

На правах рукописи



Полетаев Александр Сергеевич

**КОГЕРЕНТНОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ СДВ РАДИОСИГНАЛОВ,
РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ В ВОЛНОВОДЕ ЗЕМЛЯ – ИОНОСФЕРА**

01.04.03 – Радиофизика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Иркутск – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет».

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук, доцент
Ченский Александр Геннадьевич

Официальный оппоненты: **Ременец Георгий Федорович,**
доктор физико-математических наук, доцент,
лектор физического факультета, ФГБОУ ВО
«Санкт-Петербургский государственный
университет», г. Санкт-Петербург

Козлов Владимир Ильич,
кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник, Институт
космофизических исследований и аэронавтики им.
Ю.Г. Шафера Сибирского отделения Российской
академии наук, г. Якутск

Ведущая организация: ФГБУН «Институт динамики геосфер»
Российской академии наук (ИДГ РАН),
г. Москва

Защита состоится «**26**» **декабря 2019 г.** в **14:00** на заседании диссертационного совета Д 212.074.04 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский государственный университет» по адресу: 664003, г. Иркутск, бульвар Гагарина, д. 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский государственный университет» и на официальном сайте университета <http://www.isu.ru>.

Автореферат разослан « ____ » _____ **2019 г.**

Отзывы на автореферат (в 2-х экземплярах, заверенные печатью организации) просьба выслать по адресу: 664003, г. Иркутск, бульвар Гагарина, д. 20; ученому секретарю диссертационного совета Д 212.074.04 Аграфонову Ю.В., e-mail: agrafonov@physdep.isu.ru

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.074.04
доктор физико-математических наук, профессор



Ю.В. Аграфонов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы. Ионосфера оказывает значительное воздействие на функционирование многих радиотехнических систем. Влияние ионосферы существенно для сверхдлинноволновых (СДВ) и длинноволновых (ДВ) систем радионавигации, передачи эталонных частот и единого времени, для комплексов коротковолновой радиосвязи, спутниковых систем глобального позиционирования и передачи информации. Для обеспечения заданного качества связи необходимо знать состояние канала связи, выполнять прогноз изменений его параметров и условий распространения радиосигналов. Поэтому создаются и активно развиваются различные модели ионосферы.

Современные модели ионосферы имеют ошибки прогнозирования, причем точность описания высотного распределения параметров ионосферы оказывается неодинаковой. Самые широко используемые модели лишь частично охватывают нижние слои ионосферы (области D и E): расчеты в них выполняются для высот от 90 км. Кроме того, изменчивость климата приводит к устареванию полученных ранее моделей. Важной частью совершенствования и повышения точности расчетов в существующих моделях является непрерывное проведение экспериментов по мониторингу ионосферы.

Круг средств и методов наблюдений за ионосферой достаточно обширен. Большинство существующих инструментов мониторинга ориентированы на изучение тонкой структуры средних и верхних слоев. Практически единственным эффективным способом дистанционной диагностики нижней ионосферы оказываются наблюдения в СДВ-ДВ диапазоне. Решение обратной задачи рассматривают в контексте волноводного распространения СДВ сигналов, а разнообразные физические явления – как комплекс процессов в единой системе литосфера-атмосфера-магнитосфера.

Изменения в эффективной высоте волновода, проводимости его стенок создают суточные, сезонные, годовые вариации параметров СДВ радиоволн, а результирующее поле определяется межмодовой интерференцией. Также заметно влияние нерегулярных неоднородностей ионосферы, связанных с солнечными вспышками и солнечными затмениями, геомагнитными бурями и суббурями, высыпанием высокоэнергичных частиц, геомагнитными пульсациями и акустическими гравитационными волнами, атмосферными электрическими разрядами (молнии, спрайты, эльфы, синие струи). В последние годы особый интерес представляют сейсмо-ионосферный эффект, прогнозирование сейсмических событий с помощью электромагнитных методов и литосферно-ионосферные связи. Таким образом, исследования D-слоя ионосферы как пограничной зоны взаимодействия нейтральной и ионизированной областей средней атмосферы остаются очень востребованными.

Целью диссертационной работы является разработка и создание сверхдлинноволнового радиоинтерферометра для долговременного мониторинга состояния нижней ионосферы, а также проведение сравнительного

анализа вариаций параметров спокойной и возмущенной среднеширотной ионосферы в Восточно-Сибирском регионе.

Для достижения цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Разработать, изготовить, протестировать и выполнить отладку комплекта измерительных приемников СДВ диапазона для синхронной регистрации параметров зондирующих радиосигналов ОНЧ передатчиков; выполнить калибровку измерительного комплекса, оценить чувствительность и погрешности измерений; создать программное обеспечение для управления сбором данных, предобработки сигналов и анализа результатов наблюдений.

2. Разработать и теоретически обосновать методику оценки волноводного дрейфа фазы зондирующих сигналов СДВ-ДВ радиопередатчиков, излучаемых с частотной манипуляцией с минимальным сдвигом частоты и непрерывной фазой; адаптировать метод измерения вариаций фазы центральной частоты, обусловленных субионосферным распространением радиоволн, для сигналов с гауссовой частотной манипуляцией с минимальным сдвигом частоты.

3. Выполнить сравнительный анализ результатов долговременных измерений: рассмотреть изменения параметров зондирующих радиосигналов для спокойных (суточные, сезонные, годовые вариации) и возмущенных (солнечные вспышки, высыпание заряженных частиц из магнитосферы, геомагнитные бури) условий распространения.

Теоретическая и практическая значимость. Исследован характер влияния среднеширотной ионосферы на распространение СДВ радиоволн в регионе Восточная Сибирь. Экспериментальные данные могут быть полезны для комплексного анализа состояния нижней ионосферы, поиска новых эффектов и закономерностей физических процессов в ионосфере, а также для построения эмпирических моделей нижних слоев среднеширотной ионосферы региона.

Результаты диссертационного исследования могут использоваться в системах передачи информации с применением модуляции CPFSK, MSK, GMSK для детектирования сигналов и оценки степени их искажений, что позволит улучшить надежность и эффективность цифровых систем связи. Разработанные методики оценки фазовых искажений сигналов могут применяться для исследований характеристик различных каналов радиосвязи.

Практическая значимость подтверждается поддержкой работы грантом РФФИ №16-35-00476 «Сверхдлинноволновый интерферометр долговременного мониторинга ионосферы методом наклонного зондирования когерентными радиосигналами ОНЧ передатчиков».

Методология и методы исследования. Результаты работы базируются на применении моделирования принимаемых ОНЧ радиосигналов и проведении долговременных экспериментальных измерений, методе сравнительного анализа измерений независимых инструментов дистанционной диагностики ионосферы. Для экспериментального исследования ионосферы использован метод наклонного зондирования когерентными СДВ радиосигналами, являющийся одним из наиболее эффективных для диагностики нижних слоев.

Достоверность результатов обеспечивается использованием стандартных методов цифровой обработки сигналов, применением статистической обработки данных, верификацией алгоритмов анализа при помощи моделирования, экспериментальной проверки; обуславливается применением сертифицированных технических средств измерений в процессе отладки и калибровки разработанных СДВ приемников; достигается статистической повторяемостью результатов наблюдений и применением компаративного подхода анализа данных и теоретических выводов и результатов экспериментов других авторов.

Личный вклад автора заключается в непосредственном участии в разработке, изготовлении, тестировании, отладке, оценке технических параметров и характеристик аппаратного обеспечения комплекса. Представленные методики измерения амплитуды и фазы сигналов с частотной манипуляцией, алгоритмы постобработки экспериментальных данных разработаны преимущественно автором. Также лично автором диссертации создано все программное обеспечение и выполнена обработка, систематизация и интерпретация большей части полученных экспериментальных данных. Автор также принимал активное участие в апробации результатов диссертационной работы и написании научных статей по теме исследования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработанный аппаратно-программный комплекс позволяет осуществлять долговременные интерферометрические измерения вариаций амплитуды и фазы СДВ радиосигналов с манипуляцией частоты. Когерентное детектирование частотно-манипулированных сигналов навигационных ОНЧ передатчиков показало, что радиоимпульсы с разносом частот в 100 Гц распространяются в волноводе Земля-ионосфера в одинаковых условиях, а несовпадение их начальных фаз вызвано нестабильностью передатчиков.
2. Новые методы детектирования и оценки в условиях помех величины дрейфа фазы в волноводном канале Земля-ионосфера для сигналов с частотной манипуляцией с непрерывной фазой (CPFSK), с манипуляцией с минимальным сдвигом частоты (MSK), а также с гауссовой частотной манипуляцией с минимальным частотным сдвигом (GMSK).
3. Результаты долговременных наблюдений вариаций параметров спокойной и магнитно-возмущенной среднеширотной ионосферы по измерениям характеристик ОНЧ радиосигналов, распространяющихся в волноводе Земля-ионосфера:
 - 3.1 В дальней зоне приема предрассветное увеличение амплитуды ОНЧ радиосигналов, распространяющихся в направлении запад-восток и восток-запад, является устойчивым эффектом интерференции ТМ-нормальных волн низшего порядка.
 - 3.2 Во время магнитных бурь протоны солнечного ветра с энергиями 0.6–4.0 МэВ могут проникать в нижние слои ионосферы средних широт 62°–57°. Для бури 5 апреля 2010 г. установлено, что потоки протонов после прохождения хвостовой области магнитосферы на высоте около 35800 км достигли D слоя ионосферы через 13 минут.

3.3 Полученные устойчивые закономерности роста амплитуды сигналов 23.4 кГц, 18.3 кГц и ее уменьшения у сигналов 20.9 кГц, 21.75 кГц во время геомагнитных бурь обусловлены интерференционными эффектами мод высших порядков.

Научная новизна работы состоит в том, что разработаны новые способы демодуляции и измерения вариаций фазового сдвига центральной частоты сигналов с частотной манипуляцией с непрерывной фазой (CPFSK, MSK, GMSK), позволяющие выполнять оценку дрейфа фазы зондирующих СДВ сигналов в волноводе Земля-ионосфера независимо от передаваемой двоичной информации, за счет чего исключаются погрешности измерений вследствие ошибочного приема информационной битовой комбинации. Новизна метода подтверждается патентами на изобретение и свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ. По результатам двухчастотного зондирования с разносом частот 100 Гц обнаружено несовпадение начальных фаз радиоимпульсов вследствие нестабильности навигационных ОНЧ передатчиков.

При помощи сравнительного и статистического анализа собранных экспериментальных данных получены новые результаты наблюдений для нижних слоев спокойной и возмущенной среднеширотной ионосферы в Восточно-Сибирском регионе.

Публикации. В общей сложности по теме диссертации опубликована 21 работа. Из них 9 публикаций – в научных изданиях, включенных в Перечень ВАК или приравненных к ним (из которых 4 индексируются в базах Web of Science, Scopus; 2 патента на изобретение, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ); 12 статей – в сборниках международных и всероссийских научных конференций и других изданиях.

