

Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера
Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный
исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения
Российской академии наук»
(ИКФИА СО РАН)

На правах рукописи



Корсаков Алексей Анатольевич

**ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ОНЧ-РАДИОСИГНАЛОВ ПРИ
РАСПРОСТРАНЕНИИ В ВОЛНОВОДЕ ЗЕМЛЯ – ИОНОСФЕРА НАД
ТЕРРИТОРИЕЙ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ
СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ**

1.6.18 – Науки об атмосфере и климате

диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
канд. физ. – мат. наук, с.н.с.,
Козлов Владимир Ильич

Якутск – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
ГЛАВА 1. Применение электромагнитных волн ОНЧ-диапазона в исследовании верхней атмосферы Земли	16
1.1 Основные свойства ионосферы Земли.....	16
1.2 Электромагнитные волны диапазона ОНЧ в волноводе Земля – ионосфера.....	22
1.3 Радиотехническая система дальней навигации РСДН-20 («Альфа»).....	24
1.4 Основы теории распространения электромагнитного излучения диапазона ОНЧ в волноводе Земля – ионосфера.....	26
1.4.1 Отражение электромагнитного ОНЧ-излучения от ионосферы.....	26
1.4.2 Описание распространения радиоволн приближением геометрической оптики.....	29
1.4.3 Метод нормальных волн.....	32
1.5 Источники возмущения нижней ионосферы.....	38
1.6 Модели нижней ионосферы.....	44
1.7 Системы регистрации ОНЧ-сигналов.....	48
1.7.1 Наземные системы регистрации вариаций параметров ОНЧ-радиосигналов.....	48
1.7.2 Регистрация ОНЧ-радиосигналов на спутниках.....	57
1.8. Основные выводы к главе 1.....	58
ГЛАВА 2. Регистратор амплитуды и фазы сигналов радиопередатчиков и мощности радиошума ОНЧ-диапазона	61
2.1 Алгоритм работы программы регистрации.....	63
2.2. Результаты работы приемника-регистратора.....	70
2.3. Амплитудная калибровка регистрирующего комплекса в г. Якутске....	85
2.4 Основные выводы к главе 2.....	90

ГЛАВА 3. Суточные, сезонные и межгодовые вариации амплитуды и фазы радиосигналов РСДН-20, и мощности радиошума при регистрации в Якутске.....	92
3.1 Суточные и сезонные вариации амплитуды и фазы радиосигналов РСДН-20 при регистрации в Якутске.....	93
3.2. Суточные и сезонные вариации мощности радиошума при регистрации в Якутске.....	105
3.3. Межгодовые вариации амплитуды и фазы радиосигналов РСДН-20, и мощности радиошума при регистрации в Якутске в 24-м цикле солнечной активности.....	109
3.4. Оценка межгодового изменения летней грозовой активности Северной Азии в период 24-го цикла солнечной активности.....	113
3.5 Основные выводы к главе 3.....	117
ГЛАВА 4. Эффекты рентгеновских солнечных вспышек в вариациях фазы ОНЧ-сигналов радиостанций.....	120
4.1 Зависимость внезапных фазовых аномалий от интенсивности потока рентгеновского излучения Солнца.....	122
4.2. Внезапные фазовые аномалии при регистрации ОНЧ-сигналов радиостанций в 24-м цикле солнечной активности.....	125
4.3. Изменение эффективной высоты волновода Земля – ионосфера во время внезапных ионосферных возмущений.....	141
4.4. Оценки интенсивности потока рентгеновского излучения по внезапным фазовым аномалиям радиосигналов ОНЧ-передатчиков.....	149
4.5. Основные выводы к главе 4.....	154
ГЛАВА 5. Эффекты солнечных затмений в вариациях амплитуды и фазы ОНЧ-сигналов радиостанций.....	157
5.1. Вариации амплитуды и фазы сигналов ОНЧ-радиостанций в период солнечного затмения.....	157
5.2. Изменение эффективной высоты волновода Земля – ионосфера во время солнечных затмений.....	164

5.3. Оценка изменения эффективной высоты волновода Земля – ионосфера при переходе от дня к ночи.....	174
5.4. Основные выводы к главе 5.....	175
Заключение.....	177
Список сокращений.....	179
Список литературы.....	183

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

Верхняя атмосфера, ионосфера и магнитосфера Земли формируют пространство, физическое состояние которого определяется солнечной и геомагнитной активностью, объединяющейся под общим термином «космическая погода» [Жеребцов, 2020]. Космическая погода оказывает воздействие на технологические системы. Высокая солнечная активность может приводить к изменению свойств нейтральной атмосферы на высотах выше 100 км, что подтверждается при анализе данных по торможению космических аппаратов [Khodairy et al., 2020]. Для поддержания стабильной работы радиотехнических систем необходимо отслеживать и прогнозировать параметры ионосферы [Пилипенко, 2021]. Активно развивается моделирование ионосферы [Toth et al., 2005; Ботова, Романовская, Намгаладзе, 2014; Verronen et al., 2016]. Результаты многих моделей ионосферы не проходили проверку на соответствие с экспериментальными данными в широком диапазоне радиочастот [Козлов, Ляхов, Беккер, 2014]. Одним из направлений по совершенствованию моделирования ионосферы является проведение экспериментов при различных условиях.

Недостатком прямых методов исследования ионосферы [Долуханов, 1972] является локальный характер и малая продолжительность.

В косвенных методах исследования параметры ионосферы оцениваются при анализе параметров зондирующих сигналов (обычно радиосигналов), провзаимодействовавших с ионосферой. Методы вертикального [Брюнелли, Намгаладзе, 1988; Жеребцов и др., 2021] и наклонного зондирования ионосферы [Иванов, Рябова, Шумаев, 1998; Heitmann A.J. et al., 2018], прием сигналов от глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) [Afraimovich et al., 2013; Temens, Jayachandran, Langley, 2015; Ясюкевич, Веснин, Перевалова, 2018] не позволяют зондировать нижнюю часть области D ионосферы. Риометрические методы [Kero et al., 2007; McKay et al., 2015] не позволяют проводить

исследования в труднодоступных местах. Для применения метода частичных отражений [Терещенко и др., 2003] необходимы большие площади для размещения антенных установок. Метод некогерентного рассеяния [Алсаткин, Медведев, Ратовский, 2015; Медведев и др., 2020] требует больших финансовых затрат, особенно при размещении установок для проведения исследований в труднодоступных местах.

Ослабление радиоволн диапазона очень низких частот (ОНЧ: 3 – 30 кГц), распространяющихся в волноводе Земля – ионосфера, составляет всего около 3 дБ/Мм, что позволяет радиоволнам распространяться на тысячи километров от источника излучения [Marshall, Wallace, Turbe, 2017]. Нижней границей волновода для волн ОНЧ и низких частот (НЧ: 30 – 300 кГц) является водная или земная поверхность, верхней границей служат области ионосферы D (днем) и E (ночью). Регистрация параметров ОНЧ-НЧ-сигналов позволяет проводить мониторинг нижней ионосферы. Чувствительность ОНЧ-НЧ-радиоволн к геофизическим проявлениям зависит от географического расположения излучателя и приемника, направления распространения сигнала (относительно магнитного поля Земли), его частоты, протяженности радиотрассы [Альперт, 1972]. Регистрация естественных ОНЧ-сигналов позволяет проводить мониторинг грозовой активности [Lay et al., 2004; Rodger, Brundell, Dowden, 2005; Tarabukina, Kozlov, 2020; Holzworth et al., 2021], оценивать параметры магнитосферной плазмы [Lichtenberger et al., 2008; Каримов, Лихтенбергер, 2021]. Часто возникает неоднозначность интерпретации регистрируемых вариаций параметров сигнала: связаны эти вариации с изменением параметров источника, либо с изменением параметров волновода Земля – ионосфера. Неоднозначность можно исключить, принимая эталонные ОНЧ-радиосигналы со схожих радиотрасс. Источником эталонных сигналов могут использоваться ОНЧ-радиопередатчики, применяемые в системах дальней навигации и передачи точного времени. Решая обратную задачу распространения ОНЧ, можно переходить к определению параметров нижней ионосферы [Макаров, Новиков, Рыбачек, 1994]. Такой мониторинг может выполняться на разных временных и пространственных масштабах. Относительно

малые затраты на изготовление синхронизируемых ОНЧ-НЧ-приемников, возможность охвата больших территорий сетью радиотрасс, делают регистрацию вариаций параметров ОНЧ-НЧ-сигналов удобным инструментом для зондирования нижней ионосферы над труднодоступными территориями. Зондирование над такими территориями проводилось в ограниченном объеме.

Остаются **актуальными** описание и объяснение процессов в ионосфере, обусловленных как возмущениями в нейтральной атмосфере, так и воздействием из космоса. Проблемы, возникающие при изучении, реализации методов прогнозирования состояния нижней ионосферы, указывают на необходимость мониторинга больших территорий с высоким разрешением по времени.

Объектом исследования является нижняя ионосфера: области D и E.

Предметом исследования являются вариации мощности радиошума, амплитуды и фазы сигналов радиопередатчиков диапазона ОНЧ (3 – 30 кГц), регистрируемые при распространении в волноводе Земля-ионосфера.

Целью диссертационной работы является проведение сравнительного анализа вариаций мощности радиошума, амплитуды и фазы сигналов радиопередатчиков диапазона ОНЧ (3 – 30 кГц), регистрируемых в спокойных и возмущенных условиях нижней ионосферы Северной Евразии; проведение анализа вариаций эффективной высоты волновода Земля – ионосфера над Северной Евразией во время солнечных вспышек и затмений.

Для достижения цели поставлены и решены **задачи**:

1. Разработать метод выделения амплитуды и фазы сигналов радионавигационных передатчиков и мощности радиошума диапазона ОНЧ.
2. Создать приемник ОНЧ-радиосигналов для мониторинга нижней ионосферы.
3. Получить суточные, сезонные и межгодовые вариации мощности радиошума, амплитуды и фазы радиосигналов передатчиков ОНЧ-диапазона.
4. Провести адаптацию параметров линейной регрессионной модели внезапных фазовых аномалий ОНЧ-сигналов на радиотрассах Северной Евразии.

5. По регистрируемым фазовым вариациям ОНЧ-радиосигналов во время солнечных вспышек и затмений провести переход к изменению эффективной высоты волновода Земля – ионосфера.

Научная новизна работы

1. Разработана методика выделения мощности радишума, амплитуды и фазы радиосигналов на рабочих частотах РСДН-20. Новизна методики состоит в том, что в периоды паузы между излучением радиоимпульсов передатчиков в соответствии с режимом работы РСДН-20 регистрируется мощность радишума в узкой полосе (эффективная полоса 334,8 Гц) на частотах 11,904, 12,649 и 14,881 кГц. Методика позволяет проводить исследования особенностей распространения ОНЧ-радиоволн природного и техногенного происхождения в спокойных и возмущенных условиях ионосферы.

2. Впервые, на основе длительной регистрации в узкой полосе частот как амплитуды и фазы сигналов радиостанций, так и мощности радишума на рабочих частотах РСДН-20, получены летние межгодовые вариации интенсивности источников грозовых ОНЧ-радишумов в Северной Азии в 24-м цикле солнечной активности (2009-2017 гг.).

3. Впервые получено, что при внезапных ионосферных возмущениях на ОНЧ-радиотрассах Северной Евразии в течение относительно слабого 24-го цикла солнечной активности, минимальное понижение эффективной высоты волновода Земля – ионосфера регистрируется зимой в период максимума солнечной активности.

4. Впервые по регистрируемым вариациям фазы ОНЧ-радиосигналов во время солнечных затмений определены значения нормировочных коэффициентов, связывающих изменение эффективной высоты волновода Земля-ионосфера на радиотрассах Северной Евразии и изменение потока ионизирующего излучения Солнца.

Теоретическая и практическая значимость

Исследовано влияние среднеширотной и субавроральной нижней ионосферы на распространение ОНЧ-радиоволн в Северной Евразии на фоне

возрастания, максимума и спада 24 цикла солнечной активности. Экспериментальные данные могут быть полезны для комплексного анализа, корректировки эмпирических моделей нижних областей ионосферы. Результаты исследований могут использоваться для развития систем дальней радионавигации и мониторинга грозовой активности.

Методология и методы исследования:

– Результаты работы основаны на проведении долговременных экспериментальных измерений, сравнительном анализе независимых методов дистанционного мониторинга нижней ионосферы.

– Применяются одни из наиболее эффективных методов диагностики D и E областей ионосферы: одновременная регистрация вариаций мощности радишума, амплитуды и фазы сигналов радиопередатчиков ОНЧ-диапазона.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработана методика выделения мощности радишума, амплитуды и фазы радиосигналов на рабочих частотах РСДН-20. Особенность методики состоит в том, что в периоды паузы между излучением радиоимпульсов передатчиков в соответствии с режимом работы РСДН-20 регистрируется мощность радишума в узкой полосе частот.

2. С учетом вариаций функции распространения радиосигналов на частотах 11,904 и 14,881 кГц получено, что интенсивность грозовой активности в Северной Азии летом с 2009 по 2017 гг. возросла в 2,5 раза днем и от 1,5 до 2,5 раз ночью.

3. На основе адаптации параметров регрессионной модели внезапных фазовых аномалий ОНЧ-сигналов показано, что в зимний период понижение эффективной высоты волновода Земля – ионосфера на радиотрассах Северной Евразии при внезапных ионосферных возмущениях достигает меньших значений в максимуме цикла солнечной активности.

4. По вариациям фазы ОНЧ-радиосигналов во время солнечных затмений на радиотрассах Северной Евразии получены коэффициенты связи

изменения эффективной высоты волновода Земля-ионосфера с изменением потока ионизирующего излучения Солнца.

Достоверность результатов исследования

- обеспечена применением стандартных методов цифровой и статистической обработки сигналов;
- обусловлена применением сертифицированного оборудования при сборке, отладке и калибровке ОНЧ-приемников;
- достигнута статистической повторяемостью экспериментальных результатов с применением сравнительного анализа опубликованных результатов других авторов.

Личный вклад автора

Автор принимал непосредственное участие в разработке, отладке программного обеспечения, снятии характеристик и установке аппаратных комплексов в составе ОНЧ-регистраторов. Получение длинного ряда экспериментальных данных и его первичная обработка выполнялись преимущественно автором. Диссертант активно участвовал в систематизации и интерпретации экспериментальных данных ОНЧ-регистраторов Якутск, Улан-Удэ и ПГО ИКФИА СО РАН (Тикси), в формировании выводов проводимого исследования, их апробации и подготовке научных статей.

Реализация результатов работы

Результаты исследования были использованы при решении научно-исследовательских задач лаборатории радиоизлучений ионосферы и магнитосферы Института космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера Сибирского отделения Российской академии наук - обособленного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ИКФИА СО РАН).

Апробация результатов

Основные результаты диссертационного исследования были представлены автором лично на семинарах ИКФИА СО РАН, 20 международных, 5 всероссийских и 2 региональных конференциях:

Международная конференция «Взаимодействие полей и излучения с веществом» в рамках работы Байкальской школы по фундаментальной физике (БШФФ) (г. Иркутск, 2011, 2013, 2015, 2017 гг.);

Международная школа молодых ученых «Физика окружающей среды» им. А.Г. Колесника (г. Томск, 2012, 2014 гг.);

40th COSPAR Scientific Assembly (г. Москва, 2014 г.);

Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (г. Новосибирск, 2014 г., г. Иркутск, 2017 г., г. Томск, 2018 г., г. Москва, 2020, 2021 гг., г. Томск, 2022 г.);

Международный симпозиум «Атмосферная радиация и динамика» (МСАРД – 2015) (г. Санкт-Петербург, 2015 г.);

Международная научная конференция «Излучение и рассеяние электромагнитных волн» ИРЭМВ-2015 (с. Дивноморское, 2015 г.);

13th Russian-Chinese Conference on Space Weather (Yakutsk, Russia, 2016);

Международная конференция «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений» (с. Паратунка, 2017, 2020 гг.);

Международная конференция по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды: ENVIROMIS-2018 (г. Томск, 2018 г.);

Международная конференция «Целостность и ресурс в экстремальных условиях» ЦРЭУ – 2019 (ПЛЕЕ 2019), посвященная 70-летию Якутского научного центра (г. Якутск, 2019 г.);

Всероссийская конференция «Космические лучи и гелиосфера», посвященная 50-летию ИКФИА СО РАН (г. Якутск 2012 г.);

V Всероссийская научно-практическая конференция «Информационные технологии в науке, образовании и экономике» (с международным участием) (г. Якутск, 2014 г.);

Всероссийская конференция (с международным участием) «Оптические исследования высокоширотной верхней атмосферы» (г. Якутск, 2019 г.);

Всероссийский симпозиум по космическим лучам, посвященный 100-летию А.И. Кузьмина и 75-летию станции космических лучей №1 (г. Якутск, 2022 г.);

Всероссийская конференция с международным участием «Динамические процессы в средней и верхней атмосфере» (Якутск, 2024 г.);

Вторая региональная летняя научная школа молодых ученых-космофизиков, посвященная 50-летию радиофизических наблюдений на полигоне «Ойбенкель» (г. Якутск, 2022 г.);

III Летняя научная школа молодых ученых-космофизиков, посвященная 50-летию Якутской комплексной установки ШАЛ (г. Якутск, 2023 г.).

Публикации по теме диссертации

13 работ опубликовано в рецензируемых журналах, 9 из которых индексируются в научных изданиях из Перечня ВАК (категории К1-К2), 7 из которых индексируются в базах Web of Science и Scopus; 14 работ опубликовано в сборниках международных и всероссийских научных конференций и других изданиях, 8 из которых индексируются в базах Web of Science и Scopus. Получены 1 свидетельство о государственной регистрации базы данных и 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура диссертации

Работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка сокращений и списка литературы. Диссертация изложена на 212 страницах, включает в себя 48 рисунков, 22 таблицы и 233 библиографических ссылки.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, описаны новизна, научная и практическая значимость и защищаемые положения.

Первая глава посвящена литературному обзору, обоснованию актуальности и выбранной методики исследования. Рассмотрены основные

свойства нейтральной атмосферы и ионосферы Земли. Представлены источники радиоизлучения диапазонов ОНЧ и НЧ. Описан алгоритм работы отечественной радиотехнической системы дальней навигации РСДН-20 («Альфа»). Рассмотрены основы теории распространения электромагнитного ОНЧ-излучения в волноводе Земля – ионосфера. Представлены источники возмущения нижней ионосферы, регистрируемые в вариациях параметров ОНЧ-НЧ-сигналов. Рассмотрены модели нижней ионосферы. Рассмотрены системы регистрации ОНЧ-сигналов.

Вторая глава посвящена описанию работы регистратора амплитуды и фазы сигналов радиопередатчиков и мощности радиошума ОНЧ-диапазона. Описан алгоритм работы программы регистрации. Проведен анализ амплитудных распределений сигналов радиостанций и радиошума, регистрируемых в Якутске летом и зимой. Проанализированы суточные вариации амплитуды и фазы сигналов РСДН-20 и радиошума. Представлены результаты амплитудной калибровки.

Третья глава посвящена анализу суточных, сезонных и межгодовых вариаций амплитуды и фазы радиосигналов РСДН-20, и мощности радиошума при регистрации в Якутске. Показано, что регистрируемые в Якутске ОНЧ-радиошумы распространяются по сходным трассам, что и сигналы от передатчиков Новосибирск и Хабаровск. С учетом суточных и межгодовых вариаций функции распространения в Северной Азии получены оценки суточных вариаций мощности радиошума при максимуме гроз (июль 3 – 12 UT) и межгодового (с 2009 по 2017 гг.) нарастания мощности радиошума на частотах 11,904 и 14,881 кГц от грозных источников в летний период днем и ночью.

Четвертая глава посвящена анализу эффектов рентгеновских солнечных вспышек в вариациях фазы ОНЧ-сигналов радиостанций. Для радиотрасс Северной Евразии (Краснодар – Якутск, Краснодар – Тикси, Новосибирск – Якутск, Новосибирск – Тикси, Хабаровск – Якутск и Хабаровск – Тикси) на частоте 11,904 кГц проведена адаптация параметров зависимости внезапных фазовых аномалий (ВФА) от интенсивности потока рентгеновского излучения Солнца. Проведен анализ ВФА при регистрации ОНЧ-сигналов в Якутске в 24-м

цикле СА. Проанализированы изменения эффективной высоты волновода Земля – ионосфера во время ВФА. По данным ВФА сигналов РСДН-20 при регистрации в Якутске проведена оценка интенсивности потока рентгеновского излучения Солнца во время вспышек, при дневных условиях распространения ОНЧ.

Пятая глава посвящена анализу эффектов солнечных затмений в вариациях амплитуды и фазы ОНЧ-сигналов радиостанций. По значениям бесселевых элементов солнечных затмений 04.01.2011 и 20.03.2015 вдоль трасс Краснодар – Якутск и Краснодар – Улан-Удэ с разрешением по трассе 0,2 Мм и по времени 3 минуты по данным о вариациях фазы радиосигнала на частотах 11,904 и 14,881 кГц определены значения нормировочного коэффициента для соответствующей протяженной радиотрассы. Получены оценки изменений эффективной высоты волновода вдоль радиотрасс Краснодар – Якутск и Краснодар – Улан-Удэ при максимальном затенении. Проведена оценка изменения эффективной высоты волновода Земля – ионосфера при переходе от дневных к полностью ночным условиям на радиотрассе.

В заключении представлены основные результаты и выводы.

Автор выражает благодарность научному руководителю к.ф.-м.н. Козлову Владимиру Ильичу за постановку задачи, постоянное внимание, обсуждение результатов, а также за ценные замечания при формировании выводов диссертационного исследования; к.ф.-м.н. Баишеву Д.Г. за проявленный интерес при обсуждении результатов работы; к.ф.-м.н. Каримову Р.Р. за помощь при разработке программного обеспечения для регистрации электромагнитных сигналов диапазона ОНЧ; сотрудникам Центра информационных технологий ИКФИА СО РАН: Неустроеву Н.И. за ценные замечания по обработке длинного ряда экспериментальных данных, за создание системы управления базой данных, Келлареву И.А. и Прошутинскому А.С. за рекомендации по установке и настройке программного обеспечения в составе ОНЧ-приемников-регистраторов; директору Физико-технического института СВФУ им. М.К. Аммосова, к.ф.-м.н. Николаеву Д.В., зав. кафедрой радиотехники, радиофизики ФТИ СВФУ им. М.К.

Аммосова в разные периоды: к.ф.-м.н. Мельчинову В.П. и к.т.н. Жебсаину В.В. за помощь в организации в г. Якутске длительной регистрации ОНЧ-радишума и сигналов радиопередатчиков; к.ф.-м.н. Торопову А.А., заведующему Полярной геокосмофизической обсерваторией ИКФИА СО РАН Хорошевскому Д.Ю., Матвиенко С.А. и Бандерову Е.А. за помощь в проведении длительной регистрации ОНЧ-радишума и сигналов радиопередатчиков в п. Тикси. Автор благодарен сотрудникам лаборатории электромагнитной диагностики ИФМ СО РАН за проведение регистрации ОНЧ-радишума и радиосигналов передатчиков на стационаре «Верхняя Березовка» (г. Улан-Удэ). Автор признателен к.ф.-м.н. Муллаярову В.А. и всем сотрудникам лаборатории радиоизлучений ионосферы и магнитосферы ИКФИА СО РАН за внимание и поддержку необходимые для выполнения диссертационной работы и реализации результатов исследования.

Работа выполнена в рамках государственного задания (номер госрегистрации № 122011700182-1), при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации бюджетной темы П.16.2.1. (номер госрегистрации № АААА-А17-117021450059-3); частично при финансовой поддержке РФФИ (№ 14-05-31056 мол_а, № 15-45-05005 р_восток_а) и Научно-образовательного фонда поддержки молодых ученых Республики Саха (Якутия): № 2014-01-0015.

ГЛАВА 1. Применение электромагнитных волн ОНЧ-диапазона в исследовании верхней атмосферы Земли

1.1 Основные свойства ионосферы Земли

Атмосфера характеризуется своим составом, температурой и концентрацией заряженных частиц. Эти параметры изменяются с высотой. Типичный высотный профиль температуры атмосферы представлен на рисунке 1.1.

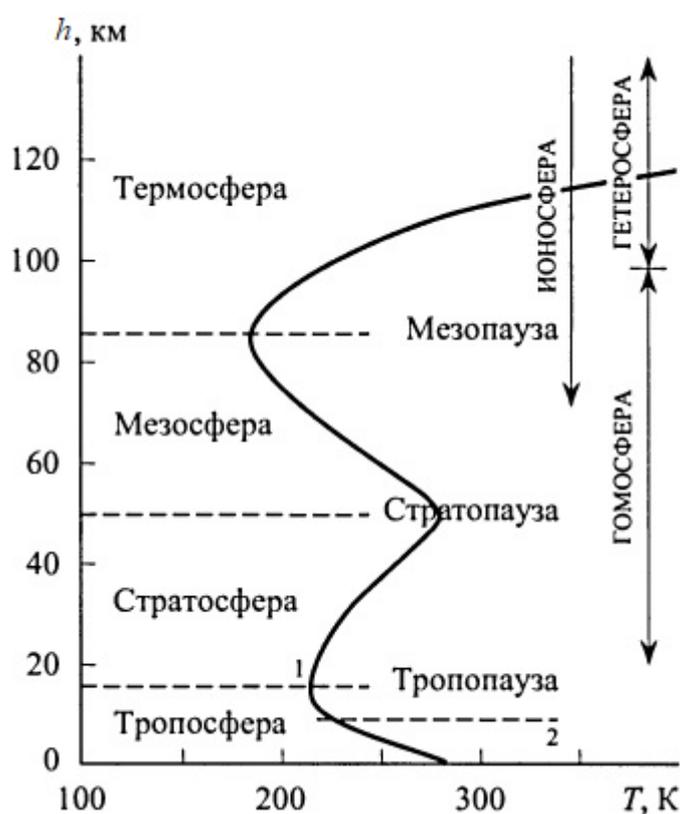


Рисунок 1.1 – Высотный профиль температуры атмосферы. 1 – экваториальная, 2 – полярная тропопаузы [Криволицкий, Куницын, 2007а]

Состав атмосферы от земной поверхности до высот 90 – 100 км остается квазипостоянным с фиксированной средней молярной массой 28,98 г/моль, так как турбулентное перемешивание преобладает над процессами диффузного разделения.

При гидростатическом приближении зависимость давления p и концентрации n молекул воздуха от высоты h можно представить с помощью барометрической формулы [Криволицкий, Куницын, 2007а]:

$$\begin{aligned} p(h) &= p_0 \exp\left(-\frac{h-h_0}{H}\right), \\ n(h) &= n_0 \exp\left(-\frac{h-h_0}{H}\right), \end{aligned} \quad (1.1)$$

где p_0 – давление и n_0 – концентрация молекул воздуха на начальном уровне h_0 (чаще выбирается уровень у поверхности Земли);

H – высота однородной атмосферы представляется выражением:

$$H = \frac{kT}{mg}, \quad (1.2)$$

где k – постоянная Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж·К⁻¹;

T – абсолютная температура газа (воздуха), К;

m – масса молекул газа (воздуха);

g – ускорение свободного падения.

Земля является эллипсоидом вращения, при этом планета вращается вокруг своей оси. Ускорение свободного падения g можно представить зависимостью от высоты h и географической широты Φ :

$$g(\Phi, h) = g_0 \left(\frac{R_0}{R(\Phi) + h} \right)^2, \quad (1.3)$$

где $g_0 = 9,78$ м/с² – ускорение свободного падения вблизи поверхности у экватора Земли;

R_0 – радиус Земли вблизи экватора;

$R(\Phi)$ – радиус Земли у географической широты Φ .

На средних широтах (при $\Phi \approx 45^\circ$) у поверхности Земли $g \approx 9,81$ м/с².

Параметры эмпирической модели атмосферы представлены в таблице 1.1 [Чемберлен, 1981].

Таблица 1.1 – Параметры эмпирической модели атмосферы

Высота h , км	Температура T , К	Концентрация N , см ⁻³	Средняя молекулярная масса, μ	Высота однородной атмосферы H , км	Ускорение свободного падения g , м/с ²
0	288	$2,547 \cdot 10^{19}$	28,96	8,434	9,807
10	223	$8,598 \cdot 10^{18}$	23,96	6,555	9,776
20	217	$1,849 \cdot 10^{18}$	28,96	6,382	9,745
30	227	$3,828 \cdot 10^{17}$	28,96	6,693	9,715
40	250	$8,308 \cdot 10^{16}$	28,96	7,421	9,684
50	271	$2,135 \cdot 10^{16}$	28,96	8,047	9,654
60	247	$6,439 \cdot 10^{15}$	28,96	7,368	9,624
70	220	$1,722 \cdot 10^{15}$	28,96	6,570	9,594
80	198	$3,838 \cdot 10^{14}$	28,96	5,962	9,564
85	189	$1,709 \cdot 10^{14}$	28,96	5,678	9,550
86	187	$1,447 \cdot 10^{14}$	28,95	5,621	9,547
90	187	$7,12 \cdot 10^{13}$	28,91	5,64	9,53
100	195	$1,19 \cdot 10^{13}$	28,40	6,01	9,51

В ионосфере Земли (ионизированной части атмосферы) свободные ионы и электроны существуют в условиях квазинейтральной плазмы. Одним из основных параметров ионосферы является концентрация свободных электронов N_e . В нижней ионосфере перенос плазмы мал, так что в стационарном состоянии ($\partial N_e / \partial t = 0$) среда находится в фотохимическом равновесии, в балансе ионизации и рекомбинации [Risbeth, Garriott, 1969]. Ионосфера располагается на высотах от 50 км до более чем 600 км. На высотах выше 1000 км преобладают ионы водорода (протоносфера). Ионосферу можно разделить на области в соответствии с концентрацией электронов, доминирующими источниками ионизации и другими ключевыми параметрами плазмы, меняющимися с высотой. Высотный профиль концентрации электронов N_e имеет суточные и сезонные вариации. Типичные для средних широт дневной и ночной высотные профили концентрации электронов представлены на рисунке 1.2 [Мигулин, 1987], где основные ионосферные области: D, E, F1 и F2.

Ионосферу по преобладающим физическим процессам условно делят на экваториальную, включающую низкие широты ($|\Phi'| \leq 30^\circ$), среднеширотную ($30^\circ \leq |\Phi'| \leq 50^\circ$), субавроральную ($50^\circ \leq |\Phi'| \leq 65^\circ$), авроральную ($65^\circ \leq |\Phi'| \leq 75^\circ$) и полярную ($|\Phi'| \geq 75^\circ$), где Φ' – геомагнитная широта [Брюнелли, Намгаладзе,

1988]. Положение и размеры субавроральной ионосферы, где расположен главный ионосферный провал, могут изменяться при изменении геомагнитной активности [Тащилин, 2014]. В авроральной ионосфере на распределение концентрации электронов оказывают влияние: высыпания из магнитосферы энергичных электронов и ионов; втекание из магнитосферы и отток в магнитосферу продольных токов, замыкающихся в нижней ионосфере горизонтальными поперечными токами Педерсена и Холла. В полярной ионосфере чаще всего возникают интенсивные и продолжительные возмущения [Жеребцов и др., 2021].

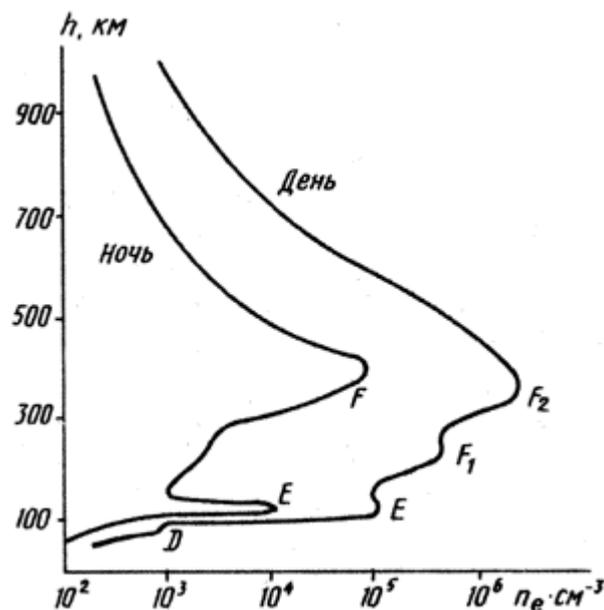


Рисунок 1.2 – Высотные профили концентрации электронов в дневное и ночное время на средних широтах [Мигулин, 1987]

В области E преобладают процессы ионизации молекул, основным процессом исчезновения электронов является рекомбинация с молекулярными ионами NO^+ и O_2^+ . Отрицательные ионы и процессы ионно-ионной рекомбинации редки. Появляются спорадические области E_s – тонкие ионизированные слои с повышенной концентрацией ионов металлов. Это явление возникает из-за ветрового сдвига в присутствии магнитного поля. Важным ионизирующим излучением области E является солнечная линия водорода Лайман- β ($L\beta$: $\lambda = 102,6$

нм), ультрафиолетовый спектр (с длиной волны λ менее 100 нм) и рентгеновские лучи (λ менее 1 нм). Ночью концентрация электронов области E быстро уменьшается из-за рекомбинации. В ночное время могут существовать два источника ионизации: электромагнитный – рассеянное излучение Лайман- α ($L\alpha$: $\lambda = 121,6$ нм), Лайман- β ; и корпускулярный (потoki электронов с энергиями 1 – 10 кэВ). Концентрации электронов при этом могут достигать $10^3 - 10^4$ см⁻³ [Криволуцкий, Куницын, 2007b].

Область D ионосферы расположена на высотах 50 – 90 км, концентрация электронов меняется в пределах 10 – 1000 эл/см³. Днем ионизация происходит за счет излучения от Солнца: Лайман- α , коротковолновым ультрафиолетовым (102,7 – 111,8 нм) и рентгеновским излучениями; высыпаниями заряженных частиц из радиационных поясов, а также космическими лучами. Поток Лайман- α ионизует оксид азота NO. Ультрафиолетовый спектр (102,7 – 111,8 нм) ионизирует возбужденные молекулы кислорода O₂ (1Δg). Рентгеновские лучи $\lambda \leq 1$ нм ионизируют все составляющие. Электроны образуются в основном из наиболее распространенных в этой области молекул O₂ и N₂. Высокоширотная ионосфера отличается от среднеширотной своей изменчивостью из-за вторжений корпускулярных потоков нерегулярного характера. В спокойных условиях скорости дневной ионизации за счет высыпающихся из радиационных поясов протонов и электронов меньше чем за счет ионизации молекул NO в линии L α . Однако при геомагнитных возмущениях высыпающиеся электроны уже с энергиями десятки кэВ вносят значительный вклад в ионизацию ночной области D и на средних широтах [Кошелев и др., 1983]. Вследствие сильных геомагнитных возмущений и солнечных протонных событий высыпания протонов и электронов могут быть значительным источником дневной ионизации даже среднеширотной нижней ионосферы [Криволуцкий, Репнев, 2009; Криволуцкий, Вьюшкова, 2017]. Космические лучи ионизируют все составляющие на высоте ниже 65 км и их влияние становится все более значимым с уменьшением высоты, а также с увеличением геомагнитной широты. Ионизация от космических лучей

присутствует постоянно, поэтому она играет важную роль в поддержании очень слабой ночной нижней области D.

Кроме основных нейтральных компонент N_2 и O_2 в атмосфере существует множество малых составляющих: O , O_3 , NO , NO_2 , CO_2 , H_2O , а также появляющиеся от метеоров металлы Mg , Si , Na , Fe . Электроны и положительные ионы возникают при фотоионизации, а отрицательные ионы – в процессе прилипания электронов к нейтралам. Ниже ~ 70 км доминируют тяжелые кластерные ионы $H^+(H_2O)_n$, а NO^+ и O^+_2 преобладают на больших высотах [Криволуцкий, Куницын, 2007b].

Наиболее важные процессы, приводящие к потере свободных электронов на высотах в области D: рекомбинация и прилипание. Из-за высокой скорости рекомбинации концентрация электронов ночью в D области резко уменьшается. Ниже 80 км область D практически исчезает после захода Солнца. Область D все же остается ночью из-за отлипания при столкновениях и слабой ионизации NO потоком $L\alpha$, рассеянным водородной короной в неосвещенную полусферу.

Наиболее отчетливо на средних широтах области D проявляется зимняя аномалия, связанная с повышением концентрации электронов вследствие переноса NO из термосферы в мезосферу [Данилов и др., 1987]. Одной из возможных причин переноса NO может служить повышение турбулентного обмена, который в средней атмосфере обусловлен планетарными волнами различных масштабов. Амплитуды этих волн при этом растут с высотой, а это приводит к усилению роли крупномасштабной турбулентности на высотах нижней ионосферы. Летом планетарные волны не проникают в более высокие слои вследствие изменения знака зональной циркуляции [Холтон, 1979]. Зимой регистрируется аномально большее поглощение ОНЧ-НЧ-радиоволн с большими флуктуациями в амплитуде [Sharma et al., 2017; Macotela et al., 2019].

В сезонных изменениях высотных профилей концентрации электронов $N_e(h)$ области D регистрируется асимметрия: средние профили $N_e(h)$ в период осеннего равноденствия ближе совпадают с летними профилями $N_e(h)$, а профили $N_e(h)$ весеннего равноденствия ближе по значениям к зимним [Альперт, 1972].

Кроме поглощения ультрафиолетовой радиации, верхняя атмосфера может нагреваться за счет химических реакций, поглощения энергии заряженными частицами, джоулевого нагрева электрическими токами, диссипации энергии атмосферных приливов и гравитационных волн [Кривошуккий, Куницын, 2007а]. Изменения характеристик нижней ионосферы могут быть связаны с синоптическими процессами в тропосфере. Наибольшая временная корреляция концентрации электронов в области D и температуры на высоте стратосферы (низкие широты) проявляется на высотах 60 – 65 км [Данилов и др., 1987].

1.2 Электромагнитные волны диапазона ОНЧ в волноводе Земля – ионосфера

Электромагнитному излучению в диапазоне очень низких частот (ОНЧ: 3 – 30 кГц) соответствуют длины волн 100 – 10 км. Для ОНЧ поверхности нижней ионосферы и Земли обладают достаточной проводимостью. ОНЧ-волны могут проникать под землю и в морскую воду. Глубина скин-слоя ($\delta \sim 1/\sqrt{\omega}$) для морской воды с типичной проводимостью $\sigma = 4$ См/м на частоте 10 кГц составляет $\sim 2,5$ м [Inan, Inan, 2000]. Регистрируемые параметры ОНЧ-радиоволн чувствительны к возмущениям, происходящим вдоль трассы их распространения.

Источники ОНЧ-излучения естественного происхождения

К естественным источникам ОНЧ-излучения можно отнести электрические разряды вследствие гроз, извержений вулканов, пылевых бурь и торнадо [Barr, Jones, Rodger, 2000; Фирстов, Котенко, Акбашев, 2020]. Импульсное электромагнитное излучение способно проникать в магнитосферу Земли, распространяться вдоль силовых линий магнитного поля, испытывая дисперсию. ОНЧ-излучения появившиеся в результате взаимодействия с частицами в магнитосфере могут иметь шумовой (шипения) или дискретный характер (свисты, крюки, хоры) [Муллаяров, Львов, Козлов, 2005]. Также источником ОНЧ-радиоизлучения являются разряды в ионосфере: эльфы, синие струи и спрайты [Potapov, Serman, 2019].

В глобальной электрической цепи большинство ОНЧ-излучений генерируются грозowymi разрядами [Мареев, 2010]. Наибольшая интенсивность гроз на земном шаре наблюдается в Индонезийском (Азиатском), Африканском и Американском (Центральная Америка и северная часть Южной Америки) районах, которые также называют мировыми грозowymi очагами. В флуктуационную составляющую фона основной вклад вносят атмосферники (радиоимпульсы грозowych разрядов) от дальних грозowych очагов. Разряды ближних молний вносят вклад в импульсную составляющую радишума. Геофизические процессы воздействуют на параметры природных источников ОНЧ и на условия распространения этих сигналов [Муллаяров и др., 1997].

Источники ОНЧ-излучения, созданные человеком

Кроме грозowych разрядов (атмосферный радишум) источником ОНЧ-радишума являются излучения электрического и электронного оборудования, линий электропередач или систем зажигания двигателей (промышленный радишум) [Рекомендация МСЭ-R P.372-11 (09/2013), 2014].

Диапазон ОНЧ стал успешно использоваться для создания глобальных систем навигации, передачи точного времени и частоты. ОНЧ-передатчики установлены по земному шару для связи с кораблями, самолетами и подводными лодками. Сигналы многих таких передатчиков доступны и широко используются для мониторинга ионосферы, исследования солнечно-земных связей [Barr, Jones, Rodger, 2000; Rodger, 2003; Bashkuev et al., 2018]. Гелиогеофизические проявления выделяются по изменениям не только амплитуды, но и фазы сигналов – наиболее чувствительного параметра [Каримов, Козлов, Муллаяров, 2008]. Вариации амплитуды и фазы регистрируемого ОНЧ-радиосигнала дают информацию об изменениях параметров волновода, в основном определяемых параметрами его верхней стенки (нижней ионосферы). Вариации фазы ОНЧ-сигналов указывают на изменения высоты волновода Земля – ионосфера, а вариации амплитуды – на изменения градиента концентрации электронов нижней ионосферы, следствием чего является изменение коэффициента затухания радиоволн при распространении. Дневным условиям распространения

соответствуют большее затухание и меньшая фазовая задержка принимаемого ОНЧ-радиосигнала (уменьшение градиента высотного профиля электронной концентрации на меньших высотах, где проводимость дневной нижней ионосферы уже достаточна для отражения радиоволны).

Для передачи информации в ОНЧ-НЧ-диапазоне обычно используют различные типы модуляции: амплитудная манипуляция в режиме радиотелеграфа Continuous Wave (CW), частотная манипуляция Frequency Shift Keying (FSK), частотная манипуляция с минимальным сдвигом Minimum Shift Keying (MSK), частотная манипуляция с минимальным сдвигом с применением гауссовского фильтра нижних частот Gaussian Minimum Shift Keying (GMSK). Выделение фазовых вариаций, принимаемых ОНЧ-НЧ-радиосигналов сети передатчиков является сложной задачей, требующей определения конкретного вида модуляции сигналов и знания алгоритмов работы передающих станций. Часто генераторы передатчиков оказываются плохо синхронизированы и обладают невысокой стабильностью по частоте [Полетаев, Ченский, Токмачев, 2013].

1.3 Радиотехническая система дальней навигации РСДН-20 («Альфа»)

В ОНЧ-диапазоне в режиме амплитудной манипуляции CW с 1972 г работает отечественная фазовая радиотехническая система дальней навигации РСДН-20 «Альфа» [Болошин, 2013]. Система является разностно-дальномерной, состоит из трех основных передатчиков, расположенных вблизи Комсомольска-на-Амуре (далее Хабаровск), Новосибирска и Краснодара. Площадь рабочей зоны с тремя передатчиками ≈ 120 млн. км², среднеквадратичное отклонение определения местоположения в зависимости от расположения потребителей относительно передатчиков составляет 2,3 – 7,6 км. Каждый передатчик последовательно излучает радиоимпульсы на трех частотах. Организована синхронизация в автоматическом режиме. При работе системы с тремя передатчиками территория Российской Федерации относится к области многомодового распространения радиоволн, трудно поддающегося

прогнозированию. Для повышения надежности определения местоположения, периодически в работу системы включается передатчик вблизи населенного пункта Ревда (Мурманская область). Модифицированный вариант РСДН-20 позволяет:

- увеличить зону действия системы (площадь ≈ 320 млн. км²);
- снизить погрешность местоопределения до 1,2 – 5 км в рабочей зоне;
- создать навигационное поле на территории России;
- уточнить привязку временных шкал потребителей к UTC (SU) с

погрешностью 1,5 – 5 мкс в зависимости от времени суток и сезона.

РСДН-20 («Альфа») излучает основную частоту $F1 = 16/1344$ МГц $\approx 11,904$ кГц и дополнительные: $F2 = 17/1344$ МГц $\approx 12,649$ кГц, $F3 = 20/1344$ МГц $\approx 14,881$ кГц, $F4 = 65/(4 \cdot 1344)$ МГц $\approx 12,091$ кГц. Для синхронизации временной диаграммы передатчиков с диаграммой работы всей навигационной системы излучается сигнал на частоте $F3n = F3 + 5/36$ Гц. Длительность пакета излучения всех передатчиков $T_{\Sigma} = 3,6$ с [Jacobsen, 2000]. Длительность посылки радиоимпульса равна 0,4 с, а длительность паузы между сигналами составляет 0,2 с, что исключает перекрытие сигналов разных станций во всей рабочей зоне.

Частотно-временная диаграмма работы РСДН-20 («Альфа») представлена на рисунке 1.3.

Учитывая нецелочисленные соотношения между рабочими частотами и временными шкалами, в 00:00 московского времени (21:00 UTC) каждые сутки осуществляется принудительная синхронизация излучения со шкалой UTC (SU). В течение суток система синхронизации передатчиков обеспечивает сохранение установленных соотношений между излучением и шкалой UTC (SU) с погрешностью, не превышающей 1 мкс. При мощности излучения станций 50 – 80 кВт сигналы могут уверенно приниматься на удаленностях свыше 10000 км [Кикулькин, Рубцов, Фабрик, 1979; Болошин и др., 1985].

	Сегмент					
	1	2	3	4	5	6
Новосибирск	F1 11,904 кГц	F2 12,649 кГц	F3 14,881 кГц	F3п F3+5/36 Гц		
Краснодар	F3 14,881 кГц		F1 11,904 кГц	F2 12,649 кГц		
Хабаровск		F3 14,881 кГц	F2 12,649 кГц	F1 11,904 кГц		
Ревда	F2 12,649 кГц	F4 12,091 кГц		F3п F3+5/36 Гц	F1 11,904 кГц	F3 14,881 кГц
	0,4 с	0,4 с		0,4 с	0,4 с	0,4 с
	0,6 с	0,6 с	0,6 с	0,6 с	0,6 с	0,6 с
Tц = 3,6 с						

Рисунок 1.3 – Частотно-временная диаграмма работы РСДН-20 («Альфа»)

1.4 Основы теории распространения электромагнитного излучения диапазона ОНЧ в волноводе Земля – ионосфера

1.4.1 Отражение электромагнитного ОНЧ-излучения от ионосферы

Ионосфера является неоднородной (свойства изменяются с высотой) анизотропной (из-за наличия магнитного поля Земли) слабо ионизированной плазмой. Дисперсионное уравнение радиоволн в ионосфере определяется уравнением Эпплтона – Хартри [Budden, 1961a]:

$$n^2 = 1 - \frac{X}{1 - iZ - \left[\frac{Y_T^2}{2(1 - X - iZ)} \right] \pm \sqrt{\frac{Y_T^2}{4(1 - X - iZ)^2} + Y_L^2}}, \quad (1.4)$$

где n – комплексный показатель преломления;

X , Y_T , Y_L , и Z – безразмерные параметры, определяемые как:

$$X = \frac{\omega_p^2}{\omega^2}, \quad Y_T = \frac{\omega_{Be}}{\omega} \cdot \sin(\theta), \quad Y_L = \frac{\omega_{Be}}{\omega} \cdot \cos(\theta), \quad Z = \frac{\nu_e}{\omega}, \quad (1.5)$$

где ω – угловая частота волны;

ω_p – плазменная частота;

ω_{Be} – гирочастота электронов;

θ – угол между направлением распространения радиоволны и внешним магнитным полем;

ν_e – частота столкновений электронов с нейтралами.

$$\omega_p = \sqrt{\frac{N_e \cdot e^2}{m_e \cdot \epsilon_0}}, \quad (1.6)$$

где e – заряд электрона;

m_e – масса электрона;

N_e – концентрация электронов;

ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума.

Гирочастота электронов ω_{Be} определяется из выражения:

$$\omega_{Be} = B \cdot e / m_e, \quad (1.7)$$

где B – индукция геомагнитного поля.

Частота столкновений электронов с нейтралами ν_e :

$$\nu_e = 5,4 \cdot 10^{-10} \cdot n_n \cdot T_e^{1/2}, \quad (1.8)$$

где n_n – концентрация нейтралов, см⁻³;

T_e – температура электронов, К.

Теория дает два режима для электромагнитной волны определенной частоты, в знаменателе выражения (1.4) одному режиму соответствует знак «плюс» («обыкновенная волна»), другому – знак «минус» («необыкновенная» волна). Для мнимой части показателя преломления параметр Z учитывает энергетические потери волны при столкновениях электронов с нейтралами. Распространяясь в двух магнитоионных режимах, волны отражаются на разных высотах. Разница этих высот зависит от частоты волны. В простейшем случае для

обыкновенной волны, когда эффекты столкновений и геомагнитное поле игнорируются ($Y = Z = 0$), показатель преломления можно представить в виде:

$$n^2 = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}. \quad (1.9)$$

В ионосфере для вертикального падения встречается условие отражения, когда показатель преломления $n = 0$, таким образом, при нормальном падении электромагнитная волна отражается на высоте, где ее частота равна плазменной $\omega^2 = \omega_p^2$. Такая частота называется критической. При падении волны на ионосферу под углом φ критическая частота больше плазменной частоты в $1/\cos(\varphi)$ раз [Брюнелли, Намгаладзе, 1988].

Волны ОНЧ отражаются в нижней области ионосферы (в областях D или E), где эффекты геомагнитного поля малы в то время как столкновения играют решающую роль ($Z \gg 1$). Показатель преломления для ОНЧ-волны:

$$n^2 = 1 - i \frac{X}{Z}. \quad (1.10)$$

С учетом столкновений, на высотах, где концентрация электронов мала $\text{Re}(n^2) \gg \text{Im}(n^2)$, волна движется вверх ($n = 1$) без поглощения и отражения. Затухание радиоволн зависит от колеблющихся электронов, теряющих энергию при столкновениях, но если электронов мало, то затухание несущественно. С другой стороны, при повышенной концентрации электронов на больших высотах ($\text{Im}(n^2) \gg \text{Re}(n^2)$) процесс затухания доминирует. Существует высота перехода ($\text{Re}(n^2) = \text{Im}(n^2)$), на которой отражение ОНЧ-волн эффективно:

$$\frac{X}{Z} \approx 1 \Rightarrow \frac{\omega_p^2}{\omega \nu_e} \approx 1. \quad (1.11)$$

Зависимость концентрации электронов N_e (электрон/см³) нижней ионосферы от высоты h можно представить экспоненциальным профилем Уэйта и Спаеса [Wait, Spies, 1964], модель пригодна до высот 100 км:

$$N_e(h) = 1,43 \cdot 10^7 \cdot \exp(-0,15h') \cdot \exp[(\beta - 0,15) \cdot (h - h')], \quad (1.12)$$

где h' – высота основания профиля, км;

β – высотный градиент концентрации электронов, км⁻¹.

Параметры β и h' изменяются в зависимости от зенитного угла Солнца. Типичными значениями для ночных условий являются: $\beta = 0,5 \text{ км}^{-1}$ и $h' = 85 \text{ км}$ [Cummer, 1997]. Отражение происходит на высотах, где $\omega \sim \omega_p^2/\nu_e$. Высоты отражения ОНЧ-радиоволн от ионосферы в ночное время, оцененные на основе уравнения (1.11), представлены на рисунке 1.4.

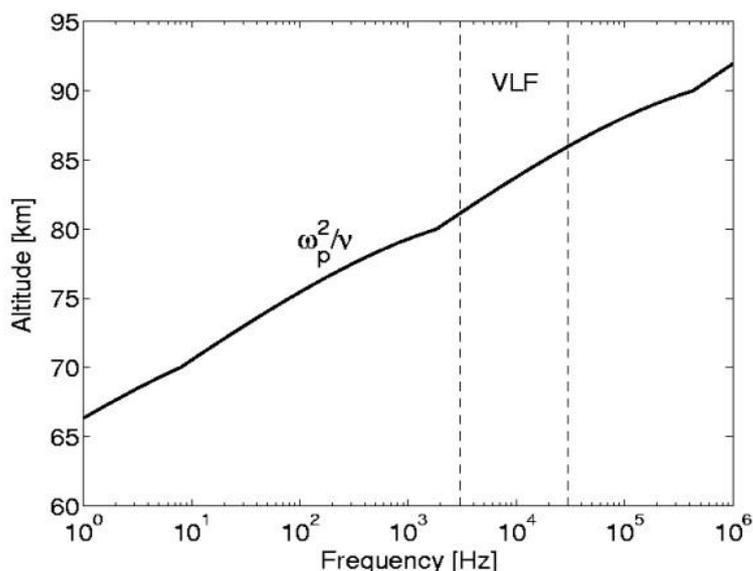


Рисунок 1.4 – Оценка высоты отражения ОНЧ от ионосферы в ночное время в зависимости от частоты сигнала

На рисунке 1.4 кривая была рассчитана с использованием типичного для ночного времени профиля концентрации электронов Уэйта и Спаеса (1.12), по выражениям (1.6) и (1.8) определены ω_p и ν_e . Как видно из рисунка 1.4, в ночное время ОНЧ-волны отражаются от ионосферы на высотах 82 – 86 км.

1.4.2 Описание распространения радиоволн приближением геометрической оптики

Для описания распространения радиоволн ОНЧ в волноводе Земля – ионосфера может применяться приближение геометрической оптики. Поле пространственной волны (напряженность и фаза) в точке приема считается

векторной суммой полей, создаваемых различными волнами, распространяющимися от передатчика путем одного или нескольких скачков (отражений) от границ волновода. Общее поле в приемнике является векторной суммой поля волны, дифрагированной землей, и поля пространственной волны.

Напряженность поля нисходящей пространственной волны перед отражением от земной поверхности вблизи приемной антенны E_t (мВ/м) [Рекомендация МСЭ-R P.684-8 (08/2022), 2023]:

$$E_t = \frac{300\sqrt{P_t}}{L} \cdot \cos\psi \cdot R_{\parallel} \cdot D \cdot F_t, \quad (1.13)$$

где P_t – излучаемая мощность вертикальным коротким электрическим диполем, кВт;

L – длина трассы пространственной волны, км;

R_{\parallel} – коэффициент отражения от ионосферы, который представляет собой отношение составляющих электрического поля, параллельных плоскости падения;

D – коэффициент ионосферной фокусировки;

F_t – поправочный коэффициент передающей антенны;

ψ – угол выхода и прихода пространственной волны у поверхности земли по отношению к горизонтали.

При приеме на короткую вертикальную антенну эффективное значение напряженности поля пространственной волны E_s (мВ/м) имеет вид:

$$E_s = \frac{600\sqrt{P_t}}{L} \cdot (\cos\psi)^2 \cdot R_{\parallel} \cdot D \cdot F_t \cdot F_r, \quad (1.14)$$

где L – длина трассы пространственной волны (км);

R_{\parallel} – коэффициент отражения от ионосферы, который представляет собой отношение составляющих электрического поля, параллельных плоскости падения;

D – коэффициент ионосферной фокусировки;

F_t – поправочный коэффициент передающей антенны;

ψ – угол выхода и прихода пространственной волны у поверхности земли по отношению к горизонтали;

F_r – поправочный коэффициент приемной антенны.

Поправочные антенные коэффициенты учитывают влияние кривизны Земли и конечной проводимости на диаграмму направленности антенн в вертикальной плоскости. Коэффициент показывает отношение фактической напряженности поля к напряженности поля, которая наблюдалась бы в случае идеально проводящей Земли [Рекомендация МСЭ-R P.684-8 (08/2022), 2023].

Для двухскачковой пространственной волны напряженность поля в точке вертикальной приемной антенны представляется в (мВ/м):

$$E_s = \frac{600\sqrt{P_t}}{L} \cdot (\cos\psi)^2 \cdot \|R_{1\parallel}\| \cdot \|R_{2\parallel}\| \cdot D^2 \cdot D_G \cdot \|R_{g\parallel}\| \cdot F_t \cdot F_r, \quad (1.15)$$

где D_G – коэффициент дивергенции, вызванной сферичностью Земли, равный примерно D^{-1} ;

$\|R_{g\parallel}\|$ – эффективный коэффициент отражения от Земли с конечным значением проводимости;

L – общая длина трассы распространения при двухскачковой траектории лучей;

$\|R_{1\parallel}\|$ и $\|R_{2\parallel}\|$ – коэффициенты ионосферного отражения для первого и второго отражений. При падении волн под сильно наклонными углами $\|R_{1\parallel}\| \approx \|R_{2\parallel}\|$.

Результирующая напряженность поля одно- и двухскачковых пространственных волн, вычисляется согласно выражению:

$$R_s^2 = E_{s1}^2 + E_{s2}^2 + 2 \cdot E_{s1} \cdot E_{s2} \cdot \cos\varphi, \quad (1.16)$$

где $\varphi = 2 \cdot \pi \cdot (L_2 - L_1) / \lambda$ – разность длин траекторий лучей между одно- и двухскачковыми пространственными волнами.

Напряженность поля R , принимаемого сигнала, которая является результатом сложения пространственных волн и земной волны G :

$$R^2 = R_s^2 + G^2 + 2 \cdot R_s \cdot G \cdot \cos \theta, \quad (1.17)$$

где θ – угол задержки фазы сигнала R_s относительно земной волны G [Рекомендация МСЭ-R P.368-10 (08/2022), 2023].

Вклад лучей высших порядков падает быстрее с расстоянием из-за большего числа отражений с потерями на границах волновода. Предполагается, что энергия обратно пропорциональна пройденному волной пути.

Приближение геометрической оптики мало пригодно для моделирования распространения на расстояниях более 4000 км, так как это потребовало бы учета слишком большого числа лучей. Для расстояний не более 4000 км достаточно учитывать не более 4 лучей [Орлов, Азарнин, 1970].

1.4.3 Метод нормальных волн

Метод нормальных волн более подходит для описания распространения ОНЧ на большие расстояния. На фиксированной частоте f поле волновода можно разложить на последовательность независимых структур поля (мод), которые распространяются с различными скоростями [Budden, 1962]. Решение уравнений Максвелла для случая волны, распространяющейся вдоль направления x плоского волновода с идеально проводящими стенками делится на три категории: поперечные электрические (ТЕ) волны ($E_x = 0, H_x \neq 0$), поперечные магнитные (ТМ) волны ($E_x \neq 0, H_x = 0$) и поперечные электромагнитные (ТЕМ) волны ($E_x = 0, H_x = 0$). Поскольку рассматривается распространение вдоль оси x , изменение всех компонент поля представлено как $e^{-\gamma x}$, где γ – постоянная распространения. Амплитуды поля являются функцией от z , взятое в направлении, перпендикулярном к границам волновода. Электрические и магнитные компоненты поля можно определить из волнового уравнения:

$$\frac{\partial^2 M}{\partial z^2} = -a^2 M, \quad (1.18)$$

где M – либо электрическая E или магнитная H компонента поля;

$$a^2 = \gamma^2 + \omega^2 \mu \epsilon.$$

Применение граничных условий: исчезновение касательной компоненты электрического и нормальной компоненты магнитного поля на верхней и нижней стенках волновода, накладывает ограничение на a :

$$a = \frac{m \cdot \pi}{h}, \quad (1.19)$$

граничные условия могут удовлетворяться только для определенных значений a (здесь h – эффективная высота волновода). Каждое целое число m указывает на определенную конфигурацию поля (моду). Для распространяющихся волн γ должно быть комплексным, иначе получим быстро затухающую волну. Используя выражение (1.19) γ может быть представлено в виде:

$$\gamma = \sqrt{a^2 - \omega^2 \cdot \mu \cdot \varepsilon} = \sqrt{\left(\frac{m \cdot \pi}{h}\right)^2 - \omega^2 \cdot \mu \cdot \varepsilon}, \quad (1.20)$$

что применимо для обеих мод ТЕ и ТМ. Таким образом, для каждой из мод TE_m и TM_m существует частота среза, $f_{cm} = mc/2h$. Волны с частотами выше f_{cm} могут распространяться в виде моды порядка m , но с частотами ниже частоты среза – быстро затухают. ТЕМ мода (или TM_0), не имеет частоту среза ($f_{cm} = 0$) и волны любой частоты могут распространяться в этом режиме. Конечное число мод, при которых может распространяться энергия волны, определяется геометрией (эффективной высотой) волновода [Cummer, 1997].

Волновод Земля – ионосфера не является идеальным, следует учитывать кривизну Земли, конечные проводимости верхней и нижней границ, анизотропию ионосферы (из-за влияния геомагнитного поля). Из-за анизотропии происходит преобразование мод: линейно поляризованные волны становятся эллиптически поляризованным с компонентами, имеющими как параллельную, так и перпендикулярную поляризацию. Поле в реальном волноводе является суперпозицией QTM (квази-ТМ) и QTE (квази-ТЕ) мод. Ночью ОНЧ-волны отражаются от больших высот, где свойства ионосферы более анизотропны.

Определение электромагнитного поля в данной точке волновода может быть сделано путем суммирования вклада всех мод. Электрическое поле у приемника, расположенного на высоте z_R на удалении d (дальняя зона: $d \gg \lambda$) от

источника, представленного в виде колебаний вектора электрического диполя $P(t) = P_0 e^{i\omega t}$, расположенного на высоте z_S над землей выражается в виде [Budden, 1961b]:

$$E = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} = \frac{i \cdot \omega \cdot \tilde{c} \cdot F}{\sqrt{d}} \cdot \sum_m e^{-i \cdot k \cdot S_m \cdot d} \cdot \Gamma_m(z_S) \cdot \Gamma_m(z_R) \cdot \Lambda_m \cdot P_0, \quad (1.21)$$

где F – скалярный показатель рассеяния/фокусировки:

$$F = \sqrt{\frac{d/R_E}{\sin(d/R_E)}},$$

$$\tilde{c} = -\frac{\exp(i\pi/4) \cdot \mu_0 \cdot \omega}{h \cdot \sqrt{2} \cdot \pi \cdot k},$$

R_E – радиус Земли;

d – длина радиотрассы;

h – высота основания ночной ионосферы;

ω – угловая частота волны;

$k = \omega/c$ – волновое число;

$S_m = \sin(\theta_m)$ – синус угла падения θ моды порядка m ;

$\Gamma_m(z)$ – тензор функций усиления, описывает поведение трех электрических компонент поля в зависимости от высоты z для данной моды m ;

Λ_m – функция возбуждения, характеризующая эффективность, с которой диполь возбуждает моду m в волноводе в зависимости от ориентации (Λ_m является тензором 3×3).

Суммирование в (1.21) ведется по допустимым модам порядка m . Компонент Λ_m^{ij} функции возбуждения является показателем возбуждения электрического поля компоненты E_i диполя, ориентированного в направлении j . С помощью уравнений Максвелла можно получить выражение аналогичное (1.21) и для магнитного поля.

Углы падения θ_m определяются допустимыми модами. Интерференция мод усложняет картину поля вдоль волновода, однако при удалении от передатчика

более чем на 2000 – 4000 км удобно пользоваться методом нормальных волн: достаточно учитывать не более 3 мод. Обычно в работах по распространению ОНЧ-радиоволн главной модой считается первая. Подразумевается, что существует еще нулевая мода, которая оказывается основной на частотах меньше 1 кГц. Для диапазонов ОНЧ и сверхнизких частот (СНЧ: 0,3 – 3 кГц) расчеты показывают, что это одна и та же мода (встречается также терминология Баддена, в которой главную моду в ОНЧ считают от нулевой [Budden, 1957]).

На рисунке 1.5 представлены зависимости коэффициентов затухания от частоты для дневных (левая панель) и ночных (правая панель) условий распространения для квази-ТМ (сплошная кривая) и квази-ТЕ (пунктир) волн в волноводе Земля-ионосфера над влажной почвой ($\varepsilon = 20$, $\sigma = 10^{-2}$ См/м).

