

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Чупина Владимира Александровича

на диссертационную работу **Закирова Марата Нафисовича**

«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

Актуальность диссертационной работы обусловлена несколькими факторами, имеющих как научное, так и прикладное значение. Многие природные и техногенные явления генерируют инфразвук, который при наличии акустического волновода может распространяться на расстояния в тысячи километров. Тема распознавания сигналов от импульсных источников особенно важна в контексте глобального мониторинга природных и техногенных катастроф, верификации международных договоров (например, ДВЗЯИ), а также раннего оповещения о взрывах, извержениях вулканов и других явлениях.

В настоящее время международная система мониторинга (IMS) действует в 89 странах и включает 321 станцию. Ежегодно регистрируются миллионы событий, но идентифицируются только десятки тысяч. Современные системы мониторинга работают непрерывно, обрабатывая большие объёмы данных, выявление из этого потока реальных геофизических событий по-прежнему требует участия человека, именно эта особенность становится узким местом всей цепочки мониторинга, что приводит к задержкам и снижает эффективность оперативного реагирования.

Традиционные методы обнаружения инфразвуковых событий обладают рядом принципиальных ограничений: они чувствительны к коррелированному шуму, требуют многоканальных записей и зачастую не используют форму сигнала как устойчивый инвариант. Всё это делает необходимым поиск новых подходов, поэтому исследование является своевременным и актуальным.

Состав и содержание диссертационной работы

Диссертационная работа Закирова М.Н. состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 117 ссылок и 1 приложения. Объем работы составляет 125 страниц, включая 46 рисунков.

Во **введении** сформулированы актуальность, цель и задачи, обосновывается применение морфологического анализа и машинного

обучения. Приводятся научная новизна, защищаемые положения, практическая и теоретическая значимости, аргументы в пользу достоверности результатов. Отмечены личный вклад автора, количество публикаций, список конференций, благодарности и содержание диссертации.

В **первой главе** построена модель формы вейвлет-спектра импульсного сигнала как кусочно-постоянного изображения с упорядоченной яркостью. Введена метрика схожести, устойчивая к монотонным искажениям амплитуды. Разработан алгоритм выявления ярких пятен на спектрах; на реальных данных достигнута метрика $AUC \approx 0.87$. Проверена устойчивость к аддитивному шуму и отклик метода на неимпульсные сигналы.

Во **второй главе** показано, что система сдвинутых во времени N- и U-волн образует базис в пространстве дискретных сигналов конечной длины. Разработан двухэтапный алгоритм декомпозиции: решение СЛАУ для грубой оценки амплитуд с последующей нелинейной оптимизацией параметров (время прихода, ширина, амплитуда).

В **третьей главе** с помощью метода главных компонент построены формы вейвлет-спектров для двух классов как статистический центр масс выборки. Введена мера схожести и определены пороги принятия решений. Разработана и на синтетических данных обучена свёрточная нейронная сеть, показавшая высокую точность классификации при работе на реальных записях без переобучения.

Заключение в диссертации и автореферате представлено 6 пунктами, в которых автор делает выводы, соответствующие цели и задачам исследования.

Достоверность результатов исследования

Полученные результаты были верифицированы на достаточно большом объёме данных, и поэтому являются **достоверными** и **обоснованными**. В работе использованы многократно проверенные методы морфологического анализа, разработанные школой проф. Ю.П. Пытьева. Проведённое исследование не противоречит результатам других авторов.

Научная новизна полученных результатов

Основной научный результат, полученный соискателем, состоит в разработке новых методов, которые в совокупности не имели аналогов в мировой литературе. Работа интегрирует известные подходы к анализу данных в новом контексте применительно к задачам физики атмосферы.

К наиболее важным результатам, определяющим научную новизну диссертационной работы, следует отнести:

1) математическая модель формы вейвлет-спектра импульсного сигнала как выпуклого конуса в пространстве квадратично интегрируемых функций с упорядоченной яркостью;

2) метод классификации сигналов от импульсных источников на основе морфологического анализа вейвлет-спектров. Алгоритм классификации основан на сравнении вейвлет-спектра зарегистрированного сигнала по форме с эталоном;

3) метод декомпозиции акустического сигнала на составляющие известной формы в виде так называемых N- и U-волн, получены явные формулы для спектральных максимумов и разработан быстрый двухэтапный алгоритм декомпозиции сигнала на компоненты заданной формы, показана полнота построенной системы функций;

4) класс статистических эталонов (РСА-форм) для вейвлет-спектров, позволяющий автоматически определять характерные признаки, свойственные каждому из классов.

