

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

**И.А. Ботыгин, Ю.В. Волков, В.Н. Попов, В.А. Тартаковский**

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ  
КЛИМАТОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ  
НА ОСНОВЕ ДЕНДРОХРОНОИНДИКАТОРОВ**

Монография

Издательство  
Томского политехнического университета  
2015

УДК 551.583.4:504

ББК 26.237:20.1

Б63

**Ботыгин И.А.**

Б63

Методы и алгоритмы восстановления климатозкологической информации на основе дендрохроноиндикаторов : монография / И.А. Ботыгин, Ю.В. Волков, В.Н. Попов, В.А. Тартаковский ; Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – 185 с.

ISBN 978-5-4387-0531-4

Монография посвящена исследованию моделей, алгоритмов, методов и программного обеспечения, позволяющих осуществлять накопление и обработку больших массивов многопараметрических дендрохронологических данных в приемлемые сроки. Описаны концепции дендрохроноиндикации как метода исследования. Представлена математическая модель радиального сечения годовых колец. Предложено оригинальное применение формализма аналитического сигнала для анализа математической модели. Практическая реализация алгоритмов обработки и анализа годовых колец деревьев рассматривается с использованием разработанного распределенного вычислительного комплекса.

Предназначена для специалистов в области дендрохронологического анализа, а также научных работников, аспирантов и студентов технических специальностей вузов.

**УДК 551.583.4:504**

**ББК 26.237:20.1**

*Рецензенты*

Доктор технических наук,  
профессор ТУСУРа

*А.А. Мицель*

Доктор физико-математических наук  
заведующий кафедрой ТГУ

*В.Н. Черепанов*

**ISBN 978-5-4387-0531-4**

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2015

© Ботыгин И.А., Волков Ю.В.,

Попов В.Н., Тартаковский В.А., 2015

© Оформление. Издательство Томского политехнического университета, 2015

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>6</b>
<b>1. ДЕНДРОХРОНОИНДИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГОДИЧНЫХ КОЛЕЦ ДЕРЕВЬЕВ.....</b>	<b>9</b>
1.1. Дендрохроноиндикация как метод исследования.....	9
1.2. Особенности радиального роста дерева и формирования годовых колец.....	13
1.3. Методы изучения сезонного роста деревьев.....	17
1.4. Методы исследования годового прироста и анализ поперечных спилов деревьев.....	19
1.5. Сравнительный обзор и анализ аппаратно-программных средств обработки и анализа годовых колец деревьев.....	24
1.6. Обзор современных решений в области grid-технологий.....	29
<b>2. ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАДИАЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ ГОДИЧНЫХ КОЛЕЦ.....</b>	<b>36</b>
2.1. Структура годовых колец на микро и макроуровне.....	39
2.1.1. Биоиндикационная математическая модель микроструктуры годовых слоев деревьев.....	43
2.1.2. Алгоритм совместной фильтрации рядов клеточных структур годовых колец деревьев.....	49
2.2. Биологическая природа шумов.....	55
2.3. Монотонность и непрерывность роста как основа построения математической модели годовых колец.....	58
2.4. Применение формализма аналитического сигнала для анализа математической модели.....	61
2.4.1. Монотонность фазы как предпосылка для введения аналитического сигнала.....	66
2.5. Преобразование «сжатие-растяжение».....	67
2.6. Алгоритм обработки радиального сечения.....	70
2.7. Предварительная фильтрация шумов.....	72
2.8. Вычисление функции фазы.....	77
2.9. Восстановление функции роста.....	83
2.9.1. Вычисление обратной функции фазы.....	83
2.9.2. Операция «сжатие-растяжение».....	85
2.9.3. Численное исследование качества оценок фазы.....	88
2.9.4. Результаты численного эксперимента.....	90
2.10. Получение сезонных изменений радиального роста.....	95
2.10.1. Формирование однородной выборки радиальных сечений.....	97
2.10.2. Результаты анализа радиальных сечений дерева.....	99
2.11. Алгоритм анализа площадей годовых слоев деревьев.....	105

<b>3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОБРАБОТКИ ГОДИЧНЫХ КОЛЕЦ ДЕРЕВЬЕВ.....</b>	<b>114</b>
3.1. Использование технологии и инструментальных средств Rational Software и AllFusion для разработки информационно-программного обеспечения комплекса .....	114
3.2. Архитектура и системные решения при реализации распределенных вычислений .....	118
3.3. Разработка обобщенной функциональной структуры и алгоритмов функционирования многомашинного вычислительного комплекса .....	119
3.3.1. Формирование профилей вычислительных серверов .....	120
3.3.2. Разработка алгоритма функционирования коммуникационного сервера .....	123
3.3.3. Разработка алгоритма динамического определения реального времени отклика вычислительных серверов .....	127
3.3.4. Разработка подсистемы контроля и разграничения прав доступа к информационно-вычислительным ресурсам комплекса.....	128
3.3.5. Разработка подсистемы инструментальных средств администратора комплекса .....	130
3.3.6. Разработка интерфейсных средств пользователей комплекса .....	133
3.3.7. Архитектура многомашинного вычислительного комплекса .....	134
3.4. Разработка обобщенного алгоритма управления данными в многомашинном вычислительном комплексе.....	139
<b>4. РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ГОДИЧНЫХ КОЛЕЦ ДЕРЕВЬЕВ В МНОГОМАШИННОМ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ.....</b>	<b>145</b>
4.1. Имитационное моделирование систем распределенных вычислений .....	145
4.1.1. GPSS-модель для оценки эффективности функционирования grid-систем произвольной структуры.....	146
4.1.2. Результаты имитационного моделирования многомашинного вычислительного комплекса удаленного анализа изображений годичных колец деревьев .....	147
4.2. Многоуровневая схема построения системных и обрабатывающих модулей комплекса .....	151
4.3. Административно-системная часть многомашинного вычислительного комплекса обработки годичных колец деревьев .....	152
4.4. Автоматизированное рабочее место исследователя для анализа годичных колец деревьев .....	153
4.5. Формирование и ведение баз данных многомашинного вычислительного комплекса .....	163

4.5.1. Системная база данных .....	164
4.5.2. База данных научной информации .....	165
4.5.3. База дендрэкологических данных .....	166
4.6. Тестирование и оценка качества многомашинного вычислительного комплекса на соответствие оценочным элементам государственного стандарта.....	168
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>170</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>173</b>

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время во многих областях охраны окружающей среды и экологии человека и, в частности, в мониторинге, моделировании и прогнозировании климатических и экосистемных изменений под воздействием природных и антропогенных факторов встает задача изучения объектов, информация о которых требует как большого объема памяти для их хранения, так и больших вычислительных мощностей. Для решения задач прогнозирования климатических и экосистемных изменений необходимо искать аналогичные ситуации в прошлом, поэтому исследуются ряды изменения элементов климата в пределах возможного. Физические параметры климата широко измерялись последние сто лет, но для прогноза этого недостаточно. Например, годовые кольца деревьев могут дать информацию на тысячу лет назад, а по ископаемой древесине – до десяти тысяч лет назад. Климат характеризуется такими физическими величинами как: температура, давление, влажность, радиационные характеристики и пр. Основная задача климатологии это прогноз изменения этих физических величин и в их совокупности, прогноз комфортности окружающей среды или качества жизни. Однако решение полной задачи чрезвычайно затруднено в силу многообразности процессов, влияющих на формирование климата, недостаточной изученностью их взаимодействия.

Биологические объекты находятся в тесной взаимосвязи с элементами окружающей среды и являются универсальной базой для проведения подобных исследований. В некотором диапазоне значений физических характеристик окружающей среды их изменения не влияют на жизненно важную, целевую функцию организма. Таким образом, например, дерево является естественным сглаживающим фильтром, своим существованием регулируя «климатическую задачу». При этом в годовых кольцах дерева содержится ответ на главный вопрос – датированная интегральная информация о комфортности среды. Такой подход состоит в том, что должны измеряться физические параметры дерева, значения которых градуируются в соответствии с состоянием окружающей среды. Наиболее информативным будет параметр, который максимизируется вместе с развитием и ростом организма. Этот параметр – биологический элемент климата – будет количественно характеризовать климат, комфортность жизни в нем, с «точки зрения» дерева. Подобные исследования ведутся во всех значимых климатических регионах. Объемы данных очень большие, причем для достоверности результатов исследований необходимо проводить сопоставление между собой этих данных.

В связи с этим для указанных задач актуальна интеграция и масштабирование использования вычислительных ресурсов. Усложняет ситуацию разнородность используемых компьютерных платформ (гетерогенность среды) и распределение в пространстве информационных и вычислительных ресурсов. В таких условиях одним из возможных решений является использование технологии распределенных вычислений. Данная технология позволяет разгрузить маломощные пользовательские компьютеры, обеспечить необходимую вычислительную мощность. В этом случае исследователь не заботится о том, где выполняются функциональные модули системы, о модификации используемого программного обеспечения и т. д.

Дендроэкологический анализ наследует особенности решения задач климатических и экосистемных изменений и также требует математической обработки очень большого объема данных, например, иногда требуется обработка временных рядов наблюдений за тысячу лет и более, и коллективной работой сотрудников, практически, на всех этапах дендроэкологических исследований, а также в необходимости хранения и систематизации больших объемов неоднородной структурированной информации (хронологические ряды наблюдений, результаты обработки, сопутствующие метеорологические, геологические, геофизические, аэрокосмические и т.п. ряды наблюдений).

Годичные кольца деревьев как биологический носитель хронологической информации, являются широко используемым объектом изучения. Существует ассоциация исследователей годичных колец деревьев Tree Ring Society, известны своими результатами лаборатории в Аризоне, Швейцарии, Германии. В России подобные исследования проводятся в С.-Петербурге, Екатеринбурге, Томске. Институт леса СО РАН г. Красноярск является ведущей организацией в этой области.

Исследования в области дендроэкологии, помимо большого объема вычислений, требуют и разработки новых методов получения экспериментальных данных, которые бы более точно отражали изменение соответствующих климатических данных. Отметим необходимость внедрения исследований в области дендроэкологии и в университетах при организации учебного процесса по соответствующим дисциплинам.

С математической точки зрения годичные кольца на поперечном спиле дерева представляют собой модулированный сигнал, зависящий от двух пространственных переменных. Поэтому перспективным в дендроэкологических исследованиях является двумерный анализ годичных колец, который в полной мере в исследовательских задачах не применяется.

Таким образом, только развитое математическое описание, поддержанное численными алгоритмами и их эффективной сетевой программной реализацией с возможностью хранения большого объема дендроэкологических данных и сопутствующей им научной информации, с отсутствием дублирования данных, с легкостью и простотой модификации алгоритмов и программ обработки, с обеспечением надежной защиты данных от несанкционированного использования и восстановления данных в случае сбоя в системе, с решением проблем исследователей, работающих на маломощных рабочих станциях, со снижением стоимости и трудоемкости администрирования системы и др. даст возможность получить новые результаты и качественные оценки экологических параметров окружающей среды.



# **1. ДЕНДРОХРОНОИНДИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГОДИЧНЫХ КОЛЕЦ ДЕРЕВЬЕВ**

Биоиндикация – это использование доступных для наблюдения процессов, происходящих в живом организме с целью определения параметров среды, в которой находится организм. В качестве живого организма, биологического объекта, можно выбрать системы на различных уровнях организации живой материи: молекулы органических веществ, клетки, ткани, органы, организмы, популяции, виды, группировки, сообщества организмов. Биологический объект, позволяющий получать достаточно точные и воспроизводимые результаты, выбирается в качестве биоиндикатора [1].

Широкое использование ботанических индикаторов связано с тем, что они проявляют свои свойства в пределах определенных природно-территориальных комплексов. По степени устойчивости связи с объектом наблюдения или индикатором они делятся на панареальные, сохраняющие связь с индикатором на всей территории ареала, зональные, имеющие индикационное значение в пределах географических зон, локальные, обнаруживающие связь с индикатором в одном физико-географическом районе [2].

В исследованиях изменения климата значительное место среди биоиндикаторов занимают годовые кольца многолетних древесных растений. Задача использования деревьев в качестве природных индикаторов заключается в выявлении погодичной изменчивости качественных и количественных характеристик слоев прироста и установлении факторов внешней среды, которые определяют эту изменчивость [1, 3].

## **1.1. Дендрохроноиндикация как метод исследования**

Дендрохроноиндикация является биоиндикационным методом, позволяющим получать информацию о параметрах окружающей среды по приросту дерева. Применяя существующие методы можно определить такие параметры, как температуру, влажность и др.

Достижение задачи получения подобной информации об окружающей среде по приросту дерева основывается на дендрохронологических принципах:

- закон лимитирующих факторов,
- отбор местообитаний,
- чувствительность,
- перекрестное датирование [3].

Закон лимитирующих факторов (закон минимума Либиха). Этот закон был установлен Либихом в 1840 году экспериментально на сельскохозяйственных растениях. Суть его в том, что биологические процессы, в частности рост, не могут протекать быстрее, чем это позволяет наиболее лимитирующий (ограничивающий) фактор. В случае если этот фактор в силу каких-либо причин переходит в разряд оптимальных, скорость роста будет возрастать до тех пор, пока другой фактор (или факторы) не станут лимитирующими [3, 4].

Согласно этому закону, для анализа следует брать образцы с таких деревьев, величина годового прироста которых прямо или косвенно лимитируется каким-либо внешним фактором.

Принцип отбора местообитаний является составной частью закона лимитирующих факторов. Он требует, чтобы при дендрохронологических исследованиях образцы древесины брали с таких местообитаний, где проявляется действие лимитирующих факторов.