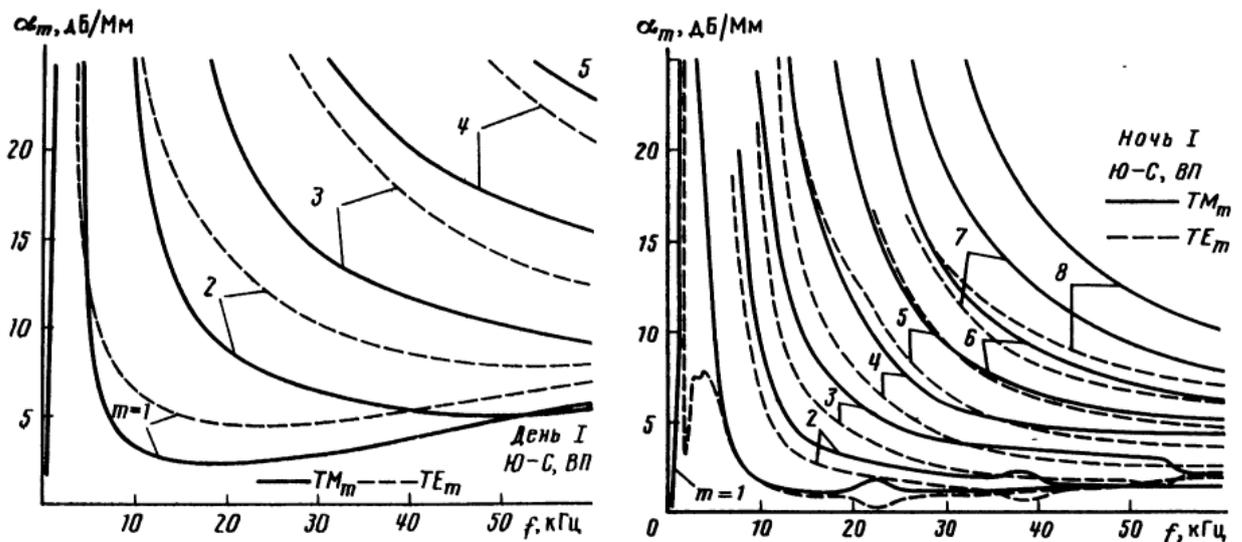


Рисунок 1.5 – Зависимости коэффициентов затухания от частоты для дневных (левая панель) и ночных (правая панель) условий распространения для квази-ТМ (сплошная кривая) и квази-ТЕ (пунктир) волн в волноводе Земля – ионосфера над влажной почвой ($\varepsilon = 20$, $\sigma = 10^{-2}$ См/м) [Макаров, Новиков, Рыбачек, 1994]

С понижением частоты коэффициент затухания увеличивается, что соответствует наличию в волноводе критических частот. В дневном волноводе для квази-ТМ₁ волны на частоте ≈ 3 кГц имеется максимум коэффициента затухания ≈ 54 дБ/Мм. В диапазоне 5 – 50 кГц волна обладает минимальным

затуханием. В ночных условиях в диапазоне частот 2 – 35 кГц минимальным коэффициентом затухания обладает волна квази-TE₁, при этом этот коэффициент меньше дневного затухания квази-TM₁ волны. Ночные зависимости коэффициента затухания от частоты по сравнению с дневными имеют немонотонный вид. Например, для квази-TE₁ волны имеется максимум затухания на частоте около 4 кГц, минимумы на частотах 22 кГц и 1,8 кГц.

На частотах ≈ 10 кГц в дневных условиях распространения основной вклад вносит первая мода [Орлов, Азарнин, 1970]. Вклад мод высших порядков в волноводе убывает быстрее с расстоянием из-за более высокого затухания при увеличении числа отражений.

При распространении радиоволн в направлении запад – восток и восток – запад при учете геомагнитного поля регистрируется эффект невзаимности. Минимальное затухание квази-TM_m волн при распространении с востока на запад, максимальное затухание – с запада на восток. С увеличением номера m при фиксированной частоте 10 – 20 кГц растет отличие в затухании. Для квази-TE_m волн, наоборот, минимальное затухание – при распространении с запада на восток, а максимальное – с востока на запад [Макаров, Новиков, Рыбачек, 1994].

На рисунке 1.6 представлены зависимости коэффициента затухания для TM волн при распространении в дневных условиях направление юг – север. Сплошные линии соответствуют $m = 1$, штриховые – $m = 2$, штрихпунктирные линии – $m = 3$. Кривые помечены цифрой: 1 – ледовый покров Антарктиды или Гренландии ($\epsilon_m = 3$, $\sigma = 5 \cdot 10^{-4}$ См/м), 2 – мерзлотная почва ($\epsilon_m = 5$, $\sigma = 10^{-4}$ См/м), 3 – сухая почва ($\epsilon_m = 10$, $\sigma = 10^{-3}$ См/м), 4 – влажная почва ($\epsilon_m = 20$, $\sigma = 10^{-2}$ См/м), 5 – морская вода ($\epsilon_m = 80$, $\sigma = 4$ См/м) [Макаров, Новиков, Рыбачек, 1994].

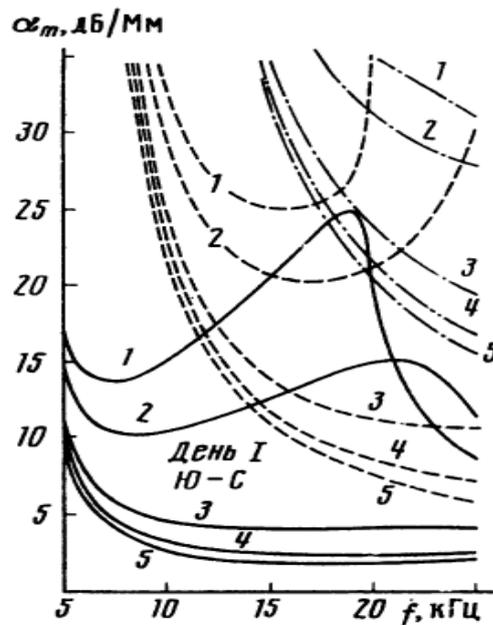


Рисунок 1.6 – Зависимости коэффициента затухания для ТМ волн при распространении днем, направление юг – север

Коэффициенты затухания для трасс с большой проводимостью мало зависят от свойств трассы. Максимальное отличие в этом коэффициенте на частотах 5 – 25 кГц для ТМ₁ при переходе от сухой почвы к морской воде $\alpha \approx 2,3$ дБ/Мм, для ТМ₂ $\alpha \approx 4,7$ дБ/Мм и ТМ₃ $\alpha \approx 3,8$ дБ/Мм. Уменьшение проводимости нижней границы волновода приводит сложной зависимости. Для частот 19 – 20 кГц коэффициенты затухания ТМ₁ и ТМ₂ волн для радиотрассы с ледовым покровом сближаются. Сближаются и фазовые скорости [Макаров, Новиков, Рыбачек, 1994]. Возникают условия к вырождению квази-ТМ₁ и квази-ТМ₂ мод.

Проводимость Земли меньше влияет на затухание ТЕ₁ и ТЕ₂ волн. При изменении проводимости от морской воды до ледового покрова на частоте 10 кГц максимальное изменение коэффициента затухания для ТЕ₁ $\alpha \approx 0,2$ дБ/Мм, для ТЕ₂ моды $\alpha \approx 1$ дБ/Мм [Макаров, Новиков, Рыбачек, 1994].

Исследования в условиях изотропного волновода и численные расчеты для частот 15 – 18 кГц показали, что параметры ионосферы (в частности высота волновода) влияют на поведение мод более существенно, чем параметры земной поверхности [Макаров, Новиков, Орлов, 1970].

1.5 Источники возмущения нижней ионосферы

Концентрация электронов D и E областей ионосферы, значит и регистрируемые вариации параметров ОНЧ-радиосигналов зависят как от вариации интенсивности источников ионизации, так и от динамических и химических процессов в атмосфере [Thomson, Clilverd, 2000]. Продолжительная регистрация ОНЧ-НЧ-радиоволн позволяет проводить исследования суточных, сезонных, межгодовых изменений параметров атмосферы [Thomson, Clilverd, Rodger, 2014; Silber, Price, Rodger, 2016] на фоне смены 11-летних циклов солнечной активности, стратосферных потеплений, а также изменений климата [Silber et al., 2013; Pal, Hobara, 2016; Silber, Price, 2017].

Одновременная регистрация сигналов от естественных источников и радиопередатчиков на сходных трассах распространения может прояснить вопрос о соотношении влияния геофизических процессов как на условия распространения сигналов, так и на природные источники ОНЧ-излучения.

В суточных фазовых и амплитудных вариациях ОНЧ-радиосигналов, принимаемых во время движения по радиотрассе границы день-ночь (терминатора) регистрируются замирания амплитуды и ступенчатообразные изменения фазы [Crombie, 1964].

При условиях распространения сигнала из ночных условий в дневные (падающее поле вблизи терминатора у передатчика определяется двумя модами, большое удаление от приемника до терминатора и в точке приема поле определяется только одной модой) принимаемый сигнал зависит от амплитудных и фазовых соотношений мод, падающих на границу раздела день-ночь. Значит при перемещении терминатора вдоль трассы распространения у приемника будут регистрироваться периодические изменения амплитуды и фазы сигнала. Период изменений будет определяться разностью фазовых скоростей первой и второй моды на участке передатчик – терминатор. При приближении терминатора к передатчику относительный вклад второй моды будет увеличиваться, а в точке приема замирания поля могут усиливаться.

При распространении радиосигнала из дневных условий в ночные предполагается, что поле со стороны передатчика определяется первой модой. Неоднородности в волноводе Земля – ионосфера приводят к появлению мод высших порядков, поэтому поле на участке терминатор – приемник носит интерференционный характер. При перемещении терминатора вдоль радиотрассы будут наблюдаться периодические вариации поля. При распространении двух мод период таких вариаций определяется разностью фазовых скоростей первой и второй мод на ночном участке трассы. Глубина замираний будет увеличиваться при приближении ночного терминатора к приемнику [Lynn, 2010].

Вклад в формирование амплитуды и фазы волноводных мод вносят разные по высоте области нижней ионосферы, ионизация которых может происходить под воздействием разных факторов [Smirnova, Danilov, 1998]. Ионизация нижних областей ионосферы, влияющих на вариации амплитуды принимаемых ОНЧ-радиосигналов, происходит также под воздействием галактических космических лучей. Выше в области D ионосферы основным источником является ионизирующее излучение Солнца. Возможно даже разное влияние одного и того же геофизического фактора на вариации амплитуды и фазы. В работе [Нестеров, 2019] не выделено существенного влияния числа солнечных пятен в 21-м цикле солнечной активности на вариации фазы ОНЧ-радиосигнала.

В работе [Peters, Entzian, 2015] приводится 50-летний ряд наблюдений НЧ-радиосигналов. Указывается на понижение эффективной высоты (как характеристики высоты отражения от дневной нижней ионосферы) во время солнечного максимума. В работе отмечается понижение эффективной высоты зимой из-за повышенного образования свободных электронов в области D вследствие сильного переноса NO зимой из нижней термосферы путем остаточной циркуляции и последующей фотоионизации солнечным излучением линии Лайман- α (121,6 нм). Выделены влияние южной фазы колебаний Эль-Ниньо и квазидвухлетних колебаний, связанных со стратосферными и тропосферными процессами. В работе [Calvo et al., 2009] показано, что эффекты южной фазы колебаний Эль-Ниньо, квазидвухлетних колебаний и циклов

солнечной активности не обязательно являются аддитивными. Изменения параметров нижней ионосферы не обязательно происходят линейно.

Солнечные протонные события и ОНЧ-аномалии

Солнечные протонные события (СПС) представляют собой выброс с поверхности Солнца высокоэнергичных частиц (в основном протонов с энергиями МэВ – ГэВ) вследствие солнечной вспышки. Протоны с энергиями 1 – 100 МэВ приводят к образованию значительной ионизации на низких высотах (100 – 1000 см⁻³ на высотах 45 – 50 км). Характерны существенные поглощения и флуктуации амплитуды ОНЧ-сигналов [Clilverd et al., 2006]. В приполюсном пространстве возникает комплекс эффектов – поглощение в полярной шапке (ППШ). ППШ могут продолжаться до 10 – 15 суток. Область аномальной ионизации при ППШ ограничивается геомагнитными широтами $\Phi' > 65 - 70^\circ$ [Мизун, 1983]. СПС, обладающее релятивистской энергией способное генерировать вторичные частицы, регистрируемые наземными нейтронными мониторами, представляет собой наземное возрастание солнечных космических лучей Ground Level Enhancement (GLE). С 1942 г. по 2023 г. было зарегистрировано всего 73 события GLE. В работе [Ахметов и др., 2023] показано, что во время сильного GLE70 (13 декабря 2006 г. 04:00 UT) на широте г. Апатиты (67,57° с.ш., 33,4° в.д.) амплитуды ОНЧ-сигнала могут ослабнуть в 6 раз, при слабом GLE72 (10 сентября 2017 г. 16:15 UT) – в 2 раза. Во время СПС 10 – 13 сентября 2017 г. на полигоне Михнево (55° с.ш., 38° в.д.) регистрировалось понижение амплитуды до 2 дБ ночью в сигналах ОНЧ-НЧ-передатчиков JXN (Норвегия), GBZ и GQD (Великобритания) [Гаврилов, Ряховский, Поклад, 2023].

Высыпания авроральных электронов

Потоки электронов с энергиями десятки кэВ, высыпающиеся в земную атмосферу во время магнитосферных суббурь, приводят к появлению авроральной ионизации, регистрируемой в виде нерегулярных вариаций ОНЧ сигналов. Длительность магнитосферной суббури составляет 1 – 3 часа [Акасофу, 1971]. Область авроральной ионизации имеет форму серпа, примерно концентрического относительно геомагнитного полюса. Широтный максимум

ионизации приходится на $\Phi = 65 - 68^\circ$. Увеличение геомагнитной возмущенности приводит к увеличению интенсивности поглощения и к расширению авроральной зоны. В суточном ходе авроральной ионизации наблюдается ночной максимум. Максимальная частота и интенсивность возмущений приходятся на равноденствия [Мизун, 1983]. В работе [Ахметов и др., 2021] показано увеличение амплитуды сигналов РСДН-20 в 2 – 5 раз при распространении под областью ионосферы, в которую произошло высыпание частиц из магнитосферы во время суббури; обнаружено увеличение волнового сопротивления волновода Земля – ионосфера на 10 – 15 Ом.

Вторжения релятивистских электронов

Источником нерегулярной ионизации нижней ионосферы могут являться релятивистские электроны с энергиями от нескольких сотен кэВ [Кузнецов, Столновский, 1978]. Исследование процессов высыпания релятивистских электронов из магнитосферы в атмосферу Земли началось косвенными методами, в том числе наземным ОНЧ-мониторингом [Ременец, Белоглазов, 1985; Remenets, Beloglazov, 1999]. Ультрарелятивистские электроны с энергией более 10 МэВ тормозятся в атмосфере с высот 45 км, при торможении генерируют потоки гамма и рентгеновских лучей, которые способны проникать еще ниже и ионизировать атмосферу. Высыпания ультрарелятивистских электронов в высоких широтах регистрировались с помощью ОНЧ [Ременец, 2001].

Внезапные ионосферные возмущения (ВИВ)

Во время солнечных вспышек происходит увеличение на несколько порядков интенсивности потока рентгеновского излучения. При этом рентгеновское излучение Солнца преобладает над остальными дневными источниками ионизации в области D на высотах 60 – 85 км. Резко возрастает концентрация электронов в нижней ионосфере. Такие внезапные ионосферные возмущения (ВИВ) приводят к регистрации внезапных фазовых и амплитудных аномалий (ВФА и ВАА) электромагнитных сигналов диапазонов ОНЧ и НЧ при их распространении в волноводе Земля – ионосфера [Митра, 1977; Ohshio, 1979].

Были рассмотрены поток и степень жесткости рентгеновского излучения [Deshpande, Subrahmanyam, Mitra, 1972]. Анализ 122 рентгеновских вспышек, сопровождавшихся возмущениями в ионосфере, показал, что лишь в 5% случаев интенсивность потока в спектральном интервале $0 - 8 \text{ \AA}$ не превышала 10^{-6} Вт/м^2 , а степень жесткости не превышала значения $1,5 \cdot 10^{-2}$. Эти значения были приняты за пороговые. В 73% случаев рентгеновских вспышек, вызывающих ВИБ, значения потока и степени жесткости превышали пороговые. В 15% случаев степень жесткости была ниже порогового значения. В 7% случаев поток в диапазоне $0 - 8 \text{ \AA}$ был ниже порогового значения 10^{-6} Вт/м^2 , но при этом степень жесткости была высокой и составляла около $3 \cdot 10^{-2}$.

В работе [Демькин, Кищук, 1982] величина ВФА представлена в виде линейной зависимости от логарифма произведения интенсивности потока рентгеновского излучения на усредненный вдоль радиотрассы косинус зенитного угла Солнца. Эта зависимость успешно использовалась при обработке ВФА для моделирования нижней ионосферы при ВИБ [Орлов, Пронин, Уваров, 1998].

В работе [Муллаяров, Мурзаева, Шапаев, 1995] было показано, что с учетом нескольких источников регулярного шумового фона в диапазоне ОНЧ и положения подсолнечной точки относительно радиотрассы, можно оценивать интенсивность потока рентгеновского излучения Солнца во время вспышек по наземным измерениям ОНЧ-радишумов.

Геофизические факторы (широта, сезон, освещенность и расположение радиотрассы, активность Солнца в 11 летнем цикле) могут влиять на отклик в параметрах ОНЧ-радиосигнала при ВИБ [Pacini, Raulin, 2006].

В зависимости ВАА от интенсивности потока рентгеновского излучения Солнца предполагается в большей степени проявление особенностей спектров излучения рентгена для отдельных вспышек [Belenkiy et al., 2006]. Это усложняет моделирование ВАА. Отдельные солнечные вспышки, сопровождающиеся, вместе с повышенным рентгеновским потоком, резким увеличением интенсивности в линии Лайман- α (121,6 нм), не дают четкой закономерности в величине наблюдаемых вариаций фазы ОНЧ-радиосигналов [Raulin et al., 2013].

Регистрация ОНЧ-сигналов на близких частотах (22,1 и 19,58 кГц) по схожим радиотрассам (Великобритания – полигон Михнево (55° с.ш., 38° в.д.)) при ВИВ позволила использовать параметры ионосферы, определенные в период рентгеновских вспышек для восстановления высотного профиля концентрации электронов для невозмущенной области D над Европой [Гаврилов и др., 2019].

В работе [George et al., 2019] на основе ОНЧ-сигналов от передатчиков исследовался метод определения интенсивности потока рентгеновского излучения от солнечных вспышек. Анализ проведен для 10 вспышек класса X вблизи максимума 24-го цикла солнечной активности. Наименьшая среднеквадратичная ошибка получалась для уравнения регрессии с параметрами: изменение фазы ОНЧ-сигнала, индекс F10.7 за день до вспышки, зенитный угол Солнца на середине радиотрассы и интенсивность потока рентгеновского излучения за 5 мин до начала вспышки. Применение фазовых вариаций ОНЧ-сигнала дают в 1,5 – 3 раза меньшие среднеквадратичные отклонения (СКО) при описании интенсивности потока рентгеновского излучения в диапазоне 1 – 8 Å во время солнечной вспышки в сравнении с 0,5 – 4 Å. Показано, что фаза ОНЧ-радиосигнала является наиболее важным параметром в регрессии, затем следует зенитный угол Солнца, интенсивность рентгеновского потока от Солнца за 5 минут до вспышки. Индекс F10.7 за день до события, дал наименьший вклад в регрессию. Оценки потока рентгеновского излучения по амплитуде ОНЧ-сигналов дали в 4 – 10 раз большие СКО, чем при использовании фазы.

Солнечные затмения

Во время солнечного затмения Луна перекрывает потоки ионизирующего излучения Солнца. Солнечное затмение дает возможность изучать механизмы изменений параметров ионосферы. Так как время его наступления предопределено, то это позволяет заранее подготовиться к эксперименту. Динамические процессы во время каждого затмения зависят от геофизической обстановки и активности Солнца [Chakrabarti et al., 2018; Wang et al., 2021].

В работе [Clilverd et al., 2001] исследовались ионосферные эффекты во время полного солнечного затмения в Европе 11 августа 1999 г. Анализ

амплитуды и фазы четырех передатчиков в диапазоне 16 – 24 кГц был выполнен для 19 радиотрасс протяженностью от 90 до 14510 км. Повышения амплитуды наблюдались на коротких радиотрассах (менее 2000 км), а на длинных трассах (более 10000 км) – понижение амплитуды. Отрицательные фазовые изменения, характеризующие повышение эффективной высоты ионосферы, наблюдались на большинстве трасс. Типичные изменения составили 3 дБ и 50° .

Рассматривались вариации амплитуды и фазы ОНЧ-НЧ-сигналов (20 – 45 кГц), принимаемых в Москве, Граце (Австрия) и Шеффилде (Великобритания) при полном солнечном затмении 20 марта 2015 г. [Соловьева и др., 2016]. Четыре длинные радиотрассы пересекали область затенения 90 – 100%. Были обнаружены отрицательные фазовые аномалии (от -75° до -90°). Регистировались положительные и отрицательные амплитудные аномалии (не более 5 дБ). Максимальные аномалии наблюдались во время наибольшей фазы затмения.

В работе [Rozhnoi et al., 2020] представлены результаты регистрации ОНЧ-НЧ-вариаций фазы и амплитуды на трех радиотрассах во время полного солнечного затмения 21 августа 2017 г. Протяженности радиотрасс составляли от 2200 до 6400 км. Две трассы пересекали полную полосу затмения, а третья трасса находилась в области 40 – 60% затенения. Для всех трасс влияния на амплитуду не было зарегистрировано. Во время затмения было зарегистрировано уменьшение фазы ОНЧ-радиосигналов, что было характерно для приближения к ночным условиям распространения в волноводе Земля – ионосфера.

1.6. Модели нижней ионосферы

Сформулированы минимальные требования для моделей нижней ионосферы для расчета распространения ОНЧ-НЧ-радиоволн [Козлов и др., 2018]:

1. верхняя граница высоты не ниже 90 км;
2. определение высотного распределения концентрации и эффективной частоты соударений электронов;
3. описание ионосферы в широтном диапазоне;

4. учет меняющихся свойств ионосферы;
5. адаптация модели по экспериментальным данным.

Получение высотных профилей плотности атмосферы, концентрации электронов, температуре и концентрации нейтральных частиц в нижней ионосфере затруднено. Данные возможно получить лишь ограниченными методами: установками частичного отражения и некогерентного рассеяния, запуском геофизических ракет и регистрацией амплитудно-фазовых вариаций радиоволн диапазонов ОНЧ и НЧ.

Каталог профилей концентрации электронов области D ионосферы

В каталог составлен на данных по 900 публикациям о высотных профилях концентрации электронов нижней ионосферы, полученных различными методами [Нестерова, Гинзбург, 1985].

ГОСТ Р-25645.15-94. Ионосфера Земли нижняя

Составлена модель глобального распределения концентрации электронов N_e и эффективной частоты соударений электронов ν_e в ионосфере для высот 45 – 105 км в любой точке земного шара для любого времени суток, дней года и уровней солнечной активности [ГОСТ Р-25645.157-94, 1995]. На высотах более 75 – 80 км днем и на высотах более 95 – 100 км ночью для геомагнитных широт ниже 60 градусов модели высотных зависимостей N_e построены на основе ГОСТ 25645.146 [ГОСТ 25645.146-89, 1991]. На меньших высотах значения N_e получены с учетом расчетных и экспериментальных данных по распространению ОНЧ-радиоволн. Стандарт не предназначен для условий ионосферных возмущений.

Пакет программ по моделированию распространения длинных волн LWPC

Пакет программ Long Wave Propagation Capability (LWPC), разработанный Фергюсоном и Снайдером [Ferguson, Snyder, 1987] широко используется в исследованиях распространения ОНЧ. Программа LWPC состоит из трех основных частей PRESEG, MODEFNDR и FASTMC. PRESEG ссылается на таблицу значений диэлектрической проницаемости и проводимости земли, а также геомагнитного поля. Высотный профиль параметров ионосферы может

быть задан в виде таблиц, либо в виде параметров профиля Уэйта и Спаеса (1.12). Волновод поделен на участки (сегменты), внутри которых параметры считаются однородными. MODEFNDR – определяет моды (углы θ_m), удовлетворяющие условиям когерентности (плоского фазового фронта) внутри каждого сегмента. Процедура FASTMC выполняет преобразования мод на границах волновода. На выходе программный пакет LWPC выдает значения фазы и амплитуды вертикального электрического поля в зависимости от высоты и пути распространения.

В обновленной версии LWPC-2.0 усовершенствованы графические подпрограммы, повышена гибкость моделирования ионосферы и возможность расчетов напряженности поля при моделировании полного радиосигнала при преобразовании волновых мод. Подпрограмма Long Wave Propagation Model (LWPM) реализует модель распространения, а GRDPLOT генерирует графики напряженности поля сигнала на карте [Ferguson, 1998]. В программу заложена старая модель геомагнитного диполя, ее исправление требует перекодировки, а основа программы написана на уже устаревшем компиляторе (требуется устаревшие функции FORTRAN-4) [Lyakhov, Goncharov, Losseva, 2020].

Международная справочная модель IRI

Международная справочная модель ионосферы IRI (International Reference Ionosphere) включает глобальные эмпирические детерминированные модели, построенные на основе обработки экспериментальных данных, полученных радиофизическими методами, а также прямыми измерениями параметров ионосферы с использованием ИСЗ и геофизических ракет [Bilitza, 1998; Bilitza et al., 2017]. Модель регулярно уточняется и может являться прогностической. Модель IRI требует небольшого числа входных параметров (географические или геомагнитные координаты, высота, дата, время, индексы геомагнитной и солнечной активности: a_p и F10.7), позволяет решать задачи распространения радиоволн широкого диапазона частот. В работе [Козлов, Ляхов, Беккер, 2014] представлен экспериментальный суточный ход амплитуды радиосигнала ДНО (53° с.ш., 8° в.д., 23,4 кГц) и сезонный ход амплитуды сигнала ТВВ (37° с.ш., 27°

в.д., 26,7 кГц) при регистрации на полигоне Михнево (55° с.ш., 38° в.д.) и расчетные по модели IRI значения амплитуд этих сигналов. Имеются расхождения в ночных значениях и значительные расхождения в сезонном ходе амплитуд. Большая часть данных ионосферы накоплена над европейской и североамериканской территориями, поэтому ионосфера этих регионов лучше прогнозируется IRI, а полярный регион описывается недостаточно точно [Ляхов, Козлов, Беккер, 2019].

Модель SIMP

Эмпирическая модель System of Ionospheric Monitoring and Prediction (SIMP) разработана институтами ИЗМИРАН и ИПГ Росгидромета. По координатам, зенитному углу и активности Солнца выдается концентрация электронов N_e выше 65 км. Концентрация N_e определяется по комбинации экспоненциальной функции и полинома третьей степени. Модель не учитывает условия высокой геомагнитной активности и спорадический слой Es [Лапшин и др., 2016], предназначена в основном для диапазона коротких волн.

Вероятностная эмпирически – статистическая модель области D ионосферы

В эмпирических моделях невозможно учесть непрерывную изменчивость параметров ионосферы. С помощью вероятностно-статистических моделей возможно описать непрерывно меняющиеся параметры ионосферы [Беккер, Козлов, Ляхов, 2013]. С учетом исходных данных сначала рассчитываются средние параметры ионосферы. Далее по датчикам случайных чисел, включенных в модель по заложенным в них законам распределения, выбираются величины, которые далее используются для расчета параметров радиоволны. Делается определенное число итераций. Эмпирически-статистические модели основываются на статистической обработке экспериментальных данных концентрации электронов с учетом гелиогеофизических условий (солнечная активность, сезон, время суток) в результате чего оцениваются плотности вероятности $P(N_e)$ для различных высот.

В работе [Беккер, 2018] для построения вероятностной эмпирически-статистической модели среднеширотной области D без возмущений ИДГ РАН использовались массивы [Нестерова, Гинзбург, 1985] и данные ГОСТ Р-25645.157-94 [ГОСТ Р-25645.157-94, 1995]. Рассматривался диапазон высот 55 – 95 км. Было показано, что массивы значений концентрации электронов плохо описываются нормальным и логнормальным законами распределения. Генерацию высотных профилей концентрации электронов необходимо проводить напрямую согласно полученным эмпирически плотностям вероятности $P(N_e)$. Для построения функции плотности вероятности достаточно проведения 1000 итераций значений концентрации электронов.

Часто результаты эмпирических моделей противоречивы, но остаются достаточно простым инструментом. По-прежнему ограниченный объем экспериментальных данных не позволяет смоделировать ионосферу с необходимой точностью в высоких широтах и в условиях возмущений.

1.7 Системы регистрации ОНЧ-сигналов

1.7.1 Наземные системы регистрации вариаций параметров ОНЧ-радиосигналов

В работе [Митра, 1977] описывается регистратор вариаций амплитуды и фазы сигналов ОНЧ-передатчиков. Сигнал с приемной антенны подавался в приемник-супергетеродин, преобразующий входной сигнал с помощью опорного стандарта частоты 100 кГц и частотного делителя в сигнал частоты 1 кГц. С выхода приемника сигнал 1 кГц сравнивался с помощью двух когерентных детекторов с опорным напряжением на частоте 1 кГц, полученной делением стандарта частоты. На выходе фильтра нижних частот выделялся сигнал амплитудой, пропорциональной фазе входного сигнала. Работа фазоизмерителя ОНЧ-сигналов, разработанного в Полярном геофизическом институте [Белоглазов, Ременец, 1982], была основана на импульсных схемах. Фаза

смещалась добавлением или исключением импульсов в импульсной последовательности, сформированной из напряжения подстраиваемого генератора. Такие регистраторы приходилось держать в экранированных помещениях с системами кондиционирования для стабилизации температуры.

Регистрация ОНЧ-сигналов на кафедре радиофизики СПбГУ

На примере разработок сотрудников кафедры радиофизики СПбГУ можно выделить основные этапы развития регистраторов амплитуды и фазы сигналов ОНЧ-радиостанций [Галюк, Бисярин, 2000; Galyuk, Belenky, Bisyarin, 2002; Галюк и др., 2012a]:

- 1995 г. Приемник-индикатор РНС «Омега» и «Альфа». Диапазон 10 – 15 кГц. Внутренний АЦП PCL-818L (ISA-слот), MS-DOS, VC++ 1.5, Ассемблер, MS Fortran 5.1, целочисленная цифровая фильтрация;

- 2000 г. Приемник-индикатор РНС «Альфа». Диапазон 10 – 15 кГц. Внутренний АЦП PCL-818L (ISA-слот), Windows 95/98, Visual Studio 6 (VC++ 6, Fortran 6.5, Ассемблер), целочисленная цифровая фильтрация;

- 2008 г. Приемник-индикатор РНС «Альфа». Диапазон 10 – 15 кГц. Внутренний АЦП PCI-1712 (PCI-слот), Windows XP, Visual Studio 6 (VC++ 6, Fortran 6.5, Ассемблер), цифровая фильтрация – плавающая арифметика.

В работе [Галюк и др., 2012b] описан модернизированный регистратор. Проводится определение амплитуды, фазы и доплеровского сдвига частоты ОНЧ-сигналов РСДН-20 «Альфа», амплитуды и временной задержки НЧ-сигналов передатчиков Logan-C, вычисляются координаты и проводится архивация данных. Комплекс включает в себя персональный компьютер (ПК), антенную систему (штырь высотой 4 м, согласующий каскад предварительного усиления), генератор опорной высокостабильной частоты (5 МГц, рубидиевый стандарт), делитель частоты, вырабатывающий частоту дискретизации АЦП. АЦП подключался к ПК с помощью шины PCI. Стабилизация частоты на основе кварцевого генератора (стабильность 10^{-7}) приводила к усложнению фазовых измерений.

Приемная система VELOX

VLF/ELF Logger Experiment (VELOX) – приемная система для сбора данных в радиодиапазоне от крайне низких (КНЧ: 3-30 Гц) до очень низких частот. Была установлена и запущена с 1992 г. на станции Галей (Антарктида), способна оцифровывать сигналы до 95 кГц. Данные записываются на диск с секундным разрешением [Smith, 1995].

Регистратор OmniPAL

В университете Отаго Новой Зеландии был разработан регистратор амплитудно-фазовых вариаций ОНЧ-сигналов радиостанций (OmniPAL) [Dowden et al., 1998]. Регистратор работает с модулированными сигналами CW и MSK. Сигнал принимается штыревой антенной. Частота дискретизации АЦП равняется 100 кГц. Используется генератор с кварцевой стабилизацией. Приемник OmniPAL оснащен детекторами, реализованными программой. Амплитуда сигнала каждой радиостанции детектируется в полосе 100 Гц. Обычно задается разрешение 10 мс [Dowden et al., 1994]. Генераторы в каждой паре фазовых детекторов работают на частоте передатчика, но сдвинуты в квадратуре по фазе. Сигналы с выходов фазовых детекторов усредняются отдельно в течение выбираемого времени: 0,05, 0,1, 0,2, 0,4 или 0,5 секунд. Изменения по неизвестному закону смещения фазы, а также смещения по частоте устраняются усреднением.

Система ОНЧ-НЧ-регистраторов AWESOME

Коллаборацией Стэнфордского университета для выделения амплитудно-фазовых вариаций ОНЧ-сигналов с модуляцией MSK применяются регистраторы AWESOME (Atmospheric Weather Electromagnetic System for Observation, Modeling, and Education) [Johnson, 2000]. Рамочные приемные антенны имеют вид равностороннего треугольника площадью от 1,69 до 25 м². Принятый радиосигнал после предварительного усиления и фильтрации в полосе 9 Гц – 43 кГц оцифровывается АЦП (16 разрядов, частоты дискретизации 100 кГц и 1 МГц на каждый из двух каналов). Работа разнесенных регистраторов синхронизируется по времени с помощью GPS-часов, секундный импульс управляет запуском АЦП. В отдельных приемниках высокостабильные колебания устройств GPS служат внешним источником дискретизации АЦП. Оцифрованные данные регулярно

записываются на диск ПК. После узкополосной цифровой фильтрации происходит детектирование сигналов. Вычисляются как амплитуды с разрешением 1 с и 20 мс, так и фазовые вариации с разрешением 1 с и 100 мс. Происходит архивация данных. Для оценки вариаций амплитуды и фазы MSK и GMSK сигналов ОНЧ-передатчиков применяется метод реконструкции фазовых переходов [Shafer, 1994]. При квадратурном детектировании определяются амплитуда и фаза сигнала на центральной частоте. Далее фаза сдвигается на заданное количество отсчетов. Этот задержанный сигнал поступает на демодулятор MSK (GMSK) с выхода которого получается последовательность бит информации, переданных ОНЧ-передатчиком. По этой битовой последовательности кодер MSK (GMSK) реконструирует фазу. Разность сдвинутой на заданное число отсчетов фазы и фазовой функции без искажений, полученной с выхода кодера MSK (GMSK), соответствует вариациям фазы сигнала, связанными с распространением в волноводе Земля – ионосфера. Точность вычислений фазы, полученной с выхода кодера, зависит от наличия ошибок в битовой последовательности, определяемой в демодуляторе MSK (GMSK) и от точности совпадения по времени изгибов сдвинутой фазы и фазовой функции без искажений, полученной с выхода кодера MSK (GMSK). Точность выделения фазы сигнала MSK достигала $\pm 2,5^\circ$ (два сигма) на частоте 23,4 кГц [Shafer, 1994]. В работе [Cohen et al., 2018] для синхронизации по времени и стабилизации частоты АЦП используется GPS-приемник (точность секундного импульса составляет ± 15 нс), достигается чувствительность $0,03$ фТл/(Гц)^{0,5} на частоте 30 кГц и динамический диапазон 96 дБ.

Синхронизация работы разнесенных ОНЧ-регистраторов и систем радиопередатчиков с помощью ГНСС

Синхронизация режимов работы регистратора ОНЧ и систем радионавигационных станций по времени возможна с помощью приемников глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) [Козлов, Каримов, Муллаяров, 2007]. С выхода модуля GPS формируются высокостабильные импульсы (с ежесекундной коррекцией частоты), используемые в качестве

сигнала внешней синхронизации запуска АЦП. Сбор данных начинается по приходу секундного импульса PPS на вход синхронного запуска АЦП, подстройка системного времени ПК осуществляется также по данным GPS-модуля (через СОМ-порт). Синхронизация и применение высокостабильных импульсов от устройств GPS для опорного генератора АЦП позволяет разнесенным в пространстве регистраторам проводить фазовые измерения ОНЧ-радиосигналов [Козлов, Каримов, Муллаяров, 2008]. Методика апробирована при регистрации эффектов затмения Солнца 29.03.2006 в амплитудно-фазовых вариациях сигналов ОНЧ-радиопередатчиков [Каримов, Козлов, Муллаяров, 2008].

UltraMSK

Узкополосный ОНЧ-приемник UltraMSK предназначен для записи амплитуды и фазы, модулированных ОНЧ-радиосигналов MSK. Широкополосный ОНЧ-сигнал оцифровывается с помощью одного из каналов звуковой карты компьютера. Звуковые карты способны проводить оцифровку сигнала на частотах дискретизации до 192 кГц. Для программного синтеза необходимых эталонных частот применяются высокоточные последовательности секундных импульсов (PPS) от приемника GPS. Импульс PPS подается на второй канал звуковой карты. Число ОНЧ-передатчиков, сигналы которых приемник может одновременно регистрировать зависит от вычислительных ресурсов персонального компьютера. Как правило, ПК способен регистрировать сигналы более 10 радиопередатчиков [UltraMSK].

AARDDVARK

Антарктико-арктическая сеть по исследованию динамики радиационных поясов с помощью атмосферного ОНЧ-радиоизлучения (AARDDVARK) обеспечивает сеть непрерывных наблюдений нижней ионосферы в полярных регионах [Clilverd, 2009]. Сеть состоит из 10 регистраторов, принимающих радиосигналы ОНЧ-НЧ-диапазонов [AARDDVARK]. Радиотрассы охватывают области Арктики и Антарктики. Большинство из приемников AARDDVARK регистрируют фазу и амплитуды узкополосных радиосигналов с модуляцией MSK. Амплитудным изменениям уделено больше внимания, т.к. при проведении

анализа на больших периодах (несколько суток) возникают проблемы детектирования и интерпретации фазовых вариаций. Считается, что причинами регистрируемых фазовых вариаций могут быть как геофизические процессы, так и ошибки детектирования модулированных сигналов. Система включает в себя приемники: OmniPAL (наиболее распространены), UltraMSK и VELOX. Приемная система обычно состоит из двух ортогональных рамочных антенн. Члены AARDDVARK, а также сторонние пользователи, могут обмениваться данными. Основным недостатком AARDDVARK является отсутствие покрытия территорий Тихого океана и Северной Азии [Wendt et al., 2024].

Южноамериканская сеть ОНЧ-приемников SAVNET

Южноамериканская сеть ОНЧ-приемников SAVNET состоит из 7 приемных станций [Raulin et al., 2009]: три станции расположены в Бразилии, две – в Перу, одна – в Аргентине и еще одна – в Антарктиде (станция EACF). Приемники выделяют амплитудно-фазовые вариации сигналов передатчиков NDK (Северная Дакота, США), NPM (Гавайские острова), NAA (Катлер, США), NLK (Джим-Крик, США), NAU (Пуэрто-Рико). Каждый приемник состоит из двух скрещенных рамок и штыревой антенны. Сигналы усиливаются и оцифровываются внешней звуковой картой. Подстройка опорной частоты звуковой карты осуществляется с помощью секундных импульсов PPS, подаваемых от приемника GPS. Импульсы PPS также синхронизируют работу всей системы [Raulin et al., 2010; Raulin et al, 2011; Raulin et al, 2013].

Комплекс ОНЧ-НЧ-регистрации на полигоне Михнево ИДГ РАН

На геофизическом полигоне Михнево (55° с.ш., 38° в.д.) Института динамики геосфер РАН регистрируются ОНЧ-НЧ-радиосигналы. Применяется супергетеродинный приемник Rhode&Schwarz ESCI настроенный на регистрацию электрической составляющей поля 10 – 160 кГц (ширина полосы 200 Гц). Приемная антенна – вертикальный штырь высотой 35 м. Результат измеренных значений амплитуд представляется в виде таблицы с полями частота и время. Сигнал от вертикального штыря (параллельно с приемником Rhode&Schwarz ESCI) и от скрещенных рамочных антенн (север-юг и восток-запад) после

предварительного усиления подается на магнитометр ADU-07e Metronix (параллельные АЦП, частота дискретизации 65536 Гц, 24 разряда). Для синхронизации по времени используется GPS-приемник (точность PPS ± 30 нс). Результат измерения ADU-07e – двоичные данные, объем около 45 ГБ в сутки. Данные передаются на сервер, выделение амплитуд и фаз ОНЧ-НЧ-сигналов происходит при постобработке [Ряховский, 2014; Гаврилов и др., 2017]. Применяется метод реконструкции фазовых переходов.

ОНЧ-интерферометр ИРНТУ

Иркутским национальным исследовательским техническим университетом изготовлен и установлен в Иркутской области трехэлементный ОНЧ-интерферометр [Полетаев, Ченский, Токмачев, 2018]. Ортогональные рамочные антенны принимают радиосигнал. После предварительного усиления (46 дБ) сигнал фильтруется (полоса пропускания: 16 – 28 кГц), оцифровка происходит на АЦП E14-140M (14 разрядов, частота дискретизации: 100 кГц на канал, используется 2 канала). Для тактирования каждого АЦП и запуска сбора данных используются GPS/ГЛОНАСС приемники. Обеспечивается привязка к единой шкале времени, предельная кратковременная нестабильность частоты синхроимпульсов за 1 секунду составляет $8 \cdot 10^{-8}$ [Tokmachev et al., 2014]. Определяются вариации амплитуды и фазы ОНЧ-радиосигналов с манипуляцией частоты с минимальным сдвигом (MSK и GMSK). Записываются узкополосные данные (амплитуды и фазы ОНЧ-сигналов) и широкополосный сигнал во всей рабочей полосе приемника. Объем данных составляет 276 МБ за сутки.

Для определения вариаций амплитуды и фазы, принимаемых ОНЧ-сигналов с модуляцией MSK и GMSK, выполняется отдельное когерентное детектирование радиоимпульсов логических нулей и единиц двумя квадратурными демодуляторами. Входной сигнал перемножается с опорными сигналами на частотах, соответствующих логическому нулю (пониженная частота) и единице (повышенная частота), а после результат подвергается низкочастотной фильтрации для подавления высоких частот, получающихся при перемножении. Анализ производится за интервал времени много больший периода одного бита

информации. Амплитуда сигнала на выходе представляется в виде суммы квадратного корня из суммы квадратов синфазной и квадратурной компонент нулевых бит и квадратного корня из суммы квадратов синфазной и квадратурной компонент единичных бит. Для корректировки фазы включены еще два квадратурных детектора с задержкой на $0,5\pi$. Значения фазы определяются как арктангенс отношения квадратурной компоненты к синфазной отдельно на частотах, соответствующих логическому нулю и единице. Так же определяется фаза через арктангенс отношения задержанных на $0,5\pi$ квадратурной компоненты к синфазной отдельно на частотах, соответствующих логическому нулю и единице. Определяются интервалы расположения максимумов в распределениях фазы логических нулей и фазы логических единиц. Эти номера интервалов усредняются и умножаются на ширину кармана, в результате получается фаза сигнала. Аналогично оценивается фаза смещенной характеристики. И, наконец, в решающем устройстве сравниваются дисперсии фазы и смещенной фазовой характеристики, по наименьшей дисперсии на выходе получается значение фазы, либо скомпенсированное прибавлением $0,5\pi$ значение смещенной фазовой характеристики [Poletaev, Chensky, Tokmachev, 2018].

PWING – сеть наземной поддержки измерений спутника Arase (ERG)

Для исследования глобального распределения и оценки динамических изменений параметров плазмы и электромагнитных волн во внутренней магнитосфере Земли Японским агентством аэрокосмических исследований создан межрегиональный проект Exploration of energization and Radiation in Geospace: ERG (исследование процессов возбуждения и радиации в околоземном космическом пространстве). Состав проекта ERG: группа спутниковых наблюдений (спутник Arase, запущен в декабре 2016 г.), сеть наземных наблюдений, а также группа комплексного анализа данных и моделирования [Miyoshi et al., 2018]. Проект Study of dynamical variation of particles and waves in the inner magnetosphere using ground-based network observations: PWING (исследование динамики частиц и волн во внутренней магнитосфере сетью наземных наблюдений) как часть проекта ERG организован с апреля 2016 г.

Приборы расположены на станциях (около 60° северной геомагнитной широты) в Канаде, Исландии, Финляндии, России и на Аляске. Приборная база состоит из цифровых камер всего неба, СНЧ-ОНЧ-регистраторов, индукционных магнитометров и риометров [Shiokawa et al., 2017].

В состав каждого регистратора СНЧ-ОНЧ-сигналов по проекту PWING входят 2 ортогональные рамочные антенны (север – юг и запад – восток); предварительный усилитель; приемник GPS; усилитель мощности; АЦП; персональный компьютер (ПК). Для минимизации помех от электросетей приемные антенны и предусилитель располагаются на удалении до 300 м от основного здания с регистрирующей аппаратурой. Сигналы от антенн после усиления подаются на 2 входа АЦП, а на третий вход АЦП поступает синхронизирующий секундный импульс PPS от GPS. Частота дискретизации АЦП составляет 40 кГц, разрядность 16 бит. Системное время ПК корректируется либо по приемнику GPS, либо по серверу точного времени. Каждые 10 минут в течение 9 минут 50 секунд проводится запись принимаемых сигналов на внешний жесткий диск 10 ТБ. Параллельно большой объем первичных данных (около 700 ГБ в месяц) обрабатываются на втором ПК и сохраняются файлы с данными о форме сигнала и динамические спектры в диапазоне СНЧ-ОНЧ на локальном диске (объем данных 25 ГБ в месяц).

С 24 октября 2010 г. на полигоне Атабаска ($54,60^\circ$ с.ш., $246,36^\circ$ в.д., Университет Атабаски, Канада) и с 21 апреля 2017 г. на полигоне Маймага ($63,06^\circ$ с.ш., $129,56^\circ$ в.д., ИКФИА СО РАН) в рамках проекта PWING организована регистрация сигналов радиопередатчиков диапазонов ОНЧ и НЧ. Применяется вертикальная штыревая антенна (высота 2 м), после усиления сигнал поступает на АЦП (частота дискретизации 200 кГц, 16 бит), ПК с программным обеспечением (ПО) проводит выделение амплитуды и фазы сигналов радиостанций, производится запись данных на диск (около 15 ГБ в год). Синхронизация времени регистраторов и стабилизация частоты дискретизации АЦП, необходимая для выделения фазы сигналов, организована с помощью GPS [Adachi et al., 2008].

Таким образом, развитие ОНЧ-регистраторов получило в направлении минимизации аналоговых функций приемника, организации регистрации на основе модулей серийного производства.

1.7.2 Регистрация ОНЧ-радиосигналов на спутниках

Французский низкоорбитальный микроспутник DEMETER (Detection of Electro-Magnetic Emissions Transmitted from Earthquake Regions) имеет высоту орбиты 710 км, склонение $98,23^\circ$. Аппарат был запущен 29 июня 2004 г. для изучения ионосферных неоднородностей и их связи с сейсмической и антропогенной активностью. На борту измерялось: 3 электрические (от постоянного тока до 3,5 МГц) и 3 магнитные (от нескольких Гц до 18 кГц) компоненты электромагнитного поля, определялись электронная плотность и температура ионосферной плазмы. Спутник совершал 14 витков в день и непрерывно измерял на широтах от -65° до $+65^\circ$. Над сейсмически активными зонами включался режим с максимальной скоростью записи (1,7 Мбит/с). Проект был официально завершён 9 декабря 2010 г. [DEMETER data server].

Микроспутник «Чиби́с-М» (высота орбиты: 500 км, наклонение: $51,6^\circ$) предназначен для исследования процессов при грозовых разрядах. Запущен 23 января 2011 г. В состав аппаратуры входят: рентген – гамма детектор (50 – 500 кэВ); ультрафиолетовый детектор (300 – 450 нм); радиочастотный анализатор (20 – 50 МГц); камера оптического диапазона (пространственное разрешение 300 м); магнитно – волновой комплекс диапазона крайне низких частот (КНЧ) и ОНЧ (0,1 – 40 кГц) [Чиби́с-М. О проекте]. За период работы более 2 лет спутник зарегистрировал несколько сотен событий, связанных с короткими (от десятков мкс до сотен мс) и мощными (сотни джоулей) грозовыми разрядами. Данные о КНЧ-ОНЧ излучениях в спокойных и возмущенных геомагнитных условиях позволили выделить специфические характеристики ряда ионосферно-магнитосферных резонансов [Зеленый и др., 2015].

На борту спутника Arase (проект ERG) Японского агентства аэрокосмических исследований с 2017 г. (геостационарная орбита, перигей 460 км, апогей 32110 км, наклонение 31°) регистрируются интенсивности электрического (от постоянного тока до 10 МГц) и магнитного (от нескольких Гц до 100 кГц) полей во внутренней магнитосфере Земли [Miyoshi et al., 2018; Kasaba et al., 2017; Ozaki et al., 2018]. В магнитосфере проводились эксперименты по передаче ОНЧ-радиоволн. 4 сентября 2019 г. ОНЧ-сигналы были успешно переданы на расстояние 410 км от спутника DSX на Arase. Возможность напрямую излучать ОНЧ-волны в околоземное пространство открыло новый способ изучения динамики радиационных поясов [McCollough et al., 2022].

1.8 Основные выводы к главе 1

На основе обзора основных свойств верхней атмосферы, источников электромагнитных сигналов ОНЧ-диапазона, особенностей распространения ОНЧ-радиосигналов можно сделать следующие выводы:

1. Малое затухание ОНЧ-радиоволн при распространении в волноводе Земля – ионосфера позволяет проводить дистанционный мониторинг грозовой активности. При этом необходимо учитывать особенности как мировых, так и локальных грозовых очагов. В флуктуационную составляющую ОНЧ-фона вносят вклад атмосферники от дальних грозовых очагов. Разряды ближних молний вносят вклад в импульсную составляющую радишума.

2. Узкополосные сигналы ОНЧ-радиопередатчиков широко используются для мониторинга ионосферы, исследования солнечно-земных связей. Фаза ОНЧ-сигналов является наиболее чувствительным параметром. Выделение фазовых вариаций, принимаемых ОНЧ-радиосигналов в которых используется модуляция является сложной задачей, требующей знания конкретного вида модуляции и алгоритмов работы передающих радиостанций.

3. В ОНЧ-диапазоне в режиме амплитудной манипуляции CW работает отечественная фазовая радионавигационная система РСДН-20 «Альфа».

Передатчики находятся вблизи Комсомольска-на-Амуре (Хабаровска), Новосибирска, Мурманска и Краснодара. Каждый передатчик последовательно излучает радиоимпульсы на частотах: 11,904, 12,649 и 14,881 кГц. Длительность радиоимпульсов 0,4 с и паузы по 0,2 с исключают перекрытие радиосигналов в любой точке рабочей зоны. Такой частотно-временной алгоритм позволяет проводить регистрацию амплитуды и фазы сигналов РСДН-20, при этом во время пауз на этих же частотах регистрировать мощность ОНЧ-радишума.

4. Для упрощенного описания распространения ОНЧ в волноводе Земля – ионосфера применяется приближение геометрической оптики. Для расстояний не более 4000 км достаточно учитывать не более 4 лучей. Метод нормальных волн более подходит для описания распространения ОНЧ на большие расстояния. Конечное число мод, при которых может распространяться энергия волны, определяется геометрией (эффективной высотой) волновода. Следует учитывать кривизну Земли, конечную величину проводимости верхней и нижней границ волновода, а также анизотропию ионосферы под влиянием геомагнитного поля. Моды TE и TM при распространении в реальном волноводе преобразуются в квази-TE и квази-TM. На частотах около 10 кГц днем при удалении более 2000 – 4000 км основной вклад вносит первая мода. Наблюдается эффект невзаимности: минимальное затухание квази-TM_m волны при распространении с востока на запад, максимальное затухание – с запада на восток. Для квази-TE_m волн, наоборот, минимальное затухание при распространении волн с запада на восток, а максимальное – с востока на запад. Коэффициенты затухания и фазовые скорости квази-TM₁ и квази-TM₂ волн для радиотрассы с ледовым покровом (малая проводимость) сближаются: условия близкие к вырождению мод. Отмечено, что проводимость Земли оказывает меньшее влияние на коэффициенты затухания квази-TE₁ и квази-TE₂ нормальных волн. Параметры ионосферы влияют на распространение ОНЧ в волноводе Земля – ионосфера более существенно, чем параметры земной поверхности.

5. Применяемые модели ионосферы должны проходить адаптацию параметров по экспериментальным данным. Эмпирические модели ионосферы

являются достаточно простым инструментом, однако могут давать противоречивые результаты. Дефицит экспериментальных данных в условиях возмущений не позволяет моделировать ионосферу с необходимой точностью.

6. Современные наземные регистраторы ОНЧ-радиосигналов имеют минимальный набор аналоговых функций. Регистрация организована на основе модулей серийного производства. Синхронизация режимов работы приемников-регистраторов и радионавигационных систем может быть организована с помощью приемников – часов ГНСС, вырабатывающих секундные импульсы, способных стабилизировать тактовые генераторы АЦП для проведения фазовых измерений. Эффективность мониторинга повышается с увеличением площадей, охваченных сгущением сети радиотрасс (как с помощью повышения числа ОНЧ-радиостанций, так и создания сети синхронно работающих разнесенных регистраторов). Остается проблема ОНЧ-мониторинга с высоким разрешением по времени больших труднодоступных территорий Северной Азии. Регистрация ОНЧ-сигналов на отдельных спутниках не позволяет проводить околоземный мониторинг с большим пространственным разрешением, является более затратным методом.

ГЛАВА 2. Регистратор амплитуды и фазы сигналов радиопередатчиков и мощности радишума ОНЧ-диапазона

Результаты, представленные во второй главе, опубликованы в [Дуюкова, Козлов, Корсаков, 2018; Козлов и др., 2013; Каримов и др., 2016; Корсаков, Козлов, Павлов, 2021]. Получено свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ [Свидетельство № 2022666143].

В г. Якутске ($62,02^\circ$ с.ш., $129,7^\circ$ в.д.) с 2009 года при участии автора в непрерывном режиме организована регистрация сигналов радиотехнической системы дальней навигации (РСДН-20) «Альфа». Блок-схема регистратора представлена на рисунке 2.1.

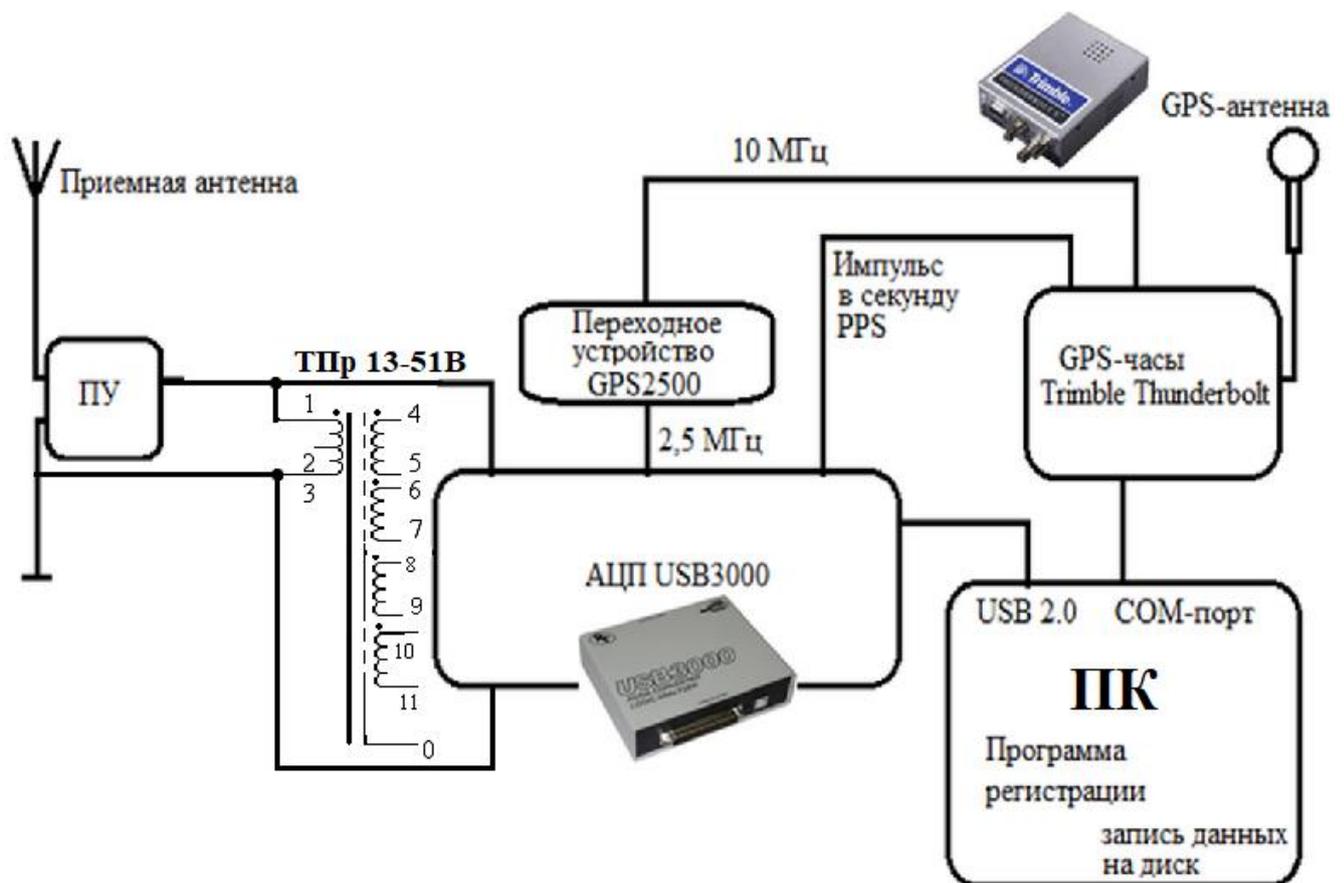


Рисунок 2.1 – Блок-схема регистратора амплитуды и фазы сигналов радиопередатчиков и мощности радишума ОНЧ-диапазона

Радиосигнал принимается на вертикальную штыревую антенну (действующая высота 2 м). Под антенной расположен предварительный усилитель (ПУ), после предварительного усиления сигнал по коаксиальной кабельной линии поступает в здание на первичную обмотку трансформатора ТПр 13-51В (контакты 1 и 3). Трансформатор применяется для гальванической развязки одновременно подключаемых нескольких регистраторов к используемому приемному тракту. Сигнал с первичной обмотки трансформатора поступает на вход 14-ти разрядного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) USB 3000. Данные с АЦП являются целыми знаковыми двухбайтовыми числами от -8000 (соответствует напряжению -5В) до +8000 (соответствует +5В на входе канала). Используется подключение к АЦП в виде однофазного источника сигналов (не инвертирующий вход X1) [ООО «Р-Тех»; Устройство USB3000]. Коэффициент передачи приемного тракта (ПУ с нагрузкой на первичную обмотку ТПр 13-51В) в полосе частот 4 – 50 кГц составляет 27 дБ. Привязка к абсолютному времени UTC и высокостабильная частота дискретизации АЦП, необходимые для регистрации фазы радиосигналов и запуска сбора данных в соответствии с режимом работы радиопередатчиков организованы при помощи 12 канального приемника GPS с внутренним генератором, обладающим двойной термостабилизацией (GPS Disciplined Clock Trimble Thunderbolt E). Точность PPS относительно UTC ± 15 нс (одна сигма), точность 10 МГц составляет $1,16 \cdot 10^{-12}$ после суток работы (три сигма) [Thunderbolt E GPS Disciplined Clock]. В составе общей ошибки систем GPS, ошибки моделирования атмосферы могут составлять до 50 нс (одна сигма) [ThunderBolt GPS Disciplined Clock. User Guide, 2003]. Внешняя частота дискретизации 2,5 МГц для АЦП получается делением синхронизированного гармонического сигнала GPS-часов (10 МГц) переходным устройством – делителем, подключенным ко входу внешней дискретизации АЦП.

Корректировка времени запуска регистрации ведется по приемнику GPS, выделение амплитуды и фазы сигналов РСДН-20 на частотах 16/1344 МГц, 17/1344 МГц (в программе вместо $F2 = 17/1344$ МГц используется близкая частота $F2^* = 1/79$ МГц $\approx 12658,228$ Гц) и 20/1344 МГц с помощью дискретного

преобразования Фурье (ДПФ), визуализация этих значений и запись времени, амплитуды (относительные единицы) и фазы (от 0° до 360°) в часовые бинарные файлы на локальный диск ЭВМ производится с помощью разработанной программы [Свидетельство № 2022666143]. Особенность методики состоит в том, что в периоды паузы между излучением радиоимпульсов РСДН-20 программа позволяет регистрировать мощность радишума в узкой полосе на частотах 16/1344 МГц, 1/79 МГц и 20/1344 МГц. Согласно рекомендаций Международного союза электросвязи [Recommendation ITU-R SM.1753-2 (09/2012), 2013] на частотах ниже 30 МГц частота (или полоса) измерения не остается свободной в течение всего периода измерений. Измерения рекомендуется проводить в небольшой полосе частот, либо на нескольких частотах.

2.1. Алгоритм работы программы регистрации

Запуск регистрации управляется секундными импульсами от GPS-часов. При каждом новом запуске программы регистрация радиосигналов начинается во время, ближайшее кратное 126 секундам от начала суток (UTC). Это обеспечивает отсутствие сдвига как принимаемых радиосигналов в пакете излучения опорных станций (см. пункт 1.4), так и начальных фаз радиосигналов навигационной системы. Действительно, 126 с является наименьшим общим кратным интервалом времени (в целых секундах) как для всех трех периодов исследуемых радиосигналов ($93750 \cdot 16/F1 = 93750 \cdot 17/F2 = 93750 \cdot 20/F3 = 126$ с), так и цикла излучения радиоимпульсов опорными станциями ($35 \cdot T_{\text{ц}} = 35 \cdot 3,6 \text{ с} = 126 \text{ с}$).

Период дискретизации АЦП $DtAdt$, в соответствии с частотой дискретизации $ADT_FREQUENCY = 2,5$ МГц, составляет 0,4 мкс. Для ДПФ используется прямоугольное окно, в котором для каждой частоты должно укладываться целое число периодов. Длительность прямоугольного окна ДПФ $T = 2688$ мкс. Таким образом, ширина главного лепестка АЧХ по нулевому уровню для данного прямоугольного окна: $\Delta F0 = 2/2688 \text{ мкс} = 744,05 \text{ Гц}$, что определяет частотное разрешение. Так как в периоде $T2 = 1/F2$ число отсчетов по 0,4 мкс

равно 197,647, то для повышения точности вычислений, в окне ДПФ используются двойные периоды. Таким образом, в выбранном прямоугольном окне преобразования содержится 16, 17 и 20 двойных периодов.

Совпадение частоты сигнала с сеткой спектральных отсчетов будет в случае если в окне ДПФ укладывается целое число периодов сигнала. При этом получаем только отсчет на этой частоте по амплитуде, соответствующий амплитуде сигнала, остальные спектральные отсчеты будут равны нулю. Если частота сигнала не совпадает ни с одной частотой из сетки спектральных отсчетов, то спектр сигнала «размывается», так как дискретизация производится уже не в нулях спектра функции окна, и все боковые лепестки проявляются в спектре, при этом амплитуда спектральных отсчетов также уменьшается [Дискретное преобразование Фурье]. Первый лепесток спектральной плотности энергии $W(f)$ составляет 90,2% всей энергии прямоугольного сигнала [Баскаков, 2000]. Данным свойством также обладает спектральная плотность энергии сигнала (или реализации радишума) ограниченного во времени T (прямоугольное окно ДПФ). Анализируемый сигнал можно заменить другим процессом в пределах полосы $f_{эфф}$ с постоянной эффективной плотностью энергии, соответствующей максимальной плотности энергии реального сигнала W_{max} (в нашем случае ограниченного по времени прямоугольного окна ДПФ). Из условия равенства энергии сигнала, сосредоточенной в первом лепестке $W(f)$ и эквивалентной энергии $W_{max} \cdot f_{эфф}$ [Баскаков, 2000] определим, что для прямоугольного окна длительностью $T = 2688$ мкс, эффективная полоса спектра $f_{эфф} = 0,9/T = 334,8$ Гц.

Предполагается, что мощность радишума в узкой полосе частот можно охарактеризовать значением амплитуды спектральной составляющей. Для определения мощности радишума прямоугольному окну длительности 2688 мкс соответствует эффективная полоса $f_{эфф} = 334,8$ Гц.

