

На правах рукописи



Волков Юрий Викторович

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ КЛАСТЕРИЗАЦИИ
ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, МОДЕЛИРУЕМЫХ
КВАЗИГАРМОНИЧЕСКИМИ КОЛЕБАНИЯМИ**

1.2.2. – Математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Томск – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук» (ИМКЭС СО РАН).

Научный консультант: **Тартаковский Валерий Абрамович**, доктор физико-математических наук, ФГБУН «Институт мониторинга климатических и экологических систем» Сибирского отделения Российской академии наук, главный научный сотрудник, лаборатория биоинформационных технологий, заведующий лабораторией

Официальные оппоненты: **Уварова Людмила Александровна**, доктор физико-математических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», кафедра прикладной математики, заведующий кафедрой

Зоркальцев Валерий Иванович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Байкальский государственный университет», лаборатория математического моделирования, заведующий лабораторией

Марков Николай Григорьевич, доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», отделение информационных технологий Инженерной школы информационных технологий и робототехники, профессор-консультант

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

Защита состоится «09» декабря 2026 г. в 14:00 в ауд. 3П на заседании диссертационного совета 24.2.401.03 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» по адресу: 654007, Кемеровская область – Кузбасс, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на официальном сайте ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» www.sibsiu.ru.

Автореферат разослан «_____» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.401.03,
к.т.н., доцент



Сеченов Павел
Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одной из важнейших современных проблем является глобальное изменение климата, влияющее на природные процессы, отражающееся на состоянии животного и растительного мира и тесно связанное с социально-экономическим развитием, условиями жизни и здоровьем людей. Актуальность разработки моделей и численных методов для исследования природно-климатических процессов заключается в возможности создания математического аппарата для комплексной оценки климатических изменений, что обосновано национальным приоритетом, отражённым в Климатической доктрине Российской Федерации. Климат оказывает влияние на природные процессы на глобальном, региональном и субрегиональном уровнях. Комплексное исследование климата возможно при использовании методов, позволяющих получать оценки его изменчивости для отдельных уровней дифференциации на разных пространственных и временных масштабах. Развитие таких методов направлено на поиск климатически обусловленных закономерностей, позволяющих разделить климат на группы – климатические классы. Классификация климатов необходима для решения вопросов рационального природопользования и обеспечения оптимального социально-экономического развития, для перехода от пассивного реагирования на изменения климата к стратегическому маневрированию ресурсами регионов.

Изучение климата основывается на анализе долговременной изменчивости статистических оценок метеорологических величин: температуры, влажности воздуха, атмосферного давления и других. Информация об изменчивости значений этих величин собирается в результате инструментальных измерений на распределённой по территории земного шара сети метеорологических станций, в процессе анализа биоиндикаторов и палеоклиматических данных, а также другими методами. В основу работы положено представление о том, что статистические оценки изменчивости метеорологических величин для длительных временных периодов являются климатическими характеристиками, колебания значений которых, в силу сложности и нелинейности климатических и связанных с ними природных процессов, обладают нестационарностью. При определенных условиях они могут быть адекватно аппроксимированы квазигармоническими колебаниями, модулированными по амплитуде и фазе.

На современном этапе не разработана полная математическая теория квазигармонических колебаний. Для работы с реальными характеристиками природно-климатических процессов требуется создание нетривиальных численных методов анализа квазигармонических колебаний. Нелинейность, присущая природно-климатическим процессам, приводит к существенному расширению частотного спектра колебаний значений климатических характеристик, что создаёт сложность для применения классической теории квазигармонических колебаний и требует оптимизации параметров модуляции.

В результате наблюдений накоплены большие массивы данных о колебаниях значений характеристик природно-климатических процессов,

собранных для разных природных территорий за длительные периоды времени. Использование этих данных для выделения общих закономерностей природно-климатических процессов и построения климатических классов требует развития методов кластерного анализа. Традиционные методы кластеризации используют априорные знания о количестве и структуре кластеров. В условиях же наличия глобальных трендов климатических изменений необходимо развитие методов кластеризации без какой-либо априорной информации о кластерах.

Актуальным является решение крупной научной проблемы, направленной на разработку системы математических методов и алгоритмов моделирования и идентификации элементов квазигармонических колебаний и их кластеризации для анализа нестационарных пространственно-неоднородных процессов. Решение данной проблемы имеет важное народнохозяйственное значение, так как обеспечивает возможность на основе использования реальных данных об изменчивости природно-климатических характеристик (полученных в результате инструментальных измерений, использования методов биоиндикации и изучения палеоклиматической информации) оперативно, в автоматическом режиме, выделять климатически обусловленные региональные закономерности, на их основе формализовать структуру региональных климатических изменений и выделять климатические классы. Особая значимость заключается в возможности обеспечения системного анализа климата и исследования его изменчивости в разных пространственно-временных масштабах с учётом взаимосвязей между климатическими изменениями и состоянием объектов окружающей природной среды. В силу глобальности влияния климатических изменений на различные природные процессы, разрабатываемые численные методы и модели для исследования колебаний климатических характеристик будут иметь широкую область применения и обеспечат основу для создания новых методов комплексного анализа и оценки климатических и иных, связанных с климатом процессов, необходимых при принятии управленческих решений.

Степень разработанности темы.

Численные методы, разрабатываемые для исследования и оценки климатических изменений, должны обеспечивать построение классификации климатов в рамках климатической системы. Известно, что климатические изменения сопровождаются трансформацией геофизических полей различных климатических характеристик, в результате которых на поверхности Земли формируются климатические зоны. Выявление зон со сходными климатическими особенностями является основой классификации климатов. Эволюция подходов к анализу и классификации климатов прошла путь от эмпирико-статистических методов до построения сложных динамических моделей. Простые классификации климатов по температуре воздуха появились в конце XIX в. (Supan A., 1879). Позже были созданы классификации, основанные на комплексе метеорологических характеристик (Körppen W., 1918, 1936). Определяющая роль в развитии «классических» классификаций климатов принадлежит В. П. Кеппену, А. И. Воейкову,

Л. С. Бергу, Б. П. Алисову, А. А. Григорьеву, М. И. Будыко. В «классических» классификациях классы построены на основе количественных критериев тепло-влажностного режима с учётом ландшафтных особенностей территории (Körppen W., 1918), на учёте ландшафтно-географических зон суши (Григорьев А. А., 1956), по среднему положению климатических фронтов (Алисов Б. П., 1974). «Классические» методы требуют значительных затрат времени, что не обеспечивает оперативность получения информации в условиях быстрых климатических изменений. В настоящее время в научных работах авторов (Кирста Ю. Б. и др., 2014; Салугашвили Р. С., 2012; Unal Y., et al., 2003; DeGaetano A. T., 2001; Zappala D. A., 2020) развиваются методы классификации климатов по оценкам измеренных климатических характеристик, применяется теория колебаний. В современных работах по созданию классификаций климатов для определения закономерностей используется методология кластерного анализа (Катаев С. Г. и др., 2014; Закусиллов В. П. и др., 2009; Кондратюк В. И. и др., 2003). Обзор существующих методов показывает, что для решения научной проблемы и оперативной классификации климатов необходимо обобщение формализованного подхода, обеспечивающего разработку математических моделей элементов климата в форме квазигармонических колебаний. Требуется создание численного метода анализа динамических свойств квазигармонических колебаний, сформированных в сложных нелинейных системах, подобных климатической системе, и разработка численного метода кластеризации для выделения типовых закономерностей, реализующего определение климатических классов без априорной информации и применимого для проведения оперативного пространственно-временного анализа климатических данных.

Цель состоит в разработке математических методов, алгоритмов и программного комплекса для математического моделирования, идентификации элементов и кластеризации квазигармонических колебаний, обеспечивающих пространственно-временной анализ нестационарных процессов и формализацию структуры региональных климатических изменений на основе климатических данных, полученных способом инструментальных измерений, методами биоиндикации и в результате изучения палеоклиматической информации.

Задачи:

1. Разработать математическую модель изменения среднемесячных значений приземной температуры в форме квазигармонического колебания. Разработать математическую модель в форме квазигармонического колебания для изменения значений прироста трахеид дендроиндикатора, элементы которой описывают изменения значений приземной температуры.

2. Разработать численный метод для вычисления элементов квазигармонического колебания на основе анализа свойств характеристик, моделирующих климатические и биоклиматические процессы. Найти условие применения аналитического сигнала (АС) для вычисления амплитуды и фазы. Получить оценки колебаний средних значений приземной температуры на основе свойств модели прироста дендроиндикатора.

3. Разработать численный метод кластеризации квазигармонических колебаний, обеспечивающий поиск типовых закономерностей без какой-либо априорной информации. Применить метод кластеризации для исследования колебаний климатических характеристик. Выделить климатически обусловленные региональные закономерности в виде типовых функций, пригодных для сокращения размерности климатической информации и построения климатических классов.

4. Провести численное исследование сходимости разработанного метода кластеризации и интерпретацию результатов применения метода к реальным данным.

5. Создать с использованием разработанных методов новый программный комплекс, реализующий вычисление элементов моделей в форме квазигармонических колебаний, их исследование и классификацию.

Объектом являются динамические природно-климатические процессы, характеризующиеся нестационарностью и пространственной неоднородностью, отражающие климатические изменения.

Предметом являются математические модели и численные методы идентификации элементов и кластеризации квазигармонических колебаний, а также программный инструментарий для автоматизированного анализа пространственно-неоднородных природно-климатических данных.

Научная новизна

В области математического моделирования: Разработаны теоретические основы математического моделирования нестационарных природно-климатических процессов, представляемых в форме квазигармонических колебаний, с применением аналитического сигнала при выполнении условия монотонности фазы колебаний. Впервые изменения среднемесячных значений приземной температуры во времени представлены на основе АС в виде модели квазигармонического колебательного процесса, модулированного по амплитуде и фазе в зависимости от географической широты. Впервые создана на основе АС математическая модель непрерывного радиального прироста трахеид дендроиндикатора, связывающая радиальный прирост с колебанием значений климатической характеристики.

В области численных методов: Разработан численный метод для вычисления элементов квазигармонического колебания. Метод позволяет в автоматическом режиме вычислять амплитудную и фазовую модуляцию моделей природно-климатических процессов в форме квазигармонических колебаний на основе оптимизации полосы их частотных спектров. Предложен итерационный метод кластеризации для вычисления типовых характеристик кластеров, формируемых квазигармоническими моделями природно-климатических процессов, в отличие от существующих методов кластеризации, без априорной информации о количестве кластеров. Разработан алгоритм распознавания графических образов сложных кольцевых структур путем разделения изображения на области однородности и алгоритм синхронизации хронологических рядов.

В области комплексов программ: Разработан проблемно-ориентированный программный комплекс (ПК) для численного моделирования и пространственно-временного анализа свойств квазигармонических колебаний в неоднородных системах. В ПК реализовано визуальное программирование, позволяющее на основе визуальных расчетных компонентов, выполняющих предложенные в работе методы, обеспечить реализацию численных экспериментов и классификацию климатов.

Теоретическая значимость заключается в развитии методов кластерного анализа природно-климатических процессов, представляемых моделями в форме квазигармонических колебаний. Разработанные методы расширяют теоретическую базу для пространственно-временного анализа нестационарных процессов.

Практическая значимость результатов заключается в создании и внедрении программного комплекса, реализующего предложенные численные методы и позволяющего решать задачу исследования свойств квазигармонических колебаний для изучения сложных нестационарных процессов, а также задачу оперативной климатической классификации для оценки климатических изменений и информационного обеспечения управленческих решений при реализации хозяйственной деятельности и развитии рационального природопользования. Полученные результаты направлены на создание новых автоматизированных технологий непрерывного мониторинга климата в условиях его изменений. Разработанные методы могут быть рекомендованы к внедрению в организациях гидрометеорологии, природоохранных и лесохозяйственных учреждениях, организациях аграрного сектора экономики, а также при подготовке специалистов в областях вычислительных технологий, метеорологии, климатологии и экологии в высших учебных заведениях РФ.

Методология и методы. В работе применялись методы численного моделирования, реализованы методы кластерного, корреляционного и спектрального анализа сигналов, проведён статистический анализ результатов. При разработке комплекса программ использовались методы объектно-ориентированного и визуального программирования.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Математические модели в форме квазигармонических колебаний, разработанные на основе АС с монотонно изменяющейся фазой, для описания изменений среднемесячных значений приземной температуры и прироста трахеид дендроиндикатора. Свойства модели в применении к колебаниям значений приземной температуры обеспечивают реализацию и интерпретацию классификации климатов. Свойства модели в применении к колебаниям ширины годичных слоев дендроиндикатора позволяют исследовать радиальный рост дерева и восстанавливать на его основе климатические характеристики в период вегетации, пригодные для климатической классификации и датировки палеоклиматической информации. (*Направление исследований: 4. Разработка новых математических методов и алгоритмов интерпретации натурного эксперимента на основе его математической модели*).

