

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

г.Москва, 2014 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Институте динамики геосфер Российской академии наук (ИДГ РАН) г. Москва

Научный руководитель:

Доктор физико-математических наук

Гаврилов Борис Георгиевич

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук, профессор

Ружин Юрий Яковлевич

Кандидат физико-математических наук, доцент

Нестеров Иван Анатольевич

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт прикладной физики Российской академии наук (ИПФ РАН)
г. Нижний Новгород

Защита состоится 16 октября 2014 года в 11:00 на заседании диссертационного совета
Д002.050.01 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института
динамики геосфер Российской академии наук по адресу :119334 г. Москва, Ленинский
проспект, д.38, корпус 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИДГ РАН и на официальном сайте
ИДГ РАН <http://idg.chph.ras.ru>

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь

диссертационного совета

кандидат физико-математических наук

В.А. Рыбаков

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Настоящая работа посвящена изучению генерации и распространения 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, HAARP, 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 амплитудно-частотные 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;

2. 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;
4. разработку принципов построения измерительных систем, обладающих высокой чувствительностью, широким динамическим диапазоном и высокой точностью временных привязок;
5. 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;
2. 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:

1. 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 пространственно-распределенной системы радиомониторинга (ПРСР), обладающий рекордно низким уровнем собственных шумов, большим динамическим диапазоном и точностью временных привязок на уровне 30 нс;
2. 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.

Личный вклад

Автор принимал непосредственное участие:

- в постановке целей и задач исследования;
- в обзоре литературы по тематике исследования;
- в получении и анализе экспериментальных данных, полученных в ходе экспедиций;

- в разработке программного обеспечения для обработки и визуализации полученных данных.

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 литосферно-атмосферно-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 многолетнего 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.

Апробация работы.

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

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического указателя, содержащего 59 ссылок. Общий объем диссертации - 120 страниц, включая 5 таблиц и 56 рисунков.

Автор выражает благодарность своему научному руководителю д.ф.-м.н. Б.Г. Гаврилову за неоценимую помощь и постоянное внимание к работе., к.ф.-м.н. Ю.В. Покладу, с.н.с. В.М. Ермаку за участие в экспериментальных работах и помощь в анализе полученных результатов, а так же всему коллективу лаборатории "Литосферно-ионосферных связей" ИДГ РАН за содействие на всех стадиях выполнения работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность исследуемой проблемы, сформулированы задачи работы, положения, выносимые на защиту, новизна результатов, полученных в диссертации, описана ее структура.

В обзорно аналитической главе 1 в разделе 1.1 рассматривается современное положение дел в области генерации и распространения КНЧ/ОНЧ излучения и его регистрации. Рассмотрены основные виды источников КНЧ/ОНЧ излучения: естественные и антропогенные. Основным естественным источником КНЧ/ОНЧ излучения являются молниевые разряды.

Техногенными источниками КНЧ/ОНЧ излучения, исследованного в работе, являются СДВ станции и нагревные стенды, на которых проводятся эксперименты по искусственной модификации ионосферы (эффект Гетманцева). В настоящее время эксперименты по искусственной модификации ионосферы и генерации КНЧ/ОНЧ излучения проводятся на нагревных стендах Сура, HAARP, EISCAT и другие.

В разделе 1.2 рассмотрены основные модели распространения КНЧ/ОНЧ излучения. Считается, что КНЧ/ОНЧ излучение может распространяться в волноводе Земля-ионосфера на очень большие расстояния, а также проникать в верхнюю ионосферу Земли и распространяться вдоль геомагнитных линий (*Рис. 1*). Рассмотрено модовое распространение сигнала в волноводе.

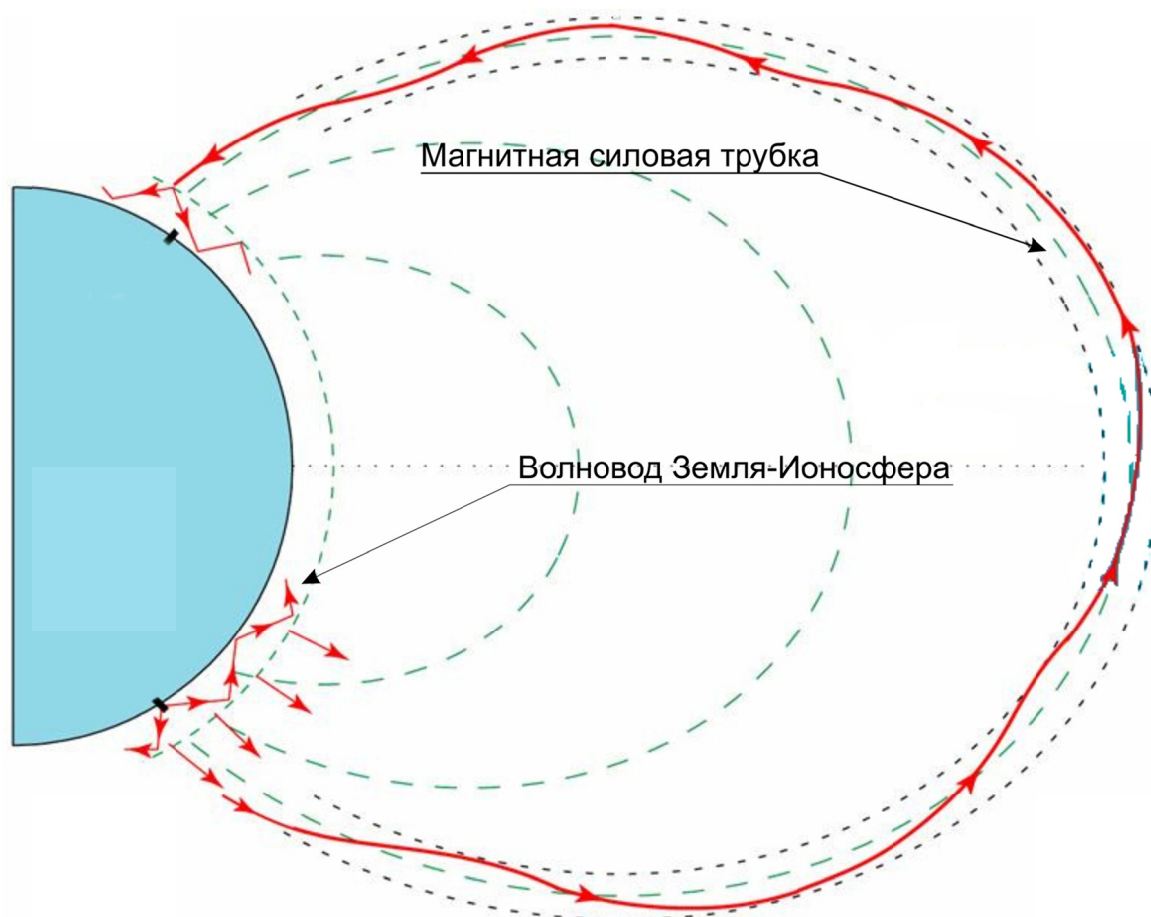


Рис. 1. Распространение КНЧ/ОНЧ излучения в волноводе Земля – ионосфера и вдоль силовых линий магнитного поля Земли

В разделе 1.3 рассмотрены основные наземные приемники КНЧ/ОНЧ излучения, такие как World Wide Lightning Location Network, National Lightning Detection Network (NLDN) и Atmospheric Weather Electromagnetic System for Observation, Modeling, and Education (AWESOME).

