

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»

На правах рукописи
УДК 537.877, 551.594.6



Корсаков Алексей Анатольевич

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

Специальность 1.6.18 – Науки об атмосфере и климате

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Якутск – 2025

Работа выполнена в Институте космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера Сибирского отделения Российской академии наук – обособленном подразделении Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ИКФИА СО РАН)

Научный руководитель: **Козлов Владимир Ильич,**
кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, ИКФИА СО РАН ведущий научный сотрудник лаборатории радиоизлучений ионосферы и магнитосферы

Официальные оппоненты: **Нагорский Петр Михайлович,**
доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук (ИМКЭС СО РАН), главный научный сотрудник лаборатории физики климатических систем

Васильев Роман Валерьевич,
кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, заместитель директора по научно-исследовательской работе

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения Российской академии наук, с. Паратунка, Камчатский край

Защита диссертации состоится « ____ » _____ 202_ года в _____ часов на заседании диссертационного совета 24.1.197.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Ордена Трудового Красного Знамени Институте солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова 126а, а/я 291, ИСЗФ СО РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ИСЗФ СО РАН, <http://iszf.irk.ru>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 202_ г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук



Ясюкевич Ю.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Верхняя атмосфера, ионосфера и магнитосфера Земли формируют пространство, физическое состояние которого определяется солнечной и геомагнитной активностью. Для поддержания стабильной работы радиотехнических систем необходимо отслеживать и прогнозировать параметры ионосферы. Результаты многих моделей ионосферы не проходили проверку на соответствие с экспериментальными данными в широком диапазоне радиочастот. Одним из направлений по совершенствованию моделирования ионосферы является проведение экспериментов в различных условиях. Недостатком прямых методов исследования ионосферы является локальный характер и малая продолжительность. В косвенных методах исследования параметры ионосферы оцениваются при анализе параметров зондирующих сигналов. Ослабление радиоволн диапазона очень низких частот (ОНЧ: 3 – 30 кГц), распространяющихся в волноводе Земля – ионосфера составляет всего около 3 дБ/Мм. Нижней границей волновода для волн ОНЧ и низких частот (НЧ: 30 – 300 кГц) является водная или земная поверхность, верхняя граница – области ионосферы D (днем) и E (ночью). Чувствительность ОНЧ-НЧ-радиоволн к геофизическим проявлениям зависит от географического расположения излучателя и приемника, направления распространения, частоты, протяженности трассы. Регистрация естественных ОНЧ-сигналов позволяет проводить мониторинг грозовой активности, оценивать параметры магнитосферной плазмы. Часто возникает неоднозначность интерпретации регистрируемых вариаций: связаны они с изменением параметров источника, либо с изменением параметров волновода. Неоднозначность можно исключить, принимая эталонные ОНЧ-сигналы со схожих радиотрасс. Источником эталонных сигналов могут использоваться ОНЧ-радиопередатчики. Решая обратную задачу распространения ОНЧ, можно переходить к определению параметров нижней ионосферы. 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 параметров ОНЧ-НЧ-сигналов удобным инструментом для зондирования нижней ионосферы над труднодоступными территориями. 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.

Целью диссертационной работы является проведение сравнительного анализа вариаций мощности радиопомех, 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 радиошума, 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 радиошума 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 радиошума на рабочих частотах РСДН-20, получены летние межгодовые вариации интенсивности источников грозовых ОНЧ-радиосуммов 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-го цикла солнечной активности. Экспериментальные данные могут быть полезны для комплексного анализа, корректировки эмпирических моделей нижней 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 радиошума, амплитуды и фазы сигналов радиопередатчиков ОНЧ-диапазона.

Положения, выносимые на защиту:

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. 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 статистическая повторяемость 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.

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) (Иркутск, 2011, 2013, 2015, 2017 гг.); Международная школа молодых ученых «Физика окружающей среды» им. А.Г. Колесника (Томск, 2012, 2014 гг.); 40th

COSPAR Scientific Assembly (Москва, 2014 г.); Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (Новосибирск, 2014 г., Иркутск, 2017 г., Томск, 2018 г., Москва, 2020, 2021 гг., Томск, 2022 г.); Международный симпозиум «Атмосферная радиация и динамика» (МСАРД – 2015) (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 (Якутск, 2016 г.); 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 (Томск, 2018 г.); Международная конференция «Целостность и ресурс в экстремальных условиях» ЦРЭУ – 2019 (ILEE 2019), посвященная 70-летию Якутского научного центра (Якутск, 2019 г.); Всероссийская конференция «Космические лучи и гелиосфера», посвященная 50-летию ИКФИА СО РАН (Якутск 2012 г.); V Всероссийская научно-практическая конференция «Информационные технологии в науке, образовании и экономике» (с международным участием) (Якутск, 2014 г.); Всероссийская конференция (с международным участием) «Оптические исследования высокоширотной верхней атмосферы» (Якутск, 2019 г.); Всероссийский симпозиум по космическим лучам, посвященный 100-летию А.И. Кузьмина и 75-летию станции космических лучей №1 (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» (Якутск, 2022 г.); III Летняя научная школа молодых ученых-космофизиков, посвященная 50-летию Якутской комплексной установки ШАЛ (Якутск, 2023 г.).

Соответствие паспорту специальности. Задачи диссертационной работы и полученные результаты соответствуют областям исследований специальности 1.6.18 «Науки об атмосфере и климате» в части пунктов 4 и 7.

Публикации по теме диссертации. 9 работ, входящие в международные базы цитирования (Web of Science, Scopus) и перечень ВАК; 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 и объем 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.

