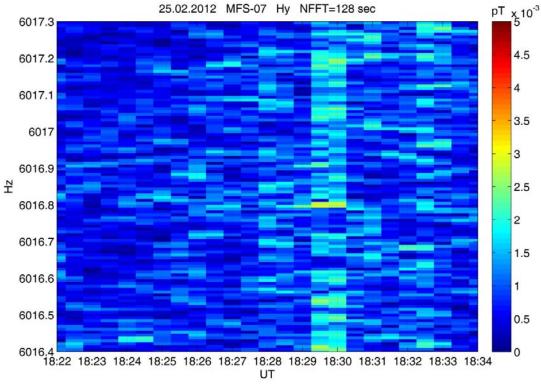
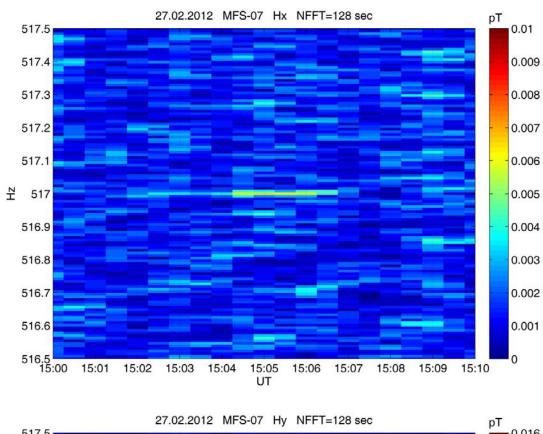


Рис. 4.1.13. Регистрация сигналов на частоте 6017 Гц 25 февраля 2012 года в период с 18:26 до 18:31 UT



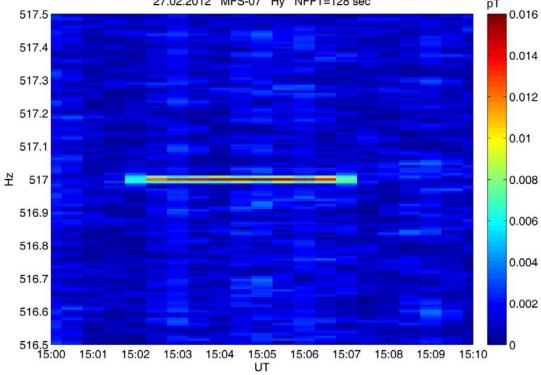
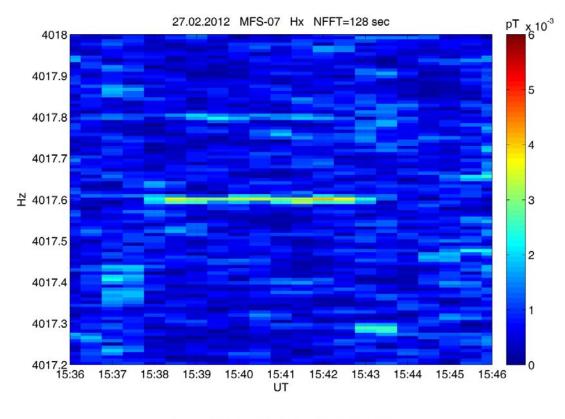


Рис. 4.1.14. Регистрация сигналов на частоте 517 Гц 27 февраля 2012 года в период с 15:02 до 15:07 UT



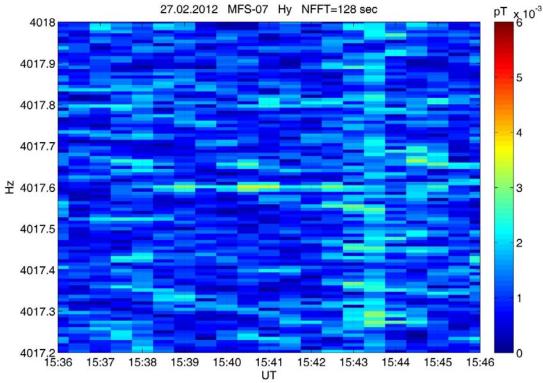


Рис. 4.1.15. Регистрация сигналов на частоте 4017 Гц 27 февраля 2012 года в период с 15:38 до 15:43 UT

Регистрация всех модуляционных частот в ходе февральского эксперимента, позволила построить зависимость поляризации принятых сигналов (отношение радиальной компоненты поля к тангенциальной) от их частоты (Рис. 4.1.16). На этом графике красной кривой показаны логарифм поляризации сигналов, полученных экспериментально в ГФО "Михнево", от частоты. Синяя и коричневая - теоретический расчет поляризации для разных профилей волновода [31]. На всех кривых наблюдается изменение поляризации сигнала в районе 1,8 кГц. Эта частота является частотой среза волновода Земля-ионосфера. Преобладание тангенциальной компоненты поля над радиальной для частот ниже этой частоты среза можно объяснить тем, что в принимаемом сигнале преобладает ТЕМ мода. Выше частоты среза волновода поляризация сигналов меняется и наблюдается преобладание азимутальной компоненты над тангенциальной, что соответствует преобладанию в принимаемом сигнале ТЕ моды [64]. Отличие между экспериментальными и теоретическими данными может быть обусловлено слабостью принятых сигналов, а так же по причине того, что антенны были ориентированы на магнитный С-Ю и В-3. Таким образом разница между направлением на источник и положением антенн составила 41 градус. Это привело к тому, что каждая антенна принимала как радиальную, так и тангенциальную компоненты.

В результате этой нагревной кампании экспериментально показана возможность регистрации сверхслабых сигналов КНЧ/ОНЧ диапазона на расстоянии около 2000 км от источника. Прием всех модуляционных частот позволил экспериментально подтвердить многомодовое распространение КНЧ/ОНЧ излучения от ионосферного источника и построить зависимость поляризации принимаемого сигнала от частоты в диапазоне 0.5-6 кГц.

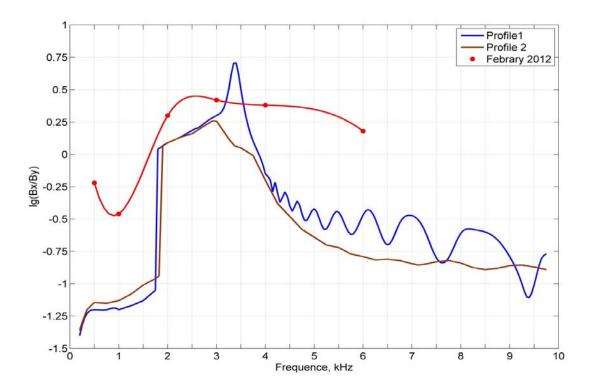


Рис. 4.1.16. Зависимость поляризации сигналов от частоты. Красная кривая — эксперимент EISCAT — Михнево, 1884 км, февраль 2012 г. Синяя и коричневая кривые - расчет по модели [31] для разных волноводов.

4.2. Пеленгация сверхслабых сигналов от ионосферного источника на больших базах

В ходе октябрьской кампании 2012 года решалась задача исследования влияния трассы на амплитудно-фазовые характеристики сигнала. Для этой цели проводилась синхронная регистрация электромагнитных сигналов КНЧ/ОНЧ диапазона в трех пунктах, расположенных на различных азимутах и расстояниях от источника.

В ходе данной нагревной кампании стенд работал по нашей программе с килогерцовыми модуляциями 5 дней. Более подробно режим работы стенда приведен в таблице 4.2.1. Для выявления влияния трассы на распространение КНЧ/ОНЧ сигналов в волноводе Земля - ионосфера, в ходе данного эксперимента измерения проводились синхронно в трех точках: ГФО "Михнево", ГФО "Горьковская", ГФО "Тулома". Расположение приемных пунктов показано на *Рис. 4.2.1*. Координаты точек измерения, расстояние до источника, и используемые датчики приведены в *таблице 4.2.2*.

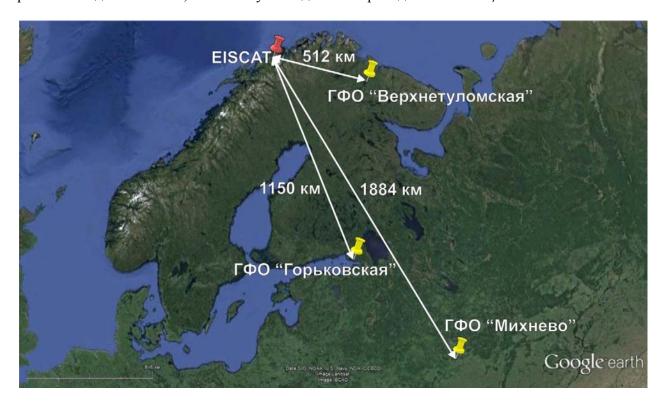
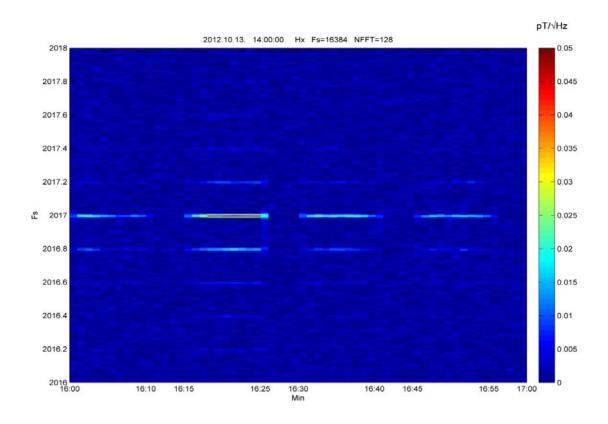


Рис. 4.2.1. Схема постановки эксперимента в октябре 2012 года.