Помимо наземных измерений электромагнитное излучение КНЧ/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.

В главе 2 детально описана измерительная аппаратура, методики измерений и обработки данных.

В разделе 2.1 описаны параметры созданного комплекса пространственно распределенной системы регистрации (ПРСР). В качестве датчиков в данном измерительном комплексе использовались индукционные магнитометры MFS-06 и MFS-07 немецкой фирмы Metronix и специально разработанные по нашему техническому заданию активные рамочные антенны «Плутон» и «Вистлер», обладающие рекордной чувствительностью в несколько фТл и имеющих уровень собственных шумов в два раза меньше, чем у магнитометров MFS-07. Уровни собственных шумов магнитометров и антенн (выраженных в единицах поля) представлены в Таблице. 1. Регистрация велась на 10-канальный регистратор ADU-07 компании Metronix, с динамическим диапазоном 130дБ. Временная синхронизация данных осуществлялась с помощью GPS сигнала с точностью 30 нс. Данные, используемые в работе, писались с частотой оцифровки от 8 до 65 кГц.

Таблица. 1.

Индукционный магнитометр MFS-06	$10 \text{ пТл}/\sqrt{\text{Гц}}$ на частоте 0.01 Гц $0.1 \text{ пТл}/\sqrt{\text{Гц}}$ на частоте 1 Гц $1 \text{ фТл}/\sqrt{\text{Гц}}$ на частоте 1 кГц Частотный диапазон 0.00025-10000 Гц
Индукционный магнитометр MFS-07	$30 \text{ пТл}/\sqrt{\text{Гц}}$ на частоте 0.01 Гц $0.3 \text{ пТл}/\sqrt{\text{Гц}}$ на частоте 1 Гц $0.8 \text{ фТл}/\sqrt{\text{Гц}}$ на частоте 1 кГц Частотный диапазон 0.001-60000 Гц
Рамочная антенна "Вистлер"	Чувствительность – $0.4 \text{ фТл}/\sqrt{\text{Гц}}$ Частотный диапазон 800-100000 Гц

Рамочная антенна "Плутон"	Чувствительность – $0.5 \text{ фТл}/\sqrt{\text{Гц}}$ Частотный диапазон 800-30000 Гц
---------------------------	--

В разделе 2.2 описаны основные методики обработки данных, представленных в этой работе. Для обработки и визуализации данных использовалась среда MatLab. По волновой форме вычислялись спектры, для этого брались выборки длительностью от 2 до 120 секунд с временным шагом от 1 до 60 секунд. Использовались оконная функция Ханна и быстрое преобразование Фурье (БПФ). Данные представлялись в виде трехмерных спектров (по оси абсцисс отложено время, по оси ординат частота, цветом показана амплитуда сигнала).

Для получения амплитуды и фазы сигнала на заданной частоте и полосе, волновые формы фильтровались с помощью резонансного или полосового фильтра, с последующим использованием преобразования Гильберта.

В главе 3 описываются эксперименты по регистрации естественных источников КНЧ/ОНЧ излучения.

В разделе 3.1 описываются основные результаты, полученные в ходе экспедиций в период 2009-2010 годов в район Байкальской рифтовой зоны (БРЗ). Задачей экспедиций являлось изучение взаимосвязанных явлений в литосферно-ионосферной системе, поиск возможных литосферных источников электромагнитного излучения, регистрируемого на Земли и в космосе. Постановка данной задачи обусловлена результатами ряда исследований, обнаруживших области повышенного уровня электромагнитных полей над районами с высокой тектонической активностью. В ходе экспедиций проводились синхронные наземные и орбитальные измерения КНЧ/ОНЧ сигналов. Для наземных измерений использовалась аппаратура, описанная в разделе 2.2, в составе регистратора ADU-07 и магнитометров MFS-06 и MFS-07. Орбитальные измерения вариаций электромагнитных полей проводились на французском спутнике «Demeter». По

договоренности с французской стороной во время пролета над зоной измерений на спутнике включалась так называемая burst mode, которая позволяла получать волновые формы с частотой оцифровки 2.5 кГц по трем компонентам магнитного поля. По характерным особенностям волновых форм сигналов и временным задержкам было установлено, что зарегистрированные на Земле и в верхней ионосфере сигналы КНЧ/ОНЧ диапазона имеют общий источник – молниевые разряды.

В результате анализа данных, полученных за несколько десятков пролетов спутника над БРЗ, была обнаружена область преимущественного проникновения КНЧ/ОНЧ из волновода Земля-ионосфера в верхнюю ионосферу. На *Рис. 2* показана 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.

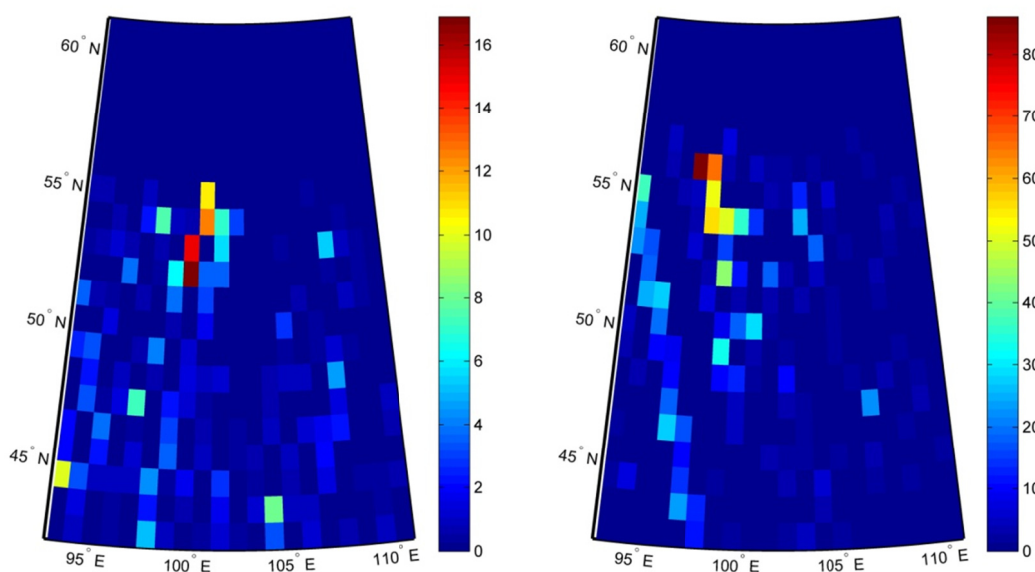


Рис. 2. Область исследования электромагнитных сигналов в БРЗ размером двадцать на двадцать градусов. Цветом показана частота регистрации сигналов на спутнике в ячейках сетки размером один на один градус.