2. Численный метод вычисления элементов модели в форме квазигармонического колебания, позволяющий определить амплитудные и фазовые модуляции, включающий оптимизацию спектральной полосы анализируемого колебания в Фурье-области. Метод обеспечивает при исследовании колебаний среднемесячных значений приземной температуры вычисление амплитуды и фазы, при исследовании колебаний ширины годовых слоев дендроиндикатора определение вариаций радиального роста трахеид, а также позволяет производить датировку палеоклиматических данных. *(Направление исследований: 4. Разработка новых математических методов и алгоритмов интерпретации натурного эксперимента на основе его математической модели).*

3. Численный метод кластеризации, использующий принцип синхронности, из которого следует связь элементов кластера с его типовой характеристикой, определяемой в итерационном сходящемся процессе, который приводит к разделению данных на отдельные кластеры без априорной информации об их количестве. Вычисляемая в методе типовая характеристика определяет математическую модель кластера, позволяет рассчитать оценки тесноты взаимосвязей между кластерами и получить интерпретацию их структуры. *(Направление исследований: 4. Разработка новых математических методов и алгоритмов интерпретации натурного эксперимента на основе его математической модели).*

4. Сходимость в разработанном методе кластеризации к конечному числу типовых функций, экспериментально подтвержденная в численном эксперименте при кластеризации массивов колебаний, полученных путем численного моделирования, в результате которого алгоритм обеспечил устойчивую работу до отношения аддитивного шума к эталонному сигналу 60 % при значении ошибки менее 45 %. *(Направление исследований: 9. Постановка и проведение численных экспериментов, статистический анализ их результатов, в том числе с применением современных компьютерных технологий).*

5. Численный алгоритм распознавания графических образов сложных кольцевых структур, использующий сегменты однородности, определяемые разработанным методом кластеризации. При исследовании картины годовых слоев дендроиндикатора алгоритм позволил в два и более раза повысить точность вычисления значений прироста и связанных климатических характеристик по сравнению с результатами существующих методов. *(Направление исследований: 2. Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий).*

6. Программный комплекс в виде интерактивного приложения, в котором на основе разработанных визуальных расчетных компонентов реализованы предложенные в работе численные методы, включая параллельную реализацию, для исследования квазигармонических колебаний, обеспечивающий решение задачи климатической классификации. Созданная в программном комплексе параллельная реализация для предложенных методов

позволила достичь увеличения вычислительной производительности в 6,5 раза. *(Направление исследований: 3. Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента).*

Внедрение результатов работы:

1. Разработанный программный комплекс «Климатоэкологического мониторинга» используется в Институте мониторинга климатических и экологических систем СО РАН в составе распределённого комплекса климатического и экологического мониторинга.

2. Программный комплекс «Климатоэкологического мониторинга» использован в ОГБУ «Областной комитет охраны окружающей среды и природопользования» для расширения возможностей аналитической системы оперативного регионального мониторинга метеорологических параметров.

3. Разработанный программный комплекс «Климатоэкологического мониторинга» (ПК КЭМ) используется в Институте динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН. ПК КЭМ включен в единую систему цифрового мониторинга Байкальской природной территории, созданную в рамках выполнения Крупного научного проекта Министерства науки и высшего образования РФ «Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории».

4. Разработанный алгоритм выделения климатических характеристик из дендроиндикаторов и алгоритм синхронизации хронологических рядов использованы в Сибирском институте физиологии и биохимии растений СО РАН (г. Иркутск) в рамках выполнения научно-исследовательских работ для восстановления временных периодичностей длительных хронологических рядов индикационных показателей, полученных из разных природных сред.

5. Разработанный метод кластеризации, применяемый для сокращения объемов массивов данных и исследования закономерностей, и его параллельная реализация, обеспечивающая сокращение времени выполнения вычислений, использованы в учебном процессе в ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» для студентов Инженерной школы информационных технологий и робототехники, обучающихся по направлениям: 09.03.01 – «Информатика и вычислительная техника» (бакалавриат), 09.04.01 – «Информатика и вычислительная техника» (магистратура).

Результаты работы применялись в следующих НИР:

1. Крупный научный проект Министерства науки и высшего образования РФ: «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды», соглашение № 075-15-2024-533, 2024 г.

2. Крупный научный проект Министерства науки и высшего образования РФ: «Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга

и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории», соглашение № 075-15-2020-787, 2020 г.

3. «Мониторинг предвестников изменений состояния геосферы, представляющих вызовы для территории», грант РФФИ 18-47-700005\18, 2018–2021 гг.

4. «Разработка алгоритмов и анализ согласованности природно-климатических процессов по данным инструментальных измерений и изотопной биоиндикации», ФАНО №0369-2016-0010, 2017-2020 гг.

5. «Разработка и исследование интеллектуальной информационно-аналитической системы для анализа и прогноза природно-климатических процессов на основе высокопроизводительных кластеров», программа фундаментальных исследований Президиума РАН, (ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН) №I.33П, 2016 г.

6. «Разработка и исследование интеллектуальной информационно-аналитической системы для анализа и прогноза природно-климатических процессов на основе высокопроизводительных кластеров», программа фундаментальных исследований Президиума РАН, (ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН) №43П, 2014 г.

7. «Методы измерения и алгоритмы совместного анализа природно-климатических процессов», программа СО РАН №0369-2014-0008, 2013-2017 гг.

8. «Создание базы данных об экологическом состоянии Томского региона с использованием новых математических моделей годовых колец деревьев как биоиндикаторов». Грант РФФИ 05-07-98009-р, 2005-2007 гг.

Степень достоверности результатов научного исследования обеспечивается анализом работ по данной тематике, корректностью использованных методов, результатами численного эксперимента с необходимым объемом выборки, малой дисперсией при обработке экспериментальных данных, а также обоснованными предположениями и выводами.

Апробация материалов диссертации проходила на 44 профильных всероссийских и международных конференциях и симпозиумах: «Korea-Russia International Symposium on Science and Technology – KORUS» (г. Томск, 2004 г.), «International Forum on Strategic Technology – IFOST» (г. Томск, 2012 г., г. Новосибирск, 2016 г.), «Международная конференция и школа молодых ученых. «Вычислительные и информационные технологии для наук об окружающей среде» – CITES» (г. Москва, 2019 г., г. Звенигород, 2017 г.), «Международный симпозиум «Оптика Атмосферы и Океана. Физика Атмосферы»» (г. Томск, 2003 г., г. Иркутск, 2007 г., г. Новосибирск, 2014 г., г. Томск, 2015 г., 2016 г., г. Иркутск, 2017 г., г. Томск, 2018 г., г. Новосибирск, 2019 г.), «Международный симпозиум «Контроль и реабилитация окружающей среды»» (г. Томск, 2002 г., 2004 г., 2008 г.), «Международная конференция по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды – Enviromis» (г. Томск, 2002 г., 2004 г., 2014 г., 2016 г.), «Международная дендрохронологическая конференция «РусДендро»»

(г. Екатеринбург, 2011 г., Киргизия, г. Иссык-Куль, 2014 г., г. Барнаул, 2017 г.), «Международный научный симпозиум им. академика М.А. Усова. «Проблемы геологии и освоение недр»» (г. Томск, 2002 г., 2003 г., 2005 г., 2007 г.), «Международная научная конференция «Интегрированная система мониторинга Черного и Азовского морей»» (г. Севастополь, 2013 г.), «Международная научная конференция «Системы контроля окружающей среды»» (г. Севастополь, 2017 г.), «Девятый международный зимний симпозиум и школа по хемометрике «Современные методы анализа многомерных данных»» (г. Томск, 2014 г.), «Всероссийская научная конференция с международным участием «Новые методы в дендроэкологии»» (г. Иркутск, 2007 г.), «Всероссийская научно-техническая конференция. «Энергетика: экология, надежность, безопасность»» (г. Томск, 2001 г., 2013 г., 2015 г.), «Девятая Сибирская конференция по параллельным и высокопроизводительным вычислениям» (г. Томск, 2015 г., 2017 г.), «Сибирское совещание по климатологическому мониторингу» (г. Томск, 2001 г., 2003 г., 2009 г., 2011 г., 2013 г., 2015 г., 2017 г., 2019 г.).

Публикации по теме диссертации. Основные результаты исследования опубликованы в 46 печатных работах, включая 29 статей в научных изданиях, в том числе 15 статей в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора наук, 17 статей в изданиях, индексируемых в международных базах Web of Science или Scopus. Получено 6 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ, 4 акта о внедрении результатов. По теме диссертации издана 1 монография.

Личный вклад автора. Основные результаты диссертационного исследования получены автором. Постановка цели и задач различных этапов научного исследования, поиск методов и подходов были осуществлены автором. Создание математического описания, разработка методов и алгоритмов, анализ и обработка данных, разработка и реализация численных и натурных экспериментов выполнялись автором. Интерпретация климатических результатов проводилась совместно с коллегами – специалистами в области климатологии, анализ биоиндикационных данных проводился совместно с коллегами – специалистами в области дендрохронологии в рамках междисциплинарных проектов.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка используемой литературы из 308 наименований и 6 приложений. Общий объем работы составляет 310 страницы, включая 51 рисунок и 7 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе дано описание методов, применяемых для моделирования и анализа квазигармонических колебаний. Приведено описание динамических природно-климатических процессов, приводящих к формированию квазигармонических колебаний климатических характеристик. Приведено описание методов кластерного анализа квазигармонических колебаний климатических характеристик. Обозначена актуальность развития методов

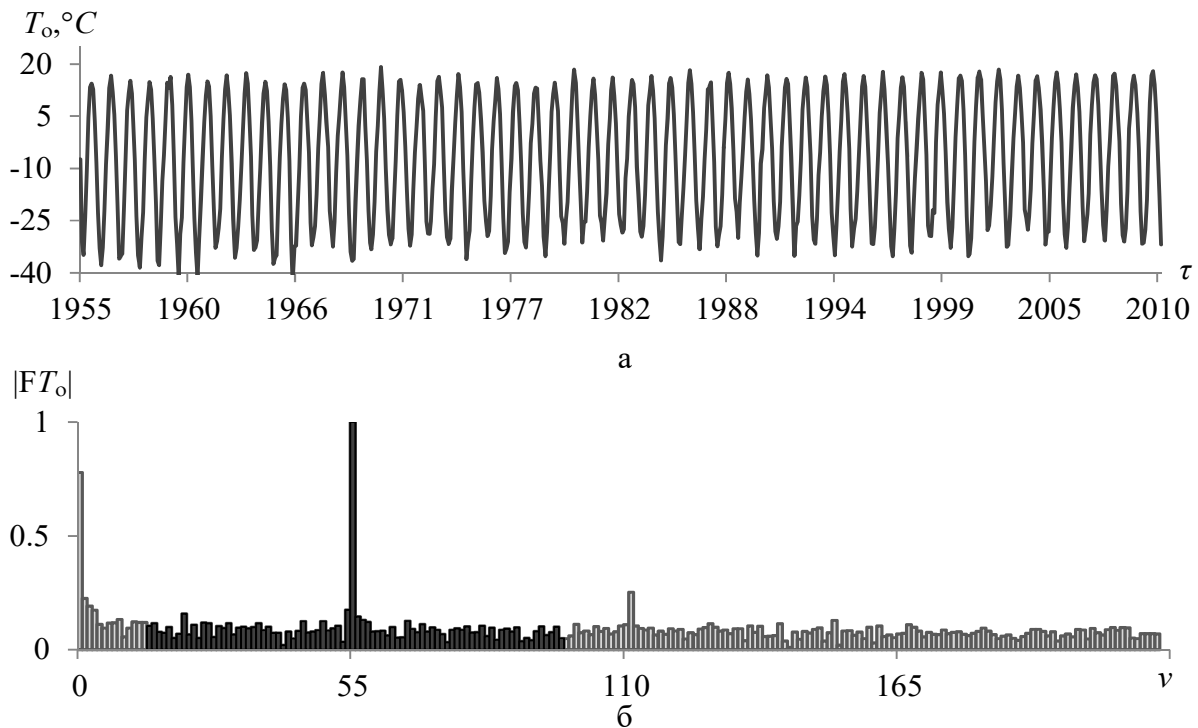
исследования квазигармонических колебаний и кластерного анализа для решения прикладных задач, включая задачу классификации климатов.

Вторая глава посвящена разработке *математической модели изменения среднемесячных значений приземной температуры в форме квазигармонического колебания*. Представим модель квазигармонического колебания в общем виде (1):

$$T(\tau, L) = D(\tau + P, L) S_m(\tau) + S_a(\tau) + C, \quad (1)$$

где τ – время, L – дополнительный параметр, определяющий характеристики основного колебания, $D(\tau + P, L)$ – основное квазигармоническое колебание, P – период колебания, $S_m(\tau)$, $S_a(\tau)$ – мультипликативная, аддитивная составляющие шума, C – постоянная.

Из проведенного обзора существующих климатических характеристик выявлено, что приземная температура как физическая величина содержит в себе интегральную информацию о климатических изменениях и поэтому наиболее пригодна для исследования климата. В данной работе колебания усредненных значений температуры, полученных в результате регистрации на метеостанциях, представляются в виде температурных сигналов (рис. 1, а).



а – значения приземной температуры за период 1955–2010 гг., б – значения нормированного модуля преобразования Фурье (представлены первые 220 частот из 2048)
Рисунок 1 – Температурный сигнал, полученный на метеостанции «Tomsk»

Исходя из результатов анализа температурного сигнала, можно предположить, что он имеет периодический характер, а все отклонения от периодичности связаны с модуляциями амплитуды и фазы. В частотных спектрах температурного сигнала присутствует несущая частота, имеющая период, равный одному календарному году (рис. 1, а, б).

Математическая модель в форме квазигармонического колебания, описывающая изменения среднемесячных значений приземной температуры (2), представлена в виде колебания, обусловленного глобальным ежегодным циклом вращения Земли – собственное колебание или несущее, модулированное по амплитуде и фазе в результате влияния процессов различной природы.

$$T_0(\tau, L) = a_0(\tau, L) \left(1 + I^A a(\tau, L) \right) \cos \left(2\pi \nu_n \tau + \varphi_0 + I^\Phi \varphi(\tau, L) \right), \quad (2)$$

где τ – время, a_0 – амплитуда несущего колебания, φ_0 – начальная фаза, ν_n – частота несущего колебания, $I^A = K^A/a_0$ – индекс амплитудной модуляции, K^A – коэффициент пропорциональности, отражает глубину амплитудной модуляции, I^Φ – индекс фазовой модуляции, определяет максимальное отклонение фазы, $a(\tau)$ – сигнал, модулирующий амплитуду, $\varphi(\tau)$ – сигнал, модулирующий фазу.