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-

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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. В разделе 1.1 рассмотрены основные свойства нейтральной атмосферы и ионосферы Земли. В разделе 1.2 представлены источники радиоизлучения диапазонов ОНЧ и НЧ. Раздел 1.3 посвящен описанию работы отечественной радиотехнической системы дальней навигации РСДН-20 («Альфа»). Передатчики находятся вблизи Комсомольска-на-Амуре (далее Хабаровск), Новосибирска, Мурманска и Краснодара. Каждый передатчик последовательно излучает радиоимпульсы на частотах: 11,904, 12,649 и 14,881 кГц. В разделе 1.4 рассмотрены основы теории распространения электромагнитного ОНЧ-излучения в волноводе Земля – ионосфера. В разделе 1.5 представлены источники возмущения нижней ионосферы, регистрируемые в вариациях параметров ОНЧ-НЧ-сигналов. В разделе 1.6 рассмотрены модели нижней ионосферы. Результаты эмпирических моделей остаются достаточно простым инструментом. Ограниченный объем экспериментальных данных не позволяет смоделировать ионосферу с необходимой точностью в высоких широтах и в условиях возмущений. В разделе 1.7 рассмотрены системы регистрации ОНЧ-сигналов. Эффективность мониторинга повышается с увеличением площадей, охваченных сгущением сети радиотрасс. Остается проблема ОНЧ-мониторинга с высоким разрешением по времени больших труднодоступных территорий Северной Азии. Регистрация ОНЧ-сигналов на отдельных спутниках не позволяет проводить мониторинг с большим пространственным разрешением. В разделе 1.8 сформулированы выводы к первой главе.

Вторая глава посвящена описанию работы регистратора амплитуды и фазы сигналов радиопередатчиков и мощности радишума ОНЧ-диапазона. В г. Якутске

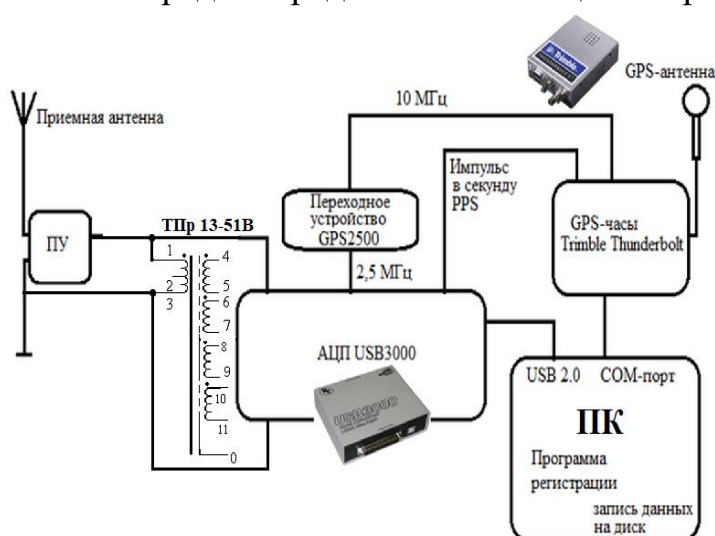


Рис. 1 – Блок-схема регистратора амплитуды и фазы сигналов радиопередатчиков и мощности радишума ОНЧ-диапазона

(62,02° с.ш., 129,7° в.д.) с 2009 г. в непрерывном режиме организована регистрация сигналов РСДН-20 («Альфа»). Радиосигнал принимается на вертикальную штыревую антенну, после предварительного усиления по коаксиальной кабельной линии поступает в здание на первичную обмотку трансформатора ТПР 13-51В. 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 (рис. 1). Коэффициент передачи приемного тракта (ПУ с нагрузкой на первичную обмотку ТПр 13-51В) в полосе 4 – 50 кГц составляет 27 дБ. Привязка к абсолютному времени UTC и высокостабильная частота дискретизации АЦП организованы при помощи приемника GPS (GPS Disciplined Clock Trimble Thunderbolt E). Точность секундного импульса PPS: UTC±15 нс (одна сигма), точность генератора 10 МГц: $1,16 \cdot 10^{-12}$ после суток работы (три сигма). Ошибки моделирования атмосферы могут достигать до 50 нс (одна сигма). Частота дискретизации 2,5 МГц для АЦП получается делением гармонического сигнала GPS часов (10 МГц) переходным устройством – делителем. Выделение амплитуды и фазы сигналов РСДН-20 на частотах $F1=16/1344$ МГц, $F2=17/1344$ МГц (в программе используется $F2^* = 1/79$ МГц) и $F3=20/1344$ МГц с помощью ДПФ, визуализация, запись времени, амплитуды (относительные единицы) и фазы в часовые бинарные файлы на локальный диск ЭВМ производится с помощью разработанной программы. Между излучением радиопульсов РСДН-20 программа регистрирует интенсивность радиошума на частотах $F1$, $F2^*$ и $F3$.

В разделе 2.1 описан алгоритм работы программы регистрации. Период дискретизации АЦП $Dt_{Adt} = 0,4$ мкс. Длительность прямоугольного окна ДПФ $T = 2688$ мкс. В окне ДПФ содержится 16, 17 и 20 двойных периодов. Предполагается, что мощность радиошума в узкой полосе частот можно охарактеризовать значением амплитуды спектральной составляющей (прямоугольному окну 2688 мкс соответствует эффективная полоса $f_{эфф} = 334,8$ Гц). Преобразования по косинусам:

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

где F_k – одна из трех известных частот разложения ($F1$, $F2^*$ и $F3$); $x_{i,j}$ – отсчет оцифрованного принимаемого сигнала; t_j – временной отсчет в прямоугольном окне ДПФ; i – индекс меняется от 0 до $NumPeriodhWin$ (число двойных периодов в прямоугольном окне ДПФ: 16, 17 и 20 соответственно для частот $F1$, $F2^*$ и $F3$); j – индекс меняется от 0 до $POINT_TWO_PERIOD_X$ (число отсчетов АЦП в двойном периоде: 420, 395 и 336 соответственно для $F1$, $F2^*$ и $F3$). Разложение по синусам:

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

Амплитуда сигнала A на частоте F_k определяется:

$$A = \sqrt{a^2 + b^2}. \quad (3)$$

Фазовая задержка φ регистрируемого сигнала на частоте F_k :

$$\varphi = \arctg\left(\frac{b}{a}\right). \quad (4)$$

Заранее строится таблица синусов и косинусов для каждой частоты. При первом запуске программы определяется время ближайшее кратное 126 секундам от 00:00:00 UTC. Старт регистрации осуществляется по приходу этого PPS (обеспечивает отсутствие сдвига принимаемых радиосигналов в пакете излучения опорных станций и начальных фаз радиосигналов). Очередная регистрация запускается после каждого восемнадцатого PPS. В конце обработки всех 80

половин FIFO буфера АЦП во всей реализации получаются 2 массива амплитуд и фаз с $80 \cdot 80 = 6400$ значениями для каждой частоты $F1$, $F2^*$ и $F3$. На диск сохраняются значения минуты, секунды – по 1 байту, 3 массива амплитуд и фаз (на каждую частоту) по 6400 элемента. Каждый час регистрации создается новый файл.