Чем сильнее ежегодная изменчивость величины прироста деревьев, тем более надежным индикатором внешних условий она является. Для оценки степени чувствительности древесно-кольцевых серий используется специальный показатель – коэффициент чувствительности. Вычисление его производится по следующей формуле.

$$K_r = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^{n-1} \left[ \frac{2 \cdot (x_{i+1} - x_i)}{x_{i+1} + x_i} \right] \quad (1.1)$$

где  $x_i$  – индекс ширины годового кольца за  $i$ -й год;  $n$  – общее количество колец в данной кольцевой серии.

Среднее значение коэффициента чувствительности определяется путем нахождения абсолютной разности соседних значений ширины (или индексов) колец, деленной на их среднюю величину. Это один из наиболее важных показателей, при помощи которого можно отбирать места обитания и виды древесных растений, наиболее пригодные для исследований. Диапазон изменчивости значений коэффициента чувствительности отдельно взятых пар колец колеблется от 0 до 2. Серия колец считается чувствительной, когда средний коэффициент чувствительности превышает 0,3 [3, 5].

Принцип перекрестного датирования основывается на том, что древесные растения, произрастающие в пределах какого-либо района, величиной прироста сходно реагируют на изменение внешних факторов. В благоприятные по климатическим условиям годы формируются широкие кольца, в неблагоприятные – узкие. В связи с этим у большей части деревьев наблюдается синхронное изменение ширины годовых колец, как во времени, так и в пространстве. Чередование узких и ши-

роких колец неповторимо во времени, поэтому совместить графики изменения ширины колец у сравниваемых деревьев можно лишь в пределах строго определенного участка дендрохронологической шкалы. Перекрестное датирование – это сравнение сходных рисунков колец у различных деревьев и выбор точного места, где соответствие между ними найдено [3].

Получение информации о климате с использованием в качестве биоиндикаторов годичных колец деревьев происходит в несколько этапов.

В первую очередь производится выбор района сбора образцов. Затем выбирается вид древесного растения и типы условий мест произрастания, с которых можно получить наиболее чувствительную к определенному фактору среды кольцевую хронологию. Для этой цели предварительно берут и исследуют образцы древесины с разных видов древесных растений и при различных условиях произрастания. Основное внимание обращают на изучение чувствительности и возможности перекрестного датирования, заключающегося в исследовании сходства процессов роста у соседних деревьев и продлении информационных рядов путем сопоставления образцов разного возраста. Наиболее отзывчивыми на изменение внешних условий являются растения типа голосеменных, поэтому они в большинстве случаев используются при проведении дендрохронологических исследований. После того, как определены наиболее чувствительные виды древесных растений, приступают к выбору конкретных участков (или пробных площадей), с которых будут отбираться образцы древесины для построения древесно-кольцевых хронологий. От правильности выбора участков во многом зависит качество полученной хронологии. Участки необходимо выбрать там, где наиболее полно проявляется действие какого-либо лимитирующего фактора, в то время как действие других факторов проявляется в наименьшей степени. Лимитирующим фактором считается один из факторов, необходимых для полноценного роста дерева (температура, влажность, и др.), который поступает в недостаточном количестве, и изменения которого определяют и ограничивают изменения в росте [3].

При проведении дендроклиматологических исследований берут образцы с участков, которые не подвергались действию катастрофических факторов, для определения только климатических параметров исключают участки, подвергавшиеся антропогенным воздействиям. Большое влияние на изменение величины годичного прироста оказывают фитоценотические взаимоотношения в сообществе или отношения конкуренции между растениями. В пределах древостоя господствующие деревья меньше всего меняют свое положение в течение жизни, поэтому они наиболее пригодны для выбора их в качестве образцов [3, 6].

Необходимым является детальное геоботаническое описание типов леса, в пределах которых проводят исследования.

Для взятия образцов древесины, без значительного повреждения ствола дерева, используют специальные бурава, которые позволяют высверливать из стволов цилиндры древесины (керны) диаметром примерно 4 мм и длиной до 40 см. Керн представляет собой чередование древесины, сформированной в разные годы и сезоны роста, в одном радиальном направлении.

Образцы древесины обычно берут из нижней части ствола (0,2–1,3 м от поверхности земли), чтобы захватить наибольшее количество годовичных слоев, для получения надежных древесно-кольцевых хронологий образцы берут по двум радиусам с 10–20 деревьев. В этом случае обеспечивается статистическая обработка полученного ряда и уменьшается роль индивидуальных различий в изменчивости ширины годовичных колец.

Буровые образцы и выбранные радиусы на спилах зачищают режущим инструментом, после чего производят датировку колец, то есть точное определение года формирования каждого слоя прироста на основе взаимного сопоставления и согласованности в изменении ширины годовичных колец и определяют ширину годовичных слоев. В результате получают дискретные значения величины ежегодного прироста древесины за отдельные вегетационные периоды.

Различия в темпах роста, обусловленных видом древесного растения, возрастными и индивидуальными особенностями, а также типом условий мест произрастания, сглаживают путем применения так называемой стандартизации значений ежегодного прироста. Вычисляют индексы ширины годовичных колец путем деления действительной толщины каждого кольца на среднюю норму прироста за тот же год. Расчет средней нормы производится по методу наименьших квадратов. Полученные величины отражают главным образом среднюю ежегодную изменчивость внешних лимитирующих рост факторов, в частности климатических [3, 7].

Ежегодные значения ширины годовичных слоев являются исходными данными, на основе которых можно реконструировать климатические условия прошлого. Информация о величине прироста древесины за один год может быть расширена при изучении прироста дерева в течение вегетационного периода. Исследование особенностей роста от начала формирования древесины до завершения роста с более детальным изучением ростовой активности дерева внутри сезона роста является актуальной задачей.

Вычисление параметров роста это – трудоемкий процесс, поэтому в настоящее время для обработки данных измерения ширины годовичных

слоев деревьев широко используют ЭВМ, для чего требуется разработка новых методов, которые позволили бы быстро и точно восстанавливать необходимую, а также качественно новую информацию [3].

## **1.2. Особенности радиального роста дерева и формирования годичных колец**

В основе роста и развития целого организма и отдельной клетки лежит обмен веществ. В процессе жизни каждого организма происходят качественные и количественные изменения.

Необратимое увеличение объема и массы живого тела и его частей получило название роста. Развитие – это качественные изменения организма и его составляющих. Рост и развитие тесно связаны между собой. Оба процесса регулируются на клеточном уровне [8].

Рост отдельных органов и всего организма складывается из роста его клеток. Основные этапы роста, а также и развития на клеточном уровне это деление клеток и их растяжение, т. е. увеличение размеров в длину. Радиальный рост ствола дерева обычно рассматривается как процесс, происходящий в три этапа: деление клеток, рост их растяжением и формирование клеточной стенки.

Процесс деления является наиболее важным, так как от скорости протекания этого процесса зависит количество образованных новых клеток, которые составят слой прироста.

У высших растений (деревьев) рост тесно связан с деятельностью делящихся тканей – меристем. Типы роста различных органов определяются характером расположения меристем. Апикальные меристемы – меристемы побегов и корней, обеспечивают рост древесного растения в высоту и рост подземных его частей, латеральные (боковые) – увеличение клеток ствола и корней дерева в толщину, а именно клеток, древесины и коры [9].

Процесс растяжения не менее важен для формирования слоя прироста, так как его величина напрямую зависит от размера клеток. Длительность роста растяжением у клеток различных тканей различна. Переход меристематической клетки к росту растяжением сопровождается появлением в ней множества полостей – вакуолей и их слиянием в одну, вытягиванием стенок клеток в длину и поглощением вакуолями большого количества воды.

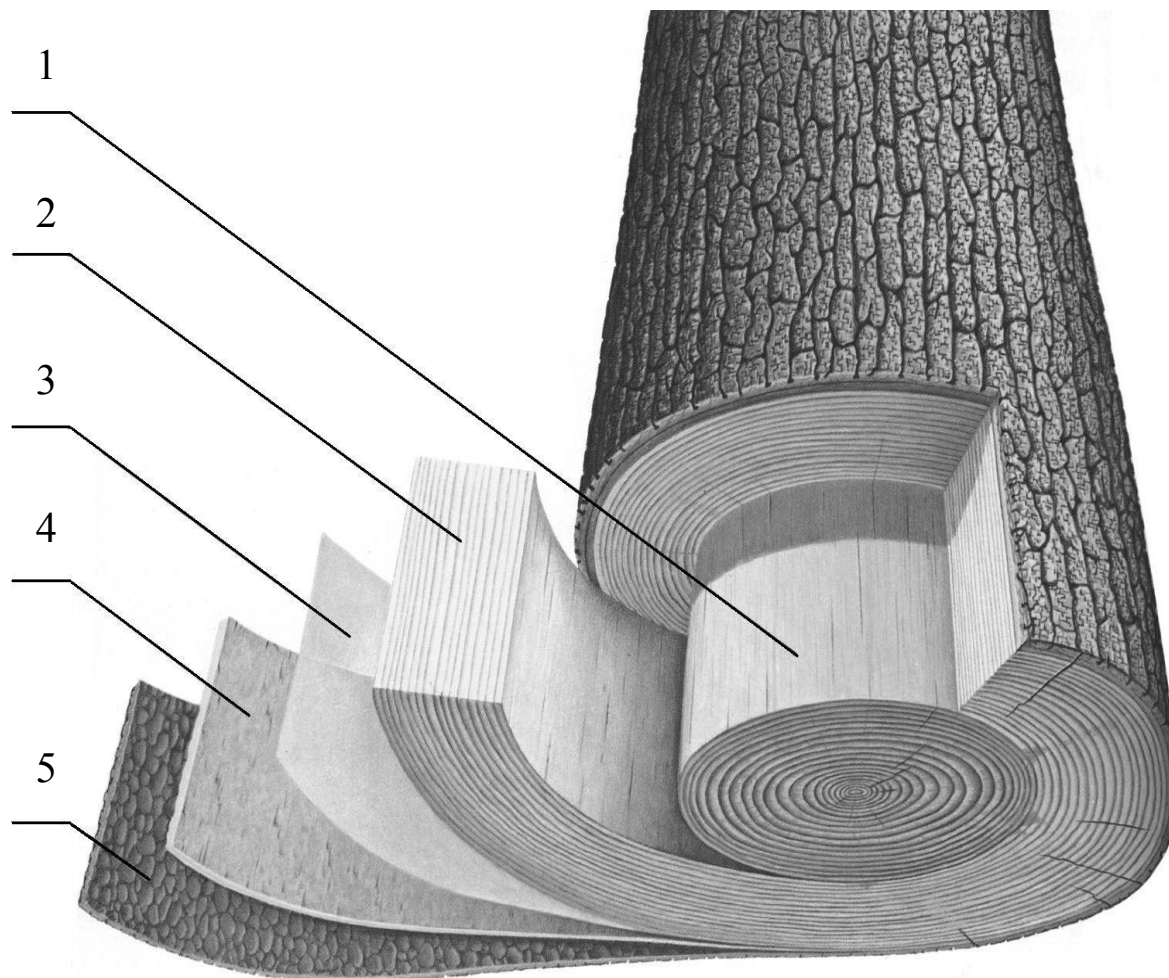
Последний этап роста, характеризуется отложением жесткой вторичной стенки, формирование которой наблюдается сразу или чуть раньше прекращения радиального роста клеток. Отложение вторичной стенки с последующей ее лигнификацией или одревеснением можно рас-

считать как заключительную стадию развития клетки. Содержание лигнина, полимерного вещества полифенольной природы, в оболочках некоторых видов клеток может достигать 30 %. Оболочка, пропитанная лигнином, очень прочна и тверда. Лигнифицируются быстрее всего оболочки клеток, подвергающихся механическим нагрузкам. Клетка, покрытая сильно лигнифицированной оболочкой, обычно рано или поздно отмирает. Таким образом, процессы лигнификации связаны с параметром плотности древесины.

Наиболее важный момент в развитии клеток высшего растения – это возникновение их структурной и функциональной разнокачественности, в результате чего образуются специализированные клетки, присущие отдельным тканям. На рис. 1.1 представлен древесный ствол и его слои [8].