Преобразования по косинусам вычисляются по формуле:

$$a = \sum_{i=0}^{n-1} (x_i \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot F_k \cdot t_i)), \quad (2.1)$$

где F_k – одна из трех известных частот разложения ($F1$, $F2^*$ и $F3$);

x_i – отсчет оцифрованного принимаемого сигнала;

t_i – временной отсчет в прямоугольном окне ДПФ;

i – индекс меняется от 0 до n (числа отсчетов в прямоугольном окне ДПФ).

С учетом периодичности косинуса формула (2.1) преобразуется:

$$a = \sum_{j=0}^{POINT_TWO_PERIOD_X-1} \left(\left(\sum_{i=0}^{NumPeriodInWin-1} x_{i,j} \right) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot F_k \cdot t_j) \right), \quad (2.2)$$

где i – индекс меняется от 0 до $NumPeriodInWin$ (число двойных периодов в прямоугольном окне ДПФ);

j – индекс меняется от 0 до $POINT_TWO_PERIOD_X$ (значение равно числу отсчетов АЦП в двойном периоде).

Таким образом, число операций умножения, занимающее большое время при вычислении, уменьшается в значение, равное числу двойных периодов в окне ДПФ $NumPeriodInWin$. Аналогично происходит и разложение по синусам (2.3):

$$b = \sum_{j=0}^{POINT_TWO_PERIOD_X-1} \left(\left(\sum_{i=0}^{NumPeriodInWin-1} x_{i,j} \right) \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot F_k \cdot t_j) \right). \quad (2.3)$$

Предварительное создание таблицы косинусов и синусов заведомо известных частот также ускоряет процесс ДПФ. Амплитуда сигнала A на частоте F_k определяется из выражения (2.4):

$$A = \sqrt{a^2 + b^2}. \quad (2.4)$$

Фазовая задержка φ регистрируемого сигнала на частоте F_k определяется по выражению (2.5):

$$\varphi = \arctg\left(\frac{b}{a}\right). \quad (2.5)$$

Значения параметров, используемых программой при обработке регистрации представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Значения параметров, используемых программой

Параметр	Название параметров в программе	Основные значения	1я частота $F1$	2я частота $F2$	3я частота $F3$
Коэффициент кратности	$K_FREQUENCY_X$		16	17	20
Частоты радиосигналов, Гц	$Freq1, Freq2, Freq3$		16000000 /1344 $\approx 11904,762$	17000000 /1344 $\approx 12648,809$ (используется: 12658,228)	20000000 /1344 $\approx 14880,952$
Периоды радиосигналов, мкс	$Period1, Period2, Period3$		84	79,059 (используется: 79)	67,2
Временное разрешение АЦП, мкс	$DtAdt$	0,4			
Число отсчётов в двойном периоде радиосигналов	$POINT_TWO_PERIOD_X$		420	395,294 (используется: 395)	336
Длительность прямоугольного окна ДПФ, мкс	$WinDuration = PeriodX * CoefX * 2$	2688	2688	2687,999 (используется: 2688)	2688
Число двойных периодов в окне ДПФ	$NumPeriodInWin$		16	17	20
Сдвиг фазы в окне ДПФ, градусы			Без сдвига	9,107(142857) Используется: 9,1	Без сдвига
Сдвиг фазы за 18 секунд, градусы	$deltPh16, deltPh17, deltPh20$		-257,14	-36,46	-51,43
Сдвиг фазы за 1 час, градусы	$4deltPh16, 4deltPh17, 4deltPh20$		-308,57	-91,14	-205,71
Сдвиг фазы при наступлении 21:00 UT, градусы			207	-54,71	258
Число окон ДПФ в половине FIFO буфера	$NUM_WIN_IN_HALF_FIFO$	80			
Размер половины FIFO буфера, слов	$POINT_HALF_FIFO = NumWin \cdot WinPoint$	525 * 1024			
Длительность половины FIFO буфера, мкс	$DurFIFO = POINT_HALF_FIFO \cdot DtAdt$	215040			
Число периодов радиосигналов в половине FIFO буфера			2560	2722,00002 (используется: 2722)	3200
Число половин FIFO буфера во всей реализации	NUM_HALF_FIFO	80			

Для частоты $F2 \approx 12648,809$ Гц (в программе используется $F2^* = 1/79$ МГц $\approx 12658,228$ Гц) следует учитывать остаток: $197,647 \cdot 2 - 197,5 \cdot 2 = 0,294$ отсчета на 2 периода, что составляет ошибку $0,294 \cdot 17 = 5$ отсчетов в прямоугольном окне

ДПФ. Ошибка соответствует задержке 2 мкс или $9,1^\circ$ на каждый результат ДПФ. В соответствии с временным разрешением АЦП ($DtAdt = 0,4$ мкс) при оцифровке число отсчетов в двух остальных периодах анализируемых сигналов принимает целые значения, это означает, что извлечение фазы на частотах $F1$ (16/1344 МГц) и $F3$ (20/1344 МГц) за каждый результат ДПФ происходит без дополнительных сдвигов.

Так как периоды анализируемых сигналов РСДН-20 не кратны 18-ти секундному интервалу регистрации, то при обработке каждого 18-ти секундного пакета и каждого нового часа для соответствующей частоты необходимо вносить фазовую поправку (см. таблицу 2.1). В соответствии с режимом работы РСДН-20 в конце суток московского времени происходит сдвиг фаз сигналов навигационной системы (см. пункт 1.4), что следует учитывать при обработке.

Размер половины FIFO буфера АЦП USB3000 (*POINT_HALF_FIFO*) вычисляется как $N \cdot 1024$ слов (1 слово соответствует 2 байтам), а максимальный размер FIFO буфера достигается при $N = 1024$. Выбирается максимальное значение N , в которое входит целое число прямоугольных окон ДПФ. Максимальному целому числу прямоугольных окон ДПФ *NUM_WIN_IN_HALF_FIFO* соответствует значение 80, при этом $N = 80 \cdot 6720 / 1024 = 525$. Т.е. размер половины FIFO буфера *POINT_HALF_FIFO* составляет $525 \cdot 1024$ слов. Целое число половин FIFO буфера на интервале 18 секунд *NUM_HALF_FIFO* = 80. Длительность половины FIFO буфера $DurFIFO = POINT_HALF_FIFO \cdot DtAdt = 525 \cdot 1024 \cdot 0,4$ мкс = 215040 мкс. Длительности всей реализации соответствует значение $80 \cdot 215040 = 17203200$ мкс. Число результатов ДПФ: 17203200 мкс / 2688 мкс = 6400. За время $18000000 - 17203200$ мкс = 796800 мкс результаты ДПФ (вычисленные амплитуды и фазы на частотах 16/1344 МГц, 1/79 МГц и 20/1344 МГц) записываются на локальный диск ЭВМ.

Алгоритм программы можно разделить на этапы.

1. Строится таблица значений синусов и косинусов для каждой частоты с временным разрешением $DtAdt = 0,4$ мкс на интервале от 0 до $2T_k$, где T_k – период соответствующего сигнала радиостанции.

2. При первом запуске программы по приемнику-часам GPS определяется время старта регистрации. Производится синхронизация времени по данным GPS-часов, передаваемым через COM-порт (синхронизация по данным пакета TSIP [ThunderBolt GPS Disciplined Clock. User Guide, 2003]). Определяется время повтора фазы: приход следующего прямоугольного секундного импульса (PPS) от GPS-часов укажет на время ближайшее кратное 126 секундам от 00:00:00 UTC. Старт регистрации осуществляется по приходу этого секундного импульса PPS. В штатном режиме очередная регистрация запускается после каждого восемнадцатого секундного импульса GPS-часов. Переключения между режимами синхронизации, старта и сбора данных происходят программно.

3. Первая половина FIFO буфера заполняется данными за 215040 мкс. Параллельно, пока за такое же время заполняется вторая половина буфера, обрабатывается первая. Смена заполнения/обработка половин FIFO буфера выполняется в цикле от нуля до 80 ($525 \cdot 1024 \cdot 80 \cdot 0,4$ мкс = 17203200 мкс). Обработка данных в половине буфера АЦП заключается в проведении ДПФ. Т.е. строятся три тройных цикла. Внешний цикл обработки, общий для всех частот, меняется от 0 до $NUM_WIN_IN_HALF_FIFO = 80$ (число окон ДПФ в половине FIFO буфера). Средние циклы меняются от 0 до $POINT_TWO_PERIOD_X$ (число отсчетов в двойных периодах сигналов), что равняется 420, 395 и 336 соответственно (см. таблицу 2.1). Внутренние циклы обработки от 0 до числа двойных периодов в окне преобразования $NumPeriodInWin$ (16, 17 и 20 соответственно для каждой частоты). Во внутреннем цикле значения массива данных суммируются через интервал $POINT_TWO_PERIOD_X$. В среднем цикле значения массива данных из внутреннего цикла умножаются на таблицу синусов и таблицу косинусов поочередно, в результате чего строится таблица перемноженных значений, которые складываются поэлементно от 0 до $POINT_TWO_PERIOD_X$. Во внешнем цикле обработки результаты усредняются, путем поэлементного деления сумм на $16 \cdot 420$, $17 \cdot 395$ и $20 \cdot 336 = 6720$ соответственно. Таким образом, получается 80 таблиц значений по синусу и 80 таблиц значений по косинусу (число окон ДПФ в половине FIFO буфера

$NUM_WIN_IN_HALF_FIFO = 80$). Из полученных таблиц получаются 80 значений амплитуд и 80 значений фаз для каждой из трех частот, которые сохраняются в соответствующих массивах. Далее заполняется первая половина FIFO буфера, и параллельно выполняется обработка второй половины, аналогично процессу, описанному выше. В конце всего чтения из АЦП и полной обработки (обработка числа половин FIFO буфера во всей реализации $NUM_HALF_FIFO = 80$) получаются два массива амплитуд и фаз с $80 \cdot 80 = 6400$ значениями для каждой из трех частот.

4. Визуализация данных в окне программы: Дата и Время (ДД-ММ-ГГГГ ЧЧ:ММ:СС); следующий повтор фазы, соответствующий времени прихода следующего секундного импульса PPS который укажет на следующее время кратное 126 секундам от 00:00:00 UTC; результаты расчета 3 массива амплитуд и фаз на каждую частоту (16/1344 МГц, 1/79 МГц, 20/1344 МГц) по 6400 элементов отображаются в виде точек.

5. Сохранение данных на диск происходит за $18000000 - 17203200 = 796800$ мкс. В результате в файл сохраняются пакеты, размером 153602 байта: значения минуты, секунды – по 1 байту, 3 массива амплитуд и фаз (на каждую частоту) по 6400 элемента, при этом каждый элемент массива занимает объем 4 байта. В каждый час регистрации создается новый файл данных двоичной кодировки. В имени файла указывается год, месяц и час создания: aYYYYMMHH.dat. Файлы сохраняются в директорию: C:\RimData\Alpha. Директорию на локальном диске ЭВМ необходимо создать заранее.

6. Переход к пункту 2. Параллельно перед каждой 15-й секундой производится синхронизация времени по передаваемым через COM-порт данным GPS-часов (синхронизация по данным пакета TSIP).

На рисунке 2.2 представлен интерфейс программы регистрации амплитуды и фазы сигналов РСДН-20 на частотах 16/1344 МГц, 1/79 МГц, 20/1344 МГц.

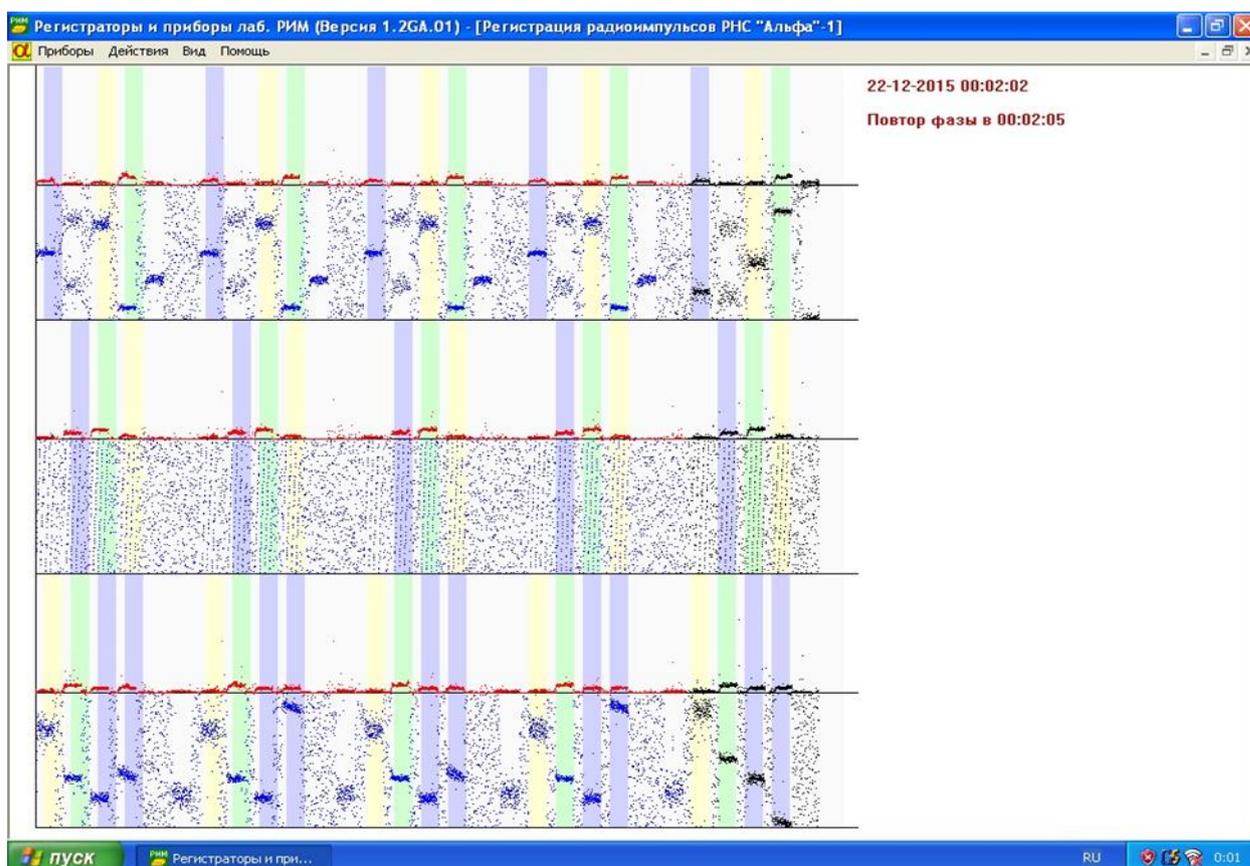


Рисунок 2.2 – Визуализация выделения с помощью ДПФ амплитуды и фазы сигналов РСДН-20 на частотах 16/1344 МГц, 1/79 МГц, 20/1344 МГц

Верхняя панель – амплитуда на частоте 16/1344 МГц; панель ниже – фаза на частоте 16/1344 МГц; третья панель – амплитуда на частоте 1/79 МГц ($\approx 12658,228$ Гц); четвертая панель – фаза на частоте 1/79 МГц ($\approx 12658,228$ Гц); пятая панель – амплитуда на частоте 20/1344 МГц; шестая панель (нижняя) – фаза на частоте 20/1344 МГц. 22.12.2015 работали передатчики, расположенные вблизи городов Краснодар ($45,4^\circ$ с.ш., $38,15^\circ$ в.д.), Новосибирск ($55,75^\circ$ с.ш., $82,45^\circ$ в.д.), Хабаровск ($50,07^\circ$ с.ш., $136,6^\circ$ в.д.) и Мурманск (Ревда, $62,03^\circ$ с.ш., $34,68^\circ$ в.д.).

2.2. Результаты работы приемника-регистратора

Зная режим работы РСДН-20 (см. рисунок 1.3), в записанном бинарном файле для каждой из трех частот (16/1344 МГц, 1/79 МГц и 20/1344 МГц) определяется интервал значений, соответствующий времени излучения

анализируемого радиопередатчика (400 мс). Из середины этого интервала считывается часть длительностью 268,8 мс, соответствующая 100 значениям амплитуд или фаз. Следующие 100 значений для анализа считываются через $T_{\text{ц}} = 3,6$ с (т.е. через 1339 значений ДПФ). По такому же алгоритму для каждой из трех частот вычисляется амплитуда, характеризующая мощность радиошума в то время, когда не излучает ни одна из радиостанций РСДН - 20.

Для оценки мощности собственных радиошумов приемника-регистратора, программа регистрации запускалась при закороченном на общую шину заземления входе предварительного усилителя. По выборкам длительностью 6 минут (10000 значений амплитуд) для частот 11,904, 12,649 и 14,881 кГц был проведен анализ амплитудных распределений собственных радиошумов приемника-регистратора, регистрируемых в узкой полосе ($f_{\text{эфф}} = 334,8$ Гц).

На рисунке 2.3 представлены амплитудные распределения собственных радиошумов приемника-регистратора на частотах 11,904, 12,649 и 14,881 кГц

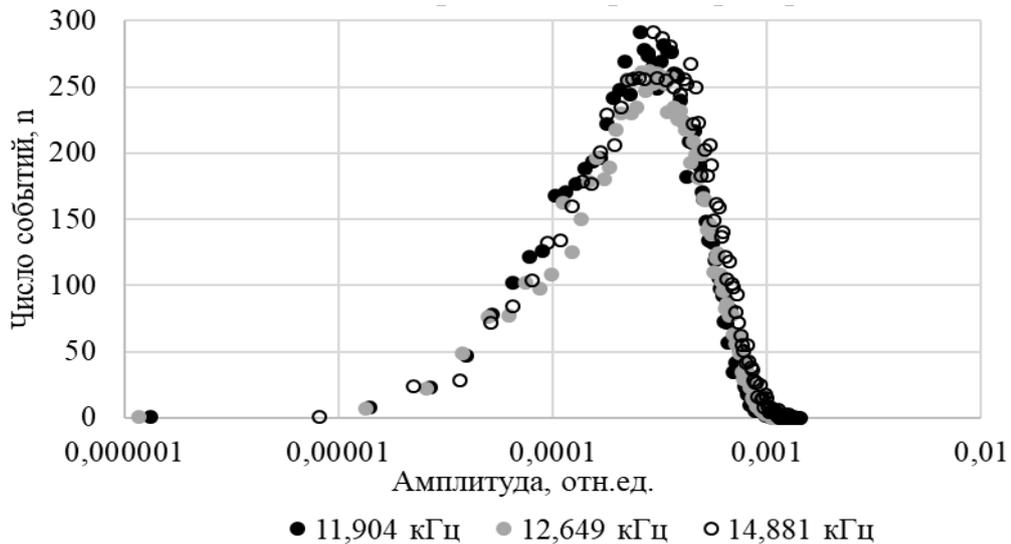


Рисунок 2.3 – Амплитудные распределения собственных радиошумов приемника-регистратора на частотах 11,904, 12,649 и 14,881 кГц

Статистические параметры проанализированных распределений амплитуд собственных радиошумов приемника-регистратора на частотах 11,904, 12,649 и 14,881 кГц представлены в таблице 2.2. Анализ характеристик распределений

собственных ради шумов приемника-регистратора на рабочих частотах (11,904, 12,649 и 14,881 кГц) показал небольшие значения эксцесса (не более 0,227), и небольшой асимметрии в сторону больших значений (не более 0,63).

Таблица 2.2 – Статистические параметры распределений амплитуд собственных ради шумов приемника-регистратора в узкой полосе

Частота, кГц	11,904	12,649	14,881
Среднее арифметическое	$351 \cdot 10^{-6}$	$371 \cdot 10^{-6}$	$396 \cdot 10^{-6}$
Среднеквадратичное отклонение	$184 \cdot 10^{-6}$	$192 \cdot 10^{-6}$	$207 \cdot 10^{-6}$
Стандартная ошибка среднего	$1,84 \cdot 10^{-6}$	$1,92 \cdot 10^{-6}$	$2,07 \cdot 10^{-6}$
Медиана	$331 \cdot 10^{-6}$	$349 \cdot 10^{-6}$	$372 \cdot 10^{-6}$
Мода	$538 \cdot 10^{-6}$	$239 \cdot 10^{-6}$	$121 \cdot 10^{-6}$
Эксцесс	0,227	0,097	0,208
Асимметрия	0,628	0,590	0,621

Оценки доверительных интервалов истинной амплитуды собственного ради шума в генеральной совокупности по уровню значимости $p = 0,05$ для частот 11,904, 12,649 и 14,881 кГц составили $351 \cdot 10^{-6} \pm 3,68 \cdot 10^{-6}$ отн. ед., $371 \cdot 10^{-6} \pm 3,84 \cdot 10^{-6}$ отн. ед. и $396 \cdot 10^{-6} \pm 4,14 \cdot 10^{-6}$ отн. ед. соответственно.

По выборкам длительностью 6 минут (10000 значений амплитуд) был проведен анализ амплитудных распределений сигналов радиостанций и ради шума регистрируемых в Якутске летом и зимой. Интервалы взяты в начале третьего, девятого и семнадцатого часа, отсчитанного по мировому времени (3 UT, 9 UT и 17 UT), что соответствует дневным, вечерним и ночным часам местного времени для Якутска. Время 9 UT в зимний период соответствует прохождению границы «день-ночь» (вечерний терминатор) по радиотрассе Новосибирск – Якутск. Для анализа выбраны сутки в середине июня и декабря 2013 г. в отсутствие геофизических возмущений.

На рисунке 2.4 представлено амплитудное распределение радиосигнала передатчика Новосибирск на частоте 14,881 кГц, зарегистрированного в Якутске 15 июня 2013 г.

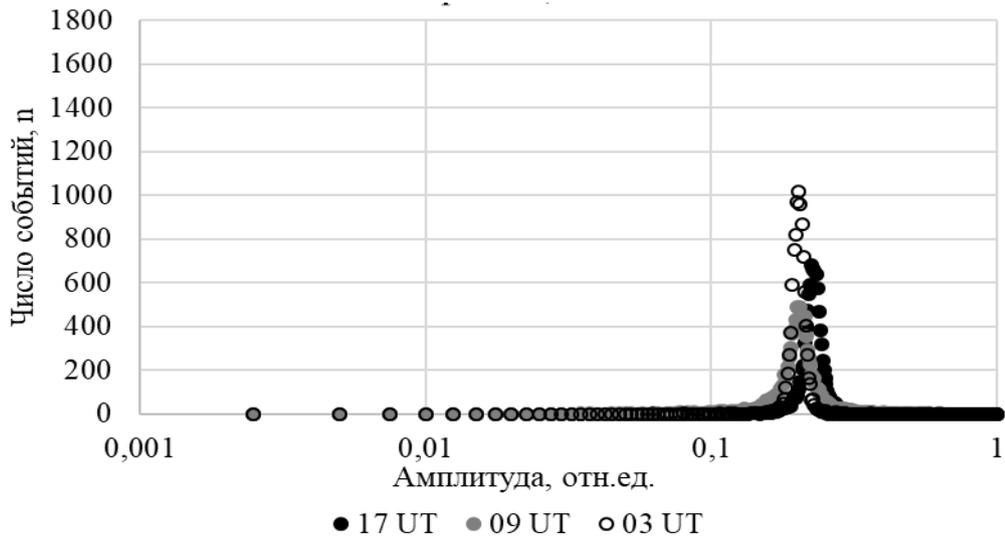


Рисунок 2.4 – Распределение амплитуды радиосигнала Новосибирск (14,881 кГц), зарегистрированного в Якутске 15 июня 2013 г.

На рисунке 2.5 представлено амплитудное распределение радиошума на частоте 14,881 кГц, зарегистрированного в Якутске 15 июня 2013 г.

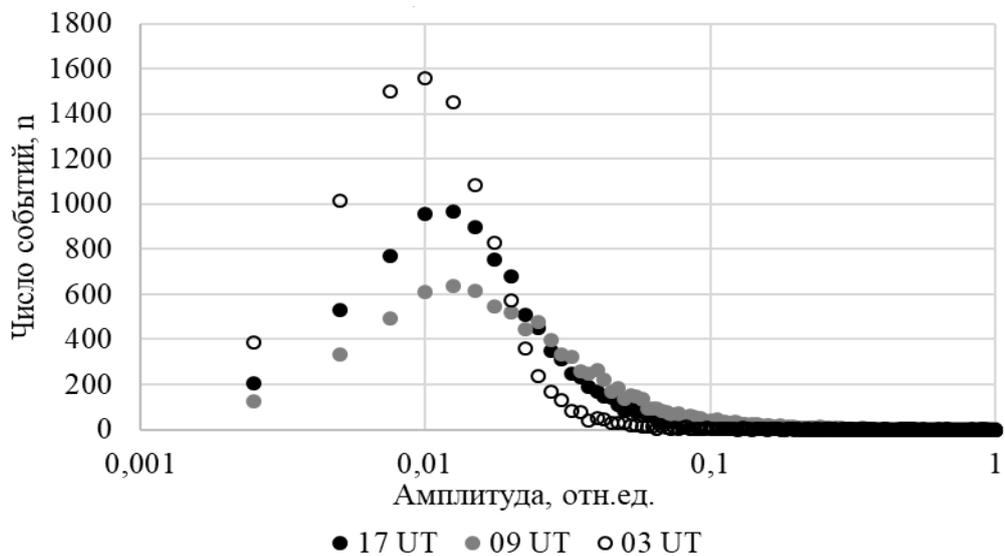


Рисунок 2.5 – Распределение амплитуды радиошума (14,881 кГц, $f_{эфф} = 334,8$ Гц), зарегистрированного в Якутске 15 июня 2013 г.

На рисунке 2.6 представлено амплитудное распределение радиосигнала Новосибирск (14,881 кГц), зарегистрированного в Якутске 17 декабря 2013 г.

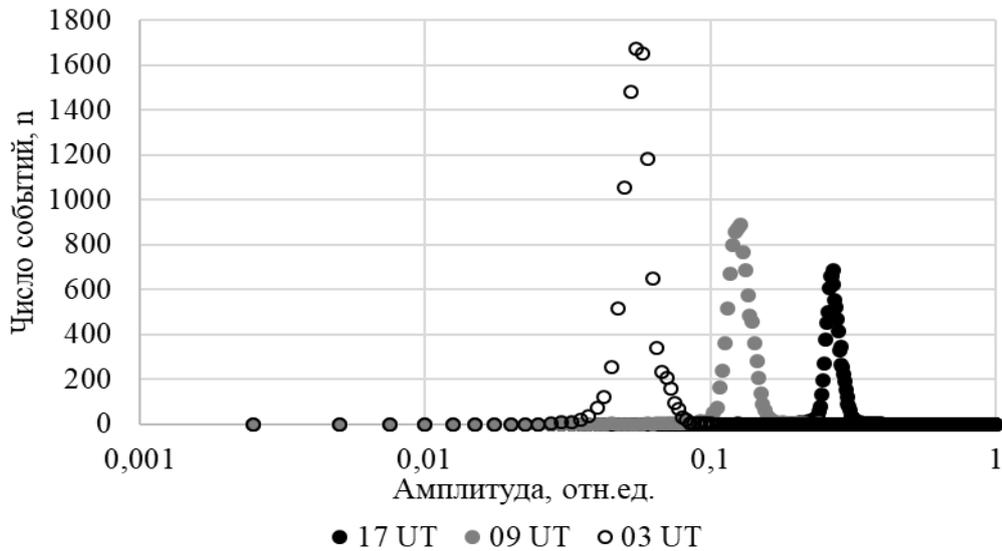


Рисунок 2.6 – Распределение амплитуды радиосигнала передатчика Новосибирск (14,881 кГц), зарегистрированного в Якутске 17 декабря 2013 г.

На рисунке 2.7 представлено амплитудное распределение радиошума на частоте 14,881 кГц, зарегистрированного в Якутске 17 декабря 2013 г.

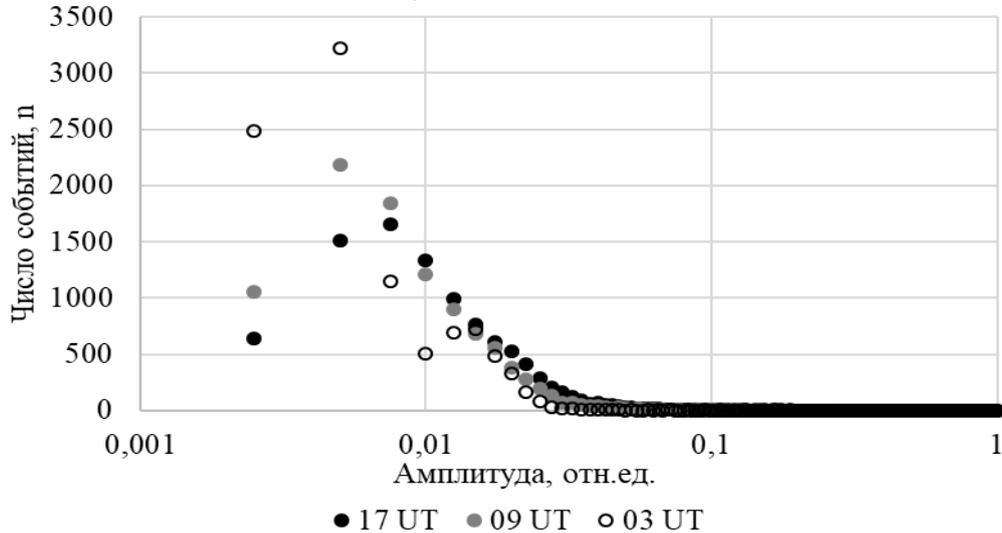


Рисунок 2.7 – Распределение амплитуды радиошума на частоте 14,881 кГц ($f_{эфф} = 334,8$ Гц), зарегистрированного в Якутске 17 декабря 2013 г.

Статистические параметры распределений амплитуд сигналов передатчика Новосибирск на частоте 14,881 кГц представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Статистические параметры распределений амплитуд сигналов передатчика Новосибирск на частоте 14,881 кГц

Сезон	2013.06.15			2013.12.17		
	3	9	17	3	9	17
Среднее арифметическое	0,204	0,232	0,219	0,056	0,128	0,271
Медиана	0,201	0,227	0,204	0,055	0,126	0,267
Мода	0,201	0,230	0,175	0,061	0,137	0,271
Экссесс	284	85	97	1189	1363	762
Асимметрия	14	10	8	28	31	19

Анализ параметров амплитудного распределения узкополосных сигналов радиопередатчиков ОНЧ-диапазона показывает, что среднее, медианное и модовое значения практически совпадают, достигая максимального значения в зимнее время ночью, меняясь в течение суток по величине примерно в 5 раз. Летом величина принимаемого сигнала мало меняется в течение суток и составляет 75% от ночного зимнего. Сезонные изменения амплитуды в дневных условиях распространения ОНЧ-радиосигнала наиболее выражены и составляют повышение на 30% от декабря к июню (3 UT). Ночные значения амплитуды принимаемых сигналов ОНЧ-радиостанций мало меняются в течение сезона.

Статистические параметры распределений амплитуд радишума в узкой полосе ($f_{эфф} = 334,8$ Гц) на частоте 14,881 кГц представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Статистические параметры распределений амплитуд радишума в узкой полосе на частоте 14,881 кГц

Сезон	2013.06.15			2013.12.17		
	3	9	17	3	9	17
Среднее арифметическое	0,017	0,055	0,032	0,008	0,012	0,017
Медиана	0,011	0,026	0,017	0,004	0,007	0,010
Мода	0,012	0,024	0,043	0,003	0,016	0,008
Экссесс	362	116	646	2041	339	254
Асимметрия	15,6	8	18	36	16	13

Анализ параметров амплитудных распределений узкополосных сигналов радиопередатчиков и радишума ОНЧ-диапазона показал наличие как больших

значений эксцесса, так и асимметрии в сторону больших значений, что указывает на то, что распределения амплитуд отличаются от нормального [Дуюкова, Козлов, Корсаков, 2018].

Процентиль 2,5% амплитуд радиошума в узкой полосе на частоте 14,881 кГц для выборки, зарегистрированной 17 декабря 2013 г. в 3 UT (выборка соответствует минимуму суточно-сезонных вариаций), составляет $734 \cdot 10^{-6}$ отн. ед. Указанное значение процентиля 2,5% не выходит за границу доверительного интервала случайного измерения амплитуды собственного радиошума приемника-регистратора на частоте 14,881 кГц $396 \cdot 10^{-6} \pm 414 \cdot 10^{-6}$ отн. ед. (по уровню значимости $p = 0,05$). Процентиль 3,5% регистрируемых амплитуд радиошума в узкой полосе на частоте 14,881 кГц для выборки 17 декабря 2013 г в 3 UT составляет $864 \cdot 10^{-6}$ отн. ед. Процентиль 96,5% случайного измерения амплитуды собственного радиошума приемника-регистратора на частоте 14,881 кГц составляет $817 \cdot 10^{-6}$ отн. ед. Определенные таким образом доверительные интервалы выборок не пересекаются (уровень значимости $p = 0,07$). Уровень собственных радиошумов приемника-регистратора позволяет проводить измерения мощности радиошумов в узкой полосе на частотах РСДН-20.

Для характеристики величин амплитуды и фазы регистрируемых радиосигналов передатчиков и радиошума ОНЧ-диапазона будут использоваться медианные значения (Me), а флуктуации амплитуды и фазы охарактеризованы с помощью квартилей 25% (Q_{w25}) и 75% (Q_{w75}): $Me - Q_{w25}$ и $Q_{w75} - Me$. Это позволит уменьшить влияние импульсных помех большой амплитуды (например, во время летней грозы вблизи приемника). Выбранный подход не противоречит рекомендациям Международного союза электросвязи [Recommendation ITU-R SM.1753-2 (09/2012), 2013].

В записанном бинарном файле определяется интервал значений, соответствующий времени излучения сигнала анализируемого радиопередатчика (400 мс). Из этого интервала считывается интервал длительностью 268,8 мс, соответствующий 100 значениям амплитуд или фаз, не попадающих на фронт или спад радиоимпульса анализируемого радиопередатчика. В этом массиве по 100

значениям вычисляются значения, соответствующие квантилю 25%, медиане и квантилю 75%. Следующие 100 значений для анализа считываются через цикл излучения станций $T_{\text{ц}} = 3,6$ с (через 1339 значений). Таким образом, при обработке разрешение по времени составляет 3,6 секунды. По такому же алгоритму вычисляется амплитуда радиошума в то время, когда не излучает ни одна из радиостанций РСДН - 20. Таким образом мощность радиошума в узкой полосе частот характеризуется в виде значений спектральной плотности амплитуды, соответствующих квантилю 25%, медиане и квантилю 75%.

В результате работы приемника-регистратора в г. Якутске получены устойчивые суточные вариации амплитуды и фазы сигналов радиопередатчиков РСДН-20 («Альфа») и радиошума на трех частотах. На рисунке 2.8 представлены вариации амплитуды радиошума на частоте 11,904 кГц при регистрации в Якутске 30 октября 2014 г.

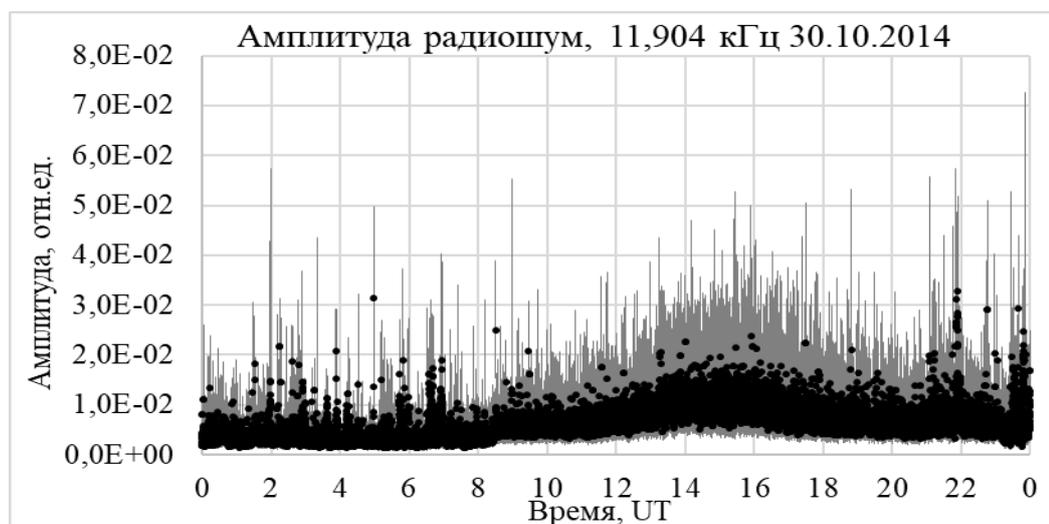


Рисунок 2.8 – Вариации амплитуды радиошума, 11,904 кГц ($f_{эфф} = 334,8$ Гц).

Черные точки – медиана (Me), серая линия – флуктуации: Me – Qw25, Qw75 – Me

Для позднего осеннего периода (30 октября) суточные вариации амплитуды радиошума, характерны отсутствием местной в Якутии (летней) грозовой активности. Зарегистрирован минимум амплитуды радиошума $3,5 \cdot 10^{-3}$ отн. ед. (4 UT) соответствует дневному максимуму затухания ОНЧ-сигнала в волноводе

Земля – ионосфера (23 – 8 UT). Местной ночью (10 – 21 UT) регистрируется максимум амплитуды радиошума $1,26 \cdot 10^{-2}$ отн. ед. (16 UT), что соответствует минимальному затуханию в ночном волноводе. Суточная вариация интенсивности радиошума составила 11 дБ.

Представлены вариации амплитуды и фазы (рисунок 2.9) радиосигнала передатчика Краснодар на частоте 11,904 кГц. 30 октября 2014 г. при распространении радиосигнала вдоль дневной трассы Краснодар – Якутск (4 – 7:30 UT) значения амплитуды и фазы составили $1,38 \cdot 10^{-2}$ отн. ед. и 248° соответственно.

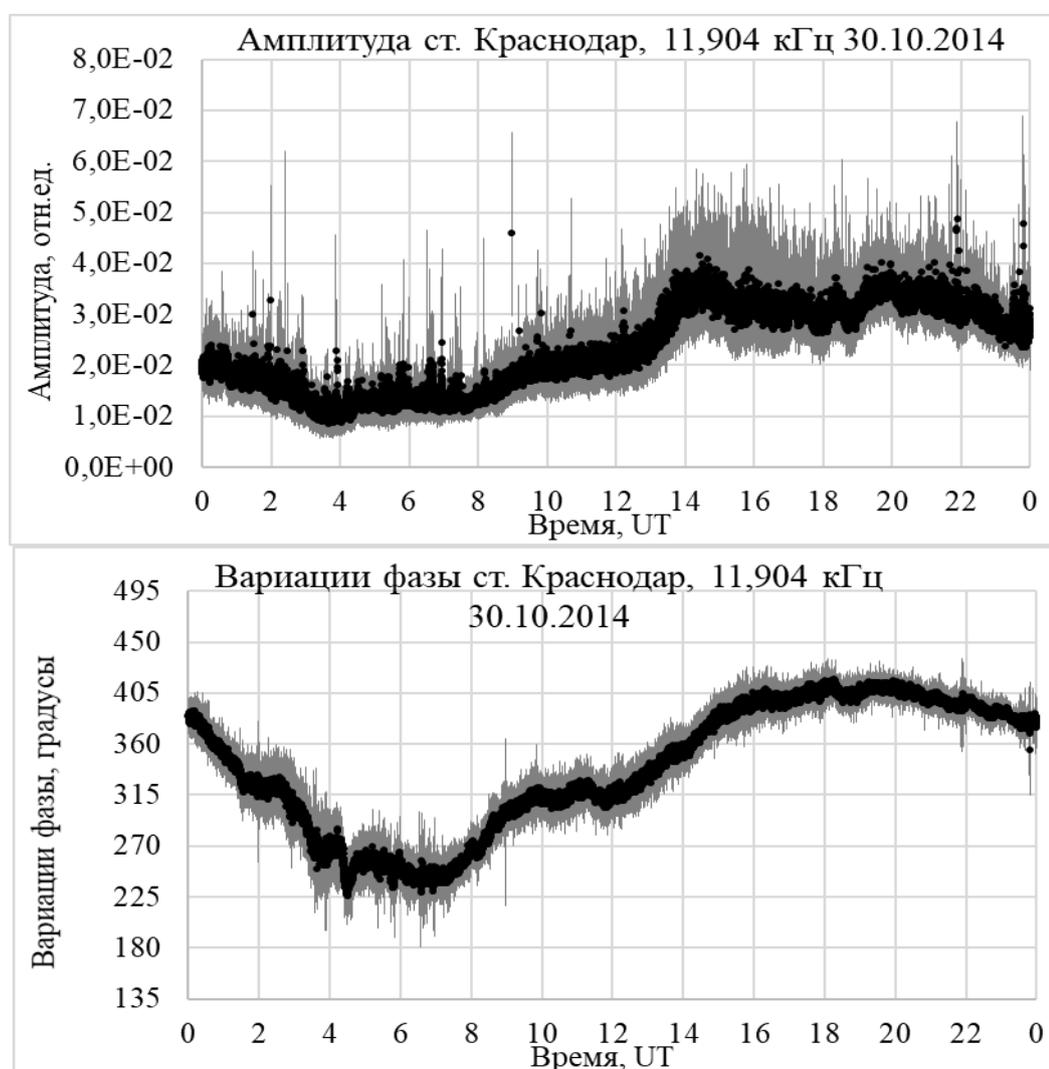


Рисунок 2.9 – Вариации амплитуды (верхняя панель) и фазы (нижняя панель) радиосигнала передатчика Краснодар, 11,904 кГц.

Черные точки – медиана (Me), серая линия – флуктуации: Me – Qw25, Qw75 – Me

В ночных условиях распространения (15 – 23 UT) регистрируются значения амплитуды $3,05 \cdot 10^{-2}$ отн. ед. и фазы 406° . Суточная вариация амплитуды радиосигнала Краснодар (11,904 кГц) составила 6,9 дБ, а суточная вариация фазы: 160° . Днем условиям на радиотрассе соответствует большее затухание ОНЧ-радиосигнала (уменьшение высотного градиента концентрации электронов на меньших высотах ионосферы, где потеря энергии при столкновениях электронов с нейтральной составляющей атмосферы значительна, но проводимость дневной ионосферы уже достаточна для отражения радиоволны). Увеличение фазовой задержки радиосигнала при переходе от дня к ночи может объясняться увеличением эффективной высоты волновода Земля – ионосфера из-за увеличения зенитного угла и уменьшения потока ионизирующего излучения Солнца [Орлов, Азарнин, 1970]. При перемещении терминатора вдоль радиотрассы регистрируются характерные периодические изменения амплитуды и фазы сигнала, связанные с интерференцией мод высших порядков [Crombie, 1964; Lynn, 2010].

Резкое возрастание интенсивности потока рентгеновского излучения во время солнечных вспышек приводит к увеличению концентрации электронов в ионосфере. Такие внезапные ионосферные возмущения (ВИВ) приводят к регистрации внезапных амплитудных и фазовых аномалий (ВАА и ВФА) ОНЧ-сигналов [Митра, 1977; Ohshio, 1979]. Из-за солнечной вспышки класса M1.2 (максимум вспышки в 4:28 UT) [Лаборатория рентгеновской астрономии Солнца. ФИАН, 31.10.2014] ВАА проявилась в виде повышения амплитуды радиосигнала Краснодар на 1,72 дБ, а ВФА – в уменьшении фазовой задержки на 42° (4:29 UT).

Повышение амплитуды ОНЧ-радиосигнала при ВИВ происходит вследствие повышения высотного градиента концентрации электронов нижней ионосферы на освещенной Солнцем части волновода Земля-ионосфера при повышении потока ионизирующего излучения во время солнечных вспышек, а понижение фазовых задержек ОНЧ-радиосигналов – из-за понижения эффективной высоты радиоволновода на освещенной Солнцем части

радиотрассы. Суточная вариация амплитуды радиосигнала Краснодар (11,904 кГц) без учета ВИВ составила 6,9 дБ, а суточная вариация фазы составила 160° .

На рисунке 2.10 представлены вариации амплитуды и фазы радиосигнала передатчика Новосибирск на частоте 12,649 кГц (30 октября 2014 г.).

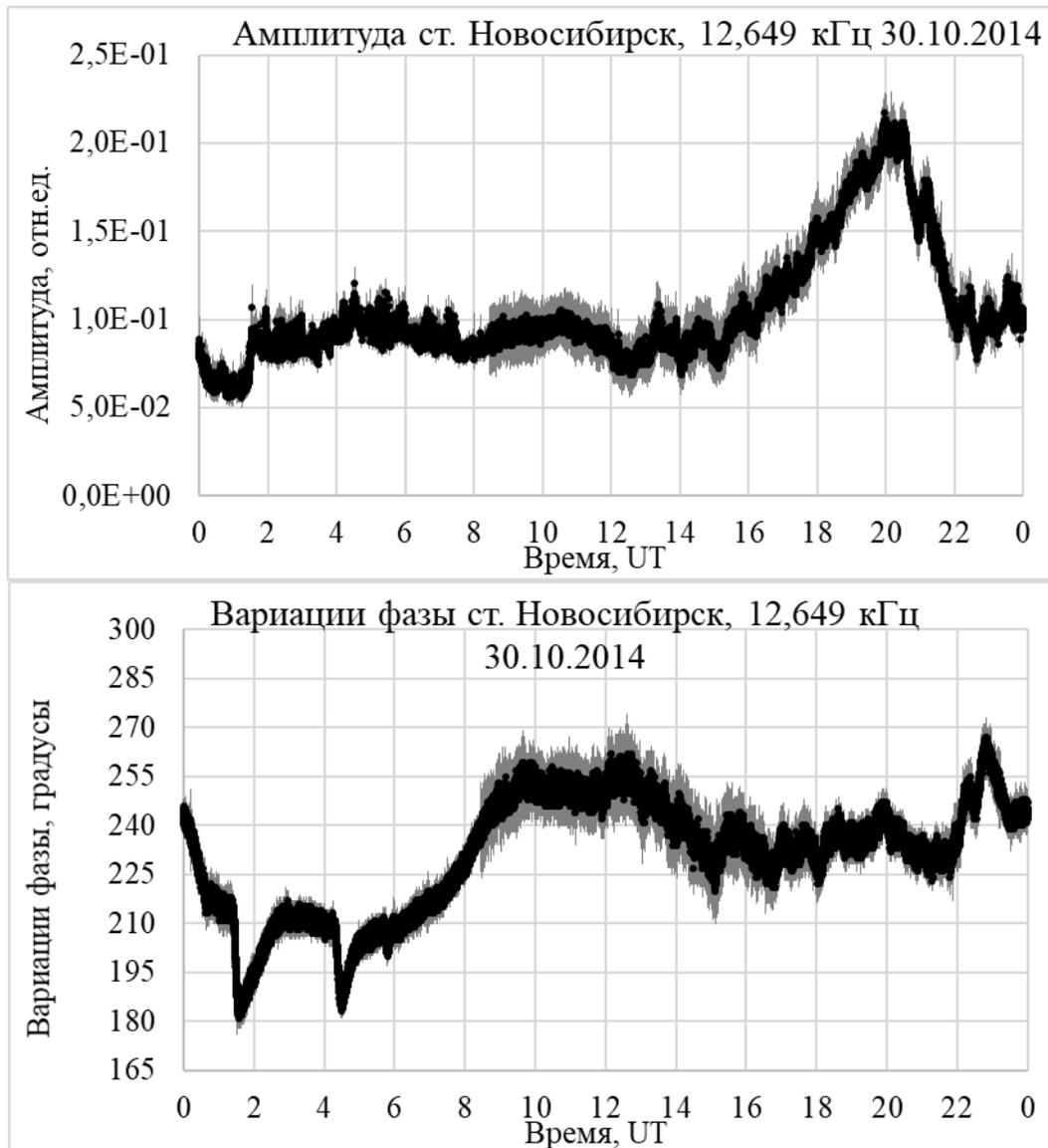


Рисунок 2.10 – Вариации амплитуды (верхняя панель) и фазы (нижняя панель) радиосигнала передатчика Новосибирск, 12,649 кГц.

Черные точки – медиана (Me), серая линия – флуктуации: Me – Qw25, Qw75 – Me

При распространении радиосигнала вдоль дневной радиотрассы Новосибирск – Якутск (1 – 6 UT) значения амплитуды и фазы составили $8,42 \cdot 10^{-2}$ отн. ед. и 210° соответственно. В ночных условиях распространения (11 – 23 UT)

регистрируются значения амплитуды: $9,41 \cdot 10^{-2}$ отн. ед. (11 UT), $2,02 \cdot 10^{-1}$ отн. ед. (20 UT) и фазы: 252° (10:30 UT), 240° (20 UT), 265° (22:50 UT). Вследствие отсутствия стабильного ночного источника ионизации верхней атмосферы, в ночном волноводе Земля – ионосфера проявляются неоднородности, приводящие к появлению мод высших порядков, которые в результате интерференции приводят к повышению флуктуаций и изменениям регистрируемых амплитуды и фазы.

Зарегистрированы ВАА, проявившиеся в виде повышения амплитуды сигнала передатчика Новосибирск (12,649 кГц) на 2,7 дБ и 1,25 дБ (солнечные рентгеновские вспышки M3.5 (1:35 UT) и M1.2 (4:28 UT)). ВФА проявились в виде уменьшения фазовой задержки радиосигнала, что составило в максимуме 33° (вспышка M3.5), 25° (вспышка M1.2). Зарегистрировано также ВФА от солнечной вспышки класса C3.5 (5:46 UT) в виде понижения фазовой задержки на 8° (5:47 UT). Суточная вариация амплитуды радиосигнала Новосибирск на частоте 12,649 кГц без учета внезапных амплитудных и фазовых аномалий составила 7,6 дБ, а суточная вариация фазы составила 55° .

На рисунке 2.11 представлены вариации амплитуды и фазы радиосигнала передатчика Хабаровск на частоте 14,881 кГц. При распространении ОНЧ-сигнала по дневной радиотрассе Хабаровск – Якутск (23 – 6:30 UT) значения амплитуды и фазы составили $1,89 \cdot 10^{-1}$ отн. ед. и 68° соответственно. В ночных условиях распространения (10 – 21 UT) регистрируются значения амплитуды: $5,33 \cdot 10^{-1}$ отн. ед. (13:34 UT), $4,12 \cdot 10^{-1}$ отн. ед. (17:40 UT) и значения фазы радиосигнала: 114° (11 UT), 100° (17 UT).

Эффект солнечной вспышки класса M3.5 проявился в виде повышения амплитуды сигнала передатчика Хабаровск в максимуме на 3,3 дБ и уменьшении фазовой задержки на 10° (1:35 UT). Эффект вспышки M1.2 проявился в виде повышения фазовой задержки на 4° (4:28 UT). Повышение фазовой задержки и отсутствие эффекта рентгеновской вспышки класса M1.2 в вариациях амплитуды сигнала Хабаровск можно объяснить интерференцией мод более высоких порядков, которые могут вносить значительный вклад в общее поле на

радиотрассе небольшой протяженности Хабаровск – Якутск [Орлов, Азарнин, 1970].

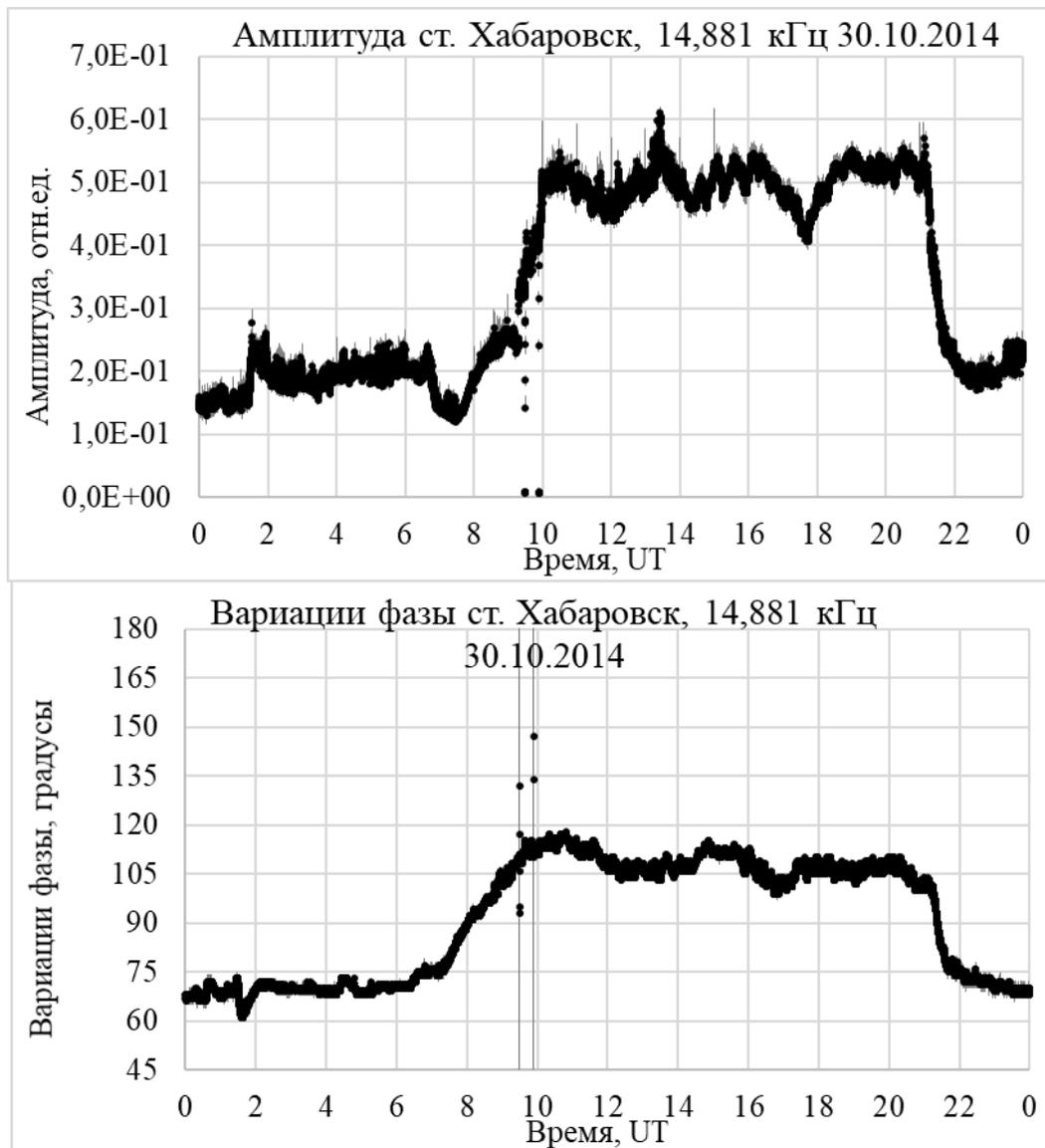


Рисунок 2.11 – Вариации амплитуды (верхняя панель) и фазы (нижняя панель) радиосигнала передатчика Хабаровск, 14,881 кГц.

Черные точки – медиана (Me), серая линия – флуктуации: Me – Qw25, Qw75 – Me

Суточная вариация амплитуды радиосигнала Хабаровск (14,881 кГц) без учета ВАА и ВФА составила 7,6 дБ, а суточная вариация фазы составила 55°. Для сигнала на частоте 14,881 кГц от ближайшего передатчика Хабаровск, регистрируемого в Якутске, минимальное среднеквадратичное отклонение фазы

составило $0,5^\circ$. Это значение может быть принято для оценки нестабильности фазовых измерений регистратора.

На рисунке 2.12 представлены вариации амплитуды и фазы радиосигнала передатчика Ревда на частоте 14,881 кГц.

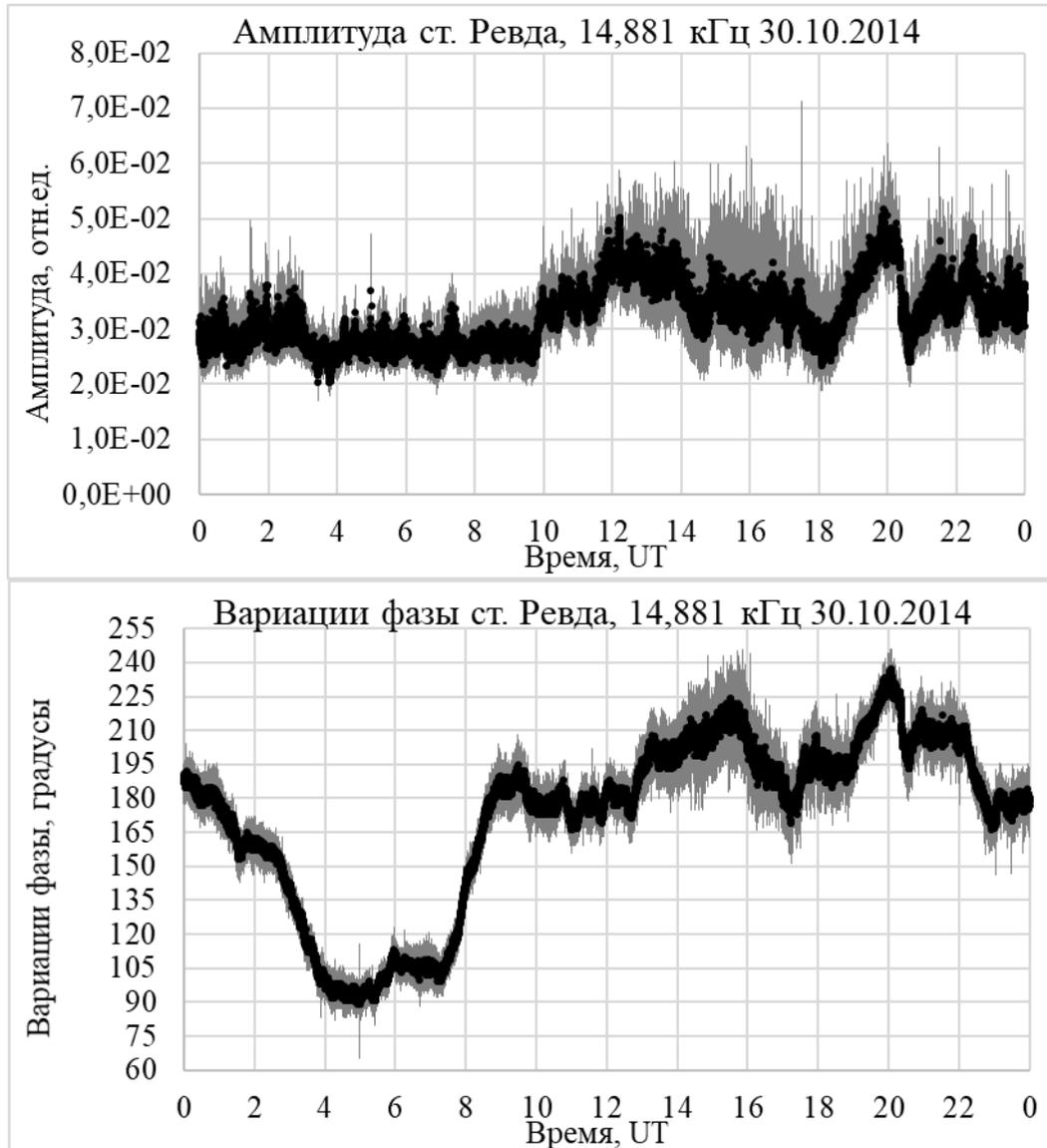


Рисунок 2.12 – Вариации амплитуды (верхняя панель) и фазы (нижняя панель) радиосигнала передатчика Ревда (Мурманск), 14,881 кГц.

Черные точки – медиана (Me), серая линия – флуктуации: Me – Qw25, Qw75 – Me

В дневных условиях распространения по радиотрассе Ревда – Якутск (4 – 7:20 UT) зарегистрированы амплитуда $2,67 \cdot 10^{-2}$ отн. ед. и фаза 93° . В ночных условиях распространения (12 – 23 UT) регистрируются значения амплитуды:

$3 \cdot 10^{-2}$ отн. ед. (14:34 UT), $4,6 \cdot 10^{-2}$ отн. ед. (20 UT) и значения фазы сигнала: 216° (15:40 UT), 177° (17:15 UT), 228° (20 UT). Ночная высокоширотная ионосфера особенно нестабильна [Брюнелли, Намгаладзе, 1988], что приводит к интерференции мод высших порядков и к повышению флуктуаций и квазипериодическим изменениям амплитуды и фазы ОНЧ-радиосигнала регистрируемых на трассе Ревда – Якутск.

Эффект солнечных вспышек не проявился в амплитудных вариациях сигнала Ревда (14,881 кГц) по причине большого зенитного угла Солнца над радиотрассой Ревда – Якутск. Эффект солнечной вспышки класса M3.5 проявился в виде уменьшения фазовой задержки радиосигнала Ревда на 10° (1:35 UT). Суточная вариация амплитуды радиосигнала Ревда (14,881 кГц) без учета ВИБ составила 4,7 дБ, а суточная вариация фазы составила 135° .

Следует отметить, что регистрируемые уменьшения значений фазы ОНЧ-сигнала φ , определяемые в программе регистрации по выражению (2.5), соответствуют понижению эффективной высоты волновода Земля – ионосфера.

На рисунке 2.13 представлены трассы распространения радиосигналов передатчиков РСДН-20 («Альфа»), принимаемых в Якутске.



Рисунок 2.13 – Трассы распространения радиосигналов передатчиков РСДН-20 при приеме в Якутске

С августа 2012 г. до 2016 г. регистрировались сигналы РСДН-20 в окрестности г. Улан-Удэ ($51,85^\circ$ с.ш., $107,65^\circ$ в.д.) [Козлов и др., 2013]. Сигнал принимался на вертикальную рамочную антенну, ориентированную в направлении восток-запад. С сентября 2015 г. в непрерывном режиме проводится регистрация амплитудно-фазовых вариаций сигналов РСДН-20 на территории Полярной геокосмофизической обсерватории ИКФИА СО РАН вблизи п. Тикси ($71,58^\circ$ с.ш., $128,78^\circ$ в.д.) [Каримов и др., 2016]. Сигналы ОНЧ радионавигационных станций принимаются в ПГО на вертикальную штыревую антенну, высотой 3 м. Работа регистраторов синхронизирована по времени с помощью GPS-часов.

Регистрация мощности радиошума, амплитуды и фазы радиосигналов РСДН-20 на частотах 11,904, 12,649 и 14,881 кГц в Якутске, Улан-Удэ и Тикси позволила охватить широкое мониторинговое пространство Северной Евразии для исследования особенностей распространения электромагнитных волн диапазона ОНЧ на радиотрассах различной протяженности и направленности в условиях как средних, так и высоких широт.

В работе [Гаврилов и др., 2019] показано, что регистрация сигналов на близких частотах от рядом расположенных ОНЧ-передатчиков является эффективным инструментом по восстановлению высотного профиля концентрации электронов нижней ионосферы.

2.3. Амплитудная калибровка регистрирующего комплекса в г. Якутске

Анализ вариаций амплитуды сигналов РСДН-20, регистрируемых в Якутске, Улан-Удэ и Тикси, проводится в относительных единицах. Калибровка амплитудных измерений проводилась путем одновременной регистрации сигналов передатчиков РСДН-20 стационарным регистрирующим комплексом в г. Якутске и дополнительным мобильным ОНЧ-приемником в составе сертифицированной дипольной антенны Пб-51 [Антенна дипольная активная Пб-51 - №349], АЦП Е14-440 [Е14-440 Внешний модуль АЦП/ЦАП/ТТЛ на шину

USB 1.1.] и ноутбука с программным обеспечением для АЦП «LGraph2» [LGraph2. Руководство пользователя].

Антенна Пб-51 сертифицирована с кабелем 3 м и треногой. Выходное сопротивление антенны составляет 50 Ом. Погрешность измерений составляет ± 2 дБ. На частоте 15 кГц значение коэффициента пересчета антенны $K_{ант}$ составляет $15,9 \pm 2$ дБ(1/м). На частоте 9 кГц: $K_{ант} = 17,8 \pm 2$ дБ(1/м) [Антенна дипольная активная Пб-51 - №349]. Методом линейной интерполяции оценены коэффициенты пересчета $K_{ант}$ для частот 11,904, 12,649 и 14,881 кГц. Для частоты 11,904 кГц $K_{ант} = 16,88 \pm 2$ дБ(1/м), для частоты 12,649 кГц $K_{ант} = 16,64 \pm 2$ дБ(1/м), для частоты 14,881 кГц $K_{ант} = 15,9 \pm 2$ дБ(1/м).