В реальных системах модулирующие сигналы $a(\tau)$, $\varphi(\tau)$ являются сложными функциями времени. Любой сложный сигнал можно представить в виде конечной или бесконечной суммы гармонических составляющих. Математическая модель (2) для сложной модуляции сигнала будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} T_0(\tau, L) = (a_0(\tau, L) + \Delta A(\tau, L)) \cos(2\pi \nu_n \tau + \varphi_0 + \Delta \Phi(\tau, L)) \\ \Delta A(\tau, L) = \sum_{f=1}^F K_f^A(L) a_f(\tau) = \sum_{f=1}^F K_f^A(L) \cos(2\pi f \tau) \\ \Delta \Phi(\tau, L) = \sum_{f=1}^F I_f^\Phi(L) \varphi_f(\tau) = \sum_{f=1}^F I_f^\Phi(L) \cos(2\pi f \tau) \end{cases}, \quad (3)$$

где i – порядковый номер гармоники, $f = 1, 2 \dots F$, F – количество модулирующих гармоник, $a_f(\tau)$ – сигнал, модулирующий амплитуду, $\varphi_f(\tau)$ – сигнал, модулирующий фазу, L – переменная, связывающая значения индексов модуляции с географической широтой местности.

В численном эксперименте при совпадении модельного колебания с исходным ошибка численного моделирования составила 9 %.

Метод вычисления элементов модели квазигармонического колебания (3). Расчет параметров модели – амплитуды и фазы (3) проводится в соответствии с предлагаемым численным методом. Для температурного сигнала:

$$T_0(\tau, L) = (a_0(L) + \Delta A(\tau, L)) \cos(2\pi \nu_n \tau + \varphi_0 + \Delta \Phi(\tau, L)) = A(\tau, L) \cos \Phi(\tau, L). \quad (4)$$

применим операцию периодического продолжения и алгоритм быстрого преобразования Фурье БПФ $\mathbf{C}$, (обратная операция $\mathbf{C}^{-1}$).

$$T_1(\tau, L) = \mathbf{C} [A(\tau, L) \cos \Phi(\tau, L)].$$

Пусть также $\mathbf{H}, \mathbf{b}$ – есть операторы последовательного выполнения полосовой фильтрации на частоте f_c и преобразования Гильберта. Тогда численный метод определения параметров модели можно представить в следующем виде:

$$T_2(\tau, L) = \mathbf{H} \mathbf{C} [A(\tau, L) \cos \Phi(\tau, L)] = T_1(\tau, L) + \mathbf{H} T_1(\tau, L), \quad (5)$$

$$T_3(\tau, L) = \mathbf{H} \mathbf{b} \mathbf{C} [A(\tau, L) \cos \Phi(\tau, L)] = \mathbf{b} [T_1(\tau, L) + \mathbf{H} T_1(\tau, L)], \text{ при } \Phi' > 0, \quad (6)$$

$$A(\tau, L) = \sqrt{(T_1(\tau, L))^2 + (\mathbf{H} T_1(\tau, L))^2}, \quad (7)$$

$$\Phi(\tau, L) = \arg \left(\frac{\mathbf{H} T_1(\tau, L)}{T_1(\tau, L)} \right). \quad (8)$$

Законы изменения амплитуды и фазы требуют определения, которое должно быть конструктивным; это означает, что оно должно поддерживаться вычислительным алгоритмом. Непротиворечивое определение амплитуды и фазы дается на основе аналитического сигнала (АС), введенного в 1946 г. Д. Габором (Gabor, D 1946). Аналитический сигнал является комплексной функцией $W(\tau)$, которая представляет колебание температуры $T(\tau)$ во времени как естественное обобщение гармонических колебаний:

$$W(\tau) = T(\tau) + iV(\tau), \quad (9)$$

$$V(\tau) = \frac{1}{\pi} \text{v.p.} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{T(s)}{\tau - s} ds, \quad (10)$$

где мнимая составляющая аналитического сигнала $V(\tau) = \mathbf{H} T(\tau)$ – является Гильберт-трансформантой (10) его действительной части $T(\tau)$ (5) (Вакман Д. Е., 1977).

Введение комплексного представления (9) позволяет определять амплитуду и фазу в соответствии с уравнениями (7) и (8). Функция $A(\tau, L)$ для сигнала, представленного в виде (4), описывает закон изменения его амплитуды; также данную функцию обозначают как огибающую (Трахтман А. М., 1975). Функция $\Phi(\tau)$ – есть полная фаза, которая определена как главное значение функции $\arctg$ и может быть «счита» по непрерывности

при выполнении условия монотонности. Для реальных сигналов условие монотонности фазы выполняется не всегда. В нашем случае сигнал формируется *алгоритмом оптимизации спектра*, в результате которого преобразованный, модулированный по амплитуде и фазе колебательный процесс $T(\tau)$ может быть выделен из исходного процесса путем применения спектрального окна $\mathbf{b}$ с эффективной шириной $\Delta\nu$ при обязательном выполнении условия монотонности фазы $\Phi' > 0$. Данное преобразование представлено выражением (6). *Алгоритм оптимизации спектра* определяет итерационным путем наибольшую ширину спектра при выполнении условия монотонности фазы, рассчитанной в соответствии с формулой (8). Именно монотонность фазы вносит определенность в рассматриваемую проблему. Поскольку функция фазы монотонна и строго возрастающая, то обратная ей функция однозначна и не имеет разрывов, что особенно важно для ее численной реализации. Для более сложных сигналов *алгоритм оптимизации* дополним *процедурой гармонизации*. Оператор $\mathbf{E}$ реализует преобразование, сжимая периоды колебания, которые больше некоторого среднего периода, и растягивая те из них, которые меньше. $\mathbf{E}^{-1}$ реализует обратное преобразование, возвращая колебание в исходное состояние. Пусть также $\mathbf{H}, \mathbf{b}$ – есть оператор последовательного выполнения полосовой фильтрации на частоте f_c и преобразования Гильберта, тогда алгоритм преобразований можно выразить следующим образом:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}[1+a(\tau)]\cos\varphi(\tau) &= \left\{1+a\left[\varphi^{-1}(f_c z)\right]\right\}\cos\left\{\varphi\left[\varphi^{-1}(f_c z)\right]\right\}= \\ &= \left[\cos f_c u + a(u)\cos f_c u\right], \end{aligned} \quad (11)$$

$$\mathbf{H}\mathbf{b}\left[\cos f_c u + a(u)\cos f_c u\right] = b\sin f_c u, \quad (12)$$

$$\mathbf{E}^{-1}\left[b\sin f_c u\right] = b\sin\left\{f_c \frac{\varphi(\tau)}{f_c}\right\} = b\sin\varphi(\tau). \quad (13)$$

В алгоритме оптимизации спектра *процедура гармонизации* совместно с полосовой фильтрацией позволяет выделить из колебания с монотонной фазой гармоническое колебание с частотой f_c . Для него находится Гильберт-трансформанта, которая «сжимается» и «растягивается» в обратном порядке. В данном случае амплитуда не несет полезной информации и рассматривается как мультипликативный шум. *Процедура гармонизации* сжимает частотный спектр и делает возможным применение узкополосного фильтра для выделения полезного колебания.

Колебательные свойства реальных систем получают в процессе исследования свойств соответствующих моделей. Процесс моделирования позволяет установить связи между параметрами колебательной модели и свойствами моделируемого процесса. Применительно к исследованию свойств

реальных квазигармонических процессов актуальным является определение типовых закономерностей на основе метода кластеризации.

Метод кластеризации колебаний. В данной работе принцип синхронности как одновременность событий положен в основу анализа процессов и использован при разработке нового метода кластеризации, обозначенного как метод динамической кластеризации (МДК).

В качестве меры сходства для оценки синхронности изменений между выбранными однотипными характеристиками колебаний применен коэффициент корреляции Пирсона.

Описание численного метода кластеризации. Массив данных представлен характеристиками колебаний, огибающими или функциями фаз. Данные характеристики образуют множество, номера элементов которого соответствуют условным номерам метеостанций: $j = 1, 2, \dots, N$ или $k = 1, 2, \dots, N$, $N = 818$, τ – время, l – порядковый номер итерации. Процедура кластеризации начинается с определения корреляционной матрицы $C^l_{j,k}$ для элементов одинаковых множеств: $M^l_{\tau,j}$ и $M^l_{\tau,k}$. Расчет значений коэффициента взаимной корреляции можно представить в следующем виде:

$$C^l_{j,k} = \frac{\sum_{\tau=1}^T \left(M^l_{\tau,j} - \frac{1}{T} \cdot \sum_{\tau=1}^T M^l_{\tau,j} \right) \cdot \left(M^l_{\tau,k} - \frac{1}{T} \cdot \sum_{\tau=1}^T M^l_{\tau,k} \right)}{\sqrt{\sum_{\tau=1}^T \left(M^l_{\tau,j} - \frac{1}{T} \cdot \sum_{\tau=1}^T M^l_{\tau,j} \right)^2 \cdot \sum_{\tau=1}^T \left(M^l_{\tau,k} - \frac{1}{T} \cdot \sum_{\tau=1}^T M^l_{\tau,k} \right)^2}}, \quad (14)$$

где T – количество отсчетов времени.

Далее производится разбиение множества $M^l_{\tau,j}$ на кластеры. Каждый кластер формируется из элементов, соответствующих условию:

$$C^l_{j,k} \geq r, \quad (15)$$

где $r = \text{const}$ – минимальное значение коэффициента корреляции.

В соответствии с условием (15) создается бинарный массив элементов $S^l_{j,k}$:

$$S^l_{j,k} = \begin{cases} 0, & \text{если } C^l_{j,k} < r \\ 1, & \text{если } C^l_{j,k} \geq r \end{cases}. \quad (16)$$

Для каждого элемента множества $M^l_{\tau,j}$, попавшего в один из кластеров $S^l_{j,k}$, определяется «текущая» характеристика, которая вычисляется как среднее значение всех элементов, вошедших в кластер:

$$M_{\tau,j}^{l+1} = \frac{1}{\sum_{k=1}^N (S_{j,k}^l)} \cdot \sum_{k=1}^N (M_{\tau,k}^l \cdot S_{j,k}), \text{ при } \sum_{k=1}^N (S_{j,k}^l) > 0 \quad (17)$$

Формируется новое множество $M_{\tau,j}^{l+1}$, элементами которого являются рассчитанные «текущие» характеристики (17).

Далее рассчитывается абсолютная разница между элементами массивов: $M_{\tau,j}^l$ и $M_{\tau,j}^{l+1}$. Итерационный процесс останавливается при выполнении следующего условия (18):

$$\max |M_{\tau,j}^l - M_{\tau,j}^{l+1}| \leq \varepsilon, \quad (18)$$

где ε – максимальное значение отклонения, $\varepsilon = 1 \cdot 10^{-4}$.

Если условие (18) не выполняется, итерационный процесс повторяется, начиная с расчета корреляционной матрицы $C_{j,k}^{l+1}$ для элементов массива $M_{\tau,j}^{l+1}$. В результате итерационного процесса вычисляются типовые функции, характеризующие средние для группы закономерности. При завершении итерационного процесса элементы массива $M_{\tau,j}^l$ классифицируются вокруг полученных типовых закономерностей в соответствии с заданным минимальным значением коэффициента корреляции r . В отличие от существующих алгоритмов, разработанный алгоритм не требует никакой априорной информации о классах, позволяет определять классы для разных уровней корреляции, соответствующих разным интервалам значений коэффициента корреляции, и использовать функции, отражающие типовые закономерности как для оценки тесноты связей между классами одного уровня корреляции, так и разных уровней корреляции.

В процессе исследования разработанных численных методов было выявлено, что амплитуда и фаза, входящие в математическую модель в форме квазигармонического колебания, описывающую изменения среднемесячных значений приземной температуры (3), являются новыми характеристиками, пригодными для использования при построении климатических классов.

Прежде чем перейти к анализу реальных данных, следует оценить устойчивость МДК в ходе численного эксперимента.

В третьей главе приводятся результаты исследования МДК в *численном эксперименте* и применения его к анализу колебаний среднемесячных значений приземной температуры, измеренных на метеостанциях Северного полушария Земли. Численный эксперимент реализован с целью оценки сходимости и устойчивости разработанного метода (14–18). Основная задача численного эксперимента заключается в получении результатов работы метода при разных уровнях и видах шума, вносимого в подготовленные эталонные сигналы. Оценка точности метода при наличии шумов различных видов и уровней определяется среднеквадратическими отклонениями (СКО). Изменяемые

параметры численного эксперимента: уровень шума, способ введения шума, форма шума, форма эталонных сигналов, минимальное значение коэффициента корреляции, количество сигналов в выборке.

Эталонные сигналы были представлены в виде амплитуды или фазы, входящих в модель (3). Форма эталонного модулирующего сигнала, фазы или амплитуды, варьировалась через изменение количества гармоник F в частотном спектре. Шум задавался в частотной области. Уровень шума P определялся как отношение СКО шума к СКО исходного сигнала. Оценка нормированной среднеквадратической ошибки E определялась как отношение СКО восстановленного сигнала к СКО эталонного.