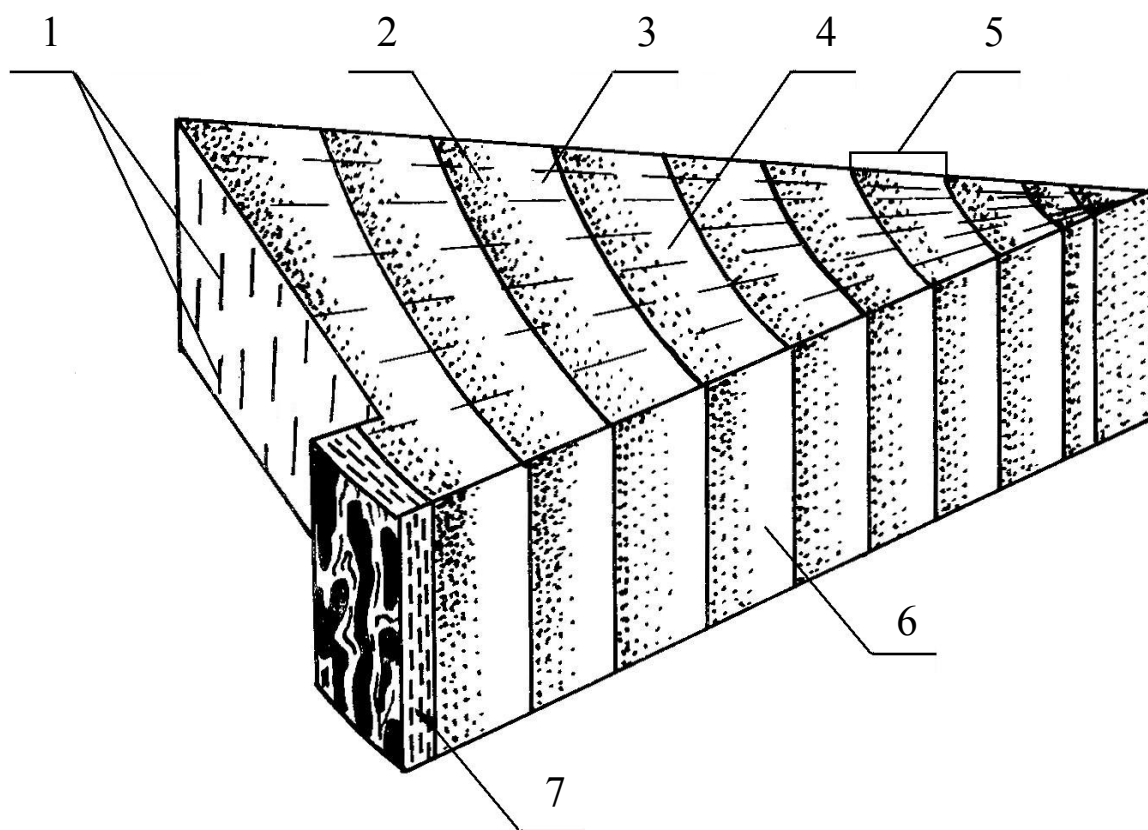
Древесный ствол служит опорой и системой «трубопроводов». Самый тонкий слой и самый необходимый для роста дерева, в том числе и радиального, – камбий. Он является самоподдерживающейся клеточной системой, производные камбия могут дифференцироваться в различных типах клеток. Клетки камбия образуют непрерывный слой, выстилающий ствол, ветви и корни [9]. При делении клеток камбия наружные клетки становятся флоэмой, по этой волокнистой ткани ко всем частям дерева доставляются сахара. Старая флоэма становится корой. Внутренние клетки камбия становятся ксилемой. Ксилема или древесина – это ткань, служащая для проведения воды и растворов минеральных солей от корней к листьям и другим органам. Молодые клетки ксилемы образуют заболонь, а старые – сердцевину.

Для роста и развития древесного растения необходимо оптимальное сочетание природных факторов, что ограничивает период роста дерева. В умеренном климате деревья особенно быстро растут весной, когда тонкостенные клетки, образующие ксилему, быстро увеличиваются. На срезе ствола эти клетки образуют светлые круги – так называемую «раннюю» древесину. В конце лета рост замедляется, и клетки становятся меньше, а стенки их утолщаются, формируя «позднюю» древесину. Клетки поздней древесины видны на срезе как более темные круги. Каждое кольцо, светлое и темное, соответствует двум составляющим роста, каждая пара соответствует одному году. Годичный слой формируется с плавно изменяющейся окраской между ранней и поздней древесиной (рис 1.2) [3, 5, 10].



*Рис. 1.1. Древесный ствол и его слои:  
1 – сердцевина, 2 – заболонь, 3 – камбий, 4 – флоэма, 5 – кора*

Образование формы и структуры годичных слоев у древесных растений происходит под влиянием большого количества комплексно действующих факторов как внутренних, так и внешних. Из внутренних факторов, наибольшее влияние оказывает вид древесного растения, индивидуальные особенности дерева, возраст дерева, положение среза по высоте ствола, плодоношение. К внешним факторам, оказывающим влияние на рост дерева, относятся климатические, почвенно-грунтовые условия, разного рода катастрофы, а также деятельность человека [5, 11]. Несмотря на комплексность воздействия, заметный эффект на рост и развитие дерева оказывают внешние факторы, или факторы среды, основными из которых являются свет, тепло, влага. Климатические условия влияют на рост деревьев косвенно, через процессы фотосинтеза, дыхания, накопления питательных веществ [9].



*Рис. 1.2. Схема строения древесины из ствола дерева и ориентация срезов:  
 1 – лучи, 2 – поздняя древесина, 3 – ранняя древесина, 4 – поперечный срез,  
 5 – годичный слой, 6 – радиальный срез, 7 – кора*

Все климатические параметры способны оказать влияние на ростовые процессы дерева в течение вегетационного периода, что отражается на структуре годичного слоя. Восстановление информации по кольцам является не простой задачей, так как не существует четкого описания роста из-за сложности происходящих процессов.

Сезонное формирование годичных колец хвойных представляет собой сложное сочетание процессов роста и развития клеток – процессов дифференцировки. В течение сезона изменяются как численность клеток в соответствующих зонах, так и скорость прохождения клеток через эти зоны. Любой новый инструмент, позволяющий получать дополнительную информацию о росте, является значимым в рамках поставленной задачи восстановления параметров окружающей среды. Для изучения сезонной активности камбия нужно развивать формальный подход, в результате которого была бы решена задача непрерывного измерения параметров роста дерева в период вегетации.



### 1.3. Методы изучения сезонного роста деревьев

Методы изучения сезонной динамики строятся на представлении о том, что в течение отдельного сезона роста камбий образует несколько слоев клеток, способных к ограниченному делению. Зона, где происходят деления клеток, называется камбиальной, она состоит из ксилемных материнских клеток, камбия и флоэмных материнских клеток. Каждая клетка ксилемы переставляет собой дочернюю клетку последнего деления ксилемной материнской клетки, находящейся на границе камбиального слоя. После потери способности к делению, дочерняя клетка перемещается в зону радиально растягивающихся клеток, а затем в зону созревающей ксилемы. Таким образом, дифференцирующаяся ксилема включает в себя несколько слоев: ограниченно делящихся ксилемных материнских клеток, радиально растягивающихся клеток, закончивших растяжение, но формирующих вторичную клеточную стенку. Зрелая ксилема – это клетки, у которых все процессы дифференцирования завершены и отсутствует протопласт – живое содержимое клетки, состоящее из ядра и цитоплазмы [8].

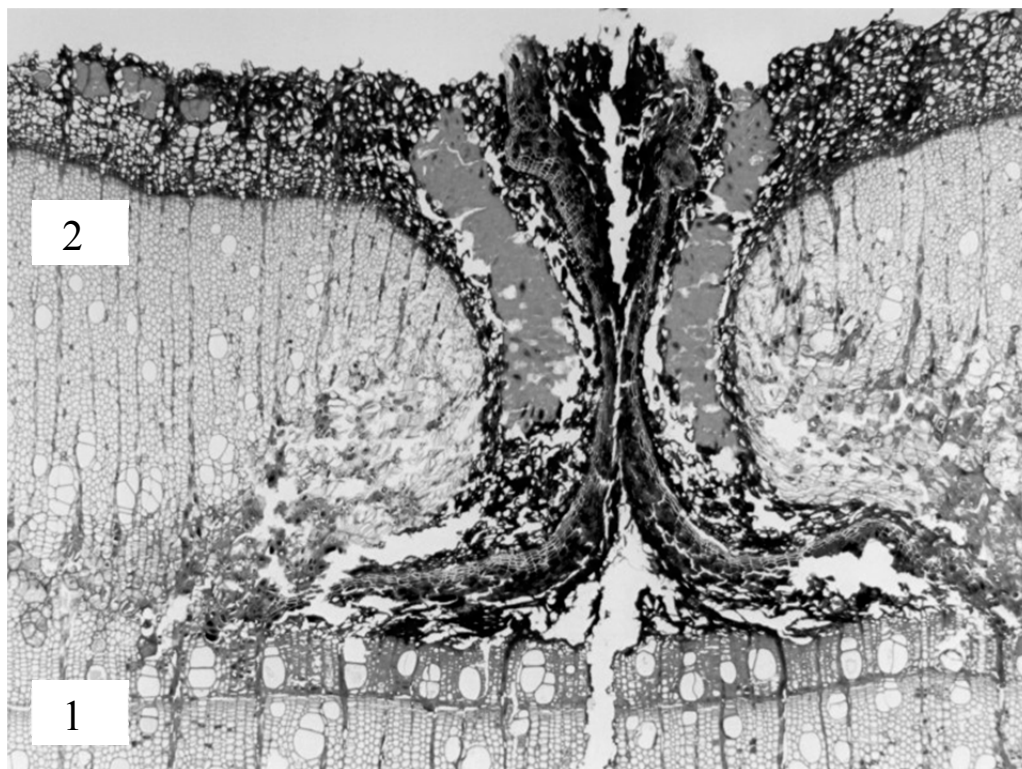
При детальном изучении сезонного роста определяющим параметром является скорость процесса: деления, растяжения, утолщения клеточной стенки, а также численность клеток, находящихся в каждый интервал сезона в том или ином периоде дифференцировки и созревания [9, 12].

К методам исследования сезонного прироста относится метод периодического изъятия малых образцов древесины из ствола растущего дерева в течение сезона [9, 13]. Для каждого из образцов приготавливаются срезы, представляющие собой моментальный временной «слепок» формирующейся ксилемы, на которых можно измерить число клеток в камбиальной зоне. Благодаря периодическому изъятию образцов статистическая картина сезонного формирования кольца превращается в динамическую, на которой можно рассчитывать скорость деления, скорость прохождения клеток по отдельным периодам дифференцировки и созревания.

Главным недостатком данного метода является большая вариабельность измеряемых характеристик, обусловленная тем, что каждый последующий образец отбирается на другом радиусе окружности ствола. Для надежной оценки кинетических характеристик сезонного роста необходимо измерять одновременно большое количество деревьев [12].

Период роста ксилемы может быть определен с помощью метода, который называют методом точечных ран (pinning method) [9, 14].

Этот метод основан на периодическом локальном повреждении живых клеток с помощью тонкой иглы, вводимой в ствол дерева через кору (рис. 1.3).



*Рис. 1.3. Изображение камбиальной зоны березы (рисунок взят с сайта – Dendro Hamburg: <http://www.bfafh.de>): 1 – зона ранней древесины (до поранения), 2 – зона поздней древесины (после поранения)*

При помощи нанесенных повреждений становится возможным определить временной период от начала первого деления камбия, и роста в ширину, до момента когда последние клетки сформировались и закончили деление.

На рис. 1.3 показано изображение, полученное под микроскопом, камбиальной зоны березы, произраставшей на верхней границе леса. Рана нанесена 1-го июля 1996 года, до этой даты сформированная, ранняя древесина, осталась без изменений.

Метод позволяет измерить число клеток и ширину слоя клеток, находящихся в зонах растяжения и формирования клеточной стенки [14].

Для точной интерпретации данных и измерения соответствующих слоев клеток необходимо, чтобы срезы древесины были сделаны точно в зоне поранения, что является сложной задачей [9].

Существующие методы изучения сезонной динамики являются достаточно трудоемкими и сложными в реализации.

Общее знание о внутренних и внешних механизмах роста дерева также как его начала, интенсивности, и завершения, все еще остается недостаточным. Актуальность изучения сезонного роста дерева определяется необходимостью непрерывной интерпретации полученных результатов исследования годичных колец в зависимости от времени.

#### 1.4. Методы исследования годичного прироста и анализ поперечных спилов деревьев

Ширина годичного кольца представляет собой абсолютную скорость роста дерева по радиусу. Скорость роста интегрирует влияние внешних и внутренних факторов и имеет четко определенную единицу измерения (мм), поэтому климатическая составляющая изменчивости прироста имеет и меру, и биофизическое обоснование (скорость роста), а значит, может быть количественно оценена [5].

Годовой прирост древесины может служить индикатором параметров окружающей среды при совместном использовании знаний о биологических особенностях роста дерева и достаточно развитом математическом описании происходящих в дереве процессов.

На данном этапе существует множество работ, в которых используются достаточно сложный математический аппарат для анализа длительных рядов динамики температуры и влажности по годам опираясь на годовой прирост деревьев [3].

Математические методы исследования сезонного прироста годовых колец в зависимости от времени сводятся к ряду моделей, описывающих рост с позиции скорости деления и развития клеток.

В литературе используются следующие основные характеристики в соответствии со строением годичных колец хвойных [7, 9].

Ширина годичного кольца  $\rho$  рассчитывается по формуле:

$$\rho = \sum_{i=1}^N D_i, \quad (1.2)$$

где  $i$  – порядковый номер клетки в ряду;  $D$  – радиальный размер клеток;  $N$  – число клеток в пределах годичного кольца.

Плотность древесины  $R$  представлена, как отношение площади клеточной стенки к площади, занимаемой клеткой на поперечном сечении.

$$R = \sum_{i=1}^N \frac{2d_i(D_i + T - 2d_i)}{D_i T}, \quad (1.3)$$

где  $T$  – тангентальный размер клетки [9];  $d$  – толщина клеточной стенки.

Таким образом, ширина годичного кольца является производной двух основных характеристик, а плотность – трех:

$$\rho = f(N, D_i), \quad (1.4)$$

$$R = f(N, D_i, d_i), \quad (1.5)$$

Взаимосвязь кинетических параметров процесса роста при формировании годичных слоев рассматривается путем оценки продолжительности этапов: деления, радиального роста и формирования вторичной стенки. Суммарное число клеток в кольце  $N$  определяет величину годового прироста дерева за вегетационный период:

$$N = N_c + N_e + N_m + N_d, \quad (1.6)$$

где  $N_c$  – численность клеток в камбиальной зоне;  $N_e$  – численность клеток в зоне растяжения;  $N_m$  – численность клеток в стадии созревания;  $N_d$  – численность зрелых клеток.

Скорость роста численности клеток  $\nu_1$  зависит от скорости деления клеток камбиальной зоны и численности клеток в камбиальной зоне.

$$\nu_1 = \eta_c \cdot N_c, \quad (1.7)$$

где  $\eta_c$  – скорость деления клеток в камбиальной зоне.

