

На правах рукописи

Закиров Марат Нафисович

**Распознавание атмосферных инфразвуковых сигналов
импульсных источников методами морфологического анализа
вейвлет-спектров**

1.6.18 – Науки об атмосфере и климате

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук.

Научный руководитель: **Куличков Сергей Николаевич**,
доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты: **Красненко Николай Петрович**,
доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук, заведующий лабораторией, главный научный сотрудник, профессор
Чупин Владимир Александрович,
доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильчева Дальневосточного отделения Российской академии наук, заведующий лабораторией, старший научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

Защита состоится 18 марта 2026 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета Д 002.096.XX (24.1.130.01) на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук по адресу: 119017, Москва, Пыжевский пер., 3, стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФА РАН и на официальном сайте ИФА РАН: <https://ifaran.ru/ru/about/dissertations>.

Автореферат разослан _____ г.

Ученый секретарь диссертационного совета
Д 002.096.XX (24.1.130.01),
кандидат физико-математических наук

А.В. Чернокульский

Общая характеристика работы

Актуальность исследования. Атмосфера представляет собой сложную динамическую среду с выраженной пространственно-временной изменчивостью, в которой распространение акустических сигналов сопровождается множеством физических эффектов: рефракцией, дисперсией, рассеянием на тонкослоистых неоднородностях и турбулентностях, нелинейным взаимодействием волн и другими [Чунчузов и Куличков, 2020; Bass et al., 1991; Kshevetskii et al., 2024]. Эти процессы приводят к искажению формы и спектра сигнала, что затрудняет его идентификацию и классификацию, особенно на больших расстояниях от источника [Асминг и др., 2021; Bowman and Lees, 2017; Landès et al., 2012].

Инфразвуковые сигналы от импульсных источников — таких как взрывы и извержения вулканов — при наличии волновода могут распространяться на большие расстояния в сотни и тысячи километров и регистрироваться глобальными сетями мониторинга, включая Международную систему мониторинга (IMS) [Green and Bowers, 2010; Marty, 2019]. Однако на фоне широкого спектра природных и антропогенных шумов (микробаромы, полярные сияния, горные обвалы и др.) задача автоматического обнаружения и распознавания импульсных сигналов остаётся технически сложной при использовании традиционных методов — спектрального [Chulichkov, 2009], корреляционного [Cansi and Le Pichon, 2008; Le Pichon and Cansi, 2003] или основанных на STA/LTA-алгоритмах [Vaezi, 2015].

Современные вызовы, связанные с мониторингом выполнения международных договоров (в частности, Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний), требуют разработки новых методов, способных надёжно идентифицировать импульсные события в условиях неопределённости формы сигнала, высокого уровня шума и ограниченного объёма априорной информации о траектории распространения [Куличков и др., 2010].

В этих условиях особую значимость приобретают методы, основанные на частотно-временном анализе и морфологическом подходе, которые позволяют выявлять устойчивые признаки сигнала, инвариантные к искажениям, возникающим в атмосфере [Tsybul'skaya et al., 2012]. Использование вейвлет-преобразования в сочетании с распознаванием образов и машинного обучения открывает новые возможности для автоматизации процессов обнаружения и классификации инфразвуковых

событий, обеспечивая устойчивость алгоритмов к помехам [Chulichkov et al., 2022; Zakirov et al., 2024].

Таким образом, разработка математических моделей и вычислительных методов распознавания импульсных инфразвуковых сигналов на фоне шумов представляется актуальной как с научной [Willis et al., 2004], так и с прикладной [Hupe et al., 2022] точки зрения, в том числе в контексте задач геофизического мониторинга, раннего оповещения о техногенных и природных катастрофах [Marchetti et al., 2015; Van Herwijnen and Schweizer, 2011; Tarumi and Yoshizawa, 2023], а также верификации международных соглашений [Marty, 2019].

Целью настоящей диссертационной работы является разработка математических моделей и вычислительных методов для распознавания атмосферных инфразвуковых сигналов от импульсных источников на основе анализа их вейвлет-спектров с применением методов морфологического анализа и машинного обучения.

В рамках диссертационной работы решены следующие **задачи**:

1. Изучить современные подходы к решению задач классификации сигналов, применяемые в инфразвуковом геофизическом мониторинге, включая нейросетевые методы.

2. Провести анализ и предобработку экспериментальных данных, включающую проверку целостности, удаление аномалий в сигналах. Исследовать характерные особенности вейвлет-спектров сигналов от различных источников.

3. Построить алгоритм обнаружения импульсных сигналов на основе анализа формы вейвлет-спектра, введя количественную меру схожести. Исследовать устойчивость алгоритма к аддитивному шуму и наличию в сигнале нескольких источников различной природы. Оценить качество классификации путём построения ROC-кривых и вычисления площади под ними.

4. Изучить свойства системы функций, построенных из сдвинутых во времени N- и U-волн. Разработать метод декомпозиции сигнала на N- и U-волны, представляющие сигнал в виде линейной комбинации этих волн. Реализовать методику определения параметров волн (амплитуда, задержка, ширина) нелинейной оптимизацией.

5. Создать метод построения формы изображения спектров сигналов двух классов источников на основе метода главных компонент, провести тестирование.

6. Подобрать оптимальную архитектуру и обучить свёрточную нейронную сеть для бинарной классификации акустических сигналов и оценить её точность на реальных данных.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Морфологический метод идентификации акустических сигналов от импульсных источников, основанный на анализе фрагментов изображений вейвлет-спектров, позволяющий обнаружить и локализовать сигналы на фоне шумов, устойчивый кискажениям амплитуды сигнала, вызванным изменчивостью условий распространения в атмосфере.

2. Метод декомпозиции акустических сигналов на N- и U-волны для оценки их параметров (амплитуды, времени задержек, ширины), представляющий зарегистрированный сигнал в виде суперпозиции компонент, отраженных от слоистых неоднородностей атмосферы.

3. Метод построения формы изображений вейвлет-спектров для различных классов акустических сигналов на основе метода главных компонент, определяющий характерные структуры спектров для двух классов сигналов по данным серии наблюдений.

4. Свёрточная нейронная сеть для бинарной классификации атмосферных инфразвуковых сигналов, обеспечивающая высокую точность распознавания и устойчивость к шуму при обучении на синтетических данных и тестировании на реальных записях.

Научная новизна исследования. Предложен метод, сочетающий идеи морфологического анализа проф. Ю.П. Пытьева и вейвлет-преобразования для идентификации импульсных инфразвуковых сигналов. Метод устойчив кискажениям амплитуды, вызванным влиянием атмосферных условий. Впервые показано, что система функций, составленная из сдвинутых во времени N- и U-волн фиксированной ширины, образует базис в пространстве дискретных сигналов конечной длины, заданных на равномерной сетке. Разработан новый метод декомпозиции акустических сигналов на N- и U-волны, включающий двухэтапный алгоритм: грубую оценку параметров решением системы линейных уравнений и последующую нелинейную оптимизацию. Метод позволяет представить любой сигнал в виде суперпозиции волн, отражённых от слоистых неоднородностей атмосферы на разной высоте, и количественно оценить параметры этих отражений. Метод

главных компонент применён для автоматического построения формы изображений вейвлет-спектров инфразвуковых сигналов для двух классов. Показано, что первая главная компонента спектров сигналов позволяет использовать их как эталонные образы для распознавания. Создана и обучена свёрточная нейронная сеть новой архитектуры для бинарной классификации инфразвуковых сигналов, демонстрирующая высокую точность на реальных данных при обучении на синтетических примерах с добавленным белым шумом. Сеть устойчива к переобучению и обеспечивает классификацию в реальном времени. Создано программное обеспечение, зарегистрированное Федеральной службой по интеллектуальной собственности, свидетельства: № 2023612037, № 2024669755, № 2024680262, № 2024669595, № 2025682560.