Для АЦП Е14-440 максимальная частота дискретизации на один канал равна 400 кГц. Амплитудный диапазон на 14 разрядов составляет ± 10 В, что соответствует 1,22 мВ/разряд. Внутренний усилитель АЦП допускает 3 градации усиления с диапазонами 10 В, 2,5 В и 0,156 В. АЦП с ПО «LGraph2» представляет собой спектроанализатор.

Измерения среднеквадратичных значений амплитуд ОНЧ-сигналов радиостанций были проведены дополнительным мобильным приемником одновременно со стационарным регистратором, находящимся в г. Якутске. Измерения мобильным комплексом выполнены на открытой сельской местности в окрестностях г. Якутска (удаление 10 км), без застроек в радиусе 2 км. Местность представляет открытый луг без посевов и кустарников, плотность застройки $< 1/га$, вдали от крупных автодорог и от электрифицированных железных дорог. Предполагается, что основным источником радиощума является атмосферный шум грозовых разрядов (9 кГц – 30 МГц). Для ограниченного по времени спектрального анализа радиосигнала, регистрируемого в полевых условиях, было выбрано прямоугольное окно быстрого преобразования Фурье (БПФ) со шкалой дБ($V/\sqrt{Гц}$). В интерфейсе ПО «LGraph2» выбранная нами шкала имеет обозначение, широко применяемое в зарубежной литературе: $dB(V_{rms}/rtHz)$. Полевые измерения амплитуды сигналов радиостанций проводились в период 3 – 5 УТ.

На рисунке 2.14 представлен пример осциллограммы и спектральной плотности среднеквадратичного значения амплитуды сигнала, регистрируемого в полевых условиях 08.05.2015 г. в 4:12 UT. В представленный момент времени выделяется среднеквадратичное значение амплитуды передатчиков: Хабаровск (11,904 кГц) -83 дБ(В/√Гц), Краснодар (12,649 кГц) -101 дБ(В/√Гц), Новосибирск (14,881 кГц) -86 дБ(В/√Гц).

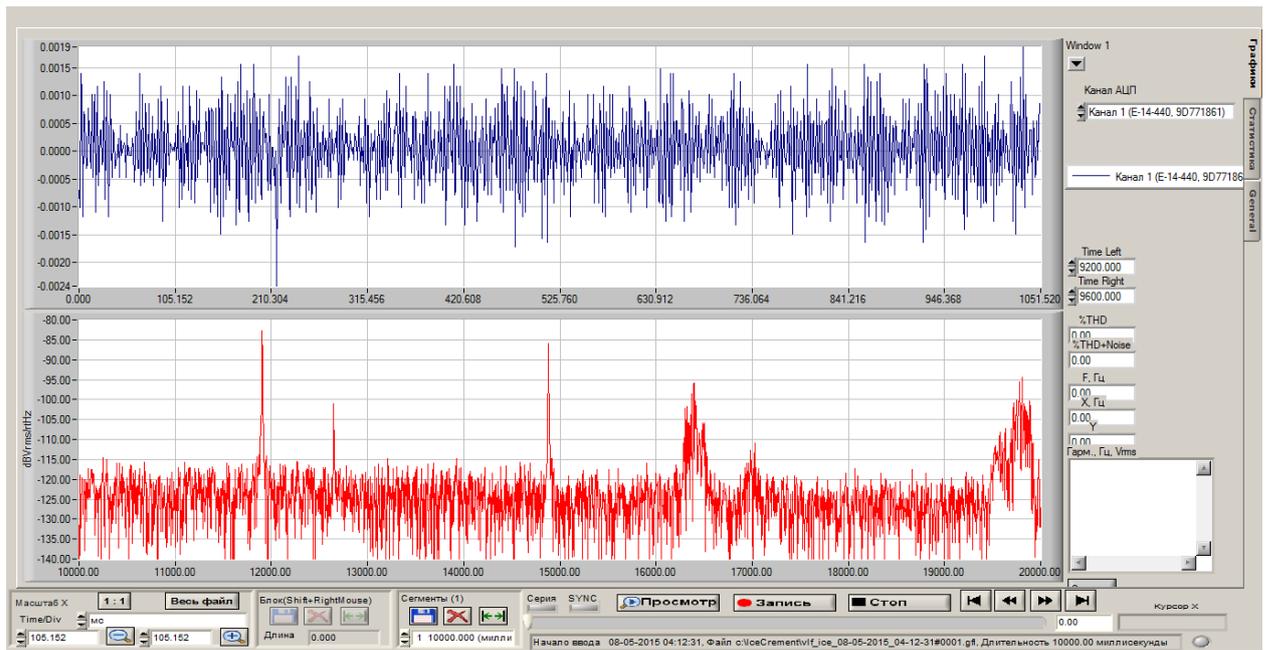


Рисунок 2.14 – Осциллограмма и спектральная плотность среднеквадратичного значения амплитуды радиосигнала. Регистрация в полевых условиях 08.05.2015 г. в 4:12 UT

Среднеквадратичное значение напряженности электрического поля E сигнала на частоте f , регистрируемое мобильным ОНЧ-приемником можно представить в виде [Антенна дипольная активная П6-51 - №349]:

$$E = S + 10 \cdot Lg(f_{эфф}) + K_{ант}, \quad (2.6)$$

где E – среднеквадратичное значение напряженности электрического поля, дБ(В/м);

S – показания спектроанализатора, на частоте сигнала f , дБ(В/√Гц);

$f_{эфф}$ – эффективная полоса спектра выделяемого сигнала, Гц;

$K_{ант}$ – коэффициента пересчета антенны на частоте измерения f , дБ(1/м).

На основе проведенных измерений 08.05.2015 г. за период 3 – 5 УТ получены усредненные показания спектроанализатора мобильного ОНЧ-приемника в период регистрации сигналов радиопередатчиков Хабаровск, Новосибирск, Краснодар и радишума на частотах 11,904, 12,649 и 14,881 кГц. Усредненные показания мобильного спектроанализатора S на основе выражения (2.6) переведены в среднеквадратичные значения напряженности электрического поля E . На основе среднеквадратичных значений напряженности электрического поля и усредненных за период 3 – 5 УТ показаний стационарного регистрирующего комплекса получены коэффициенты пересчета дБ(В/(отн. ед.·м)). Коэффициент пересчета дБ(В/(отн. ед.·м)) на частоте 11,904 кГц представлен в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Коэффициент пересчета дБ(В/(отн. ед.·м)) на частоте 11,904 кГц

Радиоимпульсы	Показания спектроанализатора S , дБ(В/√Гц)	Эффективная полоса спектра $f_{эфф}$, Гц	Коэффициент пересчета антенны $K_{ант}$, дБ(1/м)	Напряженность поля сигнала, принимаемого антенной E , дБ(В/м)	Показания стационарного регистратора, дБ(1 отн. ед.)	Коэффициент пересчета дБ(В/(отн. ед.·м))
Хабаровск	-82,58	5	16,88	-58,71	-13,7	-45,01
Новосибирск	-88,02	3,33	16,88	-65,92	-18,11	-47,81
Краснодар	-100,47	5	16,88	-76,6	-33,63	-42,97
радишум	-121,31	334,8	16,88	-79,18	-43,58 ($f_{эфф} = 334,8$ Гц)	-35,6

Усредненный коэффициент пересчета на частоте 11,904 кГц составляет -42,85 дБ(В/(отн. ед.· м)).

Коэффициент пересчета дБ(В/(отн. ед.·м)) на частоте 12,649 кГц представлен в таблице 2.6. Усредненный коэффициент пересчета на частоте 12,649 кГц составляет -44 дБ(В/(отн. ед.·м)).

Коэффициент пересчета дБ(В/(отн. ед.·м)) на частоте 14,881 кГц представлен в таблице 2.7. Усредненный коэффициент пересчета на частоте 14,881 кГц составляет -45,19 дБ(В/(отн. ед.·м)).

Таблица 2.6 – Коэффициент пересчета дБ(В/(отн. ед.·м)) на частоте 12,649 кГц

Радиоимпульсы	Показания спектроанализатора S , дБ(В/ $\sqrt{\text{Гц}}$)	Эффективная полоса спектра $f_{эфф}$, Гц	Коэффициент пересчета антенны $K_{ант}$, дБ(1/м)	Напряженность поля сигнала, принимаемого антенной E , дБ(В/м)	Показания стационарного регистратора, дБ(1 отн. ед.)	Коэффициент пересчета дБ(В/(отн. ед.·м))
Хабаровск	-81,84	5	16,64	-58,21	-11,97	-46,24
Новосибирск	-85,67	3,33	16,64	-63,81	-15,35	-48,46
Краснодар	-100,69	5	16,64	-77,06	-32,45	-44,61
радиошум	-121,51	334,8	16,64	-79,62	-42,9 ($f_{эфф} = 334,8 \text{ Гц}$)	-36,72

Таблица 2.7 – Коэффициент пересчета дБ(В/(отн. ед.·м)) на частоте 14,881 кГц

Радиоимпульсы	Показания спектроанализатора S , дБ(В/ $\sqrt{\text{Гц}}$)	Эффективная полоса спектра $f_{эфф}$, Гц	Коэффициент пересчета антенны $K_{ант}$, дБ(1/м)	Напряженность поля сигнала, принимаемого антенной E , дБ(В/м)	Показания стационарного регистратора, дБ(1 отн. ед.)	Коэффициент пересчета дБ(В/(отн. ед.·м))
Хабаровск	-77,55	3,33	15,89	-56,44	-12,2	-44,24
Новосибирск	-84,68	5	15,89	-61,8	-14,48	-47,32
Краснодар	-100,03	3,33	15,89	-78,92	-30,63	-48,29
радиошум	-122,83	334,8	15,89	-81,69	-40,78 ($f_{эфф} = 334,8 \text{ Гц}$)	-40,91

В таблице 2.8 представлены усредненные коэффициенты пересчета 1 отн.ед. амплитудного значения стационарного регистратора к среднеквадратичному значению напряженности электрического поля ОНЧ-сигналов (мкВ/м) на частотах 11,904, 12,649 и 14,881 кГц у приемной антенны [Корсаков, Козлов, Павлов, 2021].

Таблица 2.8 – Коэффициент пересчета 1 отн. ед. амплитудного значения стационарного регистратора к среднеквадратичному значению напряженности электрического поля ОНЧ-сигналов РСДН – 20 у приемной антенны, мкВ/м

Частота сигнала, кГц	Коэффициент пересчета, дБ(В/(отн. ед. · м))	Коэффициент пересчета, дБ(мкВ/м)	Напряженность электрического поля ОНЧ радиосигналов, мкВ/м
11,904 кГц	-42,85	77,15	7203
12,649 кГц	-44	76	6310
14,881 кГц	-45,19	74,81	5502

2.4 Основные выводы к главе 2

1. Разработаны методика и программное обеспечение регистрации и выделения мощности радишума, амплитуды и фазы радиосигналов на рабочих частотах РСДН-20.

2. Для сигнала радиопередатчика на частоте 20/1344 МГц (14,881 кГц), ближайшего регистратора в Якутске, минимальное СКО фазы составило $0,5^\circ$. Это значение СКО может служить для оценки нестабильности фазовых измерений регистратора. Приемник-регистратор обладает малым уровнем собственных шумов, в узкой полосе частот позволяет проводить регистрацию мощности радишума, амплитуды и фазы сигналов РСДН-20 на частотах 16/1344 МГц, 1/79 МГц и 20/1344 МГц.

3. Анализ параметров распределений регистрируемых узкополосных сигналов радиопередатчиков и радишума ОНЧ-диапазона показал наличие как больших значений эксцесса, так и асимметрии в сторону больших значений, что указывает на то, что распределения амплитуд отличаются от нормального. Для уменьшения влияния импульсных помех большой амплитуды, в качестве характеристики величин амплитуды и фазы, регистрируемых радиосигналов и радишума следует использовать медианные значения, при этом флуктуации амплитуды и фазы будут охарактеризованы с помощью квартилей 25% и 75%.

4. Получены устойчивые суточные амплитудно-фазовые вариации сигналов передатчиков, расположенных вблизи городов Хабаровск, Новосибирск,

Краснодар и Мурманск (п. Ревда). Организована регистрация мощности радишума, амплитуды и фазы радиосигналов РСДН-20 на частотах 11,904, 12,649 и 14,881 кГц в Якутске, Улан-Удэ и Тикси. Предложенный метод позволил организовать мониторинг широкого пространства Северной Евразии для исследования особенностей распространения ОНЧ-радиоволн в спокойных и возмущенных условиях ионосферы.

5. Проведена калибровка амплитудных измерений регистратора в г. Якутске, позволяющая проводить анализ данных с использованием абсолютных единиц электрической составляющей поля сигнала у приемной антенны. Коэффициент пересчета 1 В амплитудного значения (1 отн. ед.) регистратора в Якутске к среднеквадратичному значению напряженности электрического поля на частоте сигнала 11,904 кГц составляет 7203 мкВ/м, на частоте 12,649 кГц составляет 6310 мкВ/м, на частоте 14,881 кГц составляет 5502 мкВ/м.

ГЛАВА 3. Суточные, сезонные и межгодовые вариации амплитуды и фазы радиосигналов РСДН-20, и мощности радиошума при регистрации в Якутске

Результаты, представленные в третьей главе, опубликованы в [Корсаков, Козлов, Павлов, 2021; Korsakov, Kozlov, Toropov, 2020; Каримов и др., 2012; Корсаков, Павлов, Козлов, 2018; Korsakov, Kozlov, Tarabukina, 2018; Корсаков, Козлов, 2023]. Получено свидетельство о государственной регистрации базы данных [Свидетельство № 2021621889].

Для уменьшения вклада импульсной составляющей радиошума при обработке зарегистрированных данных применяется медианное усреднение значений (Me) на двух этапах. На первом этапе определяется интервал значений, соответствующий времени излучения сигнала анализируемого радиопередатчика (400 мс). Из этого интервала считывается интервал длительностью 268,8 мс, соответствующий 100 значениям амплитуд или фаз, не попадающих на фронт или спад радиоимпульса анализируемого передатчика. В этом массиве по 100 значениям вычисляется медиана амплитуды или фазы. Следующие 100 значений для анализа считываются через цикл пакета излучения радиостанций $T_{\text{ц}} = 3,6$ с (через 1339 значений). При обработке на первом этапе разрешение по времени составляет 3,6 секунды. По такому же алгоритму вычисляется амплитуда радиошума в то время, когда не излучает ни одна из радиостанций РСДН - 20. Мощность радиошума в узкой полосе частот характеризуется в виде значения спектральной плотности амплитуды, соответствующей медиане (см. пункт 2.3). На втором этапе проводится медианное усреднение на интервале 3 минуты (по 50 значениям первого этапа). Результат подобен применению алгоритмов детектирования с минимальным порогом. Флуктуации оцениваются на основе квантилей 25% (Q_{w25}) и 75% (Q_{w75}): $Me - Q_{w25}$ и $Q_{w75} - Me$.

Вариации амплитуды и фазы радиосигналов РСДН-20 и мощности радиошума при регистрации в Якутске представлены в открытом доступе на сайте ИКФИА СО РАН (<https://ikfia.ysn.ru/data/rim/alpha>) [Свидетельство №

2021621889]. Измеренные стационарным регистратором амплитудные значения в соответствии с коэффициентами пересчета (таблица 2.8) представлены в виде среднеквадратичных значений напряженности электрического поля ОНЧ-радиосигналов.

3.1. Суточные и сезонные вариации амплитуды и фазы радиосигналов РСДН-20 при регистрации в Якутске

Суточные вариации амплитуды и фазы радиосигналов РСДН-20 (11,904 кГц), характеризующиеся медианными значениями, регистрируемыми в марте, июне, сентябре и декабре в Якутске в 2015 г. представлены на рисунке 3.1.

В декабре дневным условиям распространения ОНЧ-сигнала в волноводе Земля – ионосфера на радиотрассе Хабаровск – Якутск соответствует интервал с 1 UT (восход Якутск) до 5:30 UT (заход Якутск). Среднеквадратичное значение амплитуды в местный полдень (зенит) на середине радиотрассы: 53 дБ(мкВ/м), фазовая задержка составляет 501° . Ночные условия распространения: 8 UT (заход Хабаровск) – 22:30 UT (восход Хабаровск). Среднеквадратичное значение амплитуды сигнала в местную полночь (надир) на середине радиотрассы: 61 дБ(мкВ/м), фазовая задержка: 485° . В результате интерференции мод высших порядков в период прохождения заходного терминатора в 7:15 UT регистрируется максимум фазовой задержки: 510° . При прохождении восходного терминатора в 17:30 UT регистрируется минимум амплитуды сигнала: 61,8 дБ(мкВ/м), в 22:45 UT – максимум фазовой задержки: 507° .

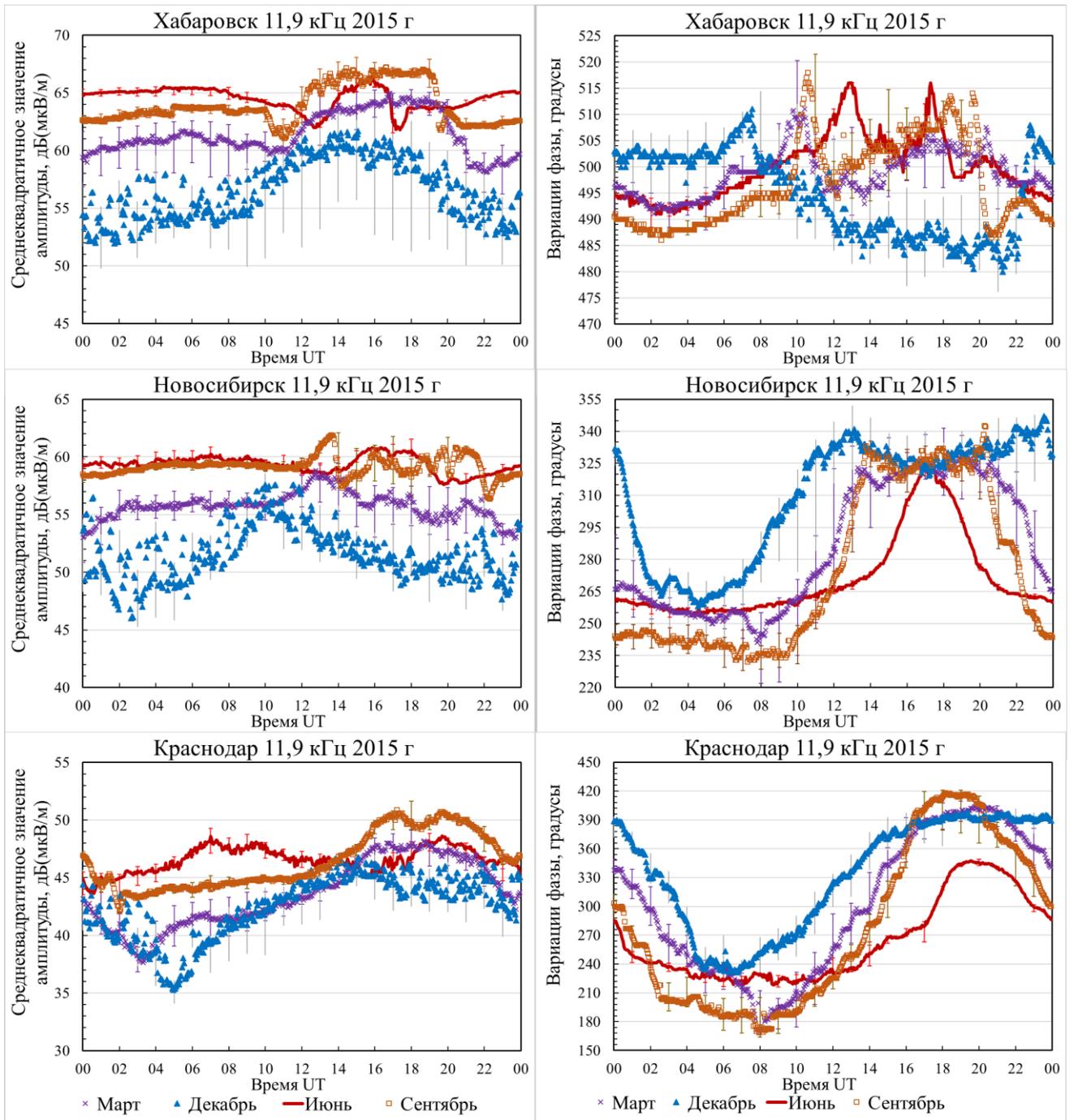


Рисунок 3.1 – Суточные и сезонные вариации амплитуды и фазы радиосигналов РСДН-20 (11,904 кГц), зарегистрированные в Якутске в 2015 г.

Фиолетовый крест – медиана зарегистрированных суточных значений в марте;
 синий треугольник – медиана зарегистрированных суточных значений в декабре;
 красная линия - медиана зарегистрированных суточных значений в июне;
 оранжевый квадрат - медиана зарегистрированных суточных значений в сентябре

В марте дневным условиям распространения ОНЧ-радиосигнала соответствует интервал с 21:15 UT (восход Якутск) до 9:10 UT (заход Хабаровск). Среднеквадратичное значение амплитуды сигнала Хабаровск в местный полдень на середине радиотрассы: 61,6 дБ(мкВ/м), фазовая задержка: 493°. Ночные условия распространения в марте: 9:30 UT (заход Якутск) – 21 UT (восход Хабаровск). Среднеквадратичное значение амплитуды сигнала в полночь на середине радиотрассы: 64,3 дБ(мкВ/м), фазовая задержка: 500°. В результате интерференции мод высших порядков при прохождении границы «день – ночь» в 10:30 UT регистрируется минимум амплитуды: 59 дБ(мкВ/м), вблизи 9:47 и 10:20 UT регистрируются два максимума фазовой задержки: $\approx 510^\circ$. В марте при прохождении восходного терминатора регистрируется спад амплитуды сигнала Хабаровск с перегибом типа «колено», с максимумом в 20:51 UT: 61 дБ(мкВ/м), два максимума в фазовой задержке сигнала: 508° (20:21 UT) и 502° (21:15 UT).

В июне дневным условиям распространения ОНЧ-сигнала на радиотрассе Хабаровск – Якутск соответствует интервал с 20 UT (восход Хабаровск) до 11 UT (заход Хабаровск). Среднеквадратичное значение амплитуды сигнала в местный полдень на середине радиотрассы: 65,4 дБ(мкВ/м), фазовая задержка: 492°. Ночным условиям соответствует 13 UT (заход Якутск) до 18 UT (восход в Якутске). Среднеквадратичное значение амплитуды сигнала в полночь на середине радиотрассы: 66,0 дБ(мкВ/м), фазовая задержка составляет 503°. В результате интерференции мод высших порядков при прохождении заходного терминатора в 12:45 UT регистрируется минимум амплитуды: 62 дБ(мкВ/м), в 13 UT регистрируется максимум фазовой задержки: 516°. При прохождении восходного терминатора в 17:30 UT также регистрируется минимум амплитуды сигнала: 61,8 дБ(мкВ/м), в 17:20 UT – максимум фазовой задержки: 515°.

В сентябре дневным условиям распространения ОНЧ-сигнала на трассе Хабаровск – Якутск соответствует интервал с 20:40 UT (восход Якутске) до 9:20 UT (заход Хабаровск). Среднеквадратичное значение амплитуды в местный полдень на середине радиотрассы: 63,6 дБ(мкВ/м), фазовая задержка: 487°. В сентябре ночным условиям распространения ОНЧ соответствует 10 UT (заход

Хабаровск) до 20:30 UT (восход Хабаровск). Среднеквадратичное значение амплитуды сигнала в полночь на середине трассы: 67 дБ(мкВ/м), фазовая задержка: 507°. В результате интерференции мод высших порядков при заходе в 11:09 UT регистрируется минимум амплитуды сигнала: 61,2 дБ(мкВ/м), вблизи 10:30 UT – максимум фазовой задержки: 518°. При прохождении восходного терминатора в 19:39 UT регистрируется минимум амплитуды сигнала: 61,8 дБ(мкВ/м), затем в 20:15 UT небольшой максимум амплитуды: 63,2 дБ(мкВ/м), регистрируется минимум в фазовой задержке сигнала: 487° (20:51 UT), а затем максимум фазовой задержки: 493° (22:36 UT).

Характерные суточные и сезонные изменения амплитуды и фазы ОНЧ-сигнала передатчика Хабаровск РСДН-20 (11,904 кГц), регистрируемые в Якутске в 2015 г. [Корсаков, Козлов, Павлов, 2021] сведены в таблицу 3.1.

В декабре дневным условиям распространения ОНЧ-сигнала в волноводе Земля – ионосфера на радиотрассе Новосибирск – Якутск соответствует интервал с 3 UT (восход Новосибирск) до 5:30 UT (заход Якутск). Среднеквадратичное значение амплитуды сигнала передатчика Новосибирск в местный полдень на середине радиотрассы: 49,2 дБ(мкВ/м), фазовая задержка составляет 268°. Ночным условиям распространения в декабре соответствует 10 UT (заход Новосибирск) до 01 UT (восход в Якутске). Среднеквадратичное значение амплитуды сигнала Новосибирск в местную полночь на середине радиотрассы в декабре: 51 дБ(мкВ/м), фазовая задержка составляет 322°. В результате интерференции мод высших порядков в период прохождения заходного терминатора в 10 UT регистрируется максимум амплитуды: 57,6 дБ(мкВ/м). Регистрируется послезаходный максимум фазовой задержки: 340° (12:39UT). В период прохождения восходного терминатора в 2:36 UT регистрируется минимум амплитуды сигнала: 46,8 дБ(мкВ/м), вблизи 23:30 UT – максимум фазовой задержки: 345°, а затем минимум задержки радиосигнала: 265° (2:27 UT).

Таблица 3.1 – Суточные и сезонные изменения амплитуды и фазы ОНЧ-сигнала передатчика Хабаровск РСДН-20 (11,904 кГц), регистрируемые в Якутске 2015 г.

Сезон	Восход на радиотрассе	День	Закат на радиотрассе	Ночь
декабрь	минимум амплитуды (17:30 UT): 61,8 дБ(мкВ/м), макс. фазовой задержки (22:45 UT): 507°	53 дБ(мкВ/м), 501° 1:00-5:30 UT	Макс. фазовой задержки: 510° 7:15 UT	61 дБ(мкВ/м), 485° 8:00-22:30 UT
март	перегиб с макс. амплитуды (20:51 UT): 61 дБ(мкВ/м), 2 макс. в фазовой задержке: 508° (20:21 UT) и 502° (21:15 UT)	61,6 дБ(мкВ/м), 493° 21:15-9:10 UT	минимум амплитуды (10:30 UT): 59 дБ(мкВ/м), 2 макс. фазовой задержки: 510° (9:47 и 10:20 UT)	64,3 дБ(мкВ/м), 500° 9:30-21:00 UT
июнь	минимум амплитуды (17:30 UT): 61,8 дБ(мкВ/м), максимум фазовой задержки (17:20 UT): 515°	65,4 дБ(мкВ/м), 492° 20:00-11:00 UT	минимум амплитуды (12:45 UT): 62 дБ(мкВ/м), макс. фазовой задержки (13:00 UT): 516°	66,0 дБ(мкВ/м), 503° 13:00-18:00 UT
сентябрь	минимум амплитуды (19:39 UT): 61,8 дБ(мкВ/м), затем максимум амплитуды (20:15 UT): 63,2 дБ(мкВ/м), минимум фазовой задержки (20:51 UT): 487°, затем максимум задержки (22:36 UT): 493°	63,6 дБ(мкВ/м), 487° 20:40-9:20 UT	минимум амплитуды (11:09 UT): 61,2 дБ(мкВ/м), макс. фазовой задержки (10:30 UT): 518°	67 дБ(мкВ/м), 507° 10:00-20:30 UT

В марте дневным условиям распространения ОНЧ-сигнала по трассе Новосибирск – Якутск соответствует интервал с 0:40 UT (восход Новосибирск) до 9:30 UT (заход Якутск). Среднеквадратичное значение амплитуды сигнала в

местный полдень на середине радиотрассы: 56 дБ(мкВ/м), фазовая задержка: 252°. Ночные условия распространения в марте на радиотрассе: 12:40 UT (заход Новосибирск) до 21:30 UT (восход Якутск). Среднеквадратичное значение амплитуды сигнала в местную полночь на середине радиотрассы: 56,3 дБ(мкВ/м), фазовая задержка сигнала: 325°. При интерференции мод высших порядков в период прохождения заходного терминатора около 12:51 UT регистрируется максимум амплитуды сигнала: 58,3 дБ(мкВ/м), вблизи 13:18 UT – максимум фазовой задержки сигнала: 323°. При прохождении восходного терминатора в 0 UT регистрируется минимум амплитуды сигнала Новосибирск: 54 дБ(мкВ/м) и спад фазовой задержки сигнала.

В июне дневным условиям распространения ОНЧ-сигнала на радиотрассе Новосибирск – Якутск соответствует интервал с 22 UT (восход в Новосибирске) до 13 UT (заход Якутск). Среднеквадратичное значение амплитуды сигнала Новосибирск в местный полдень на середине радиотрассы: 60 дБ(мкВ/м), фазовая задержка составляет 257°. Ночным условиям распространения в июне соответствует 15 UT (заход Новосибирск) до 18 UT (восход Якутск). Среднеквадратичное значение амплитуды сигнала в местную полночь на середине радиотрассы: 60,5 дБ(мкВ/м), фазовая задержка составляет 324°. Как результат интерференции мод высших порядков при прохождении заходного терминатора в 13:57 UT регистрируется минимум амплитуды сигнала: 59 дБ(мкВ/м). В период прохождения восходного терминатора регистрируются два минимума: 57,6 дБ(мкВ/м) и 57,7 дБ(мкВ/м) в 19:48 и 20:45 UT соответственно.

В сентябре дневным условиям распространения ОНЧ-сигнала на трассе Новосибирск – Якутск соответствует интервал с 22:40 UT (восход около Новосибирска) до 12 UT (заход вблизи Якутска). Среднеквадратичное значение амплитуды сигнала в местный полдень на середине радиотрассы: 59,3 дБ(мкВ/м), фазовая задержка сигнала: 237°. Ночным условиям распространения в сентябре на радиотрассе соответствует 12:30 UT (заход Новосибирск) до 21 UT (восход Якутск). Среднеквадратичное значение амплитуды сигнала в местную полночь на середине радиотрассы: 59,7 дБ(мкВ/м), фазовая задержка составляет 327°. В 13:39

UT регистрируется послезаходный максимум амплитуды сигнала Новосибирск: 61,8 дБ(мкВ/м), вблизи 13:48 UT регистрируется максимум фазовой задержки: 332°. В период прохождения восходного терминатора в 22:21 UT регистрируется минимум амплитуды радиосигнала: 56,4 дБ(мкВ/м). К подходу восходного терминатора к приемнику в Якутске регистрируется максимум фазовой задержки: 342° (20:18 UT). На восходе задержка фазы сигнала Новосибирск уменьшается, выделяются два перегиба в 21:48 и 22:54 UT.

Суточные и сезонные изменения амплитуды и фазы ОНЧ-радиосигнала передатчика Новосибирск РСДН-20 (11,904 кГц), регистрируемые в Якутске в 2015 г. сведены в таблицу 3.2.

Треть радиотрассы Краснодар – Якутск по дуге большого круга находится в субавроральных широтах (см. рисунок 2.13), середина радиотрассы: 62,47° с.ш., 72,15° в.д. В декабре дневным условиям распространения радиосигнала по радиотрассе Краснодар – Якутск соответствует интервал с 4 UT (восход Солнца на середине радиотрассы) до 6 UT (заход вблизи Якутска). Среднеквадратичное значение амплитуды сигнала передатчика Краснодар в местный полдень на середине трассы: 36 дБ(мкВ/м), фазовая задержка сигнала: 240°. Ночным условиям распространения в декабре соответствует 14 UT (заход Краснодар) до 1 UT (восход в Якутске). Среднеквадратичное значение амплитуды сигнала в местную полночь на середине трассы: 44,5 дБ(мкВ/м), фазовая задержка: 393°. При прохождении заходного терминатора регистрируется повышение амплитуды и фазовой задержки сигнала. При прохождении восходного терминатора по трассе Краснодар – Якутск регистрируется понижение амплитуды сигнала, в понижении фазовой задержки сигнала Краснодар регистрируется перегиб в 2:12 UT.

Таблица 3.2 – Суточные и сезонные изменения амплитуды и фазы ОНЧ-сигнала передатчика Новосибирск РСДН-20 (11,904 кГц), регистрируемые в Якутске в 2015 г.

Сезон	Восход на радиотрассе	День	Закат на радиотрассе	Ночь
декабрь	минимум амплитуды (2:36 UT): 46,8 дБ(мкВ/м), макс. фазовой задержки (23:30 UT): 345°, затем минимум фазовой задержки (2:27 UT): 265°	49,2 дБ(мкВ/м), 268° 3:00-5:30 UT	макс. амплитуды (10:00 UT): 57,6 дБ(мкВ/м), макс. фазовой задержки (12:39UT): 340°	51 дБ(мкВ/м), 322° 10:00-1:00 UT
март	минимум амплитуды (0:00 UT): 54 дБ(мкВ/м), регистрируется спад фазовой задержки	56 дБ(мкВ/м), 252° 0:40 UT-9:30 UT	Макс. амплитуды (12:51 UT): 58,3 дБ(мкВ/м), макс. фазовой задержки (13:18 UT): 323°	56,3 дБ(мкВ/м), 325° 12:40-21:30 UT
июнь	минимум амплитуды (19:48 UT): 57,6 дБ(мкВ/м), минимум амплитуды (20:45 UT) 57,7 дБ(мкВ/м)	60 дБ(мкВ/м), 257° 22:00-13:00 UT	минимум амплитуды (13:57 UT): 59 дБ(мкВ/м)	60,5 дБ(мкВ/м), 324° 15:00-18:00 UT
сентябрь	минимум амплитуды (22:21 UT): 56,4 дБ(мкВ/м), макс. фазовой задержки (20:18UT): 342°, выделяются два перегиба фазы в 21:48 и 22:54 UT	59,3 дБ(мкВ/м), 237° 22:40-12:00 UT	послезаходный макс. амплитуды (13:39 UT): 61,8 дБ(мкВ/м), макс. фазовой задержки (13:48 UT): 332°	59,7 дБ(мкВ/м), 327° 12:30-21:00 UT

В марте дневные условия распространения ОНЧ-сигнала на радиотрассе Краснодар – Якутск соответствуют времени с 3:30 UT (восход Краснодар) до 9:30 UT (заход Якутск). Среднеквадратичное значение амплитуды сигнала в местный полдень на середине радиотрассы: 41,7 дБ(мкВ/м), а фазовая задержка: 218°.

Ночные условия распространения в марте: с 16:30 UT (заход у Краснодара) до 21:30 UT (восход в Якутске). Среднеквадратичное значение амплитуды сигнала в местную полночь на середине трассы: 47,7 дБ(мкВ/м), фазовая задержка сигнала: 402°. В результате интерференции мод высших порядков в период прохождения границы «день – ночь» около 3:18 UT регистрируется минимум амплитуды сигнала: 37,6 дБ(мкВ/м). При прохождении восходного терминатора регистрируется минимум амплитуды сигнала в 23:36 UT: 42,2 дБ(мкВ/м), около 2:12 UT при спаде фазовой задержки сигнала регистрируется перегиб.

В июне дневным условиям распространения ОНЧ-сигнала на радиотрассе Краснодар – Якутск соответствует интервал с 1:45 UT (восход в Краснодаре) до 16 UT (заход на середине трассы). Среднеквадратичное значение амплитуды сигнала в местный полдень на середине радиотрассы: 48 дБ(мкВ/м), фазовая задержка сигнала Краснодар составляет 222°. Ночным условиям распространения в июне соответствует время с 18 UT (заход Краснодар) до 21 UT (восход на середине радиотрассы). Среднеквадратичное значение амплитуды сигнала в местную полночь на середине трассы: 48,4 дБ(мкВ/м), а фазовая задержка сигнала составляет 346°. В результате интерференции мод высших порядков при прохождении заходного терминатора в 15:18 UT регистрируется минимум амплитуды сигнала Краснодар: 45,3 дБ(мкВ/м), в 15:15 UT регистрируется перегиб фазовой задержки сигнала. При прохождении восходного терминатора в амплитуде сигнала в 0:23 UT регистрируется минимум: 43,5 дБ(мкВ/м).

В сентябре дневным условиям распространения ОНЧ на радиотрассе Краснодар – Якутск соответствует интервал с 2:30 UT (восход около Краснодара) до 12 UT (заход у Якутска). Среднеквадратичное значение амплитуды сигнала в местный полдень на середине радиотрассы: 44,2 дБ(мкВ/м), фазовая задержка составляет 185°. Ночным условиям распространения соответствует интервал с 16:30 UT (заход у Краснодара) до 21 UT (восход Якутск). Среднеквадратичное значение амплитуды сигнала Краснодар в местную полночь на середине радиотрассы: 50 дБ(мкВ/м), фазовая задержка составляет 416°. При прохождении границы «день – ночь» регистрируется плавное увеличение амплитуды и фазовой

задержки сигнала. В период прохождения восходного терминатора регистрируется серия минимумов и максимумов в амплитуде сигнала: 23:39 UT (минимум 46,3 дБ(мкВ/м)), 0:12 UT (максимум 46,6 дБ(мкВ/м)), 1:03 UT (минимум 44,2 дБ(мкВ/м)), 1:33 UT (максимум 45,2 дБ(мкВ/м)), 2 UT (минимум 42,1 дБ(мкВ/м)). В результате интерференции мод высших порядков в период прохождения восходного терминатора в вариациях фазы сигнала Краснодар регистрируется серия перегибов в 0:27 UT, 0:54 UT и 1:45 UT.

Суточные и сезонные изменения амплитуды и фазы ОНЧ-радиосигнала передатчика Краснодар РСДН-20 (11,904 кГц), регистрируемые в Якутске в 2015 г. сведены в таблицу 3.3.

Суточные вариации среднеквадратичного значения амплитуды сигнала радиопередатчика Хабаровск: 8,9 дБ (декабрь), 6,4 дБ (март), 4,2 дБ (июнь) и 5,7 дБ (сентябрь). Вариации фазы сигнала за сутки: 28° (декабрь), 18° (март), 23° (июнь), 32° (сентябрь).

Суточные вариации среднеквадратичного значения амплитуды сигналов навигационной станции Новосибирск: 10,4 дБ в декабре, 5,3 дБ в марте, 3 дБ в июне и 4,3 дБ в сентябре. Вариации фазы сигнала Новосибирск за сутки: 85° в декабре, 72° в марте, 70° в июне, 107° в сентябре.

Суточные вариации среднеквадратичного значения амплитуды сигнала передатчика Краснодар: 10,3 дБ (декабрь), 10,4 дБ (март), 4,8 дБ (июнь) и 8 дБ (сентябрь). Суточные вариации фазы радиосигнала Краснодар: 156° (декабрь), 236° (март), 129° (июнь), 240° (сентябрь) [Корсаков, Козлов, Павлов, 2021].

Таблица 3.3 – Суточные и сезонные изменения амплитуды и фазы ОНЧ-сигнала передатчика Краснодар РСДН-20 (11,904 кГц), регистрируемые в Якутске 2015 г.

Сезон	Восход на радиотрассе	День	Закат на радиотрассе	Ночь
декабрь	понижение амплитуды; в понижении фазовой задержки перегиб в 2:12 UT	36 дБ(мкВ/м), 240° 4:00-6:00 UT	повышение амплитуды и фазовой задержки	44,5 дБ(мкВ/м), 393° 14:00-1:00 UT
март	минимум амплитуды (23:36 UT): 42,2 дБ(мкВ/м), (3:18 UT): 37,6 дБ(мкВ/м), перегиб в фазовой задержке (02:12 UT)	41,7 дБ(мкВ/м), 218° 3:30-9:30 UT	Возрастание амплитуды и фазовой задержки сигнала	47,7 дБ(мкВ/м), 402° 16:30-21:30 UT
июнь	минимум амплитуды (0:23 UT): 43,5 дБ(мкВ/м)	48 дБ(мкВ/м), 222° 1:45-16:00 UT	минимум амплитуды (15:18 UT): 45,3 дБ(мкВ/м), перегиб фазовой задержки (15:15 UT)	48,4 дБ(мкВ/м), 346° 18:00-21:00 UT
сентябрь	23:39 UT (минимум 46,3 дБ(мкВ/м)), 00:12 UT (максимум 46,6 дБ(мкВ/м)), 01:03 UT (минимум 44,2 дБ(мкВ/м)), 01:33 UT (максимум 45,2 дБ(мкВ/м)), 02:00 UT (минимум 42,1 дБ(мкВ/м)); серия перегибов в фазовой задержке: в 00:27 UT, 00:54 UT и 01:45 UT	44,2 дБ(мкВ/м), 185° 2:30-12:00 UT	плавное увеличение амплитуды и фазовой задержки сигнала	50 дБ(мкВ/м), 416° 16:30-21:00 UT

Получено, что амплитуда принимаемого ОНЧ-сигнала днем меньше, чем ночью. Регистрируемые суточные вариации амплитуды интерпретируются как изменения высотного градиента концентрации электронов в нижней ионосфере (при изменении потока солнечной ионизации нижней ионосферы над радиотрассами), следствием чего является изменение коэффициента затухания радиоволн. Дневным условиям распространения соответствуют большее затухание и меньшая фазовая задержка принимаемого ОНЧ-радиосигнала (уменьшение высотного градиента концентрации электронов на меньших высотах, где потеря энергии при столкновениях электронов с нейтральной составляющей значительна, а проводимость дневной нижней ионосферы уже достаточна для отражения радиоволны).

На рассматриваемых радиотрассах регистрируется увеличение фазовой задержки радиосигнала от дня к ночи. Это характерно для увеличения эффективной высоты волновода Земля – ионосфера. Исключение составляет уменьшение задержки фазы сигнала 11,904 кГц в ночное зимнее время на радиотрассе меньшей протяженности Хабаровск – Якутск (1400 км), что может объясняться интерференцией мод высших порядков [Орлов, Азарнин, 1970].

При регистрации в Якутске наиболее ярко выражены сезонные дневные вариации амплитуды радиосигналов передатчиков РСДН-20 (11,904 кГц). Максимальная дневная амплитуда сигнала регистрируется летом во время зенита Солнца на середине радиотрассы. Это связано с уменьшением зенитного угла Солнца на радиотрассах с декабря по июнь и с увеличением высотного градиента концентрации электронов в нижней ионосфере. Зимой регистрируются меньшие амплитуды ОНЧ-радиоволн с большими флуктуациями. В этом проявляется также зимняя аномалия нижней ионосферы [Данилов и др., 1987]: повышение концентрации оксида азота NO (относительно молекулярного кислорода) который активно ионизируется под действием интенсивного потока от Солнца в линии Лайман- α (121,6 нм) на высотах области D в зимний период. Повышаются значения концентрации электронов и их флуктуации в нижней ионосфере, но при этом высотный градиент концентрации остается малым, в результате чего

повышается затухание в волноводе Земля – ионосфера. Регистрируется асимметрия дневных сезонных вариаций амплитуды ОНЧ-радиосигналов.

При регистрации дневных вариаций амплитуды радиосигналов РСДН-20 на частоте 14,881 кГц нами также выделена сезонная асимметрия: амплитуда осеннего равноденствия ближе по значениям к летнему солнцестоянию, а амплитуда весеннего равноденствия – к значениям зимнего солнцестояния [Korsakov, Kozlov, Todorov, 2020]. Это согласуется с сезонной асимметрией высотных профилей концентрации электронов нижней ионосферы [Альперт, 1972]. В работе [Macotela et al., 2021] при распространении ОНЧ-радиосигналов над Северной Атлантикой в дневных значениях амплитуд 2011 – 2019 гг. зарегистрирована сезонная асимметрия. На высотах D-области ионосферы Солнце вызывает колебания в динамике ветра. Средняя температура мезосферы понижается летом и повышается зимой. Средний зональный ветер может меняться с западного на восточный, что связано как с полусуточным усилением солнечного прилива, так и с изменением средней температуры. Последнее может существенно повлиять на химию и динамику в D-области, изменяя условия распространения ОНЧ-радиоволн. Снижение температуры может привести к уменьшению частоты столкновений, уменьшению поглощения при распространении ОНЧ-сигнала в волноводе Земля – ионосфера.

3.2. Суточные и сезонные вариации мощности радиошума при регистрации в Якутске

Среднеквадратичные значения амплитуды спектральной составляющей ОНЧ-радиошума на частоте 11,904 кГц (в эффективной полосе $f_{эфф} = 334,8$ Гц) зарегистрированные в Якутске в 2015 г. представлены на рисунке 3.2.

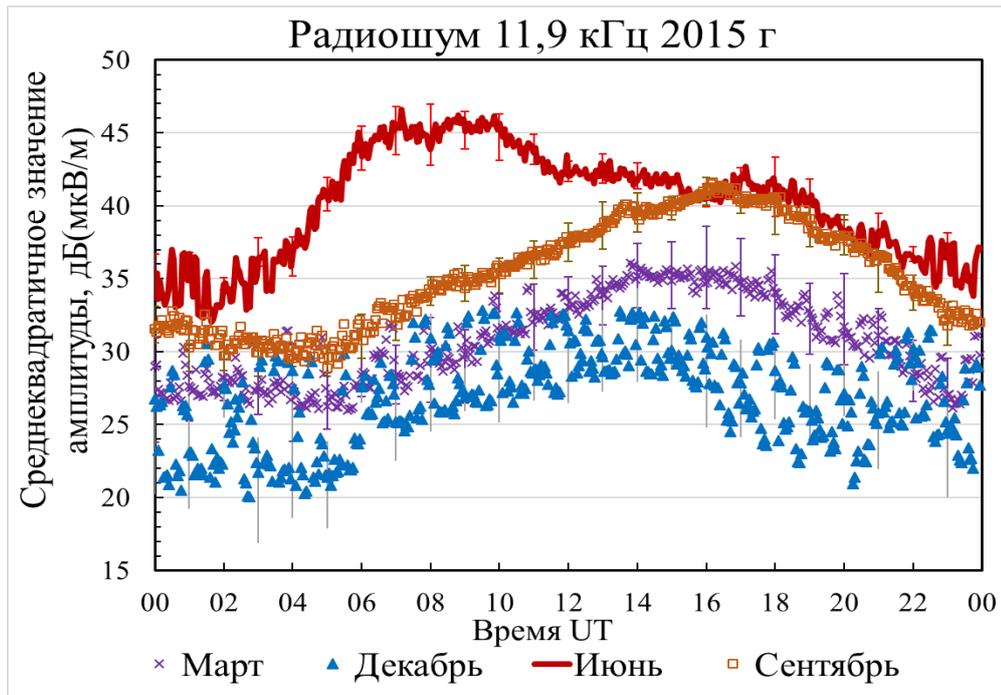


Рисунок 3.2 – Среднеквадратичные значения амплитуды ОНЧ-радиошума 11,904 кГц (эффективная полоса 334,8 Гц), зарегистрированного в Якутске в 2015 г. Фиолетовый крест – медиана зарегистрированных суточных значений в марте; синий треугольник – медиана зарегистрированных суточных значений в декабре; красная линия – медиана зарегистрированных суточных значений в июне; оранжевый квадрат – медиана зарегистрированных суточных значений в сентябре

Основными источниками регистрируемого в Восточной Сибири ОНЧ-радиошума являются 2 мощных грозовых очага, существующих постоянно в летний период. Первый очаг расположен на территории Западносибирской равнины. Второй очаг расположился по меридиану от южных хребтов Большого и Малого Хингана до севера Станового хребта, по параллели – с запада от Большого Хингана до южных гор Малого Хингана и Буреинского хребта на востоке [Tarabukina, Kozlov, 2020]. Основной источник зимой – грозы северной Индии и южного Китая. Регистрируемые в Якутске ОНЧ-радиошумы, источниками которых являются рассмотренные грозовые очаги, распространяются по сходным трассам, что и сигналы от передатчиков Новосибирск и Хабаровск системы РСДН-20. На рисунке 3.3 представлена усредненная плотность грозовых разрядов в летний период 2009 – 2010 гг. по

данным Мировой сети локации молний (World Wide Lightning Location Network) [Козлов, Муллаяров, Каримов, 2011].

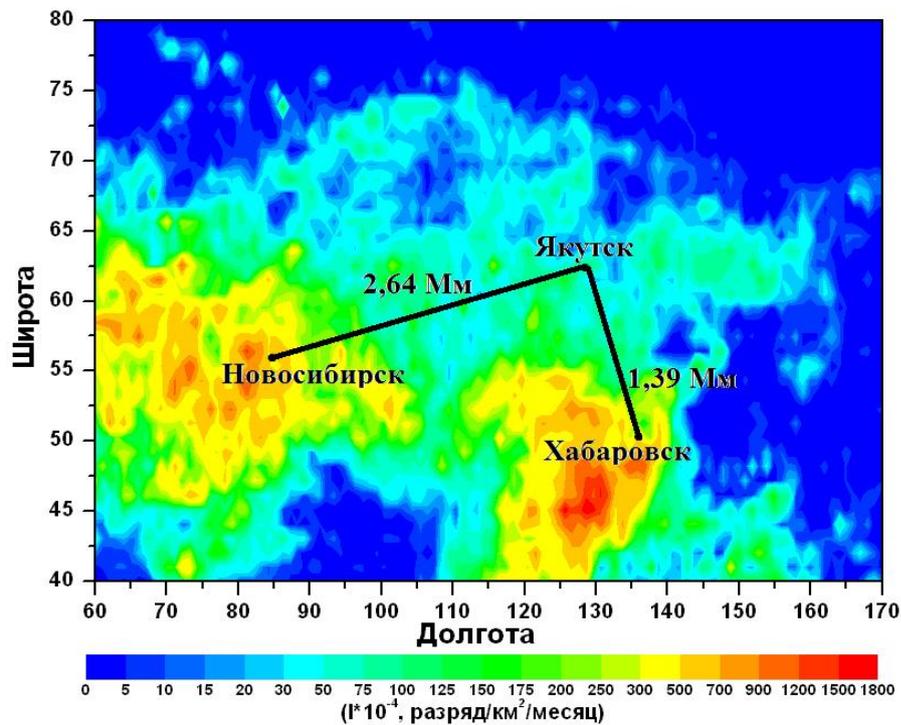


Рисунок 3.3 – Усредненная плотность грозовых разрядов летом 2009-2010 гг.

[Козлов, Муллаяров, Каримов, 2011]. Указаны радиотрассы Новосибирск – Якутск (протяженность 2,64 Мм) и Хабаровск – Якутск (протяженность 1,39 Мм)

В суточных вариациях мощности ОНЧ-радиошума выделяются три периода: 3 – 6 UT (минимум грозовой активности, максимум дневного затухания в волноводе Земля – ионосфера); 4 – 12 UT (максимум вклада местной грозовой активности летом); 15 – 19 UT – максимум зимой, весной и осенью, а также второй летний максимум, обусловленный ночным временем в окрестности пункта регистрации, при минимальном затухании в волноводе Земля – ионосфера [Kozlov, Mullayarov, Vasilyev, 2000]. Наименьшее отношение сигнал/шум на частоте 11,904 кГц для наиболее удаленного от Якутска передатчика Краснодар, составляет 2,5 дБ (летний период 6 – 12 UT). Суточная вариация среднеквадратичного значения амплитуды ОНЧ-радиошума составляет: 10 дБ (март), 13 дБ (июнь), 11,5 дБ (сентябрь) и 12 дБ (декабрь). В сезонной вариации

мощности радиозумов максимум наблюдается в летнее время [Корсаков, Козлов, Павлов, 2021]. Максимальные значения амплитуды радиозума приходятся на июль, что соответствует максимуму местной (на территории Якутии) грозовой активности, поэтому следует учитывать и ее влияние. На рисунке 3.4 сопоставлены вариации среднеквадратичных значений амплитуд сигналов радиостанций и радиозума, регистрируемых в Якутске в июле на частоте 14,881 кГц.

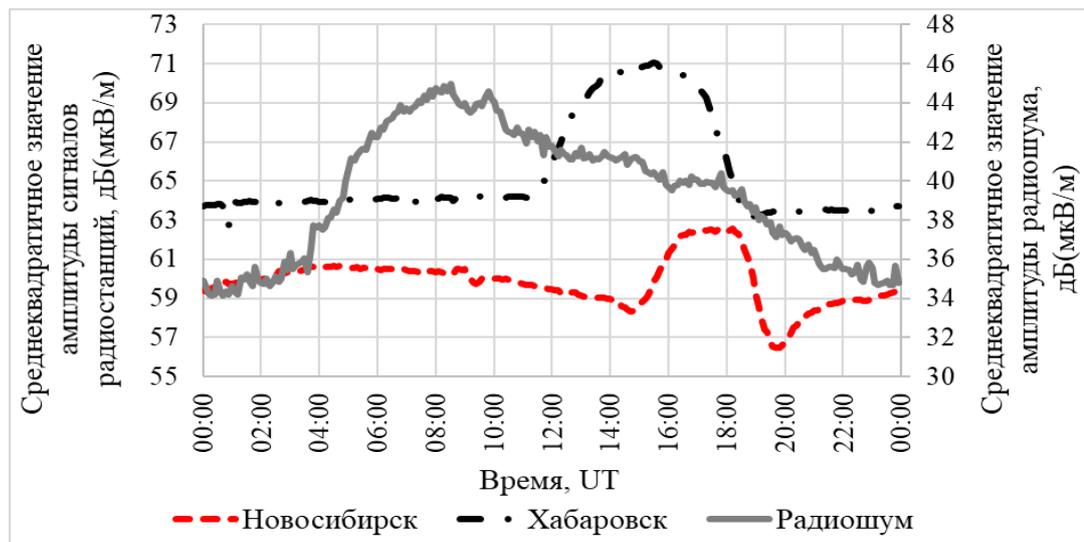


Рисунок 3.4 – Вариации среднеквадратичных значений амплитуд сигналов новосибирской (красный пунктир), хабаровской (черный пунктир с точкой) радиостанций и спектральной составляющей радиозума (серая линия), регистрируемых на частоте 14,881 кГц (июль, 2009-2011 гг.)

Вариация амплитуды спектральной составляющей радиозума (14,881 кГц) с 3 до 12 UT (относительно значения в 2 UT) составляет 10,1 дБ и соответствует изменению интенсивности источника, на что указывает отсутствие изменения амплитуды сигналов радиостанций и, следовательно, отсутствие изменений в условиях распространения ОНЧ-радиосигнала. Вариации амплитуды радиозума с 12 по 16 UT и с 16 по 20 UT составили 6,44 дБ и 5,11 дБ соответственно. Данные вариации близки к суточным вариациям амплитуды сигналов радиостанций: 7,23 дБ для Хабаровска (12 – 18 UT) и 2,54 дБ для Новосибирска (15 – 20 UT).

Вариации амплитуды указывают на изменение в условиях распространения, как радиошума, так и сигналов радиостанций. Действительно, рассмотренные временные интервалы соответствуют наступлению ночных условий на радиотрассах Хабаровск – Якутск, Новосибирск – Якутск и на сходных им трассах распространения ОНЧ-радиошума [Каримов и др., 2012].

3.3. Межгодовые вариации амплитуды и фазы радиосигналов РСДН-20, и мощности радиошума при регистрации в Якутске в 24-м цикле солнечной активности

Выбраны интервалы времени, соответствующие дневным и ночным условиям распространения сигнала по радиотрассам: Хабаровск – Якутск: 2 – 6 UT (день), 15 – 16 UT (ночь); Новосибирск – Якутск: 3 – 7 UT (день), 16:30 – 17:30 UT (ночь); Краснодар – Якутск: 5 – 7 UT (день), 18 – 19 UT (ночь). В суточных и сезонных вариациях мощности радиошума выбраны интервалы времени: 3 – 6 UT (день), 16:30 – 17:30 UT (ночь). Сезонные вариации среднеквадратичных значений амплитуды сигналов радиопередатчиков и радиошума (11,904 кГц) получены на основе медианного усреднения за каждый месяц в дневные и ночные интервалы. Флуктуации оцениваются на основе квартилей 25% и 75%. 11-летний цикл солнечной активности (СА) характеризуется индексом F10.7 [Solar Cycle Progression]. Сезонные вариации среднеквадратичного значения амплитуды сигналов радиопередатчиков и радиошума (11,904 кГц) для дневных и ночных условий распространения, а также индекс F10.7 за период 2009 – 2017 гг. представлены на рисунке 3.5.

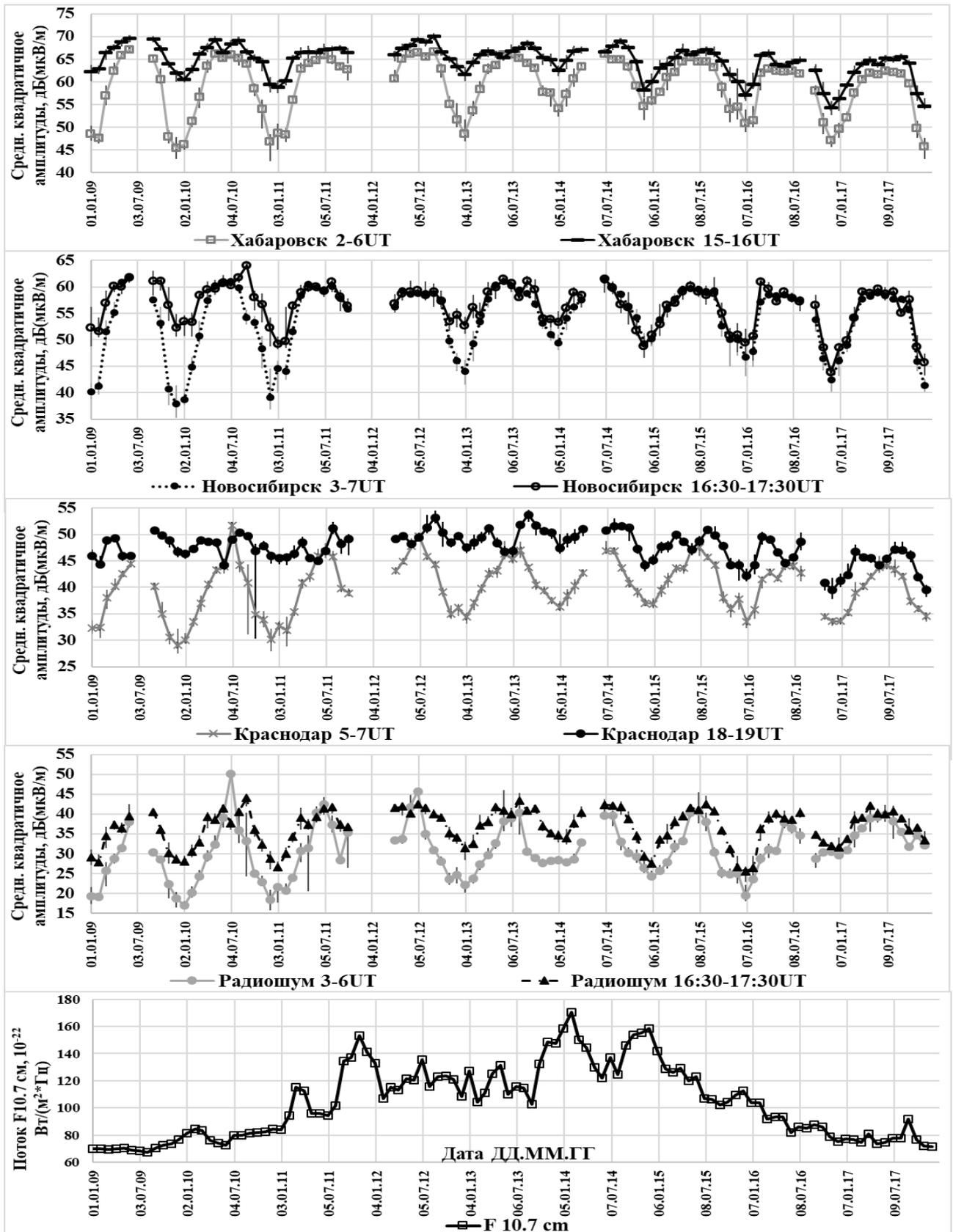


Рисунок 3.5 – Сезонные вариации среднеквадратичного значения амплитуды сигналов радиопередатчиков и радиошума (11,904 кГц) для дневного и ночного распространения, индекс F10.7 за период 2009-2017 гг.

В сезонных вариациях амплитуды радиосигналов выделяется, в основном, годовая составляющая. В дневные часы сезонная вариация амплитуд относительно стабильна год от года. Зимой, с увеличением солнечной активности в 24-м цикле (с 2009 до 2014 гг.), амплитуда радиосигнала от передатчика Хабаровск увеличивается на 9 ± 1 дБ днем и на $4 \pm 1,5$ дБ ночью, а в период спада активности (2015 – 2017 гг.) – регистрируется понижение амплитуды принимаемого сигнала. С увеличением солнечной активности в зимний период, амплитуда радиосигнала передатчика Новосибирск увеличивается на $11 \pm 1,5$ дБ днем и $6 \pm 1,3$ дБ ночью, на фоне спада солнечной активности регистрируется понижение амплитуды: $11 \pm 1,5$ дБ днем и $7 \pm 1,3$ дБ ночью. Летом отмечается понижение амплитуды на $2 \pm 0,6$ дБ на фоне спада солнечной активности. Зимой с повышением солнечной активности амплитуда сигнала радиопередатчика Краснодар увеличивается на $6 \pm 1,2$ дБ днем и $8 \pm 1,8$ дБ ночью. Летом – увеличивается на $3 \pm 0,7$ дБ днем, $3 \pm 0,6$ дБ ночью от минимума до максимума СА. На фоне спада СА (2015 – 2017 гг.) отмечается понижение амплитуды. С повышением СА мощность радиошума в зимний период увеличивается на $11 \pm 1,2$ дБ днем и $6 \pm 1,5$ дБ ночью.

Зарегистрировано нарастание мощности ОНЧ-радиошума и амплитуды сигналов радиопередатчиков в период нарастания в 24-м цикле солнечной активности (период нарастания индекса F10.7: 2009-2014 гг.). В период спада СА (2015-2017 гг.) регистрируется спад амплитуды радиосигналов и мощности ОНЧ-радиошума и как для лета, так и для зимы. В периоды нарастания, максимума и спада в 24-м цикле солнечной активности отмечены большие изменения амплитуды ОНЧ-сигнала, зарегистрированные зимой, по сравнению с летом. Следует отметить, что и основные максимумы индекса F10.7 в 24-м цикле солнечной активности приходятся на поздний осенний и зимний периоды.

Сезонные вариации фазы сигналов радиопередатчиков (11,904 кГц) для дневного и ночного распространения, значения индекса F10.7 за 2009 – 2017 гг. представлены на рисунке 3.6.