В разделе 2.2 проведен анализ амплитудных распределений сигналов радиостанций и радишума регистрируемых в Якутске летом и зимой. Интервалы по 6 минут взяты в начале 3 UT, 9 UT и 17 UT. Отмечены большие значения эксцесса и асимметрия в сторону больших значений, распределения амплитуд отличаются от нормального. Процентиль 3,5% регистрируемых амплитуд радишума (14,881 кГц) для выборки 17 декабря 2013 г. в 3 UT (минимум суточно-сезонных вариаций): $864 \cdot 10^{-6}$ отн. ед. Оценка мощности собственных радишумов приемника проведена при закороченном входе ПУ на шину заземления. Процентиль 96,5% случайного измерения амплитуды собственного радишума регистратора: $817 \cdot 10^{-6}$ отн. ед. Уровень собственных радишумов регистратора позволяет проводить измерения интенсивности радишумов в узкой полосе на частотах РСДН-20 (уровень значимости $p = 0,07$). Амплитуды и фазы радиосигналов и радишума охарактеризованы медианными значениями (Me), а флуктуации – с помощью квартилей 25% и 75%: Me – Qw25 и Qw75 – Me. Получены устойчивые суточные вариации амплитуды и фазы сигналов РСДН-20 и радишума. 30 октября 2014 г. днем трасса Хабаровск – Якутск (23 – 6:30 UT) амплитуда сигнала (14,881 кГц): $1,89 \cdot 10^{-1}$ отн. ед., фаза 68° (рис. 2). Ночью (10 – 21 UT) регистрируется амплитуда: $5,33 \cdot 10^{-1}$ отн. ед. (13:34 UT), $4,12 \cdot 10^{-1}$ отн. ед. (17:40 UT) и значения фазы: 114° (11 UT), 100° (17 UT). Эффект солнечной вспышки M3.5 проявился в виде внезапной амплитудной аномалии (ВАА):

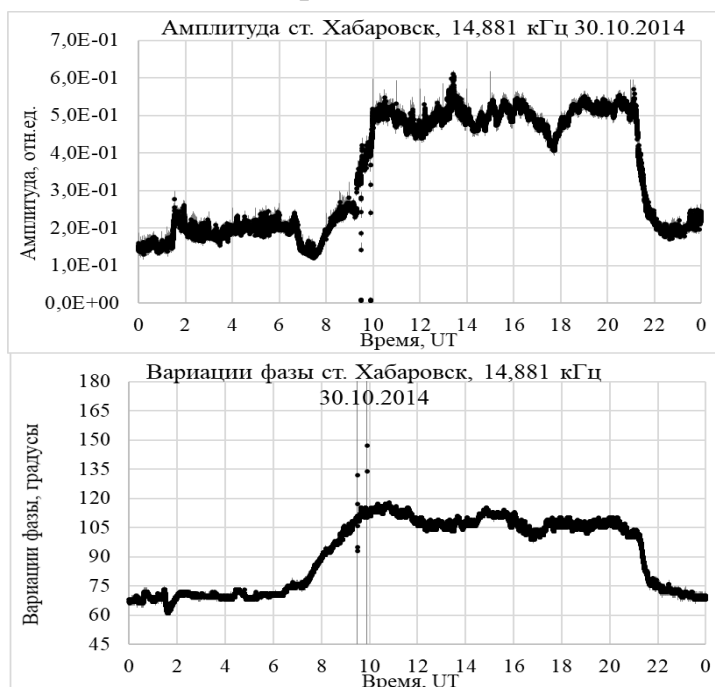


Рис. 2 – Вариации амплитуды и фазы радиосигнала Хабаровск, 14,881 кГц. Черные точки – медиана (Me), серая линия – флуктуации: Me – Qw25, Qw75 – Me

повышения амплитуды сигнала на 3,3 дБ и внезапной фазовой аномалии (ВФА): уменьшении фазовой задержки на 10° (1:35 UT). Эффект вспышки M1.2 – повышение фазовой задержки на 4° (4:28 UT).

Повышение фазовой задержки и отсутствие эффекта рентгеновской вспышки 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. Суточная вариация амплитуды радиосигнала без учета ВАА и ВФА составила 7,6 дБ, а

суточная вариация фазы: 55° . Для сигнала от ближайшего передатчика Хабаровск ($14,881$ кГц), регистрируемого в Якутске, минимальное СКО фазы составило $0,5^\circ$, что может быть принято для оценки нестабильности фазовых измерений регистратора. Уменьшения фазы ОНЧ-сигнала φ , определяемые в программе регистрации по выражению (4), соответствуют понижению эффективной высоты волновода Земля – ионосфера. Сигналы РСДН-20 регистрировались в г. Улан-Удэ ($51,85^\circ$ с.ш., $107,65^\circ$ в.д.) 2012 – 2016 гг., а с 2015 г. регистрируются на территории Полярной геокосмофизической обсерватории ИКФИА СО РАН (п. Тикси, $71,58^\circ$ с.ш., $128,78^\circ$ в.д.). Охвачено широкое пространство Северной Евразии для исследования особенностей распространения ОНЧ-радиоволн в условиях средних и высоких широт. В разделе 2.3 представлены результаты амплитудной калибровки. В разделе 2.4 сформулированы основные выводы ко второй главе.

Третья глава посвящена анализу суточных, сезонных и межгодовых вариаций амплитуды и фазы радиосигналов РСДН-20 и мощности радишума. Применяется медианное усреднение на двух этапах. На первом этапе разрешение составляет 3,6 секунды. Второй этап: медиана на интервале 3 минуты (по 50 значений первого этапа). Флуктуации оцениваются квантилями 25% и 75%. Измеренные стационарным регистратором амплитудные значения представлены в виде среднеквадратичных значений напряженности электрического поля ОНЧ-радиосигналов. В разделе 3.1 представлены суточные и сезонные вариации амплитуды и фазы радиосигналов ($11,904$ кГц), характеризующиеся медианными значениями, регистрируемыми в марте, июне, сентябре и декабре в Якутске в 2015 г. (рис. 3). Суточные вариации среднеквадратичного значения амплитуды сигнала 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 сигнала Новосибирск: 10,4 дБ в декабре, 5,3 дБ в марте, 3 дБ в июне и 4,3 дБ в сентябре. Вариации фазы сигнала за сутки: 85° (декабрь), 72° (март), 70° (июнь), 107° (сентябрь). Суточные вариации среднеквадратичного значения амплитуды сигнала Краснодар: 10,3 дБ (декабрь), 10,4 дБ (март), 4,8 дБ (июнь) и 8 дБ (сентябрь). Вариации фазы: 156° (декабрь), 236° (март), 129° (июнь), 240° (сентябрь). Наиболее ярко выражены сезонные дневные вариации амплитуды радиосигналов РСДН-20. 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 (зимняя аномалия нижней ионосферы). Регистрируется асимметрия дневных сезонных вариаций амплитуды ОНЧ-радиосигналов.