Теоретическая и практическая значимость. Разработанная математическая модель формы вейвлет-спектра импульсного инфразвукового сигнала представляет собой новый класс решений в теории распознавания образов, адаптированный к задачам обработки геофизических данных. Модель обобщает представления о форме импульсных сигналов в условиях неопределённости и может быть использована в других областях, где наблюдаются сильные искажения и шумовые помехи. Доказательство полноты базиса из N- и U-волн в пространстве дискретных сигналов предоставляет теоретическое обоснование для использования этих функций в задачах аппроксимации и зондирования атмосферы. Использование метода главных компонент для построения формы изображений вейвлет-спектров вводит новый класс статистических моделей, способных выделять инвариантные признаки сигналов. Разработанные методы с небольшими изменениями могут быть интегрированы в автоматизированные системы обработки данных.

Степень достоверности. Использованные методы морфологического анализа имеют строгую математическую базу и применяются в соответствии с принятыми в литературе процедурами. Все положения диссертации обоснованы, соответствуют общепринятым физическим представлениям о структуре инфразвуковых импульсных сигналов и согласуются с современными теоретическими представлениями и результатами других исследований. Выводы работы прошли достаточную апробацию в виде докладов на конференциях и публикаций в рецензируемых научных журналах.

Апробация работы. Результаты диссертационного исследования представлялись на научно-исследовательских семинарах Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН // Москва, 10.04.2025 и 07.10.2025; кафедры

физики атмосферы физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова // Москва, 11.11.2025; а также на конференциях: региональная конференция «Ломоносовские Чтения» // Москва, 21.04.2022; международная конференция «Ломоносов» // Москва, 14.04.2022, 11.04.2023 и 16.04.2024; международный ежегодный симпозиум «Атмосферная радиация и динамика» (МСАРД – 2023) // Санкт-Петербург, 21–24 июня 2023; международная конференция «Интеллектуализация обработки информации» // Гродно, 23–25 октября 2024; Всероссийская научная конференция «XXXVI сессия Российского акустического общества» // Москва, 21-25 октября 2024; Всероссийская конференция, посвященная памяти академика Александра Михайловича Обухова «Турбулентность, динамика атмосферы и климата» // Москва, 19–21 ноября 2024; Международная научно-практическая конференция по экологии и вопросам изменения климата ICECC 2025 // Сочи, 14–16 сентября 2025.

Личный вклад автора. Автором самостоятельно или в соавторстве с научным руководителем д.ф.-м.н. С.Н. Куличковым сформулированы научные цели и задачи, определены пути решения, разработана общая методология, объединяющая морфологический анализ, вейвлет-преобразование и методы машинного обучения. Все научные результаты, представленные в диссертации, получены автором лично. Текст диссертации полностью написан автором, иллюстрации построены автором. Автор принимал непосредственное участие в решении всех задач диссертационной работы.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 20 печатных изданиях, 9 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, и в журналах, входящих в базы данных SCOPUS, Web of Science или Russian Science Citation Index (RSCI); 11 – в тезисах докладов, 5 свидетельств о регистрации программы для ЭВМ.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю, д.ф.-м.н., Куличкову Сергею Николаевичу за интересную тему исследования, ценные советы и плодотворную совместную работу. Искреннюю благодарность автор выражает д.ф.-м.н., профессору Чуличкову Алексею Ивановичу за постоянную поддержку и помощь при работе над совместными проектами. Автор особенно благодарит сотрудников радиоакустической лаборатории ИФА РАН д.ф.-м.н. Чунчузова Игоря Петровича и Попова Олега Евгеньевича за переданный опыт. Автор выражает благодарность всем коллегам из МГУ им. М.В. Ломоносова и ИФА РАН за плодотворную работу и дружественную атмосферу.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем диссертации составляет 125 страниц, включая 46 рисунков. Список литературы содержит 117 наименований.

Основное содержание работы

Введение. Во введении обосновывается актуальность разработки методов обнаружения импульсных инфразвуковых сигналов, кратко описываются ограничения существующих подходов, формулируются цель и задачи исследования. Представлены защищаемые положения, обоснована достоверность полученных результатов, их практическая и научная значимость. Приведены сведения о личном вкладе автора и об аprobации результатов. Представлен список основных публикаций по теме диссертационной работы, ее структура и объем.

В Главе 1 построена модель формы вейвлет-спектра импульсного инфразвукового сигнала, разработан морфологический алгоритм его обнаружения, проверена устойчивость к шумам и оценено качество классификации по ROC-кривым.

В разделе 1.1 кратко описаны особенности распространения инфразвука в слоистой, анизотропной и турбулентной атмосфере: влияние профиля скорости звука, формирование волноводов, зон слышимости и тени, многократные отражения, дисперсия и нелинейные искажения сигнала.

В разделе 1.2 показано, что спектры разных инфразвуковых источников нестационарны и перекрываются; выделены типичные частотные диапазоны вулканов, взрывов, микробаром и др., и отмечены ограничения классического Фурье-анализа, что обосновывает переход к вейвлет-преобразованию.

В разделе 1.3 кратко изложены основы вейвлет-анализа: определение непрерывного вейвлет-преобразования, свойства материнских функций (Морле, Морзе), преимущества временно-частотного представления для нестационарных инфразвуковых сигналов и способ визуализации спектрограмм. Фурье-образ функции Морзе задается как:

$$\psi_{\beta,\gamma}(\omega) = A_{\beta,\gamma} \omega^{\beta} e^{-\omega^{\gamma}}, \quad (1)$$

где $\omega > 0$ - круговая частота, $A_{\beta,\gamma}$ – нормировочный коэффициент, β – контролирует число осцилляций внутри огибающей, γ - параметр симметрии, определяющий форму огибающей во временной области. Обосновывается выбор комплексного вейвлета Морзе.

В разделе 1.4 изложены основы морфологического анализа: изображения рассматриваются как квадратично интегрируемые элементы линейного пространства; стандартным образом вводятся линейные операции, скалярное произведение и расстояние между двумя изображениями. Описана идея анализа искать на изображениях вейвлет-спектра сигналов устойчивую геометрическую форму.

В разделе 1.5 определяется строгое понятие формы и действие оператора проецирования на форму. Описана математическая модель формы изображения вейвлет-спектра для распознавания сигналов от импульсных источников.

Идея модели заключается в следующем: вейвлет-спектр сигнала представляется как двумерное изображение, где оси времени и частоты задают прямоугольное поле зрения, а яркость каждого пикселя соответствует модулю значения спектра; из этого изображения выделяется фрагмент (скользящее окно), который разделяется на две области: центральную и фоновую, границы между ними задаются двумя кривыми, зависящими от частоты. При этом центральная область для низких частот шире, чем для высоких, что отражает особенности структур вейвлет-спектров. В каждой из этих областей яркость предполагается постоянной вдоль горизонтальных полос, соответствующих определённым частотам. Форма спектра определяется как множество таких кусочно-постоянных изображений, в которых средняя яркость в центре не меньше, чем на фоне. Это отражает предположение, что импульсный сигнал создаёт на спектrogramме яркое пятно характерного вида, контрастное по отношению к фону.

Для количественной оценки принадлежности предъявленного спектра ξ к заданной форме, вводится мера похожести изображения на форму v :

$$I(\xi) = \frac{\|\Pi_v \xi - \Pi_{v_E} \xi\|^2}{\|\xi - \Pi_v \xi\|^2}, \quad (2)$$

где Π_v – проектор на форму v , Π_{v_E} – проектор на константу. Знаменатель показывает невязку проекции, и чем она меньше, тем ближе ξ к форме v . Числитель характеризует контрастность изображения и позволяет избежать ложных срабатываний на однородных или низкоконтрастных участках.

Сигнал считается обнаруженным, если $I(\xi)$ превышает пороговое значение, равное 0,2 (выбрано эмпирически). В отличие от корреляционных методов, здесь достаточно одного регистрирующего канала, однако для

нивелирования риска ложных срабатываний от шума всё же крайне желательна верификация на нескольких приемниках.

В разделе 1.6 приведено краткое описание экспериментальных данных, использованных для разработки и проверки предложенного метода. Перечислены конкретные события и источники, по которым были получены записи инфразвуковых сигналов. Для демонстрации различимости импульсных и неимпульсных записей использованы также сигналы микробаромов, полярных сияний из библиотеки LTIS, поскольку они по природе являются непрерывными.

В разделе 1.7 изложена пошаговая методика вычислений и краткое руководство пользователя к зарегистрированной программе № 2023612037 «Обнаружение сигналов от импульсных источников на основании анализа вейвлет-спектров в различных частотных диапазонах».