Размеры трех последних зон изменяются в зависимости от продолжительности пребывания в них клеток и от скорости роста всего кольца.

$$\frac{dN_e}{dt} = \nu_1 - \nu_2, \quad \frac{dN_m}{dt} = \nu_2 - \nu_3, \quad \frac{dN_d}{dt} = \nu_3, \quad \frac{dN}{dt} = \nu_1 \quad (1.8)$$

где  $\nu_2$  – скорость роста клеток в зоне растяжения;  $\nu_3$  – скорость роста клеток в зоне созревания;

$$\nu_2(t) = \nu_1(t - \tau_e), \quad \nu_3(t) = \nu_2(t - \tau_m) \quad (1.9)$$

$$N_e = \int_{t-\tau_e}^t \nu_1(\tau) d\tau, \quad N_m = \int_{t-\tau_e-\tau_m}^{t-\tau_e} \nu_1(\tau) d\tau \quad (1.10)$$

где  $\tau$  – время прохождения соответствующего периода роста;  $t$  – время роста.

Таким образом можно провести различие во времени, обусловленное изменением роста клеток [9].

Описанные модели и методы вычисления роста используют информацию о размерах клеток, получение которой само по себе трудоемко и не дает общей картины об изменении роста.

Измерение ширины годичных колец на кернах древесины или на поперечных спилах – это линейные измерения, для осуществления и обработки которых в настоящее время применяются автоматизированные

приборы. Они включают в себя оптический блок, механический, осуществляющий равномерную подачу древесного образца в одном направлении, и компьютерный блок, который накапливает измеренные данные, проводит их преобразование в необходимые для дальнейшей работы форматы, и предварительную обработку [9].

Производить подобные измерения в автоматическом режиме можно при помощи существующих алгоритмов анализа двумерных статических изображений. Такие алгоритмы основаны на подходах связанных с распознаванием объектов: по контурному, по скелетизированному и по растровому представлению [15].

Наиболее интересны методы, позволяющие восстанавливать информацию, заключенную в переходных зонах годовичных колец. При рассмотрении изменения отдельного радиального сечения как колебательного процесса подобную информацию можно получить, восстанавливая фазу колебания.

Общая картина годовичных слоев дерева представляет собой кольцевую картину, отображенную в виде линий разных уровней, соответствующих уровням интенсивности цвета. Комбинации чередующихся темных и светлых линий, соответствующих годовичным слоям, сходны с комбинациями полос, полученных в результате интерференции света на поверхности, поэтому для рассмотрения и анализа годовичных колец наиболее пригодны методы, используемые в интерферометрии при анализе интерферограмм.

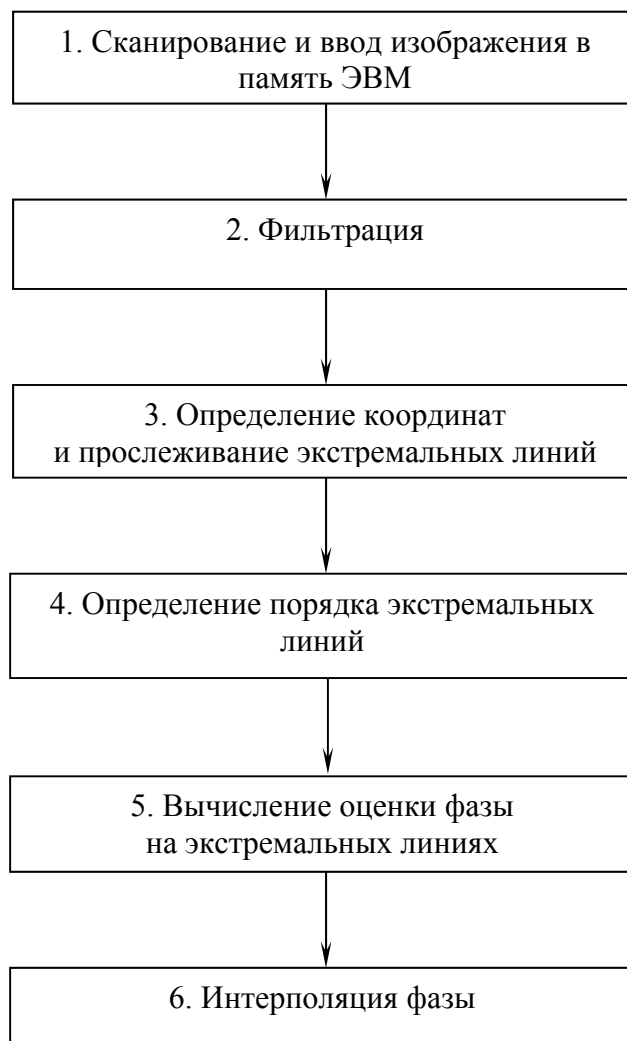
Метод хребтовых линий позволяет анализировать структуру кольцевой картины предполагая, что она не зависит от времени [16]. Проведение подобного анализа осуществляется путем разбиения множества точек картины на классы, определении границ и центров классов как функции от координат. Общая схема метода хребтовых линий представлена на рис. 1.4.

Первая операция – сканирование и ввод изображения в память ЭВМ, позволяет получить картину в виде цифрового массива данных. Вторая операция метода хребтовых линий обеспечивает подавление шумов. В большинстве работ для этого применяют методы линейной фильтрации, основанные на прямом вычислении свертки [17, 18]. Далее производится определение координат экстремальных линий с последующим их прослеживанием, при этом также необходимо применять шумоподавляющие процедуры.

Для оценки экстремума полосы часто применяется линейная регрессия. В качестве модели полосы могут использоваться две функции параболы, для верхней и нижней половины полосы [17, 19].

Экстремальные линии часто заменяются средними линиями – равноудаленными от границ полосы, они образуют «скелет» полос. Для

нахождения этих линий используют алгоритм скелетонизации. Данный алгоритм позволяет задать в качестве отсчетов полосовой картины значения ноль или единица относительно выбранного порога и перейти, таким образом, к бинарной картине. Затем в ходе просмотра полосы каждая единица заменяется на ноль, если она находится на границе полосы. Операция повторяется до тех пор, пока полоса не превратится в цепочку единиц, располагающихся по средней линии. На эффективность алгоритма скелетонизации значительное влияние оказывает шум.



*Рис. 1.4. Структурная схема метода хребтовых линий*

Определение порядка осуществляется путем последовательной нумерации экстремальных линий. При этом порядок соседних линий должен отличаться, а линии с разными порядками не должны пересекаться и касаться друг друга. Часто данную операцию трудно формализовать, поэтому для ее осуществления требуется участие человека [20, 21, 22].

Оценка фазы на экстремальных линиях вычисляется по формуле  $\varphi(x, y) = 2\pi n$ , где  $n$  – порядок линии. Начальное значение фазы может быть выбрано нулевым. Совпадение порядка соседних линий является признаком наличия экстремума функции [21]. Тогда фазу определяют так:  $\varphi(x, y) = \varphi_m(x, y) - 2\pi n$ , где  $m$  – порядок повторяющейся линии. В результате вычислений нельзя однозначно восстановить знака функции  $\varphi(x, y)$ . Если  $\varphi(x, y)$  имеет несколько экстремумов, то без дополнительной исходной информации невозможно отличить минимум от максимума.

Полученную ступенчатую функцию  $\varphi(x, y)$  интерполируют, чаще всего, полиномами Цернике [23].

Метод хребтовых линий применяется в практике оптического контроля, но имеет ряд характерных недостатков. Алгоритм метода основывается на логических операциях и имеет сложную структуру, что не исключает ошибки при выполнении операции прослеживания полос. Кроме того, происходит потеря исходной информации при анализе по центрам полос, так как потерянная информация, заключенная между полосами, восстанавливается на основе применяемой модели фазы, что приводит к потере точности оценки.

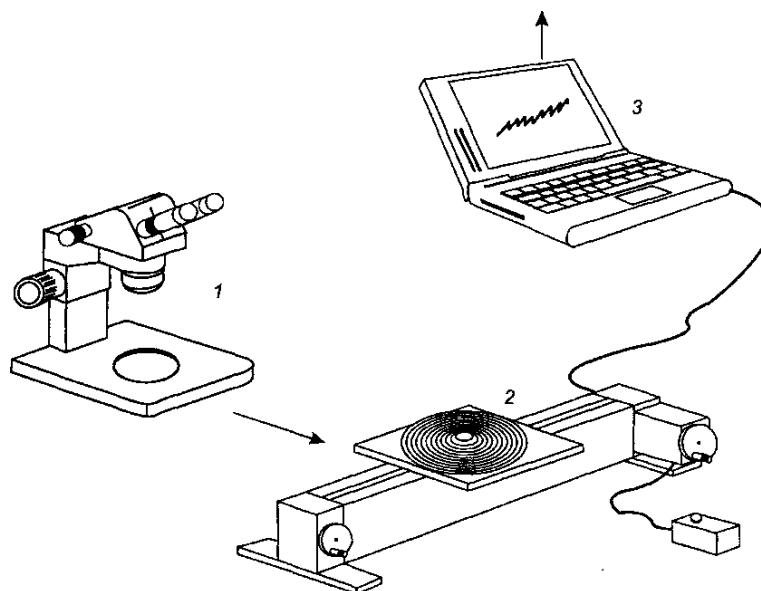
Еще более простой метод восстановления фазы из интерферограмм предложен Мертцем [24, 25]. Для реализации данного метода предлагается аппроксимировать полосу сечения тремя первыми членами ряда Фурье –  $a \cdot \cos(2\pi/T) \cdot x + b \cdot \sin(2\pi/T) \cdot x + c$ , где  $T$  – период,  $a$ ,  $b$  и  $c$  – коэффициенты ряда. Далее, измеряя интенсивность в трех точках полосы  $x_1, x_2, x_3$  и решая три линейных уравнения, находят неизвестные коэффициенты  $a, b, c$ . Затем вычисляют фазу  $\varphi = \arctg(b/a)$ , предполагая, что  $\varphi = const$  в пределах трех точек измерения  $x_1, x_2, x_3$ , а ее изменения происходят за счет удаления начальной точки  $x_1$  и добавления новой точки  $x_4$ . Основным достоинством является его простота и высокое быстродействие. Главный недостаток в том, что точность оценки фазы зависит от того, насколько полосы близки к синусоидальным, и от изменения величины периода.

Задача точного определения амплитуды и фазы колебания может решаться с помощью введения аналитического сигнала (АС). Представление колебательного процесса в виде двух величин амплитуды и фазы требует непротиворечивого определения этих понятий. Уравнение, описывающее колебательный процесс, такого определения в явном виде не содержит, поэтому наиболее общее определение амплитуды и фазы можно дать с помощью введения АС. Опубликовано значительное количество работ, в которых рассматриваются вопросы определения амплитуды и фазы применительно к одномерному колебательному процессу. Основные результаты изложены в работах [26–31].

## 1.5. Сравнительный обзор и анализ аппаратно-программных средств обработки и анализа годичных колец деревьев

Анализ научных исследований в области дендроэкологии, дендрохронологии и дендроклиматологии показывает, что в настоящее время для моделирования и анализа дендроэкологических данных используется достаточно широкий спектр аппаратно-программных средств [32-44]. Необходимо отметить, что диапазон научных исследований, проводимых с помощью этих средств, охватывает всю технологическую схему работ по обработке и анализу годичных колец деревьев.

В первую очередь отметим установки для линейных измерений ширины годичных колец деревьев на кернах и дисках древесины (рис. 1.5) [45, 46].



*Рис. 1.5. Полуавтоматическая установка для измерения и обработки данных ширины годичных колец: 1 – стереомикроскоп; 2 – скамья с прецизионной подачей, обеспечивающей линейное перемещение образца; 3 – компьютер для накопления и обработки данных измерений*

Они включают оптический блок (стереомикроскоп), механический блок, осуществляющий равномерную и прецизионную подачу древесного образца в одном направлении (направлении измерений), и блок обработки (компьютер). Именно в блоке обработке накапливаются измеренные данные, осуществляется их преобразование в необходимые для дальнейшей работы форматы, обработка и визуализация результатов измерений. Обработка данных включает такие операции, как стандартизация исходных измерений (с использованием широкого набора аппроксимирующих функций), расчеты статистических характеристик, оценивающих корреляцию и синхронность между индивидуальными сериями



и в целом для хронологии, проверка качества датировки, расчет климатических функций отклика и построение множественных моделей регрессии прироста в зависимости от выделенных ведущих климатических факторов.

Еще одним примером аппаратных средств являются устройства подготовки и облучения древесных образцов мягким рентгеновским излучением с денситометрами для измерения плотности древесины внутри годичных колец [45, 46]. Методические основы метода получения и анализа профилей плотности древесины внутри годичных колец с использованием мягкого рентгеновского излучения разработаны Г. Польгом [36] и развиты Ф. Швейнгрубером [37]. Обработка полученных рентгеновских негативов позволяет вычислить минимальную, максимальную и среднюю плотность, плотность ранней и поздней древесины.

Для анализа видеоизображений срезов растительных объектов предназначены различные специальные аппаратные комплексы, которые позволяют измерять анатомические элементы растительных объектов [37, 38]. Подобные установки позволяют измерять размеры клеток (трахеид) внутри годичных колец деревьев. Ряды трахеид представляют регулярные изменения размеров клеток и толщины их клеточных стенок. Дополнительно к размерам клеток и толщине клеточной стенки измеряются такие характеристики, как площадь люмена, площадь клеточной стенки, ее периметр. Все это позволяет более точно оценить влияние внешней среды на развитие растительного объекта.

