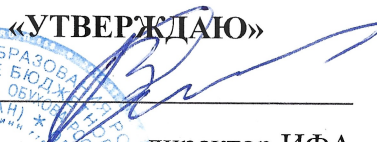


«УТВЕРЖДАЮ»

директор ИФА
им. А. М. Обухова РАН
академик РАН Семенов В. А.
16 октября 2025 г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института
физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук

Диссертационная работа Закирова М. Н. «Распознавание атмосферных инфразвуковых сигналов импульсных источников методами морфологического анализа вейвлет-спектров» выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики атмосферы им. А. М. Обухова Российской академии наук (ИФА РАН). В период подготовки диссертации соискатель работал в радиоакустической лаборатории в ИФА РАН.

В 2022 году соискатель окончил обучение по магистерской программе на кафедре математического моделирования и информатики физического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, а в 2022-2025 гг. проходил обучение по программе аспирантуры в ИФА РАН.

Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов выдано ИФА РАН соискателю в 2025 году.

Научный руководитель — доктор физико-математических наук, Куличков Сергей Николаевич.

По результатам рассмотрения диссертации Закирова М. Н. «Распознавание атмосферных инфразвуковых сигналов импульсных источников методами морфологического анализа вейвлет-спектров» принято следующее заключение:

Диссертационная работа Закирова М. Н. посвящена разработке новых математических моделей для анализа данных регистрации акустических сигналов, распространяющихся в атмосфере, а также соответствующих технологий их обработки.

Актуальность работы обусловлена тем, что инфразвуковые сигналы от импульсных источников (таких как вулканы, землетрясения) могут

распространяться на тысячи километров, но их обнаружение затруднено искажениями в атмосфере и сильным фоновым шумом. Современные методы анализа требуют многоканальной регистрации, больших вычислительных ресурсов или размеченных данных, что ограничивает их применимость. Нахождение инвариантов, свойственным сигналам от импульсных источников, позволило бы эффективнее обнаруживать и классифицировать такие сигналы. Разработка данных подходов особенно важна для автоматизированных систем мониторинга.

Целью работы является разработка новых математических моделей и вычислительных методов для анализа и распознавания инфразвуковых сигналов от импульсных источников на основе морфологического анализа вейвлет-спектров, устойчивых к искажениям сигналов в условиях неопределенности атмосферных параметров и фоновых помех; метода декомпозиции сложного акустического сигнала на составляющие заданной формы; автоматическое построение усредненной формы сигналов двух классов по реальным записям.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи: проведен анализ нескольких наборов акустических сигналов на проверку целостности, удаление пропусков в экспериментальных данных; изучены известные в литературе в настоящее время методы классификации сигналов; исследованы характерные особенности вейвлет-спектров сигналов от различных источников; на основе наблюдений за спектрами предложена математическая модель формы изображения спектра сигнала от импульсного источника; поставлена и решена задача обнаружения акустического сигнала от импульсного источника; разработано программное обеспечение, вычисляющее морфологическую схожесть изображений; проведены вычислительные эксперименты; предложено несколько вариантов форм, аппроксимирующих спектрограмму, выбран наиболее оптимальный вариант; исследована устойчивость работы метода в условиях, когда сигнал представляет собой смесь сигналов от двух источников разной природы; разработан метод декомпозиции сигнала на N- и U-составляющие, которые моделируют форму сигналов при нелинейном распространении акустических волн в атмосфере; методом главных компонент определена форма сигналов, соответствующих каждому из двух источников, решена задача многоклассовой классификации.

Из результатов, выносимых соискателем на защиту, следует отметить: метод идентификации инфразвуковых сигналов от импульсных источников, основанный на морфологическом анализе формы фрагментов изображений вейвлет-спектров; метод декомпозиции акустических сигналов на N- и U-

волны, позволяющий представить зарегистрированный сигнал в виде суперпозиции компонент, соответствующих отражениям от слоистых неоднородностей атмосферы, метод обеспечивает оценку параметров волн (амплитуда, время задержки, ширина) и может быть использован для акустического зондирования атмосферы; показано, что система функций, образованная сдвинутыми во времени N- и U-волнами, образует базис в пространстве дискретных сигналов конечной длины на равномерной сетке; алгоритм построения формы изображений вейвлет-спектров на основе метода главных компонент, нейросеть для классификации акустических сигналов.

Все научные результаты, представленные в диссертационной работе, получены автором лично или в соавторстве с научным руководителем, д.ф.-м.н. Куличковым С. Н. Соискателю принадлежит ведущая роль в постановке задач диссертационного исследования, подготовке публикаций полученных результатов в научных журналах, а также их представлении на конференциях и семинарах. Текст диссертации полностью написан автором.

Полученные результаты докладывались соискателем на российских и международных конференциях и семинарах: научная конференция «Ломоносовские Чтения» (Москва, МГУ, 2022), международная конференция «Ломоносов» (Москва, 2022-2024), международный ежегодный симпозиум «Атмосферная радиация и динамика» (МСАРД – 2023, Санкт-Петербург, 2023), международная конференция «Интеллектуализация обработки информации» (Гродно, 2024), Всероссийская научная конференция «XXXVI сессия Российского акустического общества» (Москва, 2024), Всероссийская конференция, посвященная памяти академика Александра Михайловича Обухова «Турбулентность, динамика атмосферы и климата» (Москва, 2024), Международная научно-практическая конференция по экологии и вопросам изменения климата ICESS 2025 (Сочи, 2025), доклады на семинарах и ученых советах ИФА РАН о методах обработки акустических сигналов (Москва, 2025).

Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 9 работах, все 9 из них в журналах, индексируемых базами данных Web of Science, Scopus и ВАК.

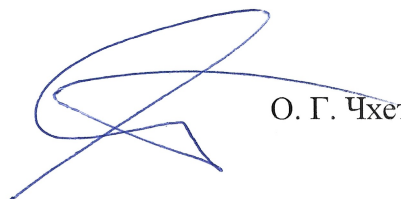
Диссертация Закирова М. Н. представляет собой законченное научное исследование, актуальна и выполнена на высоком научном уровне. Полученные автором результаты достоверны, сделанные по ним выводы обоснованы.

Работа отвечает требованиям, предъявляемым ВАК Минобрнауки России к кандидатским диссертациям, предусмотренных пунктами 9-14 Положения о порядке присуждения ученых степеней.

Диссертация «Распознавание атмосферных инфразвуковых сигналов импульсных источников методами морфологического анализа вейвлет-спектров» Закирова Марата Нафисовича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.18 – «Науки об атмосфере и климате».

Заключение единогласно принято на заседании отдела динамики атмосферы ИФА РАН 7 октября 2025 года, на котором были представлены основные результаты диссертации Закирова М. Н. На заседании присутствовало 24 человека, включая 7 докторов наук и 8 кандидатов наук.

Зам. дир. по научной
работе ИФА РАН, д.ф.-м.н.



О. Г. Чхетиани