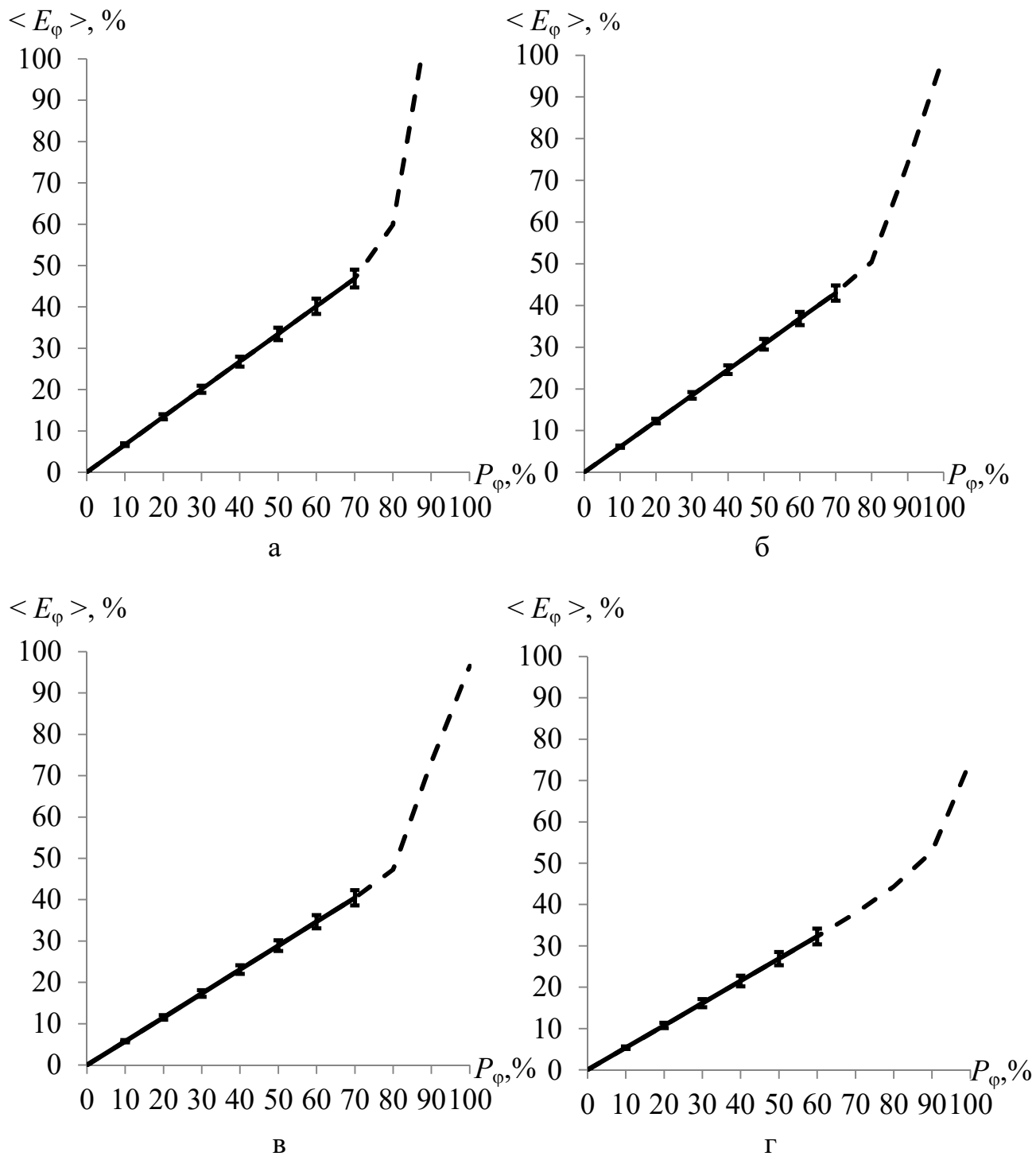
Условием устойчивой работы метода является равенство между количеством восстановленных k_r и количеством заданных эталонных k_e сигналов при малом значении ошибки E . Критерии устойчивой работы: $E \leq 1,1P$, $k_r/k_e = 1$. В зависимости от уровня шума, в соответствии с критериями устойчивости, определяется диапазон устойчивой работы метода. На графиках (рис. 2–5) диапазон устойчивой работы обозначен сплошными линиями. Результат, при котором количество восстановленных сигналов не равно количеству эталонных, не может быть отнесен к диапазону устойчивой работы метода, так как в этом случае возникает неоднозначность при выборе действительных сигналов. В данной работе определение действительных сигналов реализовано по наибольшему значению коэффициента корреляции между эталонными и восстановленными сигналами. На графиках (рис. 2–5) диапазон неустойчивой работы метода обозначен штриховыми линиями.

Основные результаты численного эксперимента.

1. Исследование влияния размера выборки на ошибку восстановления фаз. Устойчивая работа МДК сохраняется при размере выборки, состоящем из 20, 40, 60 сигналов, до отношения шума к сигналу 70 %. При размере выборки, равном 100 сигналам, метод устойчив до отношения шума к сигналу 60 %. Среднее значение нормированной СКО при устойчивой работе метода не превышает 50 % (рис. 2). Меньшие значения нормированной СКО достигаются при больших размерах выборки.

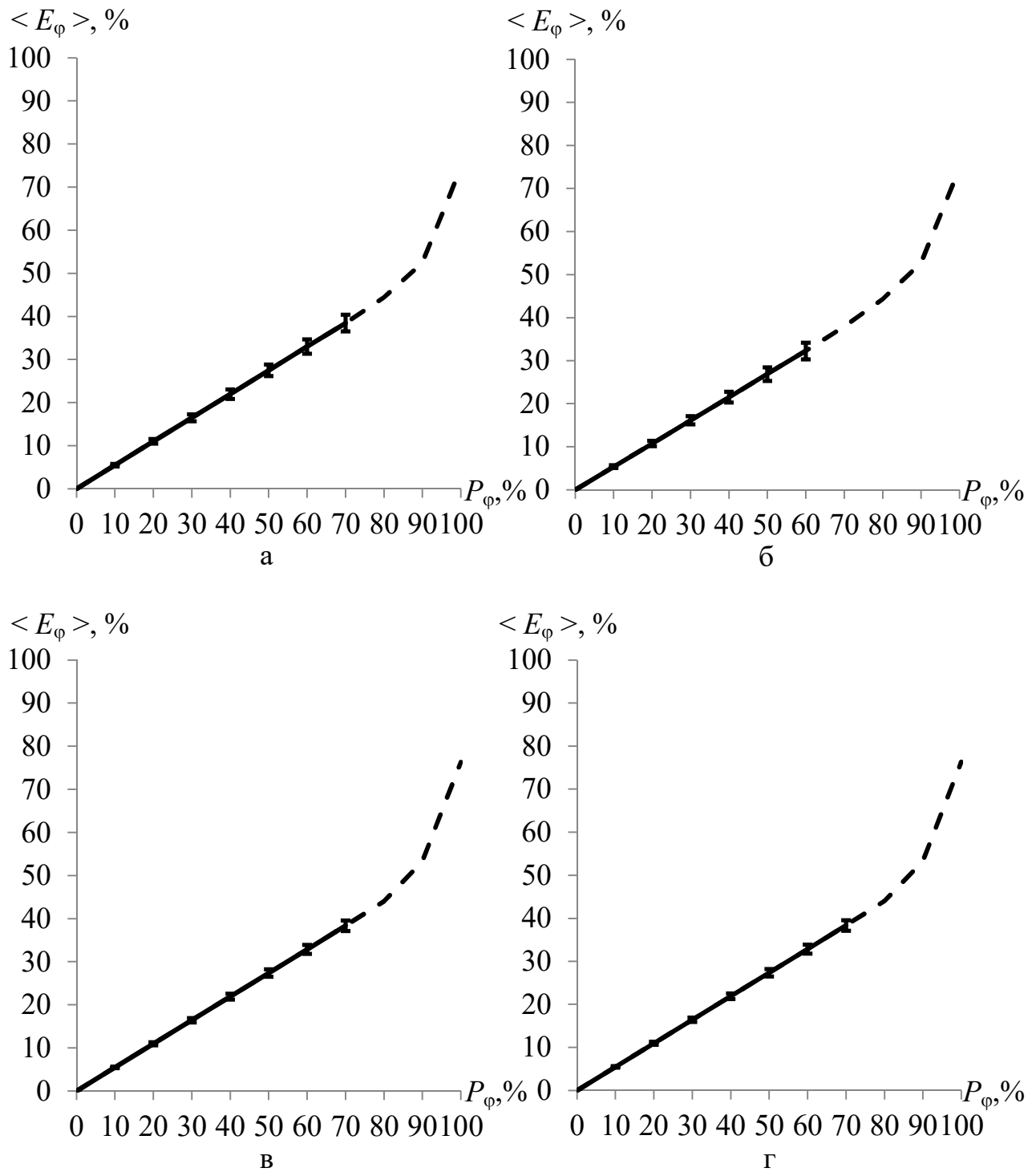
2. Исследование влияния формы эталонного сигнала на ошибку восстановления фаз. В численном эксперименте для каждого эталонного сигнала задавалось количество гармоник, равное 3, 6, 12, 24 из интервала частот от 5 до 35. При заданных параметрах устойчивая работа МДК сохраняется до уровня отношения шума к сигналу 60 %. Среднее значение нормированной СКО при устойчивой работе метода не превышает 45 % (рис. 3) и не зависит от формы сигнала.

3. Исследование влияния формы шума на ошибку восстановления фаз. В численном эксперименте форма шума варьировалась через изменение размера частотного интервала шумовых составляющих: 25, 50, 75, 100. Устойчивая работа МДК сохраняется при ширине спектра шума 25, 50 частот до отношения шума к сигналу 70 %, при ширине спектра шума 75, 100 частот метод устойчив до отношения шума к сигналу 60 % (рис. 4). При увеличении ширины спектра шума снижается среднее значение нормированной СКО.



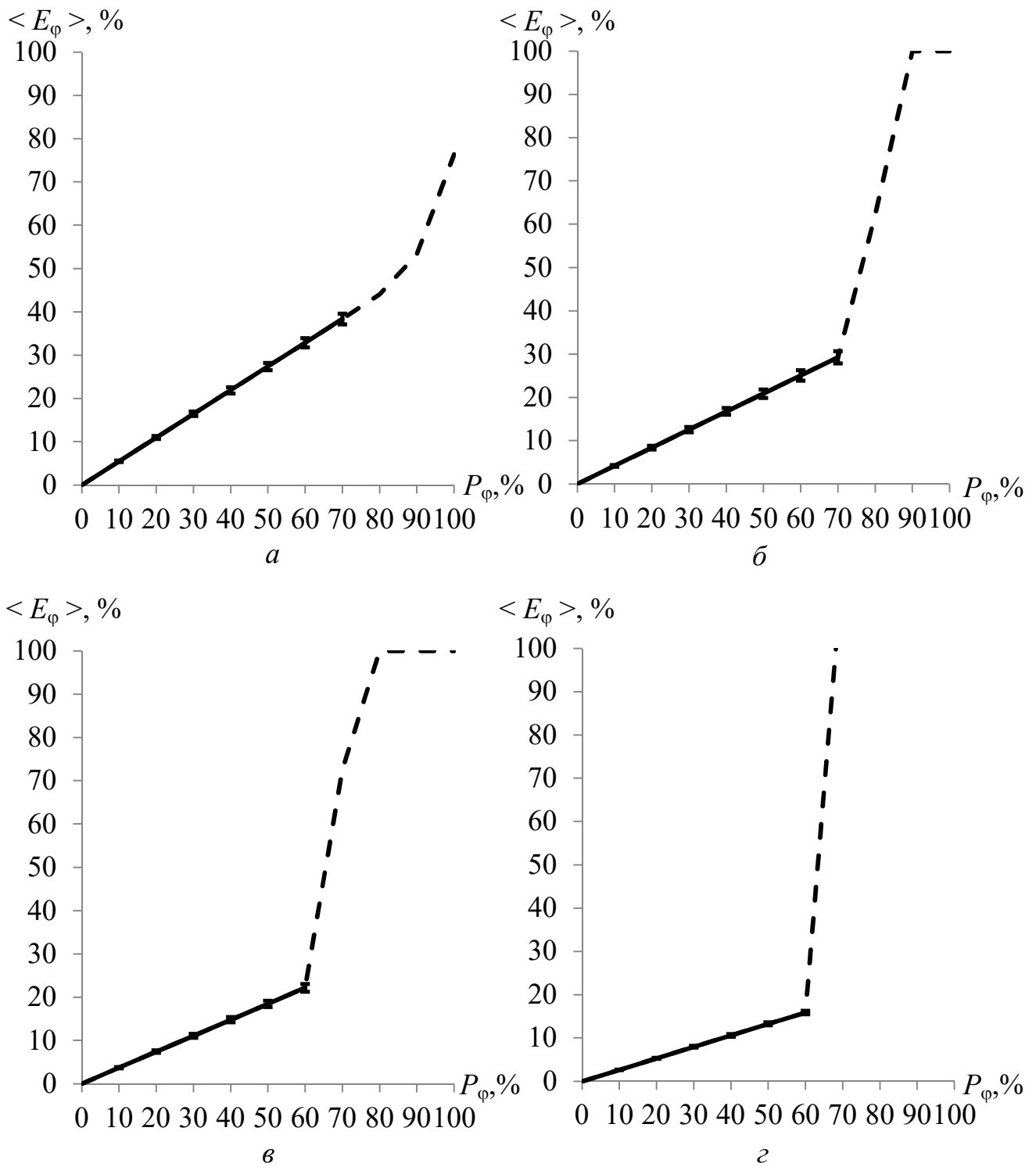
а – $n = 20$, б – $n = 40$, в – $n = 60$, г – $n = 100$,

Рисунок 2 – Оценки нормированной среднеквадратической ошибки восстановления фаз методом динамической кластеризации при разных размерах выборки сигналов n