В разделе 1.8 приведена проверка работоспособности разработанного морфологического метода на реальных записях для импульсных и непрерывных сигналов.

Раздел 1.8.1 посвящён обнаружению сигналов от импульсных источников. Модель содержит гиперпараметр — ширину скользящего окна, значение которого подбирается индивидуально для каждого случая.

На верхнем рисунке 1 показан инфразвуковой сигнал от ядерного взрыва КНР 16.10.1980, на среднем графике – его спектр, на нижнем – зависимость меры схожести фрагмента спектра с шаблоном. Алгоритм чётко выделяет единичный импульс и локализует момент прихода.

На рисунке 2 показан результат анализа сигнала от извержения вулкана Хунга-Тонга 15–16 января 2022. Импульсные сигналы создают характерную картину на спектре. Заметим, что на этом графике частота на порядок ниже, а продолжительность сигнала – больше, чем на рисунке 3, и для эффективного применения метода необходимо увеличить ширину скользящего окна до величины в несколько часов. Метод обнаруживает как ударную волну первого круга, так и волну, обогнувшую Землю.

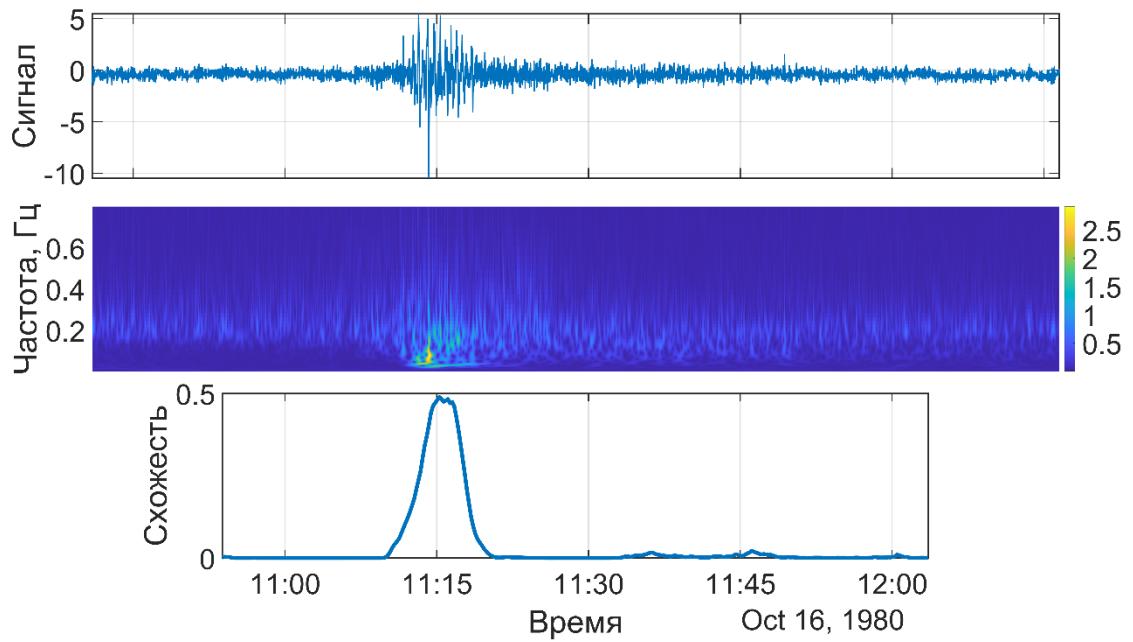


Рисунок 1. Сверху вниз: сигнал от атмосферного ядерного взрыва 1980 года, его вейвлет-спектр и зависимость меры схожести по форме от положения скользящего окна по горизонтали.

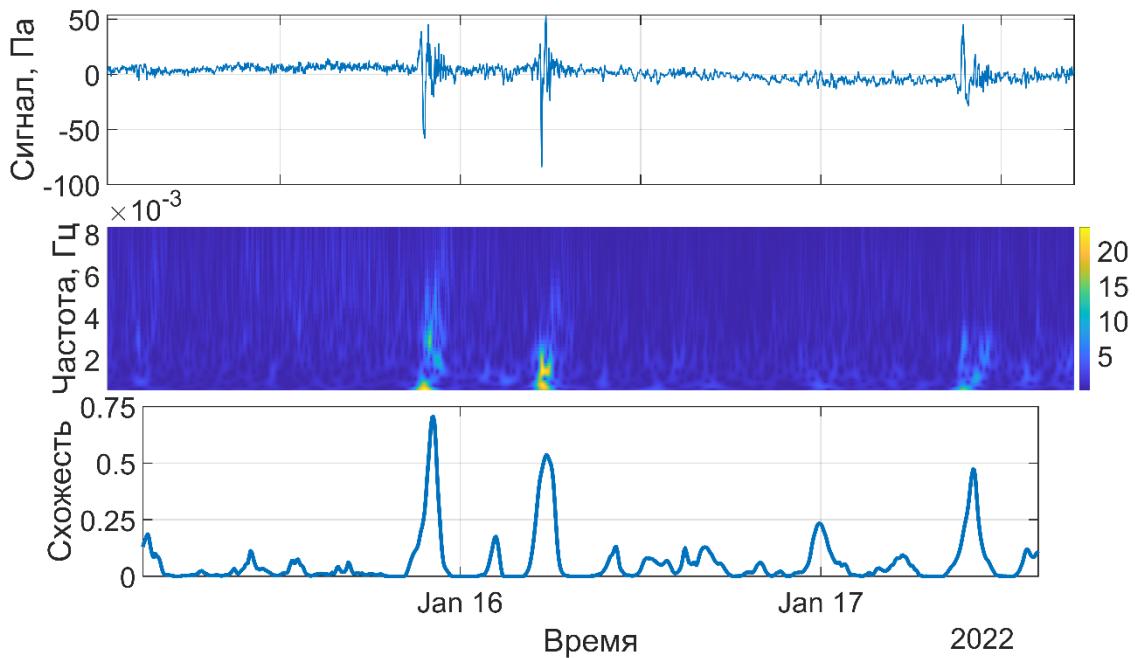


Рисунок 2. Сигнал, полученный при извержении вулкана Хунга-Тонга и результат его анализа.

На рисунке 3 показан результат обработки инфразвукового сигнала, зарегистрированного во время извержения вулкана Райкоке в июне 2019 года. В интервале 4–6 часов утра прослеживается появление компонент, «засвечивающей» спектр в широкой полосе частот. Метод успешно

обнаруживает указанные события. Таким образом, метод способен выявлять импульсные сигналы не только от взрывов, но и от извержений вулканов.

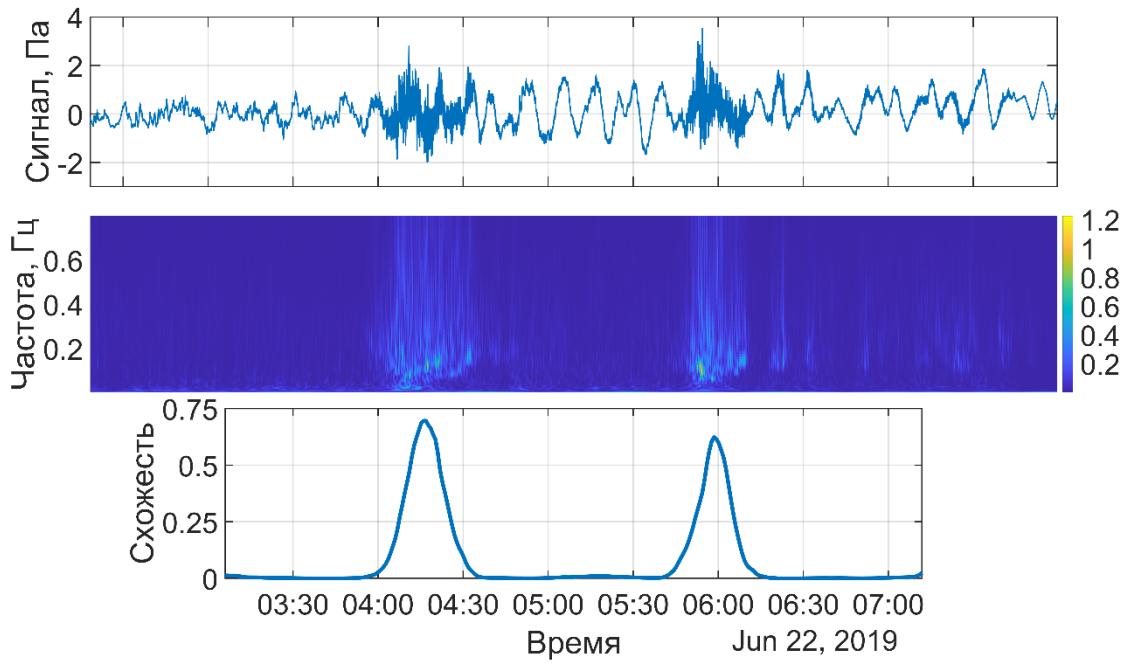


Рисунок 3. Запись сигнала при извержении вулкана Райкоке, его спектр и отклик метода.