В разделе 3.2 проанализированы суточные и сезонные вариации среднеквадратичных значений амплитуды ОНЧ-радишума при регистрации в Якутске (рис. 4). В суточных вариациях выделяются периоды: 3 – 6 UT (минимум грозовой активности, максимум дневного затухания в волноводе); 4 – 12 UT (макс.

местной грозовой активности летом); 15 – 19 UT – максимум зимой, весной и осенью, и второй летний максимум (ночное минимальное затухание в волноводе).

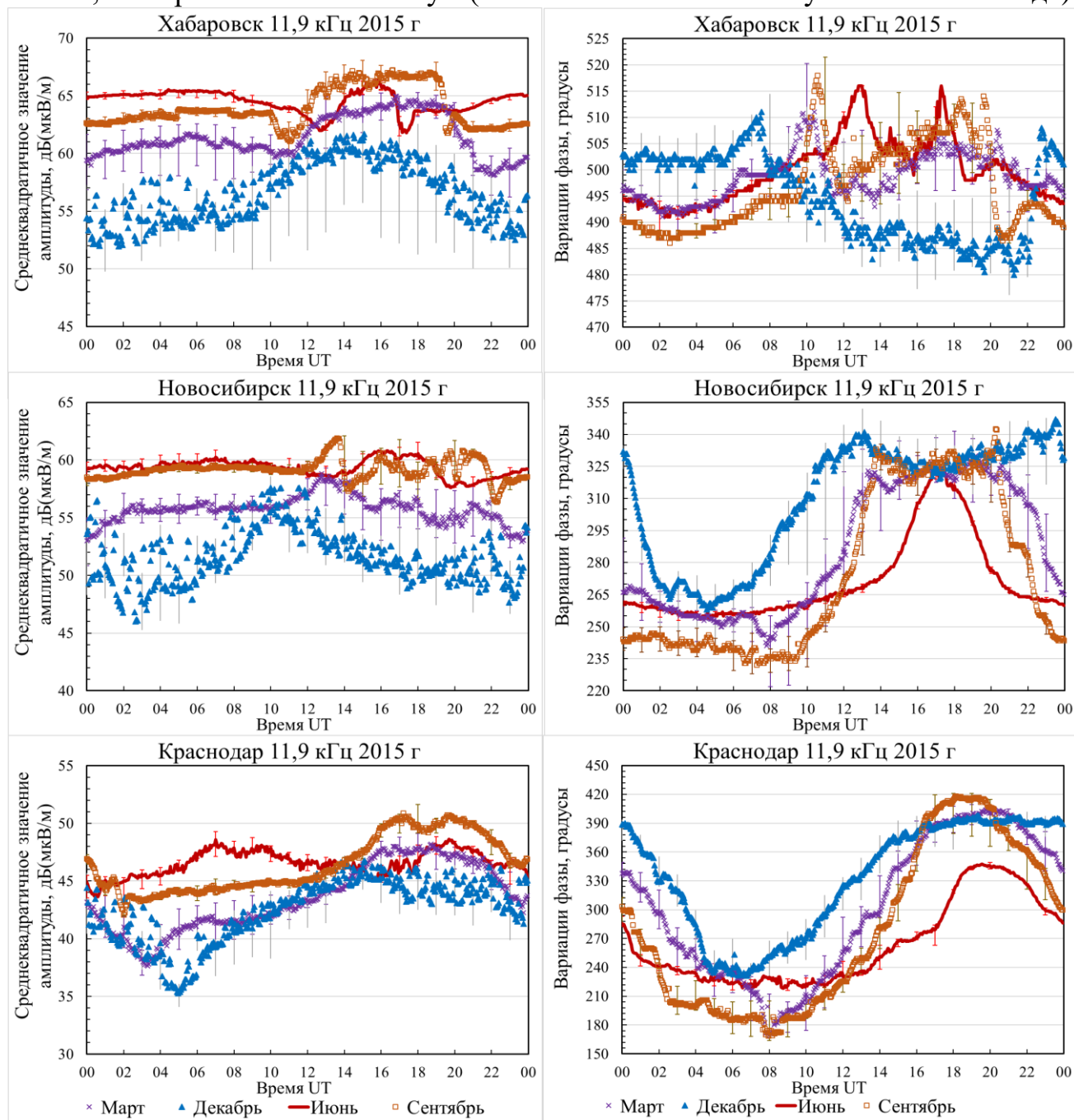


Рис. 3 – Суточные и сезонные вариации амплитуды и фазы радиосигналов РСДН-20 (11,904 кГц), зарегистрированные в Якутске в 2015 г.

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

Суточная вариация мощности ОНЧ-радишума: 10 дБ (март), 13 дБ (июнь), 11,5 дБ (сентябрь) и 12 дБ (декабрь). Максимальные значения среднеквадр. знач. амплитуды радишума приходятся на июль (максимум гроз в Якутии).