За время кампании, только 13 октября удалось зарегистрировать сигнал в двух точках одновременно, а именно в Горьковской и Верхнетуломской обсерваториях. В этот день стенд работал в режиме модуляции 2017 Гц 10 минут нагрев / 5 минут пауза. На *Рис. 4.2.2-4.2.3* приведены результаты регистрации модуляционной частоты 2017 Гц в Верхнетуломской и Горьковской обсерваториях соответственно.

Табл. 4.2.2. Координаты источника и измерительных пунктов.

Источник и	Координаты	Расстояние	Азимут	Используемые датчики
измерительные		до	на	
пункты.		EISCAT, км	EISCAT	
EISCAT	69.68°N			
	19.21° E			
ГФО "Михнево"	54.9572° N	1884	327.5°	2 магнитометра MFS-06 и
	37.7563° E			2 магнитометра MFS-07
ГФО	60.2689° N	1150	330.5°	2 рамочные антенны "Вистлер"
"Горьковская"	29.3776° E			
ГФО	68.5919° N	512	276.5°	2 рамочные антенны "Вистлер",
"Верхнетуломск	31.7503° E			магнитометр MFS-07 и магнитометр
ая"				MFS-06



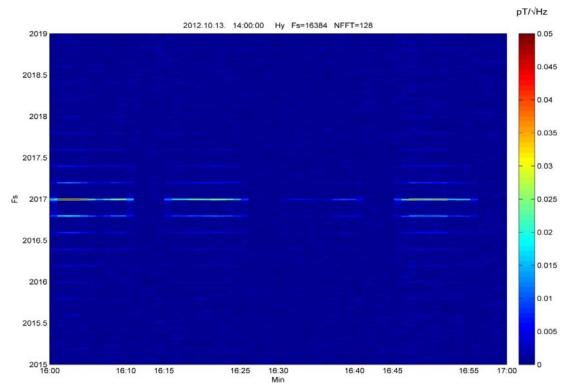
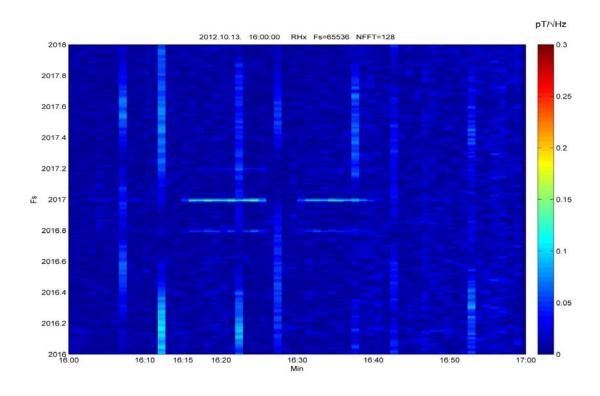


Рис. 4.2.2. Спектры сигналов принятых в $\Gamma\Phi O$ "Верхнетуломская" на индукционные магнитометры MFS-07 и MFS-07



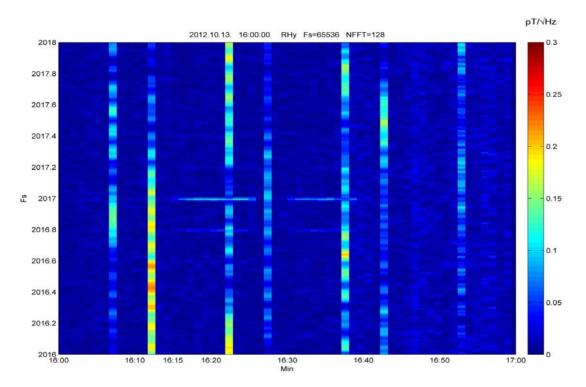


Рис. 4.2.3. Спектры сигналов принятых в $\Gamma\Phi O$ "Горьковская" на рамочные антенны "Вистлер"

В Горьковской обсерватории удалось зарегистрировать только 2 цикла работы стенда с 16:15 до 16:25 и 16:30 до 16:40, а в Верхнетуломской обсерватории были зарегистрированы все циклы работы стенда. На рис.4.2.4 приведены полные амплитуды сигналов (вычесленные как корень квадратный из суммы компонент) на частоте 2017 Гц в зависимости от времени, принятые одновременно в 2х точках.

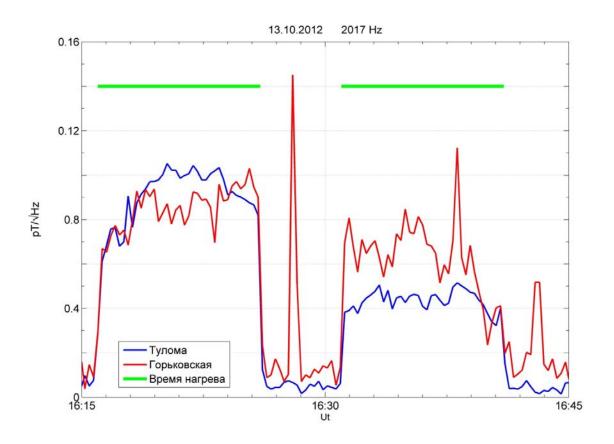


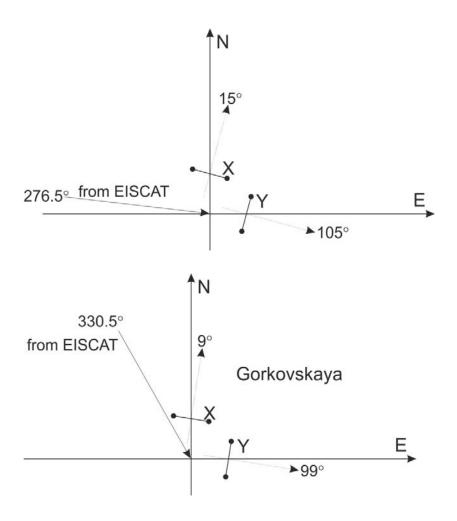
Рис. 4.2.4. Амплитуды сигнала, зарегистрированного от нагревного стенда EISCAT 13 октября 2012 года на частоте 2 кГц. Красная и синяя кривые – измерения в обсерваториях "Горьковская" и "Верхнетуломская" соответственно.

Амплитуды сигналов принятых в ГФО "Горьковская" в период с 16:16 до 16:26 сравнимы, а в период 16:31 до 16:41 больше амплитуды сигналов зарегистрированных ГФО "Верхнетуломская". Полученный результат сложно объяснить, т. к. расстояние между

точками регистрации отличается в два раза, соответственно и амплитуды сигналов должны убывать как 1/г.

Во время данной кампании, также проводились фазовые измерения. Как было сказано ранее оси антенн были ориентированы в направлении С-Ю и В-3. Для измерительной точки Верхнетуломской обсерватории азимут на стенд составлял 276.5°,

а для Горьковской обсерватории 330.5°. Геометрия приемных пунктов приведена на *Puc. 4.2.5*.



Puc. 4.2.5. Расположение измерительной аппаратуры относительно нагревного стенда EISCAT

На *Рис.* 4.2.7 показаны фазы принимаемого сигнала в Верхнетуломском и Горьковской. Для обсерватории Горьковской сигнал был пересчитан для системы координат, повернутой на 50° по часовой стрелке, так как антенны были ориентированы в направлении магнитный С-Ю, В-З, а азимут на источник составлял 330.5°. Таким образом, как в «Верхнетуломской», так и в «Горьковской» обсерваториях компонента X соответствует азимутальной составляющей магнитного поля, а компонента Y – радиальной. Здесь так же присутствует сильное, примерно на радиан, изменение фазы за время нагрева. Но, в отличие от Верхнетуломского, где фаза возрастала, здесь она наоборот убывает.

Изменение фазы сигнала может быть обусловлено тремя причинами:

- 1. отличие модуляционной частоты от ожидаемой
- 2. перемещением источника
- 3. изменением условий на трассе распространения.