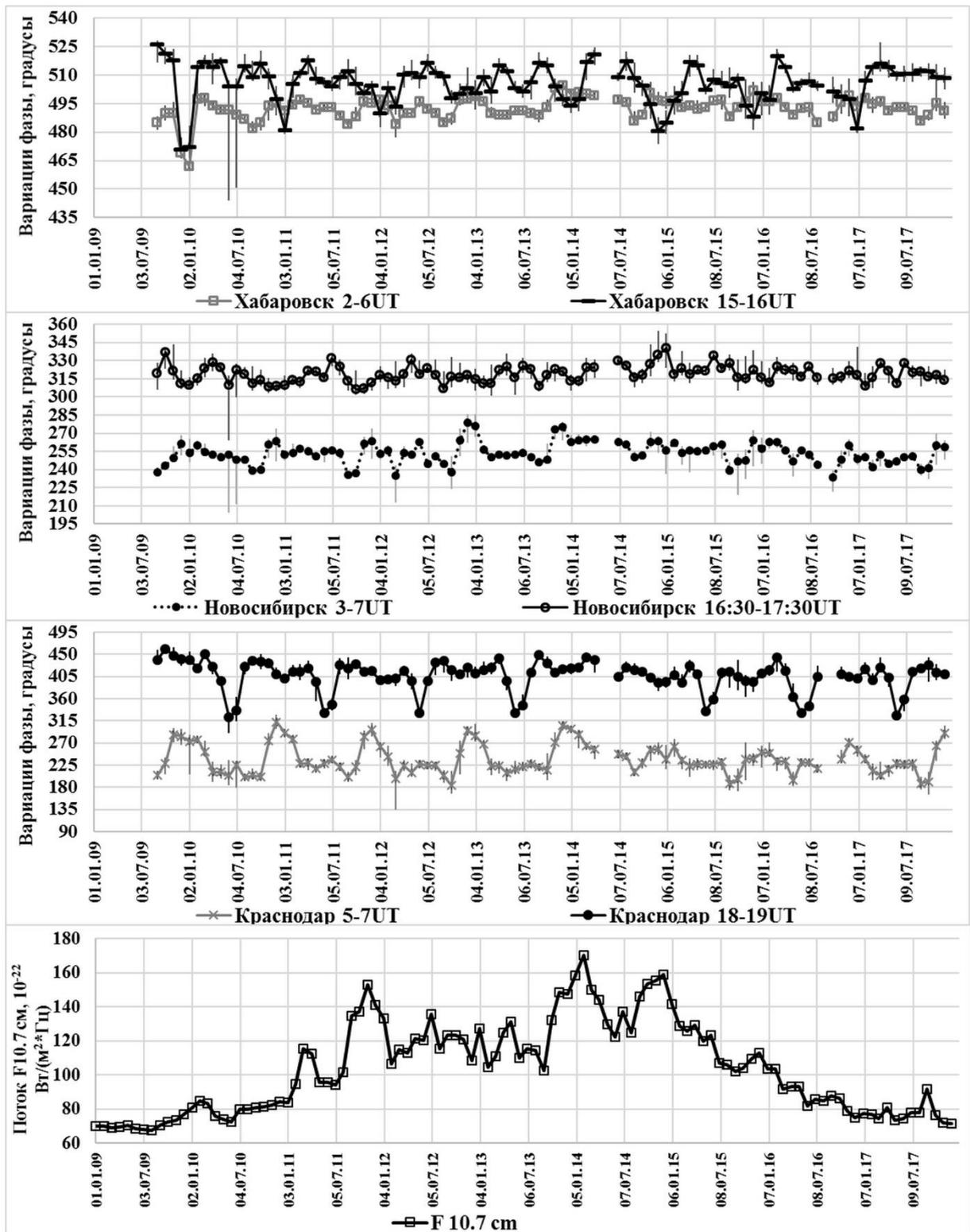


Рисунок 3.6 – Сезонные вариации фазы сигналов радиопередатчиков (11,904 кГц) для дневного и ночного распространения, а также индекс F10.7 за 2009 – 2017 гг.

В более стабильных дневных сезонных вариациях фазы сигналов радиопередатчиков выделяется годовая составляющая. На фоне сезонных

изменений в 24-м цикле солнечной активности, межгодовые вариации фазы ОНЧ-радиосигналов не выделяются. На фоне повышения СА (2009 – 2014 гг.) в зимний период ночью регистрируется повышение фазовой задержки сигнала (11,904 кГц) на радиотрассе меньшей протяженности Хабаровск – Якутск (1400 км) на $18 \pm 6^\circ$. Падение фазовой задержки сигнала радиопередатчика Хабаровск, регистрируемое в декабре 2009 г. и в январе 2010 г. (рисунок 3.6), обусловлено понижением начальной фазы сигнала при запуске передатчика 29 ноября 2009 г. после плановых отключений системы РСДН-20. Начальная фаза сигнала передатчика Хабаровск была скорректирована к 30 января 2010 г.

Нами получено, что суточные и сезонные вариации мощности радиошума, амплитуды и фазы сигналов радиопередатчиков РСДН-20 на частоте 11,904 кГц соответствуют вариациям, указанных параметров радиосигналов на частоте 14,881 кГц [Корсаков, Козлов, Павлов, 2021; Каримов и др., 2012; Корсаков, Павлов, Козлов, 2018]. В работе [Thomson, Clilverd, 2000] указывается, что в максимуме солнечной активности уровень сигналов радиостанций, регистрируемых в полдень на низких и средних широтах для протяженных радиотрасс, пересекающих экватор, примерно на $0,3 \pm 0,1$ дБ/1000 км больше, чем в минимуме, что соответствует нашим результатам для среднеширотных трасс, не пересекающих экватор.

3.4. Оценка межгодового изменения летней грозовой активности Северной Азии в период 24-го цикла солнечной активности

При исследовании вариаций интенсивности грозовых источников по регистрируемым ОНЧ-радиошумам, необходимо учитывать вариации функции распространения в волноводе Земля-ионосфера, имеющие суточные, сезонные и межгодовые особенности. Неоднозначность можно устранить при одновременном приеме со схожих направлений эталонных радиосигналов. В качестве эталонных сигналов предложено использовать ОНЧ-радиосигналы системы РСДН-20 («Альфа»).

В работе [Korsakov, Kozlov, Tarabukina, 2018] межгодовая вариация функции распространения ОНЧ-сигналов в азиатском регионе представлена в виде среднегеометрического значений амплитуд (среднего арифметического в логарифмической шкале) передатчиков Новосибирск и Хабаровск, регистрируемых в Якутске. Вариации мощности сигналов радиостанций и радишума на частоте 14,881 кГц в эффективной полосе 334,8 Гц при регистрации в Якутске в летний период с 2009 по 2017 гг. представлены на рисунке 3.7.

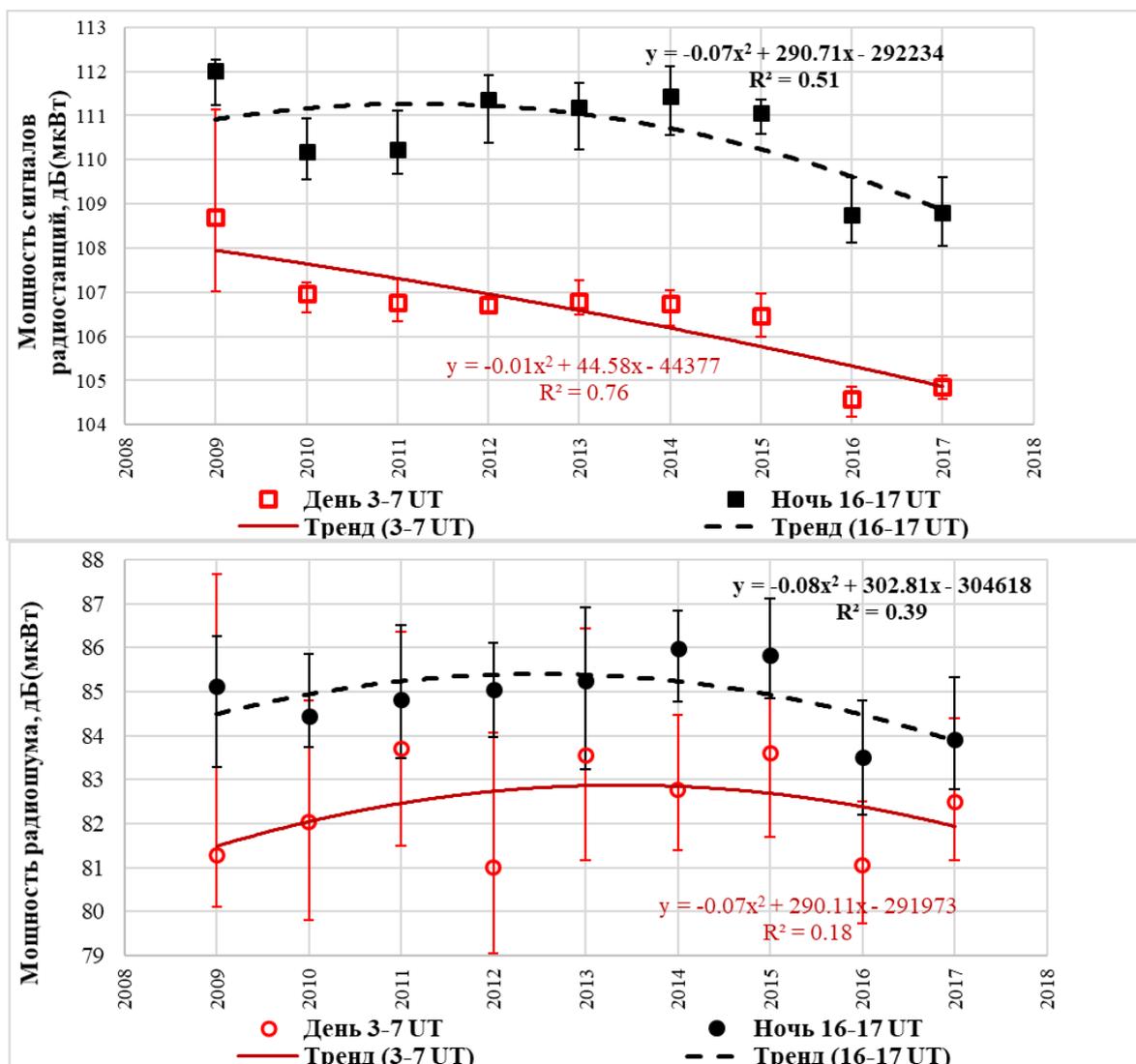


Рисунок 3.7 – Вариации мощности сигналов радиостанций и радишума на частоте 14,881 кГц при регистрации в Якутске в летний период с 2009 по 2017 гг.

В максимуме 24-го цикла СА по отношению к минимуму летом уменьшение затухания радиосигналов при распространении в волноводе Земля – ионосфера составило $1,3 \pm 0,7$ дБ около полудня и $1,5 \pm 0,7$ дБ около полуночи. С уменьшением солнечной активности (2016 – 2017 гг.) регистрируется повышение затухания ОНЧ-радиосигналов. В максимуме солнечной активности мощность регистрируемого ОНЧ-радиошума больше чем в минимуме. В летний период зарегистрировано изменение мощности на $2,2 \pm 1,6$ дБ в дневных условиях распространения (3 – 7 UT) и на $1,2 \pm 1$ дБ в ночных условиях (16 – 17 UT). С уменьшением солнечной активности (2016 – 2017 гг.) зарегистрировано уменьшение мощности ОНЧ-радиошума.

Вычитание из вариаций мощности радиошума значений мощности сигналов радиопередатчиков, принимаемых со схожих направлений, с учетом их мощности излучения, укажет на вариации мощности источника радиошума (вариации интенсивности грозовой активности). Мощность излучения передатчиков РСДН-20 прием равной 65 кВт [Киккулькин, Рубцов, Фабрик, 1979; Болошин и др., 1985].

Характеристикой интенсивности потока импульсной составляющей грозового радиошума может служить число радиоимпульсов N , регистрируемых в единицу времени. Зависимость N от порогового уровня напряженности поля радиоимпульсов E может описываться выражением [Махоткин, 1963]:

$$N = N_0 \cdot \left(\frac{E_0}{E} \right)^q, \quad (3.1)$$

где: N и N_0 – число радиоимпульсов, регистрируемых в единицу времени при превышении порогового уровня модуля напряженности поля радиоимпульсов E и E_0 соответственно.

Выражение (3.1) получено при допущениях равномерного распределения гроз по поверхности Земли; убывания амплитуды атмосферика по степенному закону при удалении от источника; логарифмически нормальной функции

распределения амплитуд атмосфериков для любого грозового очага на малом расстоянии.

Значения показателя q для выражения (3.1) при регистрации в Якутске в летний период составили от 1,36 до 2,2 [Козлов, Фёдорова, Шабаганова, 2009]. На основе данных Мировой сети локации молний (WWLLN) [Hutchins et al., 2012] определено суммарное число разрядов по территории Северной Азии ($40 - 80^\circ$ с.ш., $60 - 180^\circ$ в.д., см. рисунок 3.3) за три летних месяца с 2009 по 2017 гг. Один из пунктов сети WWLLN был установлен в г. Якутске.

Мощность источника радиопшума (14,881 кГц) с учетом межгодовых вариаций функции распространения в Северной Азии в период нарастания, максимума и спада в 24-м цикле солнечной активности и число грозных разрядов Северной Азии в летний период с 2009 по 2017 гг. представлены на рисунке 3.8.

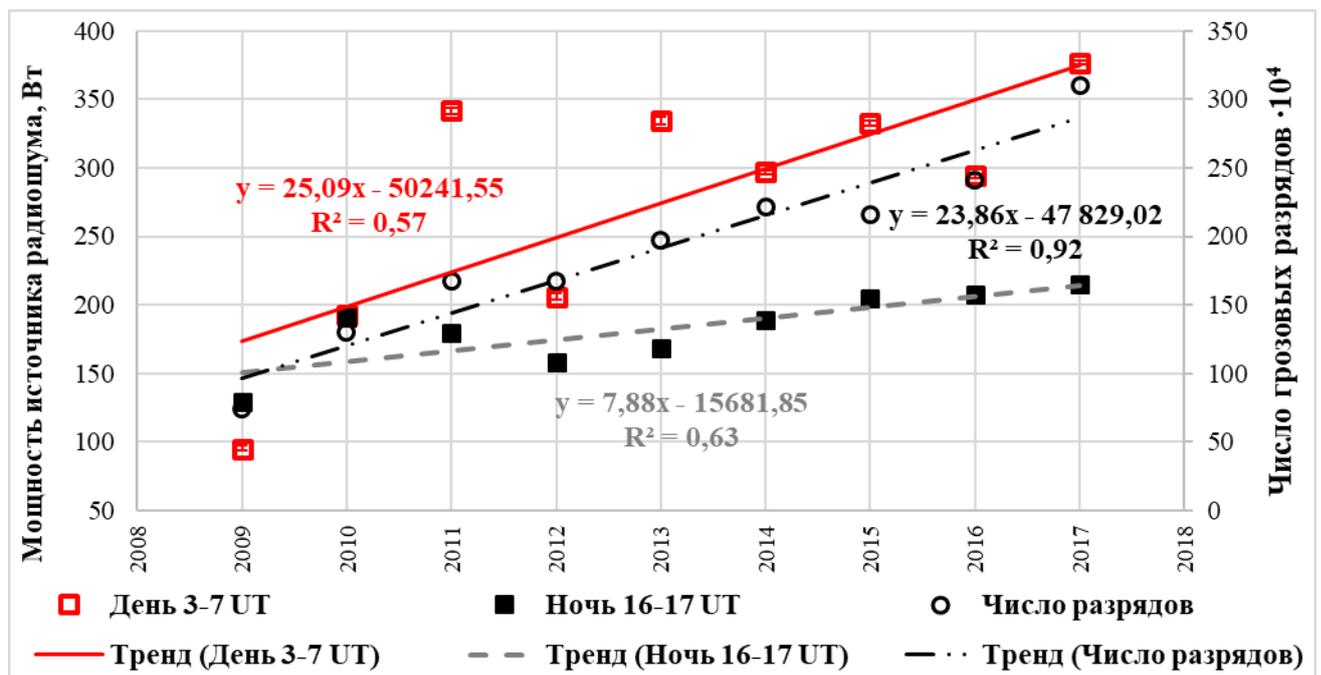


Рисунок 3.8 – Мощность источника радиопшума (14,881 кГц) с учетом межгодовых вариаций функции распространения в Северной Азии в период нарастания, максимума и спада в 24-м цикле солнечной активности и число грозных разрядов Северной Азии в летний период с 2009 по 2017 гг.

Летом мощность источников радиошума на частоте 14,881 кГц (грозовая активность) с 2009 по 2017 гг. возросла в 2,5 раза днем (3-7 UT) и в 1,5 раза ночью (16-17 UT). По данным сети WWLLN с 2009 по 2017 гг. также отмечается возрастание суммарного числа грозовых разрядов в Северной Азии (40-80° с.ш., 60-180° в.д.) летом в 3,1 раза. Нами также установлено, что с учетом межгодовых вариаций функции распространения в Северной Азии в период нарастания, максимума и спада 24-го цикла солнечной активности, оценки летнего межгодового (с 2009 по 2017 гг.) возрастания мощности радиошума на частоте 11,904 кГц от грозовых источников составили 2,5 раза (4 дБ) днем и ночью [Корсаков, Козлов, 2023].

В работе [Yang, Li, 2014] указывается на увеличение грозовой активности в Юго-Восточном Китае с 1990 по 2012 гг. В работе [Price, Rind, 1994] на основе модели общей циркуляции (GCM) Института космических исследований им. Годдарда (GISS) получены оценки мирового изменения числа гроз на 5-6 % для глобального потепления и похолодания на каждый 1 °С. Увеличение грозовой активности соответствует потеплению климата. Величина смоделированного изменения грозовых разрядов зависит от сезона, местоположения и времени суток. В работе [Biskaborn et al., 2019] указывается, что за последние четыре десятилетия за Полярным кругом отмечалось повышение температуры примерно на 1,5 – 2,5 °С, и при этом потепление продолжает усиливаться.

3.5 Основные выводы к главе 3

В результате регистрации амплитуды и фазы радионавигационных сигналов системы РСДН – 20 («Альфа») в г. Якутске в 24-м цикле солнечной активности (2009-2017 гг.) получены устойчивые суточные и сезонные вариации.

1. Амплитуда принимаемого ОНЧ-сигнала днем меньше, чем ночью, и максимальная дневная амплитуда сигнала регистрируется летом во время зенита Солнца на середине радиотрассы. Регистрируемые суточные вариации амплитуды интерпретируются как изменения высотного градиента концентрации электронов

нижней ионосферы. Регистрируется увеличение фазовой задержки радиосигнала от дня к ночи. Это характерно для увеличения эффективной высоты волновода Земля – ионосфера. Исключение составляет уменьшение задержки фазы в ночное зимнее время на радиотрассе малой протяженности Хабаровск – Якутск (1400 км), что может объясняться интерференцией мод высших порядков.

2. При регистрации в Якутске ярко выражены сезонные дневные вариации амплитуды ОНЧ-радиосигналов передатчиков. Амплитуда сигнала повышается от декабря к июню. Это связано с уменьшением зенитного угла Солнца на радиотрассах с декабря по июнь и с увеличением высотного градиента концентрации электронов в нижней ионосфере. Проявляется зимняя аномалия нижней ионосферы: зимой регистрируются меньшие амплитуды ОНЧ-радиосигналов с большими флуктуациями. Выделяется сезонная асимметрия высотных профилей концентрации электронов нижней ионосферы: дневная амплитуда ОНЧ-радиосигналов осеннего равноденствия ближе к летнему солнцестоянию, а амплитуда весеннего равноденствия – к зимнему солнцестоянию.

3. Сезонные дневные вариации мощности радиошума, амплитуды и фазы сигналов радиопередатчиков системы РСДН-20 (с протяженностью радиотрасс более 2500 км) регистрируемые в Якутске на частоте 11,904 кГц соответствуют дневным вариациям на частоте 14,881 кГц, что указывает на схожие вариации параметров нижней ионосферы, ответственных за отражение на этих частотах.

4. Зарегистрировано нарастание мощности ОНЧ-радиошума и амплитуды сигналов радиопередатчиков в период нарастания солнечной активности (СА) 2009 – 2014 гг.; в период спада СА (2015 – 2017 гг.) регистрируется спад амплитуды радиосигналов и мощности ОНЧ-радиошума летом и зимой. Межгодовые вариации амплитуды ОНЧ-сигнала зимой в период повышения до максимума в 24-м цикле солнечной активности больше чем летом. На фоне сезонных изменений в 24-м цикле СА, межгодовые вариации фазы ОНЧ-радиосигналов не выделяются. В зимний период ночью от минимума до

максимума солнечной активности регистрируется повышение фазовой задержки на радиотрассе меньшей протяженности Хабаровск – Якутск (1400 км) на $18 \pm 6^\circ$.

5. При сопоставлении среднемесячных суточных вариаций среднеквадратичных значений амплитуды ОНЧ-радишума и сигналов радиостанций получено суточное нарастание грозовой активности в Северной Азии в летний период. Указанное нарастание в максимуме (июль, 3 – 12 UT) составляет 10,1 дБ (относительно минимума в 2 UT). Наименьшее отношение сигнал/шум для наиболее удаленного от Якутска передатчика Краснодар РСДН-20, составляет 2,5 дБ (летний период 6 – 12 UT).

6. С учетом вариаций функции распространения радиосигналов на частотах 11,904 и 14,881 кГц получено, что интенсивность грозовой активности в Северной Азии летом с 2009 по 2017 гг. возросла в 2,5 раза днем и от 1,5 до 2,5 раз ночью. Полученное межгодовое нарастание соответствует нарастанию числа гроз по данным Мировой сети локации молний (World Wide Lightning Location Network). Общее число грозовых разрядов по данным WWLLN для Северной Азии ($40 - 80^\circ$ с.ш., $60 - 180^\circ$ в.д.) в летний период с 2009 по 2017 гг. увеличилось в 3,1 раза. Регистрируемая тенденция к нарастанию грозовой активности может быть вызвана глобальным потеплением.

ГЛАВА 4. Эффекты рентгеновских солнечных вспышек в вариациях фазы ОНЧ-сигналов радиостанций

Результаты, представленные в четвертой главе, опубликованы в [Korsakov, Kozlov, Karimov, 2018; Стародубцев и др., 2019; Козлов и др., 2015; Korsakov, Kozlov, Karimov, 2017; Корсаков, Козлов, 2023; Корсаков, Козлов, Каримов, 2016; Korsakov, Kozlov, Karimov, 2021; Корсаков, 2023а; Козлов и др., 2025; Korsakov et al., 2014; Баишев и др., 2017].

По данным спутников GOES [GOES space environment monitor] за период 2009 – 2017 гг. был составлен каталог солнечных рентгеновских вспышек класса C3.0 и выше.

Выделение эффектов внезапных ионосферных возмущений (ВИВ) в зарегистрированных данных проводилось после медианного усреднения. Определялся интервал значений, соответствовавший времени излучения сигнала анализируемого радиопередатчика (400 мс). Из этого интервала считывался интервал длительностью 268,8 мс, соответствующий 100 значениям амплитуд или фаз, не попадающих на фронт или спад радиоимпульса анализируемого радиопередатчика. В этом массиве по 100 значениям вычислялась медиана амплитуды или фазы. Следующие 100 значений для анализа считывались через цикл пакета излучения радиопередатчиков $T_{\text{ц}} = 3,6$ с (через 1339 значений). Таким образом, выделение эффектов ВИВ проводилось по полученному ряду медианных значений амплитуды и фазы с разрешением по времени 3,6 секунды.

На рисунке 4.1 представлены интенсивность потока рентгеновского излучения Солнца по данным спутника GOES-15 [GOES space environment monitor] и внезапные фазовые аномалии (ВФА) 18 августа 2012 г. в суточных вариациях фазы радиосигналов передатчика Хабаровск РСДН-20 на частотах 11,904 и 14,881 кГц при регистрации в Якутске.

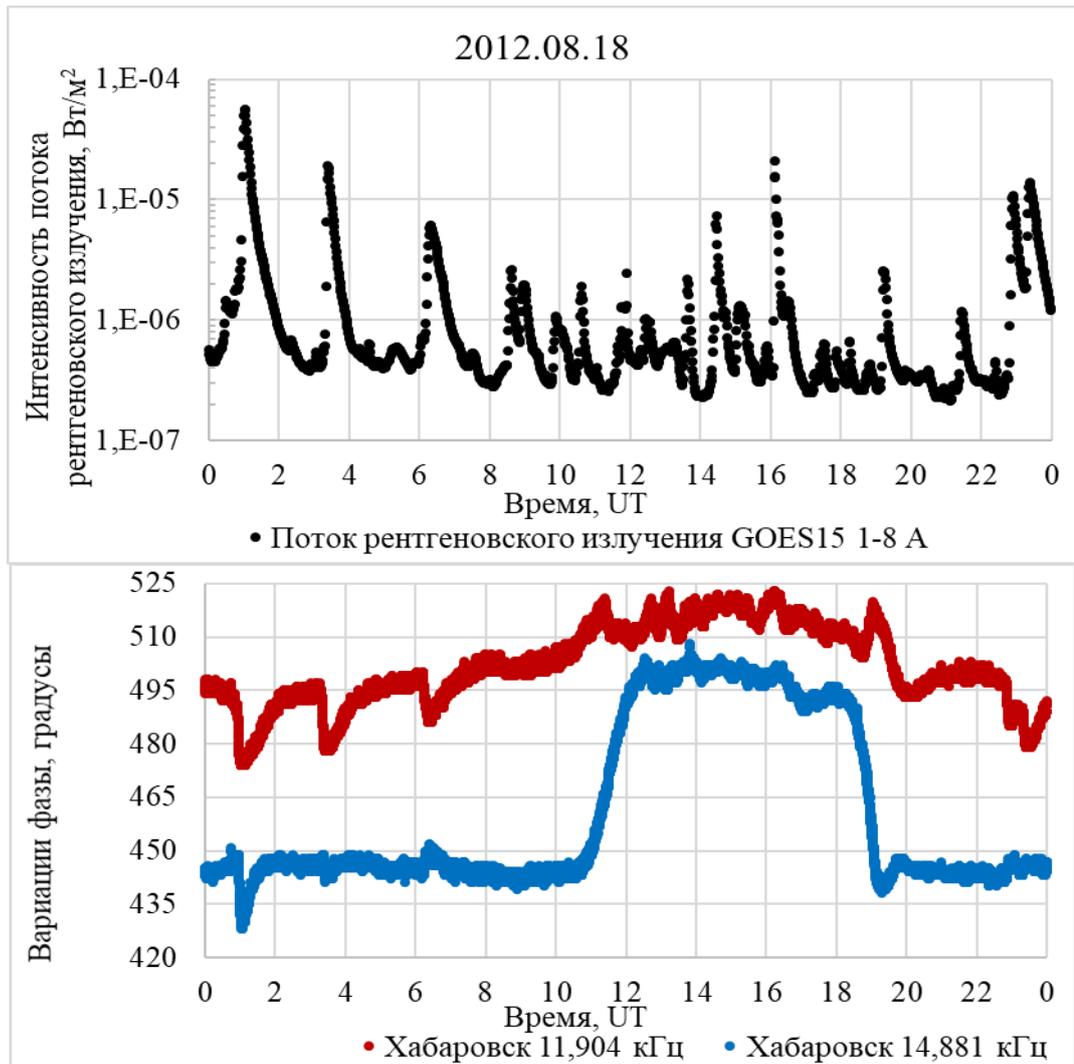


Рисунок 4.1 – Интенсивность потока рентгеновского излучения Солнца по данным спутника GOES-15 (диапазон 1-8 Å) и внезапные фазовые аномалии (ВФА) 18 августа 2012 г. в вариациях фазы радиосигналов передатчика Хабаровск РСДН-20 (11,904 и 14,881 кГц) при регистрации в Якутске

Эффект солнечной вспышки класса M5.5 (максимум интенсивности потока был зарегистрирован спутником GOES-15 в 1:02 UT) проявился в виде уменьшения фазовой задержки сигнала Хабаровск (11,904 кГц) на 22°. Вспышка класса M1.8 (в максимуме 3:23 UT) проявилась в виде уменьшения фазовой задержки сигнала Хабаровск (11,904 кГц) на 16°. Вспышки C6.1 (3:23 UT), M1.0 (22:54 UT) и M1.3 (23:22 UT) также проявились в виде уменьшения фазовой задержки сигнала Хабаровск (11,904 кГц) на 11°, 11°, и 16° соответственно.

Эффект солнечной вспышки M5.5 (1:02 UT) проявился в виде уменьшения фазовой задержки сигнала Хабаровск (14,881 кГц) на 19° . Эффект вспышки M1.8 (3:23 UT) проявился в виде уменьшения фазовой задержки сигнала Хабаровск (14,881 кГц) на 5° . Вспышка C6.1 (3:23 UT) проявилась в виде повышения фазовой задержки сигнала Хабаровск (14,881 кГц) на 6° . Эффекты вспышек M1.0 (22:54 UT) и M1.3 (23:22 UT) в вариациях фазы сигнала Хабаровск (14,881 кГц) не выделены на фоне флуктуаций.

Причинами понижения фазовых задержек ОНЧ-радиосигналов явились понижения эффективной высоты волновода Земля – ионосфера вследствие повышения интенсивности потока ионизирующего излучения во время солнечных вспышек. Меньшая чувствительность и регистрируемое повышение фазовой задержки сигнала на частоте 14,881 кГц (вспышка C6.1) во время ВИБ на радиотрассе Хабаровск – Якутск (1400 км), как и эффект вспышки M1.2 30 октября 2014 г. (рисунок 2.11), проявившийся в виде повышения фазовой задержки на 4° (4:28 UT), могут быть объяснены интерференцией мод высших порядков. Моды более высоких порядков на больших частотах могут вносить значительный вклад в общее поле на радиотрассе небольшой протяженности. В обзоре [Орлов, Азарнин, 1970] показано, что на частотах близких к 10 кГц (в нашем примере 11,904 кГц) в дневных условиях распространения вклад мод высших порядков в волноводе убывает быстрее с расстоянием из-за большего затухания.

4.1. Зависимость внезапных фазовых аномалий от интенсивности потока рентгеновского излучения Солнца

Нами выделены ВФА радиосигналов от передатчиков системы РСДН-20: Хабаровск, Новосибирск и Краснодар (11,904 кГц), регистрируемых в Якутске и Тикси в период 4 – 10 сентября 2017 г. [Korsakov, Kozlov, Karimov, 2018]. Для описания зависимости ВФА от потока рентгеновского излучения и зенитного угла Солнца использовалось эмпирическое выражение [Демькин, Кищук, 1982]:

$$\Phi = A + B \cdot \text{Lg}(P \cdot \text{Cos}(X)), \quad (4.1)$$

где Φ – вариация фазы ОНЧ-сигнала, приведенная к единице протяженности радиотрассы, градус/Мм;

P – интенсивность потока рентгеновского излучения Солнца в диапазоне 1 - 8 Å, Вт/м²;

$\text{Cos}(X)$ – усредненное вдоль трассы распространения значение косинуса зенитного угла Солнца X .

Протяженности радиотрасс Краснодар – Якутск, Новосибирск – Якутск и Хабаровск – Якутск составляют 5,76, 2,64, 1,4 Мм соответственно. Протяженности радиотрасс Краснодар – Тикси, Новосибирск – Тикси и Хабаровск – Тикси составляют 5,32, 2,71 и 2,43 Мм соответственно. Значения зенитного угла Солнца вдоль радиотрасс по географическим координатам с разрешением 200 км рассчитаны по алгоритму [Schlyter, 2003]. На основе событий ВФА с 4 по 10 сентября 2017 г. при регистрации в Якутске и Тикси в условиях дневного распространения методом наименьших квадратов оценены параметры модели (4.1).

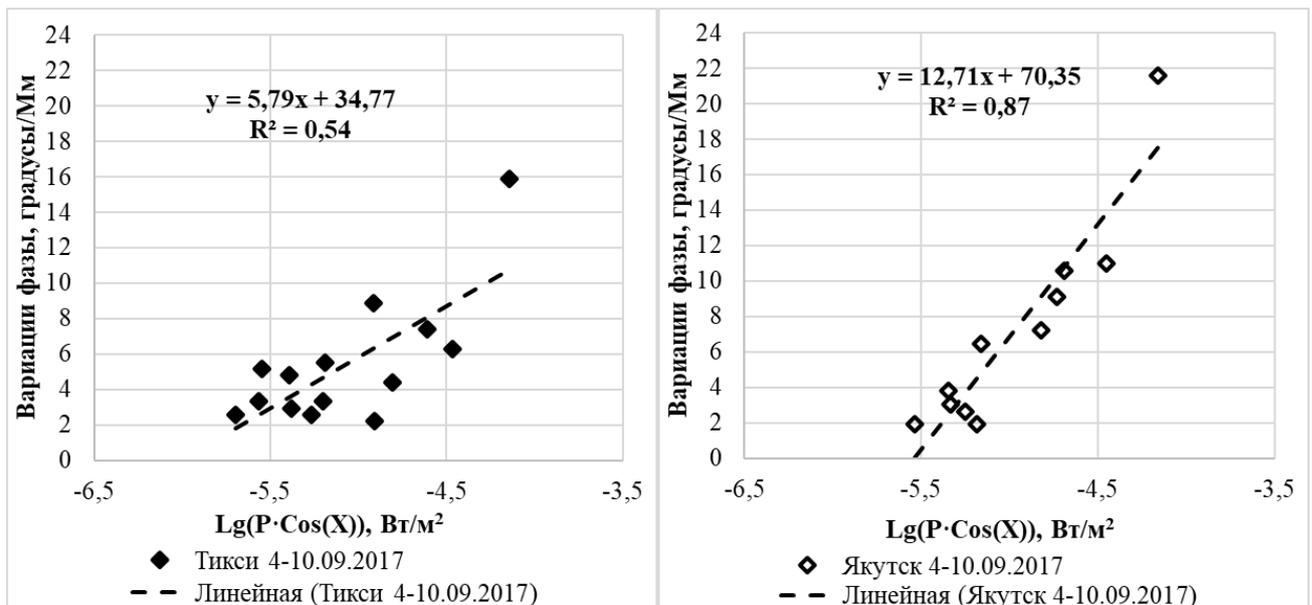


Рисунок 4.2 – Внезапные фазовые аномалии сигнала Новосибирск на частоте 11,904 кГц при регистрации в Тикси (левая панель) и Якутске (правая панель) в зависимости от потока рентгеновского излучения Солнца

На рисунке 4.2 представлены ВФА сигнала Новосибирск на частоте 11,904 кГц при регистрации в Тикси и Якутске в зависимости от потока рентгеновского излучения Солнца [Стародубцев и др., 2019].

За период 4 – 10 сентября 2017 г. при регистрации вариаций фазы сигнала Новосибирск (11,904 кГц) в ПГО Тикси (протяженность радиотрассы 2,71 Мм) были выделены эффекты солнечных вспышек от класса C4.2 (9.09.2017 в 4:01 UT при среднем вдоль трассы косинусе зенитного угла $\text{Cos}(X) = 0,48$) до класса X2.2 (6.09.2017 в 9:10 UT, $\text{Cos}(X) = 0,33$), при этом зарегистрированы внезапные фазовые аномалии от 2,58 до 15,87 градус/Мм соответственно, при этом оценки ВФА на основе регрессионной модели (4.1): от 1,78 до 10,78 градус/Мм соответственно. Среднеквадратическое отклонение остаточных невязок модельных значений от экспериментальных ВФА составило 2,55 градус/Мм. На радиотрассе Новосибирск – Якутск (протяженность 2,64 Мм) были выделены эффекты солнечных вспышек от класса C9.8 (5.09.2017 в 0:35 UT при среднем вдоль трассы косинусе зенитного угла $\text{Cos}(X) = 0,29$) до X2.2 (6.09.2017 в 9:10 UT, $\text{Cos}(X) = 0,32$), при этом зарегистрированы ВФА от 1,89 до 21,59 градус/Мм соответственно, оценки ВФА по модели (4.1): от 0,01 до 17,52 градус/Мм соответственно. СКО остаточных невязок составило 2,24 градус/Мм.

В таблице 4.1 представлены параметры зависимости ВФА от потока рентгеновского излучения Солнца для рассматриваемых шести радиотрасс. Уровень надежности этих параметров по критерию Фишера: не менее 99 %.

Для рассмотренных шести ОНЧ-радиотрасс, расположенных в Северной Евразии, величина внезапных фазовых аномалий, вызванных солнечными рентгеновскими вспышками, описывается линейной функцией логарифма произведения интенсивности потока рентгеновского излучения и усредненного вдоль радиотрассы косинуса зенитного угла Солнца. Для радиотрасс Краснодар – Якутск, Краснодар – Тикси, Новосибирск – Якутск, Новосибирск – Тикси, Хабаровск – Якутск и Хабаровск – Тикси проведена адаптация параметров этой зависимости.

Таблица 4.1 – Параметры зависимости ВФА от логарифма произведения интенсивности потока рентгеновского излучения (1–8 Å) на косинус зенитного угла Солнца, усредненного вдоль трассы распространения

Радиотрасса	Объем выборки	A	B	Коэффициент детерминации R^2	СКО остаточных невязок, градус/Мм
Хабаровск – Якутск, 1,4 Мм	17	$38,1 \pm 9,8$	$5,9 \pm 1,9$	0,36	2,70
Хабаровск – Тикси, 2,43 Мм	20	$29,5 \pm 5,9$	$4,6 \pm 1,1$	0,48	1,67
Новосибирск – Якутск, 2,64 Мм	11	$70,4 \pm 8,2$	$12,7 \pm 1,6$	0,87	2,24
Новосибирск – Тикси, 2,71 Мм	14	$34,8 \pm 7,9$	$5,8 \pm 1,6$	0,54	2,55
Краснодар – Якутск, 5,76 Мм	10	$56,7 \pm 10,3$	$9,6 \pm 2,1$	0,72	4,34
Краснодар – Тикси, 5,32 Мм	7	$53,3 \pm 3,3$	$9,3 \pm 0,7$	0,97	1,1

В работе [Башкуев и др., 2018] проведен анализ условий распространения ОНЧ-радиоволн от передатчиков РСДН-20 (частоты 11,904 и 14,881 кГц) по радиотрассам широтной ориентации: Новосибирск – Улан-Удэ (протяженность 1580 км) и Комсомольск-на-Амуре – Улан-Удэ (протяженность 2080 км) во время сильных магнитных бурь и солнечных вспышек 1 – 12 сентября 2017 г. Выявлены существенные амплитудно-фазовые вариации сигналов при распространении в возмущенных геомагнитных условиях. Увеличение концентрации электронов в области D ионосферы при гелиогеофизических возмущениях является основным фактором, влияющим на параметры ОНЧ-радиосигнала в волноводе Земля – ионосфера. Увеличение концентрации электронов в нижней ионосфере можно рассматривать как изменение геометрии волновода.

4.2. Внезапные фазовые аномалии при регистрации ОНЧ-сигналов радиостанций в 24-м цикле солнечной активности

Для описания зависимости величины внезапной фазовой аномалии с разделением влияния интенсивности потока рентгеновского излучения и

зенитного угла Солнца (освещенности трассы и поглощения ионизирующего излучения Солнца в верхней части атмосферы) в работах [Беленький, 2002; Belenkiy et al., 2006] было предложено эмпирическое выражение:

$$\Phi = A1 + B1 \cdot Lg(P) + C1 \cdot Lg(Cos(X)), \quad (4.2)$$

где Φ – вариация фазы ОНЧ-сигнала, приведенная к единице протяженности радиотрассы, градус/Мм;

P – интенсивность потока рентгеновского излучения Солнца в диапазоне 1 - 8 Å, Вт/м²;

$Cos(X)$ – усредненное вдоль трассы распространения значение косинуса зенитного угла Солнца X .

При регистрации в Якутске ОНЧ-сигналов радиостанций для описания сезонной зависимости ВФА от потока рентгеновского излучения и зенитного угла Солнца нами применялось выражение (4.2) [Козлов и др., 2015]. Для условий, когда зенитный угол Солнца не превышает 90° в районе расположения передатчика и приемника (дневные условия распространения) по данным регистрации в г. Якутске с 2009 по 2013 гг. отобраны ВФА сигналов передатчиков Новосибирск и Краснодар (14,881 кГц) для рентгеновских вспышек класса C4.0 и выше. Таким образом, был задан порог интенсивности потока рентгеновского излучения 4·10⁻⁶ Вт/м² в диапазоне 1-8 Å, которому, согласно работе [Deshpande, Subrahmanyam, Mitra, 1972], соответствовала степень жесткости спектра рентгеновского излучения 2·10⁻².

По значениям интенсивности потока рентгеновского излучения P , зенитному углу Солнца X и приведенным к протяженности трассы максимальным отклонениям фазы сигналов (относительно невозмущенного значения) оценены параметры модели (4.2) для зимы (декабрь – февраль) и лета (июнь – август). Дата, время солнечных вспышек и интенсивность потока рентгеновского излучения взяты по данным Лаборатории рентгеновской астрономии Солнца ФИАН [Лаборатория рентгеновской астрономии Солнца. ФИАН, дата обращения

12.03.2014]. На основе алгоритма [Schlyter, 2003] по географическим координатам вычислялся зенитный угол Солнца.

Коэффициенты AI , BI и CI модели (4.2) оценены методом наименьших квадратов и представлены в таблице 4.2, где также указаны стандартные отклонения этих оценок и среднеквадратичное значение остаточных невязок S модельных и экспериментальных значений ВФА.

Таблица 4.2 – Параметры модели ВФА с разделением влияния интенсивности потока рентгеновского излучения и зенитного угла Солнца

Трасса	Сезон	Объем выборки	AI	BI	CI	S
Новосибирск-Якутск	лето	33	$53,67 \pm 3,08$	$9,26 \pm 0,62$	$6,06 \pm 3,02$	1,77
	зима	20	$60,97 \pm 5,03$	$10,78 \pm 0,93$	$2,17 \pm 1,75$	1,71
Краснодар-Якутск	лето	30	$51,14 \pm 2,36$	$8,87 \pm 0,47$	$5,85 \pm 2,23$	1,19
	зима	14	$64,64 \pm 13,31$	$11,56 \pm 2,64$	$2,45 \pm 3,22$	2,77

Анализ показал, что пороговая чувствительность ВФА по интенсивности потока рентгеновского излучения P (отношение AI и BI) на радиотрассах Новосибирск – Якутск и Краснодар – Якутск слабо зависит от сезона. Отклонение фазы при фиксированных значениях потока P и зенитного угла Солнца X от лета к зиме на радиотрассах увеличивается ($AI_{лето} < AI_{зима}$). Зависимость ВФА на трассе Новосибирск – Якутск от $\cos(X)$ более крутая летом ($CI_{лето} = 6,06 > CI_{зима} = 2,17$). Зависимость ВФА на трассе Краснодар – Якутск от $\cos(X)$ наименее четкая зимой, возможно из-за широтной ориентации радиотрассы, при этом дуга радиотрассы пересекает высокие широты. В зимний период усредненный зенитный угол Солнца на трассе Краснодар – Якутск велик, что также проявилось в повышении дисперсии коэффициента $CI_{зима}$ [Козлов и др., 2015].

На рисунке 4.3 представлено сопоставление расчетных значений по модели ВФА (4.2) с экспериментальными данными. Близкое сосредоточение полученных значений около прямой $ВФА(модель) = ВФА(эксперимент)$, возможность описания значений линейным трендом (коэффициент детерминации R^2 во всех случаях превышает 0,64), малые среднеквадратичные значения остаточных

невязок, не превышающие 1,77 градус/Мм (сигнал Новосибирск) и 2,77 градус/Мм (сигнал Краснодар), позволяют считать адекватным выбор модели ВФА и полученных оценок ее параметров.

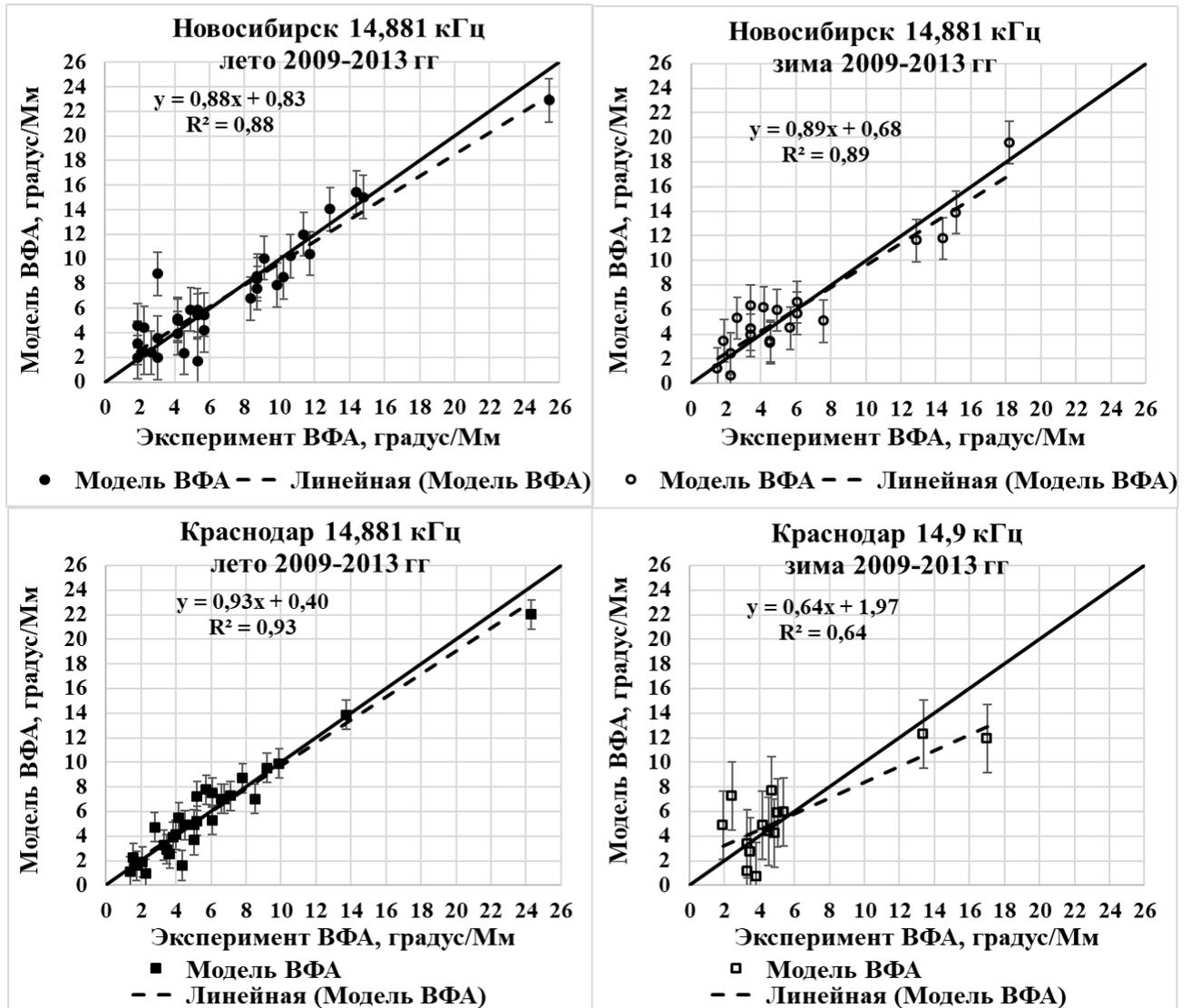


Рисунок 4.3 – Проверка на соответствие значений ВФА, рассчитанных по модели (4.2) с зарегистрированными вариациями фазы при внезапных ионосферных возмущениях

Наши результаты не противоречат работе [Данилов и др., 1983], в которой было показано, что за год высокой солнечной активности (в 1979 г., $F10.7 > 160$), нижняя ионосфера зимой, по сравнению с летом, более чувствительна к воздействию вспышечного потока рентгеновского излучения. Отмечаются

сезонные вариации параметров нижней ионосферы: понижение эффективного коэффициента рекомбинации от лета к зиме [Данилов, Симонов, 1981].

Для регистрируемых в Якутске вариаций фазы сигналов ОНЧ-передатчиков выделены контрольные выборки по 250 значений (длительность регистрации 15 минут). Выборки соответствуют дневным невозмущенным условиям распространения для каждого сезона. По выборкам определены доверительные интервалы случайного измерения фазы радиосигнала (уровень значимости $p = 0,05$). Перед определением параметров регрессионной модели (4.1) значения ВФА выделялись согласно составленного каталога ВИБ с 2009 по 2017 гг. Отбирались ВИБ максимум изменения фазы сигнала Φ в соответствующий сезон у которых выходил за доверительный интервал, приведенный к протяженности радиотрассы.

В таблице 4.3 представлены статистические параметры контрольных выборок (длительность 15 минут) вариаций фазы радиосигнала Краснодар (11,904 кГц) при регистрации в Якутске.

Таблица 4.3 – Статистические параметры контрольных выборок (длительность 15 минут) вариаций фазы сигнала Краснодар (11,904 кГц) при регистрации в Якутске

Статистический параметр	14.03.2014 5 UT	14.06.2013 3 UT	05.09.2014 5 UT	11.12.2014 5 UT
Среднее арифметическое	272,89°	199,2°	223,22°	264,26°
Медиана	273°	199°	223°	264°
Мода	273°	199°	223°	264°
Эксцесс	0,1	1,65	0,22	0,14
Асимметричность	0,19	0,34	0,26	0,2
Минимум	268°	189°	217°	240°
Максимум	279°	210°	230°	297°
Среднеквадратичное отклонение (СКО)	1,94°	2,61°	2,34°	10,14°
Доверительный интервал $\pm 2 \cdot \text{СКО}$ ($p=0,05$)	$\pm 3,88^\circ$	$\pm 5,22^\circ$	$\pm 4,68^\circ$	$\pm 20,28^\circ$
Доверительный интервал, приведенный к протяженности трассы 5,76 Мм ($p=0,05$)	$\pm 0,67^\circ/\text{Мм}$	$\pm 0,91^\circ/\text{Мм}$	$\pm 0,81^\circ/\text{Мм}$	$\pm 3,52^\circ/\text{Мм}$

На рисунке 4.4 представлены распределения вариаций фазы радиосигнала Краснодар (11,904 кГц) при регистрации в Якутске в контрольных выборках 14 июня 2013 г. в 3 UT и 11 декабря 2014 г. в 5 UT.

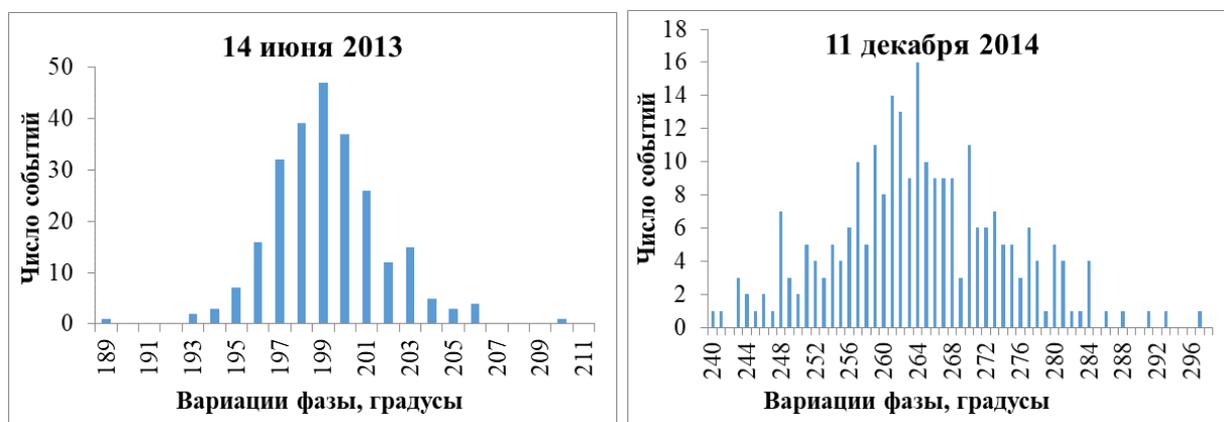


Рисунок 4.4 – Распределения вариаций фазы радиосигнала Краснодар (11,904 кГц) при регистрации в Якутске в контрольных выборках (длительность 15 минут) 14 июня 2013 г. 3 UT (левая панель) и 11 декабря 2014 г. 5 UT (правая панель)

В таблице 4.4 представлены параметры контрольных выборок вариаций фазы сигнала Хабаровск (11,904 кГц) при регистрации в Якутске.

Таблица 4.4 – Статистические параметры контрольных выборок (длительность 15 минут) вариаций фазы сигнала Хабаровск (11,904 кГц) при регистрации в Якутске

Статистический параметр	13.03.2014 5 UT	14.06.2013 5 UT	05.09.2014 5 UT	01.01.2014 5 UT
Среднее арифметическое	141,13°	131,75°	472,36°	139,36°
Медиана	141°	132°	472°	139°
Мода	141°	131°	472°	139°
Эксцесс	1,22	0,24	0,05	0,99
Асимметричность	0,49	0,86	0,52	-0,06
Минимум	140°	130°	470°	136°
Максимум	142°	134°	476°	141°
Среднеквадратичное отклонение (СКО)	0,46°	0,95°	1,32°	0,77°
Доверительный интервал $\pm 2 \cdot \text{СКО}$ ($p=0,05$)	$\pm 0,92^\circ$	$\pm 1,90^\circ$	$\pm 2,64^\circ$	$\pm 1,54^\circ$
Доверительный интервал, приведенный к протяженности трассы 1,4 Мм ($p=0,05$)	$\pm 0,66^\circ/\text{Мм}$	$\pm 1,36^\circ/\text{Мм}$	$\pm 1,89^\circ/\text{Мм}$	$\pm 1,10^\circ/\text{Мм}$

В таблице 4.5 представлены статистические параметры контрольных выборок (длительность 15 минут) вариаций фазы радиосигнала Новосибирск (11,904 кГц) при регистрации в Якутске.

Таблица 4.5 – Статистические параметры контрольных выборок (длительность 15 минут) вариаций фазы радиосигнала Новосибирск (11,904 кГц) при регистрации в Якутске

Статистический параметр	14.03.2014 5 UT	14.06.2013 5 UT	05.09.2014 5 UT	11.12.2014 5 UT
Среднее арифметическое	268,62°	252,18°	255,19°	268,02°
Медиана	269°	252°	255°	268°
Мода	269°	252°	255°	268°
Экссесс	0,02	1,73	0,33	0,05
Асимметричность	0,01	0,98	0,25	0,02
Минимум	268°	250°	254°	265°
Максимум	271°	257°	257°	271°
Среднеквадратичное отклонение (СКО)	0,52°	1,08°	0,6°	1,01°
Доверительный интервал $\pm 2 \cdot \text{СКО}$ ($p=0,05$)	$\pm 1,04^\circ$	$\pm 2,16^\circ$	$\pm 1,20^\circ$	$\pm 2,02^\circ$
Доверительный интервал, приведенный к протяженности трассы 2,64 Мм ($p=0,05$)	$\pm 0,39^\circ/\text{Мм}$	$\pm 0,82^\circ/\text{Мм}$	$\pm 0,45^\circ/\text{Мм}$	$\pm 0,77^\circ/\text{Мм}$

Поток радиоизлучения Солнца на волне 10,7 см (F10.7) коррелирован с интенсивностью потока Лайман- α (121,6 нм) [Криволицкий, Куницын, 2007b]. На основе данных о F10.7 [OMNIWeb] нами определены интервалы возрастания солнечной активности (СА): для зимних условий – 2014 г. и для летних условий – 2013-2014 гг. Условия, приближенные к минимуму СА: 2009 – 2010 гг., восходящая ветвь СА: 2011 г., а нисходящая ветвь СА: 2016 г. Данные за 2017 г. приближены к минимуму СА [Korsakov, Kozlov, Karimov, 2017].

На рисунке 4.5 представлены внезапные фазовые аномалии сигнала Новосибирск на частоте 11,904 кГц, регистрируемые в Якутске зимой и летом, как функция потока рентгеновского излучения Солнца.

На рисунке 4.6 представлены внезапные фазовые аномалии сигнала Хабаровск на частоте 11,904 кГц при регистрации в Якутске зимой и летом, как функция потока рентгеновского излучения Солнца.

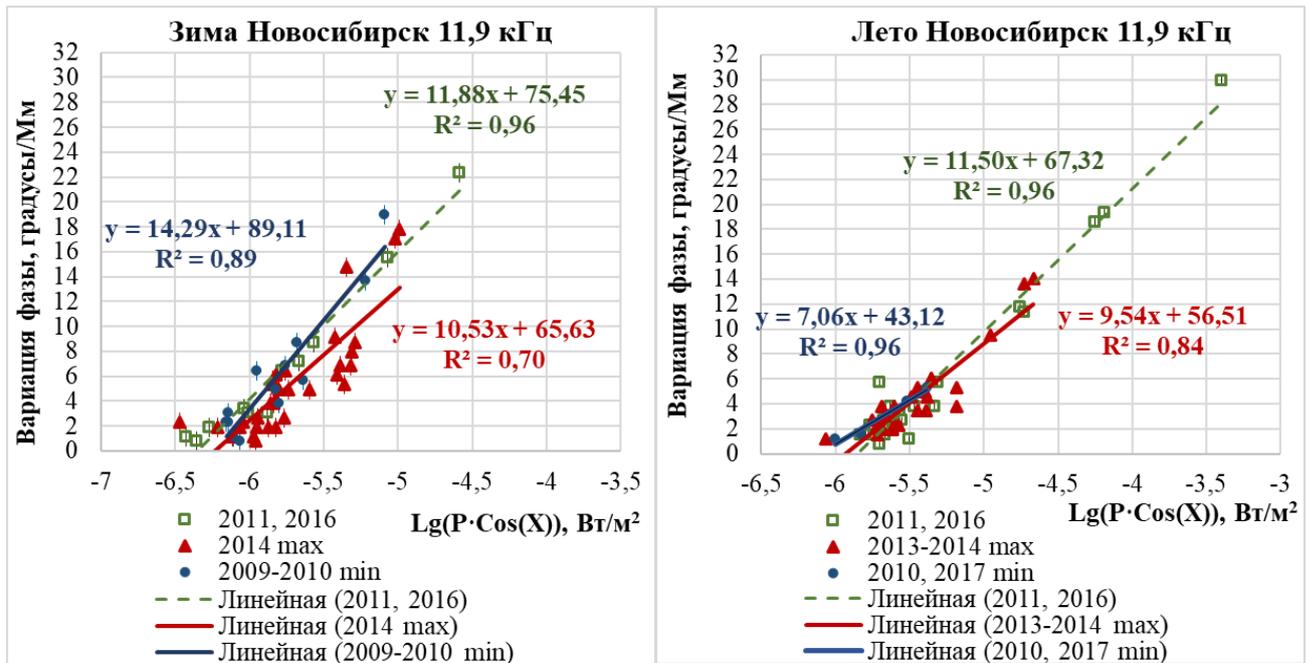


Рисунок 4.5 – Внезапные фазовые аномалии сигнала Новосибирск (11,904 кГц), регистрируемые в Якутске зимой (левая панель) и летом (правая панель), как функция потока рентгеновского излучения Солнца

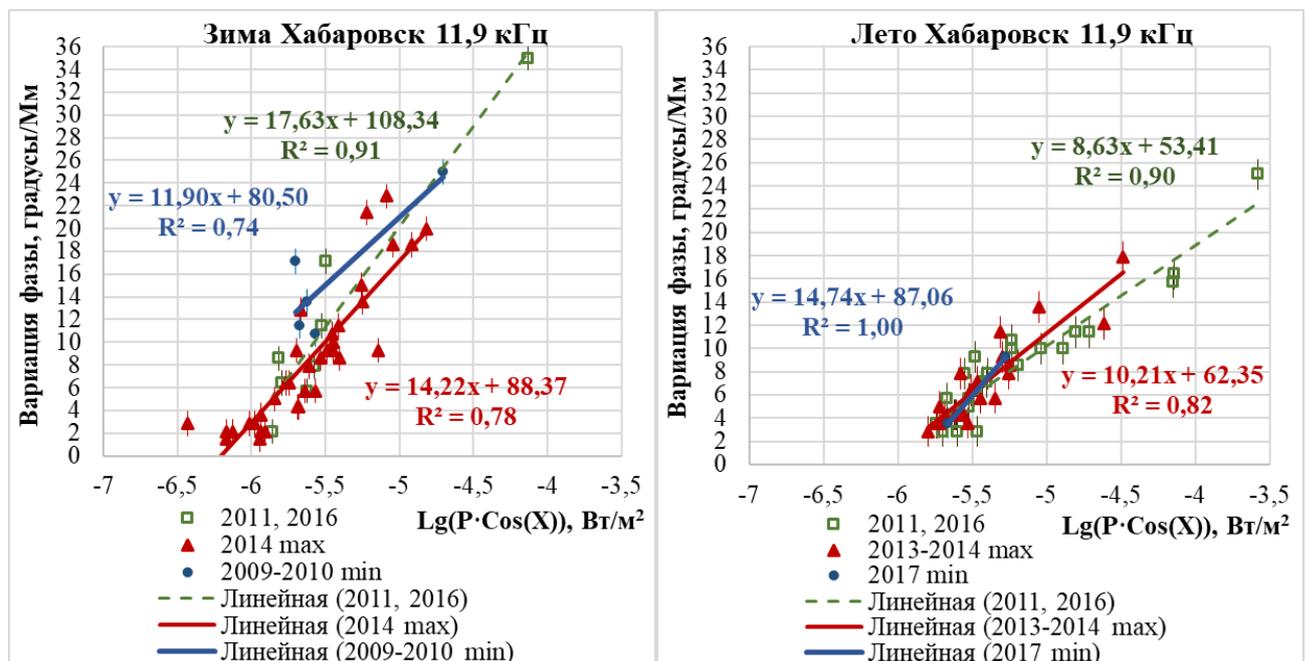


Рисунок 4.6 – Внезапные фазовые аномалии сигнала Хабаровск (11,904 кГц), регистрируемые в Якутске зимой (левая панель) и летом (правая панель), как функция потока рентгеновского излучения Солнца

На рисунке 4.7 представлены внезапные фазовые аномалии сигнала Краснодар на частоте 11,904 кГц при регистрации в Якутске зимой и летом, как функция потока рентгеновского излучения Солнца.

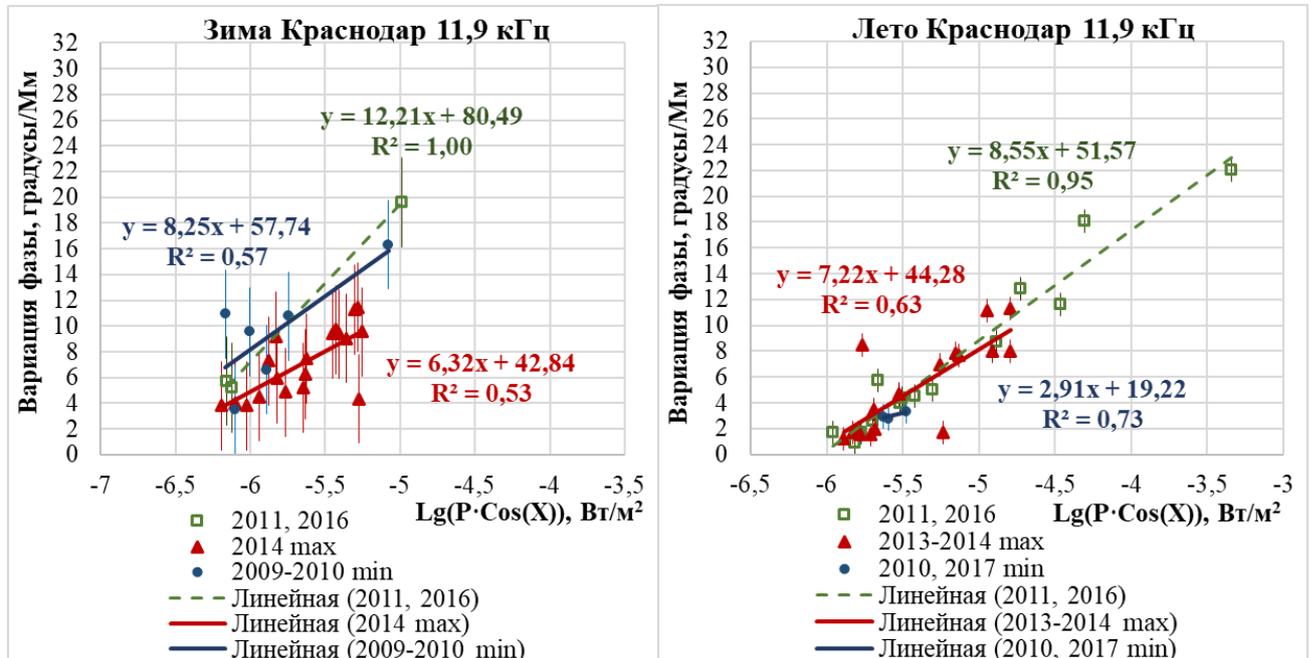


Рисунок 4.7 – Внезапные фазовые аномалии сигнала Краснодар (11,904 кГц), регистрируемые в Якутске зимой (левая панель) и летом (правая панель), как функция потока рентгеновского излучения Солнца

Параметры регрессионной модели ВФА сигналов РСДН-20 (11,904 кГц) при регистрации в Якутске за период 2009 – 2017 гг. представлены в таблице 4.6.

Рассчитанный по критерию Фишера уровень надежности параметров регрессионной модели ВФА в большинстве случаев составил не менее 95 %. Исключение составили параметры модели ВФА для сигналов Хабаровск и Краснодар в летний период при минимуме солнечной активности (2010 и 2017 гг.), а также Краснодар (зима, минимум СА: 2009 – 2010 гг.), возможно из-за малого числа зарегистрированных событий ВФА [Корсаков, Козлов, 2023].

Таблица 4.6 – Параметры регрессионной модели внезапных фазовых аномалий сигналов РСДН-20 (11,904 кГц) при регистрации в Якутске за период 2009 – 2017 гг.