Личный вклад автора

Все выносимые на защиту положения основаны на результатах, полученных автором лично. Автор принимал непосредственное участие в постановке задач, подготовке данных, разработке новых моделей и создании компьютерных программ, расчётах, интерпретации и визуализации результатов.

Научная и практическая значимость результатов работы

Научная значимость диссертационного исследования заключается в разработанном методе обнаружения сигналов импульсных источников по акустическим записям. Метод позволяет локализовывать во времени события крупной энергии. Декомпозиция сигнала на N- и U-волны в перспективе может развить альтернативный подход к оцениванию высоты атмосферных слоёв, от которых происходят отражения сигнала, без радиолокации и лидаров, что может быть полезно для решения обратных задач.

Практическая значимость результатов работы заключается в следующем:

- разработаны алгоритмы для идентификации сигналов от импульсных источников, возможность распараллеливания и работы в реальном времени делает метод пригодным для систем раннего оповещения о техногенных взрывах и извержений вулканов;

- получена аналитическая связь между временной шириной N-волны и максимумом Фурье спектра;

- предложен способ определения формы сигналов с использованием метода главных компонент, метод можно использовать для построения формы других сигналов;

- показано, что синтетического обучения нейронной сети с помощью аугментации шумом достаточно для высокой точности на реальных записях – важный результат для задач геофизики, в которых мало данных.

Основные достоинства диссертационной работы

Автором предложен новый подход к решению задачи обнаружения сигналов от импульсных источников.

Диссертация выполнена на высоком научном уровне: текст изложен грамотным, строгим языком, логично структурирован и демонстрирует широкую эрудицию автора, уверенное владение материалом и знание как собственно проблематики исследования, так и смежных наук.

Выводы и положения твёрдо обоснованы, диссертация является законченным научно-исследовательским трудом, оформленным на высоком уровне в соответствии с требованиями ВАК.

Замечания по диссертационной работе в целом

1. Значение порога (см. формулу 29) целесообразно определять на основе расширенной статистики наблюдений с учетом компромисса между вероятностью ложных срабатываний и пропусков сигнала. Дополнительного анализа требует зависимость оптимального порога от характеристик регистрирующего оборудования и уровня фонового шума.

2. Представляет интерес оценка частоты ложных срабатываний алгоритма при обработке длительных реализаций сигнала в условиях воздействия внешних факторов — скачков и перебоев напряжения и др.

3. Ширина скользящего окна определяется путём перебора; целесообразно разработать метод эффективной оценки диапазона допустимых значений.

4. В некоторых местах присутствуют небольшие стилистические ошибки и опечатки.

Заключение

Вышесказанные замечания носят частный характер и не снижают общей положительной оценки диссертации, которая является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему и содержащей новые научно обоснованные решения по анализу сигналов.

Выполненная работа характеризует соискателя как сложившегося исследователя, умеющего самостоятельно ставить и решать научные задачи.

Полученные в работе выводы и результаты соответствуют поставленным целям и задачам, обоснованы теоретическими и экспериментальными исследованиями, достоверны и апробированы на международных российских и зарубежных конференциях и симпозиумах. Основные результаты опубликованы в 9 работах в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертационных исследований, или приравненных к ним изданиях.

Автореферат и публикации соответствуют содержанию диссертации. Структура работы логична, разделы взаимосвязаны.

Диссертационная работа Закирова М.Н. соответствует паспорту специальности 1.6.18 – Науки об атмосфере и климате и пп. 9-14 Положения «О порядке присуждения ученых степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор заслуживает присуждения ему степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент,

Чупин Владимир Александрович,

доктор физико-математических наук
(специальность 1.3.7 – Акустика)

Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Тихоокеанский
океанологический институт им. В.И. Ильичева
Дальневосточного отделения Российской академии
наук, заведующий лабораторией физики геосфер.
690041, Россия, Приморский Край, г. Владивосток,

ул. Балтийская, 43
Тел.: +7 (914) 790-8143
<https://www.poi.dvo.ru/>
E-mail: chupin@poi.dvo.ru

«10» февраля 2026 г.

Чупин Владимир Александрович

Подпись д.ф.-м.н. В.А. Чупина заверяю.

Ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения
науки Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева
Дальневосточного отделения Российской академии наук (ТОИ ДВО РАН)

К.Г.Н.



Клещёва Татьяна Игоревна