Рассмотрим эти причины более подробно. В первом случае на всех фазах должен наблюдаться одинаковый линейный тренд. Но в нашем случае наблюдаются встречные тренды и это уже нельзя объяснить отличием частоты передатчика от ожидаемой.

Во втором случае - по изменению фазы сигнала в процессе нагрева можно оценить смещение источника. Тогда получается, что за время регистрации источник сместился на 24 км от "Горьковской" и приблизился на 16 км к "Верхнетуломской" обсерватории, т.е. сместился на 44 км в направлении Север-Северовосток. Эта дистанция заметно больше пятна нагрева, поэттому такое смещение источника маловероятно.

Таким образом остается единственное объяснение вариации фаз — изменяются условия распространения на трассе.

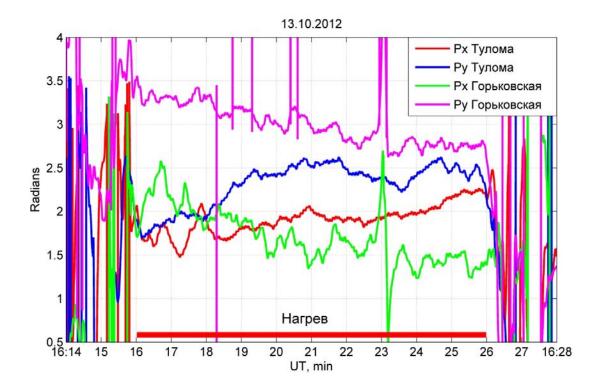


Рис. 4.2.7. Изменение фазы модуляционного сигнала на частоте 2017 Гц по результатам двухкомпонентных измерений в обсерваториях "Верхнетуломская" (синяя и красная кривые) и "Горьковская" (зеленая и розовая кривые) Горизонтальная красная линия время нагрева.

По результатам данной кампании можно сделать вывод, что при данной схеме расположения измерительных пунктов пеленгация источника невозможна, т.к. трассы существенно разные. Фазы принятых сигналов фазы разбежались примерно на 1.5 радиан что соответствует четверти длины волны (на данной частоте примерно 38 км). Для уменьшения влияния трасс на фазовые характеристики принимаемых сигналов, пеленгацию источников КНЧ/ОНЧ излучения следует осуществлять на малой базе.

4.3. Пеленгация сверхслабых сверхслабых сигналов от ионосферного источника на малых базах

В нагревной кампании февраля 2013 года решалась задача отработки методики пеленгации источника излучения фазовыми методами. Для исключения влияния трасс нами проводилась синхронная регистрация сигналов, вызванных работой стенда, на коротких базах. Измерения проводились в ГФО «Михнево», а так же вблизи д. Александровка и д. Дубна. Относительное расположение стенда EISCAT и измерительных пунктов показано на *Puc. 4.3.1*.

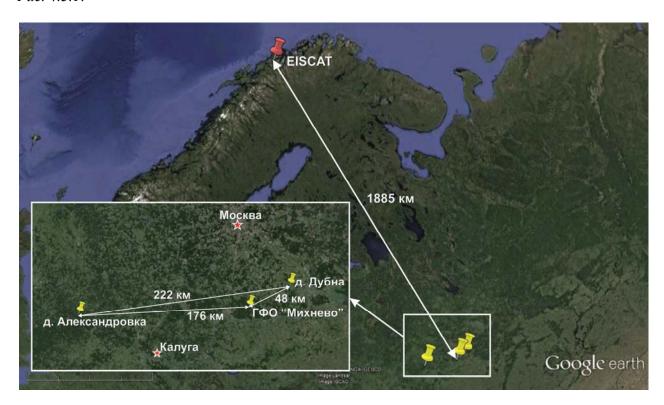


Рис. 4.3.1. Расположение измерительной аппаратуры во время эксперимента в феврале 2013.

С модуляцией стенд работал 4 дня и только 21 февраля с 17:05 до 17:07 сигнал был зарегистрирован во всех трех измерительных пунктах.

При обработке сигналов был применен следующий алгоритм:

- 1. Фильтрация принятого сигнала резонансным фильтром с центром на частоте 2017 Гц и шириной равной 0.01 Гц. На *Рис. 4.3.2*. показана амплитуда модуляционных сигналов на частоте 2017 Гц в полосе 0.01 Гц, принятых в трех точках. Большая разница амплитуд сигналов, на столь коротких базах, может быть обусловлена различными условиями в точках приема.
- 2. Вычисление фазы принятого сигнала с помощью преобразования Гилберта. На Рис. 4.3.3. приведены фазы сигналов принятых в трех измерительных пунктах. При наличии сигнала на модуляционной частоте, фазы сигналов, принятых на данной частоте ведут себя одинаково (с 17:04 по 17:07 UT), а во все остальное время они ведут себя достаточно хаотично
- 3. Для вычисления набега фаз достаточно вычислить разность соответствующей пары кривых, что и делалось. Разница в расстоянии от источника до измерительных пунктов в Александровке и в Дубне составляла 60.5 км. Соответственно разность набега фаз между Александровкой и Дубной от EISCAT должна составлять 2,52 радиана. Среднее же значение набега фаз с 17:05 до 17:07 составило 2.46 радиана, *Рис.4.3.4*. Полученный набег фаз достаточно хорошо совпадает с теоретической оценкой
- 4. В случае, когда расстояние до станции много больше расстояния между приемными пунктами можно воспользоваться классической формулой, связывающей набег фаз и угол прихода сигнала: $\alpha = \arcsin\left(\left(n + \frac{\varphi}{2\pi}\right)\frac{\lambda_0}{H}\right)$, где ϕ -набег фаз, λ_0 -длина волны, Н-база, или расстояние между приемными пунктами, n-целое число. На Puc.~4.3.5 приведен расчет азимута на источник из измерительного пункта Дубна в период с 17:05 до 17:07

Данный результат показывает принципиальную возможность пеленгации ионосферного источника КНЧ/ОНЧ излучения фазовыми методами.

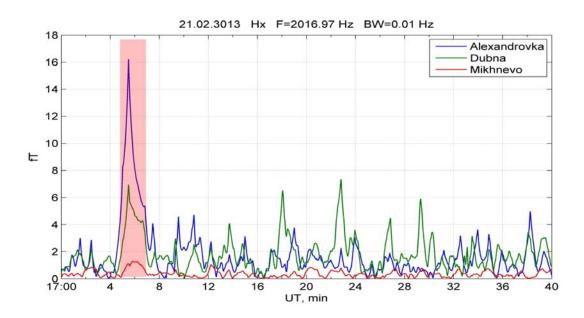


Рис. 4.3.2. Амплитуды сигналов, зарегистрированные на частоте 2016.97 Гц в трех точках. Красная кривая — измерения, проводимые в ГФО Михнево, синя и зеленая кривые - результаты измерений в деревне Александровка и деревне Дубна соответственно. Красной областью выделено время регистрации сигнала с 17:05 до 17:07.

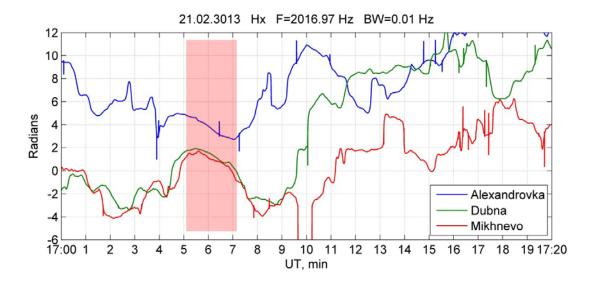


Рис. 4.3.3. Изменение фазы сигналов, записанных в трех измерительных пунктах (синяя кривая - д. Александровка, зеленая - д. Дубна, красная - ГФО Михнево). В период времени 17:05-17:07 (выделенный красной областью), когда был зарегистрирован сигнал, фазы ведут себя одинаково.

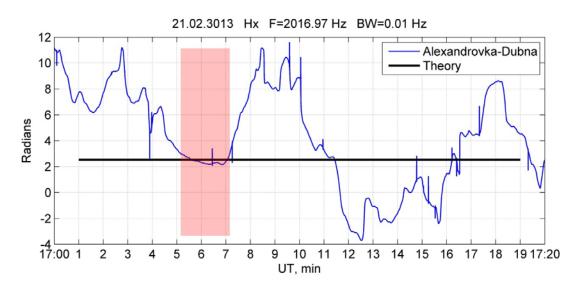


Рис.4.3.4. Разность набега фаз между д. Дубна и д. Александровка, черная прямая линяя — расчетный набег фаз, синяя кривая — набег фаз, полученный в ходе эксперимента, красной областью выделено время регистрации сигнала.

