

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе

Санкт-Петербургский

государственный университет

С. В. Микушев

2026 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ,

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» на диссертацию Закирова Марата Нафисовича на тему «РАСПОЗНАВАНИЕ АТМОСФЕРНЫХ ИНФРАЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ МЕТОДАМИ МОРФОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ВЕЙВЛЕТ-СПЕКТРОВ», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.18 «Науки об атмосфере и климате»

Диссертация Закирова М. Н. представлена на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.18 «Науки об атмосфере и климате». Диссертация посвящена разработке 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 и, несомненно, является **важным и актуальным** научным трудом. Работа выполнена на достаточно высоком научном уровне и основана на комплексном анализе многолетних данных наблюдений инфразвуковых сигналов от импульсных источников, полученных в ИФА им. А.М. Обухова РАН, а также собранных в мировых базах данных, в частности,

в библиотеке LTIS. Представленные в диссертации результаты имеют высокую значимость как для фундаментальной науки, так и для практических применений.

Актуальность темы исследования обусловлена тем, что проблемы, связанные с мониторингом выполнения международных договоров в области безопасности, а также с исследованиями тонкой структуры атмосферы, требуют разработки новых методов, способных надёжно идентифицировать импульсные события естественного и антропогенного происхождения в условиях неопределённости формы сигнала, высокого уровня шума и ограниченного объёма априорной информации о траектории распространения инфразвуковых сигналов в атмосфере. На фоне широкого спектра природных и антропогенных шумов (микробаромы, полярные сияния, горные обвалы и др.) задача автоматизированного обнаружения и распознавания импульсных сигналов остаётся технически сложной. В этих условиях повышается значимость методов, основанных на частотно-временном анализе и морфологическом подходе, которые позволяют выявлять признаки сигналов, инвариантные к искажениям, возникающим в атмосфере. Использование в диссертации вейвлет-преобразования в сочетании с распознаванием образов и методов машинного обучения расширяет возможности автоматизации процессов обнаружения и классификации импульсных инфразвуковых событий и обеспечивает устойчивость алгоритмов к помехам.

Новизна представленного исследования заключается в разработке метода, сочетающего идеи морфологического анализа и вейвлет-преобразования для идентификации импульсных инфразвуковых сигналов. Метод устойчив к искажениям 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, который позволяет представить

любой сигнал в виде суперпозиции волн, отражённых от слоистых неоднородностей атмосферы на разной высоте, и количественно оценить параметры этих отражений.

Впервые разработана и обучена «свёрточная» нейронная сеть новой архитектуры для бинарной классификации инфразвуковых сигналов. Сеть устойчива к переобучению и обеспечивает классификацию в реальном времени. Создано новое программное обеспечение, подтвержденное свидетельствами Федеральной службы по интеллектуальной собственности.

Диссертационная работа включает введение, три главы, заключение, список литературы и приложение. Общий объем диссертации составляет 125 страниц, включая 46 рисунков. Список литературы содержит 117 наименований.

Во **введении** автор убедительно обосновывает актуальность темы, связанной с разработкой методов обнаружения импульсных инфразвуковых сигналов. Сформулированы цель и задачи исследования, перечислены основные положения, выносимые на защиту, а также отмечены научная новизна, практическая значимость и достоверность результатов.

Первая глава содержит компактный обзор методов, применяемых для исследования импульсных инфразвуковых сигналов. Автором построена модель типичной формы вейвлет-спектра импульсного инфразвукового сигнала и разработан морфологический алгоритм его обнаружения. Проведена проверка работоспособности разработанного морфологического метода на реальных записях для импульсных и непрерывных сигналов. Исследована устойчивость алгоритма к атмосферным шумовым помехам.

Во **второй главе** 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. Разработан алгоритм декомпозиции инфразвуковых сигналов: сначала грубая оценка параметров, затем уточнение методом нелинейной оптимизации. Метод позволяет обнаруживать интервалы сигналов, соответствующие отражениям от

слоистых неоднородностей. Приведены результаты применения предложенного метода декомпозиции к реальным атмосферным акустическим сигналам.