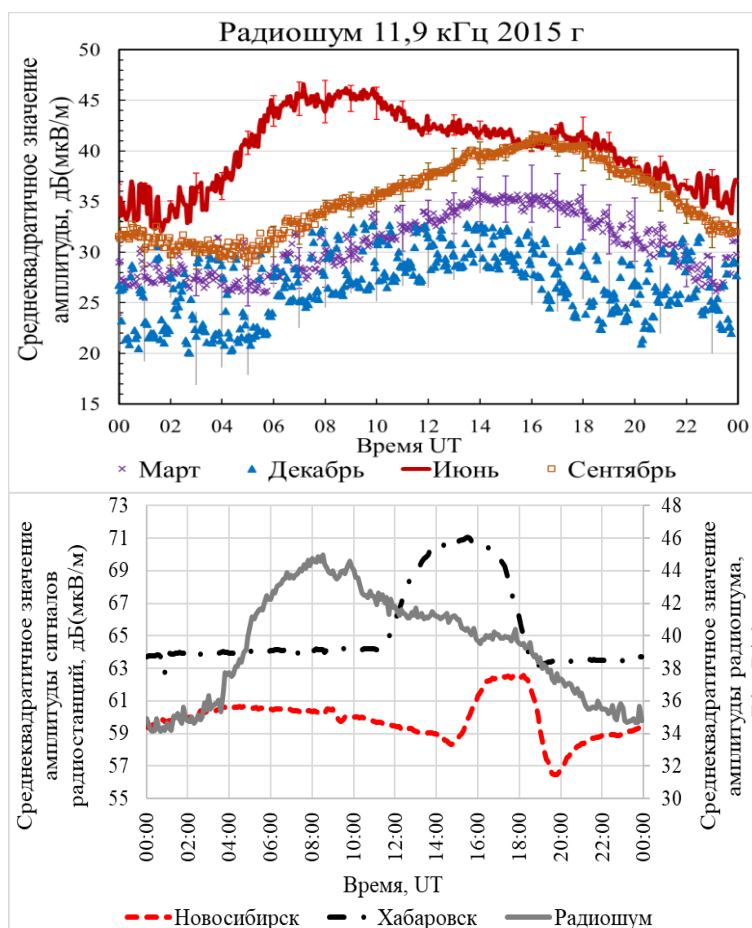


Рис. 5 – Вариации среднеквадратичных значений амплитуд сигналов новосибирской (красный пунктир), хабаровской (черный пунктир с точкой) радиостанций и спектральной составляющей радиошума (серая линия), 14,881 кГц (июль, 2009-2011 гг)

южного Китая.

Регистрируемые в Якутске ОНЧ-радиошумы распространяются по сходным трассам, что и сигналы от передатчиков Новосибирск и Хабаровск. Вариация мощности радиошума в июле (14,881 кГц) с 3 до 12 UT (относительно значения в 2 UT) составляет 10,1 дБ и соответствует изменению интенсивности источника (рис. 5). Вариации амплитуды радиошума: 6,44 дБ (12 - 16 UT) и 5,11 дБ (16 - 20 UT), близки к суточным вариациям амплитуды сигналов радиостанций: 7,23 дБ (Хабаровск, 12 – 18 UT) и 2,54 дБ (Новосибирск, 15 – 20 UT), что указывает на изменение в ночных условиях распространения ОНЧ-радиошума.

В разделе 3.3 представлены межгодовые вариации амплитуды и фазы сигналов РСДН-20, и мощности радиошума при регистрации в Якутске при возрастании, максимуме и спаде 24-го цикла солнечной активности (СА). В сезонных вариациях амплитуды выделяется годовая составляющая. Зимой с увеличением СА в 24-м цикле (с 2009 до 2014 гг.), амплитуда радиосигнала Хабаровск увеличивается на 9 ± 1 дБ днем и на $4 \pm 1,5$ дБ ночью, а в период спада СА (2015 – 2017 гг.) – понижение амплитуды сигнала. С увеличением СА зимой, амплитуда сигнала Новосибирск увеличивается на $11 \pm 1,5$ дБ днем и $6 \pm 1,3$ дБ

Рис. 4 – 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 летних грозовых очага: первый очаг – территория Западносибирской равнины; второй очаг – по меридиану от южных хребтов Большого и Малого Хингана до севера Станового хребта, по параллели – от Большого Хингана до южных гор Малого Хингана и Буреинского хребта. Основным источником зимой – грозы северной Индии и

ночью, на фоне спада СА – 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 СА. Зимой с повышением СА амплитуда сигнала 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 – понижение амплитуды. С повышением СА мощность радиошума зимой 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 СА, в период спада СА регистрируется спад амплитуды радиосигналов и мощности ОНЧ-радиошума летом и зимой. В 24-м цикле СА отмечены большие изменения амплитуды ОНЧ-сигнала, зарегистрированные зимой, по сравнению с летом. Основные максимумы F10.7 в 24-м цикле СА приходятся на поздний осенний и зимний периоды.

На фоне сезонных изменений в 24-м цикле СА, межгодовые вариации фазы ОНЧ-радиосигналов не выделяются. На радиотрассе меньшей протяженности Хабаровск – Якутск (1400 км) на фоне повышения СА (2009 – 2014 гг.) ночью зимой регистрируется повышение фазовой задержки на $18 \pm 6^\circ$.

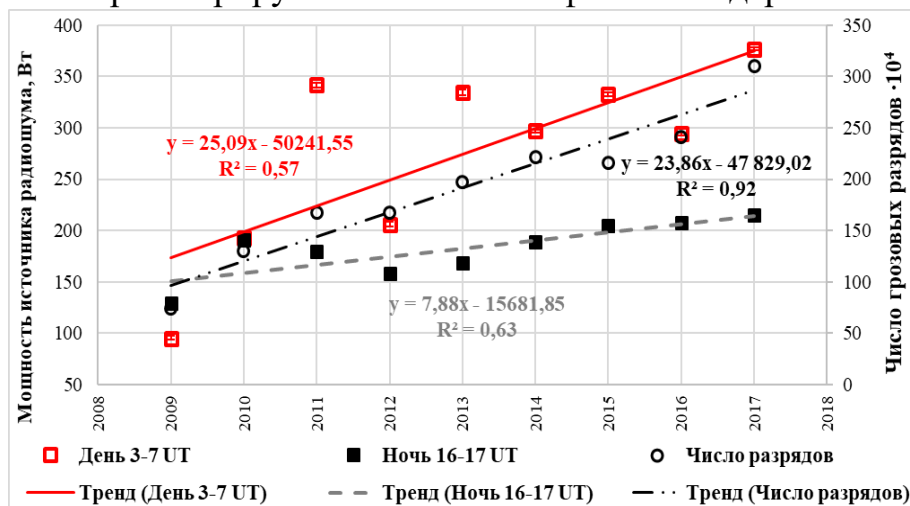


Рис. 6 – Мощность источника радиошума (14,881 кГц) с учетом межгодовых вариаций функции распространения в Северной Азии в период нарастания, максимума и спада 24-го цикла СА и число грозных разрядов Северной Азии в летний период с 2009 по 2017 гг.