Разнообразие программных средств намного шире. Их использование зависит от задач исследования. Это могут быть статистическая обработка первичных данных замеров характеристик прироста и получение надежных обобщенных хронологий, сопоставление характеристик прироста с факторами внешней среды, моделирование процессов роста, изучение пространственного распределения характеристик прироста и визуализация результатов анализа и др. Для решения этих задач одни исследователи предпочитают использовать широко распространенные статистические пакеты (SAS, MatLab, SyStat, STATISTICA и др.), различного рода электронные таблицы (QUATTRO, LOTUS, Excel и др.), универсальные системы математической обработки результатов, предназначенные для численного и символьного решения математических задач различной сложности (MathCAD, Mathematica и др.) и различные интегрированные программные решения на базе географических информационных систем (ESRI ARC/INFO, ArcView, Mapinfo, AutoCAD Map и др.) с форматами различных баз данных (Microsoft Access, Oracle, dBASE, FoxPro и др.) для связи обрабатываемых данных с географическим местоположением их сбора и отображением на электронных картах [45].

Другие исследователи работают со специализированными программами, разработанными для конкретных задач дендрохронологии. В частности, получили широкое распространение такие программные комплексы и пакеты [32], как DPL (Dendrochronology Program Library), представляющий собой классический набор интерактивных программ для простой обработки и анализа данных в дендрохронологии. Методы и процедуры DPL обеспечивают редактирование древесно-кольцевых структур, изменение форматов, проверку реконструкций, чтение или создание файлов в форматах электронных таблиц и оценку недостающей климатической информации или древесно-кольцевых структур [33].

Еще одним пакетом анализа реакции годовых колец деревьев на ежемесячное изменение климата является PRECON 5.17C. Пакет обеспечивает статистическую оценку климатических условий по ширине годовых колец деревьев и проводить множество статистических исследований (например, исследование корреляции и частотной характеристики) по ежемесячным климатическим факторам [34].

Для выявления более тонких эффектов в слоях и структуре годовых колец (активности камбия) в деревьях хвойной породы используется программный комплекс TREERING 3.0. Комплекс обеспечивает вычисление водного баланса, фотосинтеза, накопление углерода, роста кроны и активности камбия, вывод графических данных с использованием ежедневных климатических данных [35].

Программные средства DPL, PRECON 5.17C и TREERING 3.0 работают только с цифровыми данными, хранимыми в файлах. Они функционируют в операционной системе MS DOS, но есть и версии для Windows.

К программным средствам, работающим в операционной системе Windows, относятся LignoVision 1.32, TSAP-Win Professional 0.30, DendroClim 2002, WinDENDRO, DendroLab 470, PAST 32, OSM 3.10, MeasureJ2X [25].

LignoVision 1.32 – программное обеспечение для формирования цифровых изображений с целью поверхностного и рентгенографического анализа. Программные средства обеспечивают распознавание годовых колец деревьев, вычисление древесно-кольцевых серий и плотности древесины. Программное обеспечение также поддерживает множественные источники изображений, такие как оптический сканер, телекамера на приборах с зарядовой связью и рентгеновский сканер. Достоинством LignoVision является и возможность сохранения полученных древесно-кольцевых серий в формате данных программного комплекса TSAP [37].

TSAP-Win Professional 0.30 (Time Series Analysis) – программный комплекс для измерения, графического представления, статистического анализа и управления базой данных древесно-кольцевых серий. Анализ данных включает: перекрестное датирование (доступны различные математические процедуры), графический контроль перекрестного датирования (перекрестное датирование на экране), вычисление и анализ хронологии, процедуры индексации и стандартизации [38].

DendroClim 2002 – статистический пакет для анализа эволюционных и перемещающихся интервалов в дендроклиматологии, обеспечивающий анализ корреляционной функции и функции отклика связи климата и роста дерева. Это первый пакет, позволяющий проводить анализ корреляционной функции и функции отклика для определения связи между климатом и ростом дерева и использующий эволюционный и перемещающийся интервалы. Вычисления включают линейную корреляцию, вращения Якобиана для характеристических (собственных) значений, сингулярное разложение (разложение по особым значениям) и решения линейных систем, сопровождаемых регрессией главных компонентов [39].

WinDENDRO – полуавтоматическая программная система анализа изображений, специально разработанная для измерения и анализа годовичных колец деревьев. Система может использоваться для анализа и измерения годовичных колец деревьев, дисков деревьев и плотности древесины [40].

DendroLab 470 – аппаратно-программная система для измерения годовичных колец деревьев кернов, поперечного сечения древесины, а также отсканированных изображений. Программное обеспечение системы способно управлять аппаратными средствами ЭВМ и собирать измеренные данные и сохранять их в базах данных для дальнейшего использования [41].

PAST 32 – пакет программ, предназначенный для перекрестного датирования измерений годовичных колец деревьев. Пакет выполняет корреляцию индивидуальных образцов или групп образцов к одному базовому образцу или хронологии [42].

OSM 3.10 – пакет программ для измерения и анализа изображений на экране с использованием сканеров для измерения длины дендрохронологических образцов. Отличительными особенностями пакета являются: правоугольные вспомогательные линии для установки правильных точек, множественные якорные линии для следования за данной линией измерения, функции калибровки, функция динамической установки увеличения, уменьшенное измерительное окно без потери функциональной возможности измерения [43].

MeasureJ2X – программный комплекс для измерения годовых колец деревьев на различных стадиях анализа. Комплекс MeasureJ2X по функциональным возможностям заменил старые программы измерения годовых колец деревьев Medir (DOS) и PJK6v2 (MAC) [44].

Рассмотренные выше аппаратно-программные комплексы и системы для анализа и обработки данных в области дендроэкологии являются ограниченными для практического использования в силу своей стоимости. Например, полная стоимость системы DendroLab 470 около \$3650. Кроме того, они ориентированы на выполнение часто используемых операций обработки и анализа дендроэкологических данных (например, измерение ширины годовых колец и др.), но плохо учитывают специфику требований конкретных исследователей (например, определение азимута и среднеквадратичной ширины области максимального прироста и др.), а радиальный анализ годовых колец деревьев проводится по ограниченному числу азимутов, а не по всем возможным, интересующих исследователя.

Таким образом, очевидна необходимость разработки алгоритмического и программного обеспечения, которое бы предоставило исследователю инструментальные средства обработки данных для получения аналитических заключений в области охраны окружающей среды и экологии человека. Заметим, что задачи экологического анализа требуют большого объема математических вычислений, будь это исследование прогноза климата и моделирование климата или исследование климатов прошлого и изменения климата или исследование влияния солнечной активности на погоду и климат или исследование влияния экологических факторов на здоровье населения или исследование воздействия загрязнения окружающей среды на состояние природных экосистем растительного и животного мира, популяций и отдельных растительных и животных организмов и т. д. Причем, вычислительные схемы этих задач достаточно независимы и допускают в большинстве случаев их одновременное выполнение даже на территориально распределенных неоднородных компьютерных системах. В таких условиях достаточно естественным системным решением, обеспечивающим повышение вычислительной мощности и коллективную работу исследователей (экологов), является использование технологии распределенной обработки данных. Эта технология подразумевает физическое распределение обработки данных в пространстве на нескольких вычислительных машинах, которые связаны между собой каналами передачи данных, координацию использования их вычислительных мощностей, использование стандартных протоколов и служб сетевого взаимодействия. Реализация подобной технологии даже для задач охраны окружающей среды и экологии человека достаточно трудоемкая. Необходимо распределить выпол-

нение задач по вычислительным серверам и собрать результаты вычислений. При этом необходимо обеспечить и требуемую производительность (performance) и масштабируемость (scalability) вычислительного комплекса, переносимость (portability) и надежность (reliability) программного обеспечения, безопасность (security) информации и т. д. [47] в условиях, когда доставка задания и его выполнение не могут быть гарантированы (отдельные компоненты комплекса могут не работать или дать сбой в процессе расчета). Указанные проблемы решаются путем разработки промежуточного программного обеспечения (middleware), реализующего прозрачность распределенной технологии для прикладных программ, позволяя им абстрагироваться от конкретных деталей ее архитектурной реализации [48]. Именно реализация промежуточного слоя информационных сервисов и служб обеспечивает так необходимые для практического применения и коллективную работу пользователей, и мобильность (переносимость) программного обеспечения, и совместное функционирование с уже разработанными программными средствами, и защиту конфиденциальной информации и многое другое. Поэтому понятен интерес, проявляемый особенно академическими институтами экологического профиля к распределенным технологиям обработки, обусловленный возможностью при решении разнообразных задач охраны окружающей среды и экологии человека получить качественно новую технологию их решения и обеспечить широкую доступность исследователей к информационно-вычислительным ресурсам мирового уровня (повышение личного уровня профессионализма исследователей).

### **1.6. Обзор современных решений в области grid-технологий**

Использованию grid-технологий не только в научных исследованиях, но и в бизнес-системах способствовало появление целого ряда программных средств поддержки их функционирования.

В настоящее время стандартом де-факто программного обеспечения в области grid-технологии принято считать инструментарий Globus [49]. Заметим, что Globus – это система рекомендательных стандартов, которая не предлагает готовые комплексные решения актуальных крупных научных задач и коммерческие продукты на ее основе. Тем не менее, в рамках проекта Globus разработан ряд программных средств, объединенных в пакете Globus Toolkit [50] и направленных на практическую реализацию архитектуры распределенных вычислений. В частности, компоненты пакета Globus Toolkit обеспечивают информационную безопасность и безопасность ресурсов инфраструктуры (Security), управление данными (Data Management), управление заданиями (Execution Management), разнообразные информационные сервисы и

службы (Information Services), различные среды выполнения (Common Runtime Components).

Программным средством в функциональном отношении подобным Globus Toolkit является Legion [51]. Но в отличие от Globus Toolkit, в котором акцент делается на стандартизацию удаленного взаимодействия, в основу Legion положено объектно-ориентированное проектирование сети индивидуальных рабочих станций, объединенных высокоскоростными каналами связи.

К программным средствам в функциональном отношении расширяющим Globus Toolkit относится инструментарий Virtual Data Toolkit (VDT) [52]. Virtual Data Toolkit включает три группы программных средств: базовые средства пакета Globus Toolkit и средства мониторинга заданий CondorG, средства виртуализации данных Virtual Data System, набор утилит.

Condor [53] – одна из многофункциональных платформ, широко используемая в grid-технологиях. Платформа включает многочисленные компоненты такие как: компонент расширенного управления распределенной файловой системой, компонент оперативного перенаправления заданий в случае сбоя вычислительного ресурса, компоненты для обнаружения, описания и слежения за информационно-вычислительными ресурсами в grid-системе, компонент для эффективного и надежного планирования и размещения данных в сети и др.

Ninf-G [54] – платформа на базе инструментария Globus Toolkit для разработки и выполнения grid-приложений с использованием grid-процедур удаленного вызова Grid Remote Procedure Call (GridRPC).

Задачи виртуализации ресурсов, протоколирования, учета и мониторинга их использования поддерживаются и программными средствами пакета DataGrid. Инструментарий DataGrid направлен на реализацию однопроцессорных вычислительных заданий с большим временем счета (распределенные супервычисления). В рамках проекта Enabling Grids for E-science (EGEE II) [55] для пакета DataGrid разрабатывается новое промежуточное программное обеспечение на основе инструментария Globus Toolkit.

Для обеспечения доступа к суперкомпьютерным центрам стран Центральной Европы используется платформа Unicore (UNiform Interface to COmputing REsources) [56], реализующая унифицированный интерфейс с удаленными вычислительными ресурсами.

Программные средства платформы DCGrid направлены на интеграцию вычислительных ресурсов предприятия для централизованно управляемой обработки заданий и реализует архитектуру одноуровневого grid – управляющий сервер и множество обрабатывающих узлов [57].

Платформа LiveCluster компании DataSynapse [58] также как и платформа DCGrid обеспечивает реализацию одноуровневой архитектуры grid-систем, причем ее распределенными вычислительными ресурсами являются не только персональные компьютеры, но и серверы, кластеры и мэйнфреймы – независимо от режима их использования (выделенного или разделяемого).

Инструментарий платформы GridMP Enterprise компании United Devices [59] также обеспечивает виртуализацию и децентрализованное управление информационно-вычислительными ресурсами.

Программное обеспечение фирмы Sybase [60] Avaki Comprehensive Grid направлено на интеграцию структурированных и неструктурированных глобально распределенных данных, а также вычислительных ресурсов для совместного использования в масштабе реального времени.

В странах северной Европы широкое распространение для построения grid-систем получила платформа ARC (Advanced Resource Connector) [61]. Платформа ARC используется для поддержки участия стран северной Европы в LHC-экспериментах в физике высоких энергий.

Основным программным инструментарием платформы Grid3 [62] является Virtual Data Toolkit, а средством, позволяющим упростить доступ к информационно-вычислительным ресурсам grid-системы, является Virtual Organization Management System (VOMS) из инструментария DataGrid. С 2004 года платформа Grid3 нашла свое развитие в инструментарии Open Science Grid (OSG) [63].

Спектр современных grid-приложений также достаточно широк. Отметим некоторые из них.

The Metacomputing Project [64] – в рамках проекта исследуются проблемы, связанные с изучением различных аспектов взаимодействия нейтронных пучков с материалами в физике, химии, биологии и материаловедении.

RASX-MPI [65] – проект направлен на численное моделирование потоков крови в кровеносных сосудах, исследования по загрязнению атмосферы, моделирование эволюционного развития членистоногих (беспозвоночных животных), различных задач гидродинамики и т. д.

CrossGrid [66] – многофункциональный исследовательский проект, направленный на разработку трехмерных моделей потоков крови в сердечно-сосудистой системе человека, прогнозирование наводнений на крупных реках, проведение с использованием кольцевого ускорителя заряженных частиц на встречных пучках крупномасштабных ATLAS-, CMS-, ALICE- и LHCb-экспериментов в физике высоких энергий, исследование загрязнения атмосферы промышленными предприятиями.

Grid2003 [67] – проект, использующий инфраструктуру Grid3 для выполнения прикладных задач по обработке и анализу данных различных экспериментов в физике высоких энергий, в задачах моделирования столкновений на встречных протонных пучках в CMS- и ATLAS-экспериментах в кольцевых ускорителях, в задачах моделирования физических процессов протонно-антипротонных столкновений, в астрофизических задачах, в задачах биологического и молекулярного анализа белка.