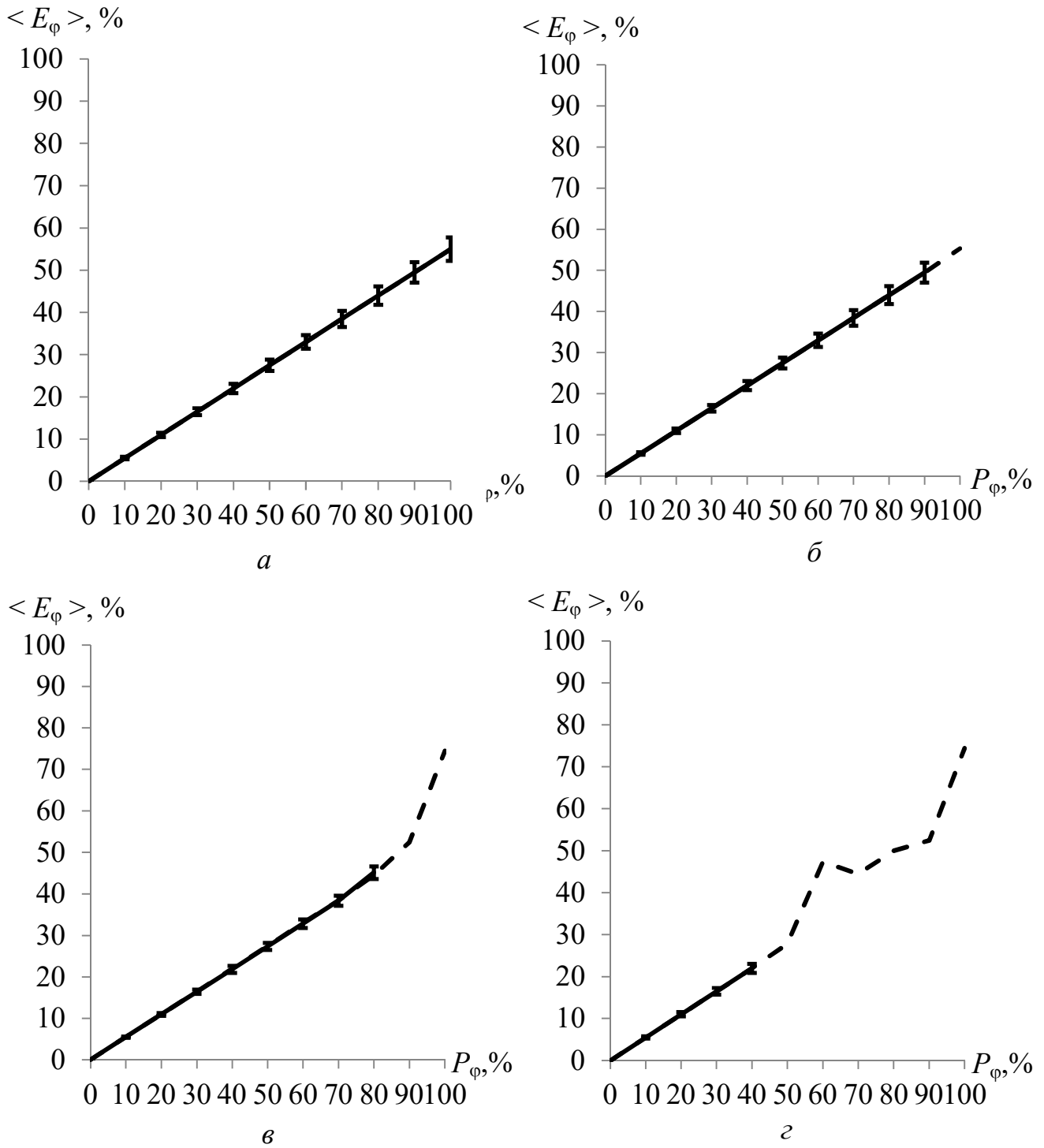
а – $g = 3$, б – $g = 6$, в – $g = 12$, г – $g = 24$

Рисунок 3 – Оценки нормированной среднеквадратической ошибки восстановления фаз методом динамической кластеризации для сигналов с разным количеством гармонических составляющих g



а – $\Delta f = 25$, б – $\Delta f = 50$, в – $\Delta f = 75$, г – $\Delta f = 100$

Рисунок 4— Оценки нормированной среднеквадратической ошибки восстановления фаз методом динамической кластеризации при разной ширине спектра шума Δf



а – $r = 0,6$, б – $r = 0,7$, в – $r = 0,8$, г – $r = 0,9$

Рисунок 5 – Оценки нормированной среднеквадратической ошибки восстановления фаз методом динамической кластеризации при разном минимальном значении коэффициента корреляции r

4. Определение ошибки восстановления фаз при разном уровне корреляции. Численный эксперимент проводился при разных минимальных значениях коэффициента корреляции. При всех заданных минимальных значениях коэффициента корреляции с увеличением уровня шума растет среднее значение нормированной СКО (рис. 5). Устойчивая работа МДК сохраняется при минимальном значении коэффициента корреляции 0,6 до отношения шума к сигналу 100 %, при минимальном значении коэффициента корреляции 0,7 до отношения шума к сигналу 90 %, при минимальном значении коэффициента корреляции 0,4 до отношения шума к сигналу 80 %, при минимальном значении коэффициента корреляции 0,8 до отношения шума к сигналу 80 %, при минимальном значении коэффициента корреляции 0,9 до отношения шума к сигналу 40 %. МДК обеспечивает при разных минимальных значениях коэффициента корреляции неизменные средние значения нормированной среднеквадратической ошибки в области устойчивой работы.

5. Определение ошибки восстановления амплитуд при разном уровне корреляции. Для амплитуд, как и для фаз, проведены аналогичные численные эксперименты. Результаты экспериментов для амплитуд полностью совпали с результатами экспериментов, реализованных для фаз, как по величине ошибки, так и по уровню устойчивости. Это означает, что вычислительная точность МДК не зависит от выбранной характеристики.

6. МДК не является работоспособным при наличии мультипликативного шума в диапазоне отношения шума к сигналу от 10 % до 100 %.

7. Исследование сходимости метода кластеризации. Критерием работоспособности метода динамической кластеризации является его сходимость с заданной точностью к одному и тому же результату при прочих равных условиях. Во всех проведенных численных экспериментах, при максимальном значении отклонения $\varepsilon = 0,001$, реализованный в методе итерационный процесс сошёлся к конечному постоянному числу кластеров при конечном числе итераций. При выполнении условия завершения итерационного процесса (18), каждая последующая итерация не приводила к изменению значений ошибок вычисления выше, чем $\varepsilon = 0,001$ и изменению состава кластеров, что подтверждает наличие сходимости метода динамической кластеризации.

На основании результатов численного эксперимента определено, что применение МДК требует выполнения следующих необходимых условий: исследуемые сигналы, принадлежащие к одному кластеру, должны обладать свойством синхронности, уровень аддитивного шума не должен превышать 60 % от полезного – восстанавливаемого сигнала.

Эксперимент с использованием реальных данных. Реальные данные представлены массивами колебаний среднемесячных значений температуры, измеренных на 818 метеорологических станциях Северного полушария Земли за временной интервал с 1955 по 2010 год. Эксперимент реализован с целью подтверждения возможности применения разработанных методов для решения прикладной задачи классификации климатов. Основная задача эксперимента – выделение типовых закономерностей (рис. 6-7) из выборки, состоящей из

массивов огибающих и фаз, вычисленных для квазигармонических колебаний значений приземной температуры, и использование этих закономерностей для построения климатических классов. МДК реализован при минимальном значении коэффициента корреляции $r \geq 0,8$ и максимальном значении отклонения $\varepsilon \leq 0,001$.

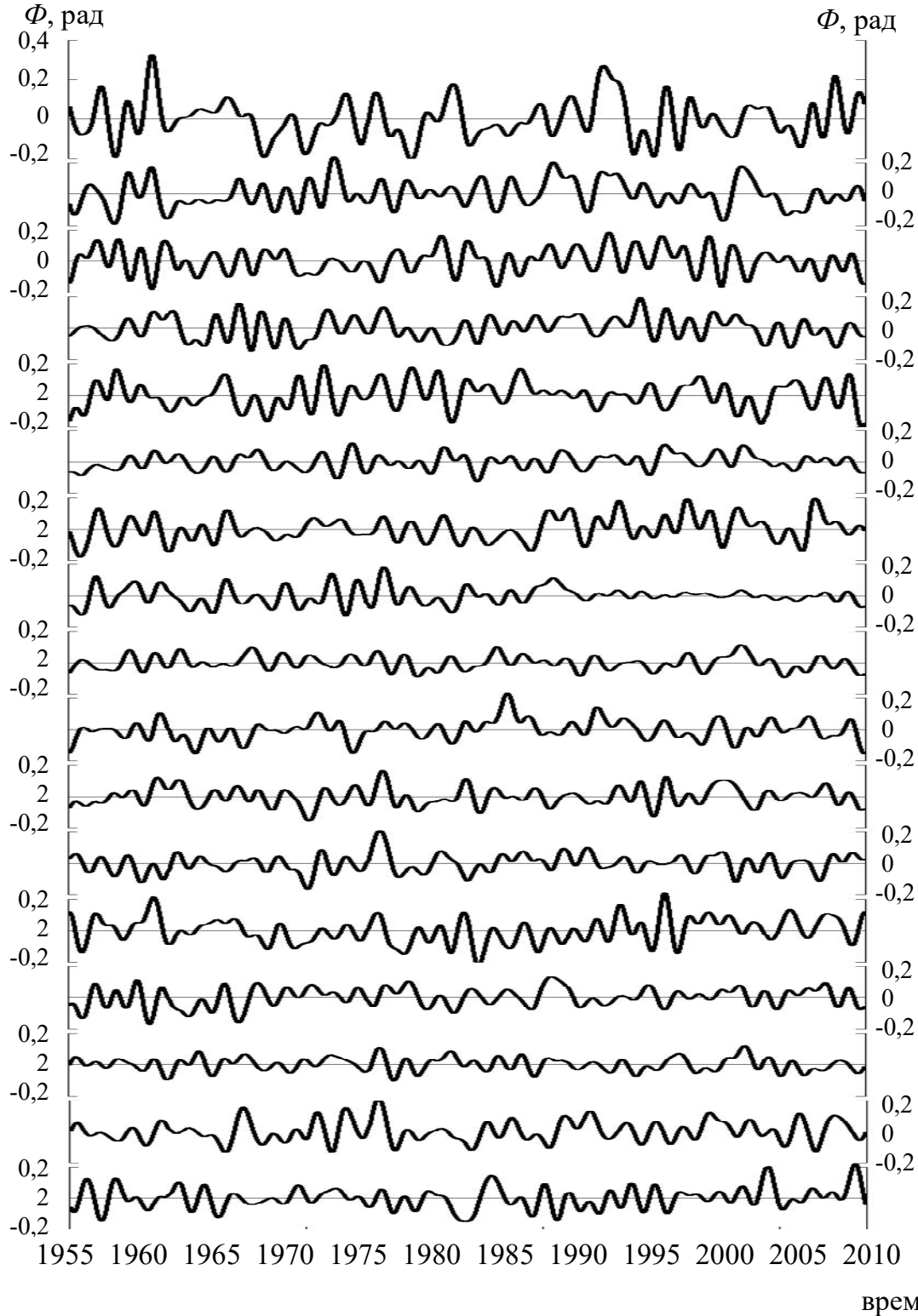


Рисунок 6 – Типовые фазы расположены сверху вниз, соответствующие 17 выделенным климатическим закономерностям, при $r \geq 0,8$