В разделе 3.4 проведена оценка межгодового изменения летней грозовой активности Северной Азии в период возрастания, максимума и спада 24-го цикла СА (рис. 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 грозных 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. Нарастание грозовой активности может быть вызвано глобальным потеплением. Выводы к третьей главе сформулированы в разделе 3.5.

Четвертая глава посвящена анализу эффектов рентгеновских солнечных вспышек в вариациях фазы ОНЧ-сигналов радиостанций. В разделе 4.1 проведена адаптация параметров зависимости ВФА от интенсивности потока рентгеновского излучения Солнца. Использовалось эмпирическое выражение:

$$\Phi = A + B \cdot Lg(P \cdot \cos(X)), \quad (5)$$

где Φ – вариация фазы ОНЧ-сигнала, приведенная к единице протяженности радиотрассы, градус/Мм; P – интенсивность потока рентгеновского излучения Солнца ($1 - 8 \text{ \AA}$), Вт/м²; $\cos(X)$ – усредненное вдоль трассы распространения значение косинуса зенитного угла Солнца X .

Значения X вдоль радиотрасс рассчитаны по географическим координатам с разрешением 200 км. 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 ВФА 4 – 10 сентября 2017 г. (табл. 1).

Табл. 1 – Параметры зависимости ВФА от логарифма произведения интенсивности потока рентгеновского излучения ($1-8 \text{ \AA}$) 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 разделе 4.2 проведен анализ ВФА при регистрации ОНЧ-сигналов в 24-м цикле СА. По F10.7 нами определены интервалы возрастания СА: зимой – 2014 г., летом – 2013-2014 гг. Условия, близкие к минимуму СА: 2009 – 2010, 2017 гг., ветви СА: восходящая – 2011 г., нисходящая – 2016 г. Параметры модели ВФА (5) сигналов РСДН-20 (11,904 кГц) при регистрации в Якутске за 2009 – 2017 гг. представлены в табл. 2. Уровень надежности параметров модели ВФА: не менее 95% (критерий Фишера). Кроме параметров модели для сигналов Хабаровск и Краснодар (лето, минимум СА), а также Краснодар (зима, минимум СА), возможно из-за малого числа зарегистрированных ВФА.

Зимой для вспышки С4.3 при среднем вдоль трассы Новосибирск – Якутск значении $\cos(X) = 0,16$ по модели (5) 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 М5.2 при $\cos(X) = 0,2$ 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 Х2.3 при $\cos(X) = 0,11$ оценки ВФА: $23,55 \pm 1,83$ 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).

Табл. 2 – Параметры регрессионной модели внезапных фазовых аномалий сигналов РСДН-20 (11,904 кГц) при регистрации в Якутске за период 2009 – 2017 гг.

Трасса	Сезон	Период СА	Объем выборки	A	B	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

Летом вдоль Новосибирск – Якутск для вспышки C3.1 при $\cos(X) = 0,48$ 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 M2.9 при $\cos(X) = 0,74$ 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 X7.0 при $\cos(X) = 0,57$ оценки ВФА: $19,13 \pm 0,48$ 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 для трассы Новосибирск – Якутск от минимума до максимума в 24-м цикле СА 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. Понижение чувствительности ВФА радиосигнала при распространении вдоль радиотрасс Хабаровск – Якутск и Краснодар – Якутск от минимума к максимуму СА находится в пределах СКО остаточных невязок. Причиной больших СКО 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 трассе Краснодар – Якутск. Летом изменение чувствительности ВФА от минимума к максимуму в 24-м цикле СА не зарегистрировано. Нами получено, что в 24-м цикле СА по F10.7 зимой можно разделить интенсивности фонового потока рентгеновского излучения для максимума и минимума солнечной активности.

В разделе 4.3 проанализированы изменения эффективной высоты волновода Земля – ионосфера во время ВФА. Уменьшение фазовой задержки ОНЧ-радиосигнала можно трактовать как уменьшение эффективной высоты волновода Земля – нижняя ионосфера. При условии одномодового распространения:

$$\Delta\varphi = \frac{360 \cdot d}{\lambda} \cdot \left(\frac{1}{2 \cdot R} + \frac{\lambda^2}{16 \cdot h_n^3} \right) \cdot \Delta h, \quad (6)$$

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 от дневной невозмущенной ионосферы, км; Δh – изменение эффективной высоты волновода Земля – ионосфера, км.

Использовалось $h_n = 72$ км. Радиус Земли R определялся усреднением по участкам радиотрасс с разрешением 200 км по модели WGS 84. Δh представим в виде:

$$\Delta h = a + b \cdot \lg(P \cdot \cos(X)). \quad (7)$$

Параметры модели (7) по данным ВФА представлены в табл. 3. Отмечается меньшая чувствительность к понижению эффективной высоты волновода Земля – нижняя ионосфера во время ВИВ зимой в период максимума 24-го цикла СА. Рассмотрены 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 (рис. 7). Показано, что для описания линейной зависимости ВФА от логарифма произведения интенсивности потока

рентгеновского излучения и зенитного угла Солнца, характерной для одномодового распространения, могут использоваться данные о вариации фазы ОНЧ-сигнала на частоте 11,904 кГц в дневных условиях распространения по радиотрассе вдоль меридиана (Хабаровск – Якутск, 1400 км). Это повышает объем выборки регистрируемых ВФА, когда сеть широтных радиотрасс находится преимущественно в ночных условиях.

Табл. 3 – Параметры регрессионной модели изменения эффективной высоты волновода Земля - ионосфера по данным внезапных фазовых аномалий сигналов РСДН-20 (11,904 кГц) зарегистрированных в Якутске 2009 – 2017 гг.