PPDG (Particle Physics Data Grid) [68] – проект, направленный на исследование элементарных частиц в физике высоких энергий, ядерной физике и разработку следующего поколения программных средств обработки больших объемов экспериментальных данных, получаемых с LHC-ускорителя, с целью повышения точности вычислений и достоверности полученных результатов.

GriPhyN (Grid Physics Network) [69] – проект, направленный на фундаментальные исследования физической природы и структуры вселенной, обработку результатов в CMS- и ATLAS-экспериментах в кольцевом ускорителе на встречных пучках (LHC), исследования гравитационных волн пульсаров, сверхновых и спиральных двойных звезд, непрерывное слежение за участками неба с целью систематического изучения звезд, галактик и туманностей.

LCG (LHC Computing Project) [70] – проект, направленный исключительно на информационно-вычислительную поддержку экспериментов уникального LHC-ускорителя (Large Hadron Collider), строящегося в Швейцарии (ЦЕРН).

iVDGL (international Virtual Data Grid Laborator) [71] – проект направлен на эксперименты в физике и астрономии.

World Community Grid [72] – проект включает два основных направления исследований: программа FightAIDS@Home [73] – разработка новых лекарств с заданными молекулярными структурами и химическими характеристиками и программа Human Proteome Folding Project [74] – исследование структуры ДНК человека.

TeraGrid [75] – проект направлен на исследования турбулентности атмосферы Земли, темной энергии космоса, исследования переноса сегментов хромосом через мельчайшие каналы белков, исследования и идентификация структурных различий в умственных способностях пациентов; моделирование местонахождения нефтяных пластов, загрязнения грунтовых вод, влияния разрушительной силы землетрясений и прогнозирование областей с наибольшими разрушениями, сложных форм материалов со свойствами между твердым веществом и жидкостью; разработку алгоритмов определения потоков частиц нейтрино от отдаленных частей вселенной.



CosmoGrid [76] – проект включает разработку региональной модели климата Ирландии и вычислительных моделей в адаптивной оптике; исследования динамики двухслойных потоков жидкости, структуры и динамики внешней солнечной атмосферы, детальных оптических свойств рассеивания аэрозолей; моделирование взаимодействия высокоэнергетических частиц и астрофизических джетов, излучающих процессов в астрофизике медленно вращающихся нейтронных звезд и пульсаров, геофизических процессов в горных минералах, аномальных особенностей литосферных структур Северной Атлантики, распространения сейсмических волн.

DataTAG [77] – специфический проект, направленный на разработку современного промежуточного программного обеспечения слоя связи grid-технологий.

EGEE II (Enabling Grids for E-sciencE) [55] – проект включает следующие направления деятельности: сетевую (Networking Activities), сервисную (Service Activities) и исследовательскую (Research Activities).

GRID.IT [78] – исследования по проекту включают четырнадцать направлений работы: два в области высокоскоростных сетей, пять в области промежуточного программного обеспечения, два в области программных средств и компонентов интегрированных сред программирования, пять в области фундаментальных академических исследований в астрофизике, поверхности земли, геофизике, биологии, вычислительной химии.

Computational Chemistry Grid (CCG) [79] – проект обеспечивает исследователей современными компьютерными технологиями в вычислительной и квантовой химии.

Earth System Grid (ESG) [80] – проект направлен на создание инструментария для решения проблем, связанных с анализом и развитием глобальных информационных климатических моделей Земли.

В России также интенсивно ведутся работы по созданию национальной инфраструктуры grid-технологий. Для координации участия России в проекте EGEE, образован консорциум РДИГ – Российский ГРИД для интенсивных операций с данными (RDIG – Russian Data Intensive GRID) [81]. Участниками консорциума РДИГ являются восемь крупных институтов, на которые возложены такие базовые задачи проекта EGEE как: разработка упрощенного удаленного доступа к объединенным информационно-вычислительным ресурсам, обеспечение возможности совместного использования программного обеспечения и данных, выполнение вычислений по требованию, поддержку основных grid-приложений и разработку новых по основным научным исследованиям, проводимым в институтах. В консорциум РДИГ входят: Государственный научный центр Институт физики высоких энергий (ГНЦ ИФВЭ) Федерального агентства по атомной энергии (Росатом) [82], Ин-

ститут математических проблем биологии РАН (ИМПБ РАН) [83], Федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный научный центр Российской Федерации – Институт теоретической и экспериментальной физики» (ФГУП ГНЦ РФ-ИТЭФ) [84], Международная межправительственная научно-исследовательская организация Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ) [85], Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша Российской академии наук (ИПМ РАН) [86], Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В.Скобельцына Московского государственного университета (НИИЯФ МГУ) [87], Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Российской академии наук (ПИЯФ РАН) [88], Российский научный центр «Курчатовский институт» (РНЦ КИ) [89].

Для обеспечения эффективности исследований в области grid-технологий созданы различные некоммерческие международные сообщества с целью координация действий ученых при реализации даже независимых проектов. К таким сообществам относятся: Global Grid Forum (GGF) [90], Enterprise Grid Alliance (EGA) [91], Organization for the Advancement of Structured Information Standards (OASIS) [92], Pacific Rim Application and Grid Middleware Assembly (PRAGMA) [93], High Performance Computing and Networking Center (HPCNC) [94], Nordic Grid Consortium [95], International Grid Trust Federation (IGTF) [96], Globus Alliance [97], Globus Consortium [98] и др.

Во всех крупных странах мира организованы научные сообщества для поддержки grid-технологий. Отметим некоторые национальные центры поддержки распределенных вычислений, которые наиболее полно представлены в печати и Internet: Austrian Grid [99] – grid-консорциум объединяет ведущих исследователей Австрии, BELNET Grid Initiative (BEgrid) [100] – национальный бельгийский проект (инициатива) в области grid-вычислений, Thailand National Grid Project (TNGP) [101] – тайский национальный grid-проект, National Research Grid Initiative (NAREGI) [102] – национальный проект Японии, K\*Grid project [103] – проект республики Южная Корея, Taiwan Grid Academia Sinica Grid Computing Centre (ASGC TWGrid) [104] – проект, направленный на реализацию инфраструктуры grid-вычислений в Тайване, China National Grid (CNGrid) [105] – национальный проект Китая в области реализации grid-технологий, Grid Canada [106] – национальный проект Канады по развитию распределенных вычислений, Danish Center for GRID Computing (DCGC) [107] – национальный проект Дании по реализации распределенных вычислений, Grid'5000 [108] – проект Франции, ориентированный на создание grid-системы, D-Grid Initiative [109] – инициатива федерального министерства образования и науки Германии,

National Computational Grid for Ireland (Grid-Ireland) [110] – проект, направленный на реализацию национальной компьютерной сети Ирландии, Grid Consortium Japan [111] – проект для развития grid-технологий в бизнесе и науке Японии. Из других национальных центров grid-технологий отметим: в Великобритании – National e-Science Centre [112], в США – Grid Research Integration Deployment and Support Center [113], в Австралии – Australian Grid Forum [114], в Израиле – Israeli Association of Grid Technologies (IGT) [115], в Греции – Hellas Grid Task Force [116], в Нидерландах – Grid Forum Netherlands [117], в Испании – Spanish National Research Network [118] (национальная научная сеть Испании, объединяющая около 250 организаций, с традиционными Internet-сервисами и службами), в Малайзии – University of Malaya [119], в Армении – Armenian e-Science Foundation [120], в Бразилии – OurGrid [121] (объединяет свыше 350 локальных машин, расположенных в 17 рабочих узлах и обеспечивает поддержку следующих проектов: BioPaua [122], GerpavGrid [123], GridVida [124], GridUnit [125], PortalGiga [126], SegHidro [127]), в Румынии – RoGrid [128], в Сингапуре – National Grid [129].

Приведенный обзор показывает, что существующих инструментальных средств grid-технологии и проектов, реализованных с их использованием, достаточно для проектирования и реализации работоспособной в мировом масштабе grid-системы. При этом требуются серьезные усилия программистов, квалифицированное системное администрирование, достаточно высокий уровень подготовки пользователей и т. д. Вместе с тем, в таких условиях для большинства предприятий и организаций, нацеленных на коллективное использование в научных или коммерческих целях скорее корпоративных ресурсов, чем мировых, целесообразнее ориентироваться на более технологичный и простой в эксплуатации grid-инструментарий, обеспечивающий те же базовые функции grid-технологии и, позволяющий оперативно реагировать на изменения бизнес-процессов организации, производить более тонкую настройку среды на конкретные требования пользователей с целью улучшения использования вычислительных ресурсов и уровня обслуживания и, главное, уменьшить эксплуатационные расходы на аппаратно-программное обеспечение. Но такие решения (говоря языком бизнеса – решения низшего ценового уровня) на информационном рынке отсутствуют.

Именно такие черты использования grid-технологии характерны для научных лабораторий, занимающихся обработкой дендрэкологических данных. Штат большинства таких лабораторий не велик, поэтому они не могут себе позволить развернуть крупномасштабные grid-технологии, но потребность в значительных вычислительных мощностях для решения своих научных задач имеется.

## 2. ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАДИАЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ ГОДИЧНЫХ КОЛЕЦ

Построение модели радиального сечения годичных колец поперечного среза ствола необходимо для решения задачи непрерывного восстановления радиального роста дерева. Под моделью радиального сечения понимается функция, описывающая изменение плотности древесины вдоль одного радиуса. Непрерывное восстановление радиального роста означает определение изменений плотности внутри годичных колец, что позволит расширить информацию о параметрах сезонных изменений формирования годичных колец. В отличие от классических методов, определяющих ежегодный прирост как дискретную величину и не учитывающих внутреннюю структуру годичного слоя, сформированного как сочетание клеток ранней и поздней древесины, подобный способ может дать новый аппарат для более детального исследования параметров ростовых процессов.

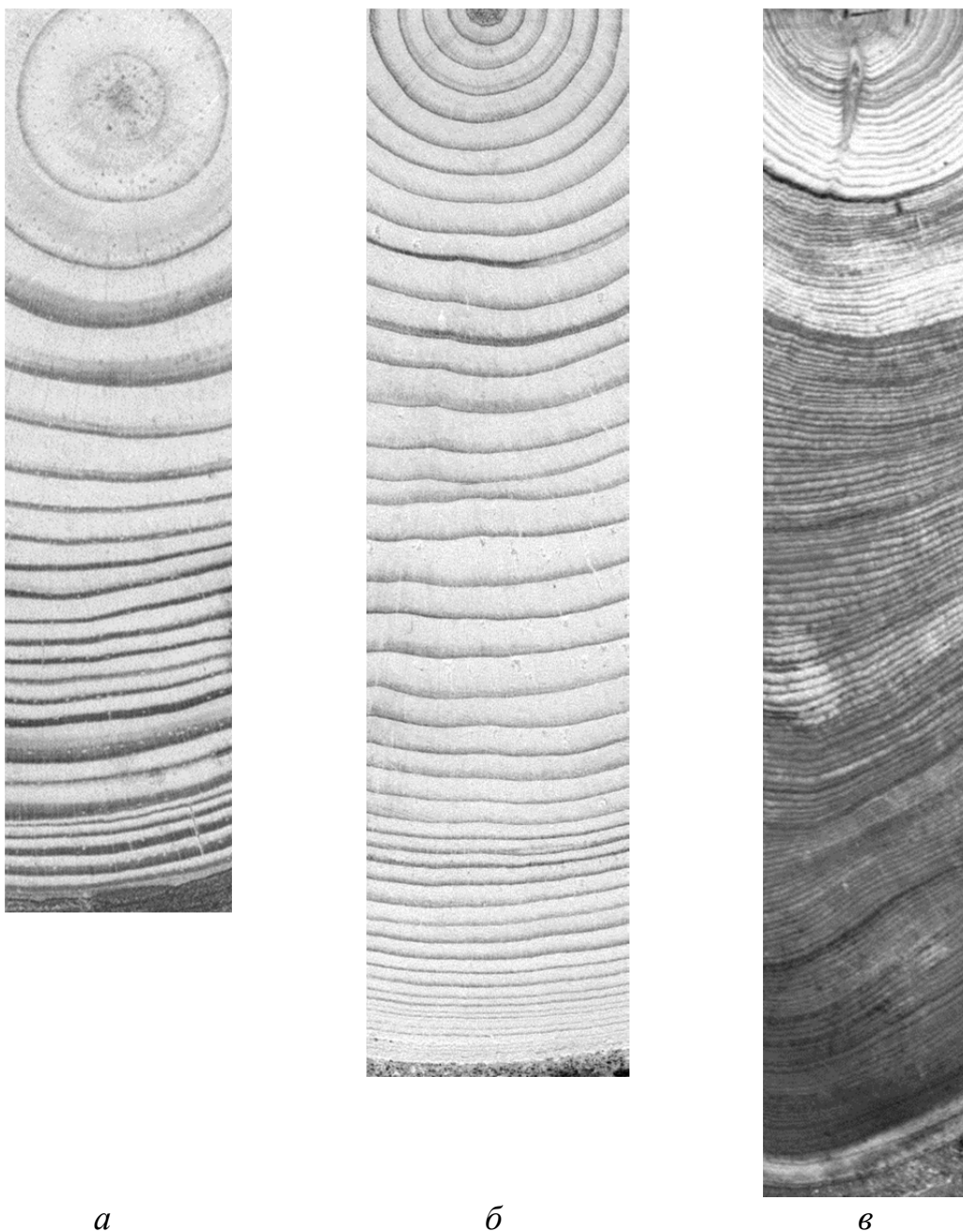
Разрабатываемая математическая модель должна быть пригодна для применения в ЭВМ и создания на ее основе вычислительного измерительного комплекса, позволяющего проводить исследование в автоматическом режиме.