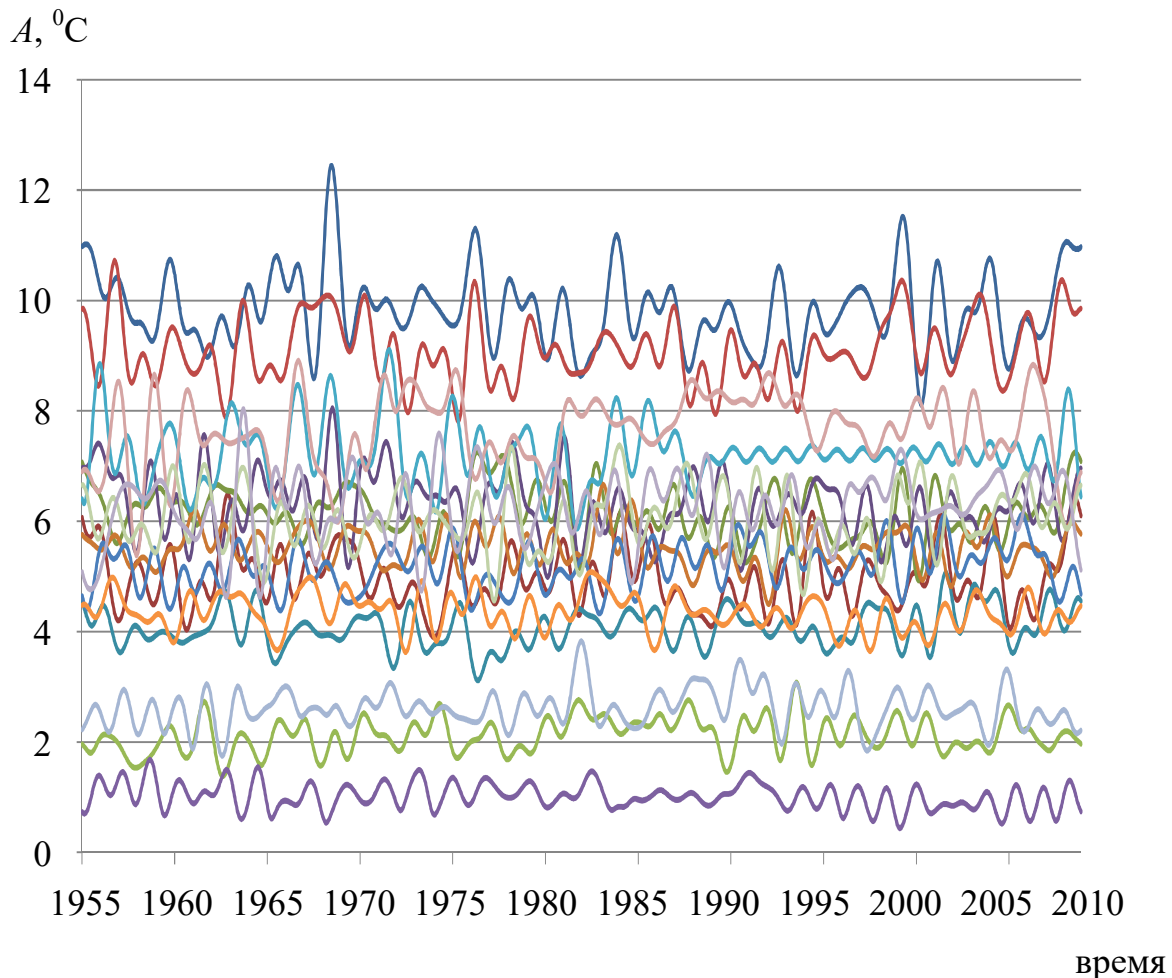
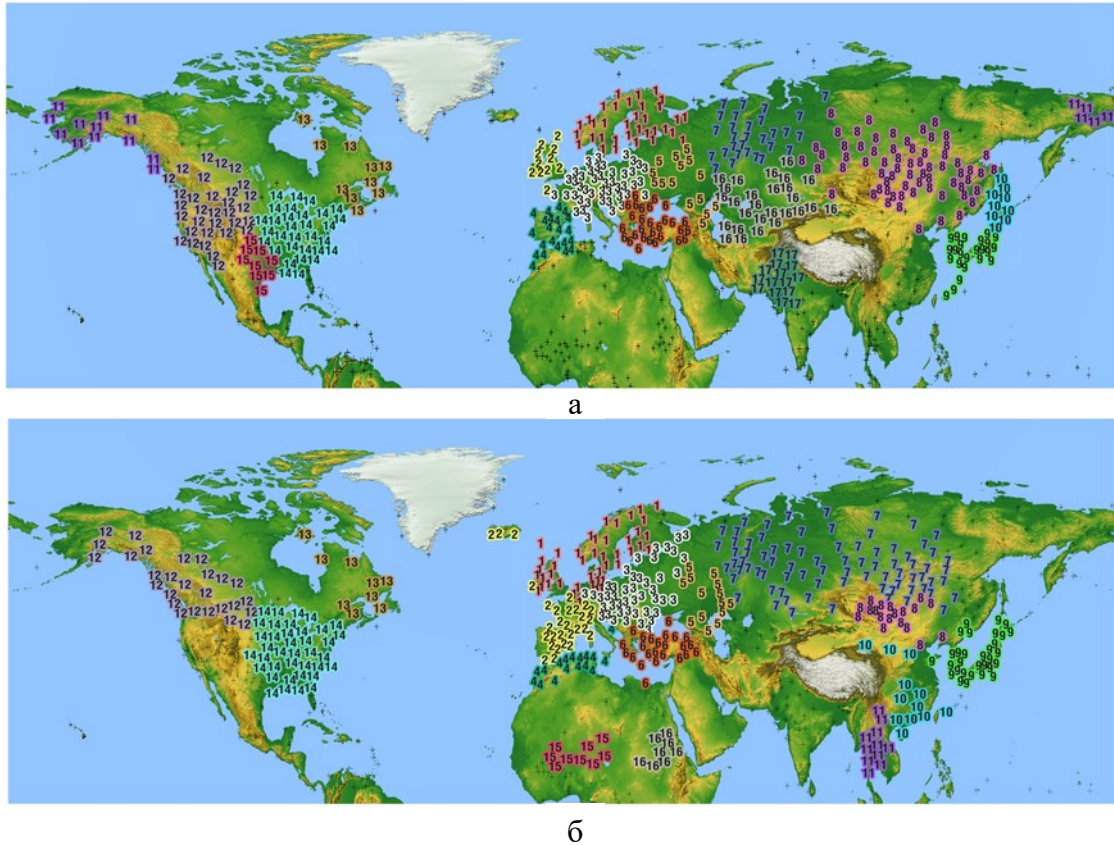


Рисунок 7 – Типовые огибающие, соответствующие 16 выделенным климатическим кластерам, при $r \geq 0,8$

Результат кластеризации достигнут при числе итераций $l = 11$ при работе с фазами (рис. 6) и при числе итераций $l = 10$ при работе с огибающими (рис. 7). Достижение конечного числа итераций при неизменном максимальном значении отклонения $\varepsilon \leq 0,001$ является подтверждением сходимости МДК. В результате кластеризации было выделено 17 типовых фаз (рис. 6) и 16 типовых огибающих (рис. 7). Каждая типовая функция отражает уникальную закономерность, присущую всем элементам, входящим в отдельный кластер. Каждая из выделенных типовых фаз, как и огибающих, имеет уникальную форму. Для определения меры сходства между типовыми функциями был проведен корреляционный анализ. Для большей части типовых функций связь характеризуется значением коэффициента корреляции, соответствующим среднему уровню по шкале Чеддока. Максимальные значения коэффициентов корреляции между типовыми фазами не превышают 0,62, а между типовыми огибающими не превышают 0,53, что обеспечивает точную дифференциацию между отдельными кластерами. Максимальные значения коэффициентов корреляции наблюдаются между типовыми функциями, соответствующими наиболее близко расположенным друг к другу кластерам.

В результате кластеризации было выделено 16 климатических кластеров по огибающим (рис. 8, б). Климатические кластеры соответствуют районам, где



а – кластеризация по фазам, б – кластеризация по огибающим. Каждый климатический кластер обозначен номером от 1 до 17. Станции, не вошедшие в кластеры, обозначены символом «+» Результаты получены при значении коэффициента корреляции $r \geq 0,8$
 Рисунок 8 – Схемы кластеризации поля приземной температуры Северного полушария Земли

изменения температуры происходят синхронно. Как видно из рисунка 8, получена четкая географическая локализация кластеров, которая является подтверждением выполнения условия о наличии синхронности. Несмотря на то, что описанный метод реализован только на данных о приземной температуре, полученные климатические кластеры (рис. 8, а) сходны с классической классификацией климата по В.П. Кёппену. Полученные результаты подтверждают применимость МДК к работе с реальными данными, представленными массивами колебаний среднемесячных значений температуры.

В результате реализации МДК исходное пространство, состоящее из 818 температурных сигналов, трансформировалось в пространство 17 климатических кластеров по функциям фаз (рис. 8, а) и в пространство 16 климатических кластеров по огибающим (рис. 8, б).

В четвертой главе рассмотрено применение разработанных методов на примере анализа изменений морфологических характеристик дендроиндикаторов. Инструментальные методы измерений являются наиболее удобными для исследования изменчивости климата и условий окружающей природной среды, но имеют ограничения во времени и в пространстве. Для расширения возможностей мониторинга климата как в пространстве, так и во

времени, часто прибегают к индикационным методам реконструкции природно-климатических процессов, основанным на наличии связей между составом и структурой природных тел и параметрами внешней среды (Ваганов Е.А., 2000). Внешние глобальные и локальные изменения параметров климата отражаются на изменениях радиального прироста стволов деревьев (Ваганов Е.А., 2000). Особенности сезонной динамики климатических характеристик отражаются на скоростях каждого из процессов дифференциации клеток (деления, растяжения, утолщения клеточной стенки) (Ваганов Е.А., 2000), что оказывает влияние на изменение картины годичных слоев и формирование уникальной клеточной структуры за период вегетации. Использование численного метода для вычисления элементов квазигармонического колебания применительно к изменениям радиального прироста трахеид дендроиндикатора позволяет получить информацию о вариациях климатических изменений с большим (декадным) временным разрешением.

Математическая модель непрерывного радиального прироста трахеид дендроиндикатора (19). Модель описывает микроструктуру ряда трахеид, ограниченного одним годичным слоем (рис. 9, а).

$$C(x) = \left| \frac{1-b(x)}{1-b(x)\exp i\phi(x)} \right|^2 = \frac{(1-b(x))^2}{1-b(x)^2 - 2b(x)\cos\phi(x)}, \quad (19)$$

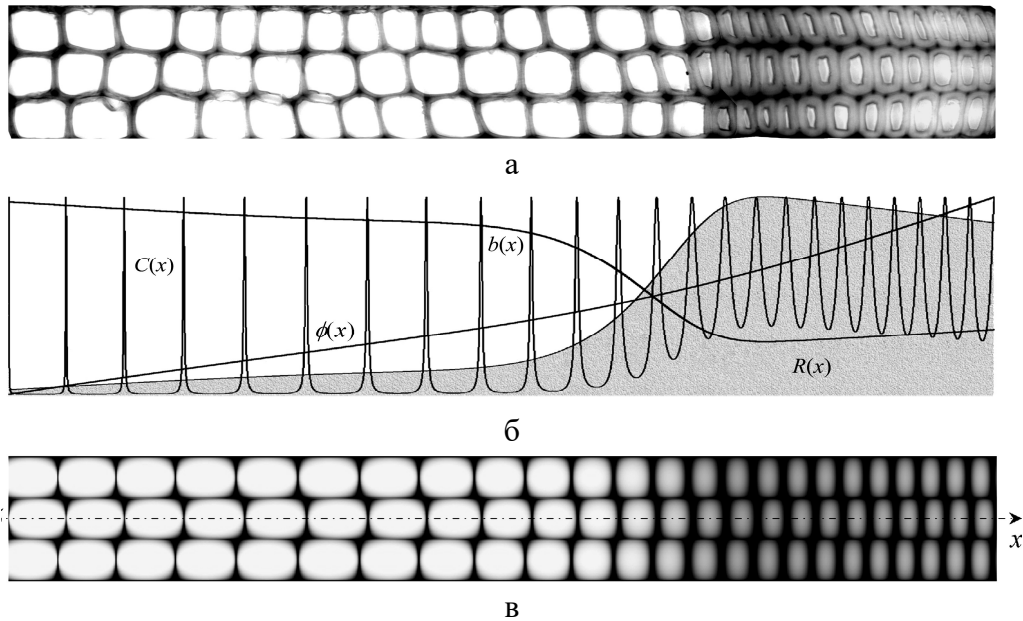
где $C(x)$ – функция, представляющая распределение плотности вещества вдоль ряда трахеид, $x = 0..L$, L – длина ряда трахеид, $b(x)$ – функция, связанная с толщиной клеточной стенки, которая уменьшается с ростом $b(x)$ в интервале $(0, 1)$, $\phi(x)$ – фаза, являющаяся монотонной функцией и определяющая радиальный размер трахеиды.

При возрастании фазы размер трахеид уменьшается. Из рисунка 9, б видно, что основные структуры трахеид воспроизводятся моделью (19) адекватно натуральному изображению (рис. 9, а). В численном эксперименте ошибка моделирования составила 22 %.

Для описания колебаний прироста дендроиндикатора в модели квазигармонического колебания (1) в качестве основного колебания используется колебание, описанное уравнением (19).

Применение численного метода для вычисления элементов квазигармонического колебания (5–9) позволило рассчитать амплитудные и фазовые модуляции прироста дендроиндикатора. Вычисленная в результате применения функция фазы $\phi(x)$ характеризует сезонную динамику усредненных по декадам значений температуры.

Радиальный прирост деревьев – это комплексный индикационный показатель, позволяющий проследить изменение состояния дендроиндикатора в течение всей его жизни и выделить связанную с ним климатическую характеристику. При анализе радиального прироста по кернам, выделенным в



а – микрофотография поперечного сечения трахеид (*Larix sibirica* Ledeb.),
 б – графическое представление модели поперечного сечения трахеид,
 в – модель плотности вещества вдоль ряда трахеид, где $C(x)$ – распределение плотности вещества вдоль ряда трахеид, $b(x)$ – функция, связанная с толщиной клеточной стенки, $\phi(x)$ – фаза, $R(x)$ – распределение вещества в радиальном сечении годичного кольца.

Рисунок 9 – Моделирование радиального прироста трахеид дендроиндикатора отдельных азимутальных направлений, большая часть информации остается неучтенной. Для решения этой задачи прибегают к анализу площадей прироста.

Алгоритм распознавания графических образов сложных кольцевых структур (рис. 10, а) строится на последовательном выполнении трех этапов.