Апробация работы. Результаты, изложенные в диссертации, были представлены и обсуждались на IX Всероссийской конференции «Современные проблемы радиоэлектроники и связи», Иркутск, 2010; на XI Международной конференции «NIDays-2012», Москва, 2012; в рамках работы Байкальской школы по фундаментальной физике (БШФФ-2013) на XIII Международной конференции «Взаимодействие полей и излучения с веществом», Иркутск, 2013; на XXIV Всероссийской конференции «Распространение радиоволн», Иркутск, 2014; на III Всероссийском семинар-совещании «Триггерные эффекты в геосистемах», Москва, 2015; в рамках БШФФ-2015 на XIV Международной конференции «Взаимодействие полей и излучения с веществом», Иркутск, 2015; на XIV Международной конференции «NIDays-2015», Москва, 2015; XIV Всероссийской конференции «Современные проблемы радиоэлектроники и связи», Иркутск, 2016; на XXI Всероссийской конференции «Современные проблемы радиоэлектроники», Красноярск, 2018; на XIV Международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2018)», Новосибирск, 2018; в рамках БШФФ-2019 на XVI Международной конференции «Взаимодействие полей и излучения с веществом», Иркутск, 2019.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 160 позиций, и трех приложений. Основной текст диссертации изложен на 201 странице, содержит 28 таблиц и 96 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обсуждаются различные методы исследования ионосферы с точки зрения их эффективности для непрерывного мониторинга нижних слоев. Кратко описаны особенности вариаций параметров СДВ-ДВ радиосигналов при распространении в сферическом волноводе Земля-ионосфера. Поставлены цель и задачи, сформулированы защищаемые положения. Приведен обзор экспериментальных и теоретических работ, проанализировано состояние проблемы на момент начала исследований. Обоснованы актуальность темы исследования, научная новизна, достоверность, теоретическая и практическая значимость.

В первой главе рассматриваются особенности распространения СДВ-ДВ радиоволн и подходы к проведению радиоизмерений в этом диапазоне. Сформулированы требования к методике проведения эксперимента, техническим характеристикам измерительных СДВ приемников.

При изучении свойств радиоканалов немаловажное значение отводится исследованию амплитудных и фазовых характеристик среды передачи. Для этой цели необходимо рассматривать поведение распространяющихся в канале связи радиоволн в разных геофизических условиях. Для проведения эксперимента необходимо иметь постоянный источник излучения радиоволн (источник когерентных сигналов при разнесенном приеме). Для этого могут быть использованы вещательные и радионавигационные станции СДВ-ДВ радиосвязи, а также источники естественного КНЧ-ОНЧ электромагнитного излучения.

Главным источником излучения естественного происхождения являются разряды молний. Основная доля энергии приходится на частоты менее 100 кГц с максимумом на 1–10 кГц. Уровень фоновых шумов составляет около 120 фТл/√Гц на частоте 80 Гц и 1.5 фТл/√Гц на частоте 1 кГц. Атмосферика – разновидность грозовых атмосферных помех – имеют уровень порядка 1–100 фТл/√Гц.

В диапазоне СДВ-ДВ работает много передатчиков, которые используются для морской радиосвязи и навигации, а также передачи сигналов эталонных частот и единого времени. Большое количество станций излучает радиосигналы в диапазоне



частот 16–28 кГц, который может быть выбран в качестве рабочей полосы СДВ приемника. На рисунке 1 на карте показаны трассы распространения выбранных для приема радиосигналов.

Сигналы выбранных передатчиков модулированы по частоте методом MSK или GMSK, что необходимо учитывать при когерентном детектировании сигналов для

Рисунок 1 – Трассы распространения СДВ радиосигналов, выбранных для приема

оценки дрейфа начальной фазы несущей, обусловленного изменениями состояния ионосферы. Использование существующих ОНЧ передатчиков значительно экономит время и средства, так как монтаж и обслуживание таких передатчиков крайне затратно.

Проведение радиоизмерений на частотах СДВ-ДВ диапазона осуществляют, как правило, при помощи специально разработанных инструментов мониторинга ионосферы (AWESOME, SoftPAL, UltraMSK и др.) либо с использованием универсальных измерительных геофизических комплексов (Rhode&Schwarz ESCI, Metronix ADU-07e, NI PXI, NI CompactRIO). Дополнительно при исследовании можно использовать онлайн-приемники, данные которых размещаются в сети Интернет в открытом доступе (Kiel Longwave Monitor, SID Monitoring Station).

Для интерферометрических измерений необходимо обеспечить синхронизацию старта сбора данных и запуска преобразования в АЦП в разнесенных приемниках. Для этих целей используют сигналы спутниковых навигационных систем (GPS, ГЛОНАСС). Для получения точности измерений фазы порядка 0.108° в диапазоне СДВ необходимо, чтобы нестабильность частоты тактового генератора внешней синхронизации АЦП была 10^{-8} . Чувствительность приемника должна быть ~ 1 фТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$ или лучше.

Во второй главе подробно рассмотрен разработанный в ИРНИТУ аппаратно-программный комплекс для долговременных интерферометрических измерений амплитуды и фазы ОНЧ радиосигналов. Приведены характеристики приемного тракта, выполнена оценка чувствительности и погрешностей измерений. Показаны новые методики разделения вариаций фазы сигналов, возникающих вследствие манипуляции частоты несущих колебаний при передаче, и дрейфа фазы, обусловленного субионосферным распространением радиоволн. Структура разработанного СДВ приемника показана на рисунке 2. Прием осуществляется на ортогональные кольцевые рамочные антенны (диаметр 0.8 м,

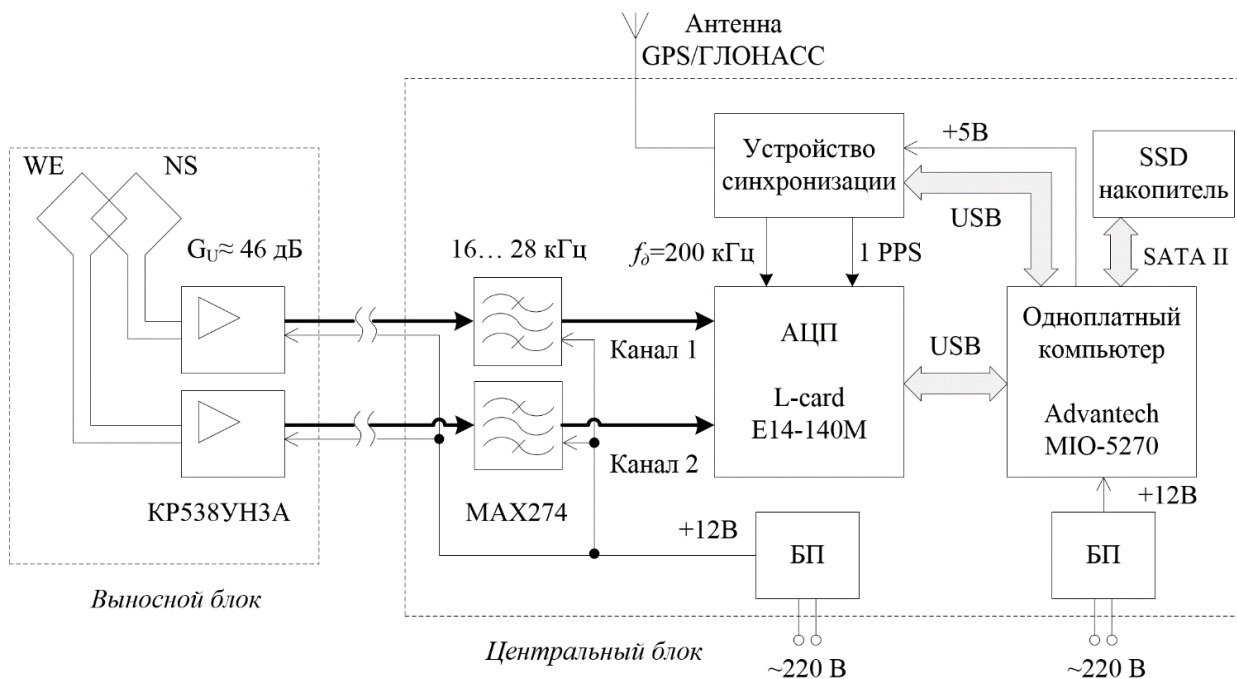


Рисунок 2 – Структурная схема измерительного комплекса, разработанного в ИРНИТУ

36 витков, чувствительность равна $0.125 \text{ фТл}/\sqrt{\text{Гц}}$ при $f = 16 \text{ кГц}$ и $0.07 \text{ фТл}/\sqrt{\text{Гц}}$ при $f = 28 \text{ кГц}$, вблизи которых располагаются малозумящие предусилители на базе КР538УН3 (неравномерность АЧХ в полосе 16–32 кГц не более $\pm 0.25 \text{ дБ}$, максимальное усиление по напряжению около 46 дБ). Аналоговые малозумящие антиалиасинговые фильтры 8-го порядка выделяют группу станций в диапазоне частот 15–28 кГц (фильтр выполнен на основе микросхем МАХ274ВЕW1,

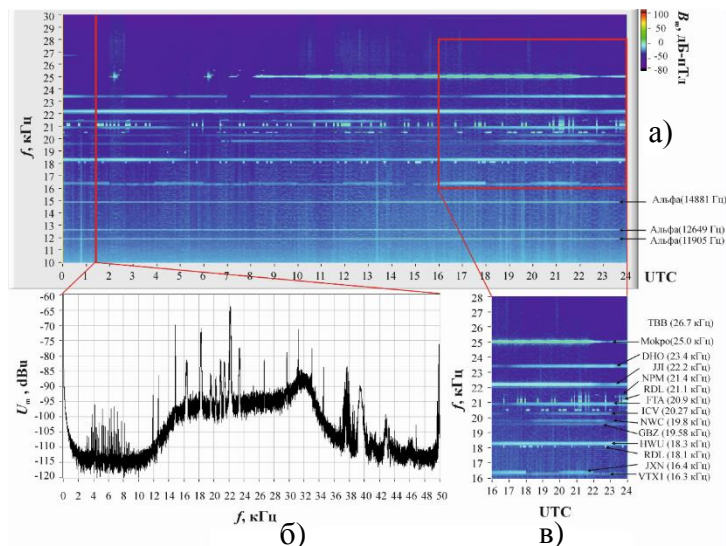


Рисунок 3 – Пример широкополосных данных 09.03.2016 г.: а) частотно-временной суточный спектр; б) усредненный амплитудный спектр в 2 часа UTC; в) 8-часовой фрагмент спектра

коэффициент пульсаций равен 0.12 дБ). Частота дискретизации 14-битного АЦП в модуле L-card E14-140М составляет 100 кГц при двухканальном приеме. На рисунке 3 показан пример измеренного частотно-временного суточного спектра. Чувствительность аппаратуры достаточно высокая для приема сигналов даже от таких удаленных станций, как NML (25.2 кГц, США) и NPM (21.4 кГц, Гавайи), расположенных на расстоянии свыше 8600 км от приемника.

Для регистрации фазы сигналов и проведения интерферометрических измерений разработано устройство синхронизации, выполняющее внешнее тактирование АЦП разнесенных приемников и запуск сбора данных (рисунок 4). Работа устройства основана на импульсно-фазовой автоподстройке частоты генератора, управляемого напряжением. Часть кольца ИФАПЧ (счетчик, цифровой компаратор, кодер, делитель частоты) реализована с помощью ПЛИС.