Третья глава посвящена автоматической классификации инфразвуковых сигналов методами машинного обучения. С помощью метода главных компонент построены формы вейвлет-спектров двух разных классов источников. Предложена мера схожести, позволяющая отнести анализируемый сигнал к одному из указанных классов. На синтетических данных с добавлением шума обучена «свёрточная» нейронная сеть, которая продемонстрировала устойчивую и достаточно высокую точность распознавания на реальных сигналах.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы. Особенно можно выделить, что автором разработан морфологический метод идентификации таких сигналов на основе анализа формы их вейвлет-спектров. 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. Разработана и обучена «свёрточная» нейронная сеть для классификации инфразвуковых сигналов. Работа хорошо структурирована, достаточно полно проиллюстрирована, материал диссертации изложен грамотно, ясно и последовательно. Имеются незначительные опечатки, которые не портят положительного впечатления от работы.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и заключений диссертации обусловлена тем, что 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.

Апробация работы. Основные результаты по теме диссертации изложены в 20 печатных изданиях, 9 из которых опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК, и в журналах, входящих в базы данных SCOPUS, Web of Science или Russian Science Citation Index (RSCI); 11 – в трудах конференций, получено 5 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ. В нескольких публикациях М. Н. Закиров является единственным либо первым автором. Это свидетельствует о значительном личном вкладе соискателя при выполнении диссертации. Результаты диссертационного исследования представлялись на 11 российских и международных научных конференциях и на научно-исследовательских семинарах ИФА РАН им. А. М. Обухова, МГУ им. М. В. Ломоносова и др.

Теоретическая и практическая значимость. Разработанная математическая модель формы вейвлет-спектра импульсного инфразвукового сигнала является крупным шагом в теории распознавания образов, применительно 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. Применение базиса из N- и U-волн в пространстве дискретных сигналов открывает широкие возможности 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. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации и соответствует требованиям ВАК.

При общей положительной оценке работы можно отметить следующие замечания:

1. В разделе 1.8 было бы полезно указать точные времена анализируемых взрывов и импульсов от вулканов. Это дало бы возможность

- оценки временных задержек выходных сигналов, даваемых различными применяемыми методами.
2. В разделе 2.3 линейная независимость функций, соответствующих N- и U- волнам, проверяется с помощью численных экспериментов. Это может служить некоторым основанием для практического использования, но не является строгим математическим доказательством полноты системы указанных функций.
 3. В разделе 3.6 не указано количество экспериментальных образцов, использованных при обучении разработанной нейросети.

Вышеуказанные замечания могут служить пожеланиями для дальнейших исследований и не влияют на общую положительную оценку всей работы.

Заключение

Диссертационная работа Закирова Марата Нафисовича является законченной научно-квалификационной работой, которая содержит решение ряда важных задач, связанных с исследованием особенностей распознавания инфразвуковых сигналов от импульсных источников на фоне шумов атмосферного и инструментального происхождения. Работа соответствует паспорту специальности 1.6.18 «Науки об атмосфере и климате» и требованиям пп. 9–14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (с изменениями и дополнениями), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а её автор, Марат Нафисович Закиров, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.18 «Науки об атмосфере и климате».

Отзыв подготовлен докторами физико-математических наук по специальности 25.00.29 «Физика атмосферы и гидросферы», профессорами кафедры физики атмосферы Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» Гавриловым Николаем Михайловичем и Ковалем Андреем Владиславовичем.

Доклад по диссертации заслушан, отзыв рассмотрен и одобрен на заседании кафедры физики атмосферы Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» 19.02.2026, протокол № 44/12/13-02-1.

Согласны на обработку персональных данных при размещении отзыва в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет».

Заведующий кафедрой физики атмосферы СПбГУ
доктор физико-математических наук,
профессор,

Е.Ф. Михайлов

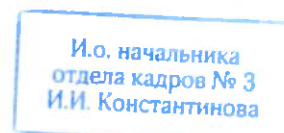
Доктор физико-математических наук,
профессор кафедры физики атмосферы СПбГУ

Н. М. Гаврилов

Доктор физико-математических наук,
профессор кафедры физики атмосферы СПбГУ

А.В. Коваль

Подписи заверяю: *Е.Ф. Михайлов, Н.М. Гаврилов, А.В. Коваль*



Konstantinova

Сведения о ведущей организации

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

Адрес: 199034, Санкт-Петербург, Университетская набережная, д. 7-9.

Телефон (812) 328-97-01, e-mail: spbu@spbu.ru