Радиотрасса	Сезон	Период СА	Объем выборки	A	B	Коэффициент детерминации и R^2	СКО невязок, градус/Мм
Новосибирск – Якутск	зима	2009-2010 минимум	13	89,11±8,9	14,29±1,53	0,89	1,83
		2011, 2016	11	75,45±4,51	11,88±0,78	0,96	1,37
		2014 максимум	31	65,63±7,29	10,53±1,27	0,70	2,43
	лето	2010, 2017 минимум	4	43,12±5,57	7,06±0,98	0,96	0,48
		2011, 2016	23	67,32±2,66	11,5±0,5	0,96	1,46
		2013-2014 максимум	23	56,51±4,99	9,54±0,91	0,84	1,42
Хабаровск – Якутск	зима	2009-2010 минимум	5	80,5±22,17	11,9±4,05	0,74	3,42
		2011, 2016	8	108,34±12,31	17,63±2,24	0,91	3,32
		2014 максимум	35	88,37±7,39	14,22±1,31	0,78	2,9
	лето	2010, 2017 минимум	2	-	-	-	-
		2011, 2016	23	53,38±3,25	8,64±0,62	0,9	1,68
		2013-2014 максимум	21	62,35±5,94	10,21±1,1	0,82	1,68
Краснодар – Якутск	зима	2009-2010 минимум	6	57,74±20,83	8,25±3,57	0,57	3,18
		2011, 2016	3	80,49±4,07	12,21±0,7	0,997	0,66
		2014 максимум	19	42,84±8,22	6,32±1,46	0,53	1,86
	лето	2010, 2017 минимум	3	19,22±9,9	2,91±1,78	0,73	0,2
		2011, 2016	15	51,57±2,95	8,55±0,56	0,95	1,54
		2013-2014 максимум	17	44,28±7,73	7,22±1,43	0,63	2,54

Зимой в период минимума СА (2009 – 2010 гг.) в вариациях фазы сигнала Новосибирск выделены эффекты солнечных вспышек от класса C4.3 (13.02.2010 в 7:52 UT при среднем вдоль радиотрассы Новосибирск – Якутск косинусе зенитного угла $\text{Cos}(X) = 0,16$) до M6.4 (7.02.2010 в 2:34 UT, $\text{Cos}(X) = 0,13$), при этом зарегистрированы ВФА от 2,27 до 18,95 градус/Мм соответственно. На

основе параметров модели (4.1), адаптированных по экспериментальным данным (таблица 4.6), оценки ВФА принимают значения: от 1,17 до 16,39 градус/Мм соответственно. СКО остаточных невязок модельных значений с экспериментальными ВФА составило 1,83 градус/Мм. В период 2011 и 2016 гг. выделены эффекты вспышек от С2.9 (5.02.2016 в 7:22 UT, $\text{Cos}(X) = 0,15$) до Х2.3 (15.02.2011 в 1:56 UT, $\text{Cos}(X) = 0,11$), зарегистрированы ВФА от 0,76 до 22,37 градус/Мм соответственно. Оценки ВФА: от -0,06 до 20,92 градус/Мм соответственно. СКО остаточных невязок составило 1,37 градус/Мм. В период максимума СА (2014 г.) выделены эффекты вспышек от С3.3 (14.02.2014 в 7:38 UT, $\text{Cos}(X) = 0,18$) до М5.2 (4.02.2014 в 4:00 UT, $\text{Cos}(X) = 0,2$), зарегистрированы ВФА от 1,9 до 17,82 градус/Мм соответственно. Оценки ВФА составили от 0,2 до 13,09 градус/Мм соответственно. СКО остаточных невязок: 2,43 градус/Мм. Таким образом, зимой для рентгеновской вспышки класса С4.3 при среднем вдоль трассы Новосибирск – Якутск значениях косинуса зенитного угла $\text{Cos}(X) = 0,16$ на основе регрессионного анализа по модели (4.1) получены оценки ВФА: $1,17 \pm 1,83$ градус/Мм (минимум СА: 2009 – 2010 гг.), $2,31 \pm 1,37$ градус/Мм (восходящая и нисходящая ветви СА: 2011 и 2016 гг.) и $0,82 \pm 2,43$ градус/Мм (максимум СА: 2014 г.); для вспышки класса М5.2 при $\text{Cos}(X) = 0,2$ получены оценки ВФА: $17,82 \pm 1,83$ градус/Мм (минимум СА), $16,15 \pm 1,37$ градус/Мм (восходящая и нисходящая ветви СА), $13,09 \pm 2,43$ градус/Мм (максимум СА); для вспышки Х2.3 при $\text{Cos}(X) = 0,11$ оценки ВФА составляют: $23,55 \pm 1,83$ градус/Мм (минимум СА), $20,92 \pm 1,37$ градус/Мм (восходящая и нисходящая ветви СА), $17,31 \pm 2,43$ градус/Мм (максимум СА).

Летом в период минимума СА (2010 и 2017 гг.) в вариациях фазы сигнала Новосибирск выделены эффекты солнечных вспышек от С3.0 (1.06.2017 в 22:59 UT при $\text{Cos}(X) = 0,33$) до С6.6 (1.06.2017 в 1:43 UT, $\text{Cos}(X) = 0,62$), зарегистрированы ВФА от 1,14 до 5,31 градус/Мм соответственно. Оценки ВФА: от 0,76 до 5,12 градус/Мм соответственно. СКО остаточных невязок ВФА составило 0,48 градус/Мм. В период возрастания (2011 г.) и убывания (2016 г.) СА выделены эффекты вспышек от С3.1 (8.07.2011 в 9:47 UT, $\text{Cos}(X) = 0,48$) до

X7.0 (9.08.2011 в 8:05 UT, $\text{Cos}(X) = 0,57$), зарегистрированы ВФА от 1,52 до 29,95 градус/Мм соответственно. Оценки ВФА: от 0,25 до 28,20 градус/Мм соответственно. СКО остаточных невязок ВФА составило 1,46 градус/Мм. В период максимума СА (2013-2014 гг.) в вариациях фазы сигнала Новосибирск выделены эффекты солнечных вспышек от C3.6 (23.08.2014 в 1:56 UT при $\text{Cos}(X) = 0,5$) до M2.9 (21.06.2013 в 3:14 UT, $\text{Cos}(X) = 0,74$), зарегистрированы ВФА от 2,65 до 14,03 градус/Мм соответственно. Оценки ВФА: от 1,69 до 12,02 градус/Мм. СКО остаточных невязок ВФА составило 1,42 градус/Мм. Летом для рентгеновской вспышки класса C3.1 при среднем вдоль радиотрассы Новосибирск – Якутск значения косинуса зенитного угла $\text{Cos}(X) = 0,48$ на основе регрессионного анализа по модели (4.1) получены оценки ВФА: $1,99 \pm 0,48$ градус/Мм (минимум СА), $0,25 \pm 1,46$ градус/Мм (восходящая и нисходящая ветви СА) и $0,92 \pm 1,42$ градус/Мм (максимум СА); для вспышки класса M2.9 при $\text{Cos}(X) = 0,74$ получены оценки ВФА: $10,2 \pm 0,48$ градус/Мм (минимум СА), $13,64 \pm 1,46$ градус/Мм (восходящая и нисходящая ветви СА), $12,02 \pm 1,42$ градус/Мм (максимум СА); для вспышки X7.0 при $\text{Cos}(X) = 0,57$ оценки ВФА составляют: $19,13 \pm 0,48$ градус/Мм (минимум СА), $28,2 \pm 1,46$ градус/Мм (восходящая и нисходящая ветви СА), $24,09 \pm 1,42$ градус/Мм (максимум СА).

Зимой в период минимума СА (2009 – 2010 гг.) в вариациях фазы сигнала Хабаровск выделены эффекты вспышек от класса C6.2 (08.02.2010 в 3:17 UT, $\text{Cos}(X) = 0,32$) до M6.4 (7.02.2010 в 2:34 UT, $\text{Cos}(X) = 0,31$), при этом зарегистрированы ВФА от 17,14 до 25 градус/Мм соответственно. Оценки ВФА принимают значения: от 12,65 до 24,5 градус/Мм соответственно. СКО остаточных невязок модельных значений с экспериментальными ВФА составило 3,42 градус/Мм. В период восходящей и нисходящей ветви СА (2011 и 2016 гг.) зарегистрированы ВФА от 6,43 градус/Мм (вспышка C4.9, 15.02.2011 в 4:32 UT, $\text{Cos}(X) = 0,33$) до 35 градус/Мм (X2.3, 15.02.2011 в 1:56 UT, $\text{Cos}(X) = 0,32$). Оценки ВФА составляют от 6,25 до 35,54 градус/Мм соответственно, СКО остаточных невязок составило 3,32 градус/Мм. В период максимума СА (2014 г.) выделены эффекты вспышек от C3.7 (24.12.2014 в 2:37 UT, $\text{Cos}(X) = 0,18$) до M5.2

(4.02.2014 в 4:00 UT, $\text{Cos}(X) = 0,29$), зарегистрированы ВФА от 2,14 до 20 градус/Мм соответственно. Оценки ВФА составили от 0,58 до 19,86 градус/Мм соответственно. СКО остаточных невязок: 2,9 градус/Мм. Таким образом, зимой для рентгеновской вспышки класса С3.7 при среднем вдоль радиотрассы Хабаровск – Якутск значении косинуса зенитного угла $\text{Cos}(X) = 0,18$ на основе регрессионного анализа по модели (4.1) получены оценки ВФА: $7,04 \pm 3,42$ градус/Мм (минимум СА), $-0,44 \pm 3,32$ градус/Мм (восходящая и нисходящая ветви СА) и $0,58 \pm 2,9$ градус/Мм (максимум СА); для вспышки М5.2 при $\text{Cos}(X) = 0,29$ получены оценки ВФА: $23,18 \pm 3,42$ градус/Мм (минимум СА), $23,45 \pm 3,32$ градус/Мм (восходящая и нисходящая ветви СА), $20 \pm 2,9$ градус/Мм (максимум СА); для вспышки Х2.3 при $\text{Cos}(X) = 0,32$ оценки ВФА составляют: $31,34 \pm 3,42$ градус/Мм (минимум СА), $35 \pm 3,32$ градус/Мм (восходящая и нисходящая ветви СА), $29,62 \pm 2,9$ градус/Мм (максимум СА).

Летом в период минимума СА в вариациях фазы сигнала Хабаровск выделено всего 2 эффекта солнечных вспышек С5.6 (25.08.2017 в 07:27 UT при $\text{Cos}(X) = 0,39$) и С6.6 (1.06.2017 в 1:43 UT, $\text{Cos}(X) = 0,8$), зарегистрированы ВФА от 3,57 до 9,29 градус/Мм соответственно. В период возрастания (2011 г.) и убывания (2016 г.) СА выделены эффекты вспышек от С3.0 (13.06.2016 в 5:52 UT при $\text{Cos}(X) = 0,71$) до Х7.0 (9.08.2011 в 8:05 UT, $\text{Cos}(X) = 0,38$), зарегистрированы ВФА от 5,71 до 25 градус/Мм соответственно. Оценки ВФА: от 4,38 до 22,49 градус/Мм соответственно. СКО остаточных невязок ВФА составило 1,68 градус/Мм. В период максимума СА (2013-2014 гг.) выделены эффекты вспышек от класса С3.3 (30.08.2014 в 4:56 UT при $\text{Cos}(X) = 0,62$) до М5.9 (7.06.2013 в 22:49 UT, $\text{Cos}(X) = 0,55$), зарегистрированы ВФА от 4,29 до 17,86 градус/Мм соответственно. Оценки ВФА: от 4,32 до 16,57 градус/Мм. СКО остаточных невязок ВФА составило 1,68 градус/Мм. Летом для рентгеновской вспышки класса С3.3 при $\text{Cos}(X) = 0,62$ получены оценки ВФА: $4,25 \pm 1,68$ градус/Мм (восходящая и нисходящая ветви СА) и $4,32 \pm 1,68$ градус/Мм (максимум СА); для вспышки класса М5.9 при $\text{Cos}(X) = 0,55$ получены оценки ВФА: $14,63 \pm 1,68$ градус/Мм (восходящая и нисходящая ветви СА), $16,57 \pm 1,68$ градус/Мм

(максимум СА); для вспышки X7.0 при $\text{Cos}(X) = 0,38$ оценки ВФА составляют: $22,49 \pm 1,68$ градус/Мм (восходящая и нисходящая ветви СА), $25,86 \pm 1,68$ градус/Мм (максимум СА).

Зимой в период минимума СА (2009 – 2010 гг.) в вариациях фазы сигнала Краснодар выделены эффекты солнечных вспышек от класса С4.0 (06.02.2010 в 7:04 UT, $\text{Cos}(X) = 0,19$) до М4.0 (8.02.2010 в 7:43 UT, $\text{Cos}(X) = 0,2$), при этом зарегистрированы ВФА от 3,47 до 16,32 градус/Мм соответственно. На основе параметров модели (4.1), адаптированных по экспериментальным данным (таблица 4.6), оценки ВФА принимают значения: от 7,36 до 15,83 градус/Мм соответственно. СКО остаточных невязок модельных значений с экспериментальными ВФА составило 3,18 градус/Мм. В период 2011 и 2016 гг. выделены эффекты трех вспышек от М1.0 (12.02.2016 в 10:47 UT, $\text{Cos}(X) = 0,07$) до М3.5 (24.02.2011 в 7:35 UT, $\text{Cos}(X) = 0,29$), зарегистрированы ВФА от 5,73 до 19,62 градус/Мм соответственно. Оценки ВФА: от 5,27 до 19,6 градус/Мм соответственно. СКО остаточных невязок составило 0,66 градус/Мм. В период максимума СА (2014 г.) выделены эффекты вспышек от С7.2 (14.02.2014 в 2:37 UT, $\text{Cos}(X) = 0,09$) до М3.6 (28.01.2014 в 7:31 UT, $\text{Cos}(X) = 0,15$), зарегистрированы ВФА от 3,82 до 9,55 градус/Мм соответственно. Оценки ВФА составили от 3,7 до 9,64 градус/Мм соответственно. При солнечной вспышке класса М1.7 (13.02.2014 в 6:07 UT, $\text{Cos}(X) = 0,21$) зарегистрирована ВФА 9,38 градус/Мм, оценка ВФА составила 8,4. СКО остаточных невязок: 1,86 градус/Мм. Таким образом, в зимних условиях для рентгеновской вспышки класса С4.0 при среднем вдоль радиотрассы Краснодар – Якутск значениях косинуса зенитного угла $\text{Cos}(X) = 0,19$ получены оценки ВФА: $7,36 \pm 3,18$ градус/Мм (минимум СА), $5,97 \pm 0,66$ градус/Мм (восходящая и нисходящая ветви СА) и $4,27 \pm 1,86$ градус/Мм (максимум СА); для вспышки М1.7 при $\text{Cos}(X) = 0,21$ получены оценки ВФА: $12,76 \pm 3,18$ градус/Мм (минимум СА), $13,95 \pm 0,66$ градус/Мм (восходящая и нисходящая ветви СА), $8,4 \pm 1,86$ градус/Мм (максимум СА); для вспышки класса М3.5 при $\text{Cos}(X) = 0,29$ получены оценки ВФА: $16,58 \pm 3,18$ градус/Мм (минимум

СА), $19,6 \pm 0,66$ градус/Мм (восходящая и нисходящая ветви СА), $11,33 \pm 1,86$ градус/Мм (максимум СА).

Летом в период минимума СА (2010 и 2017 гг.) в вариациях фазы сигнала Краснодар выделены эффекты солнечных вспышек от С4.4 (14.08.2010 в 10:05 UT, $\text{Cos}(X) = 0,53$) до С5.6 (25.08.2017 в 7:27 UT, $\text{Cos}(X) = 0,59$), зарегистрированы ВФА от 2,95 до 3,3 градус/Мм соответственно. Оценки ВФА: от 2,83 до 3,26 градус/Мм соответственно. СКО остаточных невязок ВФА составило 0,19 градус/Мм. В период возрастания (2011 г.) и убывания (2016 г.) СА выделены эффекты вспышек от С3.4 (17.08.2011 в 10:42 UT, $\text{Cos}(X) = 0,47$) до Х6.9 (9.08.2011 в 8:05 UT, $\text{Cos}(X) = 0,65$), зарегистрированы ВФА от 1,56 до 22,05 градус/Мм соответственно. Оценки ВФА: от 2,03 до 23,02 градус/Мм соответственно. СКО остаточных невязок ВФА составило 1,54 градус/Мм. В период максимума СА (2013-2014 гг.) выделены эффекты вспышек от класса С4.0 (26.08.2014 в 2:41 UT при $\text{Cos}(X) = 0,32$) до М5.9 (24.08.2014 в 12:17 UT, $\text{Cos}(X) = 0,27$), зарегистрированы ВФА от 1,56 до 7,99 градус/Мм соответственно. Оценки ВФА: от 1,74 до 9,66 градус/Мм. СКО остаточных невязок ВФА составило 2,25 градус/Мм. Летом для вспышки класса С3.4 при $\text{Cos}(X) = 0,47$ получены оценки ВФА: $2,34 \pm 0,19$ градус/Мм (минимум СА), $2,03 \pm 1,54$ градус/Мм (восходящая и нисходящая ветви СА) и $2,4 \pm 2,25$ градус/Мм (максимум СА); для вспышки класса М5.9 при $\text{Cos}(X) = 0,27$ получены оценки ВФА: $5,26 \pm 0,19$ градус/Мм (минимум СА), $10,62 \pm 1,54$ градус/Мм (восходящая и нисходящая ветви СА), $9,66 \pm 2,25$ градус/Мм (максимум СА); для вспышки Х6.9 при $\text{Cos}(X) = 0,65$ оценки ВФА: $9,49 \pm 0,19$ градус/Мм (минимум СА), $22,02 \pm 1,54$ градус/Мм (восходящая и нисходящая ветви СА), $20,15 \pm 2,25$ градус/Мм (максимум СА).

Зимой для радиотрассы Новосибирск – Якутск от минимума до максимума в 24-м цикле солнечной активности отмечается уменьшение чувствительности ВФА к потоку рентгеновского излучения солнечных вспышек. Это может быть объяснено уменьшением высоты волновода Земля – ионосфера с повышением фонового ионизирующего излучения в максимуме СА в зимний период. Понижение чувствительности ВФА радиосигнала при распространении вдоль

радиотрасс Хабаровск – Якутск и Краснодар – Якутск от минимума к максимуму СА находится в пределах СКО остаточных невязок модельных значений с экспериментальными ВФА. Причиной больших СКО остаточных невязок могут быть малый объем выборки на меридиональной трассе Хабаровск – Якутск, большие флуктуации фоновой интенсивности потока рентгеновского излучения Солнца и большие флуктуации фазы радиосигнала, принимаемого с большего удаления на радиотрассе Краснодар – Якутск.

В летний период изменение чувствительности ВФА от минимума к максимуму в 24-м цикле солнечной активности не зарегистрировано.

Получено соответствие нашим результатам регрессионного моделирования ВФА радиосигналов Новосибирск и Краснодар на частоте 14,881 кГц [Корсаков, Козлов, Каримов, 2016; Korsakov, Kozlov, Karimov, 2017].

В работе [Kumar, Kumar, 2018] при приеме на низких широтах ОНЧ-сигналов радиостанций было показано, что в условиях низкой СА (декабрь 2006 г., 2007 – 2010 гг.) рентгеновские вспышки перераспределяют высотный профиль концентрации электронов в ионосфере в большей степени, чем в периоды повышения СА (2012 – 2013 гг.).

Следует отметить неравномерное распределение индекса F10.7 от сезона к сезону в 24-м цикле солнечной активности. Для каждой вспышки из нашего каталога ВИБ, каждое среднесуточное значение фонового рентгеновского излучения Солнца было поставлено в соответствие индексу F10.7 [Korsakov, Kozlov, Karimov, 2021]. Значения F10.7 указываются в солнечных единицах потока ($1 \text{ с.е.п.} = 10^{-22} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{Гц})$) [OMNIWeb]. Массив ВФА сигналов РСДН-20, зарегистрированный в Якутске, нами был разбит на интервалы, соответствующие минимуму СА: индекс F10.7 меньше или равен 121,5 с.е.п. (F10.7 = 121,5 соответствует квантиль 25%), максимуму СА: индекс F10.7 больше или равен 160,6 с.е.п. (квантиль 75%) и средней СА: $121,5 < \text{F10.7} < 160,6$.

На рисунке 4.8 представлены распределения интенсивности потока фонового рентгеновского излучения Солнца регистрируемых ВФА сигнала

Новосибирск (11,904 кГц) в зимний и летний сезоны при минимальной, средней и максимальной солнечной активности 2009 – 2017 гг.

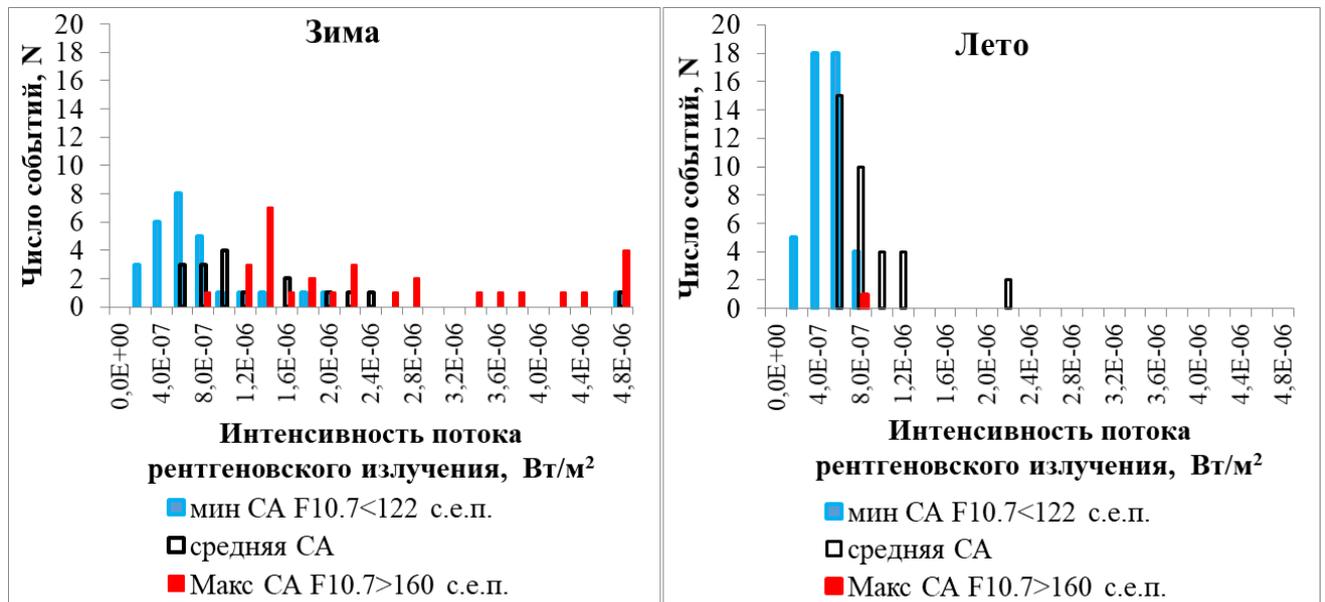


Рисунок 4.8 – Распределения интенсивности потока фонового рентгеновского излучения Солнца в зимний и летний сезоны для ВФА сигнала Новосибирск при минимальной, средней и максимальной солнечной активности 2009-2017 гг.

Нами получено, что в 24-м цикле солнечной активности зимой можно разделить интенсивности потока рентгеновского излучения для максимума и минимума солнечной активности. Основные максимумы индекса F10.7 и повышения интенсивности фонового рентгеновского излучения Солнца приходились на зимние сезоны.

4.3. Изменение эффективной высоты волновода Земля – ионосфера во время внезапных ионосферных возмущений

Уменьшение фазовой задержки ОНЧ-радиосигнала можно трактовать как уменьшение эффективной высоты волновода Земля – нижняя ионосфера. При условии одномодового распространения, переход от изменения фазы

радиосигнала к изменению эффективной высоты волновода осуществляется с помощью выражения [Митра, 1977; Pant, Mahra, 1994]:

$$\Delta\varphi = \frac{360 \cdot d}{\lambda} \cdot \left(\frac{1}{2 \cdot R} + \frac{\lambda^2}{16 \cdot h_n^3} \right) \cdot \Delta h, \quad (4.3)$$

где $\Delta\varphi$ – изменение фазы ОНЧ-радиосигнала при ВФА, градусы;

R – радиус Земли, км;

λ – длина волны, км;

d – протяженность радиотрассы, км;

h_n – эффективная высота отражения ОНЧ-радиосигнала от дневной невозмущенной ионосферы, км;

Δh – изменение эффективной высоты волновода Земля – ионосфера, км.

При невозмущенных геофизических условиях ОНЧ-радиосигнал отражается днем от ионосферы на высоте $h_n \approx 70 - 75$ км [Митра, 1977]. В работе [Burgess, Jones, 1967] применялось значение $h_n \approx 72$ км. Это значение эффективной высоты отражения ОНЧ от дневной невозмущенной ионосферы использовалось и в настоящей работе.

Радиус Земли R для каждой радиотрассы определялся путем усреднения значений, найденных по широтам, соответствующим участкам радиотрасс с разрешением 200 км, используя модель референц-эллипсоида WGS 84 [PLANETCALC].

Изменение эффективной высоты волновода Земля – ионосфера Δh можно представить в виде линейной зависимости от логарифма произведения интенсивности потока рентгеновского излучения P на косинус зенитного угла Солнца X , усредненного вдоль трассы распространения:

$$\Delta h = a + b \cdot \text{Lg}(P \cdot \text{Cos}(X)), \quad (4.4)$$

где Δh – изменение эффективной высоты волновода Земля – ионосфера, км;

P – интенсивность потока рентгеновского излучения Солнца в диапазоне 1 - 8 Å, Вт/м²;

$\text{Cos}(X)$ – усредненное вдоль трассы распространения значение косинуса зенитного угла Солнца X .

На рисунке 4.9 на основе внезапных фазовых аномалий сигнала Новосибирск (11,904 кГц), регистрируемых в Якутске зимой и летом, представлены понижения эффективной высоты волновода Земля – ионосфера как функция потока рентгеновского излучения Солнца.

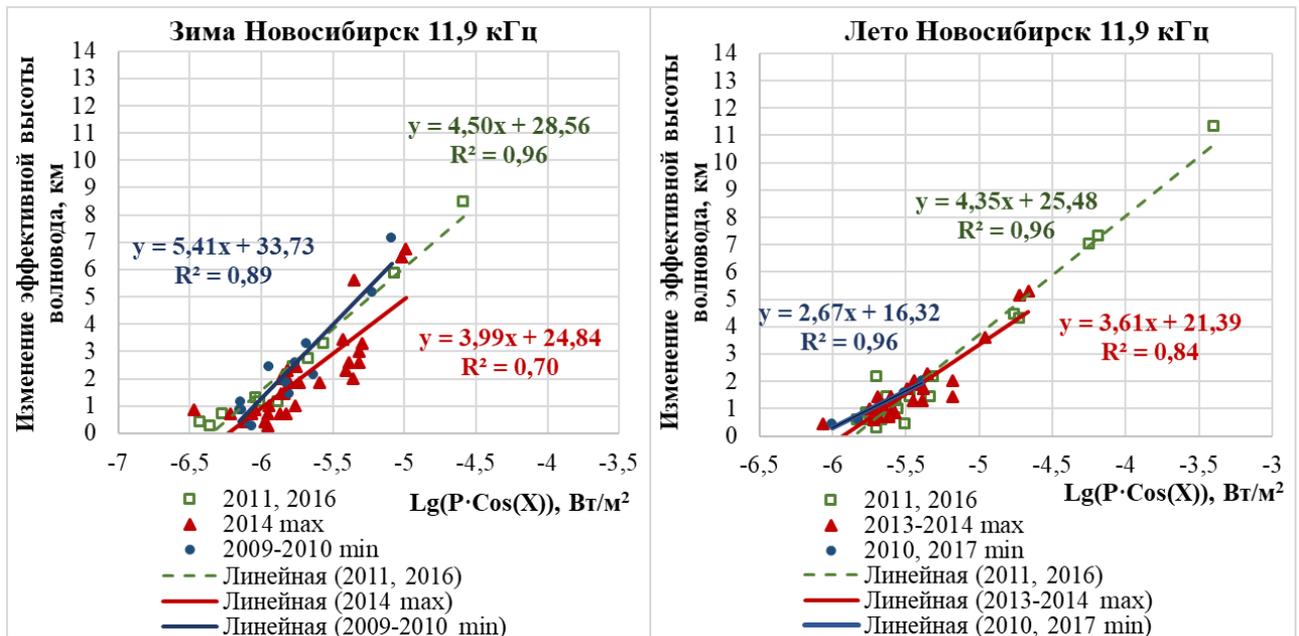


Рисунок 4.9 – Изменение (понижение) эффективной высоты волновода Земля – ионосфера на радиотрассе Новосибирск – Якутск зимой (левая панель) и летом (правая панель), как функция потока рентгеновского излучения Солнца

Параметры регрессионной модели (4.4) изменения эффективной высоты волновода Земля – ионосфера по данным внезапных фазовых аномалий сигналов РСДН-20 (11,904 кГц), зарегистрированных в Якутске за период 2009 – 2017 гг. представлены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Параметры регрессионной модели изменения эффективной высоты волновода Земля - ионосфера по данным внезапных фазовых аномалий сигналов РСДН-20 (11,904 кГц), зарегистрированных в Якутске за период 2009 – 2017 гг.

Радиограсса	Сезон	Период СА	Объем выборки	a	b	Коэффициент детерминации R^2	СКО остаточных невязок, км
Новосибирск – Якутск	зима	2009-2010 минимум	13	33,73±3,37	5,41±0,58	0,89	0,69
		2011, 2016	11	28,56±1,71	4,50±0,29	0,96	0,52
		2014 максимум	31	24,84±2,76	3,99±0,48	0,70	0,70
	лето	2010, 2017 минимум	4	16,32±2,11	2,67±0,37	0,96	0,18
		2011, 2016	23	25,48±1,01	4,35±0,19	0,96	0,55
		2013-2014 максимум	23	21,39±1,89	3,61±0,35	0,84	0,54
Хабаровск – Якутск	зима	2009-2010 минимум	5	30,47±8,39	4,51±1,53	0,74	1,3
		2011, 2016	8	41,01±4,66	6,67±0,85	0,91	1,26
		2014 максимум	35	33,45±2,8	5,38±0,5	0,78	1,1
	лето	2010, 2017 минимум	2	-	-	-	
		2011, 2016	23	20,22±1,23	3,27±0,24	0,9	0,64
		2013-2014 максимум	21	23,61±2,25	3,86±0,42	0,82	0,64
Краснодар – Якутск	зима	2009-2010 минимум	6	21,86±7,88	3,12±1,35	0,57	1,21
		2011, 2016	3	30,47±1,54	4,62±0,27	0,997	0,25
		2014 максимум	19	16,22±3,11	2,39±0,55	0,53	0,7
	лето	2010, 2017 минимум	3	7,28±3,75	1,1±0,67	0,73	0,07
		2011, 2016	15	19,52±1,12	3,23±0,21	0,95	0,58
		2013-2014 максимум	17	16,76±2,93	2,73±0,54	0,63	0,85

Зимой в период минимума СА (2009 – 2010 гг.) в вариациях фазы сигнала Новосибирск выделены эффекты вспышек от С4.3 (13.02.2010 в 7:52 UT, $\text{Cos}(X) = 0,16$) до М6.4 (7.02.2010 в 2:34 UT, $\text{Cos}(X) = 0,13$), по зарегистрированным ВФА

на основе выражения (4.3) получены понижения эффективной высоты волновода Земля – ионосфера Δh от 0,86 до 7,17 км. На основе параметров модели (4.4), адаптированных по экспериментальным данным (таблица 4.7), получены оценки понижения эффективной высоты волновода: от 0,52 до 6,2 км соответственно. СКО остаточных невязок модельных значений с экспериментальными составляет 0,69 км. В период 2011 и 2016 гг. выделены эффекты вспышек от С2.9 (5.02.2016 в 7:22 UT, $\text{Cos}(X) = 0,15$) до X2.3 (15.02.2011 в 1:56 UT, $\text{Cos}(X) = 0,11$), понижения эффективной высоты волновода Земля – ионосфера Δh составили от 0,29 до 8,47 км соответственно; оценки Δh : от -0,02 до 7,92 км соответственно. СКО остаточных невязок составляет 0,52 км. В период максимума СА (2014 г.) получены понижения эффективной высоты волновода Земля – ионосфера Δh от 0,72 км (вспышка С3.3, 14.02.2014 в 7:38 UT при $\text{Cos}(X) = 0,18$) до 6,74 км (вспышка М5.2, 4.02.2014 в 4:00 UT, $\text{Cos}(X) = 0,2$); оценки Δh : от 0,08 до 4,95 км соответственно. СКО остаточных невязок составило 0,92 км. Таким образом, зимой для рентгеновской вспышки класса С4.3 при среднем вдоль радиотрассы Новосибирск – Якутск значении косинуса зенитного угла $\text{Cos}(X) = 0,16$ на основе регрессионного анализа по модели (4.4) получены оценки понижения эффективной высоты волновода Земля – ионосфера Δh : $0,52 \pm 0,69$ км (минимум СА), $0,94 \pm 0,52$ км (восходящая и нисходящая ветви СА) и $0,37 \pm 0,92$ км (максимум СА); для вспышки класса М5.2 при $\text{Cos}(X) = 0,2$ получены оценки Δh : $6,74 \pm 0,69$ км (минимум СА), $6,11 \pm 0,52$ км (восходящая и нисходящая ветви СА), $4,95 \pm 0,92$ км (максимум СА); для вспышки X2.3 при $\text{Cos}(X) = 0,11$ оценки понижения эффективной высоты волновода Δh : $8,91 \pm 0,69$ км (минимум СА), $7,92 \pm 0,52$ км (восходящая и нисходящая ветви СА), $6,55 \pm 0,92$ км (максимум СА).

Летом в период минимума СА (2010 и 2017 гг.) в вариациях фазы сигнала Новосибирск выделены эффекты солнечных вспышек от С3.0 (1.06.2017 в 22:59 UT при $\text{Cos}(X) = 0,33$) до С6.6 (1.06.2017 в 1:43 UT, $\text{Cos}(X) = 0,62$), на основе выражения (4.3) получены значения понижения эффективной высоты волновода Δh от 0,43 до 2,01 км соответственно. Оценки Δh составляют: от 0,23 до 1,94 км соответственно. СКО остаточных невязок составило 0,18 км. В период

возрастания (2011 г.) и убывания (2016 г.) СА получены понижения эффективной высоты волновода Δh от 0,57 км (С3.1 (8.07.2011 в 9:47 UT, $\text{Cos}(X) = 0,48$) до 11,34 км (X7.0 (9.08.2011 в 8:05 UT, $\text{Cos}(X) = 0,57$)). Оценки понижения эффективной высоты волновода Δh : от 0,09 до 10,68 км соответственно. СКО остаточных невязок составило 0,55 км. В период максимума СА (2013-2014 гг.) в вариациях фазы сигнала Новосибирск выделены эффекты солнечных вспышек от С3.6 (23.08.2014 в 1:56 UT при $\text{Cos}(X) = 0,5$) до M2.9 (21.06.2013 в 3:14 UT, $\text{Cos}(X) = 0,74$), получены понижения эффективной высоты волновода Δh от 1 до 5,31 км соответственно. Оценки Δh : от 0,64 до 4,55 км. СКО остаточных невязок составило 0,54 км. Летом для рентгеновской вспышки С3.1 при среднем вдоль радиотрассы Новосибирск – Якутск значении косинуса зенитного угла $\text{Cos}(X) = 0,48$ получены оценки понижения эффективной высоты волновода Δh : $0,75 \pm 0,18$ км (минимум СА), $0,09 \pm 0,55$ км (восходящая и нисходящая ветви СА) и $0,35 \pm 0,54$ км (максимум СА); для вспышки класса M2.9 при $\text{Cos}(X) = 0,74$ получены оценки понижения эффективной высоты волновода Δh : $3,86 \pm 0,18$ км (минимум СА), $5,16 \pm 0,55$ км (восходящая и нисходящая ветви СА), $4,55 \pm 0,54$ км (максимум СА); для вспышки X7.0 при $\text{Cos}(X) = 0,57$ оценки понижения эффективной высоты волновода Δh составили: $7,24 \pm 0,18$ км (минимум СА), $10,68 \pm 0,55$ км (восходящая и нисходящая ветви СА), $9,12 \pm 0,54$ км (максимум СА).

Отмечается меньшая чувствительность к понижению эффективной высоты волновода Земля – нижняя ионосфера во время ВИБ зимой в период максимума 24-го цикла солнечной активности.

Рассмотрены понижения эффективной высоты волновода Земля – нижняя ионосфера при распространении сигнала от радиопередатчика Хабаровск (11,904 кГц) до регистратора в Якутске [Корсаков, 2023а]. На рисунке 4.10 представлены изменения эффективной высоты волновода при регистрации ВФА сигнала Хабаровск (11,904 кГц) в Якутске за период с 26 октября по 2 ноября 2021 г. и за осенний сезон 15 октября – 15 ноября 2010 – 2015 гг. в зависимости от потока рентгеновского излучения Солнца (диапазон 1-8 Å).

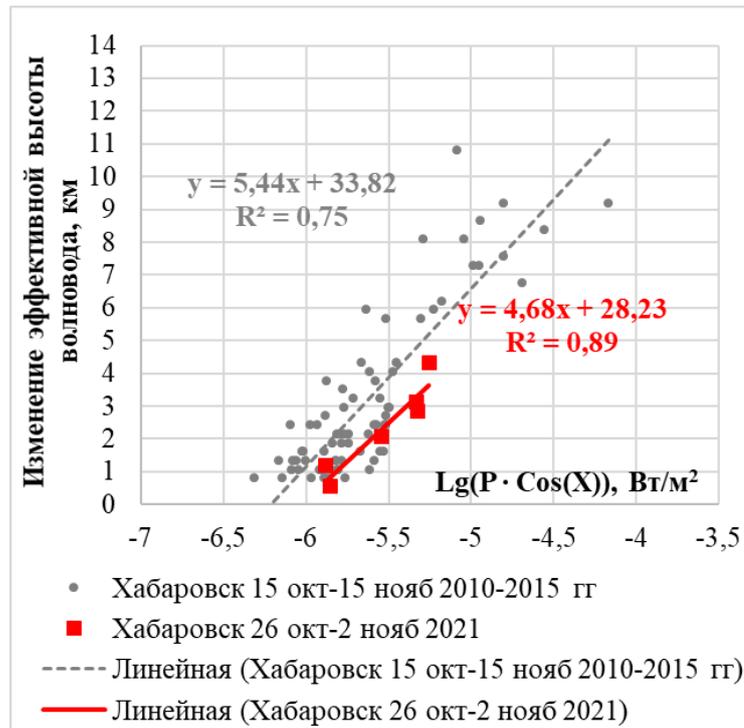


Рисунок 4.10 – Изменения эффективной высоты волновода Земля – нижняя ионосфера сигнала Хабаровск (11,904 кГц) при регистрации в Якутске за период ВФА с 26 октября по 2 ноября 2021 г. и за осенний сезон 15 октября – 15 ноября 2010 – 2015 гг. в зависимости от потока рентгеновского излучения Солнца

Уровень надежности параметров регрессионной модели (4.4), представленных в таблице 4.8, составил не менее 99 % (критерий Фишера).

Таблица 4.8 – Параметры линейной зависимости изменения эффективной высоты волновода Земля - ионосфера от потока рентгеновского излучения Солнца в диапазоне 1 – 8 Å

Радиотрасса, период регистрации	Объем выборки	a	b	Коэффициент детерминации R^2	СКО остаточных невязок, км
Хабаровск – Якутск, 15.10 – 15.11 2010 – 2015 гг.	75	$33,82 \pm 2,09$	$5,44 \pm 0,37$	0,75	1,29
Хабаровск – Якутск, 26.10 – 2.11. 2021 г.	6	$28,23 \pm 4,66$	$4,68 \pm 0,84$	0,89	0,52

Показано, что для описания зависимости ВФА от интенсивности потока рентгеновского излучения и зенитного угла Солнца, характерной для

одномодового распространения, могут использоваться данные о вариации фазы ОНЧ-радиосигнала на частоте 11,904 кГц в дневных условиях распространения по радиотрассе протяженностью 1400 км вдоль меридиана (Хабаровск – Якутск). Это повышает объем выборки регистрируемых ВФА, когда сеть протяженных преимущественно широтно-ориентированных радиотрасс оказывается в ночных условиях [Козлов и др., 2025].

В осенний период с 15 октября 2010 г. по 15 ноября 2015 г. в вариациях фазы сигнала Хабаровск выделены эффекты вспышек от С3.8 (3.11.2010 в 6:11 UT, $\text{Cos}(X) = 0,13$) до X1.8 (23.10.2012 в 3:17 UT, $\text{Cos}(X) = 0,38$), на основе выражения (4.3) получены понижения эффективной высоты волновода Земля – ионосфера Δh от 0,81 до 9,19 км. На основе параметров модели (4.4), адаптированных по экспериментальным данным (таблица 4.8), получены оценки понижения эффективной высоты волновода: от -0,54 до 11,13 км соответственно. СКО остаточных невязок модельных значений с экспериментальными составляет 1,29 км. В период с 26 октября по 2 ноября 2021 г. выделены эффекты вспышек от С3.9 (30.10.2021 в 3:15 UT, $\text{Cos}(X) = 0,34$) до M1.7 (2.11.2021 в 3:01 UT, $\text{Cos}(X) = 0,33$) понижения эффективной высоты волновода Земля – ионосфера Δh составили от 1,19 до 4,33 км соответственно; оценки Δh : от 0,73 до 3,64 км соответственно. СКО остаточных невязок составляет 0,52 км. Таким образом, для рентгеновской вспышки класса С3.8 при среднем вдоль радиотрассы Хабаровск – Якутск значении косинуса зенитного угла $\text{Cos}(X) = 0,13$ на основе регрессионного анализа по модели (4.4) получены оценки понижения эффективной высоты волновода Земля – ионосфера Δh : $-0,54 \pm 1,29$ км (осень 2010 – 2015 гг.) и $-1,31 \pm 0,52$ км (26.10 – 2.11 2021 г.); для вспышки класса M1.7 при $\text{Cos}(X) = 0,33$ получены оценки Δh : $5,22 \pm 1,29$ км (осень 2010 – 2015 гг.), $3,64 \pm 0,52$ км (26.10 – 2.11 2021 г.); для вспышки X1.8 при $\text{Cos}(X) = 0,38$ оценки понижения эффективной высоты волновода Δh : $11,13 \pm 1,29$ км (осень 2010 – 2015 гг.), $8,72 \pm 0,52$ км (26.10 – 2.11 2021 г.).

Рентгеновские вспышки за период с 26 октября по 2 ноября 2021 г. характеризовались повышенной продолжительностью и повышенной

интенсивностью фонового рентгеновского излучения. По сравнению с осенним сезоном 2010 – 2015 гг., в период 26 октября – 2 ноября 2021 г. отмечалась пониженная чувствительность изменений эффективной высоты волновода при повышенной интенсивности фонового рентгеновского излучения Солнца.

В работе [Rozhnoi et al., 2019] ОНЧ-сигналы от 7 радиопередатчиков принимались в городах Грац (Германия), Бирр (Ирландия) и Москва (Россия). Протяженности сети радиотрасс составили от 350 до 7000 км. Оценки изменения эффективной высоты волновода Земля – ионосфера показали в среднем понижение на 12 км во время вспышки класса X9.3 6 сентября 2017 г. и на 9 км во время вспышки класса X8.2 10 сентября 2017 г. В 75% случаев понижение эффективной высоты волновода составило более 7 км.

Полученные результаты не противоречат результатам работы [Pacini, Raulin, 2006], в которой показано большее изменение эффективной высоты отражения ОНЧ-волн от нижней ионосферы в минимуме солнечной активности. Было так же показано, что внезапные фазовые аномалии ОНЧ-радиосигнала в минимуме солнечной активности (1994 – 1997 гг.) более чувствительны к потоку рентгеновского излучения при солнечных вспышках по сравнению с ВФА, регистрируемыми в максимуме солнечной активности (январь – март 1991 г.).

4.4. Оценки интенсивности потока рентгеновского излучения по внезапным фазовым аномалиям радиосигналов ОНЧ-передатчиков

Параметры модели ВФА, полученные по вариациям фазы сигнала могут быть использованы для оценки интенсивности потока рентгеновского излучения [Korsakov et al., 2014; Баишев и др., 2017]. Для оценки интенсивности потока рентгеновского излучения Солнца с помощью наземных измерений использовалась модель [George et al., 2019] с некоторыми упрощениями. Оценка интенсивности потока рентгеновского излучения Солнца во время вспышек проводилась по данным о внезапных фазовых аномалиях сигналов передатчиков

РСДН-20 при регистрации в Якутске на частоте 11,904 кГц [Korsakov, Kozlov, Karimov, 2021]:

$$Lg(P) = A2 + B2 \cdot \Phi + C2 \cdot Lg(Cos(X)) + D2 \cdot Lg(F10.7), \quad (4.5)$$

где P – интенсивность потока рентгеновского излучения в диапазоне 1-8 Å;
 $Cos(X)$ – косинус зенитного угла Солнца, усредненный вдоль трассы распространения радиосигнала;
 Φ – внезапная фазовая аномалия – регистрируемое изменение фазы радиосигнала относительно невозмущенного значения, приведенное к единице протяженности радиотрассы, градус/Мм;
 $F10.7$ – среднесуточная интенсивность потока радиоизлучения Солнца на длине волны 10,7 см, с.е.п.

В таблице 4.9 представлены коэффициенты $A2$, $B2$, $C2$ и $D2$ модели (4.5) для каждого месяца регистрации (2009 – 2017 гг.) радиосигнала определены методом наименьших квадратов, где также представлены стандартные отклонения их оценок, коэффициент детерминации R^2 и среднеквадратичное значение остаточных невязок модельных и экспериментальных значений S .

Таблица 4.9 – Параметры регрессионной модели (4.5) оценки интенсивности потока рентгеновского излучения Солнца $Lg(P)$

Месяц	Передатчик	Выборка	$A2$	$B2$	$C2$	$D2$	R^2	S
Январь	Новосибирск	20	-6,47 ±1,67	0,10 ±0,02	-0,4 ±0,47	0,39 ±0,69	0,62	0,28
	Краснодар	9	-6,93 ±3,25	0,11 ±0,02	-0,13 ±0,15	0,59 ±1,47	0,88	0,14
	Хабаровск	28	-8,94 ±1,7	0,06 ±0,01	-0,19 ±0,5	1,55 ±0,74	0,75	0,2
Февраль	Новосибирск	47	-6,93 ±0,38	0,07 ±0,004	-0,58 ±0,1	0,51 ±0,17	0,88	0,14
	Краснодар	37	-8,07 ±0,54	0,08 ±0,01	-0,53 ±0,08	1 ±0,24	0,83	0,16
	Хабаровск	34	-7,34 ±0,6	0,05 ±0,004	-0,97 ±0,26	0,59 ±0,28	0,83	0,17

Таблица 4.9 – Параметры регрессионной модели (4.5) оценки интенсивности потока рентгеновского излучения Солнца $Lg(P)$ (продолжение)

Месяц	Передатчик	Выборка	A2	B2	C2	D2	R ²	S
Март	Новосибирск	58	-5,6 ±1,36	0,06 ±0,01	-0,93 ±0,22	-0,17 ±0,64	0,68	0,26
	Краснодар	48	-5,02 ±1,2	0,07 ±0,01	-0,21 ±0,15	-0,28 ±0,57	0,62	0,21
	Хабаровск	66	-6,09 ±0,81	0,07 ±0,004	-1,01 ±0,15	-0,01 ±0,38	0,86	0,18
Апрель	Новосибирск	35	-6,05 ±0,66	0,70 ±0,01	-0,40 ±0,12	0,13 ±0,30	0,86	0,13
	Краснодар	30	-5,82 ±1,2	0,08 ±0,01	-0,28 ±0,11	0,04 ±0,56	0,64	0,21
	Хабаровск	33	-5,2 ±1	0,06 ±0,01	-0,59 ±0,18	-0,32 ±0,47	0,78	0,17
Май	Новосибирск	46	-7,16 ±0,87	0,07 ±0,01	-1,02 ±0,13	0,63 ±0,41	0,76	0,19
	Краснодар	52	-4,94 ±0,9	0,07 ±0,01	-0,55 ±0,09	-0,37 ±0,43	0,74	0,2
	Хабаровск	41	-7,16 ±1,04	0,07 ±0,01	-0,8 ±0,3	0,62 ±0,49	0,77	0,22
Июнь	Новосибирск	29	-6,55 ±0,56	0,08 ±0,006	-0,966 ±0,142	0,376 ±0,269	0,89	0,12
	Краснодар	20	-6,07 ±1,24	0,1 ±0,02	-1,1 ±0,22	0,1 ±0,59	0,7	0,19
	Хабаровск	27	-6,55 ±0,71	0,08 ±0,01	-0,6 ±0,14	0,32 ±0,34	0,84	0,14
Июль	Новосибирск	16	-7,37 ±0,73	0,09 ±0,01	-1,07 ±0,2	0,76 ±0,36	0,94	0,11
	Краснодар	10	-5,89 ±1,16	0,12 ±0,01	-1,14 ±0,29	-0,07 ±0,59	0,94	0,14
	Хабаровск	13	-3,57 ±2,12	0,09 ±0,01	0,03 ±0,63	-1,1 ±1,02	0,83	0,18
Август	Новосибирск	36	-6,44 ±0,68	0,09 ±0,004	-0,97 ±0,18	0,28 ±0,32	0,94	0,13
	Краснодар	33	-5,31 ±0,97	0,104 ±0,01	-0,96 ±0,16	-0,29 ±0,47	0,84	0,21
	Хабаровск	41	-5,12 ±0,85	0,09 ±0,006	-0,02 ±0,1	-0,32 ±0,4	0,89	0,15
Сентябрь	Новосибирск	36	-6,16 ±0,97	0,08 ±0,01	-1,32 ±0,32	0,09 ±0,47	0,82	0,16
	Краснодар	37	-6,51 ±1,11	0,1 ±0,01	-0,37 ±0,1	0,37 ±0,51	0,71	0,19
	Хабаровск	37	-7,15 ±1,48	0,1 ±0,01	-1,15 ±0,28	0,49 ±0,68	0,83	0,2

Таблица 4.9 – Параметры регрессионной модели (4.5) оценки интенсивности потока рентгеновского излучения Солнца $Lg(P)$ (продолжение)

Месяц	Передатчик	Выборка	A2	B2	C2	D2	R ²	S
Октябрь	Новосибирск	37	-2,46 ±1,80	0,06 ±0,01	-0,46 ±0,1	-1,52 ±0,85	0,8	0,16
	Краснодар	24	-3,24 ±1,5	0,09 ±0,01	-0,34 ±0,17	-1,18 ±0,72	0,86	0,14
	Хабаровск	48	-3,87 ±1,39	0,05 ±0,01	0,002 ±0,14	-0,76 ±0,66	0,52	0,24
Ноябрь	Новосибирск	42	-5,97 ±0,76	0,07 ±0,004	-0,63 ±0,11	0,03 ±0,36	0,87	0,16
	Краснодар	42	-6,5 ±1,19	0,09 ±0,01	-0,26 ±0,14	0,33 ±0,55	0,72	0,24
	Хабаровск	64	-6,04 ±0,73	0,05 ±0,004	-1,2 ±0,16	-0,07 ±0,33	0,77	0,19
Декабрь	Новосибирск	7	-8,63 ±1,28	0,06 ±0,08	-2,38 ±1,59	0,43 ±0,81	0,85	0,13
	Краснодар	3	-	-	-	-	-	-
	Хабаровск	12	-0,17 ±5,08	0,09 ±0,03	-0,014 ±0,273	-2,46 ±2,34	0,6	0,26

На рисунке 4.11 представлены оценки интенсивности потока рентгеновского излучения по ВФА сигналов Новосибирск, Хабаровск и Краснодар (11,904 кГц) 6 сентября 2017 г. и интенсивность потока рентгеновского излучения Солнца (1-8 Å) по данным спутников GOES-15 и GOES-13 [GOES space environment monitor]. По данным ВФА радиосигналов РСДН-20 (11,904 кГц) регистрируемых в Якутске за период 2009 – 2017 гг. с учетом интенсивности фонового потока рентгеновского излучения, оцениваемой по индексу F10.7, проведена адаптация параметров регрессионной модели (4.5) по оценке интенсивности потока рентгеновского излучения в диапазоне 1 – 8 Å во время солнечных вспышек. При дневных условиях ОНЧ-распространения, оценки согласуются с данными спутников серии GOES.

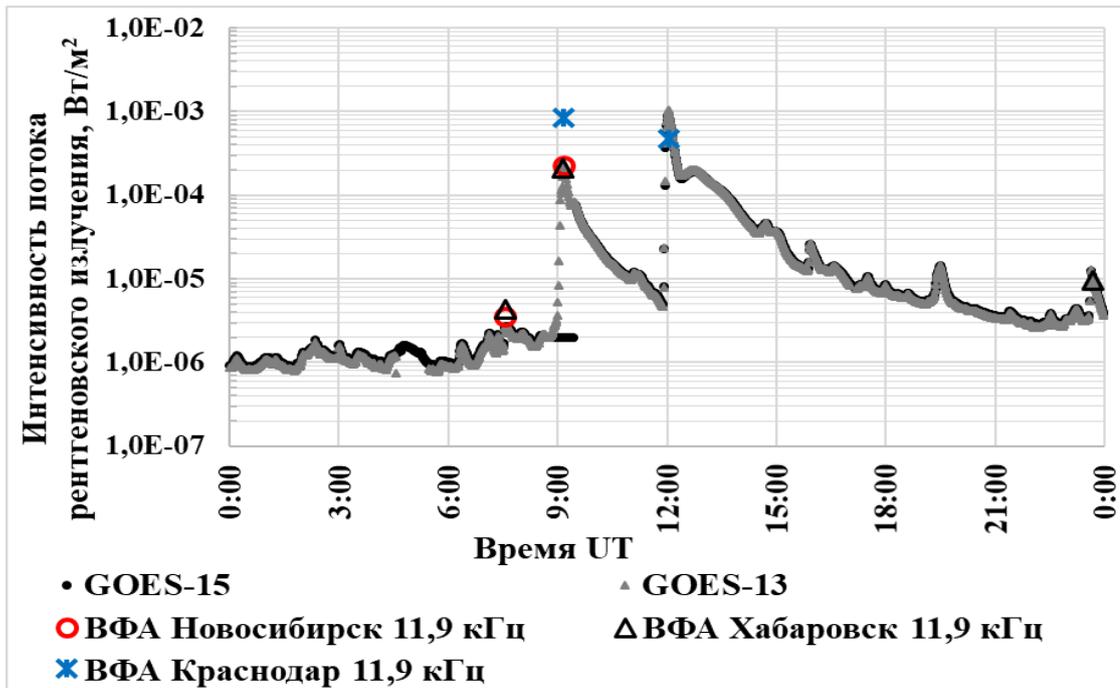


Рисунок 4.11 – Оценки интенсивности потока рентгеновского излучения по внезапным фазовым аномалиям сигналов Новосибирск, Хабаровск и Краснодар (11,904 кГц) 6 сентября 2017 г. и интенсивность потока рентгеновского излучения Солнца в диапазоне 1-8 Å (спутники GOES-15 – черная кривая и GOES-13 – серая кривая)

Полученные нами результаты не противоречат работе [Belcher et al., 2021] в которой показано, что понижение порога анализа до вспышек класса М (рассматривается диапазон вспышек М и Х класса) на протяженной радиотрассе (направление север-юг) повышает СКО остаточных невязок оцениваемой интенсивности вспышечного потока на 10%. Обнаружено хорошее соответствие оценок пиковых значений интенсивности потока рентгеновского излучения для вспышек М и Х класса и значений, измеренных на спутниках GOES. Регрессионный анализ по данным ВФА двух ОНЧ-радиотрасс показал, что СКО невязок увеличивается обратно пропорционально протяженности радиотрассы. Получено, что удаление из регрессионной модели [George et al., 2019] параметра, такого как интенсивность потока рентгена, измеренного до вспышки, не приводит к увеличению СКО невязок модельных и экспериментальных величин. Метод

позволяет проводить наземный мониторинг интенсивности потока рентгеновского излучения во время солнечных вспышек класса М и выше.

4.5. Основные выводы к главе 4

1. Установлено, что для ОНЧ-радиотрасс Краснодар – Якутск, Краснодар – Тикси, Новосибирск – Якутск, Новосибирск – Тикси, Хабаровск – Якутск и Хабаровск – Тикси, расположенных в Северной Евразии, величина внезапных фазовых аномалий, вызванных рентгеновскими вспышками, может быть описана линейной функцией логарифма произведения интенсивности потока рентгеновского излучения и усредненного вдоль радиотрассы косинуса зенитного угла Солнца. Проведена адаптация параметров этой зависимости.

2. При анализе регрессионной модели ВФА с разделенными параметрами интенсивности потока рентгеновского излучения и зенитного угла Солнца показано, что при фиксированных значениях потока рентгеновского излучения и усредненного вдоль радиотрасс Новосибирск – Якутск и Краснодар – Якутск косинуса зенитного угла Солнца, отклонение фазы ОНЧ-радиосигналов увеличивается от лета к зиме ($AI_{лето} < AI_{зима}$). Установлено, что зависимость вариаций фазы ОНЧ-радиосигнала на трассе Новосибирск – Якутск от усредненного вдоль радиотрассы косинуса зенитного угла Солнца более крутая летом ($CI_{лето} = 6,06 > CI_{зима} = 2,17$). Зимой для радиотрассы преимущественно широтной ориентации (Краснодар – Якутск) зависимость ВФА от усредненного вдоль трассы косинуса зенитного угла Солнца наименее четкая.

3. Для 24-го цикла солнечной активности проведена адаптация параметров регрессионной модели внезапных фазовых аномалий на ОНЧ-радиотрассах в Северной Евразии в зависимости от потока рентгеновского излучения Солнца. Зимой для радиотрассы Новосибирск – Якутск от минимума до максимума в 24-м цикле солнечной активности отмечено уменьшение чувствительности ВФА к потоку рентгеновского излучения солнечных вспышек. Понижение чувствительности ВФА радиосигнала при распространении вдоль радиотрасс

Хабаровск – Якутск и Краснодар – Якутск от минимума к максимуму солнечной активности находится в пределах СКО остаточных невязок модельных значений с экспериментальными ВФА. В летний период изменение чувствительности ВФА на рассмотренных радиотрассах в Северной Евразии от минимума к максимуму в 24-м цикле солнечной активности не зарегистрировано.

4. Осуществлен переход от ВФА ОНЧ-радиосигналов к изменению эффективной высоты волновода на радиотрассах Северной Евразии. Проведена адаптация параметров регрессионной модели изменения эффективной высоты волновода Земля – ионосфера от логарифма произведения интенсивности потока рентгеновского излучения на косинус зенитного угла Солнца, усредненного вдоль радиотрассы распространения. На основе адаптации параметров регрессионной модели внезапных фазовых аномалий ОНЧ-сигналов показано, что в зимний период понижение эффективной высоты волновода Земля – ионосфера на радиотрассах Северной Евразии при внезапных ионосферных возмущениях достигает меньших значений в максимуме цикла солнечной активности. Зимой для рентгеновской вспышки класса C4.3 при среднем вдоль радиотрассы Новосибирск – Якутск значении косинуса зенитного угла 0,16 получены оценки понижения эффективной высоты волновода Земля – ионосфера: $0,52 \pm 0,69$ км (минимум CA), $0,94 \pm 0,52$ км (восходящая и нисходящая ветви CA) и $0,37 \pm 0,92$ км (максимум CA); для вспышки класса M5.2 при среднем вдоль радиотрассы косинусе зенитного угла 0,2 получены оценки понижения эффективной высоты: $6,74 \pm 0,69$ км (минимум CA), $6,11 \pm 0,52$ км (восходящая и нисходящая ветви CA), $4,95 \pm 0,92$ км (максимум CA); для вспышки X2.3 при среднем косинусе зенитного угла 0,11 оценки понижения эффективной высоты волновода: $8,91 \pm 0,69$ км (минимум CA), $7,92 \pm 0,52$ км (восходящая и нисходящая ветви CA), $6,55 \pm 0,92$ км (максимум CA).

5. Показано, что для описания ВФА в виде зависимости от потока рентгеновского излучения и зенитного угла Солнца, характерной для одномодового распространения, могут использоваться данные о вариации фазы радиосигнала на частоте 11,904 кГц в дневных условиях распространения по

радиотрассе протяженностью 1400 км вдоль меридиана (Хабаровск – Якутск). Это повышает объем выборки регистрируемых ВФА, когда сеть протяженных преимущественно широтно-ориентированных радиотрасс оказывается в ночных условиях.

6. По данным внезапных фазовых аномалий радиосигналов, регистрируемых в Якутске за период 2009 – 2017 гг. с учетом интенсивности потока рентгеновского излучения, оцениваемой по индексу F10.7, проведена адаптация параметров регрессионной модели по оценке интенсивности потока рентгеновского излучения в диапазоне 1 – 8 Å во время солнечных вспышек. При дневных условиях ОНЧ-распространения полученные оценки согласуются с данными спутников.

ГЛАВА 5. Эффекты солнечных затмений в вариациях амплитуды и фазы ОНЧ-сигналов радиостанций

Результаты, представленные в пятой главе, опубликованы в [Дружин и др., 2010; Корсаков и др., 2015a; Корсаков и др., 2015b; Козлов и др., 2016; Korsakov, Kozlov, Karimov, 2023; Корсаков, Сокрут, 2023; Корсаков, 2023b; Korsakov et al., 2019]. Получено свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ [Свидетельство № 2023614391].

Солнечное затмение предоставляет возможность изучения процессов в ионосфере в условиях быстрого изменения интенсивности ионизирующего излучения при почти постоянном зенитном угле Солнца. Диск Луны служит естественным коронографом, позволяющим изучать влияние излучения как диска Солнца, так и его короны на ионизацию затеняемой части ионосферы в дневных условиях. В работах [Гоков, Гритчин, Тырнов, 2008; Черногор, 2010] показано, что при солнечных затмениях происходит уменьшение как температуры, так и концентрации электронов и ионов в ионосфере. Уменьшение зависит от зенитного угла, доли перекрытия диска Солнца (линейной фазы затмения), состояния космической погоды. Поскольку затмение Солнца довольно редкое явление и каждое из них является уникальным в силу прохождения тени через различные области земной поверхности, исследования таких эффектов остаются актуальными. Регистрируемые амплитудно-фазовые вариации сигналов радиостанций в диапазоне ОНЧ при солнечном затмении дают сведения о влиянии Солнца на параметры области D ионосферы.

5.1. Вариации амплитуды и фазы сигналов ОНЧ-радиостанций в период солнечного затмения

Нами рассмотрены амплитудно-фазовые вариации сигналов ОНЧ-радиостанций во время солнечного затмения 1 августа 2008 г. [Дружин и др.,

2010]. Регистрация радионавигационных сигналов проводилась в окрестности г. Якутска на радиофизическом полигоне ИКФИА СО РАН ($61,93^\circ$ с.ш., $129,37^\circ$ в.д.) вдали от промышленных электромагнитных помех. Радиосигнал принимался рамочной антенной, ориентированной в направлении восток-запад. Регистрировались вариации амплитуды и фазы радиопередатчиков РСДН-20, расположенных в окрестностях городов Краснодар, Новосибирск и Хабаровск. Радиотрасса Краснодар – Якутск проходила через область полного затмения, а передатчик Новосибирск находился в области полного затмения. Для радиосигнала передатчика Краснодар, регистрируемого на частоте 11,904 кГц в Якутске, в 10:20 UT наблюдалось повышение амплитуды на 0,26 дБ (3%) и увеличение фазовой задержки на 45° относительно уровня без возмущений. Для сигнала радиопередатчика Новосибирск увеличение амплитуды составило 0,42 дБ (5%), а увеличение фазовой задержки: 30° . Вариации в амплитуде и фазе сигнала Хабаровск не превышали уровень флуктуаций.