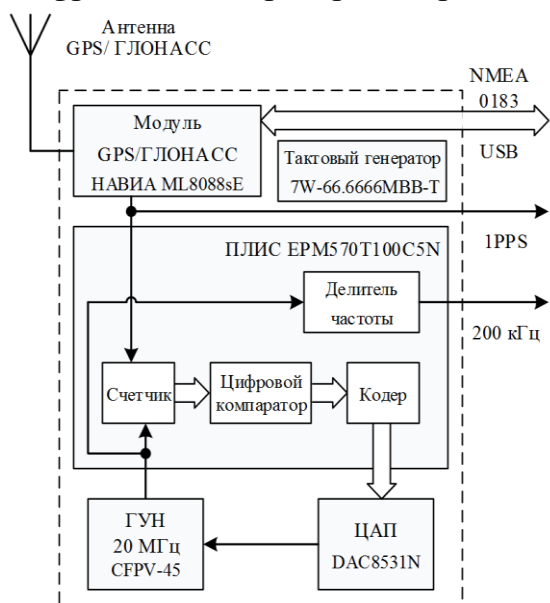


Рисунок 4 – Структурная схема устройств синхронизации приемников СДВ интерферометра

Среднеквадратичная погрешность привязки синхронизирующих импульсов 200 кГц к шкале UTC равна $\sigma_{\Sigma} = 26.53 \text{ нс}$, что соответствует предельной амплитуде джиттера $\Delta t_{\Sigma} = 79.59 \text{ нс}$ (доверительный интервал $p = 0.997$), точности измерения фазы СДВ сигналов не хуже $\pm 0.86^\circ$ и нестабильности частоты $\kappa = 8 \cdot 10^{-8}$ за 1 с. По результатам тестирования данного устройства при помощи генератора ГСС-93/1, синхронизированного с водородным эталоном частоты Ч1-75А (государственный вторичный эталон частоты и шкалы времени ВЭТ 1-5 ФГУП «ВНИИФТРИ»), средний дрейф фронтов импульсов дискретизации составил 19.4 нс ($\kappa = 1.53 \cdot 10^{-8}$, $\Delta\phi \approx 0.2^\circ$).

Характерной особенностью частотной манипуляции сигналов MSK является наличие линейного (квазилинейного в случае GMSK) набега фазы на $\pi/2$ за время передачи каждого бита, что создает необходимость разделения вариаций фазы, возникающих вследствие манипуляции частоты, и дрейфа фазы сигналов, обусловленного их субионосферным распространением. Для этого чаще всего используют метод реконструкции переходов по фазовой решетке. Однако при этом возникают трудно исправимые погрешности вследствие ошибок в принятой двоичной комбинации, несовпадения по времени реконструированной и измеренной фазовых функций. Эти недостатки устранены в авторском методе оценки фазового дрейфа MSK сигналов и его модификации для GMSK сигналов.

На рисунке 5 показана блок-схема предлагаемого алгоритма вычислений. MSK сигнал на входе приемника может быть записан в виде

$$S_{вх}(t) = KA \cdot \cos \left[\omega_{ц}t + \frac{a_k \pi t}{2T_s} + \theta(t) \right], \quad (1)$$

где K – коэффициент ослабления; A – амплитуда сигнала; $\omega_{ц}$ – центральная частота, Гц; $a_k = \pm 1$ – последовательность бит в виде биполярного кода NRZ; T_s – длительность одного бита, с; $\theta(t)$ – функция фазовых искажений сигнала, рад.

Для получения квадратурных компонент единичных бит $I_1(t)$ и $Q_1(t)$ и нулевых бит $I_0(t)$ и $Q_0(t)$ входной сигнал $S_{вх}(t)$ перемножается соответственно с частотами передачи радиоимпульсов ω_1 и ω_0 логических единиц и нулей. После выделения квадратур вычисляются фазовые характеристики

$$p_1(t) = \text{arctg}(Q_1(t)/I_1(t)) \text{ и } p_0(t) = \text{arctg}(Q_0(t)/I_0(t)), \quad (2)$$

причем в моменты приема логических единиц $p_1(t) = \theta(t)$ и $p_0(t) = \pi t/T_s + \theta(t)$, а при приеме логических нулей $p_1(t) = -\pi t/T_s + \theta(t)$ и $p_0(t) = \theta(t)$.

Скользящее среднее от суммарной функции $\langle p(t) \rangle = \langle p_0(t) + p_1(t) \rangle$ дает искомую величину $\theta(t)$. Также для уменьшения погрешности измерения вблизи границ диапазона измерений $[-\pi/2; \pi/2]$ аналогичные вычисления выполняются для опорных колебаний, сдвинутых на $\pi/2$. При этом смещенные квадратуры могут быть получены из несмещенных:

$$\begin{cases} \hat{I}_1(t) = Q_1(t), & \hat{I}_0(t) = Q_0(t), \\ \hat{Q}_1(t) = -I_1(t); & \hat{Q}_0(t) = -I_0(t). \end{cases} \quad (3)$$

Затем находим $\hat{p}_0(t)$ и $\hat{p}_1(t)$.

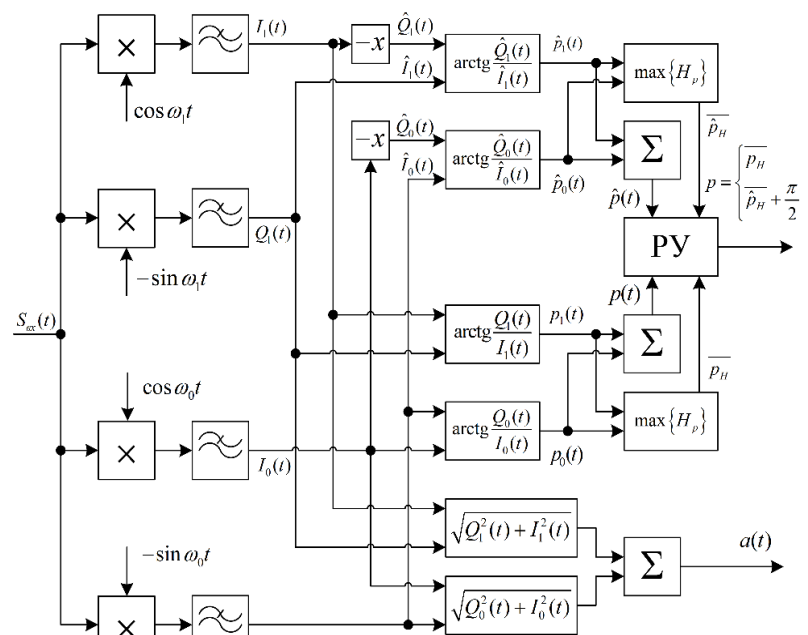


Рисунок 5 – Блок-схема предлагаемого метода оценки дрейфа фазы MSK и GMSK сигналов в канале передачи

В решающем устройстве (РУ) выбор между усредненными фазами $\langle p(t) \rangle$ и $\langle \hat{p}(t) \rangle$ происходит из условия наименьшей дисперсии: если $D[p(t)] \leq D[\hat{p}(t)]$, то на выход передается $\langle p(t) \rangle$, иначе – измеренной фазой будет $\langle \hat{p}(t) + \pi/2 \rangle$. С целью упрощения операции развертывания фазы при постобработке данных можно выполнять вычитание $\langle \hat{p}(t) - \pi/2 \rangle$ – тогда сдвиг фазы составит π радиан.

При детектировании GMSK сигналов возникают дополнительные фазовые искажения в результате применения при передаче формирующего фильтра Гаусса. Поэтому в предлагаемом модифицированном методе оценки дрейфа фазы в канале передачи выполняется статистический анализ функций $p_1(t)$ и $p_0(t)$. При построении гистограммы наблюдается хорошо выраженный максимум распределения значений этих функций, который соответствует $\theta(t)$.

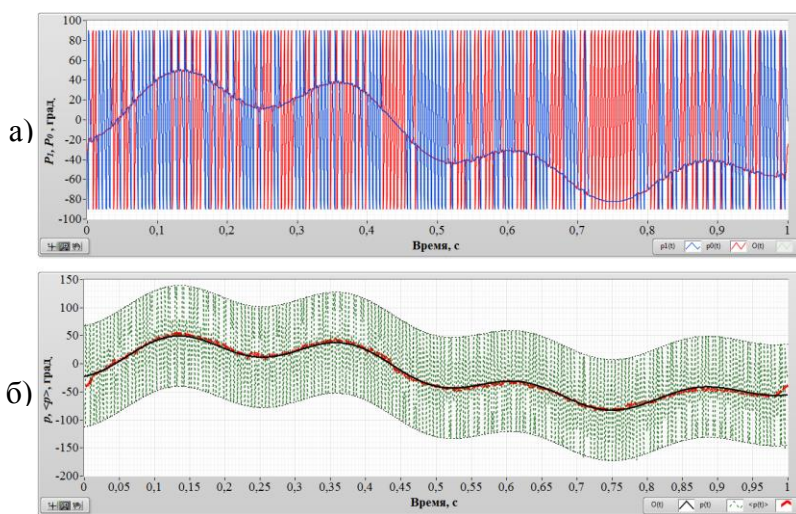


Рисунок 6 – Моделирование MSK сигнала (22.2 кГц, 200 бод): а) фазовые характеристики $p_1(t)$ и $p_0(t)$ с внесенными искажениями; б) сравнение суммарной функции $p(t)$, усредненной фазы $\langle p(t) \rangle$ и функции искажений $\theta(t)$

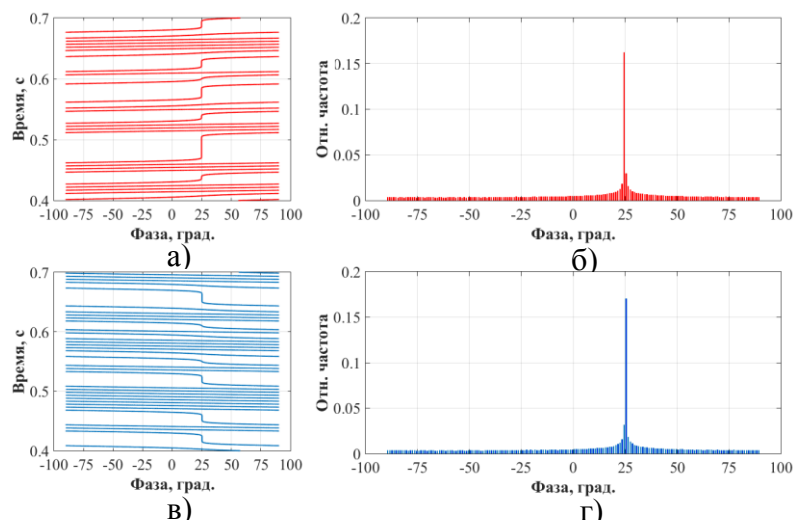


Рисунок 7 – Модель GMSK сигнала (22.2 кГц, 200 бод) с искажениями $\theta = 25^\circ$: а) функция $p_0(t)$; б) гистограмма $H(p_0)$; в) функция $p_1(t)$; г) гистограмма $H(p_1)$

Найденные моды распределения значений $\max\{H(p_1)\}$ и $\max\{H(p_0)\}$ усредняются, и в результате получаем фазу p_H . Аналогичным образом вычисляется \hat{p}_H для смещенных фазовых характеристик $\hat{p}_1(t)$ и $\hat{p}_0(t)$. Выбор между p_H или $(\hat{p}_H + \pi/2)$ происходит по наименьшей дисперсии $D[p(t)]$ и $D[\hat{p}(t)]$.

Разработанные методы испытаны при помощи моделирования и на данных измерений. На рисунках 6-7 приведены результаты моделирования. Видно, что скользящее среднее хорошо описывает даже очень быстрые искажения начальной фазы MSK сигнала. Для GMSK модифицированный метод позволяет снизить влияние на результат оценки фильтра Гаусса. Проверка разработанных методик на измеренных радиосигналах показана на рисунке 8.