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 разделе 3.2 анализируются возможности пеленгации импульсных источников КНЧ/ОНЧ излучения. По измерениям, проведенным в Байкальской рифтовой зоне, была продемонстрирована работоспособность методики моноимпульсной пеленгации, а именно, были запеленгованы локальные максимумы грозовой активности. Для улучшения точности пеленгации импульсных источников КНЧ/ОНЧ излучения, была разработана практическая методика пеленгации по времени прихода сигнала на пространственно-распределенных измерительных пунктах.

В главе 4 показаны результаты исследований параметров КНЧ/ОНЧ излучения, зарегистрированного на больших расстояниях от антропогенного источника, рассмотрены методы пеленгации источника и влияния гелиогеофизических условий на распространение излучения. Исследования проводились во время трех нагревных кампаний на стенде EISCAT.

В разделе 4.1 описываются основные результаты удаленной регистрации (на расстоянии порядка 2000 км) модуляционного излучения КНЧ/ОНЧ диапазона во время экспериментов по искусственной модификации ионосферы нагревным стендом EISCAT в феврале 2012 года. Стенд работал по нашей программе с различными модуляционными частотами: 517 Гц, 1017 Гц, 2017 Гц, 3017 Гц, 4017 Гц, 6017 Гц.

Разработанная нами аппаратура и измерительные методики позволили надежно зарегистрировать сверхслабые сигналы (на уровне единиц фТл) на частотах модуляции от 0.5 до 6 кГц (Рис. 3.). В результате этой нагревной кампании была экспериментально показана возможность регистрации сверхслабых сигналов КНЧ/ОНЧ диапазона на расстоянии около 2000 км от источника.

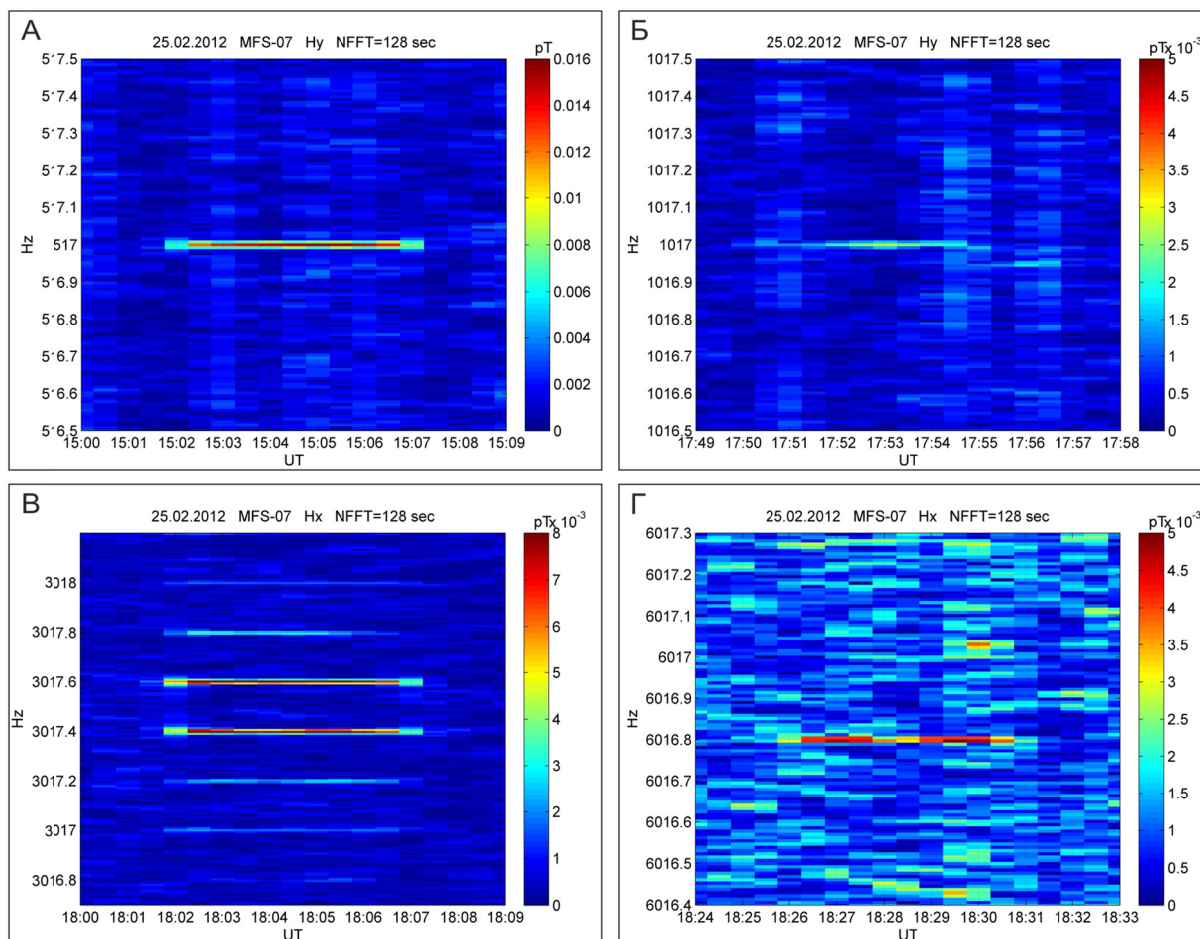


Рис. 3. Спектрограммы сигналов, зарегистрированных в ГФО "Михнево" на частотах 517 Гц (Рис. 3а), 1017 Гц (Рис. 3б), 3017 Гц (Рис. 3в) и 6017 Гц (Рис. 3 г). На частоте 3017 Гц (Рис. 3в) наблюдается расщепление спектра сигнала, обусловленное особенностью передатчика. Сигнал на частоте 6017 Гц (Рис. 3г) наблюдается в условиях повышенного уровня шумов.

По результатам измерений была построена зависимость поляризации модуляционного сигнала от частоты, которая подтвердила многомодовое волноводное распространение сигналов КНЧ/ОНЧ диапазона от ионосферного источника в диапазоне частот от 0.5 до 6 кГц (Рис. 4.).