Также рассмотрены эффекты частного солнечного затмения 4 января 2011 г. в вариациях фазы радиосигнала передатчика Краснодар на частоте 14,881 кГц при регистрации в Якутске [Корсаков и др., 2015а]. 4 января большая часть северной Африки, Западной Европы, Среднего Востока и Центральной Азии попали в лунную полутень с большим затенением. Максимальная линейная фаза затмения наблюдалась в 8:50:35 UT на линии горизонта в северной части Швеции и составила 0,858. В это время ось лунной тени проходила в 510 км от земной поверхности. Затмение на заходе Солнца наблюдалось в центральной России, Казахстане, Монголии и на северо-западе Китая. Частное затмение над Краснодаром продолжалось с 7:28 до 10:32 UT, а максимальная линейная фаза затмения в 9:00 UT составила 0,725. Частное затмение наблюдалось над Новосибирском в условиях, приближенных к закату с 8:47:53 UT, максимум линейной фазы затмения составил 0,489 в 09:56 UT. Лунная полутень покинула Землю в 11:00:54 UT [Астрономический ежегодник на 2011 год]. На рисунке 5.1 представлены зарегистрированные в г. Якутске суточные вариации амплитуды и фазы радиосигнала передатчика Краснодар (14,881 кГц) в день затмения 4 января

2011 г., а также усредненные значения суточных вариаций амплитуды и фазы 3 и 5 января 2011 г.

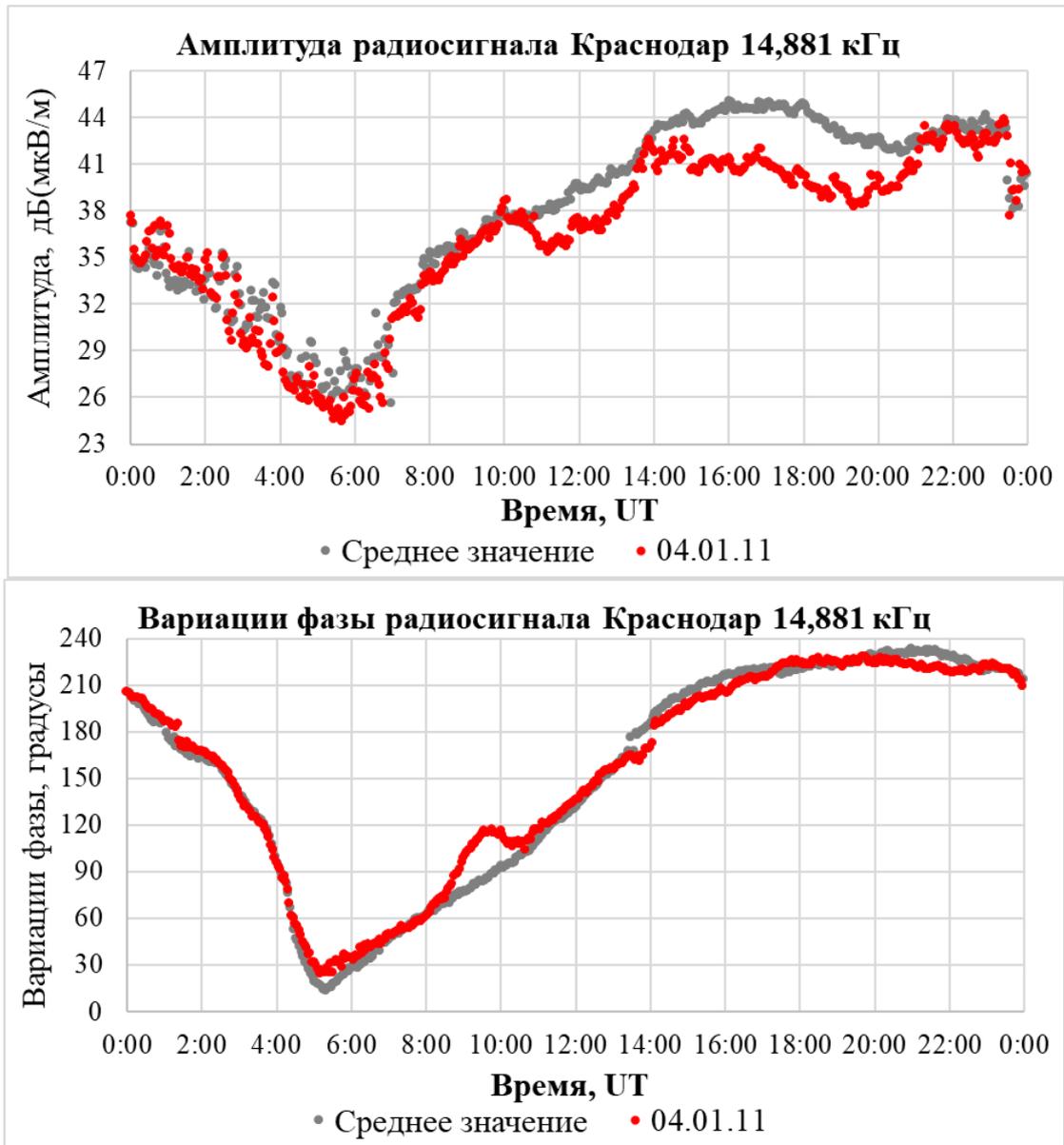


Рисунок 5.1 – Суточные вариации амплитуды (верхняя панель) и фазы (нижняя панель) радиосигнала передатчика Краснодар (14,881 кГц) в день затмения 4 января 2011 г., а также усредненные значения суточных вариаций амплитуды и фазы 3 и 5 января 2011 г.

Эффект затенения трассы 4 января 2011 г. проявился в виде повышения фазовой задержки радиосигнала Краснодар (14,881 кГц) с 8:24 до 10:36 UT. В максимуме (9:33 UT) регистрируемое в Якутске повышение фазовой задержки

радиосигнала составило 32° (0,558 радиан). В вариациях амплитуды радиосигнала эффект затенения радиотрассы Краснодар – Якутск не выделяется из уровня флуктуаций.

Представлены суточные вариации амплитуды и фазы ОНЧ-радиосигналов, регистрируемых в Якутске [Корсаков и др., 2015b] и в г. Улан-Удэ [Козлов и др., 2016] в день полного солнечного затмения 20 марта 2015 г. Солнечное затмение проходило на фоне восстановления после сильных геомагнитных возмущений. Максимум возмущений пришелся на 17 марта 2015 г. [Gokani et al., 2019], $Dst_{\min} \approx -230$ нТл, $Kp_{\max} \approx 8-$, $AE_{\max} \approx 1600$ нТл. 20 и 21 марта суммарный индекс ΣKp составлял 27 и 22 соответственно. Частное затмение Солнца началось в 7:40:51 UT 20.03.2015, а полное затмение – в 9:09 UT. Тень Луны пересекла Фарерские острова, архипелаг Шпицберген, покинула Землю на Северном полюсе в 10:21 UT. Частное затмение закончилось в 11:50:11 UT. Максимум затмения с линейной фазой 1,0445 в точке с координатами $64,4^\circ$ с.ш., $6,6^\circ$ з.д. длился 167 секунд при высоте Солнца над горизонтом 18° . Ширина лунной тени на поверхности Земли составила 463 км. В Краснодаре затмение наблюдалось с 9:15UT до 11:19 UT с максимальной линейной фазой 0,412 в 10:17 UT при зенитном угле Солнца $46,7^\circ$. Обстоятельства солнечного затмения для г. Новосибирск: затмение 10:12 – 11:48 UT, максимальная линейная фаза составила 0,391 в 11:01 UT при зенитном угле 78° . В г. Улан-Удэ частное затмение длилось с 10:32 UT до захода Солнца, максимальная линейная фаза составила 0,236 в 10:59 UT, при зенитном угле $90,5^\circ$ [Астрономический ежегодник на 2015 год]. Якутск находился в ночных условиях. Протяженности радиотрасс Краснодар – Якутск и Краснодар – Улан-Удэ составляют 5780 км и 4975 км соответственно. Для трассы Новосибирск – Якутск протяженность составила 2640 км, для трассы Новосибирск – Улан-Удэ – 1580 км. Протяженности трасс Хабаровск – Якутск и Хабаровск – Улан-Удэ составляют 1400 км и 2030 км соответственно. На рисунке 5.2 представлены вариации амплитуды и фазы радиосигнала передатчика Краснодар (14,881 кГц), зарегистрированные в г. Якутске в день солнечного затмения 20 марта и в последующие сутки 21 марта 2015 г. 20 марта регистрировалось понижение

фазовой задержки, которое в максимуме в 7:00 UT составило 104° (1,82 радиан). Причиной таких вариаций могли быть высыпания электронов вследствие нестабильной геофизической обстановки после магнитной бури от 17 марта 2015 г. 20 марта в 6 – 9 UT индекс Кр составил 5 [Лаборатория солнечной астрономии ИКИ и ИСЗФ], с 6:30 UT индекс АЕ превышал значение 1000 нТл [World Data Center for Geomagnetism, Kyoto]. Эффект солнечного затмения проявился в вариациях фазы сигнала Краснодар (14,881 кГц) с 9:36 по 11:15 UT. Максимум повышения фазовой задержки в 10:45 UT составил $22,35^\circ$ (0,39 радиан).

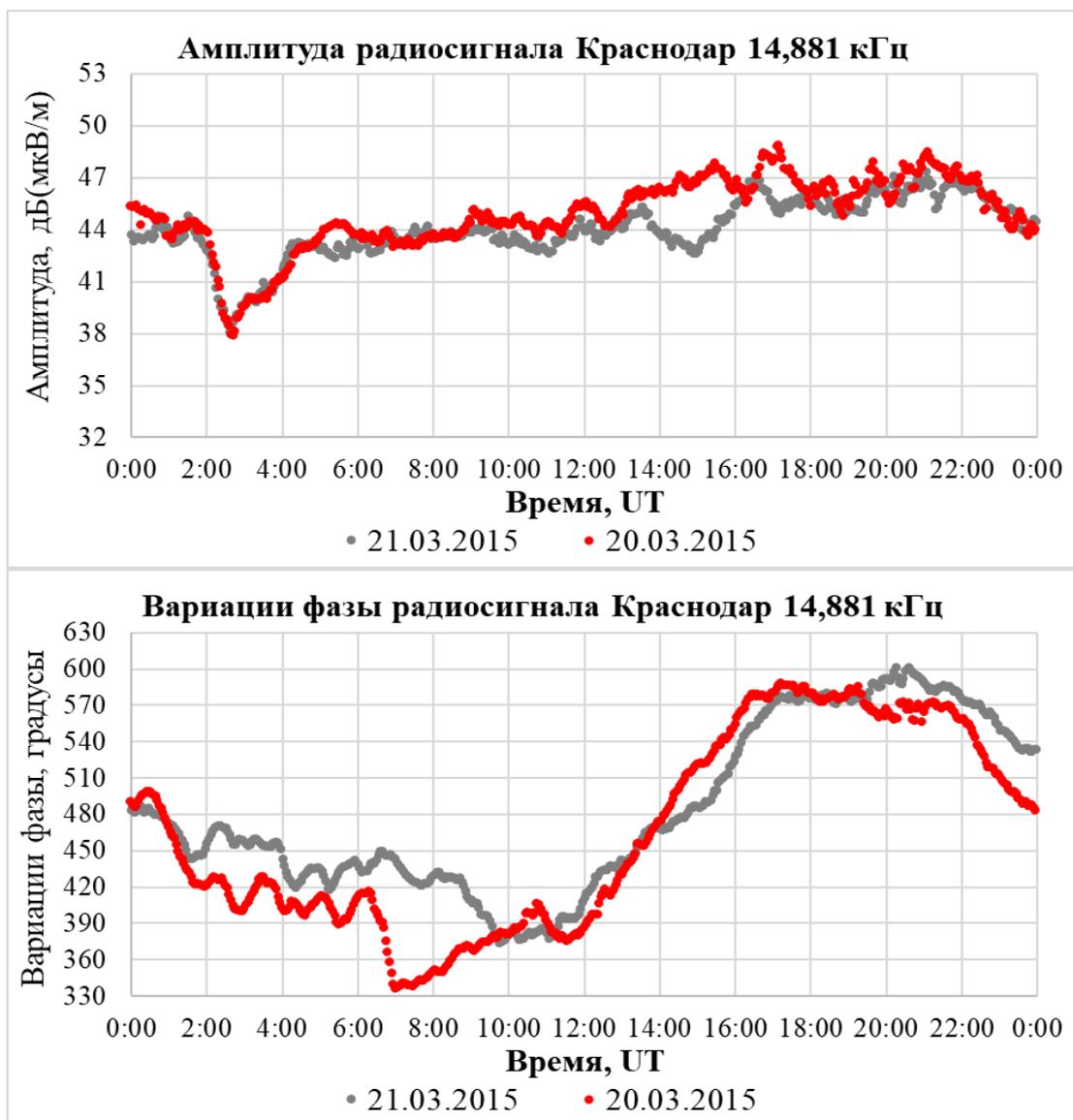


Рисунок 5.2 – Вариации амплитуды (верхняя панель) и фазы (нижняя панель) радиосигнала Краснодар (14,881 кГц) при регистрации в г. Якутске в день солнечного затмения 20 марта и в последующие сутки 21 марта 2015 г.

На рисунке 5.3 представлены вариации амплитуды (верхняя панель) и фазы (нижняя панель) радиосигнала Краснодар (14,881 кГц) при регистрации в г. Улан-Удэ в день солнечного затмения 20 марта и в последующие сутки 21 марта 2015 г.

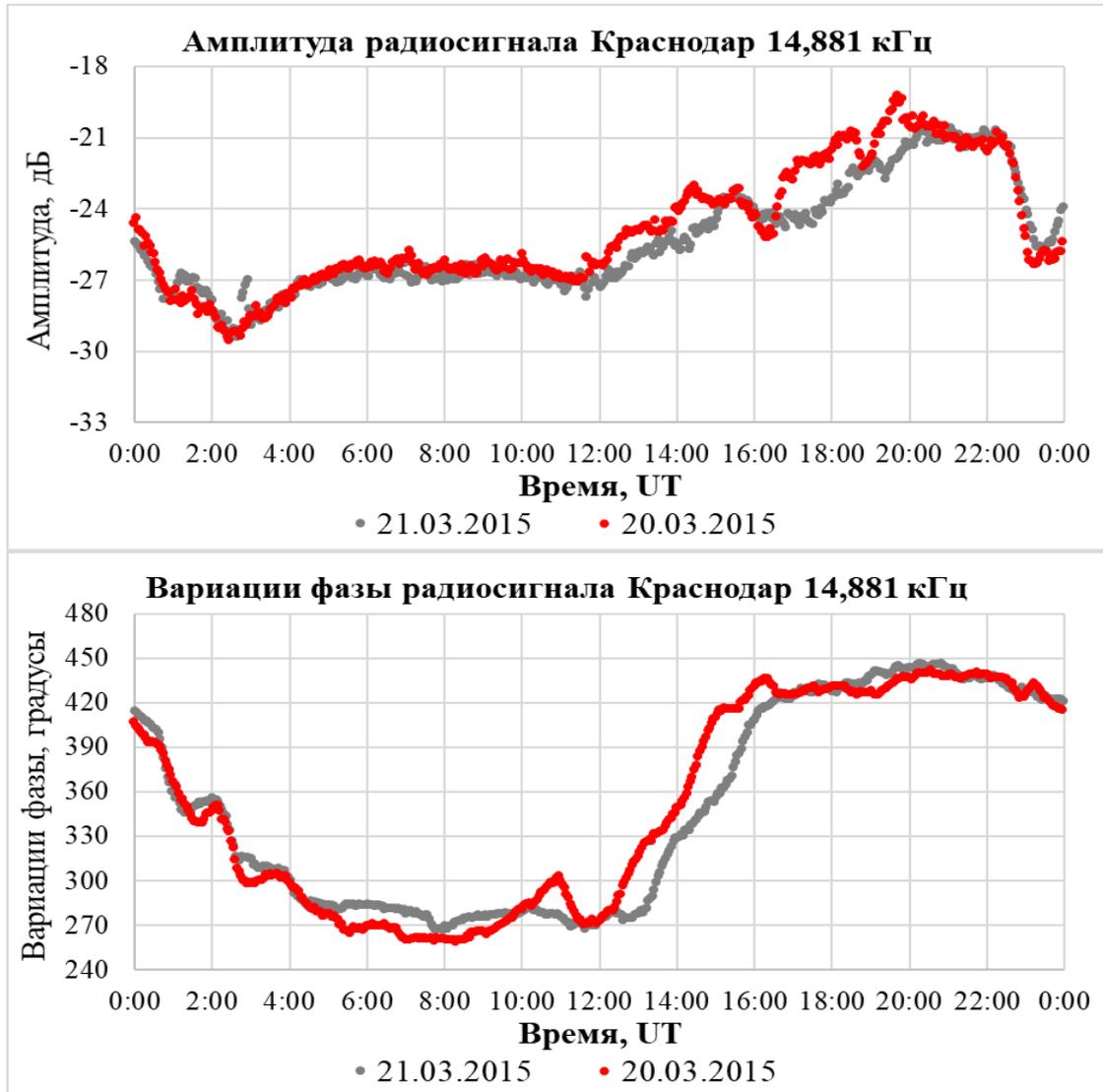


Рисунок 5.3 – Вариации амплитуды (верхняя панель) и фазы (нижняя панель) радиосигнала Краснодар (14,881 кГц) при регистрации в г. Улан-Удэ в день солнечного затмения 20 марта и в последующие сутки 21 марта 2015 г.

Эффект солнечного затмения проявился в виде повышения фазовой задержки радиосигнала Краснодар (14,881 кГц) при регистрации в г. Улан-Удэ. Максимум фазовой задержки радиосигнала в 10:57 UT составил $25,78^\circ$ (0,45

радиан). В вариациях амплитуды радиосигнала на радиотрассах Краснодар – Якутск и Краснодар – Улан-Удэ эффект затмения 20 марта 2015 г. на фоне естественных флуктуаций не был выделен.

Эффект затмения оказался сравним с уровнем естественных амплитудно-фазовых флуктуаций сигнала Новосибирск (14,881 кГц) и не проявился в параметрах радиосигнала Хабаровск (14,881 кГц) из-за малого затенения Луной радиотрасс Новосибирск – Якутск, Новосибирск – Улан-Удэ, Хабаровск – Якутск и Хабаровск – Улан-Удэ перед самым закатом [Козлов и др., 2016].

На аналогичной приборной базе 19 – 25 марта 2015 г. в Якутске вертикальной штыревой антенной принимался радиосигнал, который после предварительного усиления поступал на вход АЦП USB-3000 [ООО «Р-Тех»; Устройство USB3000], далее на ПК с программой регулярной записи [Свидетельство № 2023614391]. Регулярная запись проводилась по 18 секунд через каждые 126 секунд. С применением ДПФ (прямоугольное окно длительностью 5 мс) выделены вариации амплитуды радиосигнала передатчика DHO (Германия, 53° с.ш., 8° в.д., частота сигнала 23,4 кГц). Протяженность субполярной радиотрассы DHO – Якутск составляет 6270 км.

На рисунке 5.4 представлены вариации амплитуды радиосигнала DHO при регистрации в Якутске в день солнечного затмения 20 марта 2015 г., медиана суточных вариаций амплитуды DHO, регистрируемого в период 19 – 24 марта 2015 г., флуктуации амплитуды представлены в виде квартилей 25% и 75%.

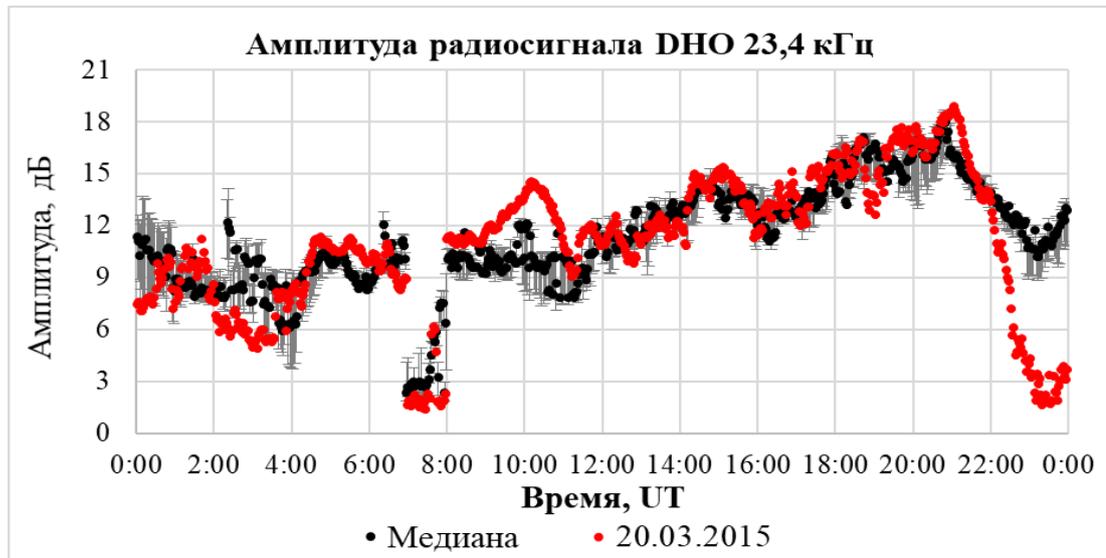


Рисунок 5.4 – Вариации амплитуды радиосигнала DHO при регистрации в Якутске в день солнечного затмения 20 марта и медиана суточных вариаций амплитуды радиосигнала DHO, регистрируемого в период 19 – 24 марта 2015 г.

В период кольцеобразного солнечного затмения 10 июня 2021 г. исследовались вариации амплитуд ОНЧ-радиосигналов, принимаемых в Якутске от передатчиков DHO и JXN (Норвегия, $66,97^\circ$ с.ш., $13,87^\circ$ в.д., частота сигнала 16,4 кГц, протяженность радиотрассы – 4800 км). Эффект солнечного затмения 10.06.2021 проявился в виде повышения амплитуды сигнала DHO с 10:21:36 до 12:25:30 UT. Амплитуда повысилась в максимуме на 1,62 дБ (11:39:18 UT) [Korsakov, Kozlov, Karimov, 2023]. Эффект солнечного затмения проявился в виде повышения амплитуды сигнала JXN с 10:36:18 до 12:19:12 UT. Амплитуда сигнала JXN повысилась в максимуме на 1,4 дБ (11:26:42 UT). Время перекрытия радиотрасс тенью Луны не противоречит зарегистрированным вариациям амплитуд ОНЧ-сигналов в период солнечного затмения [Корсаков, Сокрут, 2023].

5.2. Изменение эффективной высоты волновода Земля - ионосфера во время солнечных затмений

Поскольку эффект затенения более отчетлив в фазовых вариациях, принимаемых ОНЧ-радиосигналов, то это позволяет объяснить вариации

параметров регистрируемых сигналов изменением геометрии волновода Земля – ионосфера, а не импеданса его стенок. При моделировании изменения эффективной высоты волновода во время солнечного затмения использована идеология, изложенная в работе [Моисеенко, Шубова, 1978]. Для характеристики фазы ОНЧ-сигнала введена эффективная высота волновода h , определяемая как уровень постоянной концентрации электронов ионосферы вдоль элемента радиотрассы. Профиль концентрации электронов изменяется в зависимости от линейной фазы затмения и разным концентрациям электронов соответствуют различные высоты. Предполагая, что зенитный угол за время затмения постоянен и излучение по диску Солнца и его короне распределено равномерно, с учетом барометрической формулы (1.1), изменение эффективной высоты на элементе радиотрассы Δh можно представить в виде:

$$\Delta h = H \cdot \ln(I(\Phi) / I_{\text{дн}}), \quad (5.1)$$

где $I(\Phi)$ – поток ионизирующего излучения, зависящий от линейной фазы затмения;

Φ – линейная фаза затмения, определяемая как отношение закрытой части диаметра Солнца к полному;

$I_{\text{дн}}$ – полный поток ионизирующего излучения в дневное время;

H – высота однородной атмосферы.

На основе выражений (1.2), (1.3) и значений из таблицы 1.1. прослеживается изменчивость значения высоты однородной атмосферы H от географической широты и высоты над уровнем моря. Выражение (5.1) представим в виде:

$$\Delta h = H' \cdot \ln(I(\Phi) / I_{\text{дн}}), \quad (5.2)$$

где H' – нормировочный коэффициент для соответствующей протяженной радиотрассы, которая по дуге большого круга может охватывать ряд географических широт.

Полный поток ионизирующего излучения в дневное время $I_{\text{дн}}$ можно представить, как сумму потоков ночных дополнительных источников ионизации I_n , потоков ионизации от диска Солнца I_D и его короны I_k .

Поток ионизирующего излучения от диска Солнца I_D :

$$I_D = b \cdot S(\Phi),$$

где $S(\Phi)$ – площадь открытой части диска Солнца;

b – коэффициент пропорциональности.

Выразив b через значение полного потока ионизирующего излучения в дневное время $I_{\text{дн}}$ и подставив соответствующие потоки в выражение (5.2), получим изменение эффективной высоты элемента радиотрассы в виде:

$$\Delta h = H' \cdot \ln \left[\frac{I_n}{I_{\text{дн}}} \left(1 - \frac{S(\Phi)}{S_0} \right) + \frac{I_k}{I_{\text{дн}}} \left(1 - \frac{S(\Phi)}{S_0} \right) + \frac{S(\Phi)}{S_0} \right], \quad (5.3)$$

где S_0 – полная (открытая) площадь солнечного диска.

При расчетах радиотрасса разбивается на n элементов, длина элемента Δr выбрана по 200 км. Использовано предположение об одинаковом изменении эффективной высоты волновода на протяжении всего элемента радиотрассы Δr . При одномодовом приближении распространения ОНЧ-сигнала по дневной протяженной трассе, фазу радиосигнала φ по длине трассы r представим в виде:

$$\varphi = \sum_{i=1}^n \beta_i \Delta r, \quad (5.4)$$

где β – скорость изменения фазы сигнала с расстоянием, радиан/Мм.

В работе [Орлов, Азарнин, 1970] предложено выражение:

$$\beta(\text{рад} / \text{Мм}) = 20,95 \cdot 10^{-3} \cdot f \cdot \left(1 - \frac{V_1}{c} \right), \quad (5.5)$$

где f – частота сигнала, Гц;

V_1 – фазовая скорость первой моды;

c – скорость света в вакууме.

Фазовую скорость первой моды V_1 в волноводе Земля-ионосфера предложено находить, как:

$$\frac{V_1}{c} - 1 = \frac{\pi^2}{8k^2 h^2} - \frac{h}{2R_3} \left(1 - \frac{4}{\pi^2} \right), \quad (5.6)$$

где k – волновое число;

R_3 – радиус Земли ($R_3 = 6378$ км).

На рисунке 5.5 представлено изменение фазы сигнала с расстоянием β в зависимости от высоты волновода Земля-ионосфера на частоте 11,904 кГц. Для диапазона ОНЧ рассмотрен интервал высот волновода Земля – ионосфера от 60 до 95 км.

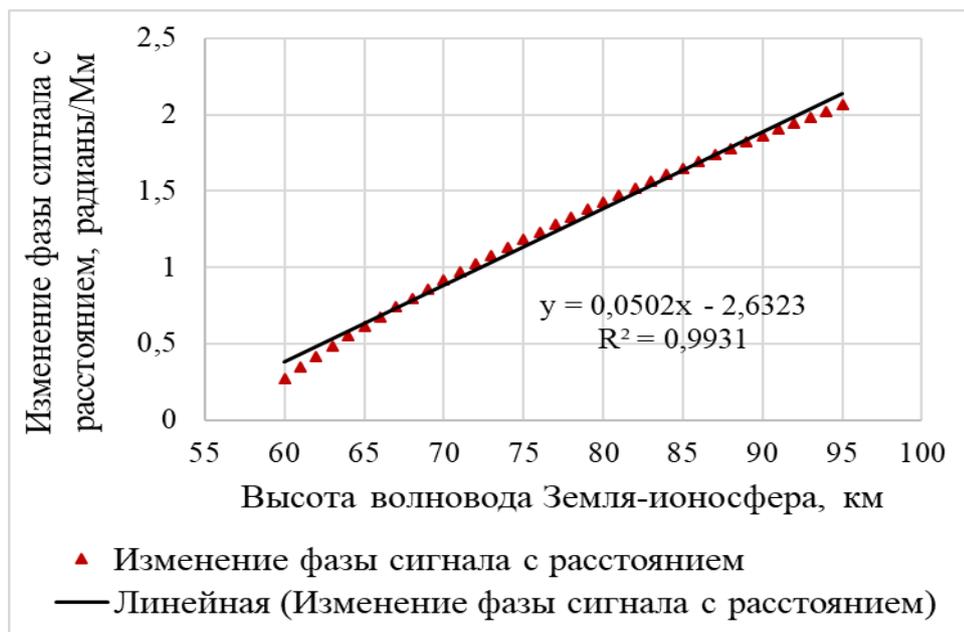


Рисунок 5.5 – Изменение фазы сигнала с расстоянием β в зависимости от высоты волновода Земля – ионосфера на частоте 11,904 кГц

Изменение фазы сигнала с расстоянием β на частоте $f = 11,904$ кГц в зависимости от высоты волновода Земля – ионосфера h описывается линейным трендом с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,993$:

$$\beta(h) = 0,0502 \cdot h - 2,6323, \quad (5.7)$$

На рисунке 5.6 представлено изменение фазы сигнала с расстоянием β в зависимости от высоты волновода Земля – ионосфера на частоте 14,881 кГц. Рассмотрен интервал высот волновода от 60 до 95 км.

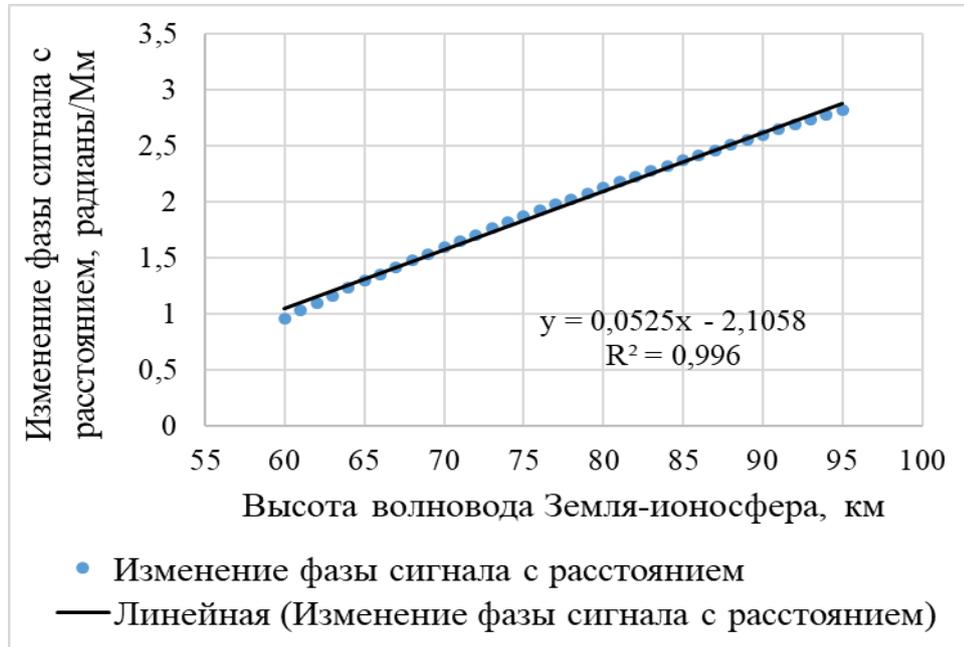


Рисунок 5.6 – Изменение фазы сигнала с расстоянием β в зависимости от высоты волновода Земля – ионосфера на частоте 14,881 кГц

Изменение фазы сигнала с расстоянием β на частоте $f = 14,881$ кГц в зависимости от высоты волновода Земля – ионосфера h описывается линейным трендом с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,996$:

$$\beta(h) = 0,0525 \cdot h - 2,1058. \quad (5.8)$$

Представим отклонения фазы радиосигнала в период затмения φ_3 от значения фазы ближайших невозмущенных суток φ_0 на основе выражений (5.4), (5.7) и (5.8). Для отклонения фазы радиосигнала на частоте 11,904 кГц:

$$\Delta\varphi = \varphi_3 - \varphi_0 = \sum_{i=1}^n 0,0502 \cdot \Delta h_i \cdot \Delta r. \quad (5.9)$$

Для отклонения фазы радиосигнала на частоте 14,881 кГц:

$$\Delta\varphi = \varphi_3 - \varphi_0 = \sum_{i=1}^n 0,0525 \cdot \Delta h_i \cdot \Delta r. \quad (5.10)$$

С учетом выражения (5.3) для отклонения фазы радиосигнала на частотах 11,904 и 14,881 кГц получим соответственно:

$$\Delta\varphi = 0,0502 \cdot \Delta r \cdot H' \cdot \sum_{i=1}^n \left(\ln \left[\frac{I_n}{I_{\text{дн}}} \left(1 - \left(\frac{S(\Phi)}{S_0} \right)_i \right) + \frac{I_k}{I_{\text{дн}}} \left(1 - \left(\frac{S(\Phi)}{S_0} \right)_i \right) + \left(\frac{S(\Phi)}{S_0} \right)_i \right] \right), \quad (5.11)$$

и

$$\Delta\varphi = 0,0525 \cdot \Delta r \cdot H' \cdot \sum_{i=1}^n \left(\ln \left[\frac{I_n}{I_{\text{дн}}} \left(1 - \left(\frac{S(\Phi)}{S_0} \right)_i \right) + \frac{I_k}{I_{\text{дн}}} \left(1 - \left(\frac{S(\Phi)}{S_0} \right)_i \right) + \left(\frac{S(\Phi)}{S_0} \right)_i \right] \right). \quad (5.12)$$

На основе обстоятельств и значений бесселевых элементов солнечных затмений 04.01.2011 [Астрономический ежегодник на 2011 год] и 20.03.2015 [Астрономический ежегодник на 2015 год] по алгоритмам [Дагаев, 1978], от момента касания лунной полутени поверхности Земли, до окончания затмения, получены распределения отношения площадей открытой части Солнца к полной $S(\Phi)/S_0$ вдоль радиотрасс Краснодар – Якутск и Краснодар – Улан-Удэ, с разрешением по трассе $\Delta r = 0,2$ Мм и временным разрешением 3 минуты.

Примем отношение потоков ночных дополнительных источников ионизации к полному потоку в дневное время $I_n/I_{\text{дн}} = 0,01$ [Иванов-Холодный, Никольский, 1969] и отношение $I_k/I_{\text{дн}} = 0,1$ [Альперт, 1972]. Методом наименьших квадратов, по экспериментальным данным о вариациях фазы радиосигнала $\Delta\varphi$ на частотах 11,904 и 14,881 кГц во время затмения на основе выражений (5.11 и 5.12) определены значения нормировочного коэффициента H' , связывающего изменение эффективной высоты волновода Земля – ионосфера Δh и логарифм отношения потока солнечного излучения во время затмения к полному потоку в дневное время $I(\Phi)/I_{\text{дн}}$. Параметры линейной регрессионной модели для солнечных затмений 4 января 2011 г. и 20 марта 2015 г. представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Параметры линейной регрессионной модели изменения фазы радиосигнала на частотах 11,904 и 14,881 кГц при распространении в волноводе Земля – ионосфера в зависимости от логарифма отношения потока солнечного излучения во время затмений 4 января 2011 г. и 20 марта 2015 г. к полному потоку в дневное время

Радиотрасса	Дата затмения	Частота сигнала, кГц	Объем выборки (разрешение 3 минуты)	Нормировочный коэффициент H' , км	Свободный член b , радиан	СКО остаточных невязок S , радиан	Коэффициент детерминации R^2
Краснодар - Якутск	04.01.2011	11,904	69	3,12 $\pm 0,21$	0,01 $\pm 0,01$	0,07	0,77
		14,881	69	3,99 $\pm 0,24$	0,02 $\pm 0,02$	0,08	0,81
	20.03.2015	11,904	53	4,76 $\pm 0,52$	0,24 $\pm 0,03$	0,16	0,62
		14,881	53	4,69 $\pm 0,42$	0,25 $\pm 0,03$	0,14	0,71
Краснодар – Улан-Удэ	20.03.2015	11,904	53	7,45 $\pm 0,39$	0,06 $\pm 0,01$	0,06	0,87
		14,881	53	7,62 $\pm 0,37$	0,1 $\pm 0,01$	0,06	0,89

Отличие нормировочных коэффициентов H' может объясняться изменением интенсивности источников ионизации. Вариации потоков дневной ионизации $I_{\text{дн}}$, могут объясняться сезонными или суточными изменениями зенитного угла Солнца над радиотрассой [Нестеров, 2011]. Геомагнитная обстановка 20 марта 2015 г. находилась на фазе восстановления после геомагнитной бури Св. Патрика 17 марта 2015 г. [Gokani et al., 2019]. На высокоширотных участках радиотрассы Краснодар – Якутск поток ночных дополнительных источников ионизации I_n мог быть увеличен вследствие высыпаний.

На рисунке 5.7 представлено сравнение рассчитанных на основе линейной регрессионной модели и регистрируемых отклонений фазы ОНЧ-радиосигнала на частоте 14,881 кГц при распространении вдоль радиотрассы Краснодар – Якутск в период частного затмения Солнца 04.01.2011. Регистрируемые отклонения фазы

радиосигнала 4 января 2011 г. приняты относительно усредненных значений вариаций фазы 03 и 05 января 2011 г.

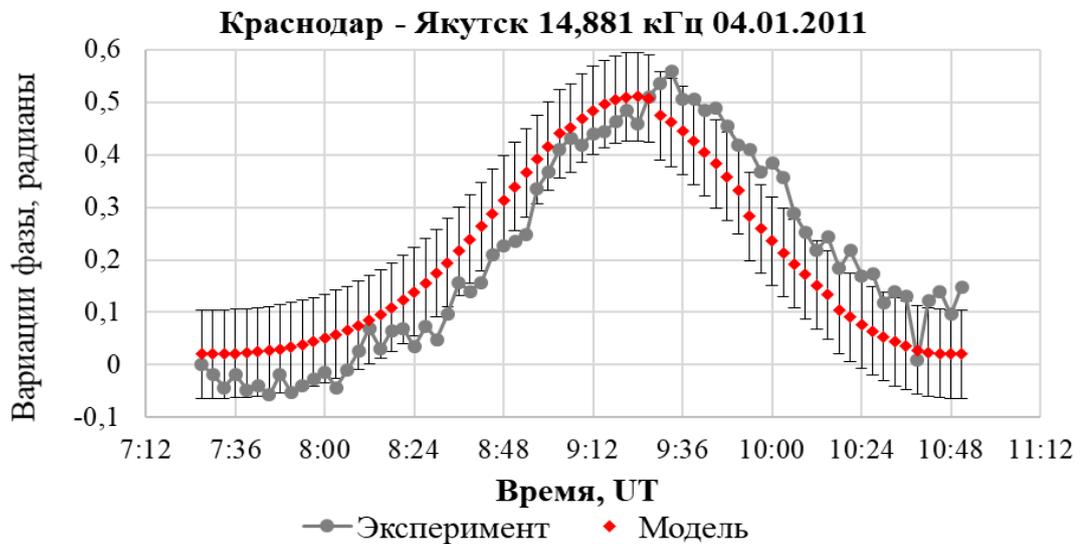


Рисунок 5.7 – Сравнение рассчитанных на основе линейной регрессионной модели и регистрируемых отклонений фазы ОНЧ-радиосигнала при распространении вдоль радиотрассы Краснодар – Якутск (14,881 кГц) в период частного затмения Солнца 04.01.2011

По значениям линейной фазы затмения Φ и найденным нормировочным коэффициентам H' на основе выражения (5.3) была проведена оценка изменения эффективной высоты волновода Δh . На рисунке 5.8 представлены распределения значений линейной фазы затмения Φ и изменения эффективной высоты волновода Δh вдоль радиотрассы Краснодар – Якутск при максимальном затенении 4 января 2011 г. (9:24 UT) по данным изменений фазы радиосигнала на частоте 11,904 кГц. Терминатор (граница день-ночь) при заходе Солнца на радиотрассе Краснодар – Якутск находился вблизи точки с координатами 64° с.ш., 74° в.д., поэтому условия распространения радиоволн к востоку считаются ночными [Корсаков и др., 2015а]. Максимальное значение линейной фазы затмения $\Phi = 0,74$ (участок трассы 55° с.ш., 51° в.д.), при этом максимальное изменение высоты волновода $\Delta h = 2,8$ км. По данным о вариациях фазы

радиосигнала на частоте 14,881 кГц вдоль радиотрассы Краснодар – Якутск максимальное изменение высоты волновода $\Delta h = 3,5$ км [Корсаков, 2023b].

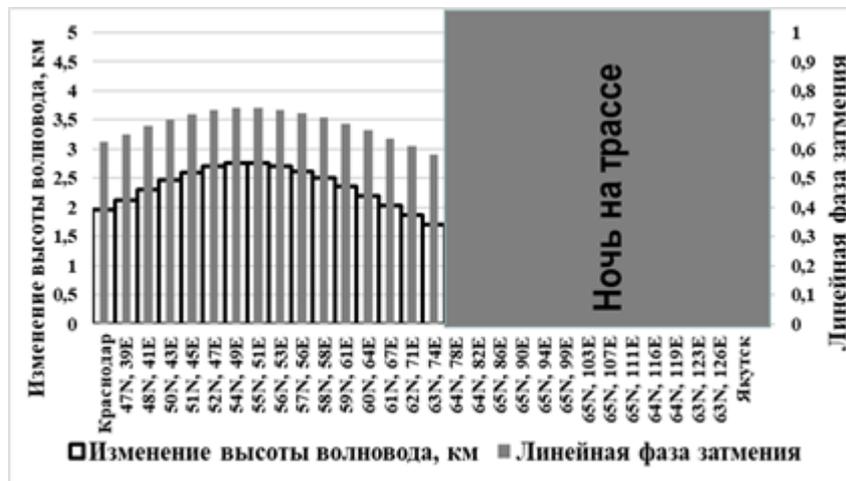


Рисунок 5.8 – Распределения линейной фазы затмения Φ и оценки изменений эффективной высоты волновода Δh вдоль радиотрассы Краснодар – Якутск при максимальном затенении 4 января 2011 г. (9:24 UT) по данным изменений фазы радиосигнала на частоте 11,904 кГц

20 марта 2015 г. при максимальном затенении радиотрассы Краснодар – Якутск (10:45 UT) максимальное значение линейной фазы затмения Φ составило 0,59 (участок трассы 64° с.ш., 78° в.д.). По значениям линейной фазы затмения Φ и нормировочным коэффициентам H' (таблица 5.1) на основе выражения (5.3) по данным о вариации фазы радиосигналов на частоте 11,904 кГц оценка максимального изменения высоты волновода $\Delta h = 2,9$ км. При максимальном затенении радиотрассы Краснодар – Улан-Удэ (10:54 UT) по данным на частоте 11,904 кГц сигнала максимальное изменение высоты волновода $\Delta h = 2,4$ км (53° с.ш., 63° в.д., линейная фаза затмения $\Phi = 0,42$).

На рисунке 5.9 представлены распределения значений линейной фазы затмения Φ 20 марта 2015 г. и изменения эффективной высоты волновода Δh вдоль радиотрасс Краснодар – Якутск и Краснодар – Улан-Удэ при максимальном затенении по данным изменений фазы радиосигнала на частоте 14,881 кГц.

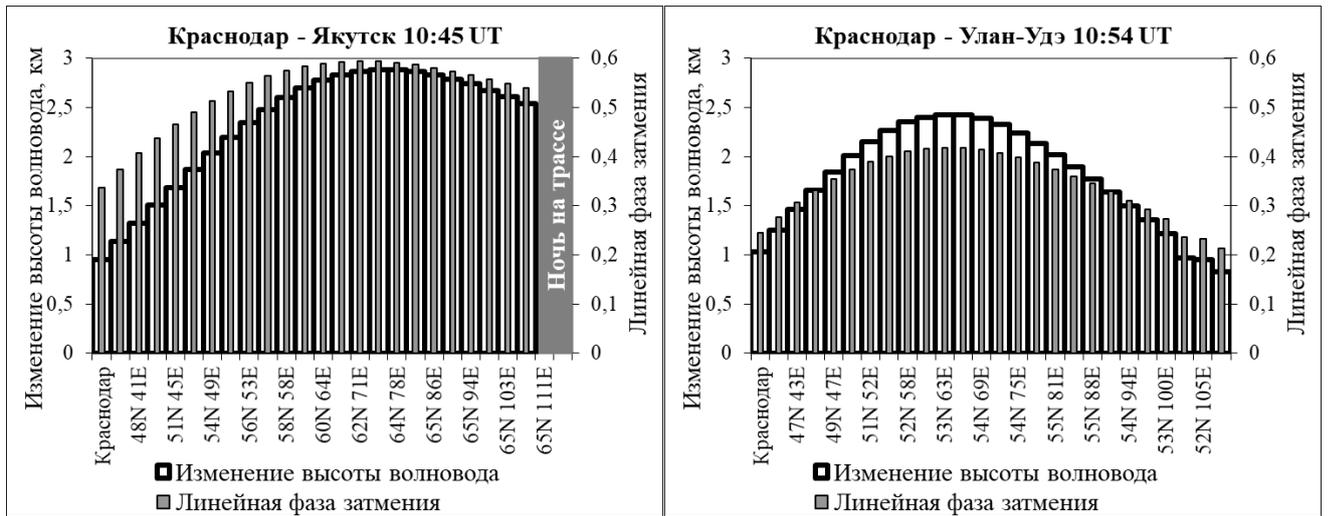


Рисунок 5.9 – Распределения линейной фазы затмения Φ 20 марта 2015 г. и оценки изменений эффективной высоты волновода Δh вдоль радиотрасс Краснодар – Якутск (левая панель) и Краснодар – Улан-Удэ (правая панель) при максимальном затенении по данным изменений фазы радиосигнала на частоте 14,881 кГц

По данным о вариации фазы радиосигналов на частоте 14,881 кГц оценка максимального изменения высоты волновода Δh на радиотрассе Краснодар – Якутск составила 2,9 км (20 марта 2015 г., в 10:45 UT максимальная линейная фаза затмения $\Phi = 0,59$ на участке радиотрассы 64° с.ш., 78° в.д.). При максимальном затенении радиотрассы Краснодар – Улан-Удэ (10:54 UT) на частоте 14,881 кГц максимальное изменение высоты волновода Δh составило 2,4 км (53° с.ш., 63° в.д., линейная фаза затмения $\Phi = 0,42$) [Козлов и др., 2016].

В работе [Соловьева и др., 2016] рассмотрены эффекты солнечного затмения 20.03.2015 в вариациях амплитуды и фазы ОНЧ-НЧ-радиосигналов передатчиков NAA (24,0 кГц, штат Мэн, США) и NRK (37,5 кГц, г. Рейкьявик, Исландия) при регистрации в Москве, Граце (Австрия) и Шеффилде (Великобритания). Радиотрассы пересекали область затенения 90 – 100%, оценка изменения эффективной высоты ионосферы составила от 6,5 до 11 км.

На установке частичных отражений Полярного геофизического института, расположенной на радиофизическом полигоне «Туманный» ($69,0^\circ$ с.ш., $35,7^\circ$ в.д.) [Черняков, 2017] в 420 км южнее от радиотрассы JXN – Якутск, солнечное

затмение 11 августа 2018 г. длилось с 8:40 до 10:15 UT. Максимум линейной фазы затмения $\Phi = 0,313$ (9:27 UT). На фоне околополуденных изменений (местный полдень 10 UT) эффекта относительно слабого затмения в данном районе не выявлено [Korsakov et al., 2019]. В работе [Моисеенко, Шубова, 1978] указывается, что при линейных фазах затмения от 0,5 до 1 эффективная высота волновода изменяется в 4 раза больше, чем при фазах затмения от 0 до 0,5. Изменение эффективной высоты волновода в зависимости от линейной фазы затмения носит нелинейный характер. В условиях, когда на радиотрассе линейная фаза солнечного затмения меньше 0,5, вариации фазы ОНЧ-сигнала могут не превышать флуктуаций, регистрируемых при отсутствии затмения.

5.3. Оценка изменения эффективной высоты волновода Земля – ионосфера при переходе от дня к ночи

По нормировочным коэффициентам H' (таблица 5.1) на основе выражения (5.2), при отношении потоков ночных источников ионизации к полному потоку в дневное время $I_n/I_{дн} = 0,01$ [Иванов-Холодный, Никольский, 1969] проведена оценка изменения эффективной высоты волновода Земля – ионосфера при переходе от полностью дневных условий к полностью ночным условиям $\Delta h_{\text{день-ночь}}$ на радиотрассах Краснодар – Якутск и Краснодар – Улан-Удэ.

По полученным значениям нормировочных коэффициентов H' на основе регистрируемых 4 января 2011 г. вариаций фазы радиосигналов на частотах 11,904 и 14,881 кГц, оценки изменения эффективной высоты волновода при переходе от дневных к ночным условиям $\Delta h_{\text{день-ночь}}$ на радиотрассе Краснодар – Якутск составили 14,4 и 18,4 км соответственно.

На основе регистрируемых 20 марта 2015 г. вариаций фазы радиосигнала на частоте 11,904 кГц, оценки изменения эффективной высоты волновода от дневных к ночным условиям на радиотрассах Краснодар – Якутск и Краснодар – Улан-Удэ составили 21,9 и 34,3 км соответственно. По данным о вариации фазы радиосигнала на частоте 14,881 кГц оценки изменения эффективной высоты

волновода $\Delta h_{\text{день-ночь}}$ на радиотрассах Краснодар – Якутск и Краснодар – Улан-Удэ 20 марта 2015 г. составили 21,6 и 35,1 км соответственно [Козлов и др., 2016].

Полученные нами оценки изменения эффективной высоты волновода Земля – ионосфера согласуются с оценками, представленными в работах [Моисеенко, Шубова, 1978; Рекомендация МСЭ-R P.684-8 (08/2022), 2023]. Распространение радиосигналов даже в условиях полного солнечного затмения можно считать одномодовым, так как при небольшой продолжительности полного затмения ночные условия распространения радиоволн ОНЧ не успевают сформироваться. В работе [Моисеенко, Шубова, 1978] по выражению (5.1), $H = 6,5$ км [Уиттен, Поппов, 1968], при учете $I_n/I_{\text{он}} = 0,01$ оценка изменения высоты волновода $\Delta h_{\text{день-ночь}}$ составила 30 км. В работе [Рекомендация МСЭ-R P.684-8 (08/2022), 2023] при оценке высоты точки отражения лучевым методом на частоте радиосигнала 10 кГц приводятся значения: 90 км (отражение в ночное время) и 70 км (наименьшая высота точки отражения в полдень по местному времени).

5.4. Основные выводы к главе 5

1. Рассмотрены эффекты в вариациях амплитуды и фазы при 4 солнечных затмениях на 5 радиотрассах Северной Евразии. Регистрируемые эффекты солнечных затмений проявились в виде повышения амплитуды и фазовой задержки ОНЧ-сигналов. Времена перекрытия радиотрасс тенью Луны не противоречат регистрируемым амплитудно-фазовым вариациям ОНЧ-сигналов. Регистрируемые значительно большие изменения фазы по сравнению с изменениями амплитуды принимаемого ОНЧ-радиосигнала во время солнечных затмений подтверждают большие изменения эффективной высоты волновода Земля – ионосфера, по сравнению с изменением импеданса его верхней стенки (области D ионосферы).

2. По вариациям фазы ОНЧ-радиосигналов во время солнечных затмений на радиотрассах Северной Евразии (Краснодар – Якутск и Краснодар – Улан-Удэ) получены коэффициенты связи изменения эффективной высоты

волновода Земля-ионосфера с изменением потока ионизирующего излучения Солнца. Отличие значений нормировочных коэффициентов этой зависимости может объясняться изменчивостью основных (изменения зенитного угла Солнца в зависимости от широты, сезона и времени суток) и дополнительных (высыпания заряженных частиц) источников ионизации нижней ионосферы.

3. Получены распределения оценок изменений эффективной высоты волновода вдоль радиотрасс Краснодар – Якутск и Краснодар – Улан-Удэ во время солнечных затмений. 4 января 2011 г. при максимальном затенении трассы Краснодар – Якутск в 9:24 UT (максимальная линейная фаза затмения составила 0,74, участок 55° с.ш., 51° в.д.) по данным о вариациях фазы радиосигнала на частотах 11,904 и 14,881 кГц оценки максимального изменения эффективной высоты волновода Земля – ионосфера составили 2,8 и 3,5 км соответственно. 20 марта 2015 г. при максимальном затенении радиотрассы Краснодар – Якутск в 10:45 UT (максимальная линейная фазы затмения составила 0,59, участок 64° с.ш., 78° в.д.) по вариациям фазы на частотах 11,904 и 14,881 кГц оценки максимального изменения высоты составили 2,9 км. Максимальному затенению радиотрассы Краснодар – Улан-Удэ в 10:54 UT (максимальная линейная фаза затмения: 0,42 на участке 53° с.ш., 63° в.д.) соответствуют оценки максимального изменения высоты волновода: 2,4 км (по данным на частотах 11,904 и 14,881 кГц).

4. По нормировочным коэффициентам проведена оценка изменения эффективной высоты волновода Земля – ионосфера при переходе от дневных к ночным условиям распространения. На основе регистрируемых 4 января 2011 г. вариаций фазы радиосигналов на частотах 11,904 и 14,881 кГц оценки изменения эффективной высоты волновода при переходе от дневных к ночным условиям на радиотрассе Краснодар – Якутск составили 14,4 и 18,4 км соответственно. По вариациям фазы радиосигнала на частоте 11,904 кГц 20 марта 2015 г. оценки изменения эффективной высоты волновода от дневных к ночным условиям на радиотрассах Краснодар – Якутск и Краснодар – Улан-Удэ составили 21,9 и 34,3 км, а на частоте 14,881 кГц оценки составили 21,6 км и 35,1 км соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты и сделанные на их основе выводы при выполнении диссертационной работы представлены ниже.

1. Разработана методика выделения мощности радиошума, амплитуды и фазы радиосигналов на рабочих частотах РСДН-20. Особенность методики состоит в том, что в периоды паузы между излучением радиоимпульсов передатчиков в соответствии с режимом работы РСДН-20 регистрируется мощность радиошума в узкой полосе частот.

2. Зарегистрировано нарастание мощности ОНЧ-радиошума и амплитуды сигналов радиопередатчиков в период нарастания солнечной активности (СА) 2009 – 2014 гг.; в период спада СА (2015 – 2017 гг.) регистрируется спад амплитуды радиосигналов и мощности ОНЧ-радиошума летом и зимой.

3. При сопоставлении среднемесячных суточных вариаций среднеквадратичных значений амплитуды ОНЧ-радиошума и сигналов радиостанций получено суточное нарастание грозовой активности в Северной Азии в летний период. Указанное нарастание в максимуме (июль, 3 – 12 UT) составляет 10,1 дБ (относительно минимума в 2 UT).

4. С учетом вариаций функции распространения радиосигналов на частотах 11,904 и 14,881 кГц получено, что интенсивность грозовой активности в Северной Азии летом с 2009 по 2017 гг. возросла в 2,5 раза днем и от 1,5 до 2,5 раз ночью.

5. На основе адаптации параметров регрессионной модели внезапных фазовых аномалий ОНЧ-сигналов показано, что в зимний период понижение эффективной высоты волновода Земля – ионосфера на радиотрассах Северной Евразии при внезапных ионосферных возмущениях достигает меньших значений в максимуме цикла солнечной активности.

6. Показано, что для описания внезапных фазовых аномалий (ВФА) в зависимости от интенсивности потока рентгеновского излучения и зенитного угла Солнца, характерной для одномодового распространения, могут использоваться данные о вариации фазы радиосигнала на частоте 11,904 кГц в дневных условиях распространения по радиотрассе протяженностью 1400 км вдоль меридиана.

7. По данным ВФА радиосигналов, регистрируемых в Якутске (2009 – 2017 гг.), с учетом интенсивности фонового потока рентгеновского излучения, проведена адаптация параметров регрессионной модели по оценке интенсивности потока рентгеновского излучения во время солнечных вспышек.

8. По вариациям фазы ОНЧ-радиосигналов во время солнечных затмений на радиотрассах Северной Евразии получены коэффициенты связи изменения эффективной высоты волновода Земля-ионосфера с изменением потока ионизирующего излучения Солнца. Нормировочные коэффициенты на частоте сигнала 14,881 кГц на радиотрассе Краснодар – Якутск: $H' = 3,99 \pm 0,24$ км (4 января 2011 г.) и $H' = 4,69 \pm 0,42$ км (20 марта 2015 г.), а на радиотрассе Краснодар – Улан-Удэ: $H' = 7,62 \pm 0,37$ км (20 марта 2015 г.).

9. Получены оценки изменений эффективной высоты волновода при переходе от дневных к ночным условиям распространения ОНЧ-сигнала на радиотрассах Краснодар – Якутск и Краснодар – Улан-Удэ. 4 января 2011 г. оценки изменения эффективной высоты волновода на трассе Краснодар – Якутск: 14,4 км (11,904 кГц) и 18,4 км (14,881 кГц). 20 марта 2015 г. оценки изменения эффективной высоты волновода на радиотрассе Краснодар – Якутск: 21,9 км (11,904 кГц) и 21,6 км (14,881 кГц); на радиотрассе Краснодар – Улан-Удэ: 34,3 км (11,904 кГц) 35,1 км (14,881 кГц). Оценки повышения эффективной высоты волновода на участке с максимальной линейной фазой затмения: 2,8 и 3,5 км на частотах 11,904 и 14,881 кГц (радиотрасса Краснодар – Якутск, 4 января 2011 г. в 09:24 UT, линейная фаза затмения 0,74); 2,9 км (радиотрасса Краснодар – Якутск, 20 марта 2015 г. в 10:45 UT, линейная фаза затмения 0,59); 2,4 км (радиотрасса Краснодар – Улан-Удэ, 20 марта 2015 г. в 10:54 UT, линейная фаза затмения 0,42).

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

Å – ангстрем, 10^{-10} м

АЦП – аналого-цифровой преобразователь

БПФ – быстрое преобразование Фурье

ВАА – внезапные амплитудные аномалии

ВИВ – внезапные ионосферные возмущения

ВФА – внезапные фазовые аномалии

ГНСС – глобальные навигационные спутниковые системы

ДПФ – дискретное преобразование Фурье

ИДГ – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук

ИЗМИРАН – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук

ИПГ Росгидромета – Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

ИФМ СО РАН – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук

КНЧ – крайне низкие частоты (3-30 Гц)

Мм – метр (дистанция протяженностью 10^6 метра)

мсек – миллисекунда

НЧ – низкие частоты (30-300 кГц)

ОНЧ – очень низкие частоты (3-30 кГц)

отн. ед. – относительная единица

ПГО ИКФИА СО РАН (Тикси) – Полярная геокосмофизическая обсерватория Института космофизических исследований и астрономии им. Ю.Г. Шафера

Сибирского отделения Российской академии наук, расположена вблизи поселка Тикси

ПК – персональный компьютер

ПО – программное обеспечение

ППШ – поглощение в полярной шапке

РСДН – радиотехническая система дальней навигации

с.е.п. – солнечная единица потока ($1 \text{ с.е.п.} = 10^{-22} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{Гц})$)

СА – солнечная активность

СКО – среднеквадратичное отклонение

СНЧ – сверхнизкие частоты (0,3-3 кГц)

СПбГУ – Санкт-Петербургский государственный университет

СПС – солнечные протонные события

ФРНС – фазовая радионавигационная система

AARDDVARK – Antarctic-Arctic Radiation-belt (Dynamic) Deposition - VLF Atmospheric Research Konsortium (Антарктико-арктическая сеть по исследованию динамики радиационных поясов с помощью атмосферного ОНЧ-радиоизлучения)

AWESOME – Atmospheric Weather Electromagnetic System for Observation, Modeling, and Education (электромагнитная система для обучения, наблюдений и моделирования процессов атмосферной погоды)

COM-порт – communications port (последовательный порт)

CW – Continuous Wave (амплитудная манипуляция в режиме радиотелеграфа)

FASTMC – процедура LWPC выполняет преобразования мод на границах волновода

FIFO – first in, first out – (способ манипулирования данными «первым пришел, первым вышел»)

FSK – Frequency Shift Keying (частотная манипуляция)

GLE – Ground Level Enhancement (наземное возрастание солнечных космических лучей)

GMSK – Gaussian Minimum Shift Keying (частотная манипуляция с минимальным сдвигом с применением гауссовского фильтра нижних частот)

GOES – Geostationary Operational Environmental Satellite (геостационарный спутник наблюдения за окружающей средой)

GPS – Global Positioning System (система глобального позиционирования)

GRDPLOT – подпрограмма LWPC-2.0 генерирует графики напряженности сигнала на карте

IRI – International Reference Ionosphere (международная справочная модель)

LWPC – Long Wave Propagation Capability (пакет программ по расчету распространения радиоволн диапазонов ОНЧ и НЧ)

LWPM – Long Wave Propagation Model (подпрограмма LWPC-2.0 реализует модель распространения радиоволн)

MODEFNDR – подпрограмма LWPC определяет моды внутри каждого сегмента волновода

MSK – Minimum Shift Keying (частотная манипуляция с минимальным сдвигом)

OmniPAL – регистратор амплитудно-фазовых вариаций ОНЧ-сигналов радиостанций

PPS – Pulse per second (импульс в секунду)

PRESEG – подпрограмма LWPC ссылается на таблицы значений диэлектрической проницаемости, проводимости земли, геомагнитного поля и параметров высотного профиля ионосферы на участках (сегментах) волновода

QTE – квази-TE волны (квази-поперечные электрические волны)

QTM – квази-TM волны (квази-поперечные магнитные волны)

SAVNET – South America VLF NETwork (Южноамериканская сеть ОНЧ-приемников).

SIMP – System of Ionospheric Monitoring and Prediction (эмпирическая модель ионосферы)

TE – поперечные электрические волны

TEM – поперечные электромагнитные волны

TM – поперечные магнитные волны

TSIP – Trimble Standard Interface Protocol (протокол интерфейса GPS по стандарту компании Trimble)

UltraMSK – ОНЧ-приемник для дистанционного зондирования ионосферы и магнитосферы. Приемник измеряет амплитуду и фазу узкополосных ОНЧ-радиосигналов с модуляцией MSK или CW

UT – всемирное время. В диссертационной работе под этим термином подразумевается всемирное координированное время UTC

UTC – Coordinated Universal Time (всемирное координированное время)

UTC (SU) – национальная шкала координированного времени Российской Федерации (допустимое расхождение UTC ± 7 нс)

VELOX – VLF/ELF Logger Experiment (приемная система для сбора данных в радиодиапазоне от крайне низких до очень низких частот)

WWLLN – World Wide Lightning Location Network (Мировая сеть локаций молний).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Акасофу, С. И. Полярные и магнитосферные суббури / С. И. Акасофу. – М.: Мир, 1971. – 320 с.

Алсаткин, С. С. Суточно-сезонные вариации электронной концентрации во внешней ионосфере по данным Иркутского радара некогерентного рассеяния / С. С. Алсаткин, А. В. Медведев, К. Г. Ратовский // Взаимодействие полей и излучения с веществом: труды Международной Байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике и конференции молодых ученых, Иркутск, 14–18 сентября 2015 года. – Иркутск: ИСЗФ СО РАН, 2015. – С. 92-95.

Альперт, Я. Л. Распространение электромагнитных волн и ионосфера / Я. Л. Альперт. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Наука, 1972. – 564 с.

Антенна дипольная активная П6-51 - №349. Руководство по эксплуатации, ИУШЯ.464651.006РЭ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://propribory.ru/static/upl/17-09-2020/vFEVXbeMZtCUDWql/P6-51.pdf> (дата обращения 12.10.2018).

Астрономический ежегодник на 2011 год / Частное солнечное затмение 4 января 2011 г [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://iaaras.ru/media/data/ae2011/20110104soa.txt> (дата обращения 15.12.2014).

Астрономический ежегодник на 2015 год / Полное солнечное затмение 20 марта 2015 г [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://iaaras.ru/media/data/ae2015/20150320soa.txt> (дата обращения 21.08.2015).

Ахметов, О. И. Влияние сильных солнечных протонных событий на распространение радиосигналов в диапазоне ОНЧ в области высоких широт / О. И. Ахметов, И. В. Мингалев, О. В. Мингалев, В. Б. Белаховский, Е. А. Маурчев, А. В. Ларченко, З. В. Суворова, Ю. В. Балабин // Солнечно-земная физика. – 2023. – Т. 9. – № 3. С. 33-46.