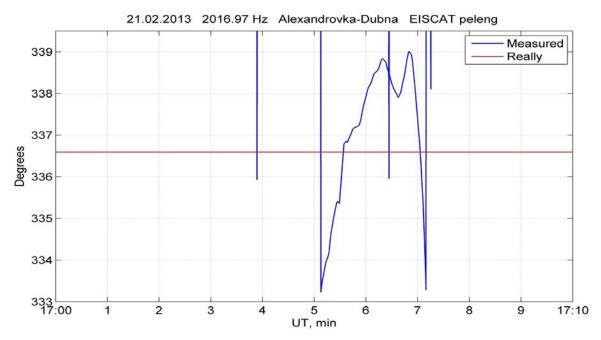


Рис. 4.3.5. Азимут на источник EISCAT из измерительного пункта «Дубна». Красная прямая - действительный азимут, синяя кривая – азимут рассчитанный в результате эксперимента

4.4. Влияние гелиогеофизических условий на генерацию КНЧ/ОНЧ сигналов во время нагревных экспериментов

Экспериментальные данные и оценки, касающиеся связи эффективности генерации КНЧ/ОНЧ волн с интенсивностью электроджета, сильно отличаются. В [65] указывается, что значительное усиление электроджета не пропорционально изменению уровня НЧ излучения. Радиометрические измерения над HAARP показали значительное повышение плотности электроджета, не сопровождавшееся ростом амплитуды НЧ излучения. Наблюдался даже рост амплитуды НЧ излучения при значительном ослаблении электроджета.

В ходе наших трех нагревных кампаний проводился сравнительный анализ амплитуды КНЧ/ОНЧ излучения с IU индексом. Этот индекс вычисляется по показаниям магнитометров, входящих в измерительную сеть IMAGE. В состав данной сети входят магнитометры, расположенные в северной Европе. Поэтому IU индекс качественно характеризует состояние электроджета в этом районе.

На *Рис.* 4.4.1. приведены сравнения IU индекса (верхняя панель) и амплитуды модуляционных сигналов на частоте 2017 Гц (нижняя панель) были записаны 20.02.2012 в период с 16:00 по 18:30 UT в ГФО "Михнево". Из этого графика прослеживается корреляция между возрастанием токов элетроджета и амплитудой принимаемых сигналов. Такая же зависимость наблюдалась и 25 февраля (*Puc.* 4.4.2.). На этом графике так же четко прослеживается корреляция состояния электроджета с амплитудами принимаемых модуляционных сигналов.

Совершенно другая ситуация была во время нагревного эксперимента в октябре 2012 года (*Puc. 4.4.3.*). Из этого рисунка видно, что амплитуда принимаемых сигналов в ГФО "Тулома" и ГФО "Горьковская" (нижняя панель) ни как ни связана с ростом геомагнитной активности над нагревным стендом EISCAT (верхняя панель).

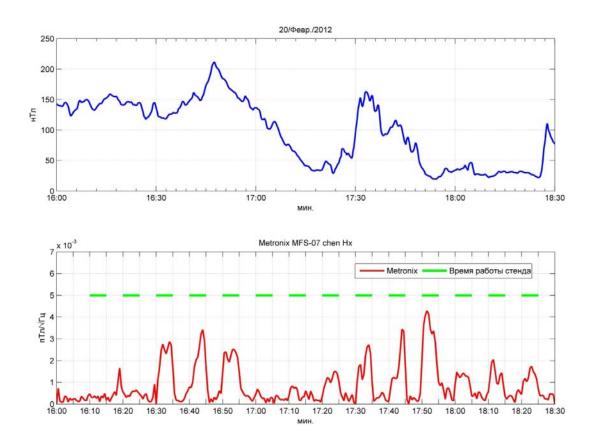


Рис. 4.4.1. Сравнение IU индекса (верхняя панель) и амплитуды принятых сигналов (нижняя панель) 20 февраля 2012 года.

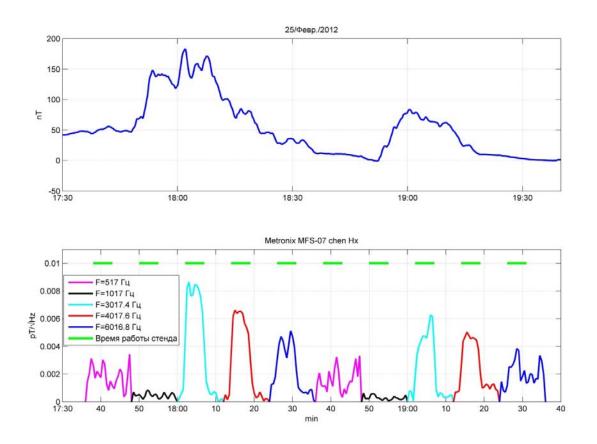


Рис. 4.4.2. Сравнение IU индекса (верхняя панель) и амплитуды принятых сигналов (нижняя панель) 25 февраля 2012 года.

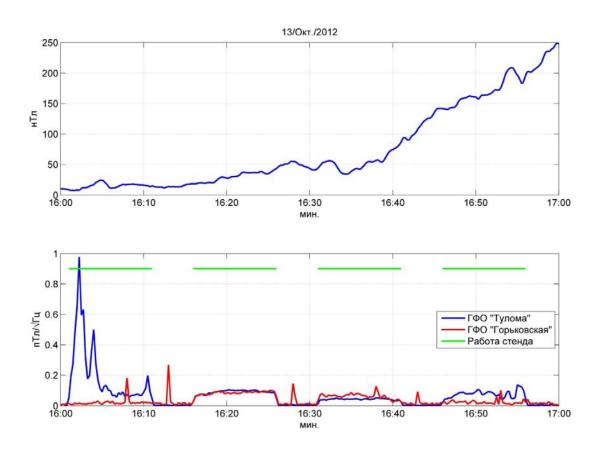


Рис. 4.4.3 Сравнение IU индекса (верхняя панель) и амплитуды принятых сигналов (нижняя панель) 13 октября 2012 года.

Так же результаты этой кампании сравнивались с состоянием электромагнитных полей в точке генерации с амплитудами принятых сигналов (*Puc. 4.4.4.*). Из данного рисунка видно, что 25.02.2012 наблюдается рост амплитуды модуляционных сигналов, зарегистрированных в ГФО Михнево, одновременно с возрастанием магнитного поля в Тромсё.

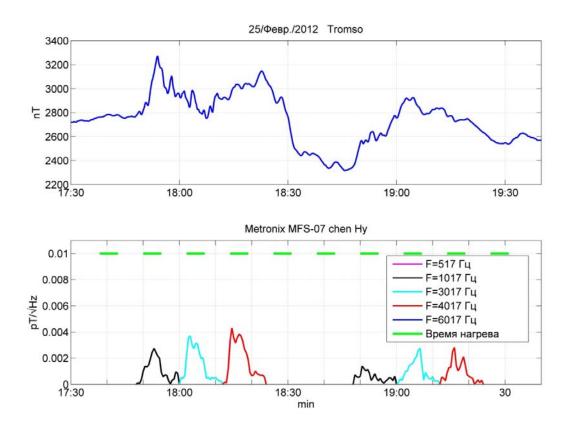


Рис. 4.4.4. Сравнение геомагнитной активности в Тромсё (верхняя панель) с амплитудой модуляционных сигналов (на частотах от 0.5 до 6 к Γ ц), принятых в $\Gamma\Phi O$ "Михнево" (нижняя панель).

Результаты проведенных исследований подтвердили влияние гелиогеофизических факторов на эффективность генерации КНЧ/ОНЧ излучения. На основании полученных результатов можно сделать вывод, что активность электроджета является одним из факторов влияющих на генерацию КНЧ/ОНЧ излучения. В то же время существуют и другие факторы, от которых так же зависит эффективность генерации ОНЧ излучения.

Заключение

Настоящая работа выполнена в рамках исследования взаимосвязанных возмущений в литосферно-атмосферно-ионосферной системе.

Во время полевых экспериментальных исследований в Байкальской рифтовой зоне проводились синхронные наземные и орбитальные измерения вариации электромагнитных полей. Было установлено, что излучение КНЧ диапазона, регистрируемое на Земле и в верхней ионосфере, имеет общий источник генерации – молниевые разряды.

Проведенные измерения позволили обнаружить зону преимущественного распространения КНЧ/ОНЧ излучения из волновода Земля-ионосфера в верхнюю ионосферу.

Применение специально разработанной высокочувствительной малошумящей аппаратуры позволило во время экспериментов по искусственной модификации ионосферы на нагревном стенде EISCAT зарегистрировать сигналы на модуляционных частотах (амплитудой порядка единиц фТл) в диапазоне от 0.5 до 6.0 кГц на расстоянии около 2000 км от источника. По результатам измерений была построена зависимость поляризации модуляционного сигнала от частоты, которая экспериментально подтвердила существующие представления о многомодовом волноводном распространении сигналов КНЧ/ОНЧ диапазона от ионосферного источника.