Радиотрасса	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

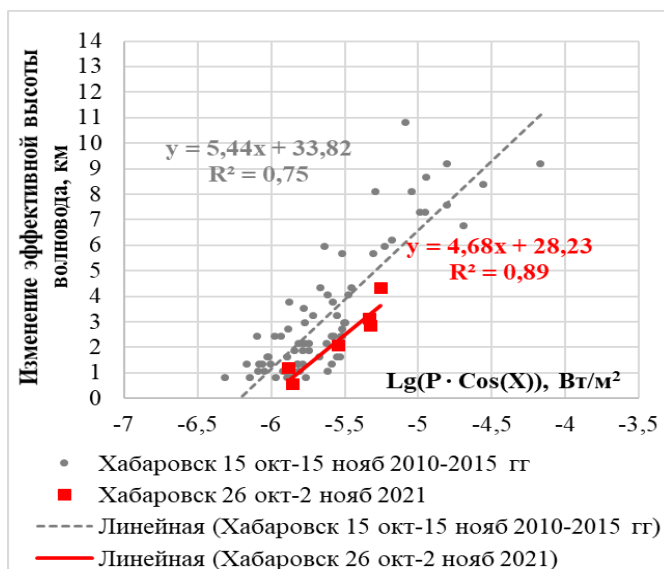


Рис. 7 – Изменения эффективной высоты волновода Земля – нижняя ионосфера сигнала Хабаровск (11,904 кГц) при регистрации в Якутске ВФА с 26 октября по 2 ноября 2021 г. и за осенний сезон 15 октября – 15 ноября 2010 – 2015 гг. в зависимости от потока рентгеновского излучения Солнца

По сравнению с осенью 2010 – 2015 гг., в период 26 октября – 2 ноября 2021 г. отмечалась пониженная чувствительность изменений эффективной высоты волновода (вспышки 26.10 – 2.11.2021) характеризовались повышенной продолжительностью и

интенсивностью фонового рентгеновского излучения).

В разделе 4.4 проведена оценка интенсивности потока рентгеновского излучения Солнца во время вспышек по данным ВФА сигналов РСДН-20 при регистрации в Якутске (11,904 кГц):

$$Lg(P) = A2 + B2 \cdot \Phi + C2 \cdot Lg(\cos(X)) + D2 \cdot Lg(F10.7). \quad (8)$$

По данным ВФА сигналов 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 (8) по оценке интенсивности потока рентгеновского излучения (1 – 8 Å) во время солнечных вспышек. При дневных условиях распространения сигналов ОНЧ, оценки согласуются с данными спутников GOES. В разделе 4.5 сформулированы основные выводы к четвертой главе.

Пятая глава посвящена анализу эффектов солнечных затмений в вариациях амплитуды и фазы ОНЧ-сигналов радиостанций. Рассмотрены эффекты в вариациях амплитуды и фазы при 4 солнечных затмениях на 5 радиотрассах. В разделе 5.1 рассмотрены суточные вариации амплитуды и фазы ОНЧ-радиосигналов, регистрируемых в г. Якутск и в г. Улан-Удэ в день полного солнечного затмения 20 марта 2015 г. Затмение проходило на фоне восстановления после сильных геомагнитных возмущений 17 марта 2015 г. 20 и 21 марта суммарный индекс ΣKp составлял 27 и 22 соответственно. В Краснодаре затмение наблюдалось с 09:15 UT до 11:19 UT с максимальной линейной фазой 0,412 в 10:17 UT. В г. Улан-Удэ частное затмение длилось с 10:32 UT до захода Солнца, максимальная линейная фаза составила 0,236 в 10:59 UT. Якутск находился в ночных условиях. Протяженности радиотрасс Краснодар – Якутск и Краснодар – Улан-Удэ: 5780 км и 4975 км. В г. Якутске 20 марта регистрировалось понижение фазовой задержки сигнала Краснодар (14,881 кГц), 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 $Kp = 5$, с 6:30 UT индекс AE превышал значение 1000 нТл. 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° (0,39 радиан). Эффект 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° (0,45 радиан). В амплитуде радиосигнала на рассматриваемых радиотрассах эффект затмения 20 марта 2015 г. на фоне естественных флуктуаций не выделен.

Оценка изменений эффективной высоты волновода Земля – ионосфера во время солнечных затмений представлена в разделе 5.2. 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 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 и изменчивости высоты однородной атмосферы H от широты и высоты над уровнем моря, изменение эффективной высоты на элементе радиотрассы Δh :

$$\Delta h = H' \cdot \ln \left[\frac{I_n}{I_{\text{дн}}} \left(1 - \frac{S(\Phi)}{S_0} \right) + \frac{I_k}{I_{\text{дн}}} \left(1 - \frac{S(\Phi)}{S_0} \right) + \frac{S(\Phi)}{S_0} \right], \quad (9)$$

где Φ – линейная фаза затмения (отношение закрытой части диаметра Солнца к полному); H' – нормировочный коэффициент для соответствующей протяженной радиотрассы, которая по дуге большого круга может охватывать ряд географических широт; $I_{\text{дн}}$ – поток ионизирующего излучения в дневное время; I_n – поток ночных дополнительных источников ионизации; I_k – поток ионизирующего излучения короны Солнца; $S(\Phi)$ – площадь открытой части диска Солнца; S_0 – полная (открытая) площадь солнечного диска.

Радиотрасса разбивается на n элементов, длина элемента Δr выбрана по 200 км. При одномодовом приближении фазу сигнала φ по длине трассы r в виде:

$$\varphi = \sum_{i=1}^n \beta_i \Delta r. \quad (10)$$

Скорость изменения фазы сигнала с расстоянием β для 11,904 и 14,881 кГц в зависимости от высоты волновода h описывается линейным трендом. С учетом (9) для отклонения фазы сигнала для 11,904 и 14,881 кГц соответственно:

$$\Delta \varphi = 0,0502 \cdot \Delta r \cdot H' \cdot \sum_{i=1}^n \left(\ln \left[\frac{I_n}{I_{\text{дн}}} \left(1 - \left(\frac{S(\Phi)}{S_0} \right)_i \right) + \frac{I_k}{I_{\text{дн}}} \left(1 - \left(\frac{S(\Phi)}{S_0} \right)_i \right) + \left(\frac{S(\Phi)}{S_0} \right)_i \right] \right), \quad (11)$$

и

$$\Delta \varphi = 0,0525 \cdot \Delta r \cdot H' \cdot \sum_{i=1}^n \left(\ln \left[\frac{I_n}{I_{\text{дн}}} \left(1 - \left(\frac{S(\Phi)}{S_0} \right)_i \right) + \frac{I_k}{I_{\text{дн}}} \left(1 - \left(\frac{S(\Phi)}{S_0} \right)_i \right) + \left(\frac{S(\Phi)}{S_0} \right)_i \right] \right). \quad (12)$$

По значениям бесселевых элементов солнечных затмений 04.01.2011 и 20.03.2015 получены распределения $S(\Phi)/S_0$ вдоль трасс Краснодар – Якутск и Краснодар – Улан-Удэ, с разрешением по трассе $\Delta r = 0,2$ Мм и по времени 3 минуты. При значениях отношений потоков ночных дополнительных источников ионизации к

потоку в дневное время $I_H/I_{\text{дн}} = 0,01$ и потока ионизации от солнечной короны к полному потоку в дневное время $I_K/I_{\text{дн}} = 0,1$, по данным о вариациях фазы сигнала $\Delta\varphi$ на частотах 11,904 и 14,881 кГц для солнечных затмений 4 января 2011 г. и 20 марта 2015 г. по (11) и (12) определены значения коэффициента H' (табл. 4).