Раздел 1.8.1 демонстрирует, что метод не реагирует на сигналы, не относящиеся к импульсным источникам. В качестве примера на рисунке 4 приведена запись инфразвука, сопровождающего полярные сияния, и результат её обработки. Спектральная плотность оказалась «размазанной» по времени, поэтому картина получилась малоконтрастной: ни при каком положении скользящего окна величина морфологической схожести не превышает порог. В сигнале преобладают колебания с частотами выше 0,1 Гц, распределённые равномерно во времени; средняя засветка спектра остаётся практически постоянной. Отдельные всплески яркости не выделяются на общем фоне: их кратковременность и низкая энергия не позволяют преодолеть порог меры сходства, поэтому ни один фрагмент не классифицируется как импульсный. Следовательно, здесь алгоритм не находит участков, которые можно было бы отнести к импульсным источникам.

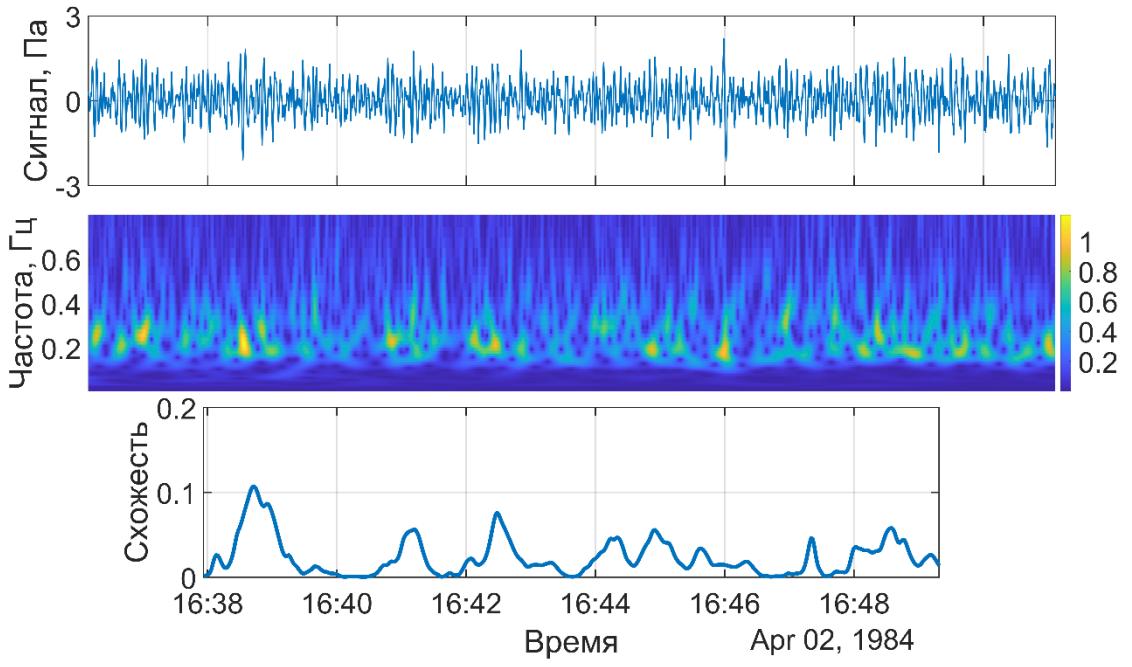


Рисунок 4. Анализ сигнала, записанного на Аляске во время полярных сияний.

В разделе 1.9 исследуется устойчивость алгоритма к аддитивной помехе. Для этого строится синтетический сигнал в виде комбинации $f(t)$ – сигнала от ядерных испытаний с весом α и записи микробаромов $g(t)$:

$$\xi_\alpha(t) = \alpha f(t) + g(t), \quad \alpha \in R^1, \quad (3)$$

Слагаемое $\alpha f(t)$ характеризует вклад полезного сигнала, а число α определяет отношение сигнал-шум. Значение α можно трактовать как безразмерный параметр, характеризующий мощность источника, либо обратное расстояние до него.

На рисунке 5 показан график схожести $\tau_f(\xi_\alpha)$ фрагмента изображения к форме в зависимости от положения скользящего окна и величины параметра α . Видим, что при $\alpha = 1$ наблюдается максимум, соответствующий взрыву, причём максимальная яркость пика убывает с уменьшением α , например, при $\alpha = 0.1 \tau_f(\xi_{0.1}) = 0.22$, при $\alpha = 0.2 \tau_f(\xi_{0.2}) = 0.37$, при $\alpha = 0.33 \tau_f(\xi_{0.33}) = 0.42$, при $\alpha = 1 \tau_f(\xi_1) = 0.47$. Такое поведение объясняется тем, что растёт относительный вклад шумовой помехи, и распознать полезный сигнал становится сложнее. Можно заметить, что с изменением α на графике появляются и исчезают локальные максимумы из-за того, что меняется вклад полезного сигнала. Также отметим, что как при малых $\alpha \rightarrow 0$, так и при больших $\alpha \rightarrow +\infty$, график слабо зависит от α , так как в этом случае $\xi_\alpha(t)$ с высокой точностью состоит либо только из шума, либо только из полезного сигнала, и вклад в сумму другого слагаемого оказывается пренебрежимо

малым. Гладкость графика свидетельствует об устойчивости алгоритма к малым возмущениям начальных данных: незначительные изменения входных параметров не приводят к существенному отклонению результата.

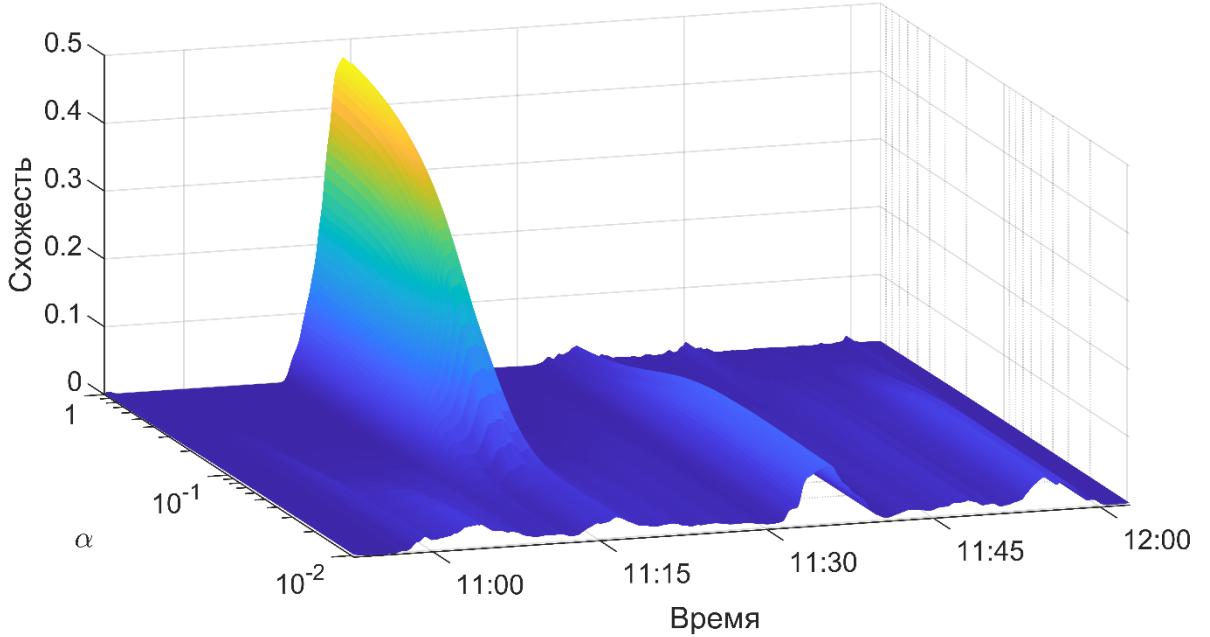


Рисунок 5. График схожести спектра к форме в зависимости от положения скользящего окна и параметра α .