В результате синхронных измерений с использованием пространственно-распределенных приемников были определены условия фазовой пеленгации ионосферного источника на малых базах. Разработана методика пеленгации источников КНЧ/ОНЧ излучения на коротких базах.

Результаты настоящей работы могут быть использованы при дальнейших исследованиях генерации и распространения КНЧ/ОНЧ излучения в литосферно-атмосферно-ионосферной системе.

Список Литературы

- 1. R. Barr, D. Llanwyn Jones, C.J. Rodger, « ELF and VLF radio waves» Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 62 (2000), 1689-1718.
- 2. Мареев Е. А. Исследования глобальной электрической цепи :достижения и проблемы //УФН. 2010. Вып. 180, №5. Сю 527-534.
- 3. В.И. Ермаков, Ю.И. Стожков, «Физика грозовых облаков», препринт Физический институт имени Лебедева (2004), 3-30.
- 4. John E. Oliver, Encyclopedia of World Climatology.— National Oceanic and Atmospheric Administration, (2005), 452
- 5. « http://www.nasa.gov/centers/goddard/news/topstory/2003/0619lightning.html
- 6. Burrows, M.L., 1978. ELF Communications Antennas. Petr Perigrinus, Stevenage, England, 245pp.
- 7. Morgan, M.G., 1960. "An island as a natural very-low-frequency transmitting antenna." IRE Transactions Antennas and Propagation AP-8 (5), 528-530.
- 8. Gould, R.N., 1961. Some preliminary experimental tests of a novel method of radiating very low frequencies. Nature 190 (4773), 332-333.
- 9. Burton, R.W., King, R.W.P., Wu, Tai.T., 1983. The loop antenna with a cylindrical core: theory and experiment. IEEE Transactions Antennas and Propagation AP-31, 225-231.
- 10. Barr R., Ireland, W., Smith, M.J., 1993. ELF, VLF and LF radiation from a very large loop antenna with a mountain core. Proceedings H of the IEE 140, 129-134.
- 11. Koons, H.C., Dazey, M.H., 1983. High-power VLF transmitter facility utilizing a balloon lofted antenna. IEE Transactions Antennas and Propagation AP-31, 243-248.
- 12. Field, E.C., Kies, L.R., Bannister, P.R., Ingram, R.F., Hopkins, W.D., Roberts, M.A., 1989. An aerostat-supported ELF/VLF transmitter. Radio Science 24, 235-246.

- 13. Watt, A.D., 1967. VLF Radio Engineering. Pergamon Press, Oxford, 703pp.
- 14. Peterson, B.B., 1990. The Soviet VLF navigation system. Proceedings of the 15th Annual Meeting of the International Omega Association, pp. 20.1-20.8.
- 15. http://solar-center.stanford.edu/SID/AWESOME/
- 16. Burrows, M.L., 1978. ELF Communications Antennas. Peter Perigrinus, Stevenage, England, 245pp.
- 17. Jones, D.Ll., 1995. ELF radio. In: 100 Years of Radio. IEE Conference Publication, Vol. 141. IEE, London, pp. 101-106.
- 18. Velikhov, E.P., Zhamaletdinov, A.A., Sobchakov, L.A., Veshev, A.V., Sarayev, A.K., Tokarev, A.D., Shetsov, A.N., Vasil'yev, A.V., Sonnikov, A.G., Yakolev, A.V., 1996. Extra-low frequency sounding of the Earth's crust with a high-power antenna. Doklady Academy Sciences USSR, Earth Science Series (English translation) 341, 12-16.
- 19. Fraser-Smith, A.C., Bannister, P.R., 1998. Reception of ELF signals at antipodal distances. Radio Science 33, 83-88.
- 20. Getmantsev, G.G., Zuikov, N.A., Kotik, D.S., Mironenko, L.F., Mityakov, N.A., Rapoport, V.O., Sazonov, Yu.A., Trakhtengerts, V.Yu., Eidman, V.Ya., 1974. Combination frequencies in the interaction between high-power short-wave radiation and ionospheric plasma. JETP Letters 20, 101-102.
- 21. Ю.И. Зецер, Б.Г. Гаврилов, Н.Ф. Благовещенская. Активные эксперименты: магнитосферно ионосферно атмосферное воздействие. Глава 9.6. сборника "Плазменная гелиогеофизика", М.: Наука, в печати, 2008.
- 22. Stubbe, P., Kopka, H., Dowden, R.L., 1981. Generation of ELF and VLF waves by the polar electrojet modulation: experimental results. Journal of Geophysical Research 86, 9073-9078.

- 23. Barr, R., Rietveld, M.T., Kopka, H., Stubbe, P., Nielsen, E., 1985. Extra-low-frequency radiation from the Polar Electrojet Antenna. Nature 317, 155-157.
- 24. Bannister, P.R., Ingram, R.F., McCarrick, M.J., Wong, A.Y., 1993. Results of the joint HIPAS=NUWC Campaigns to investigate ELF generated by auroral electrojet modulation. AGARD Conference Proceedings No. 529, pp. 18.1-18.7.
- 25. Kotik, D. S., and V. Yu. Trakhtengerts, Mechanism of excitation of combination frequencies in ionospheric plasma, JETP Lett. Engl. Transl., 21, 51-52, 1975.
- 26. Stubbe, P., and H. Kopka, Modulation of the polar electrojet by powerful HF waves, J. Geophys Res., 82, 2319-2325,1 977.
- 27. Chang, C. L., V. Tripathi, K. Papadopoulos, J. Fedder, P. J. Palmadesso, and S. L. Ossakow, Effect of the Ionosphere on Radiowave Systems, edited by J. M. Goodman, p. 91, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1981.
- 28. Ferraro, A. J., H. S. Lee, R. Allshouse, K. Carroll, A. A. Tomko, F. J. Kelly, and R. G. Joiner, VLF/ELF radiation from the ionospheric dynamo current system modulated by powerful HF signals, J. Atmos. Terr. Phys., 44, 1113-1122, 1982.
- 29. Migulin, V. V., and A. V. Gurevich, Investigation in the U.S.S.R. of non-linear phenomena in the ionosphere, J. Atmos.Terr. Phys., 47, 1181-1188, 1985.
- 30. Belyaev, P. P., D. S. Kotik, S. N. Mityakov, S. V. Polyakov, V. O. Rapoport, and V. Yu. Trakhtengerts, Generation of electromagnetic signals at combination frequencies in the ionosphere, Radiophys. Quantum Electron. Engl. Transl., 30, 189-206, 1987
- 31. Barr, R., and P. Stubbe, ELF and VLF radiation from the "polar electrojet antenna", Radio Sci., 19, 1111-1122, 1984

- 32. Barr, R., M. T. Rietveld, P. Stubbe, and H. Kopka, The diffraction of VLF radio waves by a patch of ionosphere illuminated by a powerful HF transmitter, J. Geophys. Res., 90, 2861-2875, 1985.
- 33. Papadopoulos, K, and C. L. Chang, Generation of ELF/ULF waves in the ionosphere by dynamo processes, Geophys. Res. Lett., 12,279-282, 1985.
- 34. Papadopoulos, K., R. Sharma, and V. Tripathi, ELF generation by parametric excitation of Alfven waves in the ionosphere, J. Geophys. Res., 87, 1491-1494, 1982.
- 35. Papadopoulos, K., K. Ko, and V. Tripathi, Efficient parametric decay in dissipative media, Phys. Rev. Lett., 51, 463-466, 1983.
- 36. K. Papadopoulos, C. L. Chang, P. Vitello, and A. Drobot, On the efficiency of ionospheric ELF generation, Radio Science, Volume 25, Number 6, Pages 1311-1320, 1990
- 37. Steven A. Cummer, Modeling Electromagnetic Propagation in the Earth–Ionosphere waveguide, IEEE transactions on antennas and propagations, vol. 48, no. 9, 2000
- 38. Galejs, J., Terrestrial Propagation of Long Electromagnetic Waves, Oxford: Pergamon Press,1972.
- 39. Wait, J. R., *Electromagnetic Waves in Stratified Media*,Oxford: Pergamon Press,1970.
- 40. Budden, K. G., The influence of the earth's magnetic field on radio propagation by waveguide modes, Proc. Roy. Soc. A, 265, p. 538, 1962.
- 41. A. Cummer, Lightning and ionospheric remote sensing using VLF/ELF radio atmospherics, dissertation, 1997.
- 42. http://www.spaceweather.com/glossary/inspire.html
- 43. Ajeet K. Maurya, Rajesh Singh, B. Veenadhari, Sushil Kumar, Sushil Kumar, R. Selvakumaran, P. Pant, A. K. Singh, D. Siingh, and U. S. Inan, "Morphological features of tweeks