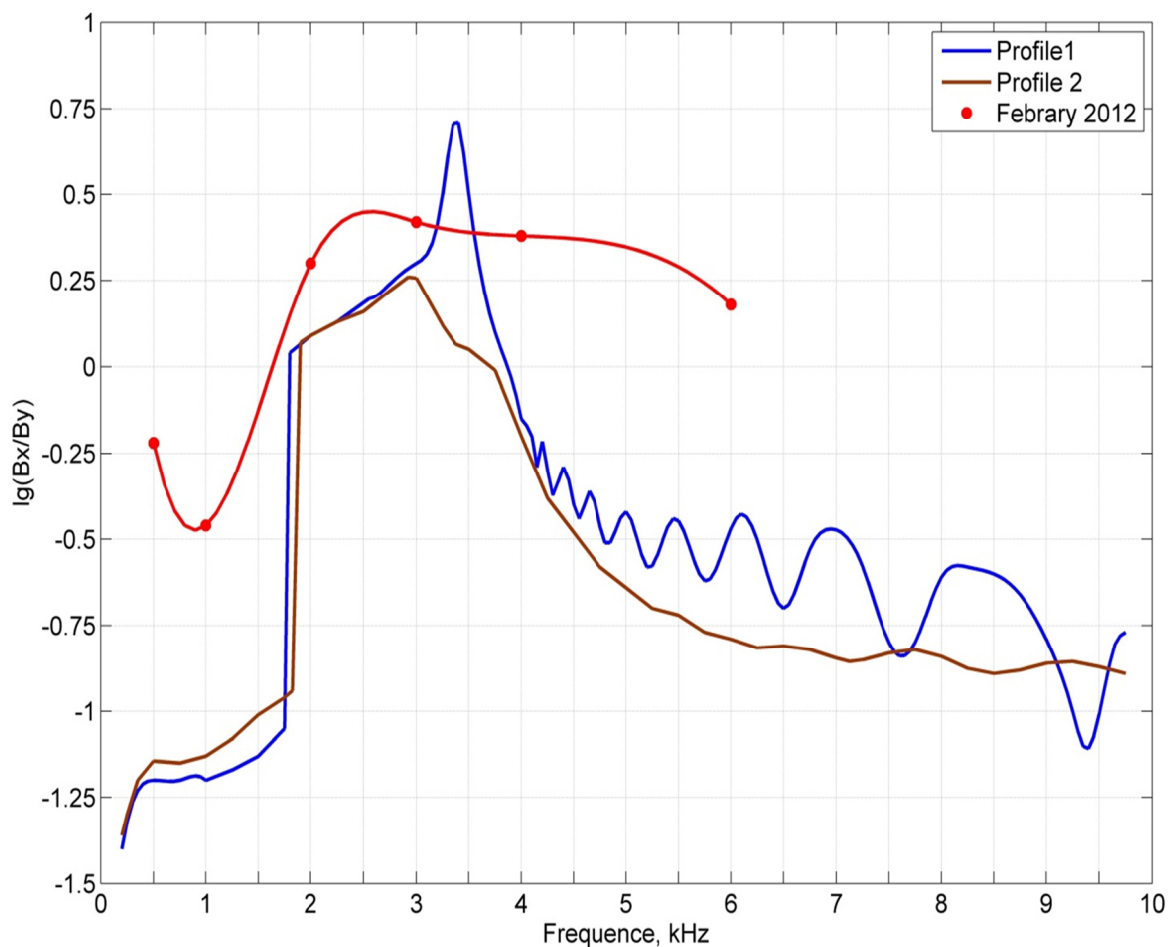


Рис. 4. Зависимость поляризации сигналов от частоты. Красная кривая – эксперимент EISCAT – Мухнево, 1884 км, февраль 2012 г. Синяя и коричневая кривые - расчет по модели [Barr, et al, Long-range detection of VLF radiation, Radio Science, 26, 4, 871-879, 1991] для разных волноводов.

В разделе 4.2 описываются результаты пеленгации сверхслабых сигналов на больших базах от ионосферного источника. Эксперименты проводились на нагревном стенде EISCAT в октябре 2012 года. В ходе данной нагревной кампании решалась задача исследования влияния трассы на амплитудно-фазовые характеристики сигналов КНЧ/ОНЧ диапазона. Для этой цели проводилась синхронные измерения в трех пространственно-разнесенных измерительных пунктах. Схема расположения измерительных пунктов изображена на Рис. 5.

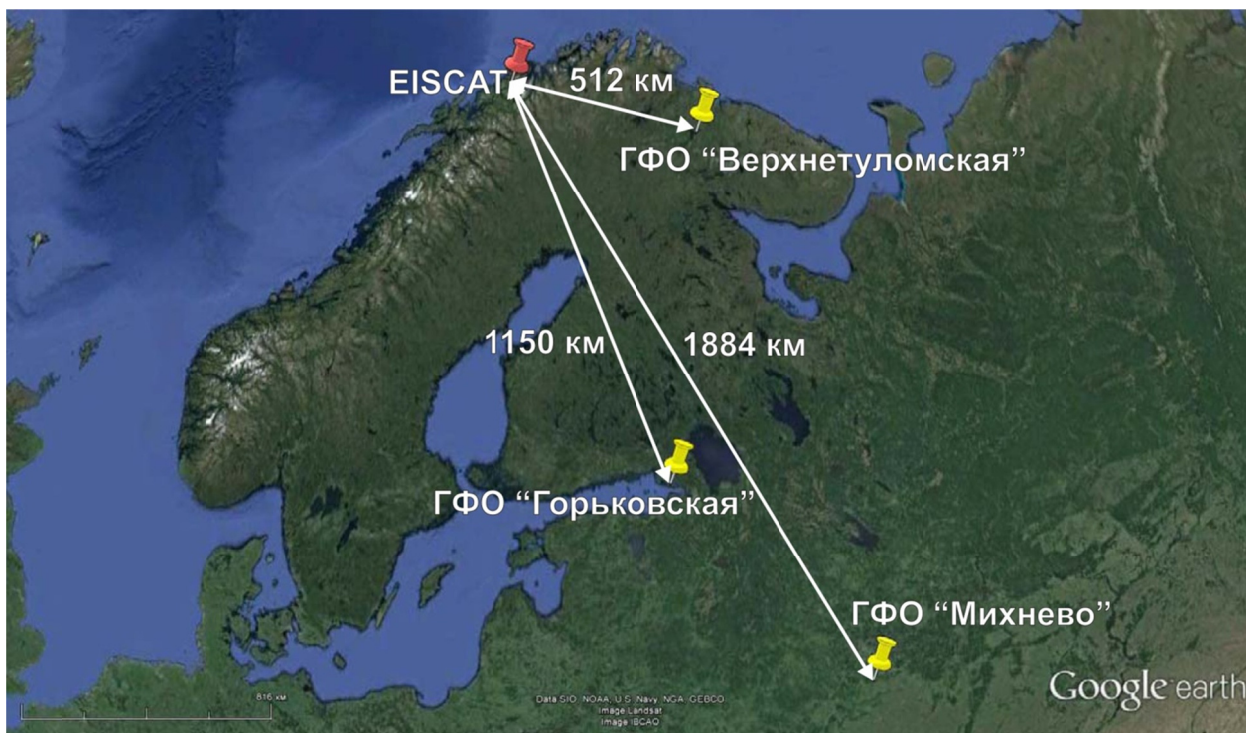


Рис. 5. Схема постановки эксперимента в октябре 2012 года. Показано взаимное расположение нагревного стенда EISCAT и геофизических обсерваторий, в которых производились измерения.

В ходе данной нагревной кампании стенд работал 5 дней с килогерцовыми модуляциями. Из этих дней только 13 октября удалось зарегистрировать сигнал в двух точках одновременно, а именно в "Горьковской" и "Верхнетуломской" обсерваториях (Рис. 6). В этот день стенд работал с модуляцией 2017 Гц в режиме 10 минут нагрев / 5 минут пауза.