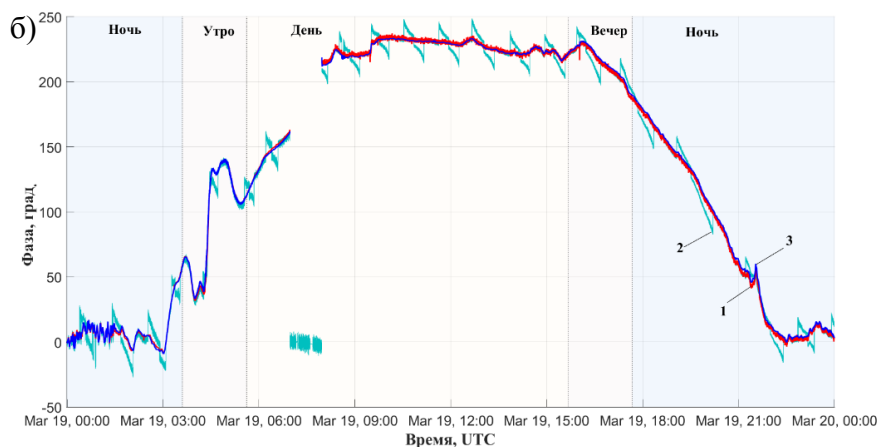
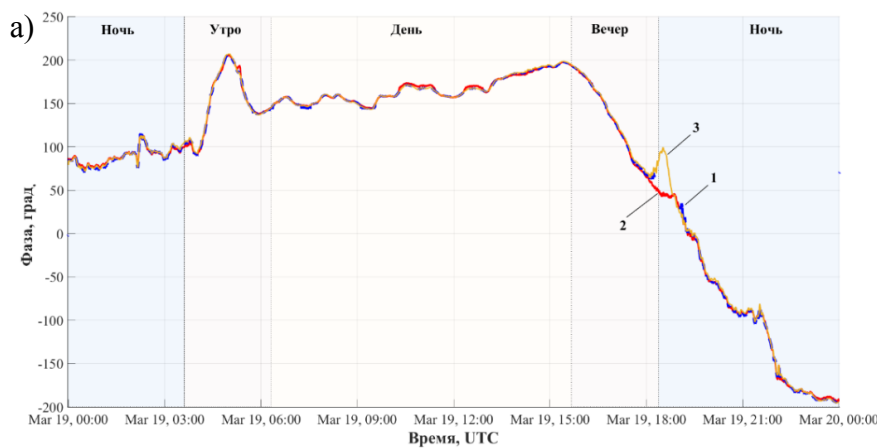


Рисунок 8 – Верификация разработанных методов на СДВ сигналах, измеренных 19.03.2015: а) суточный дрейф фазы MSK сигнала станции GQD (22.1 кГц, Великобритания); б) дрейф фазы GMSK сигнала станции DHO (23.4 кГц, Германия)

- 1** – известный метод реконструкции переходов по фазовой решетке;
- 2** – метод когерентного раздельного детектирования лог.0 и лог.1 с вычислением скользящего среднего;
- 3** – модифицированный метод когерентного детектирования лог.0 и лог.1 с применением гистограмм (статистического анализа моды распределения значений фазовых функций).

Предложенный метод выделения фазовых искажений сигналов с MSK манипуляцией показал высокую точность и хорошее быстроедействие. Предельная погрешность измерений не превышает 0.36° . Модифицированный метод может быть применим как для MSK, так и для GMSK сигналов, и позволяет уменьшить погрешность вычислений до сотых долей градуса. Результат оценки фазы не зависит от двоичной комбинации, для вычислений не требуется определять время начала битовых интервалов. Для GMSK сигналов метод универсален при всех значениях параметра фильтра Гаусса. Работоспособность сохраняется также и для CPFSK сигналов с произвольным индексом модуляции m (в том числе и для частного случая $m = 0$ – немодулированный сигнал).

В работе показано, что ОНЧ радиоимпульсы при таком двухчастотном зондировании с разном частот 100 Гц распространяются в одинаковых условиях. После обработки данных независимых СДВ приемников при помощи разработанных методов обнаружено, что иногда регистрируются несовпадения начальных фаз радиоимпульсов логических нулей и единиц. Показано, что данное несовпадение обусловлено нестабильностью ОНЧ передатчиков.

Для автоматизации эксперимента создан комплект программного обеспечения, который включает: программу управления сбором данных; программный модуль предварительной обработки сигналов в соответствии с предложенными методами; скрипты для анализа и постобработки результатов измерений; вспомогательные программные пакеты для тестирования отдельных электронных узлов приемника, моделирования и отладки работы алгоритмов цифровой обработки сигналов.

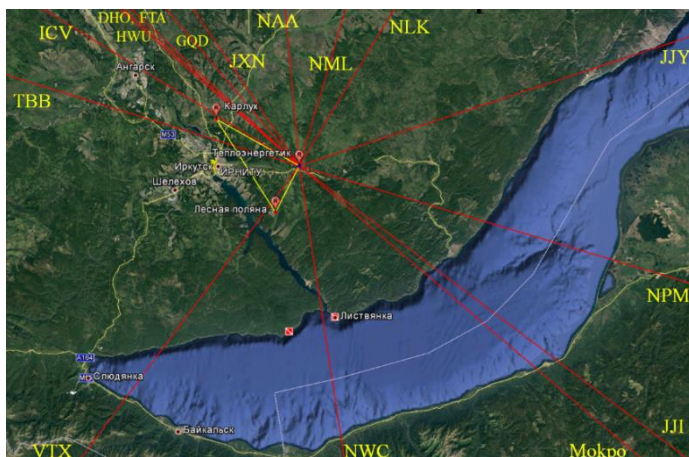


Рисунок 9 – Относительное расположение элементов интерферометра (маркеры R) и трасс ОНЧ сигналов

Таблица 1 – Значения параметров баз трехэлементного СДВ интерферометра (Т – п. Теплоэнергетик, К – п. Карлук, Л – п. Лесная поляна)

Параметр		Т	К	Л
Т	l , км	–	30.946	16.891
	A_z , град.	–	298.946	206.755
К	l , км	30.946	–	35.818
	A_z , град.	118.629	–	146.743
Л	l , км	16.891	35.818	–
	A_z , град.	26.667	326.971	–

Интерферометрические измерения позволяют решать задачи локализации ионосферных неоднородностей, выполнять радиопеленгацию источников излучения, выявлять влияние на результаты измерений шумов вблизи приемника. Сверхдлинноволновый интерферометр представляет собой сеть приемных СДВ станций, осуществляющих синхронный прием зондирующих радиосигналов. На рисунке 9 показано расположение созданного трехэлементного интерферометра, значения параметров баз сведены в таблице 1.

В третьей главе приведены результаты долговременных наблюдений в Восточно-Сибирском регионе за изменением состояния среднеширотной ионосферы и распространением СДВ радиоволн в спокойных и возмущенных условиях. Показаны методика и результаты обработки данных наблюдений.

Анализ суточного дрейфа амплитуды СДВ радиосигналов в средней зоне приема (3000 км) показывает, что днем существенной для отражения сигнала является область ионосферы на середине трассы (рисунок 10). Дневной максимум амплитуды совпадает с максимумом косинуса зенитного угла в этой области, что соответствует преимущественно одномодовому характеру распространения. Наиболее полное представление о закономерностях годовых вариаций амплитуды СДВ радиосигналов дают графики интенсивности в координатах время суток – месяцы (рисунок 11). Годовой максимум дневной амплитуды для длинных и коротких трасс средних широт (следовательно, также и электронной концентрации нижних слоев среднеширотной ионосферы) приходится на июль. Асимметрия утреннего роста и послеполуденного спада амплитуды повторяет годовые вариации наклона солнечного терминатора.

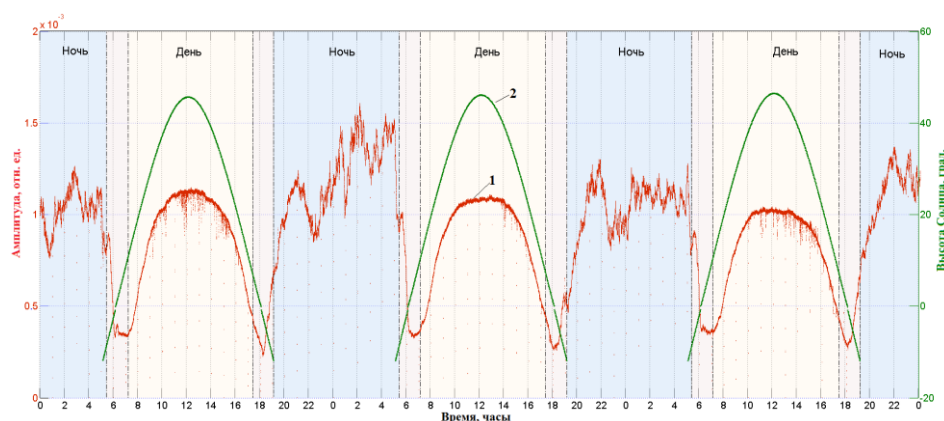


Рисунок 10 – Пример характерных суточных вариаций амплитуды СДВ радиосигналов, п. Теплоэнергетик: 1 – амплитуда сигнала JJ1 17–19 марта 2011 г. (UTC+8); 2 – изменение высоты Солнца в точке на середине трассы

Отличительной особенностью длинных среднеширотных трасс (как на западе, так и на востоке от приемника) является устойчивый предрассветный максимум амплитуды (кривая 4 на рисунке 11-б,г). Эти предрассветные максимумы соответствуют характерным утренним перегибам фазового хода, что свидетельствует об изменении результата суперпозиции мод распространения. Также для близко расположенных трасс НWU–Иркутск и ДНО–Иркутск обнаружено, что утренние интерференционные максимумы и минимумы амплитуды сигналов находятся в противофазе (рисунок 12). Предрассветные пики сигнала 23.4 кГц приходятся на глубокие минимумы амплитуды 21.75 кГц. И так как коэффициенты возбуждения ТЕ-нормальных мод в направлении запад-восток малы, то данный эффект обусловлен преимущественно интерференцией первой и второй ТМ-нормальных мод. Аналогичная ситуация наблюдается и для трассы NPM-Иркутск, для которой распространение идет в направлении восток-запад.