- and nighttime D region ionosphere at tweeks reflection height from the observations in the low-latitude Indian sector, J. Geophys. Res, vol. 117, a05301, doi:10.1029/2011ja016976, 2012
- 44. Jaroslav Chum, Ondrej Santolik, and Michel Parrot "Analysis of subprotonospheric whistlers observed by DEMETER: A case study", J. Geophys. Res, vol. 114, a02307, doi:10.1029/2008ja013585, 2009
- 45. O. Santolı'k, M. Parrot, U. S. Inan, D. Bures'ova, D. A. Gurnett, and J. Chum, "Propagation of unducted whistlers from their source lightning: A case study" journal of geophysical research, vol. 114, a03212, doi:10.1029/2008ja013776, 2009
- 46. http://webflash.ess.washington.edu
- 47. Morris B. Cohen, *Member, IEEE*, Umran S. Inan, *Fellow, IEEE*, and Evans W. Paschal, Sensitive Broadband ELF/VLF Radio Reception With the AWESOME Instrument, IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, vol. 48, no. 1, January 2010
- 48. http://demeter.cnrs-orleans.fr
- 49. http://chibis.cosmos.ru/index.php?id=1618#c3751
- 50. http://www.cosmos.ru/obstanovka/index.htm
- Гохберг М.Б., Шалимов С.Л. Литосферно ионосферная связь и ее моделирование // Российский журнал о Земле. 2000. Т. 2. № 2.
- 52. Molchanov O., Fedorov E., Schekotov A., Gordeev E., Chebrov V., Surkov V., Rozhnoi A., Andreevsky S., Iudin D., Yunga S., Lutikov A., Hayakawa M., Biagi P.F. Lithosphereatmosphere ionosphere coupling as governing mechanism for preseismic short term events in atmosphere and ionosphere // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2004. № 4. P. 757–767.
- 53. Hayakawa M. VLF/LF Radio Sounding of Ionospheric Perturbations Associated with Earthquakes // Sensors. 2007. № 7. P. 1141–1158.

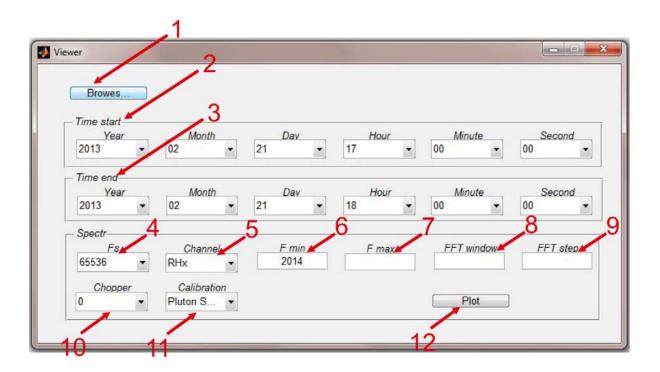
- 54. Henderson T., Sonwalkar V., Helliwell R., Inan U., Fraser-Smith A. A Search for ELF/VLF Emissions Induced by Earthquakes as Observed in the Ionosphere by the DE 2 Satellite // J. Geophys. Res. 1993. 98(A6). P. 9503–9514.
- N mec, F., Santolík O., Parrot M. Decrease of intensity of ELF/VLF waves observed in the upper ionosphere close to earthquakes: A statistical study // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. A04303. doi: 10.1029/2008JA013972.
- 56. Гершензон Н.И., Ларкина В.И., Наливайко А.В. и др. На блюдения на спутнике "Интеркосмос 19" ОНЧ излу чений, связанных с сейсмической активностью // Гео магнетизм и аэрономия. 1983. Т. 23. № 5. С. 842–846.
- 57. Ларкина В.И., Ружин Ю.Я. Отклик ионосферной плаз мы на вариации экологической обстановки природ ного и техногенного характера. Электронный научный журнал "Исследовано в России" 727. http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2009/061.pdf
- 58. Мигулин В.В., Молчанов О.А., Ларкина В.И. и др. Обнаружение эффектов воздействия землетрясения на ОНЧ/КНЧ шумы во внешней ионосфере. Препринт N25 (390). М.: ИЗМИРАН. 1982. 23 с.
- 59. Ляхов А.Н., Зецер Ю.И. Наблюдение низкочастотных колебаний электрического поля в ионосфере над разломами земной коры // Доклады АН, 2008, т. 420, №1, С. 116-119
- 60. Parrot M. The micro-satellite DEMETER // Journal of Geodynamics 33 535-541. 2002
- 61. C. Mackay and A. C. Fraser Smith, World coverage for single station lightning detection, radio science, VOL. 46, RS0M01, doi:10.1029/2010RS004600, 2011
- 62. Козлов В. И., Муллаяров В. А., Каримов Р.Р. Пространственное распределение плотности грозовых разрядов на Востоке России по данным дистанционных наблюдений. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Вып.8. Т. 3. С. 257-262.

- 63. V. A. Rafalsky, A. P. Nickolaenko, and A. V. Shvets, Location of lightning discharges from a single station, J. Geophys. Res, vol. 100, no. d10, pages 20,829-20,838, October 20, 1995
- 64. R. Barr, P. Stubbea, and H. Kopka, Long-range detection of VLF radiation produced by heating the auroral electrojet, Radio Science, Volume 26, Number 4, Pages 871-879, July-August 1991
- 65. Jin, G., M. Spasojevic, M. B. Cohen, U. S. Inan, and N. G. Lehtinen (2011), The relationship between geophysical conditions and ELF amplitude in modulated heating experiments at HAARP: Modeling and experimental results, J. Geophys. Res., 116, A07310, doi:10.1029/2011JA016664

Приложение

Програмный модуль Viewer

Программа Viewer была написана в среде Matlab для экспресс-обработки и визуализации данных. Интерфейс программы показан на *Puc. 1*. Эта программа позволяет получить трехмерные спектры сигналов, за определенное время, в нужном диапазоне частот, с требуемой выборкой.



Puc. 1. Интерфейс программы Viewer

- 1 кнопка Browes позволяет указать путь к файлам данных
- 2 группа параметров «Time start» позволяет указать интересующее время старта
- 3 группа параметров «Time end» позволяет указать интересующее время окончания
- 4 указывается частота оцифровки записи
- 5 указывается канал по которому велась запись
- 6,7 указывается унтересующий диапазон частот

- 8 указывается размер окна выборки в секндах
- 9 указывается шаг между выборками в секундах
- 10 указывается положение чопера во время записи
- 11 указываются калибровочные кривые в зависимости от используемых датчиков
- 12 при нажатии кнопки Plot строится трехмерный спектр в заданном промежутке времени, частотном диапазоне и с заданными параметрами БПФ.