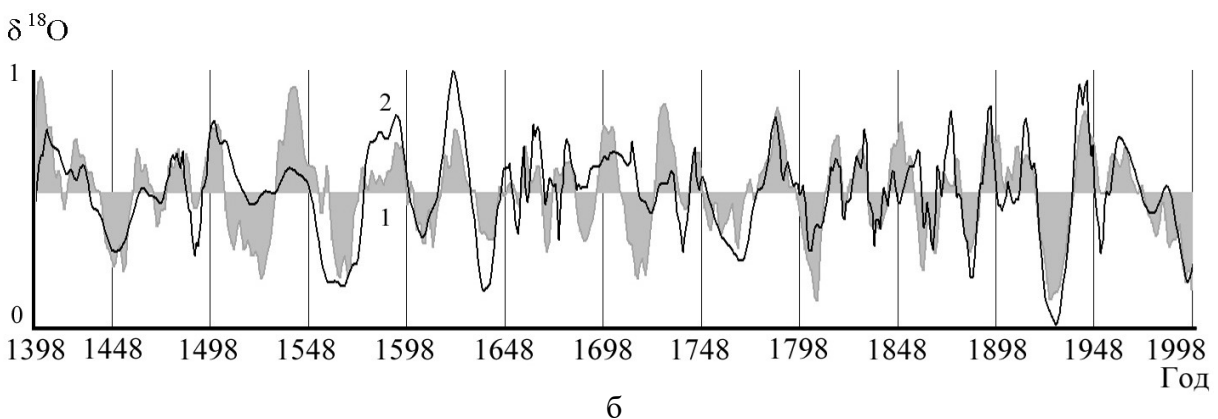
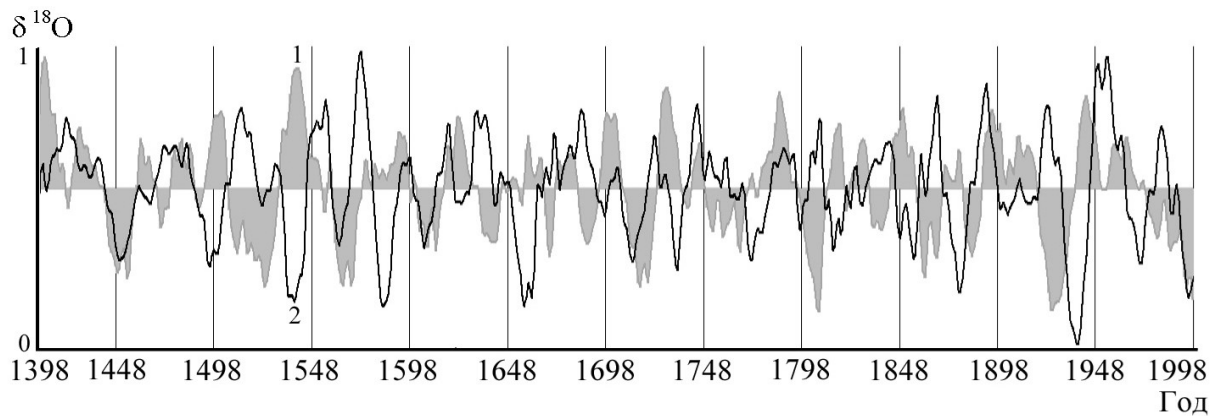
а – поперечное сечение ствола ели в градациях серого цвета, б – контуры границ годичных слоев, выделенные алгоритмом распознавания колец, наложенные на исходное изображение поперечного сечения ствола ели

Рисунок 10 – Графическое изображение поперечного сечения ствола ели (*Picea*)

Первый этап – определение квазигармонических колебаний по всем радиальным направлениям. Данная задача решается путем применения

разработанного численного метода для вычисления элементов квазигармонического колебания (5–9). Второй этап – определение областей однородности, реализуемый на основе разработанного метода динамической кластеризации. Третий этап заключается в определении границ годовичных слоев по критерию расстояния от центра с последующим объединением классов из соседних областей однородности. Результат (рис. 10, б) – картина колец, наложенная на исходное изображение. Площадь прироста для каждого отдельного годовичного слоя вычисляется как произведение количества пикселей, лежащих в границах двух соседних колец, на их размер. Нормированные значения прироста по площадям годовичных слоев сопоставляются с сезонными изменениями климатических характеристик. Ошибка вычисления площадей прироста в сравнении с используемыми методами не превышает 20 %.

Алгоритм синхронизации хронологических рядов. Длительные ряды индикационных данных создают объективные основы для ретроспективного анализа и прогноза климатических изменений. Важной задачей при восстановлении хронологий климатических характеристик является установление временных границ и периодов. Индикационные ряды (рис. 11, а)



а – исходные значения, б – синхронизованные.

Рисунок 11 – Одиннадцатилетние нормированные средние значения концентраций изотопа $\delta^{18}\text{O}$ для древесины (силуэт – 1), льда (сплошная линия – 2)

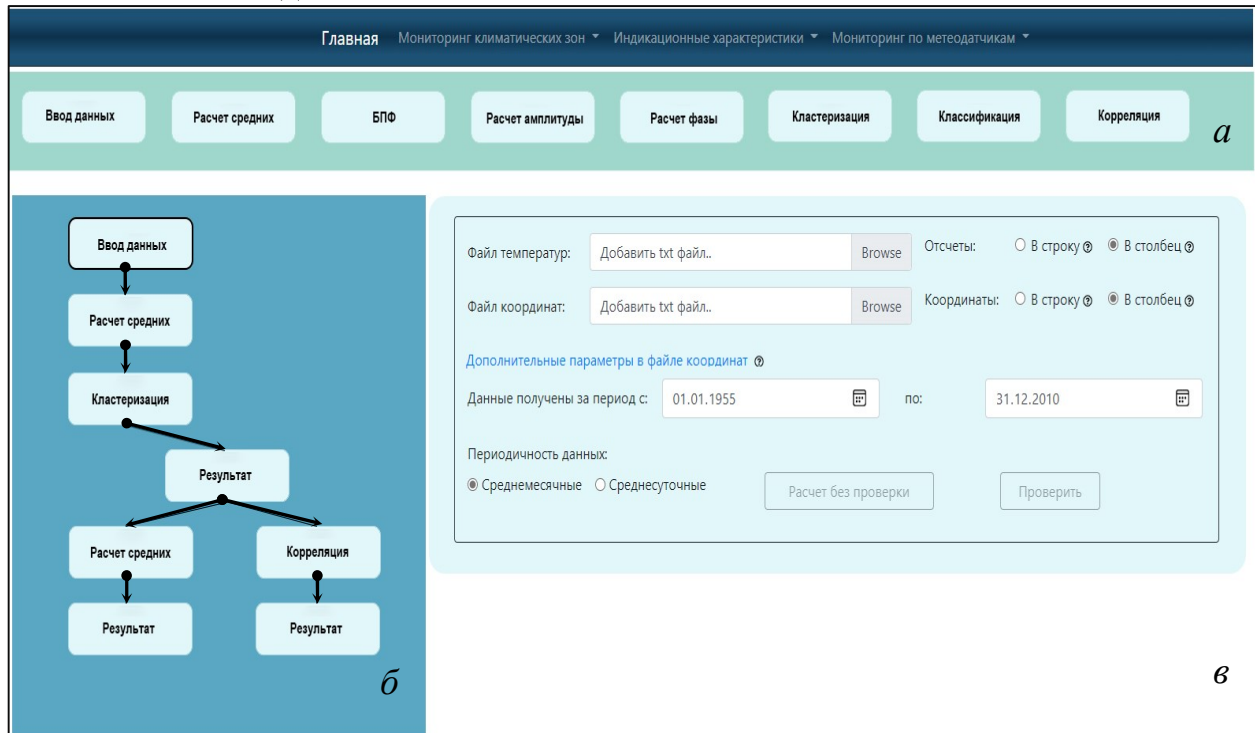
не всегда имеют четкие границы между отдельными годами, может присутствовать также временное смещение информации, обусловленное различными природными процессами и особенностями индикатора.

Для восстановления периодов между хронологическими рядами разработан новый алгоритм синхронизации. В данном алгоритме ряд с известными хронологическими параметрами выступает в качестве эталонного. Подлежащий восстановлению хронологический ряд рассматривается как смесь полезного климатического сигнала и шума в соответствии с *моделью* (1). Шум может быть связан с естественными локальными флуктуациями. Однако предполагается, что более значимым источником шума является погрешность в датировке. Модель этой погрешности представляется как некоторая трансформация временной шкалы путем ее сжатия и растяжения, но без разрывов и смещений. В рамках предлагаемой модели предполагается, что неправильная датировка приводит к десинхронизации хронологий. Синхронизировать хронологии можно путем применения обратной трансформации временной шкалы на основе предложенной *процедуры гармонизации* (11–13), используемой в разработанном *численном методе для вычисления элементов квазигармонического колебания*, которая реализует однозначное, непрерывное и обратимое преобразование колебательного процесса. На первом этапе алгоритма датировки хронологических рядов определяются две последовательности координат значимых экстремумов обеих хронологий. На втором этапе обе последовательности интерполируются сплайнами. На третьем этапе получают функции, имеющие смысл фазовых характеристик хронологий как колебательных процессов. Для полученных функций фаз находят обратные функции путем вращения исходных фаз вокруг биссектрисы первого квадранта системы координат. Все эти операции возможны, когда функции фаз априорно монотонны и имеют ограниченную производную. На четвертом этапе вычислений производится прямая операция гармонизации восстанавливаемых хронологий. При этом используется ее обратная фаза. Затем выполняется обратная операция гармонизации с использованием фазы для эталонной хронологии. Тем самым обе хронологии синхронизируются. Последний этап вычислений предназначен для получения кривой пересчета исходных дат восстанавливаемой хронологии в новые временные координаты.

В эксперименте использована изотопная $\delta^{18}\text{O}$ -хронология (рис. 11, а), полученная из ледяного керна и искажённая в результате физических особенностей объекта. В качестве эталонной взята изотопная древесно-кольцевая $\delta^{18}\text{O}$ -хронология, которая привязана к временной шкале с точностью до года. По результатам датировки с применением разработанного алгоритма искажённая хронология была синхронизирована (рис. 11, б); рассчитанный коэффициент корреляции хронологий увеличился от -0,07 до 0,66.

В **пятой главе** рассмотрен программный комплекс (ПК) для исследования и моделирования квазигармонических колебаний. В нём реализованы предложенные в работе численные методы. Разработан визуальный язык для программирования компонентов, реализующих

разработанные численные методы (рис. 12). Предложена параллельная реализация МДК для увеличения производительности и обеспечения обработки больших массивов данных.



а – область выбора визуальных компонентов (блоков) – «Палитра», б – область проектирования модели алгоритма – «Диаграмма», в – область ввода-вывода данных

Рисунок 12 – Страница веб-приложения, разработанного ПК для построения алгоритма исследования с использованием визуальных компонентов

Код программного комплекса реализован на языке программирования C# с использованием технологии ASP.NET MVC 5 в среде Microsoft Visual Studio 2019. Приложение построено в соответствии с моделью «Model-View-Controller» (MVC) – «Модель-Вид-Контроллер», что позволяет обеспечить решение задачи интерактивного доступа к программному комплексу для большого количества исследователей.

В заключении приводятся основные результаты, полученные в работе.

В приложении А представлена численная реализация алгоритма расчета амплитуды и фазы в среде Mathcad, позволяющая наглядно показать этапы алгоритма определения характеристик: амплитуды и фазы на примере температурных сигналов.

В приложении Б представлена численная реализация алгоритма динамической кластеризации характеристик температурных сигналов в среде Mathcad, показывающая этапы реализации метода динамической кластеризации и обеспечения его сходимости.

В приложении В представлены для сравнения существующие климатические классификации.

В приложении Г представлена часть программного кода ПК, обеспечивающая интерактивный режим работы.

В приложении Д представлены свидетельства о государственной регистрации разработанных программных продуктов.

В приложении Е представлены акты внедрения результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации предложено решение крупной научной проблемы – создание системы математических методов, алгоритмов моделирования и идентификации элементов квазигармонических колебаний и их кластеризации для анализа нестационарных пространственно-неоднородных процессов, обеспечивающей работу с реальными климатическими характеристиками (полученными в результате инструментальных измерений, использования методов биоиндикации и изучения палеоклиматической информации) и позволяющей выделять климатически обусловленные региональные закономерности и, на их основе, климатические классы. Проблема имеет важное научное и народнохозяйственное значение. Решение направлено на информационное обеспечение процессов управления в области рационального природопользования и достижения оптимального социально-экономического развития.

В результате формулирования и создания системы математических методов и алгоритмов, а также разработки программного комплекса для кластеризации природно-климатических процессов, моделируемых квазигармоническими колебаниями, получены следующие результаты:

1. Для описания колебаний среднемесячных значений приземной температуры и значений прироста трахеид дендроиндикатора сформулированы математические модели, разработанные на основе АС, представленные в форме квазигармонического колебания. Математические модели описывают квазигармоническое колебание в виде колебания, модулированного по амплитуде и фазе. В модели введены параметры, ограничивающие глубину модуляции амплитуды и фазы в зависимости от уникальных особенностей исследуемых процессов. Введение параметров ограничения модуляции позволило повысить адекватность моделей.

2. Анализ элементов математической модели колебания средних значений приземной температуры показал, что глубина модуляции амплитуды и фазы – элементов, входящих в математическую модель, связана с географической широтой местности. Свойства элементов модели (амплитуды и фазы) с учетом установленной зависимости позволяют решить прикладную задачу классификации климатов. Введение в модель параметра широты позволяет повысить устойчивость методов кластеризации квазигармонических колебаний к нестационарности и пропускам в данных.

3. Математическая модель непрерывного радиального прироста трахеид дендроиндикатора позволила связать радиальный прирост ствола дерева с колебанием значений приземной температуры. Использование данной модели обеспечило возможность получения климатических характеристик на основе исследования изменений морфологической структуры дендроиндикатора

(биологического объекта, используемого в качестве индикатора климатических изменений) и применение их при решении задачи классификации климатов.

4. Предложен для анализа свойств амплитуды и фазы разработанный на основе обобщения теории аналитического сигнала численный метод вычисления элементов модели в форме квазигармонического колебания с применением оптимизации спектральной полосы частот квазигармонического колебания. Оптимизация спектральной полосы, совместно с гармонизацией сигнала, позволила расширить область применения разработанного метода для колебаний с широкой полосой частотного спектра.

5. На основе анализа и обобщения методов группировки предложен новый численный метод кластеризации, использующий синхронность изменений значений однотипных характеристик как базовый принцип. В результате численного и натурного экспериментов показано, что при наличии синхронности в изменениях значений однотипных характеристик разработанный метод преобразует исходное пространство колебаний значений численных величин в пространство средних типовых функций, сокращая его размерность в зависимости от заданного интервала корреляции. На основе выделенных типовых функций новый метод позволяет формировать кластеры без априорной информации об их количестве и определять для каждого кластера модель типового колебания. Типовые функции, полученные при помощи разработанного метода кластеризации для разных уровней корреляции, дают возможность оценить тесноту связи между кластерами.

6. Доказана сходимость нового метода кластеризации к конечному числу кластеров, основанная на результатах численного эксперимента и эксперимента на основе реальных данных.