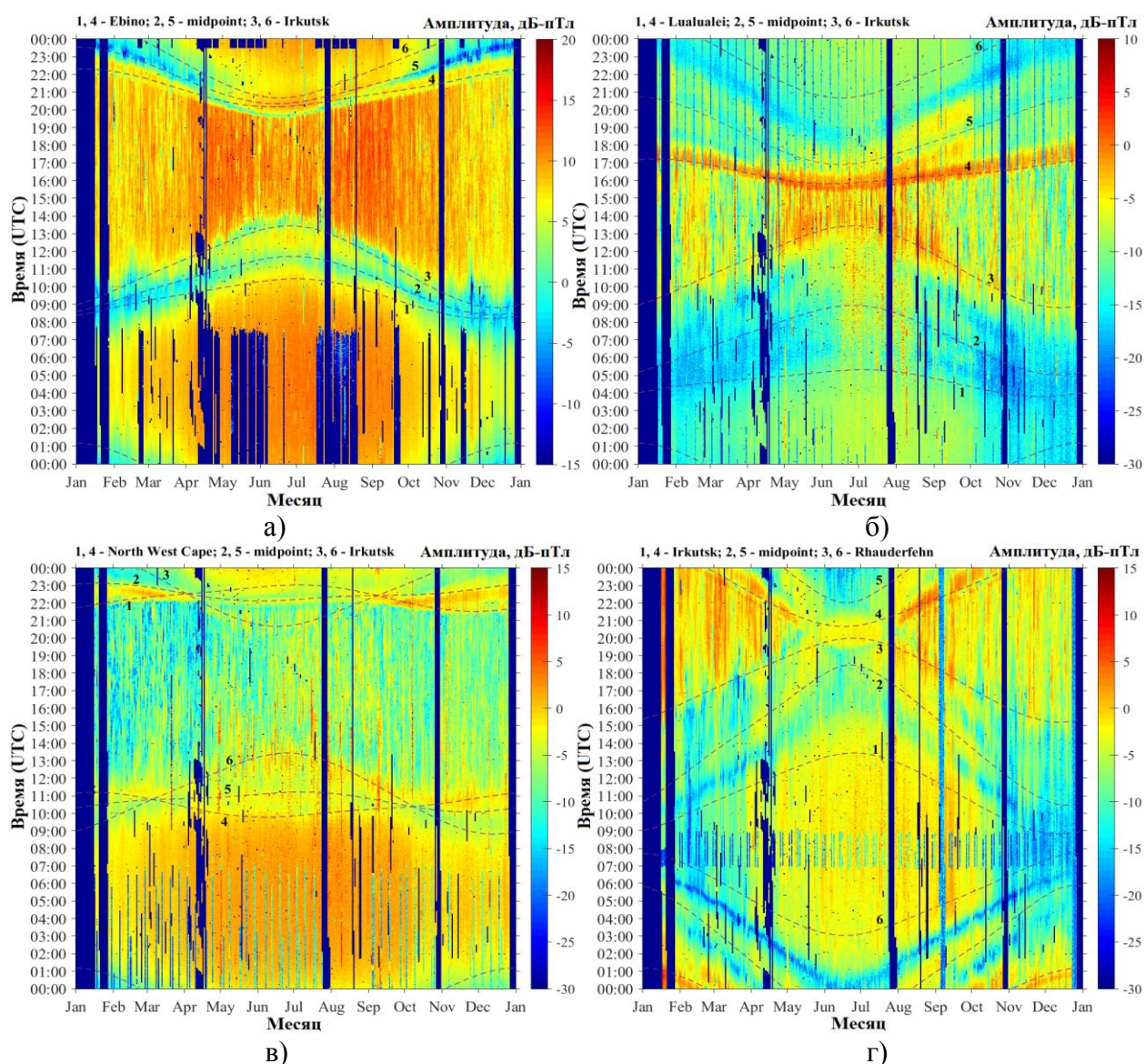


Рисунок 11 – Динамика изменения амплитуды СДВ радиосигналов в 2017 году (приемник в п. Лесная Поляна): а) передатчик JJI (Япония, 22.2 кГц, WE); б) станция NPM (Гавайи, 21.4 кГц, WE); в) передатчик NWC (Австралия, 19.8 кГц, NS); г) станция ДНО (Германия, 23.4 кГц, WE)

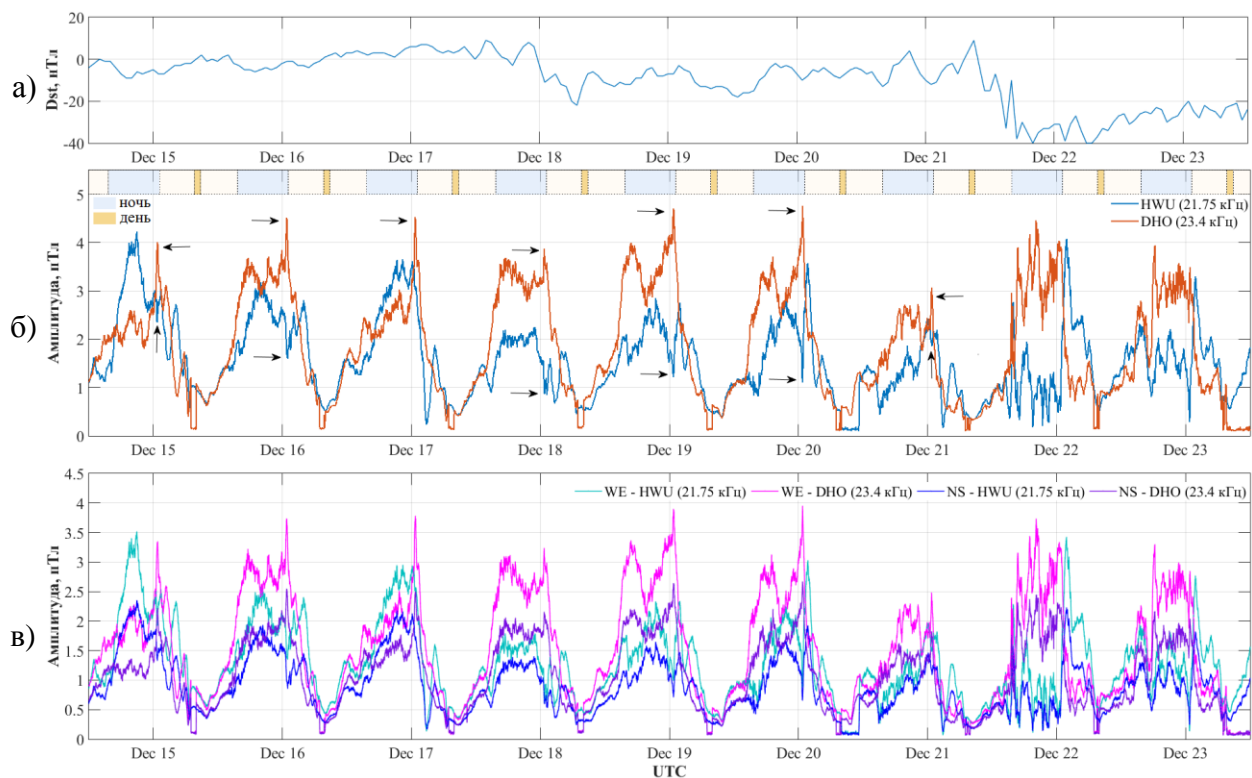


Рисунок 12 – Флуктуации амплитуды сигналов НВУ (21.75 кГц) и ДНО (23.4 кГц) в магнито-спокойных и возмущенных условиях в декабре 2016 года: а) вариации индекса Dst; б) вариации горизонтальной компоненты магнитной составляющей радиоволны; в) амплитуды сигналов, зарегистрированные ортогональными рамочными антеннами

Наблюдения за внезапными амплитудными и фазовыми аномалиями СДВ радиосигналов, возникающих в результате ионосферных возмущений во время солнечных вспышек, являются одним из эффективных способов оценки динамики процессов в нижней ионосфере на высотах D слоя, характеризующихся очень малой электронной концентрацией. Величина амплитудного всплеска прямо пропорциональна мощности вспышки, углу падения ионизирующего излучения, а также зависит от состояния ионосферы перед вспышкой.

На рисунке 13 приведены результаты наблюдений во время серий солнечных вспышек в сентябре 2017 г. Продолжительность стабилизации амплитуды (от пикового уровня к изначальному) после короткого воздействия повышенного ионизирующего излучения 6–7 мин варьируется для разных трасс от 21 до 47 мин. Начало роста амплитуды сигналов хорошо совпадает по времени с началом вспышки, но максимум амплитуды наступает с задержкой 0.5–2 мин. При определённых условиях геометрии распространения сигналов солнечные вспышки вызывают отрицательные всплески (уменьшение) амплитуды (рисунок 13-б). Такие явления зарегистрированы независимыми СДВ приемниками у ОНЧ сигналов различных частот. Одним из вероятных механизмов может выступать интерференционное подавление TM_1 -нормальной волны. Данный эффект крайне мало изучен и будет предметом дальнейших исследований.

Фаза СДВ сигналов более чувствительна к солнечным вспышкам, и даже слабые вспышки C1.0–C1.3 вызывают заметные фазовые возмущения. Произошедшая 08.09.2017 в 03:37 UTC (рисунок 14-д) короткая вспышка M1.2

длительностью 7 минут при общем фоне рентгеновского излучения $W = 1 \text{ мкВт/м}^2$ позволила оценить продолжительность возвращения фазы (высоты отражения) сигнала NWC (19.8 кГц) от пикового значения к прежнему уровню в 57.35 минуты ($\cos \chi$ меняется слабо от 0.96 до 0.985). Закон убывания фазы аппроксимируется экспоненциальной функцией с постоянной времени $\tau = 1380 \text{ с}$.

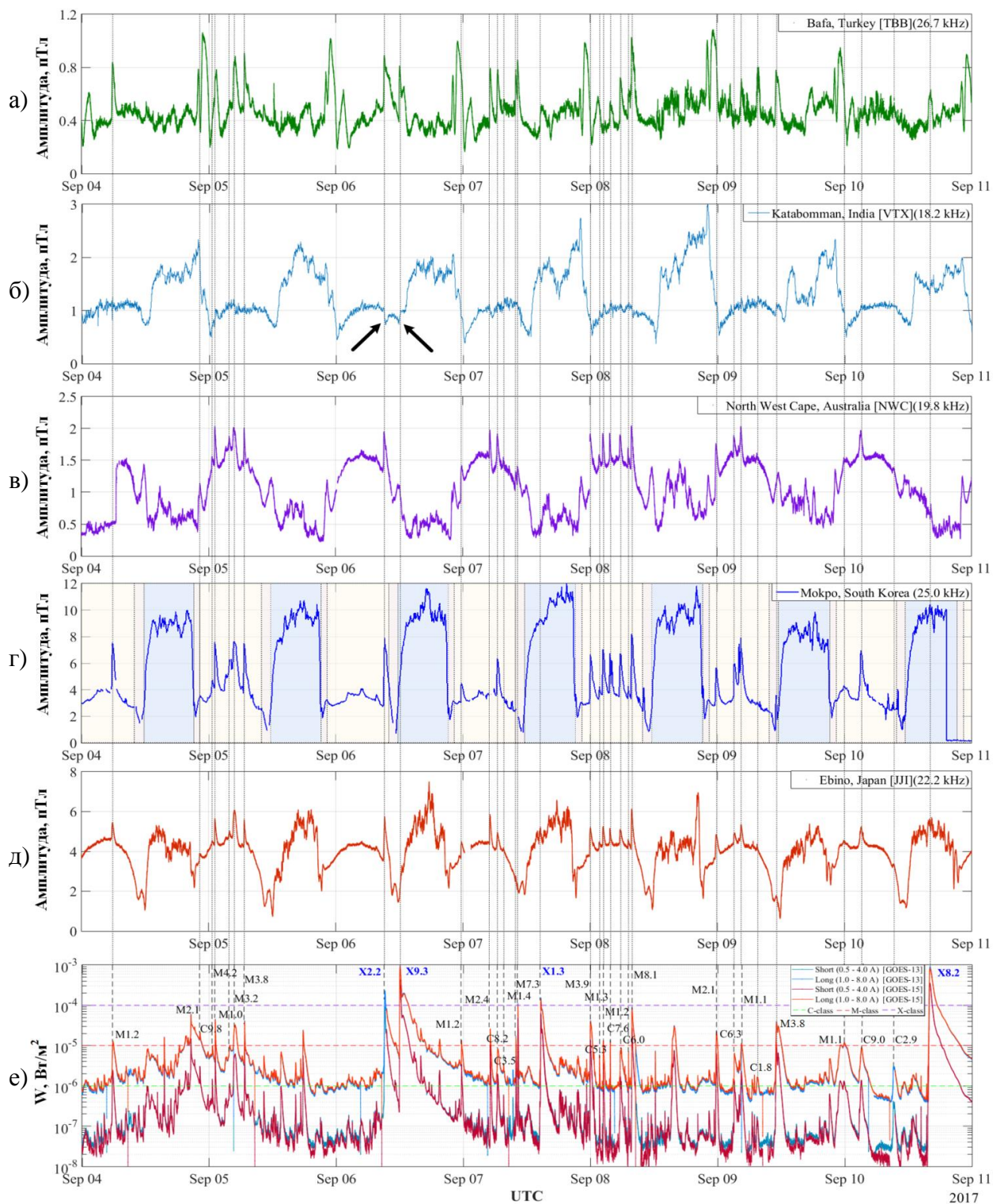


Рисунок 13 – Воздействие очень сильных солнечных вспышек на амплитуду СДВ сигналов в сентябре 2017 г., наблюдения в п. Теплоэнергетик: а) ТБВ 26.7 кГц; б) VTX 18.2 кГц; в) NWC 19.8 кГц; г) Мокро 25.0 кГц; д) JJI 22.2 кГц; е) рентгеновское излучение по данным GOES-13,15