Отличие нормировочных коэффициентов H' может объясняться изменчивостью источников ионизации. Вариации потоков $I_{\text{дн}}$, могут объясняться сезонными или суточными изменениями зенитного угла Солнца над трассой. Обстановка 20 марта 2015 г. была на фазе восстановления после геомагнитной бури 17 марта 2015 г. На высокоширотных участках трассы Краснодар – Якутск поток I_H мог быть увеличен вследствие высыпаний.

Табл. 4 – Параметры регрессионной модели изменения фазы ОНЧ-радиосигнала при распространении в волноводе Земля – ионосфера в зависимости от логарифма отношения потока солнечного излучения во время солнечных затмений к полному потоку в дневное время

Радио-трасса	Дата затмения	Частота сигнала, кГц	Объем выборки (разрешение 3 минуты)	Норм. Коэфф. H' , км	Свободный член b , радиан	СКО невязок S , радиан	Коэфф. 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

Оценка максимального изменения высоты волновода Δh на трассе Краснодар – Якутск: 2,9 км (20 марта 2015 г., в 10:45 UT максимальная линейная фаза затмения $\Phi = 0,59$, участок трассы 64° с.ш., 78° в.д.). При максимальном затенении трассы Краснодар – Улан-Удэ в 10:54 UT максимальное $\Delta h = 2,4$ км (53° с.ш., 63° в.д., $\Phi = 0,42$) (рис. 8).

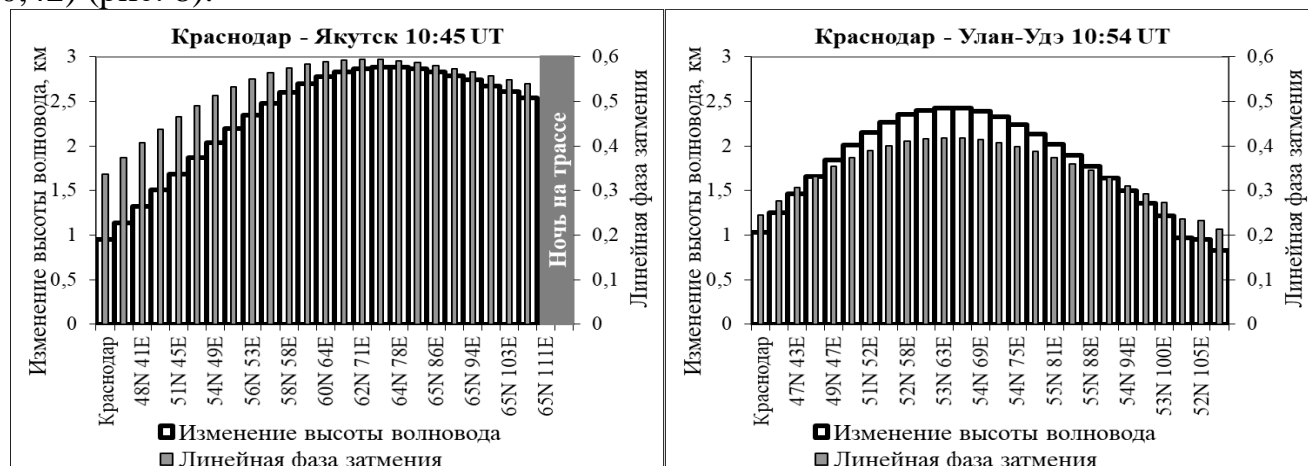


Рис. 8 – Распределения линейной фазы затмения Φ 20 марта 2015 г. и оценки изменений эффективной высоты волновода Δh вдоль радиотрасс Краснодар – Якутск (левая панель) и Краснодар – Улан-Удэ (правая панель) при максимальном затенении по данным изменений фазы радиосигнала на частоте 14,881 кГц

В разделе 5.3 оценены изменения эффективной высоты волновода Земля – ионосфера при переходе от дневных к полностью ночным условиям $\Delta h_{\text{день-ночь}}$. По вариациям фазы сигналов 11,904 и 14,881 кГц, 4 января 2011 г. оценки $\Delta h_{\text{день-ночь}}$ на трассе Краснодар – Якутск составили 14,4 и 18,4 км соответственно. По вариациям фазы сигнала 20 марта 2015 г., оценки $\Delta h_{\text{день-ночь}}$ на трассах Краснодар – Якутск и Краснодар – Улан-Удэ составили 21,9 и 34,3 км (11,904 кГц); 21,6 и 35,1 км (14,881 кГц). В разделе 5.4 представлены выводы к пятой главе.

В заключении представлены основные результаты и выводы.

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. Зарегистрировано нарастание мощности ОНЧ-радишума 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-радишума летом и зимой.

3. 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).

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).

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК:

1. **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.

Статьи в рецензируемых журналах, включенных в международные базы цитирования Web of Science и Scopus:

2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. **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.
7. 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.
8. 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.

9. 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.

Статьи в других рецензируемых журналах:

10. 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.
11. **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.
12. **Корсаков, А. А.** Суточные и сезонные вариации амплитуды и фазы радиосигналов передатчиков РСДН-20 и интенсивности радиопомех (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.
13. **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. Сокрут // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. – 2023. – № 1 (91). – С. 29-41.

Публикации в периодических изданиях и трудах конференций:

14. 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.
15. **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. 92924N.
16. **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.
17. **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, 2015b. – С. 133-135.
18. 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.
19. **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.
20. **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.

21. **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.
22. **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.
23. **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.
24. **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.
25. **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.
26. **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.
27. **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.

Патенты, свидетельства:

28. 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; опубли. 06.09.2021, Бюл. № 9.
29. 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; опубли. 25.08.2022, Бюл. № 9.
30. 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; опубли. 01.03.2023, Бюл. № 3.