7. Разработан алгоритм распознавания графических образов сложных кольцевых структур, основанный на обобщении метода кластеризации и метода вычисления элементов модели в форме квазигармонического колебания.

8. Разработан интерактивный программный комплекс, в основу которого положены предложенные в работе математические модели и численные методы, реализованные в виде созданных визуальных расчетных компонентов, упрощающих и ускоряющих процесс выполнения моделирования и анализа квазигармонических колебаний. Комплекс обеспечивает решение проблемы оперативной классификации климатов. В программном комплексе предложена реализация метода кластеризации для параллельных вычислений, обеспечивающая увеличение вычислительной производительности в 6,5 раза.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых журналах из перечня ВАК, включая журналы, индексируемые в базах данных Web of Science и Scopus:

Апробация разработанных методов в научных журналах по специальности

1. Вычислительные технологии в задачах обработки дендрэкологических данных / И. А. Ботыгин, **Ю. В. Волков**, В. Н. Попов, В. А. Тартаковский // Известия ТПУ. – 2005. – Т. 308, № 6. – С. 170-174.

2. Исследование численного алгоритма операции «сжатие-растяжение» применяемой для восстановления биоиндикационных данных / **Ю. В. Волков**, В. А. Тартаковский, В. Н. Попов, И. А. Ботыгин // Известия ТПУ. – 2006. – Т. 309, № 3. – С. 170-174.
 3. **Волков, Ю. В.** Математическая модель микроструктуры годичных слоев деревьев / **Ю. В. Волков**, В. А. Тартаковский // Известия ТПУ. – 2009. – Т. 314, № 5. – С. 117-120.
 4. **Волков, Ю. В.** Алгоритм синхронизации хронологических рядов / **Ю. В. Волков**, В. А. Тартаковский // Известия ТПУ. – 2009. – Т. 315, № 5. – С. 61-64.
 5. **Волков, Ю. В.** Алгоритм совместной фильтрации рядов клеточных структур годичных колец деревьев / **Ю. В. Волков**, В. А. Тартаковский // Известия ТПУ. – 2010. – Т. 317, № 5. – С. 125-129.
 6. **Волков, Ю. В.** Алгоритм анализа площадей годичных слоев деревьев / **Ю. В. Волков**, В. А. Тартаковский // Известия ТПУ. – 2011. – Т. 319, № 5. – С. 112-117.
 7. **Волков, Ю. В.** Алгоритм восстановления площадей прироста, основанный на геометрических особенностях годичных колец деревьев / **Ю. В. Волков**, В. А. Тартаковский // Известия ТПУ. – 2012. – Т. 321, № 5. – С. 146-149.
 8. **Волков, Ю. В.** Численный метод кластеризации климатических данных / **Ю. В. Волков**, А. В. Кавешников. // Вычислительные технологии. – 2023. – Т. 28, № 6. – С. 46-56. – DOI:10.25743/ICT.2023.28.6.005. (индексируется в WoS).
 9. **Volkov, Yu. V.** Analysis of temperature signals and their clusterization algorithm / **Yu. V. Volkov**. // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2019. – Vol. 55, № 3. – P. 243-248. – DOI: 10.3103/S8756699019030051. (индексируется в WoS).
Волков, Ю. В. Анализ температурных сигналов и алгоритм их кластеризации / Ю. В. Волков. // Автометрия. – 2019. – Т. 55, № 3. – С. 38-44. – DOI: 10.15372/AUT20190305.
 10. **Volkov, Y.V.** Estimate of stability of the dynamic clustering algorithm for temperature signals / **Y. V. Volkov**. // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2020. – Vol. 56, № 6. – P. 580-585. – DOI: 10.3103/S8756699020060126. (индексируется в WoS).
Волков, Ю. В. Оценка устойчивости алгоритма динамической кластеризации температурных сигналов / Ю. В. Волков // Автометрия. – 2020. – Т. 56, № 6. – С. 27-33. – DOI: 10.15372/AUT20200604
- Апробация разработанных моделей и методов в научных журналах из области объекта моделирования**
11. Древесно-кольцевые изотопные хронологии Прибайкалья и их связь с ледовой изотопной хронологией Гренландии / В. А. Воронин, В. А. Тартаковский, **Ю. В. Волков** [и др.]. // Оптика атмосферы и океана. – 2008. – Т. 21, № 1. – С. 60-64.
 12. Классификация климата путем анализа фазы температурных рядов / В. А. Тартаковский, В. А. Крутиков, **Ю. В. Волков**, Н. Н. Чередыко. // Оптика

атмосферы и океана. – 2015. – Т. 28, № 8. – С. 711-717. – DOI: 10.15372/AOO20150806.

13. Climate classification in the Northern hemisphere using phases of temperature signals / N. N. Cheredko, V. A. Tartakovsky, V. A. Krutikov, **Yu. V. Volkov** // Atmospheric and Oceanic Optics. – 2017. – Vol. 30, № 1. – P. 63-69. – DOI: 10.1134/S1024856017010043. (индексируется в WoS, Q2).

Классификация климатов Северного полушария на основе оценки фазы температурного сигнала / Н. Н. Чередыко, В. А. Тартаковский, В. А. Крутиков, Ю. В. Волков. // Оптика атмосферы и океана. – 2016. – Т. 29, № 8. – С. 625-632. – DOI: 10.15372/AOO20160802.

14. Transformation of Spatial Structure of the Surface Temperature Field in the Northern hemisphere / N. N. Cheredko, V. A. Tartakovsky, **Yu. V. Volkov**, V. A. Krutikov. // Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya. – 2020, №1. – P. 47-55. – DOI: 10.31857/S2587556620010057. (индексируется в Scopus).

Трансформация пространственной структуры поля приземной температуры Северного полушария / Н. Н. Чередыко, В. А. Тартаковский, Ю. В. Волков, В. А. Крутиков. // Известия РАН. Серия географическая. – 2020, № 1. С. 47–55. – DOI: 10.31857/S2587556620010057.

15. Волков, Ю. В. Структура температурного поля Северного полушария в период современных климатических изменений / **Ю. В. Волков**, Н. Н. Чередыко, В. А. Тартаковский. // Оптика атмосферы и океана. – 2022. – Т. 35, № 2S (397). – С. 143-149. – DOI: 10.15372/AOO20220209.

Рецензируемые научные публикации по результатам конференций, индексируемые в Web of Science и Scopus:

16. Information technology of tree-ring processing / I. A. Botygin, V. N. Popov, **Y. V. Volkov**, V. A. Tartakovsky. – DOI: 10.1109/KORUS.2004.1555260 // The 8th Russian-Korean International Symposium on Science and Technology (KORUS 2004) : proceedings, Tomsk, Russia, June 26 – July 03, 2004. – University of Ulsan, 2004. – P. 15-17.

17. Mathematical model of the radial cross section of tree rings / P. A. Akulov, V. A. Tartakovsky, Yu. N. Isaev [et al.]. – DOI:10.1109/IFOST.2012.6357810 // 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST): conference proceedings, Tomsk, Russia, September 18–21, 2012. – IEEE, 2013. – P. 1-5.

18. Mathematical model for the research of environmental changes on the basis of biological indication / V. N. Popov, **Yu. V. Volkov**, V. A. Tartakovsky, I. A. Botygin. – DOI: 10.1109/IFOST.2012.6357812 // 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST): conference proceedings, Tomsk, Russia, September 18–21, 2012. – IEEE, 2013. – P. 1-4.

19. Application of a principle of synchronicity to an analysis of climatic processes / V. A. Tartakovsky, V. A. Krutikov, **Yu. V. Volkov**, N. N. Cheredko. – DOI: 10.1088/1755-1315/48/1/012002 // 9th International Conference and Early Career Scientists School on Environmental Observations, Modelling and Information Systems, ENVIROMIS 2016: conference proceedings, Tomsk, Russia, July 11–16,

2016. – IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2016. – V. 48. – P. 012002.

20. Development and study of a parallel algorithm of iteratively forming latent functionally-determined structures for classification and analysis of meteorological data / V. A. Sorokin, **Yu. V. Volkov**, A. I. Sherstneva, I. A. Botygin. – DOI: 10.1088/1755-1315/48/1/012012 // 9th International Conference and Early Career Scientists School on Environmental Observations, Modelling and Information Systems, ENVIROMIS 2016: conference proceedings, Tomsk, Russia, July 11–16, 2016. – IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2016. – V. 48. – P. 012012.

21. Algorithm of a chronological series synchronization / P. A. Akulov, V. A. Tartakovsky, **Yu. V. Volkov**, D. A. Kalashnikova // 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST): conference proceedings, Novosibirsk, Russia, June 01–03, 2016. – IEEE, 2016. – P. 342–344.

22. Volkov, **Yu. V.** Features of the structure of surface air temperature field in the Northern hemisphere / **Yu. V. Volkov**, N. N. Cheredko. – DOI: 10.1117/12.2288296 // 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics: proceedings, Irkutsk, Russia, July 03–07, 2017. – SPIE, 2017. – Vol. 104666S.

23. Study of phase clustering method for analyzing large volumes of meteorological observation data / **Y. V. Volkov**, V. A. Krutikov, I. A. Botygin [et al.]. – DOI: 10.1117/12.2286873 // 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics: proceedings, Irkutsk, Russia, July 03–07, 2017. – SPIE, 2017. – Vol. 104665L.

24. Climate classification in the Northern Hemisphere using envelopes of temperature signals / **Y. V. Volkov**, V. A. Tartakovsky, N. N. Cheredko [et al.]. – DOI: 10.1088/1755-1315/211/1/01200 // 10th International Conference and Early Career Scientists School on Environmental Observations, Modelling and Information Systems, ENVIROMIS 2018: conference proceedings, Tomsk, Russia, July 05–11, 2018. – IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2018. – V. 211. – P. 012003.

25. Northern Hemisphere temperature field structure in various time frames / N. N. Cheredko, V. A. Tartakovsky, **Y. V. Volkov**, V. A. Krutikov. – DOI: 10.1117/12.2504479 // 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics: proceedings, Tomsk, Russia, July 02–05. – SPIE, 2018. – Vol. 1083384.

26. Classification of climate in the northern hemisphere by the envelope of temperature signals / **Y. V. Volkov**, V. A. Tartakovsky, N. N. Cheredko [et al.]. DOI:10.1117/12.2505454 // 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics: proceedings, Tomsk, Russia, July 02–05. – SPIE, 2018. – Vol. 108338Z.

27. Cheredko, N. N. Climate clusters of Eurasia against the background of global climate change / N. N. Cheredko, V. A. Tartakovsky, **Y. V. Volkov**. – DOI: 10.1088/1755-1315/386/1/012009 // 9th International Conference on Computational Information Technologies for Environmental Sciences, CITES 2019 and International

Young Scientists School 2019: conference proceedings, Moscow, Russia, May 27 – June 06, 2019. – IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2019. – V. 386. – P. 012009.

28. External factors in the formation of climate clusters of Eurasia / N. N. Cheredko, **Y. V. Volkov**, V. A. Tartakovsky [et al.]. – DOI: 10.1117/12.2540714 // 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics: proceedings, Novosibirsk, Russia, July 01–05, 2019. – SPIE, 2019. – Vol. 112087M.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ:

29. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2013610158. «DendroM» / **Ю. В. Волков** (RU), В. А. Тартаковский (RU) ; правообладатель ФГБУН ИМКЭС СО РАН (RU). – № 2012619390 ; заявл. 01.11.2012 ; опубли. 09.01.2013. – 1 с.

30. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2016612960. «ChronoD» / **Ю. В. Волков** (RU), В. А. Тартаковский (RU) ; правообладатель ФГБУН ИМКЭС СО РАН (RU). – № 2015661893 ; заявл. 07.12.2015 ; опубли. 20.04.2016. – 1 с.:

31. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2016611146. «Climate GR» / **Ю. В. Волков** (RU), В. А. Тартаковский (RU) ; правообладатель ФГБУН ИМКЭС СО РАН (RU). – № 2015661892 ; заявл. 07.12.2015 ; опубли. 20.02.2016. – 1 с.

32. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2018612044. Программа параллельного вычисления расчетных блоков алгоритма классификации температурных полей «Parallel» / **Ю. В. Волков** (RU), В. А. Сорокин (RU), В. А. Тартаковский (RU), И. А. Ботыгин (RU) ; правообладатель ФГБУН ИМКЭС СО РАН (RU). – № 2017663026 ; заявл. 14.12.2017 ; опубли. 09.02.2018, Бюл. № 2. – 1 с.

33. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019665560. Программа для определения границ климатических кластеров «Climatic boundaries» / **Ю. В. Волков** (RU) ; правообладатель ФГБУН ИМКЭС СО РАН (RU). – № 2019664405 ; заявл. 13.11.2019 ; опубли. 25.11.2019, Бюл. № 12. – 1 с.

34. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2020615324. Программный комплекс климато-экологического мониторинга «ССЕМ» / **Ю. В. Волков** (RU), А. Р. Харченко (RU) ; правообладатель ФГБУН ИМКЭС СО РАН (RU). – № 2020613933 ; заявл. 03.04.2020 ; опубли. 21.05.2020, Бюл. № 6. – 1 с.

Монография

35. Методы и алгоритмы восстановления климатоэкологической информации на основе дендрохроноиндикаторов: монография / И. А. Ботыгин, **Ю. В. Волков**, В. Н. Попов, В. А. Тартаковский. – Томск: Изд-во ТПУ, 2015. – 185 с. – ISBN 978-5-4387-0531-4.

Подписано в печать 04.09.2026. Формат 60х84/16. Бумага «Комус».
Печать XEROX. Усл.печ.л. 2,15. Уч.-изд.л. 1,95.
Заказ 145-26. Тираж 100 экз.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