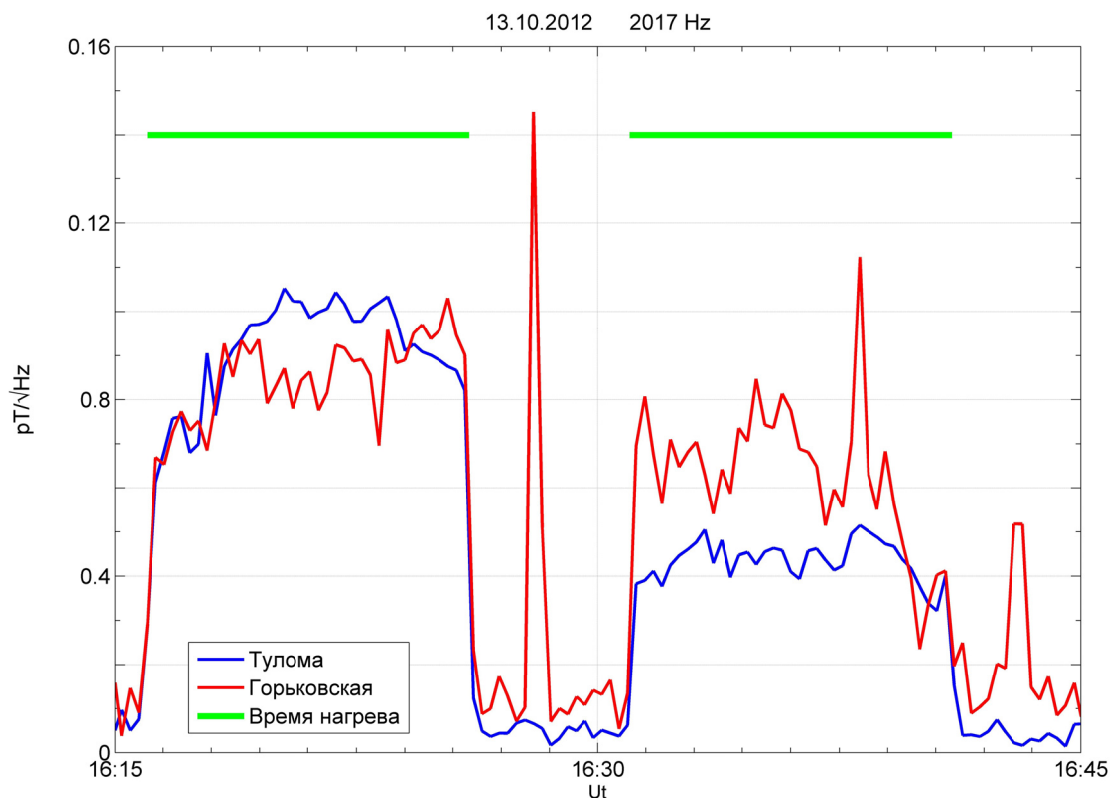


Рис. 6. Амплитуды сигнала, зарегистрированного от нагревного стенда EISCAT

13 октября 2012 года на частоте 2 кГц. Красная и синяя кривые – измерения в обсерваториях "Горьковская" и "Верхнетуломская" соответственно.

При рассмотрении фазовых характеристик принятых сигналов (Рис. 7) видно, что фазы сигналов по одним и тем же компонентам, принятым в Верхнетуломской и Горьковской обсерваториях, имеют разные тренды. Причиной такого поведения фаз может являться только влияние трассы на амплитудно-фазовые характеристики сигналов.

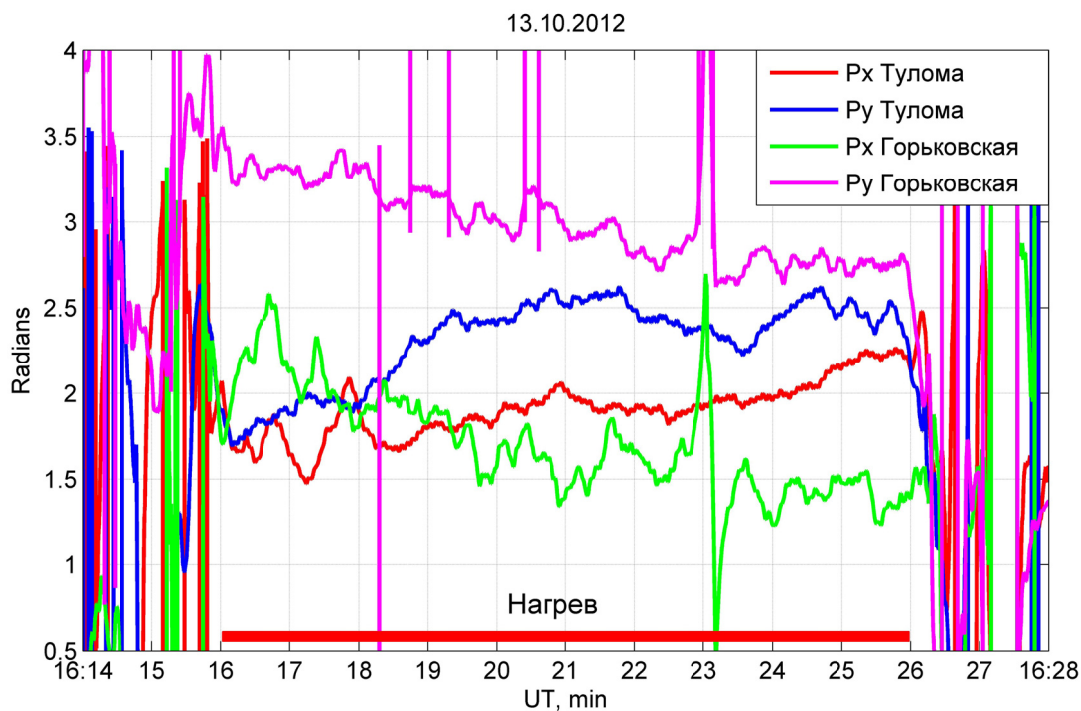


Рис. 7. Изменение фазы модуляционного сигнала на частоте 2017 Гц по результатам двухкомпонентных измерений в обсерваториях "Верхнетуломская" (синяя и красная кривые) и "Горьковская" (зеленая и розовая кривые) Горизонтальная красная линия - время нагрева.

По результатам данной кампании был сделан вывод, что при данной схеме расположения измерительных пунктов, находящихся на значительном расстоянии друг от друга, пеленгация источника невозможна из-за существенного различия фаз сигналов, распространяющихся по трассам, отличающимся как по длине, так и по азимуту, на источник. Выходом из положения является пеленгация источников КНЧ/ОНЧ сигналов на короткой базе для уменьшения влияния трасс на фазовые характеристики принимаемых сигналов.