В данной работе процесс построения математической модели основан на анализе экспериментальных данных, представленных радиальными сечениями деревьев разных видов и разных мест произрастания (рис. 2.1).

Из рис. 2.2 и 2.3 видно, что годичные кольца на поперечных срезах стволов не имеют постоянной формы, значит, анализ картины колец как ровных concentрических окружностей не будет отражать реальных изменений радиального роста дерева, поэтому построение математической модели и ее применение для изучения радиального роста деревьев необходимо проводить, опираясь на радиальные сечения натуральных образцов.

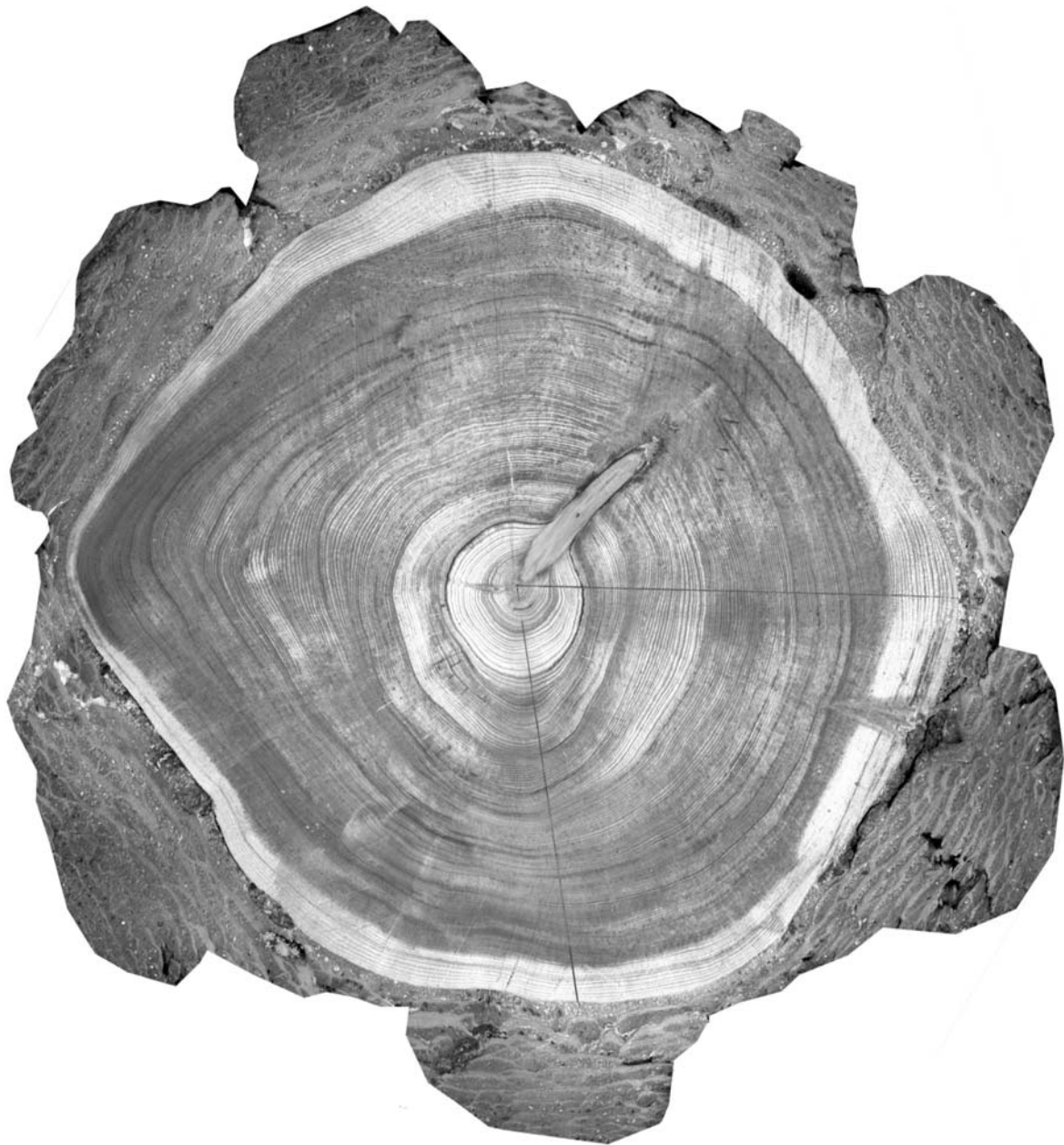
Исходя из особенностей изучаемого объекта, в процессе моделирования необходимо учесть то, что математическая модель должна быть достаточно простой, представляющей задачу в удобном виде, но достаточно точно отражающей изучаемую систему, а также быть представительной во всем диапазоне экспериментальных данных [130].

Для того, чтобы начать построение системы, необходимо иметь общие характеристики процессов роста. Для этого в работе проведено исследование годичных слоев на микроуровне и анализ возможных отклонений, накладываемых на картину радиального сечения в виде шумов биологического происхождения.

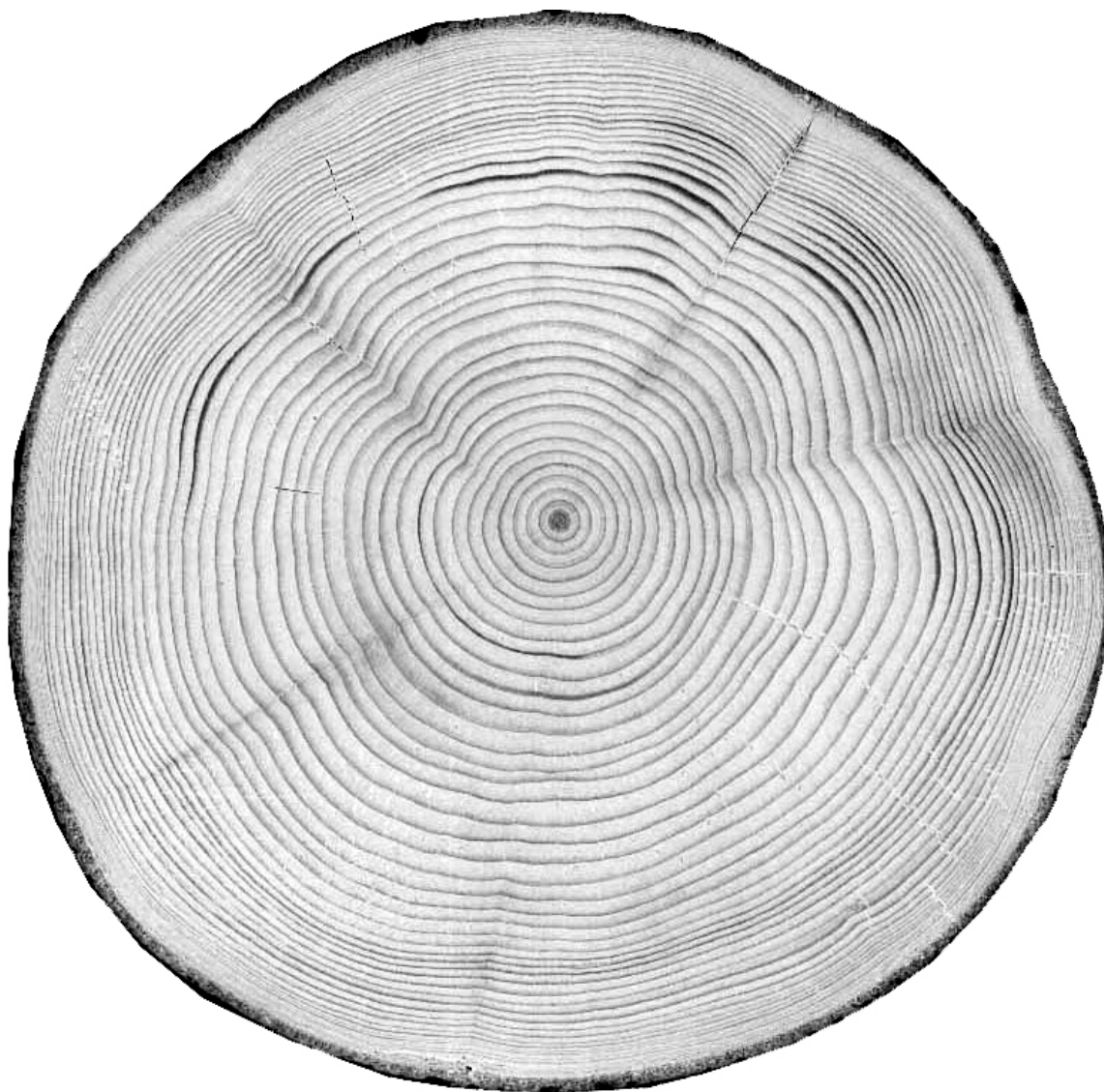


*а* *б* *в*

*Рис. 2.1. Поперечные стили разных видов деревьев: а – сосна обыкновенная (Pinus sylvestris L), б – пихта сибирская (Abies sibirica Ledeb), в – лиственница сибирская (Larix sibirica Ledeb)*



*Рис. 2.2. Поперечный ствол лиственницы сибирской *Larix sibirica* Ledeb (место сбора – Бугузунский перевал, п. Кош-агач, Алтайский край)*



*Рис. 2.3. Поперечный ствол пихты сибирской *Abies sibirica* Ledeb (место сбора – Колпашевский район, Томской области)*

### **2.1. Структура годичных колец на микро и макроуровне**

Каждый годичный слой состоит из ряда клеток, которые и определяют его структуру. В зависимости от строения клеток древесина годичного слоя определяется как светлое или темное кольцо. Рост годичного кольца происходит в результате деления клеток камбиальной зоны и их дифференцировки. Увеличение радиальных размеров клеток и утолщение клеточной стенки являются анатомическими показателями дифференцировки трахеид, клеток в форме сильно вытянутых волокон с кососрезанными концами, составляющих 90 % объема древесины. Сформированное годичное кольцо представляет собой конечный результат деления и дифференциации клеток в вегетационный сезон. Об-

щепринятым считается заключение, что конечный размер трахеид определяется условиями в период растяжения клеток [131]. Последний этап дифференциации элементов ксилемы – клеток, формирующих водопроводящую систему растения, характеризуется отложением жесткой вторичной стенки и прекращением радиального роста клеток с лигнификацией клеточной оболочки. Все зрелые клеточные элементы ксилемы имеют толстую вторичную клеточную оболочку. Однако толщина ее может заметно отличаться у трахеид, формирующихся в разное время сезона роста, что способно повлиять на поверхностную плотность древесины [131].

На рис. 2.4 представлена микроструктура годовичного слоя пихты сибирской (*Abies sibirica Ledeb.*), соответствующего 1966 году. Анализируемый слой (рис. 2.4, в) состоит из ряда клеток ранней и поздней древесины, размер которых от начала вегетационного периода до его середины увеличивается, а затем начинает снижаться (рис. 2.5, б). Толщина клеточной стенки резко возрастает у клеток поздней древесины (рис. 2.5, в). Отсюда можно сделать предположение, что исходя из микроструктуры годовичного слоя, древесина, образованная в начале периода вегетации, является менее плотной, чем древесина, образованная в конце периода вегетации. Из представленного на рис. 2.5, а профиля изменения интенсивности окраски клеток, полученного путем считывания графического изображения вдоль линии сканирования, видно, что всплески, соответствующие изменению уровня цветового изображения пикселей, сближаются к концу вегетационного сезона.

Из литературных данных известно, что изменение уровня цветового изображения, полученного при сканировании анализируемого образца, соответствует распределению плотностью древесины [132]. Поэтому, любое аналитическое представление связи процессов роста и картины годовичных слоев является удобным способом изучения структуры и свойств древесины.

Исходя из сделанных наблюдений становится возможным проведение разработки математической модели, описывающей радиальное сечение годовичных слоев деревьев, с целью использования свойств разработанной модели для автоматизированного исследования и анализа годового прироста за вегетационный период.