Скрипт программы

```
function varargout = Viewer(varargin)
gui Singleton = 1;
gui State = struct('gui Name',
                                    mfilename, ...
                    'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
                   'gui_OpeningFcn', @Viewer_OpeningFcn,
                   'gui OutputFcn', @Viewer OutputFcn, ...
                   'gui_LayoutFcn', [],...
                   'gui_Callback',
                                     []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui State.gui Callback = str2func(varargin{1});
end
if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui mainfcn(gui State, varargin{:});
else
    gui mainfcn(gui State, varargin(:));
function Viewer OpeningFcn(hObject,~, handles, varargin)
handles.output = hObject;
guidata(hObject, handles);
function varargout = Viewer OutputFcn(~, ~, handles)
varargout{1} = handles.output;
% --- Executes on button press in Path.
function Path Callback(~, ~, handles)
% Указываем папку в которой будет производиться поиск
    path=uigetdir;
    set(handles.path name, 'String', path)
% Передаем значение параметра path в другие функции
    handles.Path=path;
    guidata(gcbo, handles);
function Year 0 Callback(hObject, eventdata, handles)
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function Year 0 CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
            ispc
                                     isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
                        & &
 get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end
```

```
% --- Executes on selection change in Year 1.
    function Year_1_Callback(hObject, eventdata, handles)
    function Year_1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
                ispc
                            & &
                                         isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
        set (hObject, 'BackgroundColor', 'white');
    end
    % --- Executes on selection change in Month 0.
    function Month 0 Callback(hObject, eventdata, handles)
    % --- Executes during object creation, after setting all properties.
    function Month 0 CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
    if ispc
                      & &
                                        isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
       set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
    end
    % --- Executes on selection change in Month 1.
    function Month_1_Callback(hObject, eventdata, handles)
    % --- Executes during object creation, after setting all properties.
    function Month 1 CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
    if
               ispc
                      & &
                                         isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
        set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
    % --- Executes on selection change in Date 0.
    function Date 0 Callback(hObject, eventdata, handles)
    % --- Executes during object creation, after setting all properties.
    function Date 0 CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
                                         isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
               ispc
                        & &
get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
       set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
    end
    % --- Executes on selection change in Date 1.
    function Date 1 Callback(hObject, eventdata, handles)
    % --- Executes during object creation, after setting all properties.
    function Date 1 CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
    if
               ispc
                       & &
                                        isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
       set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
    end
    % --- Executes on selection change in Hour O.
    function Hour 0 Callback(hObject, eventdata, handles)
    % hObject handle to Hour 0 (see GCBO)
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
    function Hour 0 CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
                handle to Hour 0 (see GCBO)
    % hObject
    {}^{\circ}_{\circ} eventdata reserved - to \stackrel{-}{\text{be}} defined in a future version of MATLAB
    % handles
               empty - handles not created until after all CreateFcns called
    % Hint: popupmenu controls usually have a white background on Windows.
            See ISPC and COMPUTER.
    if
                ispc &&
                                          isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
        set (hObject, 'BackgroundColor', 'white');
    % --- Executes on selection change in Hour 1.
    function Hour 1 Callback(hObject, eventdata, handles)
    % hObject handle to Hour 1 (see GCBO)
    % eventdata reserved - to \overline{
m be} defined in a future version of MATLAB
    % handles
                 structure with handles and user data (see GUIDATA)
    % Hints: contents = cellstr(get(hObject, 'String')) returns Hour 1 contents
as cell array
             contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from Hour 1
    % --- Executes during object creation, after setting all properties.
    function Hour 1 CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
    % hObject handle to Hour 1 (see GCBO)
    % eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
    % handles empty - handles not created until after all CreateFcns called
    % Hint: popupmenu controls usually have a white background on Windows.
            See ISPC and COMPUTER.
    if
                                          isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
                ispc
                             & &
get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
        set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
    end
    % --- Executes on selection change in Min 0.
    function Min 0 Callback(hObject, eventdata, handles)
    % hObject
                 handle to Min 0 (see GCBO)
    % eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
               structure with handles and user data (see GUIDATA)
    % handles
    % Hints: contents = cellstr(get(hObject, 'String')) returns Min 0 contents as
cell array
    응
             contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from Min 0
    % --- Executes during object creation, after setting all properties.
    function Min 0 CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
    % hObject handle to Min_0 (see GCBO)
    % eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
                 empty - handles not created until after all CreateFcns called
    % handles
```

```
% Hint: popupmenu controls usually have a white background on Windows.
    응
            See ISPC and COMPUTER.
    if
                ispc
                       & &
                                         isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
        set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
    % --- Executes on selection change in Min 1.
    function Min_1_Callback(hObject, eventdata, handles)
    % hObject handle to Min 1 (see GCBO)
    % eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
                structure with handles and user data (see GUIDATA)
    % Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String')) returns Min 1 contents as
cell array
             contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from Min 1
    % --- Executes during object creation, after setting all properties.
    function Min 1 CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
    % hObject handle to Min 1 (see GCBO)
    % eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
    % handles empty - handles not created until after all CreateFcns called
    % Hint: popupmenu controls usually have a white background on Windows.
            See ISPC and COMPUTER.
    if
                                         isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
               ispc
                             & &
get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
        set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
    end
    % --- Executes on selection change in Sec 0.
    function Sec 0 Callback(hObject, eventdata, handles)
                 handle to Sec_0 (see GCBO)
    % hObject
    % eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
    % handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
    % Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String')) returns Sec 0 contents as
cell array
    응
             contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from Sec 0
    % --- Executes during object creation, after setting all properties.
    function Sec 0 CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
    % hObject handle to Sec_0 (see GCBO)
    % eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
    % handles
                 empty - handles not created until after all CreateFcns called
    % Hint: popupmenu controls usually have a white background on Windows.
            See ISPC and COMPUTER.
    if
               ispc
                                         isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
       set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
    end
```

```
% --- Executes on selection change in Sec 1.
    function Sec 1 Callback(hObject, eventdata, handles)
    % hObject handle to Sec 1 (see GCBO)
    % eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
    % handles
                 structure with handles and user data (see GUIDATA)
    % Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String')) returns Sec 1 contents as
cell array
             contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from Sec 1
    % --- Executes during object creation, after setting all properties.
    function Sec 1 CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
    % hObject
               handle to Sec 1 (see GCBO)
    % eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
              empty - handles not created until after all CreateFcns called
    % handles
    % Hint: popupmenu controls usually have a white background on Windows.
            See ISPC and COMPUTER.
    if
                ispc
                                         isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
                             & &
get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
        set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
    end
    % --- Executes on button press in Plot spectr.
    function Plot spectr Callback(hObject, eventdata, handles)
    % hObject handle to Plot spectr (see GCBO)
    % eventdata reserved - to \overline{b}e defined in a future version of MATLAB
    % handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
    %Ноль метроникса в формате матлаба
        T0 zero=datenum(1970, 1, 1);
    %СЧИТЫВАЕМ ПУТЬ ПРИНЯТЫЙ
        R Path=handles.Path;
    %Считываем год старта
            Year 0=get(handles.Year 0, 'Value');
            Year 0=2004+Year 0;
        %Считываем месяц старта
            Month 0=get(handles.Month 0, 'Value');
        %Считываем день старта
            Date 0=get(handles.Date 0, 'Value');
        %Считываем час старта
            Hour 0=get(handles.Hour 0, 'Value');
            Hour 0=Hour 0-1;
        %Считываем минуту старта
            Min 0=get(handles.Min 0, 'Value');
            Min 0=Min 0-1;
        %Считываем секунду старта
            Sec 0=get(handles.Sec 0, 'Value');
            Sec 0=Sec 0-1;
        % Добавляем ноль если меньше единицы
        for q=1:1
            if Month 0<10</pre>
                month=['0' num2str(Month 0)];
```

```
else month=num2str(Month 0);
           end
           if Date 0<10
              day=['0' num2str(Date 0)];
           else day=num2str(Date 0);
           if Hour 0<10
              hour=['0' num2str(Hour 0)];
           else hour=num2str(Hour 0);
           if Min 0<10</pre>
              min=['0' num2str(Min 0)];
           else min=num2str(Min 0);
           end
           if Sec 0<10
              sec=['0' num2str(Sec_0)];
           else sec=num2str(Sec 0);
           time start=[num2str(Year 0) '.' month '.' day '. ' hour ':' min
':' secl
             time start mat=[num2str(Year 0) ' ' month ' ' day ' ' hour ' '
   응
min '_' sec]
       end
    %Считываем год конца
           Year_1=get(handles.Year_1, 'Value');
           Year_1=2004+Year_1;
       %Считываем месяц конца
          Month 1=get(handles.Month 1, 'Value');
       %Считываем день конца
           Date 1=get(handles.Date 1, 'Value');
       %Считываем час конца
           Hour 1=get(handles.Hour 1, 'Value');
           Hour_1=Hour_1-1;
       %Считываем минуту конца
          Min 1=get(handles.Min 1, 'Value');
          Min_1=Min_1-1;
       %Считываем секунду конца
           Sec 1=get(handles.Sec 1, 'Value');
           Sec_1=Sec_1-1;
           % Добавляем ноль если меньше единицы
       for q=1:1
           if Month 1<10
              month 1=['0' num2str(Month 1)];
           else month 1=num2str(Month 1);
           end
           if Date 1<10
              day 1=['0' num2str(Date 1)];
           else day 1=num2str(Date 1);
           end
           if Hour 1<10
              hour 1=['0' num2str(Hour 1)];