Результаты пеленгации сверхслабых сигналов на малых базах описываются в разделе 4.3. Эксперименты проводились на нагревном стенде EISCAT в феврале 2013. С учетом результатов октябрьской кампании 2012 года было принято решение о пеленгации

фазовыми методами на малых базах, для исключения влияния трасс. Измерения велись в населенных пунктах д. Дубна, д. Александровка и ГФО "Михнево". Схема расположения измерительных пунктов приведена на *Рис. 8*.

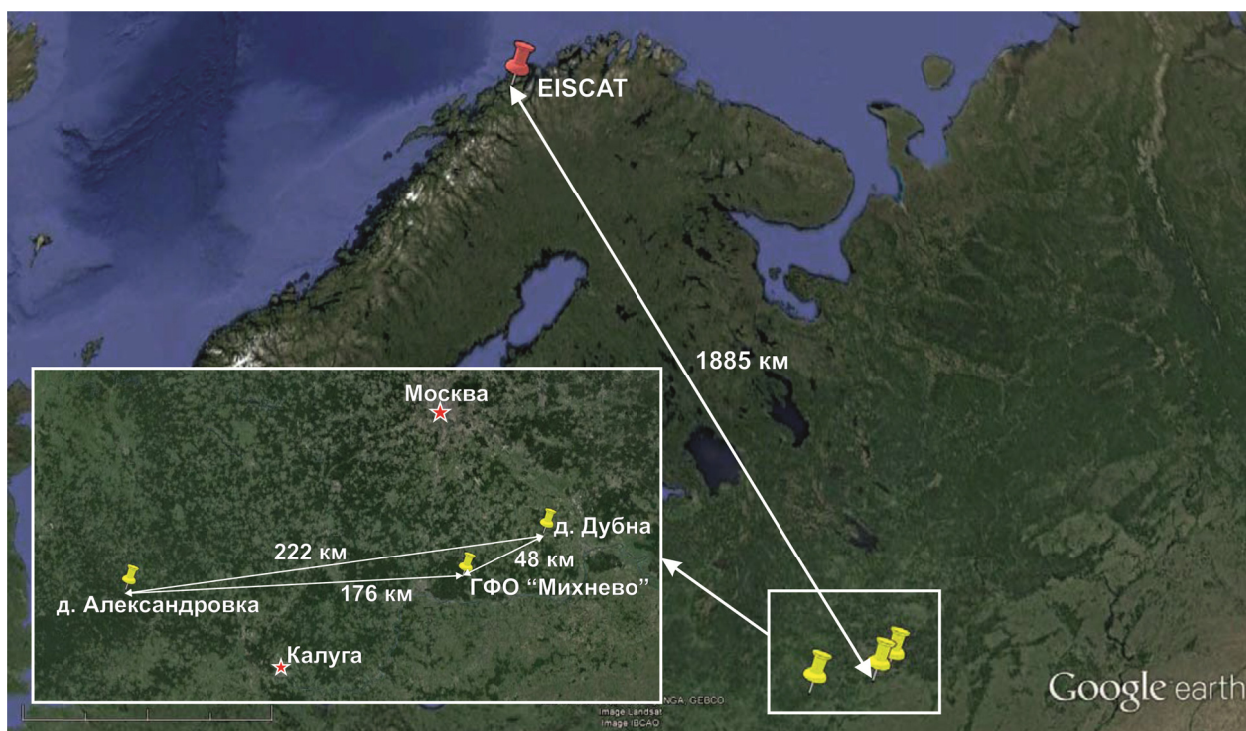


Рис. 8. Расположение измерительной аппаратуры во время эксперимента в феврале 2013.

Сигнал на частоте 2016.97 Гц был зарегистрирован с 17:05 до 17:07 во всех трех измерительных пунктах. На *Рис. 9* показано изменение во времени амплитуды сигнала на частоте 2017 Гц в полосе 0.01 Гц.

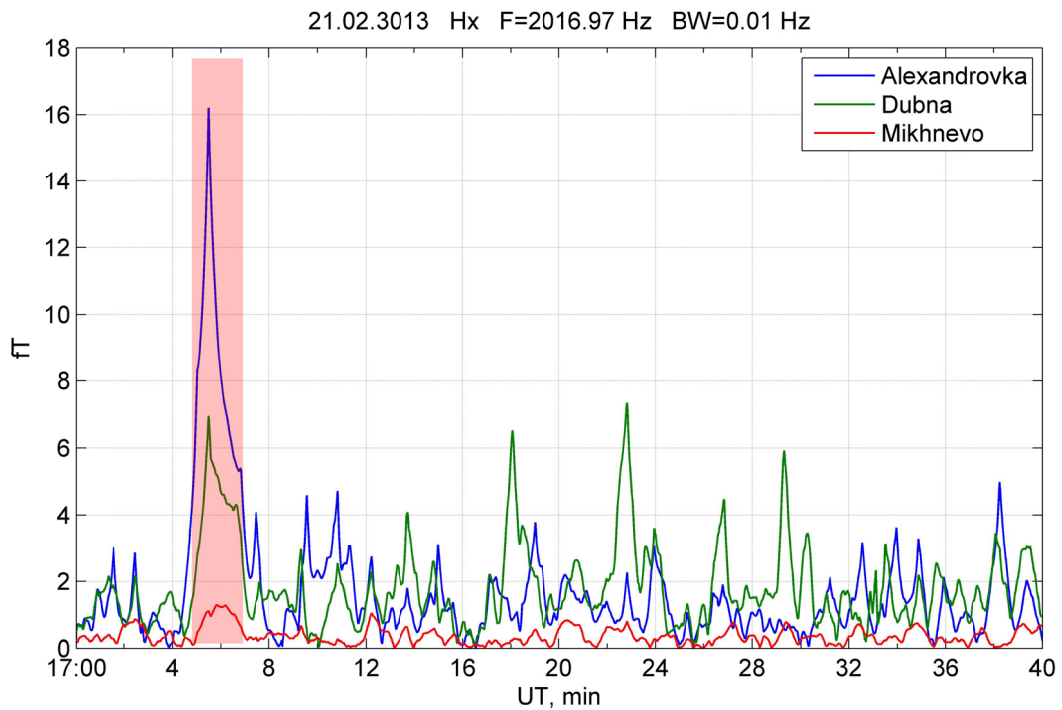


Рис. 9. Амплитуды сигналов, зарегистрированные на частоте 2016.97 Гц в трех точках. Красная кривая – измерения, проводимые в ГФО Мухнево, синя и зеленая кривые – результаты измерений в деревне Александровка и деревне Дубна соответственно. Красной областью выделено время регистрации сигнала с 17:05 до 17:07.

Во время воздействия на ионосферу электромагнитного излучения, характер изменения фаз сигналов, принятых на разных измерительных пунктах на данной частоте, одинаков, в то время, как при отсутствии сигналов на модуляционной частоте, фаза сигналов меняется хаотично (Рис. 10).

По оценкам, разность набега фаз между Александровкой и Дубной от стенда EISCAT должна составлять 2.52 радиана. Среднее же значение набега фаз с 17:05 до 17:07 составило 2.46 радиана (Рис. 11). Отклонение от истинного азимута, рассчитанное по этому набегу фаз, составляет ± 3 градуса.