В разделе 1.10 диссертации описывается методика оценки качества классификации разработанного алгоритма обнаружения импульсных инфразвуковых сигналов с помощью ROC-кривых. Для объективной оценки эффективности предложенного метода в задаче бинарной классификации используется ROC-анализ, позволяющий графически отобразить зависимость между долей правильно обнаруженных сигналов (TPR) и долей ложных срабатываний (FPR) при изменении порога алгоритма.

На рисунке 6 показана ROC-кривая, полученная путём варьирования значения порогового значения, и вычисляется площадь под кривой (AUC). Чем ближе AUC к 1, тем выше качество классификации. В работе построены ROC-кривые для трёх уровней сигнал/шум: без добавления шума, с белым шумом дисперсией с 300 и 500. Значения AUC составили 0.87, 0.79 и 0.72 соответственно, что показывает устойчивость алгоритма к шуму.

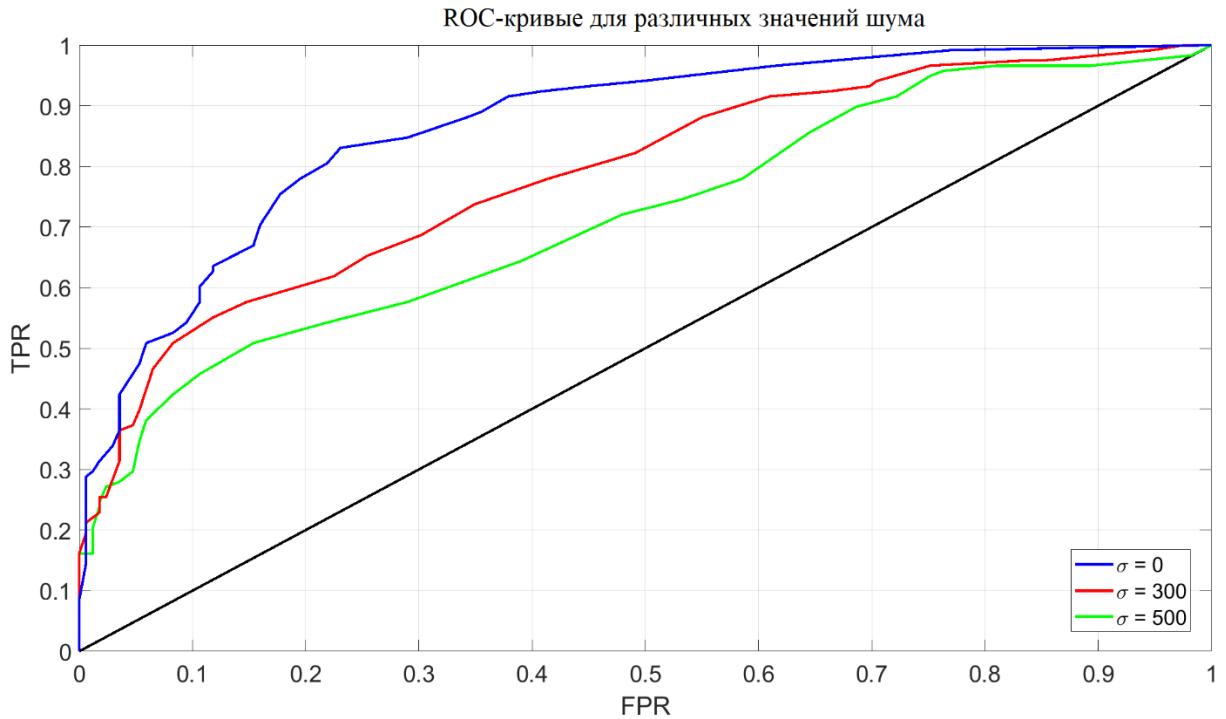


Рисунок 6. ROC-кривые для разного уровня аддитивного шума.

В разделе 1.10 приведены выводы по главе 1, в которых кратко подведены итоги разработки и применения морфологического метода обнаружения импульсных инфразвуковых сигналов: разработана математическая модель формы изображения вейвлет-спектра импульсного инфразвукового сигнала, представляющая собой множество кусочно-постоянных функций с упорядоченными по яркости областями. На этой основе предложен морфологический метод, позволяющий обнаруживать и локализовать импульсные сигналы на фоне шумов путём сравнения фрагментов спектра с эталонной формой. Метод апробирован на реальных записях, включая сигналы от ядерных взрывов, вулканических извержений и техногенных взрывов. Показана его устойчивость к шуму и искажениям, а также возможность автоматического выявления времени прихода сигнала. Для количественной оценки качества классификации построены ROC-кривые, подтвердившие высокую эффективность метода (AUC до 0.87).

В Главе 2 описывается модель акустического сигнала как суммы N- и U-волн – особых форм, возникающих при распространении и отражении инфразвука в атмосфере. Показано, что система таких волн образует базис в пространстве дискретных сигналов конечной длины, и разработан алгоритм их декомпозиции: сначала грубая оценка параметров, затем уточнение нелинейной оптимизацией. Метод позволяет извлекать из сигнала участки, соответствующие отражениям от слоистых неоднородностей, и оценивать их

задержки и амплитуды, что полезно для акустического зондирования атмосферы.

В разделе 2.1 рассматривается физическая модель распространения акустических волн в атмосфере с учётом её стратифицированной и анизотропной структуры. Атмосфера представляется как многослойная среда с тонкими горизонтальными неоднородностями, в которой звуковые лучи испытывают многократные отражения от слоёв с резкими вертикальными градиентами температуры и ветра. Эти отражения приводят к формированию сложной волновой картины, включающей как прямой сигнал, так и запаздывающие компоненты, отражённые от различных высотных уровней.

Особое внимание уделяется акустическому зондированию атмосферы — методу, позволяющему восстанавливать вертикальные профили скорости ветра и температуры в верхней тропосфере, стратосфере и мезосфере по характеру распространения и искажения сигналов от мощных импульсных источников (взрывов, извержений вулканов и т.д.). Таким образом, в пункте 2.1 обосновывается возможность использования отражённых акустических компонентов для анализа структуры атмосферы и формируется физическая база для последующей декомпозиции сигнала на отдельные волновые составляющие.

В разделе 2.2 вводятся понятия N- и U-волн как идеализированных типичных форм импульсных инфразвуковых сигналов, формирующихся при распространении в атмосфере на большие расстояния. N-волна представляет собой биполярный импульс линейной формы, возникающий вследствие нелинейной деформации первоначального сигнала в среде с убывающей с высотой скоростью звука. U-волна получается из N-волны при отражении от слоистых неоднородностей атмосферы и оказывается сдвинутым по фазе на $\varphi = \pm\pi/2$; она носит название «сопряжённой» или «гильбертовой» пары к N-волне.

Для обеих форм приведены аналитические выражения, показано, что спектр N-волны имеет чисто мнимый Фурье-образ, и установлена связь между её временной шириной и частотой максимума спектра.

В разделе 2.3 доказывается, что совокупность сдвинутых по времени N- и U-волн образует базис в пространстве дискретных сигналов конечной длины, заданных на равномерной сетке. Для этого строится счётная система функций: в нечётные узлы сетки помещаются сдвинутые N-волны, в чётные — U-волны; всего получается T линейно независимых векторов, где T — длина сигнала. Численно проверяется, что квадратная матрица из значений

этих волн имеет полный ранг, следовательно, система действительно является базисом. Это означает, что любой конечный дискретный сигнал может быть единственным образом представлен в виде линейной комбинации базисных N- и U-волн, что и лежит в основе алгоритма декомпозиции, описанного далее.