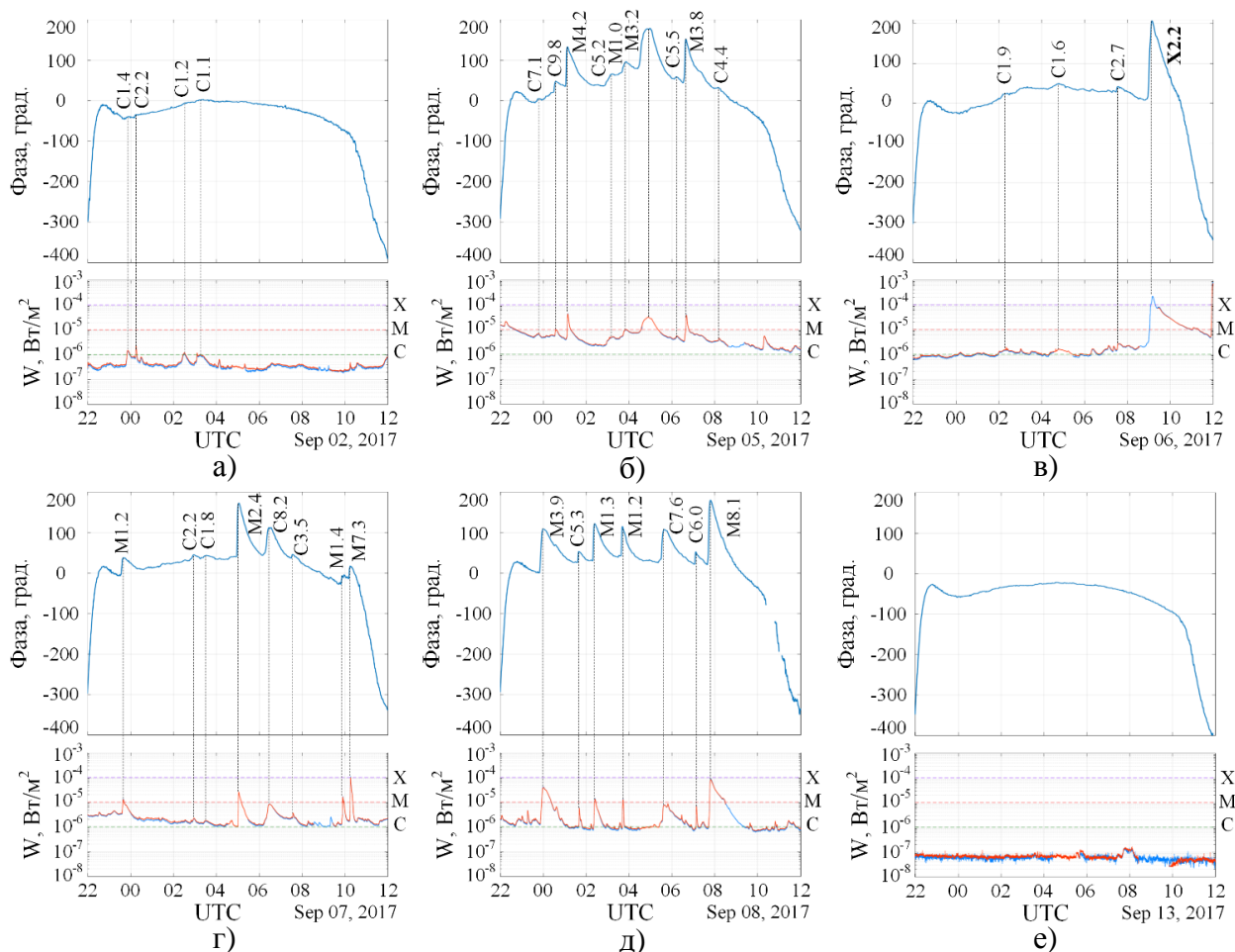


Рисунок 14 – Внезапные фазовые аномалии сигнала 19.8 кГц (NWC) в сентябре 2017 г.: а) 02.09.2017; б) 05.09.2017; в) 06.09.2017; г) 07.09.2017; д) 08.09.2017; е) 13.09.2017

Выбросы солнечной плазмы после вспышек могут вызывать значительные возмущения магнитосферы Земли. При этом геомагнитные бури сопровождаются вторжением энергичных частиц в верхние слои атмосферы приполярных областей. Во время магнитной бури 5 апреля 2010 года (класс G3) наблюдались крайне редкие эффекты одновременного усиления сигналов DHO (23.4 кГц), NWU (18.3 кГц) и FTA (20.9 кГц). Продолжительность амплитудного всплеска составила около 50 минут и хорошо коррелирует с потоком протонов, зарегистрированным спутником GOES-14 (рисунок 15). Важно, что подобный рост амплитуды проявлялся и для сигнала 37.5 кГц на трассе NRK-Киль. Данное событие позволило установить, что протоны солнечного ветра с энергиями 0.6–4.0 МэВ могут проникать в нижние слои ионосферы средних широт 62°–57°. При этом потоки протонов после прохождения хвостовой области магнитосферы на высоте около 35800 км достигли D слоя ионосферы через 13 минут.

Характер воздействия геомагнитных бурь на амплитуду СДВ сигналов среднеширотных трасс может отличаться для разных трасс очень сильно. Анализ эффектов магнитных бурь 2010–2019 годов показал, что практически во всех рассмотренных событиях амплитуда FTA (20.9 кГц) и ICV (20.27 кГц) заметно снижается после начала бури. Депрессия амплитуды сигнала 20.9 кГц имеет ярко выраженный вид и является очень хорошо «узнаваемым» характерным признаком магнитной бури. Сигнал станции NWU на частоте

18.3 кГц во всех случаях, когда работал передатчик, имеет рост амплитуды. При работе этой станции на частоте 21.75 кГц во время бурь наблюдается дневное увеличение интенсивности сигнала, а ночью – уменьшение. При более детальном рассмотрении суточных вариаций амплитуды указанных СДВ радиосигналов обнаружено, что обусловленные движением утреннего терминатора интерференционные минимумы и максимумы сигналов

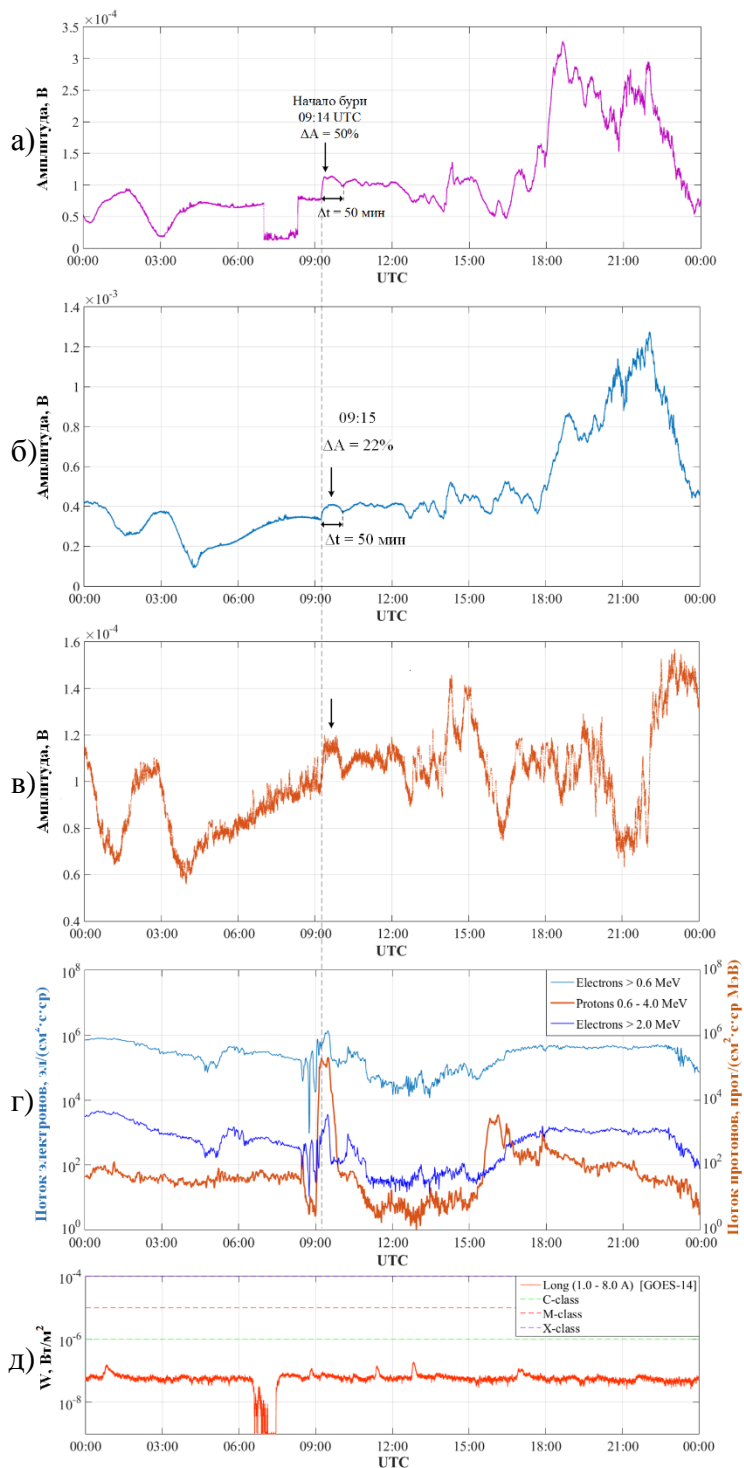


Рисунок 15 – Вариации амплитуды СДВ сигналов 05.04.2010 во время магнитной бури G3, п. Теплоэнергетик: а) 23.4 кГц; б) 18.3 кГц; в) 20.9 кГц; г) плотность потока электронов и протонов (GOES-11); д) мягкое рентгеновское излучение (GOES-14)

практически совпадают у FTA (20.9 кГц), HWU (21.75 кГц), ICV (20.27 кГц), для которых в основном наблюдается спад ночной амплитуды во время магнитных бурь, и находятся в противофазе с экстремумами амплитудных вариаций сигналов DHO (23.4 кГц) и HWU (18.3 кГц), для которых во время бурь наблюдается ночной рост. Из рисунка 12 следует, что в ночное время противофазные флуктуации амплитуды сигналов 21.75 кГц и 23.4 кГц сохраняются и для магнито-возмущенных условий распространения.