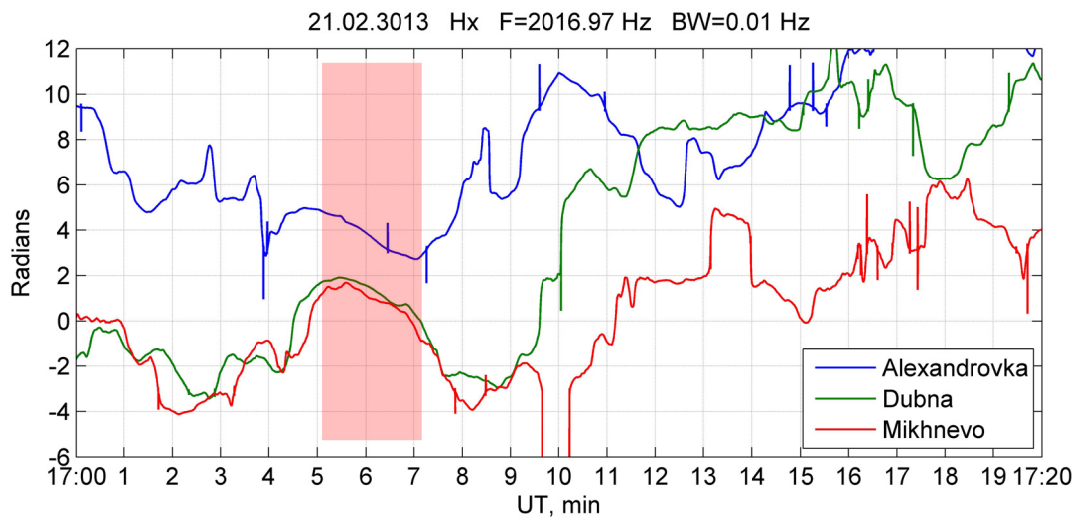


Рис. 10. Изменение фазы сигналов, записанных в трех измерительных пунктах (синяя кривая - д. Александровка, зеленая - д. Дубна, красная - ГФО Михнево). В период времени 17:05-17:07 (выделенный красной областью), когда был включен нагрев, фазы сигналов ведут себя одинаково.

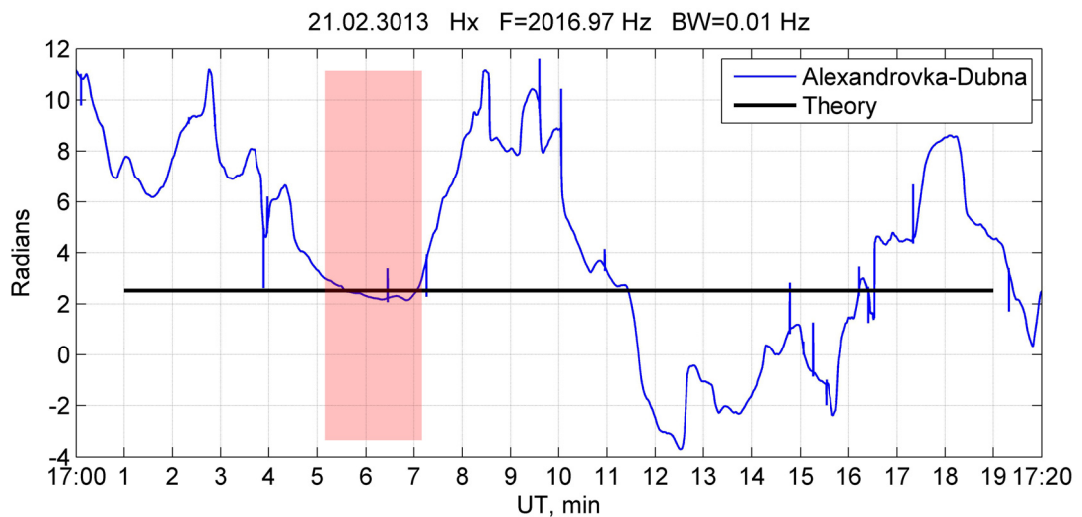


Рис. 11 Разность набега фаз между д. Дубна и д. Александровка, черная прямая линия – расчетный набег фаз, синяя кривая – набег фаз, полученный в ходе эксперимента, красной областью выделено время нагрева.

Данный результат демонстрирует возможность пеленгации ионосферного источника КНЧ/ОНЧ излучения фазовыми методами с использованием разработанной методики пеленгации на коротких базах.

В разделе 4.4 обсуждается влияние гелиогеофизических условий на генерацию и распространение КНЧ/ОНЧ излучения. Проведено сравнение характера изменения амплитуд модуляционных сигналов с IU индексом, построенным по данным Европейской системы магнитометров IMAGE (Рис. 12), а так же изменением магнитного поля в Тромсе (Рис. 13).

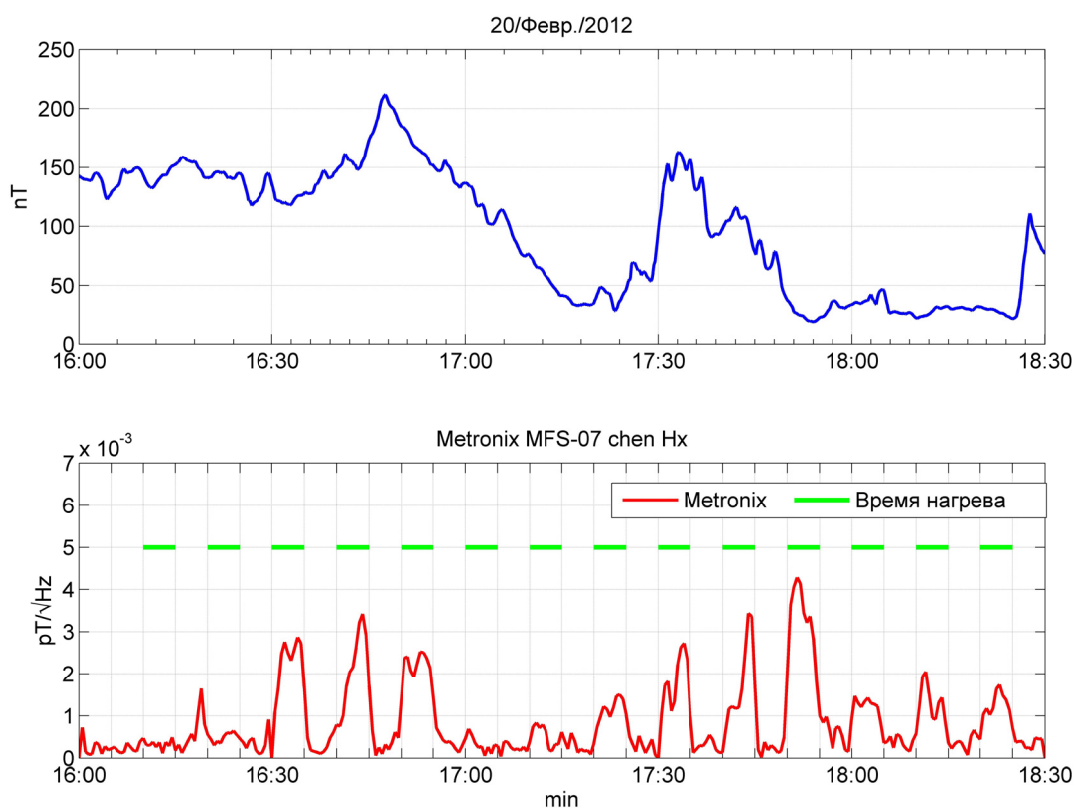


Рис. 12. Сравнение IU индекса (верхняя панель) с амплитудой сигналов принятых во время модуляционной работы стенда 20.02.2014 (нижняя панель).