В **разделе 2.4** формулируется задача декомпозиции зарегистрированного акустического сигнала на конечный набор N- и U-волн: сигнал представляется как суперпозиция N- и U-компонент с различными задержками во времени $t_{0,k}$, амплитудами a_k и b_k соответственно, шириной, и аддитивного случайного шума $v(t)$:

$$\xi(t) = \sum_{k=1}^K [a_k N_k(t - t_{0,k}) + b_k U_k(t - t_{0,k})] + v(t), \quad (4)$$

K – число слагаемых – является гиперпараметром модели. В матричной форме это даёт переопределённую систему линейных уравнений. Число слагаемых сначала выбирается равным длине сигнала, и после грубой оценки решения сохраняются только небольшое число самых крупных волн, которые подаются на вход процедуре нелинейной оптимизации для тонкой настройки.

В **разделе 2.5** описан эффективный двухэтапный алгоритм поиска параметров N- и U-волн. На первом этапе все волны предполагаются одинаковой ширины w , оцениваемой по частоте максимума спектра f_{max} :

$$w \approx \frac{1}{3f_{max}}. \quad (5)$$

Затем строится и решается система линейных уравнений относительно амплитуд волн. Из решения выбираются K пар волн с наибольшими амплитудами — они используются как начальное приближение далее. Полученное приближение уточняется с помощью процедуры нелинейной оптимизации, в ходе которой уточняются ширина, время прихода и амплитуда каждой волны.

В **разделе 2.6** приведены результаты применения предложенного метода декомпозиции к реальным атмосферным акустическим сигналам. Рассмотрен сигнал, зарегистрированный в г. Цимлянск в 1990 году от взрыва мощностью 20–70 килотонн на большом расстоянии от источника.

На рисунке 7 красной кривой показан восстановленный сигнал, полученный после решения системы линейных уравнений и отбора $K=20$ наибольших по амплитуде компонентов. Синей кривой представлен результат уточнения параметров волн с помощью нелинейной оптимизации.

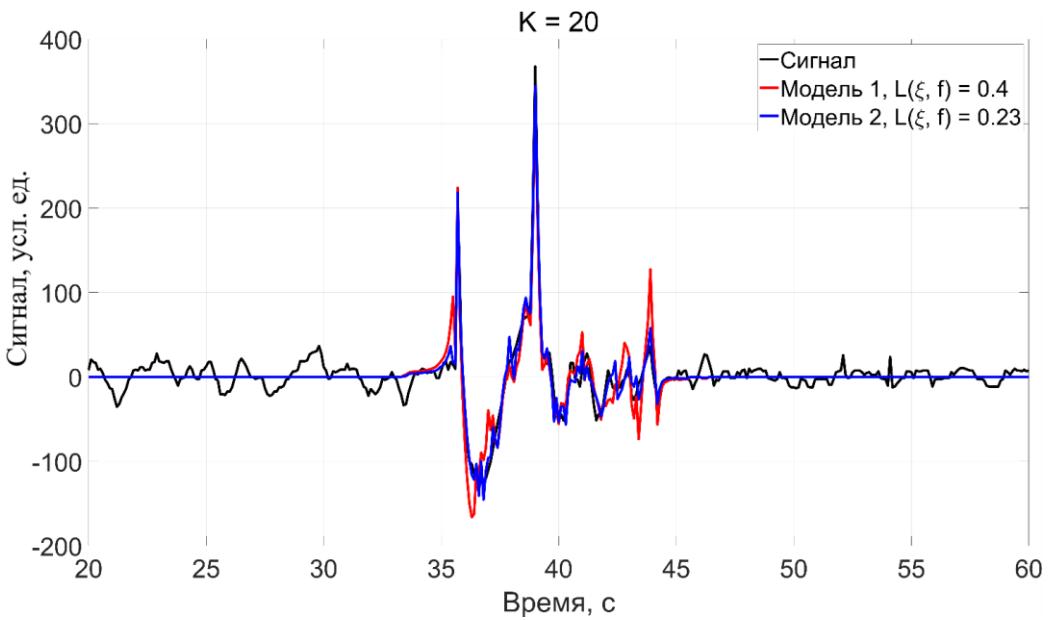


Рисунок 7. Исходный сигнал и его аппроксимация двумя моделями при помощи $K=20$ пар волн.

График зависимости величины невязки от числа используемых волн на рисунке 8 демонстрирует немонотонное поведение, что связано с неортогональностью базиса и возможным попаданием в локальные минимумы. При числе волн равном длине сигнала невязка обращается в ноль, как и должно быть по определению базиса.

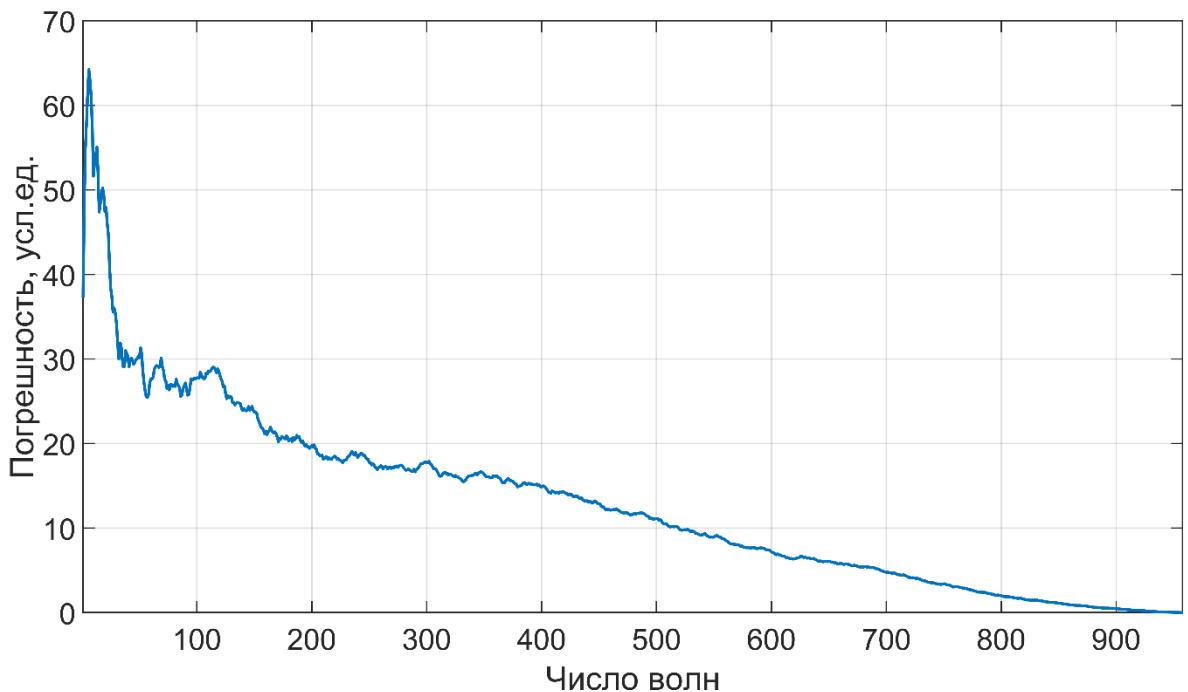


Рисунок 8. График зависимости невязки от числа используемых волн.

В разделе 2.7 подведены итоги второй главы: построена модель атмосферного акустического сигнала в виде суперпозиции N- и U-волн с различными амплитудами, временами прихода и ширинами, что позволяет представить зарегистрированный сигнал как совокупность отражений от слоистых неоднородностей атмосферы. Доказано, что система из сдвинутых во времени N- и U-волн образует базис в пространстве дискретных сигналов конечной длины, заданных на равномерной сетке, что даёт возможность аппроксимировать любой сигнал из этого класса с заданной точностью. Разработан двухэтапный алгоритм декомпозиции: сначала грубая оценка параметров методом линейной алгебры, затем уточнение с помощью нелинейной оптимизации.