Таким образом, устойчивые закономерности роста амплитуды сигналов 23.4 кГц, 18.3 кГц и ее уменьшения у сигналов 20.9 кГц, 21.75 кГц во время геомагнитных бурь являются эффектами интерференции нормальных мод высших порядков.

На рисунке 16 показано, что во время бури (класс G2) 27-28 марта 2017 г. колебания амплитуды сигнала 23.4 кГц сопровождалась также заметными флуктуациями фазы порядка 1-3 радиана с периодичностью 125 – 140 мин. При этом характер изменений амплитуды и фазы практически одинаковый во всех разнесенных измерительных пунктах СДВ интерферометра.

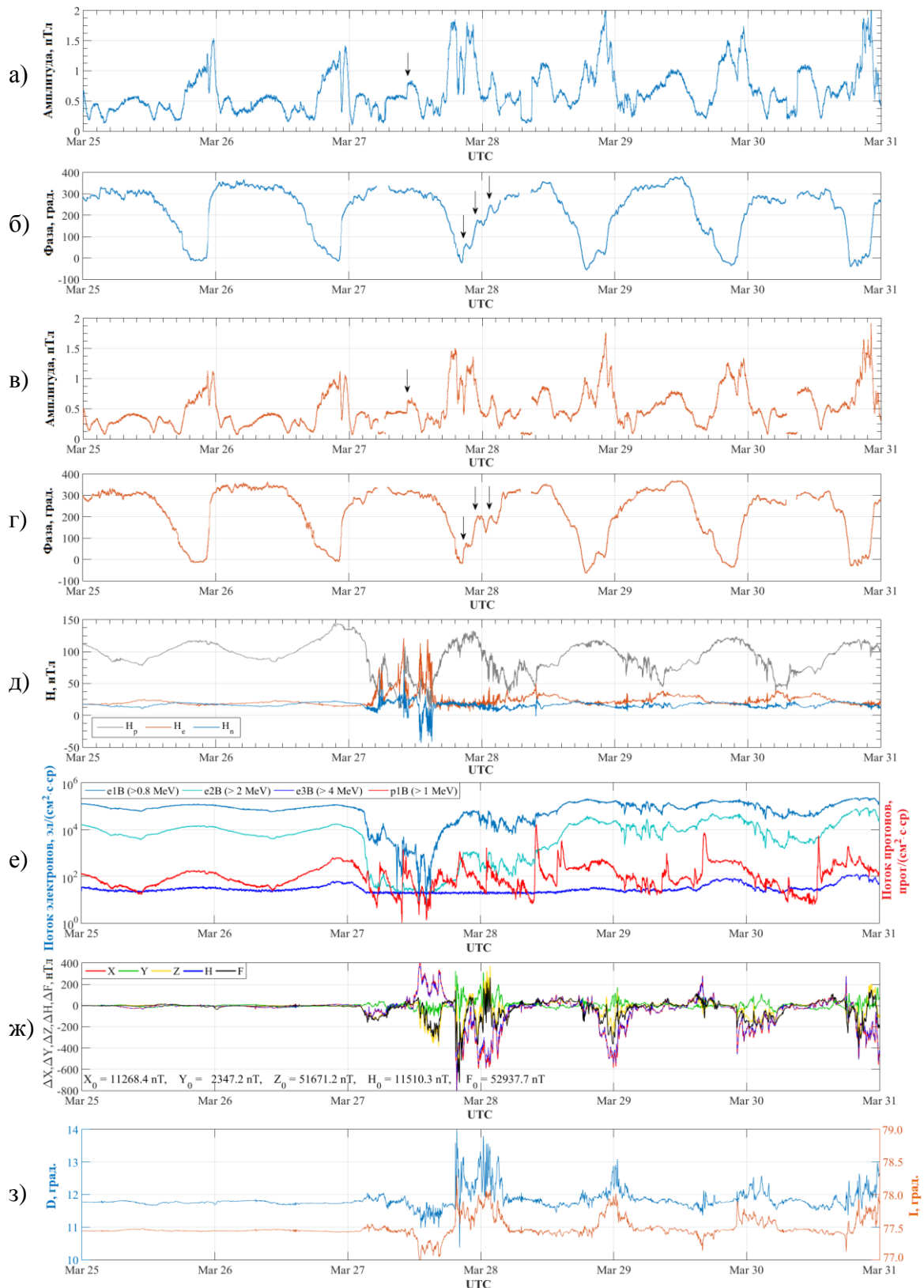


Рисунок 16 – Амплитудные и фазовые аномалии сигнала DHO (23.4 кГц) для бури 27–28 марта 2017 г.: амплитуда (а) и фаза (б) в п. Теплоэнергетик; амплитуда (в) и фаза (г) в п. Лесная поляна; д) компоненты геомагнитного поля $\{H_p, H_e, H_n\}$, спутник GOES-15; е) плотность потока электронов с энергиями более 0.8, 2, 4 МэВ и протонов с энергиями > 1 МэВ (детектор В, западное направление, GOES-15); ж) компоненты магнитного поля по данным обсерватории SOD сети INTERMAGNET; з) склонение D и наклонение I вектора F по данным станции SOD

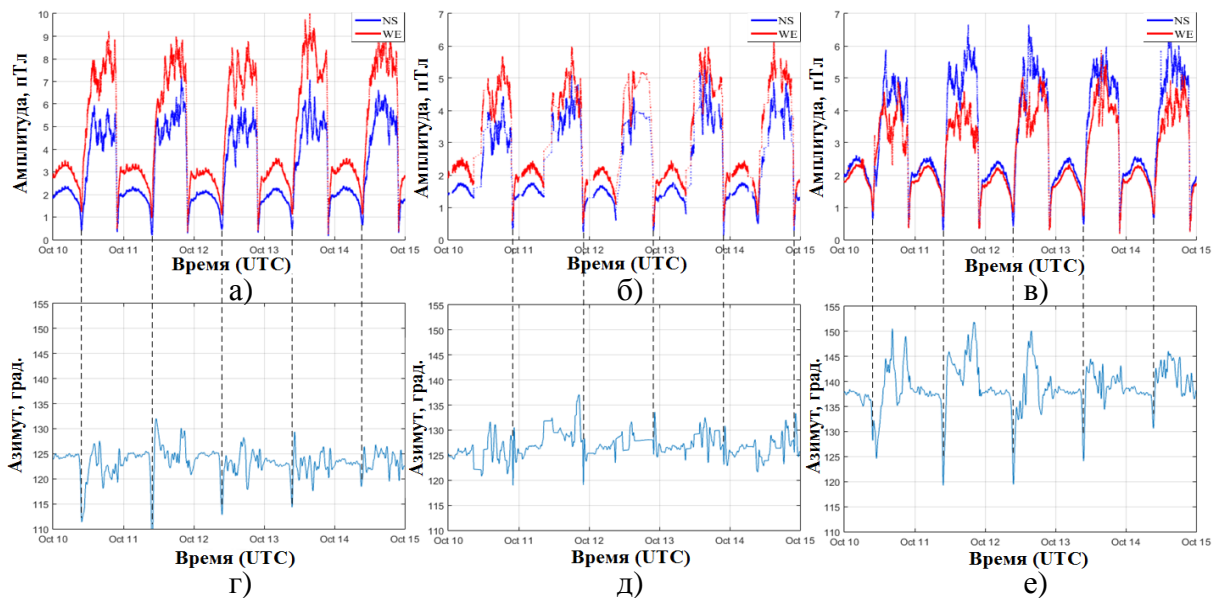


Рисунок 17 – Вариации амплитуды (а, б, в) и азимута (г, д, е) сигнала станции 24.1 кГц (без поправок на смещение антенн): Теплоэнергетик (а, г); Лесная поляна (б, д); Карлук (в, е)

В конце третьей главы рассматривается амплитудная и фазовая радиопеленгация ОНЧ передатчиков. Приводится методика определения азимутов трасс принимаемых сигналов. Ошибка пеленгации, возникающая из-за углового смещения плоскости и нестройкой ортогональности антенн, учитывается как

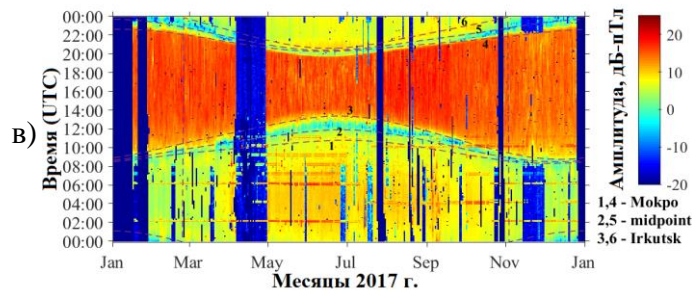
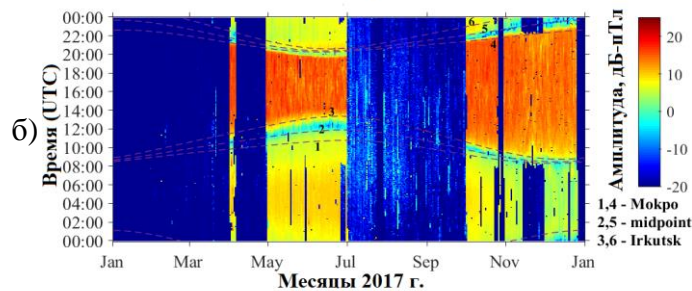
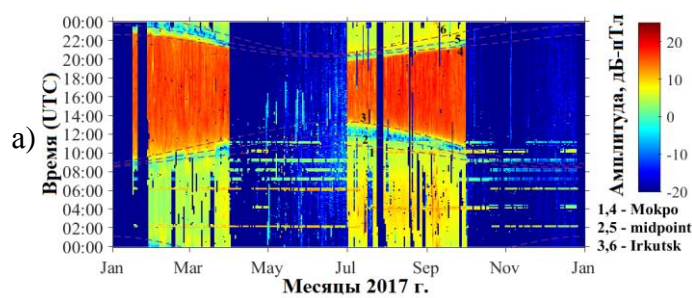


Рисунок 18 – Годовой ход амплитуды СДВ сигналов: а) 25.0 кГц; б) 24.1 кГц; в) сумма амплитуд сигналов 25.0 кГц и 24.1 кГц

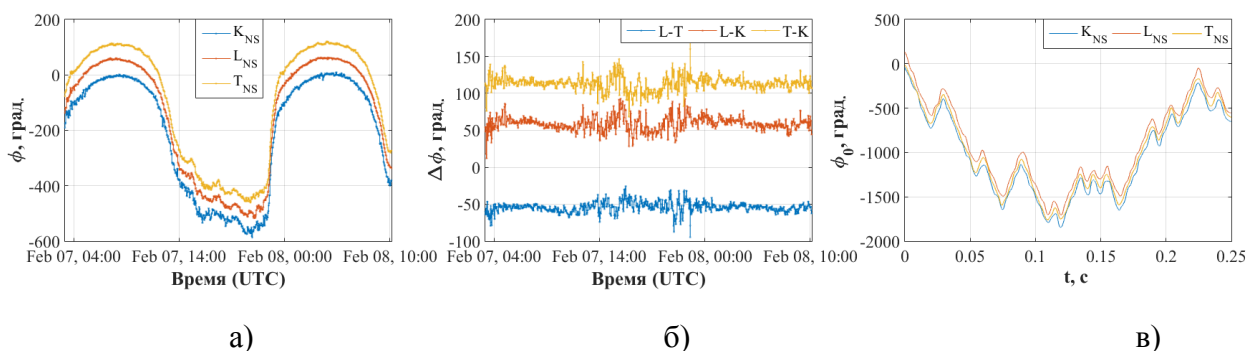
$$\varphi_2 - \varphi_1 = \arcsin \left[K'_1 \cos(\varphi_1 - \xi) \right] - \arcsin \left[K'_2 \cos(\varphi_2 - \xi) \right], \quad (4)$$

$$\varepsilon = (-1)^n \arcsin \left[K' \cos(\varphi - \xi) \right] + \varphi + \pi n, \quad n \in Z, \quad (5)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\sin \varepsilon + (\pm K') \cos \xi}{\cos \varepsilon - (\pm K') \sin \xi}, \quad (6)$$

где ε и ξ - углы смещения плоскости антенн; φ_1, φ_2 - углы прихода радиосигналов; K' - отношение амплитуд сигнала в рамках.