Из рисунка 12 видно, что при возрастании IU -индекса так же наблюдается возрастание амплитуды модуляционных сигналов, зарегистрированных в ГФО Михнево.

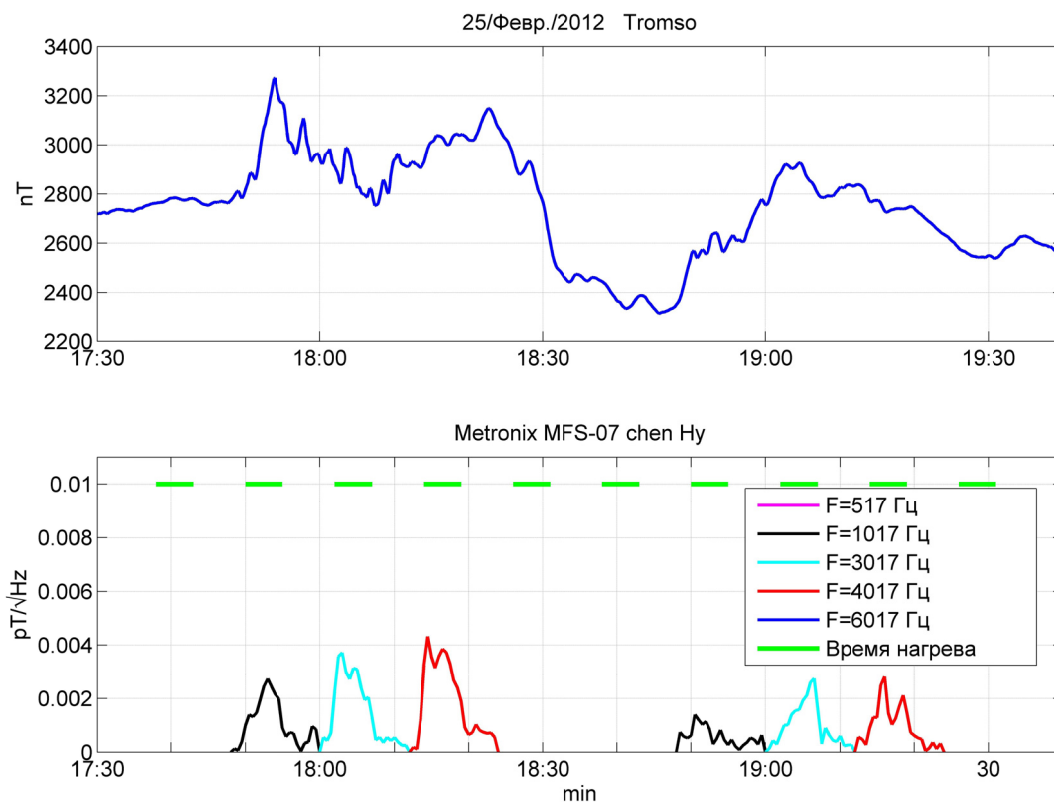


Рис. 13. Сравнение геомагнитной активности в Тромсё (верхняя панель) с амплитудой модуляционных сигналов (на частотах от 0.5 до 6 кГц), принятых в ГФО "Михнево" (нижняя панель).

Из рисунка 13 видно, что 25.02.2012 так же как и 20.02.2012 (Рис. 12) наблюдается рост амплитуды модуляционных сигналов, зарегистрированных в ГФО Михнево, одновременно с возрастанием магнитного поля в Тромсё.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что активность электроджета является одним из основных факторов, влияющих на генерацию КНЧ/ОНЧ излучения. В то же время очевидно, что существуют и другие факторы, существенно влияющие на эффективность генерации КНЧ/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.

Публикации по теме диссертации

1. Б.Г. Гаврилов, Ю.И. Зецер, В.И. Куркин, И.Э. Маркович, Ю.В. Поклад, М. Парро, И.А. Ряховский, В.В. Яким. Вариации электромагнитных полей и параметров ионосферы в Байкальской рифтовой зоне. Физика Земли, 2012, № 4, сс. 72–80.
2. Gavrilov, B. G.; Zetzer, Yu. I.; Kurkin, V. I.; Markovich, I. E.; Poklad, Yu. V.; Parrot, M.; Ryakhovskii, I. A.; Yakim, V. V. Variations of the electromagnetic fields and ionospheric parameters in the Baikal Rift Zone. Izvestiya, Physics of the Solid Earth, Volume 48, Issue 4, pp.354-362. DOI: 10.1134/S1069351312030032
3. Б.Г. Гаврилов, Ю.И. Зецер, И.Э. Маркович, Ю.В. Поклад, И.А. Ряховский, В.В. Яким. Связь вариаций электромагнитных полей и параметров ионосферы с геоморфологическими структурами юго-западной части Байкальской рифтовой зоны. Сборник ИДГ, 2012, сс 43-52.
4. И.Х.Ковалева, Ю.А.Корсунская, Ю.В. Поклад, И.А. Ряховский, Ю.С.Рыбнов, В.А.Харламов. Анализ экспериментальных данных демодуляционного излучения стенда EISCAT при работе по вечернему терминатору. Сборник ИДГ, 2013, сс 224-234.
5. И. А. Ряховский. Синхронная наземная и орбитальная регистрация вариации электромагнитных полей в Байкальской рифтовой зоне, Тезисы на X международной школе молодых ученых имени А.Г. Колесникова, Томск 2012.
6. Ilya A Ryakhovskiy, Boris G Gavrilov, Yuriy V Poklad, Julius I Zetzer, Natalia F Blagoveschenskaya, Michael T Rietveld Experimental investigation of ULF/VLF radio

wave generation and propagation in the upper atmosphere and ionosphere during EISCAT heating experiment in 2012, thesis on COSPAR, Moscow 2014.

7. Boris G Gavrilov, Julius I Zetzer, Natalia F Blagoveschenskaya, Michael T Rietveld, Vladimir M Ermak, Yuriy V Poklad, Ilya A Ryakhovskiy Experimental investigation of ULF/VLF radio wave generation and propagation in the upper atmosphere and ionosphere during EISCAT heating experiment in 2012. AGU Chapman Conference, Republic of Korea, 2014.