Глава 3 посвящена автоматической классификации инфразвуковых сигналов методами машинного обучения. С помощью метода главных компонент построены формы вейвлет-спектров двух типов источников (генератор ИФА и неизвестный удалённый источник); предложена мера схожести, позволяющая отнести новый сигнал к одному из классов, приведены примеры распознавания. На синтетических данных с добавлением шума обучена свёрточная нейронная сеть, которая продемонстрировала устойчивую и высокую точность распознавания на реальных сигналах.

В разделе 3.1 дана краткая классификация и обоснование применения методов машинного обучения к задаче распознавания атмосферных инфразвуковых сигналов. Перечислены три основные парадигмы обучения: с учителем, без учителя и с подкреплением. Описан метод главных компонент как способ построения компактного признакового описания сигналов и выявления доминирующих структур в их вейвлет-спектрах. Сформулирована идея: вместо жёстко заданной формы сигнала использовать эмпирически построенный «инвариант» (главную компоненту), полученный по экспериментальной выборке; это позволяет учесть изменчивость реальных данных.

В разделе 3.2 изложен алгоритм построения «эталонной формы» изображения вейвлет-спектра с помощью метода главных компонент. Формируется выборка заранее размеченных и пространственно согласованных спектrogramм одного класса; каждое двумерное изображение-спектр «разворачивается» в вектор и объединяется в матрицу; выполняется сингулярное разложение этой матрицы:

$$A = U\Sigma V^T, \quad (6)$$

где матрица Σ – диагональная с сингулярными числами в порядке неубывания, а матрицы U и V – ортогональны: их столбцы составляют ортонормированные базисы левых и правых сингулярных векторов соответственно. Первые столбцы матрицы U задают ортонормированный базис, вдоль которого разброс данных максимальен. Первый вектор-столбец U (или первые несколько) принимается за эталонную форму класса: линейная комбинация этих базисных изображений с коэффициентами разложения даёт наилучшее среднеквадратичное приближение любому изображению данного класса.

В разделе 3.3 приведён практический пример построения форм вейвлет-спектров для двух классов источников. Использованы реальные сигналы: 13 сигналов от акустического генератора ИФА (с расстояния 3 км) и 9 сигналов от неизвестного удалённого источника (около 20 км). Описана методика получения главных компонент, и их характерный вид.

В разделе 3.4 описывается, как с помощью построенных форм решается задача узнавания неизвестного сигнала. Для каждого класса определяется проектор на форму:

$$\Pi = U_k U_k^T, \quad (7)$$

где U_k – первые k столбцов матрицы U . Вводится мера сходства изображений, аналогичная формуле (2). Эмпирически подобраны пороги, если оба значения ниже порогов, фрагмент считается фоном. На реальных записях (рисунок 9) алгоритм корректно локализовал времена приходов сигналов обоих классов.

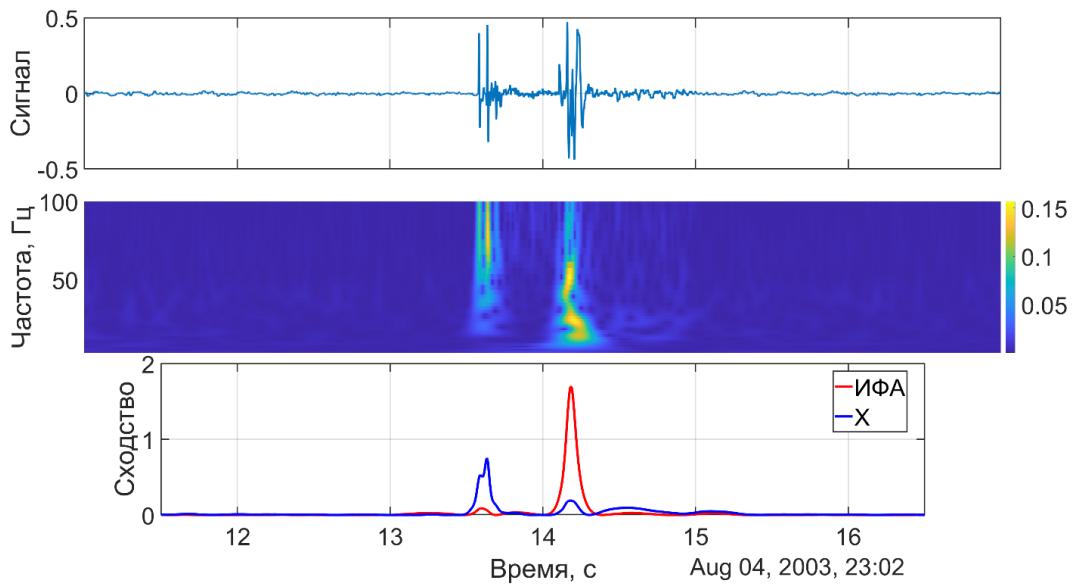


Рисунок 9. Фрагмент сигнала, его вейвлет-спектр и мера морфологического сходства на форму, построенную методом главных компонент.

В разделе 3.5 содержится описание свёрточной нейронной сети, разработанной для бинарной классификации инфразвуковых сигналов. Нейросеть состоит из трёх свёрточных блоков (одномерная свёртка, нормализация, функция активации, пулинг), за которыми следуют полносвязные слои. При обучении минимизируется функция потерь – бинарная кросс-энтропия; применяется добавление шума для расширения обучающей выборки и борьбы с переобучением.

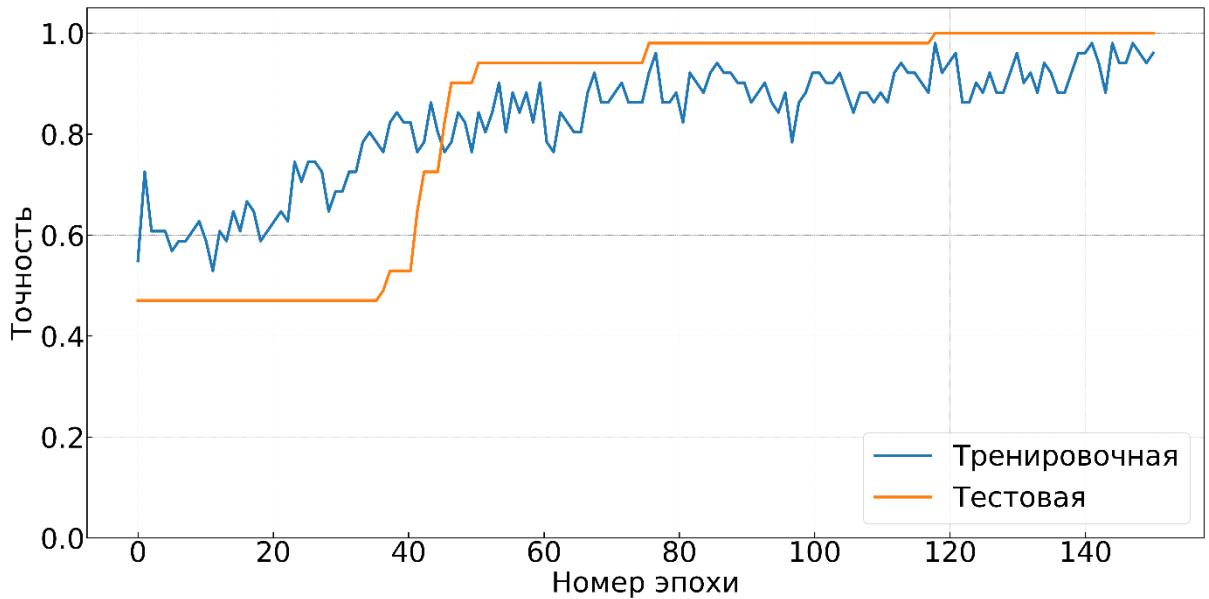


Рисунок 10. График доли правильных ответов от номера эпохи обучения.

В разделе 3.6 приводятся результаты обучения и тестирования свёрточной нейронной сети. Обучение велось на только синтетических данных, а тестирование — на реальных записях. Кривая функции потерь (кросс-энтропия) на тестовой выборке монотонно убывает и стабилизируется после приблизительно 40 эпох, что свидетельствует об отсутствии переобучения. Точность классификации (доля правильных ответов) растёт от уровня случайного угадывания (≈ 0.5) до единицы после 115 эпох (рисунок 10), то есть модель правильно определяет все тестовые сигналы.