           else hour 1=num2str(Hour 1);
           end
           if Min 1<10</pre>
              min 1=['0' num2str(Min 1)];
           else min 1=num2str(Min 1);
```

```
end
             if Sec 1<10
                 sec 1=['0' num2str(Sec 1)];
             else sec 1=num2str(Sec 1);
             end
             time end=[num2str(Year 1) '.' month 1 '.' day 1 '. ' hour 1 ':'
min 1 ':' sec 1]
                time start mat=[num2str(Year 0) ' ' month ' ' day ' ' hour ' '
min '_' sec]
         end
         %Считываем частоту оцифровки
             Fs=get(handles.Fs, 'Value');
             Fs=2^{(6+Fs)};
         %Считываем значение канала
             chan=get(handles.Chan, 'Value');
             for q=1:1;
                 if chan==1
                     Chan='Hx';
                 end
                 if chan==2
                     Chan='Hy';
                 end
                 if chan==3
                     Chan='Hz';
                 end
                 if chan==4
                      Chan='RHx';
                 end
                 if chan==5
                    Chan='RHy';
                 end
                 if chan==6
                    Chan='RHz';
                 end
                 if chan==7
                    Chan='Ex';
                 end
                 if chan==8
                    Chan='Ey';
                 end
             end
             Chan
         %Считываем значение NFFT
             T fft=get(handles.T fft, 'String');
             T_fft=str2double(T_fft);
T_fft0=int32(ceil(T_fft));
                                            %предвыборка в сек
             NFFT=Fs*T fft;
         %Считываем значение шага NFFT
             Tstep=get(handles.Tstep, 'String');
             Tstep=str2double(Tstep);
         %Считываем значение чёпера
             Chop=get(handles.Chop, 'Value');
             Chop=Chop-1;
         %Считываем нижнюю границу частот (поле f0)
             f0=get(handles.F min, 'String');
             f0=str2double(f0);
         %Считываем верхнюю границу частот (поле f1)
             f1=get(handles.F max, 'String');
```

```
f1=str2double(f1);
              Fmax=[f0 f1];
          %Считываем калибровку
         clear Fc;
             call=get(handles.Call, 'Value');
               if call==1
                 if Chop==1
                       Fc=load('MFS06339 ON.TXT');
                       Fc=Fc(:,1:2);
                       Fc(:,2) = Fc(:,1) .*Fc(:,2);
                  else
                       Fc=load('MFS06339 ON.TXT');
                       Fc=Fc(:,1:2);
                       Fc(:,2) = Fc(:,1) .*Fc(:,2);
                 end
               end
                if call==2
                 if Chop==1
                       Fc=load('MFS07083 On.TXT');
                       Fc=Fc(:,1:2);
                       Fc(:,2) = Fc(:,1) .*Fc(:,2);
                  else
                       Fc=load('MFS07083 Off.TXT');
                       Fc=Fc(:,1:2);
                       Fc(:,2) = Fc(:,1) .*Fc(:,2);
                 end
                end
                if call==3
                    Fc=load('RIAP Small.TXT');
                end
                 if call==4
                     Fc=load('RIAP Big.TXT');
                end
                Fc=Fc(:,1:2);
                Fc(:,2) = Fc(:,1) .*Fc(:,2);
                % Вводим окно Ханна
                  kw=hann(NFFT);
                  kw=kw';
              T0=datenum(Year 0, Month 0, Date 0, Hour 0, Min 0, Sec 0);
              T1=datenum(Year 0, Month 0, Date 1, Hour 1, Min 1, Sec 1);
              DD=datenum(Year 0, Month 0, Date 0, 0, 0, 0);
              DD0=int32((DD-\overline{T0} zero)*2\overline{4}*3600);
                                                           %Опорное время в формате
метроникса
              DD1=DD0+int32((T1-T0)*24*3600);
              T0_sec=int32(Hour_0*3600+Min_0*60+Sec_0);
T1_sec=int32(Hour_1*3600+Min_1*60+Sec_1);
     응
                Tvec=T0 sec:Tstep:T1 sec;
              Tvec=double(T0 sec):Tstep:double(T1 sec);
              Y=f_load_t_0(DD0+T0_sec-T_fft0, DD0+T1_sec+T_fft0, Fs, R_Path, Chan,
Chop);
              Sp=f spectr matr R I t(DD, Tvec, Y, T0 sec-T fft0, Fs, Fmax, Fc, NFFT, kw);
```

```
% Построение графика
    9
              Fig spectr=figure;
            Fig spectr=figure('PaperSize',[29.67743169791 20.98404194812],...
        'PaperOrientation', 'portrait');
        % Передаем значение номере фигуры в подфункцию для сохранения
            handles.Fig spectr=Fig spectr;
            guidata(gcbo, handles)
        lt=(Sp.T-Sp.T(1));
            fr=Sp.F;
    응
              C lim=get(handles.C lim,'String');
    응
              C lim=str2num(C lim);
            C \ Lim = [0 \ 0.05];
    응
            imagesc(lt,fr,Sp.MatrR(1:end,1:end),C Lim);
            colorbar;
    % --- Executes on selection change in Fs.
    function Fs Callback(hObject, eventdata, handles)
    % hObject
               handle to Fs (see GCBO)
    % eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
    % handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
    % Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String')) returns Fs contents as
cell array
             contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from Fs
    % --- Executes during object creation, after setting all properties.
    function Fs CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
    % hObject
                handle to Fs (see GCBO)
    % eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
    % handles
                empty - handles not created until after all CreateFcns called
    % Hint: popupmenu controls usually have a white background on Windows.
    용
            See ISPC and COMPUTER.
    if
               ispc
                            & &
                                        isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
        set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
    end
    function F min Callback(hObject, eventdata, handles)
    % hObject handle to F_min (see GCBO)
    % eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
    % handles
               structure with handles and user data (see GUIDATA)
    % Hints: get(hObject,'String') returns contents of F_min as text
```

```
str2double(get(hObject, 'String')) returns contents of F min as a
double
    % --- Executes during object creation, after setting all properties.
    function F min CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
    % hObject handle to F min (see GCBO)
    % eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
    % handles
                empty - handles not created until after all CreateFcns called
    % Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
           See ISPC and COMPUTER.
    if
              ispc
                     & &
                                        isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
      set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
    end
    function F max Callback(hObject, eventdata, handles)
    % hObject handle to F max (see GCBO)
    % eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
    % handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
    % Hints: get(hObject,'String') returns contents of F_max as text
              str2double(get(hObject, 'String')) returns contents of F max as a
double
    % --- Executes during object creation, after setting all properties.
    function F max CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
    % hObject handle to F max (see GCBO)
    % eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
    % handles empty - handles not created until after all CreateFcns called
    % Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
    % See ISPC and COMPUTER.
                     & &
            ispc
    if
                                        isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
       set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
    end
    function T fft Callback(hObject, eventdata, handles)
    % hObject handle to T fft (see GCBO)
    % eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
               structure with handles and user data (see GUIDATA)
    % Hints: get(hObject,'String') returns contents of T fft as text
              str2double(get(hObject,'String')) returns contents of T fft as a
double
    % --- Executes during object creation, after setting all properties.
    function T fft CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
% hObject handle to T fft (see GCBO)
    % handles empty - handles not created until after all CreateFcns called
    % Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
           See ISPC and COMPUTER.
    if
              ispc &&
                                       isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
     set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
    function Tstep Callback(hObject, eventdata, handles)
    % hObject handle to Tstep1 (see GCBO)
    % eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
    % handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
    % Hints: get(hObject,'String') returns contents of Tstep1 as text
             str2double(get(hObject,'String')) returns contents of Tstep1 as a
double
    % --- Executes during object creation, after setting all properties.
    function Tstep CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
    % hObject handle to Tstep1 (see GCBO)
    % eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
    % handles empty - handles not created until after all CreateFcns called
    % Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
           See ISPC and COMPUTER.
                                      isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
              ispc &&
    if
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
       set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
    % --- Executes on selection change in Chan.
    function Chan Callback(hObject, eventdata, handles)
    % hObject handle to Chan (see GCBO)
    % eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
               structure with handles and user data (see GUIDATA)
    % Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String')) returns Chan contents as
cell array
            contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from Chan
    % --- Executes during object creation, after setting all properties.
    function Chan CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
    % hObject handle to Chan (see GCBO)
    % eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
    % handles empty - handles not created until after all CreateFcns called
    % Hint: popupmenu controls usually have a white background on Windows.
           See ISPC and COMPUTER.
```

```
ispc
                                        isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
                             & &
get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
        set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
    % --- Executes on selection change in Chop.
    function Chop Callback(hObject, eventdata, handles)
    % hObject handle to Chop (see GCBO)
    % eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
                structure with handles and user data (see GUIDATA)
    % handles
    % Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String')) returns Chop contents as
cell array
             contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from Chop
    % --- Executes during object creation, after setting all properties.
    function Chop CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
    % hObject handle to Chop (see GCBO)
    % eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
    % handles empty - handles not created until after all CreateFcns called
    % Hint: popupmenu controls usually have a white background on Windows.
            See ISPC and COMPUTER.
                                         isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
    if
               ispc
                            & &
get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
        set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
    % --- Executes on selection change in Call.
    function Call Callback(hObject, eventdata, handles)
    % hObject handle to Call (see GCBO)
    % eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
    % handles
                structure with handles and user data (see GUIDATA)
    % Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String')) returns Call contents as
cell array
    으
             contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from Call
    % --- Executes during object creation, after setting all properties.
    function Call CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
    % hObject handle to Call (see GCBO)
    % eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
    % handles
                 empty - handles not created until after all CreateFcns called
    % Hint: popupmenu controls usually have a white background on Windows.
            See ISPC and COMPUTER.
                                         isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
               ispc
get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
        set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
    end
```