Совместное использование результатов радиопеленгации СДВ интерферометром (рисунок 17) и гелиогеофизических данных (рисунок 18) позволило установить, что рабочая частота сигнала 24.1 кГц, как и 25.0 кГц, принадлежит станции в г. Мокпхо (Республика Корея, азимут 130.056°). Пеленги на источник (соответственно 128.883° и 128.235°) согласуются с



а) K_{NS} – Карлук (антенна NS); T_{NS} – Теплоэнергетик (NS); L_{NS} – Лесная поляна (NS)
 Рисунок 19 – Результаты синхронных измерений фазы 19.8 кГц сигнала станции NWC:
 а) суточный ход фазы 7-8 февраля 2017; б) разность показаний разнесенных СДВ приемников; в) закон изменения начальной фазы центральной частоты модулированного MSK сигнала – одна и та же двоичная комбинация, зарегистрированная приемниками интерферометра

данными о движении солнечного терминатора и подтверждаются анализом годовых вариаций амплитуды сигналов (рисунок 18-в), а также характером амплитудных аномалий (рисунок 13-г) во время солнечных вспышек в дневное в азиатском регионе время. Разработанная методика оценки углов смещения каждой приемной антенны интерферометра позволила заметно уменьшить ошибки амплитудной радиопеленгации (до 2–5 градусов). Фазовая пеленгация (рисунок 19) показала точность оценки азимута порядка 1–1.5 градуса для станции NWC (19.8 кГц), удаленной от приемников более чем на 8200 км.

В заключении диссертации сформулированы основные выводы и кратко описаны полученные результаты диссертационной работы:

1. *Разработан* аппаратно-программный комплекс для проведения долговременных синхронных измерений амплитуды и фазы сверхдлинных радиоволн, распространяющихся в волноводе Земля-ионосфера. *Показано*, что несовпадение начальных фаз ОНЧ радиоимпульсов при двухчастотном зондировании с разносом 100 Гц вызвано нестабильностью передатчиков.

2. *Обоснованы* новые методы демодуляции и оценки в условиях помех дрейфа фазы в волноводном канале Земля-ионосфера для сигналов с частотной манипуляцией (CPFSK, MSK, GMSK). Особенностью методов является раздельное когерентное детектирование логических нулей и единиц информации. *Доказана* работоспособность предложенных методов путем моделирования сигналов с фазовыми искажениями, а также при помощи сравнения с результатами измерений, полученными известными методами.

3. *Выполнен* анализ данных долговременных наблюдений за состоянием спокойной и магнитно-возмущенной среднеширотной ионосферы. Полученные результаты подтверждают работоспособность и метрологические характеристики измерительного комплекса, доказывают эффективность предложенных методик обработки сигналов. При помощи накопленной базы экспериментальных данных исследованы закономерности процессов в нижних слоях среднеширотной ионосферы: объяснен предрассветный рост амплитуды сигналов, определена граница проникновения магнитосферных протонов в D слой, рассмотрены флуктуации параметров сигналов во время геомагнитных бурь.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Публикации в изданиях, включенных в Перечень ВАК или приравненных к ним:

1. **Полетаев А.С., Ченский А.Г., Григорьев К.А.** Мониторинг нижней ионосферы методом наклонного зондирования СДВ радиосигналами // Вестник ИрГТУ. – 2012. – № 10 (69). – С. 203-211.
2. **Poletaev A.S., Bezrukin A.G., Chenskii A.G., Zasenko V.E., Gubin N.A.** A Synchronization System of Very Low Frequency Interferometers // Instruments and Experimental Techniques, 2014. Vol. 57, No. 5, pp. 587–593.
3. **Патент на изобретение №2522854** РФ, МПК H03D 3/02. Способ демодуляции сигналов с минимальной частотной манипуляцией и устройство для его осуществления / Засенко В.Е., Полетаев А.С., Ченский А.Г.; заявитель и патентообладатель ИРННТУ. – №2013104773/08; заявл. 04.02.2013; опубл. 20.07.2014, Бюл. №20. – 17 с.
4. **Патент на изобретение №2524673** РФ, МПК H04L 27/10. Способ измерения вариаций фазового сдвига центральной частоты сигналов с минимальной частотной манипуляцией и устройство для его осуществления / Засенко В.Е., Полетаев А.С., Ченский А.Г.; заявитель и патентообладатель ИРННТУ. – №2013110631/07; заявл. 07.03.2013; опубл. 10.08.2014, Бюл. №22. – 24 с.
5. **Poletaev A., Chensky A., Grigorev K.** Software of the system for long-term ionospheric monitoring in very low frequency range // International Siberian Conference on Control and Communications. – Omsk, May 21-23, 2015.
6. **Свидетельство № 2015619500** о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа управления сбором данных и измерения параметров СДВ радиосигналов/ Полетаев А.С., Григорьев К.А., Ченский А.Г.; правообладатель ИРННТУ; заявл. 15.06.2015 №2015615068; дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 04.09.2015; опубл. 20.10.2015, Бюл. № 10.
7. **Дамдинова Д.Б., Полетаев А.С., Ченский А.Г.** Сравнение точности методов вычисления разности фаз квазигармонических сигналов // Вестник СибГУТИ. – 2017. – №2. – С. 87-97.
8. **Poletaev A.S., Chensky A.G., Tokmachev D.A.** A Method for Central Frequency Phase Variations Measurements of GMSK Modulated Signals // XIV International scientific-technical conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, 2018. Vol. 1. Part 3. pp. 101–104. Novosibirsk, October 2 – 6, 2018.
9. **Yadrennikova O.V., Poletaev A.S., Chensky A.G.** Influence of Solar Flares on VLF Radio Waves Propagation over JJI – Irkutsk Path // XIV International scientific-technical conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, 2018. Vol. 1. Part 3. pp. 137–140. Novosibirsk, October 2 – 6, 2018.

Публикации в сборниках конференций и других изданиях:

10. **Ченский А.Г., Григорьев К.А., Полетаев А.С.** Особенности изменения параметров СДВ радиосигналов под воздействием терминатора. В сб.: Современные проблемы радиоэлектроники и связи: мат-лы IX Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Иркутск: изд-во ИрГТУ, 2010. – 280 с. – С. 241-247.

11. **Полетаев А.С.** Программа для обработки экспериментальных данных сигнальной информации сверхдлинноволновых передатчиков // Молодежный вестник ИрГТУ. – 2011. – №1 (март).
12. **Полетаев А.С., Григорьев К.А.** Мониторинг нижней ионосферы в СДВ диапазоне с помощью виртуального приемника в LabVIEW. В сб.: Инженерные и научные приложения на базе технологий National Instruments – 2012. Сборник трудов XI международной научно-практической конференции – М.: ДМК-пресс, 2012. – Москва, 6 – 7 декабря 2012 г. – 504 с. – С. 458-460.
13. **Полетаев А.С., Ченский А.Г., Токмачев Д.А.** Мониторинг ионосферных возмущений когерентными сигналами СДВ радиостанций. В сб.: Взаимодействие полей и излучения с веществом. Сборник трудов XIII конф. молодых ученых. – Иркутск, 9 – 14 сентября 2013. – 361 с. – С. 198-202.
14. **Полетаев А.С., Ченский А.Г., Токмачев Д.А.** Интерферометрические измерения параметров сверхдлинноволновых радиосигналов // XXIV Всероссийская научная конференция "Распространение радиоволн", Иркутск, 29 июня – 5 июля 2014 г. – Т. I. – С. 276-279.
15. **Полетаев А.С., Ченский А.Г., Токмачев Д.А.** Регистрация вариаций амплитуды и фазы сигналов навигационных СДВ передатчиков. В сб.: Взаимодействие полей и излучения с веществом. Сборник трудов XIV Конференции молодых ученых. – Иркутск, 14–18 сентября 2015. – С. 252-255.
16. **Полетаев А.С., Ченский А.Г., Токмачев Д.А.** Дистанционная диагностика ионосферы методом наклонного зондирования СДВ радиосигналами. В сб.: «Динамические процессы в геосферах». Сб. тезисов докладов Школы молодых ученых. – Институт динамики геосфер, Москва, 15 июня 2015. – С. 93-94.
17. **Полетаев А.С.** Обработка и статистический анализ экспериментальных данных наклонного зондирования ионосферы в СДВ-ДВ диапазоне. В сб.: Труд XIV международной научно-практической конференции NIDays-2015, Москва 27 ноября 2015 г. – М.: ДМК-пресс, 2015. – С. 320-323.
18. **Дамдинова Д.Б., Полетаев А.С., Ченский А.Г.** Сравнительный анализ методов оценки разности фаз квазигармонических сигналов. В сб.: Современные проблемы радиоэлектроники и связи: мат-лы XIV Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых / под. ред. А.И. Агарышева, Е.М. Фискина. –Иркутск: изд-во ИРНИТУ, 19 мая 2016. – С. 33-37.
19. **Полетаев А.С., Ченский А.Г.** Радиопеленгация ОНЧ передатчиков по данным сверхдлинноволнового интерферометра. В сб.: Современные проблемы радиоэлектроники: мат-лы XXI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием / под. ред. А.И. Громько. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 3 – 4 мая 2018. – 526 с. – С. 32-36.
20. **Полетаев А.С., Ченский А.Г., Токмачев Д.А.** Приемный тракт сверхдлинноволнового интерферометра // Датчики и системы. – 2018. – № 6 (226). – С. 51–60.
21. **Полетаев А.С., Ченский А.Г.** Вариации параметров СДВ радиосигналов во время серий солнечных вспышек в сентябре 2017 г. В сб.: Взаимодействие полей и излучения с веществом. Сборник трудов XVI Конференции молодых ученых. – Иркутск, 16–21 сентября 2019. – С. 363-366.

Полетаев Александр Сергеевич
Когерентное детектирование СДВ радиосигналов,
распространяющихся в волноводе Земля – ионосфера.
Автореф. дисс. на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук.

Подписано в печать 18.10.2019. Формат 60×90 / 16.
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 1,5.
Тираж 100 экз. Зак.214. Поз. плана 2н.

Отпечатано в издательстве
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет»
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83