В разделе 3.7 приведён краткий итог главы 3: методом главных компонент построены формы вейвлет-спектров для двух классов источников; предложена нормированная мера сходства, позволяющая на фоне шума автоматически классифицировать сигналы к одному из классов. Разработана и обучена свёрточная нейросеть, при обучении на синтетических данных показывающую 100 % точности на реальных записях, демонстрируя высокую обобщающую способность и устойчивость к помехам.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации:

1. Построена математическая модель формы изображения вейвлет-спектра импульсного инфразвукового сигнала, представляющая собой множество кусочно-постоянных функций с упорядоченными значениями. Разработан морфологический метод идентификации таких сигналов на основе анализа формы их вейвлет-спектров. Метод подходит для распознавания сигналов от взрывов и извержений вулканов, устойчив к шуму, и не требует точного знания формы сигнала.
2. Показано, что построенная система из сдвинутых во времени N- и U-волн образует базис в пространстве дискретных сигналов конечной длины, что позволяет аппроксимировать произвольные дискретные сигналы конечной длины.
3. Разработан метод декомпозиции акустических сигналов на N- и U-волны, позволяющий представить сигнал в виде суперпозиции компонент, соответствующих отражениям от слоистых неоднородностей атмосферы, и обеспечивающий оценку ключевых параметров волн — их амплитуд, времен задержек и ширины.
4. Создан метод построения формы спектра сигналов на основе метода главных компонент. Метод позволяет автоматически выделять характерные черты вейвлет-спектров для различных классов источников и использовать их для классификации новых сигналов.
5. Разработана и обучена свёрточная нейронная сеть для классификации инфразвуковых сигналов. Сеть продемонстрировала высокую точность распознавания на реальных данных и устойчивость к шуму при обучении на синтетических примерах.
6. Создано программное обеспечение, реализующее разработанные методы обработки и анализа инфразвуковых сигналов, получены свидетельства о регистрации программ для ЭВМ в Федеральной службе по интеллектуальной собственности РФ.

Публикации по теме диссертации в рецензируемых журналах:

1. Chulichkov A.I., Tsybulskaya N.D., **Zakirov M.N.** et al. Detecting Infrasonic Signals from Impulsive Sources on the Basis of Their Wavelet Spectrum Forms // Pure and Applied Geophysics. – 2022. – V. 179. – P. 4609–4625.
2. **Закиров М.Н.**, Куличков С.Н., Чуличков А.И. [и др.]. Метод декомпозиции в задаче акустического зондирования анизотропной структуры атмосферы // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2023. – Т. 511, №1. – С. 98–104.
3. **Закиров М.Н.** Метод декомпозиции в задаче акустического зондирования анизотропной структуры атмосферы. // Ученые записки физического факультета Московского университета. – 2023.
4. **Закиров М.Н.**, Куличков С.Н., Чуличков А.И., Цыбульская Н.Д. Распознавание сигналов от импульсных источников на основе формы вейвлет-спектров, построенной методом главных компонент // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2024. – Т. 517, №2. – С. 114–118.
5. Kshevetskii S., Kulichkov S., Chunchuzov I., **Zakirov M.** et al. Nonlinear Burgers Type Equation for Acoustic Waves in the Ray Approximation in a Moving Atmosphere (Theory, Experiment) // Pure and Applied Geophysics. – 2024. – V. 181. – P. 1945–1961.
6. Косяков С.И., Куличков С.Н., **Закиров М.Н.** О развитии неустойчивости Кельвина–Гельмгольца во фронтовой области интенсивной нелинейной акустической волны в атмосфере. // Ученые записки физического факультета Московского университета. – 2025.
7. Косяков С.И., Куличков С.Н., **Закиров М.Н.** Метод «Крупных частиц» при математическом моделировании неустойчивости Кельвина–Гельмгольца в воздухе. // Ученые записки физического факультета Московского университета. – 2025.
8. Косяков С.И., Митасов Ю.А., Куличков С.Н., **Закиров М.Н.**, Буш Г.А. Распространение импульсных акустических волн в приземном слое атмосферы. Часть 1. Влияние физико-химических характеристик атмосферы на трансформацию акустических импульсов // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2025. – Т. 61, № 5. – С. 683–698.
9. Косяков С.И., Митасов Ю.А., Куличков С.Н., **Закиров М.Н.**, Буш Г.А. Распространение импульсных акустических волн в приземном слое атмосферы. Часть 2. Влияние подстилающей поверхности на форму и параметры акустических импульсов. // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2025. – Т. 61, № 6. – С. 770–785.

Другие публикации по теме диссертации:

1. Чуличков А.И., **Закиров М.Н.**, Куличков С.Н. Морфологические методы решения задач анализа инфразвуковых сигналов, распространяющихся в атмосфере Земли. // Научная конференция «Ломоносовские чтения». Секция физики. Апрель 2022. Сборник тезисов докладов / Под ред. Н.Н. Сысоева. — М.: Физический факультет МГУ, 2022, 274 с.
2. **Закиров М.Н.** Морфологические методы обнаружения инфразвуковых сигналов от импульсных источников // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2022» / М.: МАКС Пресс, 2022.
3. **Закиров М.Н.** Метод декомпозиции в задаче акустического зондирования анизотропной структуры атмосферы. // XXX Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов—2023». Секция «Физика». Сборник тезисов. — М.: Физический факультет МГУ, 2023, 1052 с.
4. Куличков С.Н., Чунчузов И.П., Попов О.Е., Чуличков А.И., **Закиров М.Н.**, Мишенин А.А., Буш Г.А., Цыбульская Н.Д., Голикова Е.В. Акустическое зондирование неоднородной структуры верхней атмосферы. Международный симпозиум «Атмосферная радиация и динамика» (МСАРД – 2023) 21 – 24 июня 2023. с. 211.
5. Кшевецкий С.П., Куличков С.Н., Чунчузов И., **Закиров М.**, Голикова Е. Расчет дальнего распространения волн от взрыва, основанный на решении уравнения типа Бюргерса на луче, и сравнение с экспериментом. Международный симпозиум «Атмосферная радиация и динамика» (МСАРД – 2023) 21 – 24 июня 2023. с. 223-224.
6. **Закиров М.Н.** Классификация акустических источников инфразвука с применением глубокого машинного обучения. // XXXI Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов–2024». Секция «Физика». Подсекция «Математическое моделирование». Сборник тезисов. — М.: Физический факультет МГУ, 2024, с. 261.
7. **Закиров М.Н.**, Чуличков А.И., Куличков С.Н. Декомпозиция сложных акустических атмосферных сигналов на части определенной формы. // 15-я Международная конференция "Интеллектуализация обработки информации", г. Гродно, Беларусь, 23–27 сентября 2024.

8. **Закиров М.Н.** [и др.]. Методы распознавания образов и нейросети для классификации источников акустических сигналов // Акустический журнал. – 2024. – Т. 70, № S1. – С. 4.
9. Попов О.Е., Чунчузов И.П., Куличков С.Н., **Закиров М.Н.**, Мишенин А.А., Лесик Н.П. Детальные измерения характеристик волны Лэмба и механизм ее генерации при извержении вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай // Сборник трудов XXXVI сессии Российского акустического общества. – М.: ГЕОС, 2024. – С. 21.
10. Куличков С.Н., Митасов Ю.А., Чунчузов И.П., Кшевецкий С.П., **Закиров М.Н.**, Попов О.Е. Слоистая структура средней атмосферы по данным акустического зондирования. // Всероссийская конференция, посвященная памяти академика Александра Михайловича Обухова «Турбулентность, динамика атмосферы и климата». 19–21 ноября 2024 года. Сборник тезисов докладов. М.: Физматкнига, 2024 – 236 с.
11. **Закиров М.Н.** [и др.]. Измерения времени распространения волны Лэмба при извержении вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай и сравнение с расчетом по данным прогнозной модели атмосферы Global Forecast System // Всероссийская конференция, посвященная памяти академика Александра Михайловича Обухова «Турбулентность, динамика атмосферы и климата». 19–21 ноября 2024 года. Сборник тезисов докладов. М.: Физматкнига, 2024 – 236 с.
12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ в Федеральной службе по интеллектуальной собственности: № 2023612037, № 2024669755, № 2024680262, № 2024669595, № 2025682560.