Ахметов, О. И. Распространение электромагнитных волн в области высоких широт при различном состоянии ионосферы на частотах системы радионавигации

РСДН-20 (Альфа) / О. И. Ахметов, И. В. Мингалев, О. В. Мингалев, В. Б. Белаховский, З. В. Суворова // Геомагнетизм и аэрономия. – 2021. – Т. 61. – № 3. – С. 366-378.

Баишев, Д. Г. Мониторинг и исследование эффектов космической погоды с помощью меридиональной цепочки инструментов в Якутии: краткий обзор / Д. Г. Баишев, С. Н. Самсонов, А. В. Моисеев, Р. Н. Бороев, А. Е. Степанов, В. И. Козлов, А. А. Корсаков, А. А. Торопов, А. Йошикава, К. Юмото // Солнечно-земная физика. – 2017. – Т. 3. – № 2. – С. 25-33.

Баскаков, С. И. Радиотехнические цепи и сигналы / С. И. Баскаков. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2000. – 462 с.

Башкуев, Ю. Б. Анализ условий распространения СДВ радиоволн в волноводе «Земля-ионосфера» на трассах «Новосибирск – Улан-Удэ» и «Комсомольск-на-Амуре – Улан-Удэ» во время магнитных бурь и солнечных вспышек 31 августа – 12 сентября 2017 года / Ю. Б. Башкуев, В. Р. Адвокатов, Д. Г. Буянова, М. Г. Пушкарев, М. Г. Дембелов // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. – 2018. – № 5 (25). – С. 8-16.

Беккер, С. З. Вероятностно – статистические модели нижней невозмущенной ионосферы, верифицированные по данным наземных радиофизических измерений: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 25.00.29 / Беккер Сусанна Зейтуллаевна. – М., 2018. – 129 с.

Беккер, С. З. Вопросы моделирования ионосферы для расчета распространения радиоволн при решении прикладных задач / С. З. Беккер, С. И. Козлов, А. Н. Ляхов // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2013. – № 3-4(57-58). – С. 85-88.

Беленький, М. И. О зависимости величины ВФА СДВ от зенитного угла Солнца на протяжённых трассах в различных широтах / М. И. Беленький, А. Б. Орлов, А. Е. Пронин, А. Н. Уваров // Труды VIII региональной конференции по распространению радиоволн. г. Санкт-Петербург. – 2002. – С. 25.

Белоглазов, М. И. Распространение сверхдлинных радиоволн в высоких широтах / М. И. Белоглазов, Г. Ф. Ременец. – Л.: Наука, 1982. – 237 с.

Болошин, С. Б. К истории создания фазовой радионавигационной системы «Маршрут» / С. Б. Болошин // Новости навигации. – 2013. – № 4. С. 69-72.

Болошин, С. Б. Радионавигационные системы сверхдлинноволнового диапазона / С. Б. Болошин, Г. А. Семенов, А. С. Гузман, Г. В. Головушкин, П. В. Олянюк. – М.: Радио и связь, 1985. – 264 с.

Ботова, М. Г. Вариации ионосферы: сопоставление результатов моделирования с данными наблюдений / М. Г. Ботова, Ю. В. Романовская, А. А. Намгаладзе // Вестник МГТУ. – 2014. – Т. 17. – № 2. – С. 385-393.

Брюнелли, Б. Е. Физика ионосферы / Б. Е. Брюнелли, А. А. Намгаладзе. – М.: Наука, 1988. – 528 с.

Гаврилов, Б. Г. Оценка изменений параметров среднеширотной нижней ионосферы, вызванных солнечной вспышкой 10 сентября 2017 г / Б. Г. Гаврилов, В. М. Ермак, Ю. В. Поклад, И. А. Ряховский // Геомагнитизм и аэрономия. – 2019. – Т. 59. – № 5. – С. 628-634.

Гаврилов, Б. Г. Воздействие солнечного рентгеновского излучения и протонных высыпаний на амплитуду ОНЧ сигналов / Б. Г. Гаврилов, И. А. Ряховский, Ю. В. Поклад. // Динамические процессы в геосферах. – 2023. – Т. 15. – № 2. – С. 81-88.

Гаврилов, Б. Г. Пространственно – временные распределения электронной плотности в ионосфере по данным регистрации полного электронного содержания и фазы ОНЧ-радиосигналов / Б. Г. Гаврилов, Ю. И. Зецер, А. Н. Ляхов, Ю. В. Поклад, И. А. Ряховский // Геомагнетизм и аэрономия. – 2017. – Т. 57. – № 4. – С. 500-509.

Галюк, Ю. П. Комбинированный цифровой приемник радионавигационных систем ОНЧ и НЧ диапазонов для исследования нижней ионосферы / Ю. П. Галюк, М. А. Бисярин, Н. Ю. Заалов, Л. Н. Лутченко // Сб. трудов Региональной XVIII конференции по распространению радиоволн. – Санкт-Петербург, 13 ноября – 15 ноября 2012 г. – 2012б. – С. 13-15.

Галюк, Ю. П. Программно-аппаратный комплекс СПбГУ для исследования нижней ионосферы посредством радиоволн низкочастотных диапазонов /

Электромагнитные методы исследования окружающего пространства [Электронный ресурс] / Ю. П. Галюк, М. А. Бисярин, Н. Ю. Заалов, Л. Н. Лутченко: Сб. тез. докл. Первой украинской конференции (Харьков, 25–27 сент. 2012 г.). – Харьков, 2012а. – С. 144-147.

Галюк, Ю. П. Цифровой приемоиндикатор радионавигационной системы ALPNA / Ю. П. Галюк, М. А. Бисярин // Третья Международная конференция и выставка «Планирование глобальной радионавигации». – М., 2000.

Гоков, А. М. Экспериментальное исследование отклика среднеширотной D-области ионосферы на затмение Солнца 29 марта 2006 г / А. М. Гоков, А. И. Гритчин, О. Ф. Тырнов // Геомагнетизм и аэрономия. – 2008. – Т. 48. – №2. – С. 241-249.

ГОСТ 25645.146-89. Ионосфера Земли. Модель глобального распределения концентрации, температуры и эффективной частоты соударений электронов: в 4 ч. – М.: Госстандарт СССР, 1991.

ГОСТ Р-25645.157-94. Ионосфера Земли нижняя. Модель глобального распределения концентрации и эффективной частоты соударений электронов для прогнозирования низкочастотных радиополей. – М.: Госстандарт России, 1995. – 334 с.

Дагаев, М. М. Солнечные и лунные затмения / М. М. Дагаев. – М.: Наука, 1978. – 208 с.

Данилов, А. Д. Вариации коэффициента рекомбинации и фотохимия области D / А. Д. Данилов, А. Г. Симонов // Ионосферные исследования. – 1981. – № 34. – С. 54-72.

Данилов, А. Д. Метеорологические эффекты в ионосфере / А. Д. Данилов, Э. С. Казимировский, Г. В. Вергасова, Г. Я. Хачикян. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 269 с.

Данилов, А. Д. Сезонные различия эффектов внезапных ионосферных возмущений в D-области / А. Д. Данилов, А. Б. Орлов, Л. П. Морозова, В. П. Кищук // Геомагнетизм и аэрономия. – 1983. – Т. 23. – № 2. – С. 311-313.

Демыкин С. М., Кищук В. П. / Тезисы докладов VIII межведомственного семинара по распространению километровых и более длинных волн. – Омск. – 1982. – С. 17.

Дискретное преобразование Фурье / Функции оконного сглаживания [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.dsplib.org/content/windows/windows.html> (дата обращения 12.02.2015).

Долуханов, М. П. Распространение радиоволн. Учебник для вузов / М. П. Долуханов. – М.: Связь, 1972. – 336 с.

Дружин, Г. И. Одновременные наблюдения на Камчатке и в Якутии естественного электромагнитного излучения в КНЧ-ОНЧ-диапазонах в период солнечного затмения 1 августа 2008 г / Г. И. Дружин, В. Н. Уваров, В. А. Муллаяров, В. И. Козлов, А. А. Корсаков // Геомагнетизм и аэрономия. – 2010. – Т. 50. – № 2. – С. 220-227.

Дуюкова, Н. С. Амплитудные распределения узкополосных ОНЧ радиосигналов по наблюдениям в Якутске / Н. С. Дуюкова, В. И. Козлов, А. А. Корсаков // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. – 2018. – № 3(65). – С. 60-69.

Жеребцов, Г. А. Ионосферные возмущения в Восточно-Азиатском регионе / Г. А. Жеребцов, Shi Jiankui, Н. П. Перевалова, Н. М. Полех, Н. А. Золотухина. – М.: ГЕОС, 2021. – 338 с.

Жеребцов, Г. А. Комплекс гелиогеофизических инструментов нового поколения / Г. А. Жеребцов // Солнечно-земная физика. – 2020. – Т. 6. – № 2. – С. 6-18.

Зелёный, Л. М. Космический эксперимент «Микроспутник» на Российском сегменте / Л. М. Зелёный, С. И. Климов, В. Н. Ангаров, В. Г. Родин, В. Н. Назаров, А. А. Суханов, О. В. Батанов, В. М. Готлиб, А. В. Калюжный, В. Н. Каредин, В. М. Козлов, И. В. Козлов, Н. А. Эйсмонт, А. А. Ледков, Д. И. Новиков, В. Е. Корепанов, Л. Боднар, П. Сегеди, Ч. Ференц, А. П. Папков, А. А. Лизунов // Космическая техника и технологии. – 2015. – № 3(10). – С. 26-37.

Иванов, В. А. Основы радиотехнических систем ДКМ диапазона: [Учеб. пособие для вузов по специальностям «Радиотехника», «Радиосвязь, радиовещание и телевидение»] Под общ. ред. В.А. Иванова / В. А. Иванов, Н. В. Рябова, В. В. Шумаев. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 1998. – 204 с.

Иванов-Холодный, Г. С. Солнце и ионосфера / Г. С. Иванов-Холодный, Г. М. Никольский. – М.: Наука, 1969. – 456 с.

Каримов, Р. Р. Вариации амплитуд сигналов СДВ-радиостанций по данным регистрации радиоизлучения в Тикси / Р. Р. Каримов, Ю. Б. Башкуев, В. И. Козлов, А. А. Торопов, А. А. Корсаков, В. В. Аргунов // Труды XXV Всероссийской открытой конференции «Распространение радиоволн». – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2016. – Т. II. – С. 148-151.

Каримов, Р. Р. Вариации параметров сигналов Радиостанций, регистрируемых в Якутске в диапазоне очень низких частот / Р. Р. Каримов, В. И. Козлов, А. А. Корсаков, В. А. Муллаяров, В. П. Мельчинов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2012. – Т. 9. – № 4. – С. 57-62.

Каримов, Р. Р. Особенности вариаций характеристик ОНЧ-сигналов при прохождении лунной тени по трассе в период солнечного затмения 29 марта 2006 г / Р. Р. Каримов, В. И. Козлов, В. А. Муллаяров // Геомагнетизм и аэрономия. – 2008. – № 2. – С. 250-254.

Каримов, Р. Р. Регистрация свистящих атмосфериков в Якутске (AWDANET) / Р. Р. Каримов, Я. Лихтенбергер // Глобальная электрическая цепь: материалы пятой Всероссийской конференции. – Геофизическая обсерватория «Борок» – филиал Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН – Ярославль: Филигрань, 2021. – С. 76-77.

Кикулькин, И. Е. Фазовый метод определения координат / И. Е. Кикулькин, В. Д. Рубцов, М. А. Фабрик. – М.: Сов. Радио, 1979. – 280 с.

Козлов, В. И. Адаптация параметров модели внезапных фазовых аномалий ОНЧ сигналов радиостанций на трассах Новосибирск – Якутск и Краснодар –

Якутск / В. И. Козлов, А. А. Корсаков, Р. Р. Каримов, В. А. Муллаяров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2015. – Т. 12. – № 1. – С. 43-50.

Козлов, В. И. Анализ гелио- и геофизических событий в октябре–ноябре 2021 г. по комплексным наблюдениям ИКФИА СО РАН / В. И. Козлов, С. А. Стародубцев, В. Г. Григорьев, Д. Г. Баишев, Г. А. Макаров, Е. А. Павлов, Р. Р. Каримов, А. А. Корсаков, А. Е. Степанов, И. И. Колтовской, П. П. Аммосов, Г. А. Гаврильева, И. Б. Иевенко, С. Г. Парников // Солнечно-земная физика. – 2025. – Т. 11. – № 1. – С. 10–30.

Козлов, В. И. Вариации амплитуды и фазы сигналов ОНЧ-радиостанций в период солнечного затмения 20 марта 2015 г. при регистрации в Якутске и Улан-Удэ / В. И. Козлов, А. А. Корсаков, Р. Р. Каримов, В. В. Аргунов, В. П. Мельчинов, Ю. Б. Башкуев, А. Л. Бояров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2016. – Т. 13. – № 4. – С. 195-203.

Козлов, В. И. Использование GPS для синхронизации регистрации ОНЧ-сигналов / В. И. Козлов, Р. Р. Каримов, В. А. Муллаяров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2008. – Т. 5. – № 1. – С. 132-137.

Козлов, В. И. Пространственное распределение плотности грозových разрядов на Востоке России по данным дистанционных наблюдений / В. И. Козлов, В. А. Муллаяров, Р. Р. Каримов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2011. – Т. 8. – № 3. – С. 257-262.

Козлов, В. И. Регистратор сигналов сверхдлинноволновых радиостанций с синхронизацией от GPS-часов / В. И. Козлов, Р. Р. Каримов, В. А. Муллаяров // Приборы и техника эксперимента. – 2007. – № 5. – С. 153-154.

Козлов, В. И. Суточно-сезонные вариации атмосфериков / В. И. Козлов, Г. В. Фёдорова, С. Н. Шабаганова // Вестник ЯГУ. – 2009. – Т. 6. – № 4. – С. 29-34.

Козлов, В. И. Эффекты взрыва Челябинского метеороида 15.02.2013 в вариациях параметров ОНЧ-радиосигналов, регистрируемых в Якутске и Улан-Удэ / В. И. Козлов, В. А. Муллаяров, А. А. Корсаков, Р. Р. Каримов, С. Е. Кобякова, Ю. Б. Башкуев, Г. Б. Номинов // Солнечно-земная физика. – 2013. – № 24 (137). – С. 32-35.

Козлов, С. И. Обоснование требований к моделям ионосферы, используемым в радиолокационных системах дециметрового и метрового диапазонов длин волн / С. И. Козлов, А. Н. Ляхов, С. В. Якубовский, С. З. Беккер, Б. Г. Гаврилов, В. В. Яким // Труды V Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». – Санкт-Петербург. – 2018. – С. 455-457.

Козлов, С. И. Основные принципы построения вероятностно-статистических моделей ионосферы для решения задач распространения радиоволн / С. И. Козлов, А. Н. Ляхов, С. З. Беккер // Геомагнетизм и аэрномия. – 2014. – Т. 54. – № 6. – С. 767-779.

Козлов, С. И. Основные принципы построения вероятностно-статистических моделей ионосферы для решения задач распространения радиоволн / С. И. Козлов, А. Н. Ляхов, С. З. Беккер // Геомагнетизм и аэрномия. – 2014. – Т. 54. – № 6. – С. 767-779.

Корсаков, А. А. Адаптация параметров модели внезапных фазовых аномалий ОНЧ-радиосигнала в течение цикла активности солнца / А. А. Корсаков, В. И. Козлов, Р. Р. Каримов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2016. – Т. 59. – № 12/2. – С. 198-200.

Корсаков, А. А. Вариации амплитуды ОНЧ радиосигналов передатчиков JXN и DHO при регистрации в Якутске в период солнечного затмения 10 июня 2021 г / А. А. Корсаков, Н. А. Сокрыт // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. – 2023. – № 1 (91). – С. 29-41.

Корсаков, А. А. Изменение эффективной высоты волновода Земля-ионосфера на радиотрассах Хабаровск-Якутск и Австралия-Якутск при регистрации внезапных фазовых аномалий в октябре-ноябре 2021 г / А. А.

Корсаков // Сб. трудов Второй региональной летней научной школы молодых ученых-космофизиков, посвященной 50-летию радиофизических наблюдений на полигоне «Ойбенкель», Якутск, 04–05 августа 2022 года. – Якутск: Государственное казенное учреждение Республики Саха (Якутия) «Национальная библиотека Республики Саха (Якутия)», 2023а. – С. 126-132.

Корсаков, А. А. Изменение эффективной высоты волновода при распространении ОНЧ радиосигнала на трассе Краснодар – Якутск во время солнечного затмения 04.01.2011 / А. А. Корсаков, Р. Р. Каримов, В. И. Козлов, В. А. Муллаяров // Труды Международной научной конференции «Излучение и рассеяние ЭМВ - ИРЭМВ-2015». – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2015а. – С. 485-489.

Корсаков, А. А. Оценка изменения эффективной высоты нижней ионосферы по вариациям фазы ОНЧ-радиосигналов, регистрируемых в Якутске в период солнечного затмения 20.03.2015 / А. А. Корсаков, В. И. Козлов, Р. Р. Каримов, В. В. Аргунов // Взаимодействие полей и излучения с веществом: труды Международной Байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике и Конференции молодых ученых, Иркутск, 14–18 сентября 2015 г. – Иркутск: Институт солнечно-земной физики СО РАН, 2015б. – С. 133-135.

Корсаков, А. А. Регистрация ионосферных возмущений с помощью приёма сигналов радиостанций РСДН-20 / А. А. Корсаков, В. И. Козлов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2023. № 3 (59). – С. 6-20.

Корсаков, А. А. Сезонная вариация амплитуды сигналов ОНЧ радиостанций Новосибирск и Хабаровск при регистрации в Якутске в течение 2009 – 2016 гг / А. А. Корсаков, Е. А. Павлов, В. И. Козлов // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. – 2018. – № 4 (66). – С. 50-60.

Корсаков, А. А. Суточные и сезонные вариации амплитуды и фазы радиосигналов передатчиков РСДН-20 и интенсивности радиозумов (11.9 кГц), зарегистрированных в Якутске в 2009-2017 гг / А. А. Корсаков, В. И. Козлов, Е. А.

Павлов // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. – 2021. – Т. 34. – № 1. – С. 122-136.

Корсаков, А. А. Эффекты солнечных затмений 4 января 2011 г и 20 марта 2015 г в вариациях фазы радиосигналов передатчика Краснодар (11,904 и 14,881 кГц) при регистрации в Якутске / А. А. Корсаков // Сб. трудов Третьей региональной летней научной школы молодых ученых-космофизиков, посвященной 50-летию Якутской комплексной установки ШАЛ, Якутск, 14 – 15 июня 2023 г. – Якутск: Государственное казенное учреждение Республики Саха (Якутия) «Национальная библиотека Республики Саха (Якутия)», 2023b. – С. 81-91.

Кошелев, В. В. Аэрономия мезосферы и нижней термосферы / В. В. Кошелев, Н. Н. Климов, Н. А. Сутырин. – М.: Наука, 1983. – 184 с.

Кривоуцкий, А. А. Атмосфера Земли / А. А. Кривоуцкий, В. Е. Куницын // Модель космоса: в 2 т. / Под ред. М.И. Панасюка, Л.С. Новикова. – Т. 1: Физические условия в космическом пространстве. – М.: Кн. дом «Университет», 2007а. – С. 668-726.

Кривоуцкий, А. А. Воздействие космических факторов на озоносферу Земли / А. А. Кривоуцкий, А. И. Репнев. – М.: ГЕОС, 2009. – 382 с.

Кривоуцкий, А. А. Изменения химического состава в полярных областях Земли после протонных вспышек на Солнце (трехмерное моделирование) / А. А. Кривоуцкий, Т. Ю. Вьюшкова, И. А. Миронова // Геомагнетизм и аэрономия. – 2017. – Т. 57. – № 2. – С. 173-194.

Кривоуцкий, А. А. Ионосфера Земли / А. А. Кривоуцкий, В. Е. Куницын // Модель космоса: в 2 т. / Под ред. М.И. Панасюка, Л.С. Новикова. – Т. 1: Физические условия в космическом пространстве. – М.: Кн. дом «Университет», 2007b. – С.744-780.

Кузнецов, С. Н. Релятивистские электроны в авроральной зоне / С. Н. Кузнецов, В. Г. Столновский // Космические исследования, 1978. Т. 16. Вып. 4. С. 539.

Лаборатория рентгеновской астрономии Солнца. ФИАН / Вспышки на Солнце [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.thesis.lebedev.ru/sun_flares.html (дата обращения 12.03.2014).

Лаборатория рентгеновской астрономии Солнца. ФИАН / Вспышки на Солнце 31.10.2014 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.thesis.lebedev.ru/sun_flares.html?m=10&d=31&y=2014 (дата обращения 12.11.2014).

Лаборатория солнечной астрономии ИКИ и ИСЗФ / Магнитные бури 20.03.2015 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://thesis.xras.ru/magnetic_storms.html?m=3&d=20&y=2015 (дата обращения 21.04.2022).

Лапшин, В. Б. Модель SIMP как новый государственный стандарт распределения концентрации электронов в ионосфере (ГОСТ25645.146) / В. Б. Лапшин, А. В. Михайлов, А. Д. Данилов, М. Г. Деминов, А. Т. Карпачев, В. Н. Шубин, В. В. Михайлов, К. Г. Цыбуля, В. Н. Денисова // Труды XXV Всероссийской открытой конференции «Распространение радиоволн». – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2016. – Т. 1. – С. 51-56.

Ляхов, А. Н. Оценка точности расчетов по международной справочной модели ионосферы IRI – 2016. I. Концентрации электронов / А. Н. Ляхов, С. И. Козлов, С. З. Беккер // Геомагнетизм и аэрономия. – 2019. – Т. 59. – № 1. – С. 50-58.

Макаров, Г. И. Распространение радиоволн в волноводном канале Земля-ионосфера и в ионосфере / Г. И. Макаров, В. В. Новиков, С. Т. Рыбачек. – М.: Наука, 1994. – 152 с.

Макаров, Г. И. Современное состояние исследований распространения СДВ в волноводном канале Земля-ионосфера / Г. И. Макаров, В. В. Новиков, А. Б. Орлов // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 1970. – Т. 13. – № 3. – С. 321-355.

Мареев, Е. А. Достижения и перспективы исследований глобальной электрической цепи / Е. А. Мареев // Успехи физических наук. – 2010. – Т. 180. – № 5. – С. 527-534.

Махоткин, Л. Г. Статистика атмосферных радиопомех / Л. Г. Махоткин // Геомагнетизм и аэрономия. – 1963. – Т. 3. – № 2. – С. 284-292.

Медведев, А. В. Всеатмосферный радар НР-МСТ / А. В. Медведев, А. П. Потехин, А. Г. Сетов, Д. С. Кушнарев, В. П. Лебедев // Солнечно-земная физика. – 2020. – Т. 6. – № 2. – С. 51-60.

Мигулин, В. В. Ионосфера и ее изучение / В. В. Мигулин // Радио. – 1987. – № 11 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://m.qrz.ru/solar/articles/ionosfera.shtml> (дата обращения 27.11.2023).

Мизун, Ю. Г. Нижняя ионосфера высоких широт / Ю. Г. Мизун. – Л.: Наука, 1983. – 248 с.

Митра, А. Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли / А. Митра. – М.: Мир, 1977. – 370 с.

Моисеенко, Л. Н. Изменение эффективной высоты ионосферы в период солнечного затмения / Л. Н. Моисеенко, Р. С. Шубова // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 1978. – Т. 21. – № 2. – С. 269-274.

Муллаяров, В. А. Метод оценки потоков рентгеновского излучения солнечных вспышек в диапазоне 1-8 А / В. А. Муллаяров, Н. Н. Мурзаева, В. И. Шапаев // Геомагнетизм и аэрономия. – 1995. – Т. 35. – № 1. – С. 143-145.

Муллаяров, В. А. Связь среднеширотного шумового ОНЧ-излучения с солнечной активностью / В. А. Муллаяров, Р. Р. Каримов, В. И. Козлов, Н. Н. Мурзаева // Геомагнетизм и аэрономия. – 1997. – Т. 37. – № 6. – С. 132-137.

Муллаяров, В. А. Среднеширотные наблюдения низкочастотных свистов / В. А. Муллаяров, С. И. Львов, В. И. Козлов // Геомагнетизм и аэрономия. – 2005. – Т. 45. – № 2. – С. 201-207.

Нестеров, В. И. Влияние солнечной активности на фазу принимаемого сигнала ОНЧ-диапазона / В. И. Нестеров // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2019. – Т. 22. – № 3. – С. 21-26.

Нестеров, В. И. Определение параметров сигналов СДВ диапазона во время солнечного затмения / В. И. Нестеров // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2011. – Т. 14. – № 4. – С. 106-112.

Нестерова, И. И. Каталог профилей электронной концентрации области D ионосферы / И. И. Нестерова, Э. И. Гинзбург. – Новосибирск: ИГиГ, 1985. – 210 с.

ООО «Р-Тех» / ПРОДУКЦИЯ / Аналого-цифровые преобразователи (АЦП) / USB3000 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.r-technology.ru/products/adc/usb3000.php> (дата обращения 07.12.2021).

Орлов, А. Б. Основные закономерности распространения сигналов СДВ-диапазона в волновом канале Земля-ионосфера (обзор экспериментальных работ) / А. Б. Орлов, Г. В. Азарнин // В сб.: Проблемы дифракции и распространения волн, 1970. – № 10. – С. 3-107.

Орлов, А. Б. Широтная зависимость эффективного коэффициента потерь электронов в дневной нижней ионосфере по данным о вариациях фазы СДВ-полей и риометрического поглощения при ВИБ / А. Б. Орлов, А. Е. Пронин, А. Н. Уваров // Геомагнетизм и аэрономия. – 1998. – Т. 38. – № 3. – С. 102-110.

Пилипенко, В. А. Воздействие космической погоды на наземные технологические системы / В. А. Пилипенко // Солнечно-земная физика. – 2021. – Т. 7. № 3. – С. 72-110.

Полетаев, А. С. Мониторинг ионосферных возмущений когерентными сигналами СДВ-радиостанций / А. С. Полетаев, А. Г. Ченский, Д. А. Токмачев // Труды Международной Байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике и Конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом», Иркутск, 09 – 14 сентября 2013 г. – Иркутск: Редакционно-издательский отдел Института солнечно-земной физики СО РАН. – 2013. – С. 198-202.

Полетаев, А. С. Приемный тракт сверхдлинноволнового интерферометра / А. С. Полетаев, А. Г. Ченский, Д. А. Токмачев // Датчики и системы. – 2018. – № 6 (226). – С. 51-60.

Рекомендация МСЭ-R P.368-10 (08/2022). Метод прогнозирования распространения земной волны для частот между 10 кГц и 30 МГц. Серия Р. Распространение радиоволн. – Женева: ITU, 2023 – 8 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.368-10-202208-I!!PDF-R.pdf (дата утверждения 24.08.2022, дата обращения 14.06.2023)

Рекомендация МСЭ-R P.372-11 (09/2013). Радишум. Серия Р. Распространение радиоволн. – Женева: ITU, 2014. 76 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.372-11-201309-S!!PDF-R.pdf (дата утверждения 30.09.2013, дата обращения 10.06.2015).

Рекомендация МСЭ-R P.684-8 (08/2022). Прогнозирование напряженности поля на частотах ниже приблизительно 150 кГц. Серия Р. Распространение радиоволн. – Женева: ITU, 2023. – 44 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.684-8-202208-I!!PDF-R.pdf (дата утверждения 24.08.2022, дата обращения 14.06.2023).

Ременец, Г. Ф. Исследование ионизации средней атмосферы высоких широт высокоэнергичными релятивистскими и ультрарелятивистскими электронами по СДВ экспериментальным данным / Г. Ф. Ременец // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 4: Физика и химия. – 2001. – Вып. 3. – № 20. – С. 23-38.

Ременец, Г. Ф. Отражательные свойства нижней полярной ионосферы, особенности возбуждения и распространения СДВ в высоких широтах (Обзор) / Г. Ф. Ременец, М. И. Белоглазов // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 1985. – Т. 28. – № 12. – С. 1491-1504.

Ряховский, И. А. Генерация и распространение КНЧ/ОНЧ излучения в литосферно-атмосферно-ионосферной системе: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 25.00.29 / Ряховский Илья Александрович. – М., 2014. – 120 с.

Свидетельство № 2021621889 о государственной регистрации базы данных. Amplitude and phase variations of the VLF signals of the long-range navigation radio system "Alpha" (RSDN-20) registered in Yakutsk / Корсаков А.А., Неустроев Н.И., Каримов Р.Р., Козлов В.И.; правообладатель Федеральное государственное

бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»; заявл. 14.07.2021 № 2021621451; дата гос. регистрации в Реестре баз данных 06.09.2021; опубл. 06.09.2021, Бюл. № 9.

Свидетельство № 2022666143 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа регистрации амплитуды и фазы ОНЧ сигналов радиотехнической системы дальней навигации (РСДН-20) / Козлов В.И., Каримов Р.Р., Корсаков А.А.; правообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»; заявл. 17.08.2022 № 2022665164; дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 25.08.2022; опубл. 25.08.2022, Бюл. № 9.

Свидетельство № 2023614391 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа регистрации электромагнитных сигналов ОНЧ и НЧ диапазонов на базе АЦП USB3000 / Каримов Р.Р., Корсаков А.А.; правообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»; заявл. 21.11.2022 № 2022681965; дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 01.03.2023; опубл. 01.03.2023, Бюл. № 3.

Соловьева, М. С. Влияние полного солнечного затмения 20 марта 2015 года на распространение ОНЧ/НЧ сигналов / М. С. Соловьева, А. А. Рожной, В. Федун, К. Швингеншу // Геомагнетизм и аэрономия. – 2016. – Т. 56. – № 3. – С. 345-352.

Стародубцев, С. А. Анализ солнечных, космо- и геофизических событий в сентябре 2017 г. по комплексным наблюдениям ИКФИА СО РАН / С. А. Стародубцев, Д. Г. Баишев, В. Г. Григорьев, Р. Р. Каримов, В.И. Козлов, А. А. Корсаков, Г. А. Макаров, А. В. Моисеев // Солнечно-земная физика. – 2019. – Т. 5. – № 1. – С. 17-38.

Тащилин, А. В. Формирование крупномасштабной структуры ионосферы в спокойных и возмущенных условиях: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 25.00.29 / Тащилин Анатолий Васильевич. – Иркутск, 2014. – 236 с.

Терещенко, В. Д. Средневолновый радиолокатор Полярного геофизического института для исследования нижней ионосферы / В. Д. Терещенко, Е. Б. Васильев, Н. А. Овчинников, А. А. Попов // Техника и методика геофизического эксперимента: Сборник научных трудов. – Апатиты: Кольский научный центр РАН, 2003. – С. 37-46.

Уиттен, Р. К. Физика нижней ионосферы / Р. К. Уиттен, И. Дж. Поппов. – М.: Мир, 1968. – 292 с.

Устройство USB3000. Инструкция по эксплуатации. Ревизия 4.2. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.r-technology.ru/docs/USB3000/USB3000%20User%20Manual%20Rev_4_2.pdf (дата обращения 07.10.2021).

Фирстов, П. П. Усиление эксплозивной активности вулкана Эбеко в апреле – июне 2020 г / П. П. Фирстов, Т. А. Котенко, Р. Р. Акбашев // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. – 2020. – № 2. – Вып. 46. – С. 10-15.

Холтон, Д. Р. Динамическая метеорология стратосферы и мезосферы: Пер. с англ. / Д. Р. Холтон. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 224 с.

Чемберлен, Дж. Теория планетных атмосфер / Дж. Чемберлен. – М.: Мир, 1981. – 352 с.

Черногор, Л. Ф. Вариации амплитуды и фазы ОНЧ радиоволн в ионосфере в период солнечного затмения 1 августа 2008 г / Л. Ф. Черногор // Геомагнетизм и аэрномия. – 2010. – Т. 50. – №1. – С. 100-110.

Черняков, С. М. Экспериментальное определение эффективных коэффициентов рекомбинации в D-области ионосферы высоких широт во время солнечных затмений по данным метода частичных отражений / С. М. Черняков // Вестник Мурманского государственного технического университета. – 2017. – Т. 20. – № 1-2. – С. 219-230.

Чибис-М. Фундаментальные космические исследования и космическое образование с использованием микроспутников. О проекте [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://chibis.cosmos.ru/index.php?id=1618#c3751> (дата обращения 10.05.2022).

Ясюкевич, Ю. В. Сибирская сеть приемников сигналов глобальных навигационных спутниковых систем SIBNET: текущее состояние / Ю. В. Ясюкевич, А. М. Веснин, Н. П. Перевалова // Солнечно-земная физика. – 2018. – Т. 4. – № 4. – С. 82-94.

Adachi, T. Monitoring of lightning activity in Southeast Asia: Scientific objectives and strategies / T. Adachi, Y. Takashashi, H. Ohya, F. Tsuchiya, K. Yamashita, M. Yamamoto, H. Hashiguchi // Kyoto Working Papers on Area Studies: G-COE Series. – 2008. – Vol. 11. – P. 1-20.

Afraimovich, E. L. A review of GPS/GLONASS studies of the ionospheric response to natural and anthropogenic processes and phenomena / E. L. Afraimovich, E. I. Astafyeva, V. V. Demyanov, I. K. Edemskiy, N. S. Gavrilyuk, A. B. Ishin, E. A. Kosogorov, L. A. Leonovich, O. S. Lesyuta, K. S. Palamartchouk, N. P. Perevalova, A. S. Polyakova, G. Y. Smolkov, S. V. Voeykov, Yu. V. Yasyukevich, I. V. Zhivetiev // Journal of Space Weather and Space Climate. – 2013. – Vol. 3. – P. A27.

Antarctic-Arctic Radiation-belt (Dynamic) Deposition – VLF Atmospheric Research Konsortium (AARDDVARK) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://space.physics.otago.ac.nz/aarddvark/#site-header> (дата обращения 02.12.2022).

Barr, R. ELF and VLF radio waves / R. Barr, D. L. Jones, C. J. Rodger // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2000. – Vol. 62. – Issue 18. – P. 1689-1718.

Bashkuev, Y. Analysis of the Conditions for the Radio Waves Propagation in the Waveguide “Earth-Ionosphere” on the Paths “Novosibirsk-Ulan-Ude” and “Komsomolsk-on-Amur-Ulan-Ude” during Magnetic Storms August 31 - September 12, 2017 / Y. Bashkuev, V. Advokatov, D. Buyanova, M. Pushkarev // E3S Web of Conferences, Paratunka, Kamchatka Region, October 17–21, 2018. – Vol. 62. – Paratunka, Kamchatka Region: EDP Sciences, 2018. – P. 01002.

Belcher, S. R. G. Solar flare X-ray impacts on long subionospheric VLF paths / S. R. G. Belcher, M. A. Clilverd, C. J. Rodger, S. Cook, N. R. Thomson, J. B. Brundell, T. Raita // *Space Weather*. – 2021. – Vol. 19. – P. e2021SW002820.

Belenkiy, M. I. Modeling of the electron density profile of the lower ionosphere (45-75 km) for sudden ionospheric disturbance conditions based on the data on sudden phase anomalies of VLF signals / M. I. Belenkiy, A. B. Orlov, G. A. Petrova, A. N. Uvarov // *International Journal of Geomagnetism and Aeronomy*. – 2006. – Vol. 6. – № 3. – P. GI3007.

Bilitza, D. International Reference Ionosphere 2016: from ionospheric climate to real-time weather predictions / D. Bilitza, D. Altadill, V. Truhlik, V. Shubin, I. Galkin, B. Reinisch, X. Huang // *Space Weather*. – 2017. – Vol. 15. – № 2. – P. 418-429.

Bilitza, D. The E- and D-region in IRI / D. Bilitza // *Advances in Space Research*. – 1998. – Vol. 21. – № 6. – P. 871-874.

Biskaborn, B. K. Permafrost is warming at a global scale / B. K. Biskaborn, S. L. Smith, J. Noetzli et al. // *Nature communications*. – 2019. – Vol. 10. – № 1. – P. 264.

Budden, K. G., *Radio Waves in the ionosphere* / K. G. Budden. – New York: Cambridge University Press, 1961a. – 542 p.

Budden, K. G. The “Waveguide Mode” Theory of the Propagation of Very-Low-Frequency Radio Waves / K. G. Budden // *Proc. of the IRE*. – 1957. – Vol. 45. – № 6, P. 772-774.

Budden, K. G. The influence of the earth’s magnetic field on radio propagation by wave-guide modes / K. G. Budden // *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*. – 1962. – Vol. 265. – № 1323. – P. 538-553.

Budden, K. G. *The Waveguide Mode Theory of Wave Propagation* / K. G. Budden. – London: Logos Press, 1961b. – 325 p.

Burgess B., Jones T. B. Solar flare effects and VLF radio wave observations of the lower ionosphere / B. Burgess, T. B. Jones // *Radio Science*. – 1967. – Vol. 2. – № 6. – P. 619-626.

Calvo, N. Nonlinearity of the combined warm ENSO and QBO effects on the Northern Hemisphere polar vortex in MAECHAM5 simulations / N. Calvo, M. A. Giorgetta, R. Garcia-Herrera, E. Manzini // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 2009. – Vol. 114. – № D13. – P. D13109.

Chakrabarti, S. K. Modeling D-region ionospheric response of the Great American TSE of August 21, 2017 from VLF signal perturbation / S. K. Chakrabarti, S. Sasmal, S. Chakraborty, T. Basak, R. L. Tucker // *Advances in Space Research*. – 2018. – Vol. 62. – № 3. – P. 651-661.

Clilverd, M. A. Modeling polar ionospheric effects during the October-November 2003 solar proton events / M. A. Clilverd, A. Seppälä, C. J. Rodger, N. R. Thomson, P. T. Verronen, E. Turunen, Th. Ulich, J. Lichtenberger, P. Steinbach // *Radio science*. – 2006. – Vol. 41. – № 2. – P. 1-15.

Clilverd, M. A. Remote sensing space weather events: Antarctic-Arctic radiation-belt (dynamic) deposition – VLF atmospheric research Konsortium network / M. A. Clilverd, C. J. Rodger, N. R. Thomson, J. B. Brundell, T. Ulich, J. Lichtenberger, N. Cobbett, A. B. Collier, F. W. Menk, A. Seppälä, P. T. Verronen, E. Turunen // *Space Weather*. – 2009. – Vol. 7. – № 4. – P. S04001.

Clilverd, M. A. Total solar eclipse effects on VLF signals: Observations and modeling / M. A. Clilverd, C. J. Rodger, N. R. Thomson, J. Lichtenberger, P. Steinbach, P. Cannon, M. J. Angling // *Radio Science*. – 2001. – Vol. 36. – № 4. – P. 773-788.

Cohen, M. B. Broadband longwave radio remote sensing instrumentation / M. B. Cohen, R. K. Said, E. W. Paschal, J. C. McCormick, N. C. Gross, L. Thompson, M. Higginson-Rollins, U. S. Inan // *Review of Scientific Instruments*. – 2018. – Vol. 89. – № 9. – P. 094501.

Crombie, D. D. Periodic fading of VLF signals received over long paths during sunrise and sunset / D. D. Crombie // *Journal of Research National Bureau of Standards, Radio Science*. – 1964. – Vol. 68. – № 1. – P. 27-35.

Cummer S.A. Lightning and ionospheric remote sensing using VLF/ELF radio atmospherics. Ph.D. thesis, Stanford University, 1997. – 137 p.

DEMETER data server [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://demeter.cnrs-orleans.fr> (дата обращения 06.12.2022).

Deshpande, S. D. Ionospheric effects of solar flares – I. The statistical relationship between X-ray flares and SID's / S. D. Deshpande, C. V. Subrahmanyam, A. P. Mitra // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. – 1972. – Vol. 34. – № 2. – P. 211-227.

Dowden R. L., Adams C. D., Brundell J. B., Dowden P. E. Rapid onset, rapid decay (RORD), phase and amplitude perturbations of VLF subionospheric transmissions / R. L. Dowden, C. D. Adams, J. B. Brundell, P. E. Dowden // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. – 1994. – Vol. 56. – № 11. – P. 1513-1527.

Dowden, R. L. Logarithmic decay and Doppler shift of plasma associated with sprites / R. L. Dowden, S. F. Hardman, C. J. Rodger, J. B. Brundell // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. – 1998. – Vol. 60. – № 7-9. – P. 741-753.

E14-440. Внешний модуль АЦП/ЦАП/ТТЛ на шину USB 1.1. Руководство пользователя [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.lcard.ru/download/e14_440_users_guide.pdf (дата обращения 10.05.2015).

Ferguson, J. A. Computer programs for assessment of long-wavelength radio communications, version 2.0: User's guide and source files / J. A. Ferguson // *Technical Document-3030*, Space and Naval Warfare Systems Center, San Diego, CA. – 1998.

Ferguson, J. A. The segmented waveguide program for long wavelength propagation calculations / J. A. Ferguson, F. P. Snyder // *Technical Document*. – 1987. – Vol. 1518.

Galyuk, Yu. P. Digital receiver of a VLF radionavigation system / Yu. P. Galyuk, M. I. Belenky, M. A. Bisyarin // *XVI European Frequency and Time Forum. Conference Proceedings*. – St. Petersburg, 2002.

George, H. E. Developing a Nowcasting Capability for X-Class Solar Flares Using VLF Radiowave Propagation Changes / H. E. George, C. J. Rodger, M. A. Clilverd, K. Cresswell-Moorcock, J. B. Brundell, N. R. Thomson // *Space Weather*. – 2019. – Vol. 17. – № 12. – P. 1783-1799.

GOES space environment monitor / National Centers for Environmental Information. NOAA [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ncei.noaa.gov/data/goes-space-environment-monitor/access/avg/> (дата обращения: 12.11.2023).

Gokani, S. A. What Fraction of the Outer Radiation Belt Relativistic Electron Flux at $L \approx 3 - 4.5$ Was Lost to the Atmosphere During the Dropout Event of the St. Patrick's Day Storm of 2015? / S. A. Gokani, M. Kosch, M. Clilverd, C. J. Rodger, A. K. Sinha // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2019. – V. 124. – Issue 11. – P. 9537-9551.

Heitmann, A. J. Observations and modeling of traveling ionospheric disturbance signatures from an Australian network of oblique angle-of-arrival sounders / A. J. Heitmann, M. A. Cervera, R. S. Gardiner-Garden, D. A. Holdsworth, A. D. MacKinnon, I. M. Reid, B. D. Ward // *Radio Science*. – 2018. – Vol. 53. – P. 1089-1107.

Holzworth, R. H. Lightning in the Arctic / R. H. Holzworth, J. B. Brundell, M. P. McCarthy, A. R. Jacobson, C. J. Rodger, T. S. Anderson // *Geophysical Research Letters*. – 2021. – Vol. 48. – № 7. – P. e2020GL091366.

Hutchins, M. L. Relative detection efficiency of the world wide lightning location network / M. L. Hutchins, R. H. Holzworth, J. B. Brundell, C. J. Rodger // *Radio Science*. – 2012. – Vol. 47. – № 6. – P. 1-9.

Inan, U. S. *Electromagnetic Waves* / U. S. Inan, A. S. Inan. – Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2000. – 07458 p.

Jacobsen, T. The Russian VLF Navaid System, Alpha, RSDN-20 [Электронный ресурс] / T. Jacobsen. – Режим доступа: – <http://www.vlf.it/alphatrand/alpha.htm> (дата обновления ресурса 20.07.2000, дата обращения 28.06.2019).

Johnson, M. P. *VLF Imaging of Lightning-Induced Ionospheric Disturbances*. Ph.D. thesis, Stanford University / M. P. Johnson. – 2000. – 115 p.

Kasaba, Y. Wire Probe Antenna (WPT) and Electric Field Detector (EFD) of Plasma Wave Experiment (PWE) aboard the Arase satellite: specifications and initial evaluation results / Y. Kasaba, K. Ishisaka, Y. Kasahara, T. Imachi, S. Yagitani, H. Kojima, S. Matsuda, M. Shoji, S. Kurita, T. Hori, A. Shinbori, M. Teramoto, Y.

Miyoshi, T. Nakagawa, N. Takahashi, Y. Nishimura, A. Matsuoka, A. Kumamoto, F. Tsuchiya, R. Nomura // *Earth, Planets and Space*. – 2017. – Vol. 69. – № 174. – P. 1-18.

Kero, A. Statistical signature of active D-region HF heating in IRIS riometer data from 1994–2004 / A. Kero, C.-F. Enell, Th. Ulich, E. Turunen, M. T. Rietveld, F. H. Honary // *Annales Geophysicae*. – 2007. – Vol. 25. – P. 407-415.

Khodairy, S. Impact of solar activity on Low Earth Orbiting satellites / S. Khodairy, M. Sharaf, M. Award, R. A. Hamed, M. Hussein // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2020. – Vol. 1523. – № 1. – P. 012010.

Korsakov, A. A. Adaptation of model parameters of VLF radio signals phase variations on the Novosibirsk-Yakutsk propagation path / A. A. Korsakov, V. I. Kozlov, V. A. Mullayarov, R. R. Karimov // *Proc. SPIE, 20th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. – 2014. – Vol. 9292. – P. 92924H.

Korsakov, A. A. Interannual variations of the intensity of narrowband VLF radio noise and radio station signals registered in Yakutsk in 2009-2017 / A. A. Korsakov, V. I. Kozlov, L. D. Tarabukina // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: International Conference and Early Career Scientists School on Environmental Observations, Modeling and Information Systems “ENVIROMIS 2018”*, Tomsk, Jul 05 – 11, 2018. – Vol. 211. – P. 012006.

Korsakov, A. A. Seasonal Variations of the Amplitude of the VLF Radio Signals and the Intensity of the Atmospheric Electric Field in Cryolithozone Conditions / A. A. Korsakov, V. I. Kozlov, A. A. Toropov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Science and Technology Conference "FarEastCon 2019"*, Vladivostok, October 01–04, 2019. – Vol. 753. – № 4. – P. 042093.

Korsakov, A. A. Solar eclipse effects on 10 June 2021 in amplitude variations of VLF signals registering in Yakutsk / A. A. Korsakov, V. I. Kozlov, R. R. Karimov // *Proc. SPIE, 29th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. – 2023. – Vol. 12780. – P. 1278071.

Korsakov, A. A. Solar flares effects in amplitude and phase variations of VLF radio station signals during September 2017 / A. A. Korsakov, V. I. Kozlov, R. R.

Karimov // Proc. SPIE, 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. – 2018. – Vol. 10833. – P. 108339Z.

Korsakov, A. A. Solar X-ray flares effects in amplitude and phase variations of VLF-signals of radio stations registered in Yakutsk during 2009-2016 / A. A. Korsakov, V. I. Kozlov, R. R. Karimov // Proc. SPIE, 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. – 2017. – Vol. 10466. – P. 104664O.

Korsakov, A. A. Sudden phase anomalies of VLF radio transmitters signals (11.9 kHz) of RSDN-20 system registered in Yakutsk during 2009-2017 / A. A. Korsakov, V. I. Kozlov, R. R. Karimov // Proc. SPIE, 27th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics. – 2021. – Vol. 11916. – P. 119167X.

Korsakov, A. A. Variations of low ionosphere parameters during partial solar eclipse on August 11, 2018 by the VLF signal phase variations and the partial reflections method / A. A. Korsakov, S. M. Cherniakov, V. I. Kozlov, R. R. Karimov // Proc. SPIE, 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. – 2019. – Vol. 11208. – P. 112088U.

Kozlov, V. I. Narrow-sector finding of VLF-noise radiation sources / V. I. Kozlov, V. A. Mullayarov, A. E. Vasilyev // Radiophysics and quantum electronics. – 2000. – Vol. 43. – № 11. – P. 858-861.

Kumar A., Kumar S. Solar fare effects on D-region ionosphere using VLF measurements during low- and high-solar activity phases of solar cycle 24 / A. Kumar, S. Kumar // Earth, Planets and Space. – 2018. – Vol. 70. – P. 1-14.

Lay, E. H. WWLL global lightning detection system: Regional validation study in Brazil / E. H. Lay, R. H. Holzworth, C. J. Rodger, J. N. Thomas, O. Pinto, R. L. Dowden // Geophysical Research Letters. – 2004. – Vol. 31. – № 3. – P. L03102.

LGraph2. Руководство пользователя. Составлено для LGraph2 v.2.35.00 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.lcard.ru/download/lgraph2_help.pdf (дата обращения 22.03.2015).

Lichtenberger, J. Automatic whistler detector and analyzer system: Automatic whistler detector / J. Lichtenberger, C. Ferencz, L. Bodnár, D. Hamar, P. Steinbach // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2008. – Vol. 113. – P. A12201.

Lyakhov, A. N. FDTD, FDFD, and mode sum methods for VLF-LF propagation in the lower ionosphere / A. N. Lyakhov, E. S. Goncharov, T. V. Losseva // *Proc. SPIE, 26th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. – 2020. – Vol. 11560. – P. 115608S.

Lynn, K. J. W. VLF waveguide propagation: The basics / K. J. W. Lynn // *Proceedings of the 1st International Conference on Science with Very Low Frequency Radio Waves: Theory and Observations*. – American Institute of Physics, 2010. – Vol. 1286. – № 1. – P. 3-41.

Macotela, E. L. D-region high-latitude forcing factors / E. L. Macotela, M., Clilverd, J. Manninen, T. Moffat-Griffin, D. A. Newnham, T. Raita, C. J. Rodger // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2019. – Vol. 124. – № 1. – P. 765-781.

Macotela, E. L. Spring-fall asymmetry in VLF amplitudes recorded in the North Atlantic region: The fall-effect / E. L. Macotela, M. Clilverd, T. Renkwitz, J. Chau, J. Manninen, D. Banyás // *Geophysical Research Letters*. – 2021. – Vol. 48. – № 16. – P. e2021GL094581.

Marshall, R. A. Finite-difference modeling of very-low-frequency propagation in the earth-ionosphere waveguide / R. A. Marshall, T. Wallace, M. Turbe // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 2017. – Vol. 65. – № 12. – P. 7185-7197.

McCollough, J. P. Space-to-space very low frequency radio transmission in the magnetosphere using the DSX and Arase satellites / J. P. McCollough, Y. Miyoshi, G. P. Ginet, W. R. Johnston, Y. J. Su, M. J. Starks, Y. Kasahara, H. Kojima, S. Matsuda, I. Shinohara, P. Song, B. W. Reinisch, I. A. Galkin, U. S. Inan, D. S. Lauben, I. Linscott, A. G. Ling, S. Allgeier, R. Lambour, J. Schoenberg, W. Gillespie, S. Stelmash, K. Roche, A. J. Sinclair, J. C. Sanchez, G. F. Pedinotti, J. T. Langhals // *Earth, Planets and Space*. – 2022. – Vol. 74. – № 1. – P. 64.

McKay, D. All-sky interferometric riometry / D. McKay, R. A. Fallows, M. Norden, A. Aikio, J. Vierinen, F. Honary, S. Marple, T. Ulichet // *Radio Science*. – 2015. – Vol. 50. – Issue 10. – P. 1050-1061.

Miyoshi, Y. Geospace Exploration Project ERG / Y. Miyoshi, I. Shinohara, T. Takashima, K. Asamura, N. Higashio, T. Mitani, S. Kasahara, S. Yokota, Y. Kazama, S. Yu. Wang, S. W. Y. Tam, P. T. P. Ho, Y. Kasahara, Y. Kasaba, S. Yagitani, A. Matsuoka, H. Kojima, Y. Katoh, K. Shiokawa, K. Seki // *Earth, Planets and Space*. – 2018. – Vol. 70. – № 101. – P. 1-13.

Ohshio, M. Ionospheric D region disturbances caused by solar X-ray flares / M. Ohshio // *Solar Terrestrial and Environmental Research Japan*. – 1979. – Vol. 3. – P. 78-82.

OMNIWeb / Interface to produce listings/plots with filtering [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx2.html> (дата обращения 01.06.2023).

Ozaki, M. Magnetic search coil (MSC) of plasma wave experiment (PWE) aboard the Arase (ERG) satellite / M. Ozaki, S. Yagitani, Y. Kasahara, H. Kojima, Y. Kasaba, A. Kumamoto, F. Tsuchiya, S. Matsuda, A. Matsuoka, T. Sasaki, T. Yumoto // *Earth, Planets and Space*. – 2018. – Vol. 70. – № 1. – P. 1-13.

Pacini, A. A. Solar X-ray flares and ionospheric sudden phase anomalies relationship: A solar cycle phase dependence / A. A. Pacini, J. P. Raulin // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2006. – Vol. 111. – № A09. – P. A09301.

Pacini, A. A. Solar X-ray flares and ionospheric sudden phase anomalies relationship: A solar cycle phase dependence / A. A. Pacini, J. P. Raulin // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2006. – Vol. 111. – P. A09301.

Pal, S. Mid-latitude atmosphere and ionosphere connection as revealed by very low frequency signals / S. Pal, Y. Hobara // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. – 2016. – Vol. 138. – P. 227-232.

Pant, P. Effect of solar eclipses on VLF propagation / P. Pant, H. S. Mahra // *Indian J. Radio Space Phys*. – 1994. – Vol. 23. – P. 399-402.

Peters, D. H. W. Long-term variability of 50 years of standard phase-height measurement at Kühlungsborn, Mecklenburg, Germany / D. H. W. Peters, G. Entzian // *Advances in Space Research*. – 2015. – Т. 55. – № 7. – P. 1764-1774.

PLANETCALC. Онлайн калькуляторы / Радиус Земли по широте (WGS 84) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://planetcalc.ru/7721/?thanks=1> (дата обращения 28.05.2022).

Poletaev, A. S. A method for central frequency phase variations measurements of GMSK modulated signals / A. S. Poletaev, A. G. Chensky, D. A. Tokmachev // XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE – 2018). – IEEE, 2018. – Vol. 1. – Part: 3. – P. 101-104.

Potapov, A. A. Features of multi-fractal structure of high-altitude lightning discharges in the ionosphere: elves, jets, sprites / A. A. Potapov, V. A. Cerman // *The Journal of Engineering*. – 2019. – Vol. 2019. – № 20. – P. 6781-6783.

Price, C. Possible implications of global climate change on global lightning distributions and frequencies / C. Price, D. Rind // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 1994. – Vol. 99. – № D5. – P. 10823-10831.

Raulin, J. P. Response of the low ionosphere to X-ray and Lyman- α solar flare emissions / J. P. Raulin, G. Trottet, M. Kretzschmar, E. L. Macotela, A. Pacini, F. C. P. Bertoni, I. E. Dammasch // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2013. – Vol. 118. – № 1. – P. 570-575.

Raulin, J. P. Solar – terrestrial, ionospheric and natural phenomena studies using the South America VLF network (SAVNET) / J. P. Raulin, F. C. P. Bertoni, P. Kaufmann, H. R. Gavilán, E. Correia, R. Hadano, N. J. Schuch // *Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics*. – 2011. – Vol. 73. – № 11-12. – P. 1581-1586.

Raulin, J. P. Solar flare detection sensitivity using the South America VLF Network (SAVNET) / J. P. Raulin, F. C. P. Bertoni, H. R. Gavilán, W. Guevara-Day, R. Rodriguez, G. Fernandez, E. Correia, P. Kaufmann, A. Pacini, T. R. C. Stekel, W. L. C. Lima, N. J. Schuch, P. R. Fagundes, R. Hadano // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2010. – Vol. 115. – № A7. – P. A07301.

Raulin, J. P. The South America VLF NETwork (SAVNET) / J. P. Raulin, P. Correia de Matos David, R. Hadano, A. C. V. Saraiva, E. Correia, P. Kaufmann // *Earth, Moon, and Planets*. – 2009. – Vol. 104. – P. 247-261.

Recommendation ITU-R SM.1753-2 (09/2012). Methods for measurements of radio noise. SM Series. Spectrum management. – Geneva: ITU, 2013. 39 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/sm/R-REC-SM.1753-2-201209-I!!PDF-E.pdf (дата утверждения 13.09.2012, дата обращения 10.06.2015)

Remenets, G. F. Ground VLF monitoring of the ultrarelativistic electron precipitations / G. F. Remenets, M. I. Beloglazov // *Problems of Geospace. Proceedings of the 2nd International Workshop held at St. Petersburg, Russia, June 29 - July 3, 1998*. – Austria, Vienna: Austrian Academy Sci. Press, 1999. – P. 275-280.

Rishbeth, H. Introduction to ionosphere physics / H. Rishbeth, O. K. Garriott. – New York: Academic Press, 1969.

Rodger, C. J. Location accuracy of VLF World-Wide Lightning Location (WWLL) network: post-algorithm upgrade / C. J. Rodger, J. B. Brundell, R. L. Dowden // *Annales Geophysicae*. – Göttingen, Germany: Copernicus Publications, 2005. – Vol. 23. – № 2. – P. 277-290.

Rodger, C. J. Subionospheric VLF perturbations associated with lightning discharges / C. J. Rodger // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. – 2003. – Vol. 65. – № 5. – P. 591-606.

Rozhnoi, A. Strong influence of solar X-ray flares on low-frequency electromagnetic signals in middle latitudes / A. Rozhnoi, M. Solovieva, V. Fedun, P. Gallagher, J. Mccauley, M. Y. Boudjada, H. U. Eichelberger, S. Shelyag // *Annales Geophysicae*. – 2019. – Vol. 37. – № 5. – P. 843-850.

Rozhnoi, A. The effect of the 21 August 2017 total solar eclipse on the phase of VLF/LF signals / A. Rozhnoi, M. Solovieva, S. Shalimov, D. Ouzounov, P. Gallagher, G. Verth, J. McCauley, S. Shelyag, V. Fedun // *Earth and Space Science*. – 2020. – Vol. 7. – № 2. – P. e2019EA000839.

Schlyter, P. Computing planetary positions – a tutorial with worked examples [Электронный ресурс] / P. Schlyter. – 2003. – Режим доступа: <http://stjarnhimlen.se/comp/tutorial.html> (дата обращения: 15.10.2017).

Shafer, D. C. Spread-Spectrum VLF Remote Sensing of the Ionosphere. Ph.D. thesis, Stanford University / D. C. Shafer. – 1994. – 115 p.

Sharma, G. A Study on the VLF/LF Long Term Amplitude Oscillations Associated with Frequencies 37.5 kHz and 45.9 kHz Received at Keil Longwave Monitor, Keil, Germany / G. Sharma, K. P. Kandel, B. Khadka, P. W. Schnoor, K. Bhatta, B. D. Ghimire, A. S. Thapa // International Journal of Geosciences. – 2017. – Vol. 8. – № 9. P. 1080-1090.

Shiokawa, K. Ground-based instruments of the PWING project to investigate dynamics of the inner magnetosphere at subauroral latitudes as a part of the ERG-ground coordinated observation network / K. Shiokawa, Y. Katoh, Y. Hamaguchi, Y. Yamamoto, T. Adachi, M. Ozaki, Sh.-I. Oyama, M. Nosé, T. Nagatsuma, Y. Tanaka, Yu. Otsuka, Y. Miyoshi, R. Kataoka, Yu. Takagi, Yu. Takeshita, A. Shinbori, S. Kurita, T. Hori, N. Nishitani, I. Shinohara, F. Tsuchiya, Yu. Obana, Sh. Suzuki, N. Takahashi, K. Seki, A. Kadokura, K. Hosokawa, Y. Ogawa, M. Connors, J. M. Ruohoniemi, M. Engebretson, E. Turunen, T. Ulich, J. Manninen, T. Raita, A. Kero, A. Oksanen, M. Back, K. Kauristie, J. Mattanen, D. Baishev, V. Kurkin, A. Oinats, A. Pashinin, R. Vasilyev, R. Rakhmatulin, W. Bristow, M. Karjala // Earth, Planets and Space. – 2017. – Vol. 69. – Issue 160. – P. 1-21.

Silber, I. Links between mesopause temperatures and ground-based VLF narrowband radio signals / I. Silber, C. Price, C. J. Rodger, C. Haldoupis // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2013. – Vol. 118. – № 10. – P. 4244-4255.

Silber, I. On the use of VLF narrowband measurements to study the lower ionosphere and the mesosphere–lower thermosphere / I. Silber, C. Price // Surveys in Geophysics. – 2017. – Vol. 38. – № 2. – P. 407-441.

Silber, I. Semi-annual oscillation (SAO) of the nighttime ionospheric D region as detected through ground-based VLF receivers / I. Silber, C. Price, C. J. Rodger // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2016. – Vol. 16. – № 5. – P. 3279-3288.

Smirnova, N. V. Effects of Solar activity in the D region of the ionosphere / N. V. Smirnova, A. D. Danilov // *Geomagnetism and aeronomy*. – 1998. – Vol. 38. – № 3. – P. 334-340.

Smith, A. J. VELOX: A new VLF/ELF receiver in Antarctica for the Global Geospace Science mission / A. J. Smith // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. – 1995. – Vol. 57. – № 5. – P. 507-524.

Solar Cycle Progression / Space Weather Prediction Center (SWPC). NOAA [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression> (дата обращения 22.03.2020).

Tarabukina, L. Seasonal variability of lightning activity in Yakutia in 2009–2019 / L. Tarabukina, V. Kozlov // *Atmosphere*. – 2020. – Vol. 11. – № 9. – P. 918.

Themens, D. R. The nature of GPS differential receiver bias variability: An examination in the polar cap region / D. R. Themens, P. T. Jayachandran, R. B. Langley // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2015. – Vol. 120. – № 9. – P. 8155-8175.

Thomson, N. R. Low-latitude ionospheric D region dependence on solar zenith angle / N. R. Thomson, M. A. Clilverd, C. J. Rodger // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2014. – Vol. 119. – № 8. – P. 6865-6875.

Thomson, N. R. Solar cycle changes in daytime VLF subionospheric attenuation / N. R. Thomson, M. A. Clilverd // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. – 2000. – Vol. 62. – № 7. – P. 601-608.

Thunderbolt E GPS Disciplined Clock [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://oem.prin.ru/datasheets/gps/022542-010B_Thunderbolt-E_DS_0807.pdf (дата обращения 17.07.2020).

ThunderBolt GPS Disciplined Clock. User Guide. Version 5.0. Part Number: 35326-30. November 2003. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.leapsecond.com/pages/tbolt/ThunderBoltBook2003.pdf> (дата обращения 17.07.2020).

Tokmachev, D. A. A Synchronization System of Very Low Frequency Interferometers / D. A. Tokmachev, A. S. Poletaev, A. G. Bezrukin, A. G. Chenskii, V.

E. Zasenko, N. A. Gubin // *Instruments and Experimental Techniques*. – 2014. – Vol. 57. – № 5. – P. 587–593.

Toth, G. *Space Weather Modeling Framework: A new tool for the space science community* / G. Toth, I. V. Sokolov, T. I. Gombosi, D. R. Chesney, C. R. Clauer, D. L. De Zeeuw, K. C. Hansen, K. J. Kane, W. B. Manchester, R. C. Oehmke, K. G. Powell, A. J. Ridley, I. I. Roussev, Q. F. Stout, O. Volberg // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2005. – Vol. 110. – P. A12226.

UltraMSK. A VLF MSK radio receiver / VLF radio receiver hardware [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ultramsk.com/hardware> (дата обращения 04.12.2022).

Verronen, P. T. *WACCM-D – Whole atmosphere community climate model with D-region ion chemistry* / P. T. Verronen, M. E. Andersson, D. R. Marsh, T. Kovacs, J. M. C. Plane // *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. – 2016. – Vol. 8. – P. 954-975.

Wait, J. R. *Characteristics of the Earth–Ionosphere waveguide for VLF radio waves* / J. R. Wait, K. P. Spies // *NBS Tech*, 1964. – Note 300.

Wang, X. *Variation of low-frequency time-code signal field strength during the annular solar eclipse on 21 June 2020: Observation and analysis* / X. Wang, B. Li, F. Zhao, X. Luo, L. Huang, P. Feng, X. Li // *Sensors*. – 2021. – Vol. 21. – № 4. – P. 1216.

Wendt, V. *Why does the October effect not occur at night?* / V. Wendt, H. Schneider, D. Banyś, M. Hansen, M. A. Clilverd, T. Raita // *Geophysical Research Letters*. – 2024. – Vol. 51. – № 7. – P. e2023GL107445.

World Data Center for Geomagnetism, Kyoto [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/ae_provisional/201503/index_20150320.html (дата обращения 29.08.2015).

Yang, X. *Increases in thunderstorm activity and relationships with air pollution in southeast China* / X. Yang, Z. Li // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 2014. – Vol. 119. – № 4. – P. 1835-1844.