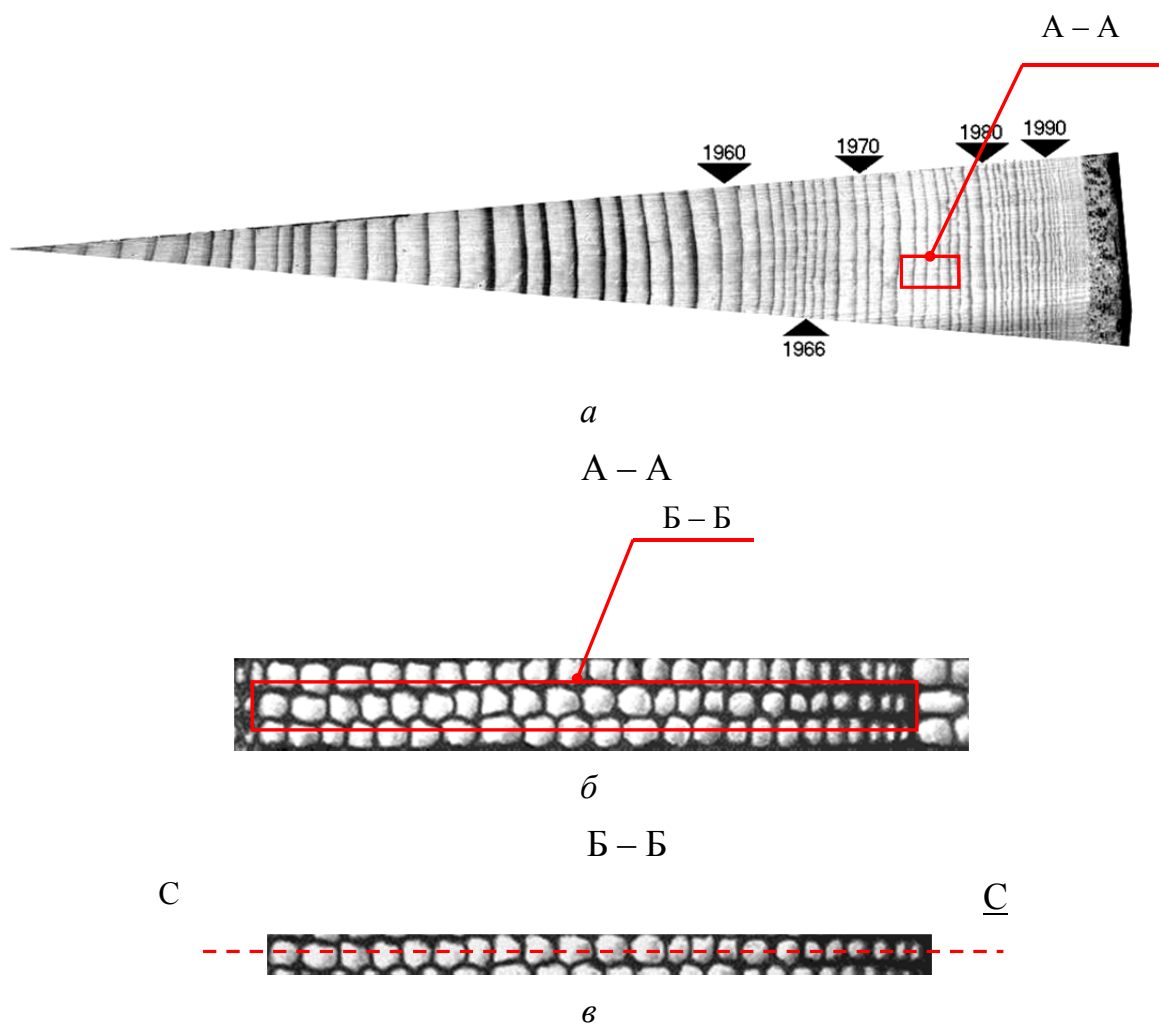


Рис. 2.4. Микроструктура годового слоя пихты сибирской (*Abies sibirica* Ledeb):

A – A – сечение одного годовичного слоя, соответствующее 1966 году,

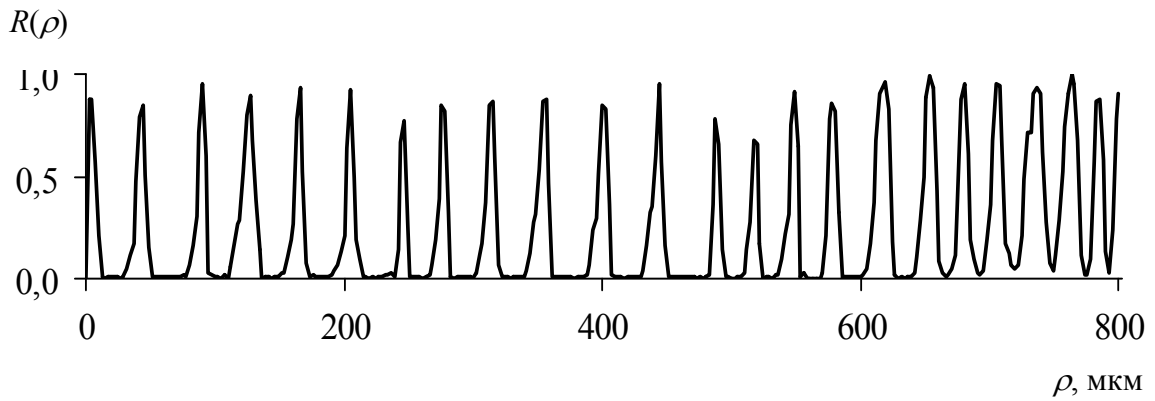
Б – Б – сечение, одного ряда клеток из выбранного годовичного слоя,

С – С – линия сканирования вдоль годовичного слоя.

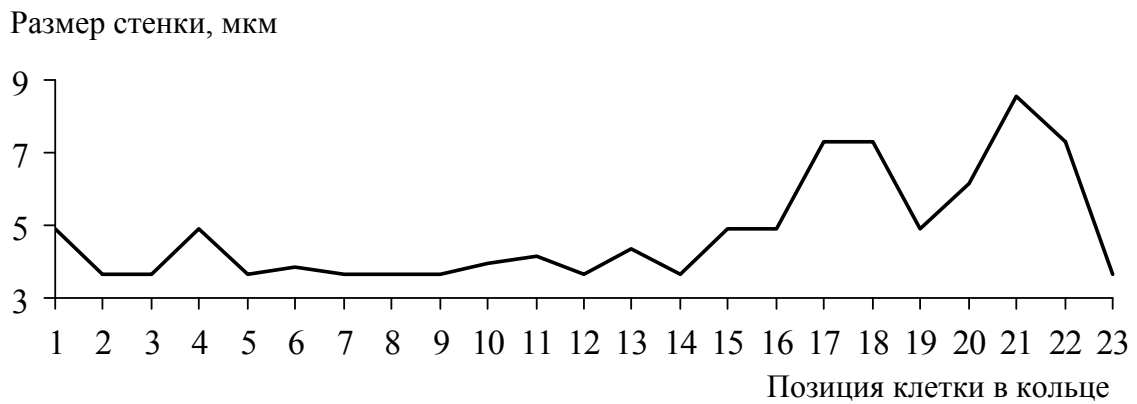
*a* – сегмент поперечного спила дерева,

*б* – ряды трахеид одного годовичного кольца,

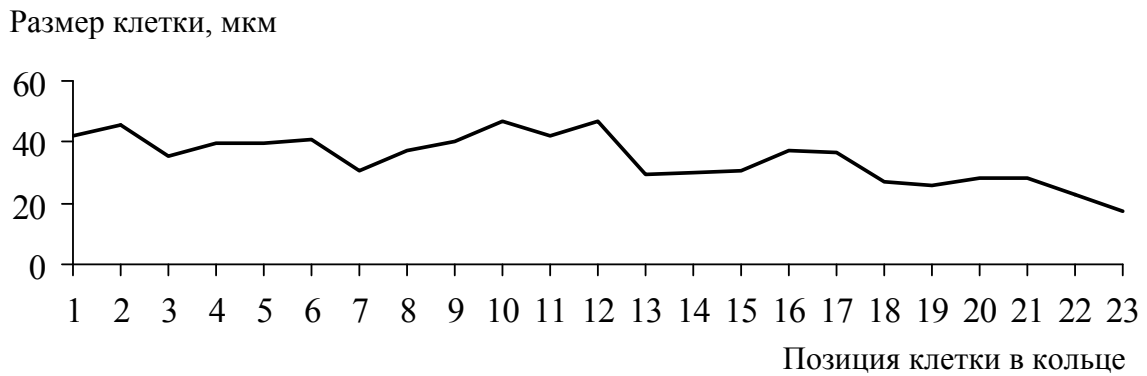
*в* – ряд трахеид для анализа размера клеток



*a*



*б*



*в*

*Рис. 2.5. Структура годичного слоя на микроуровне:  
 а – профиль изменения интенсивности окраски клеток вдоль линии сканирования  
 в относительных единицах, б, в – размер клеток в годичном слое, формирующихся  
 от начала до конца вегетационного периода, и толщина их клеточных оболочек*

### 2.1.1. Биоиндикационная математическая модель микроструктуры годовичных слоев деревьев

Многочисленные дендрохронологические исследования основываются на измерении ширины годовичных колец деревьев, формирование которой происходит под воздействием постоянно изменяющихся параметров окружающей среды. Формирование годовичных колец обусловлено ростом трахеид и формированием уникальной клеточной структуры. Трахеиды хвойных деревьев модифицируются, адаптируясь к изменениям окружающей среды в процессе вегетации. Использование для анализа характеристик годовичных колец математических методов и построение математических моделей изменчивости прироста деревьев в связи с динамикой внешних условий обеспечивает на современном этапе развитие дендрохронологии как науки [9].

Взаимосвязь между параметрами годовичного кольца и параметрами окружающей среды предполагает наличие некоторой количественной зависимости, интегрально учитывающей неоднородность внешних параметров окружающей среды. Работа по выделению подобной зависимости является наиболее актуальной для более точного восстановления климатозоологических данных. Решение данной задачи основано на построении математической модели, соответствующей микроструктуре годовичного кольца, позволяющей производить оценку сезонных изменений роста.

При исследовании структуры древесины как физического объекта параметры трахеид измеряются микроскопическими методами. На макроуровне измеримым параметром является размер годовичного кольца, который фиксируется детектором как некоторая функция, видоизмененная относительно среднего размера трахеид, образовавшихся за сезон роста. Микрофотография поперечного среза, представленная на рис. 2.6, *a*, характеризует изменение оптической плотности вдоль ряда трахеид. Наблюдаемое распределение вещества вдоль годовичного слоя (рис. 2.6, *a*) напоминает процессы, происходящие в системах с отрицательной обратной связью. Обратная связь в биологических объектах, например, в дереве, может служить системой биологического регулирования процессов роста трахеид. Применительно к сигналу, соответствующему изменению оптической плотности в ряде трахеид (рис. 2.6, *a, б*), обратная связь будет являться стабилизирующим фактором протекания процессов.

При построении математической модели входной сигнал примет вид  $1 - b(x)$ , а передаточная функция  $\exp i\phi(x)$ , тогда модель микроструктуры годовичного кольца, характеризующую изменение оптической плотности в ряде трахеид, можно представить в следующем виде:

$$C(x) = \left| \frac{1-b(x)}{1-b(x)\exp i\phi(x)} \right|^2 = \frac{(1-b(x))^2}{1-b(x)^2 - 2b(x)\cos\phi(x)}, \quad (2.1)$$

где  $C(x)$  – функция представляющая распределение плотности вещества вдоль 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 рис. 2.6, б, видно, что основные структуры трахеид воспроизводятся моделью (2.1) адекватно натуральному изображению, рис. 2.6, а.

Из выражения (2.1) следует, что параметры трахеид контролируются входными воздействиями  $b(x)$  и  $\phi(x)$  – в обычных условиях гладкими функциями, описывающими процесс модуляции [4, 5].

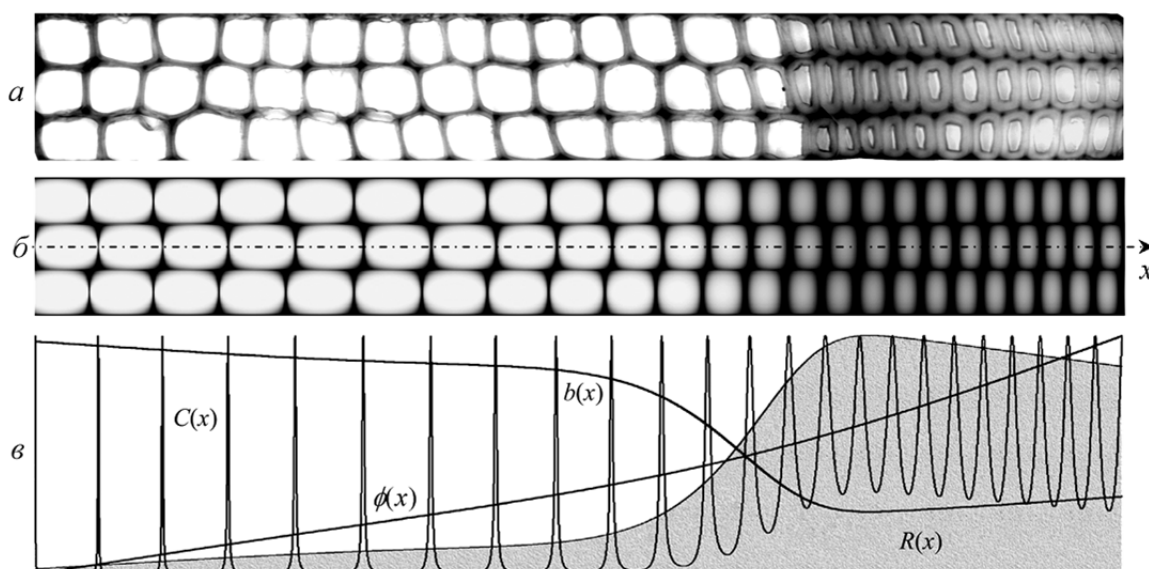


Рис. 2.6. Моделирование сезонного изменения трахеид годичного кольца: а – микрофотография поперечного сечения трахеид, б – графическое представление модели поперечного сечения трахеид; в – модель плотности вещества вдоль ряда трахеид, где  $C(x)$  – распределение плотности вещества вдоль ряда трахеид,  $b(x)$  – функция связанная с толщиной клеточной стенки,  $\phi(x)$  – фаза,  $R(x)$  – распределение вещества в радиальном сечении годичного кольца

Информация о состоянии окружающей среды и о внутренних процессах в дереве включена в эти входные воздействия. В рамках модели они являются независимыми величинами, но их взаимосвязь возникает вне модели, как результат оптимизации проводящей и опорной функций ствола.

Под воздействием входных функций знакопеременное колебание  $b(x)\exp i\phi(x)$  может обеспечивать переключение процессов роста, что соответствует переходу от формирования ранней к формированию поздней древесины, характеризующемуся изменением радиального раз-

мера клеток и толщины клеточной стенки [9]. Подобные функциональные изменения, запрограммированные в росте дерева, отражает функция фазы  $\phi(x)$  (рис. 2.6, а), преобразованная в функцию  $\phi'(x)$  (рис. 2.6, б) путем вычитания линейной зависимости  $L(x)$ , проведенной через начальную и конечную точки функции  $\phi(x)$ . На границе характеризующей сезонные изменения роста производная функции  $\phi'(x)$  изменяет знак.

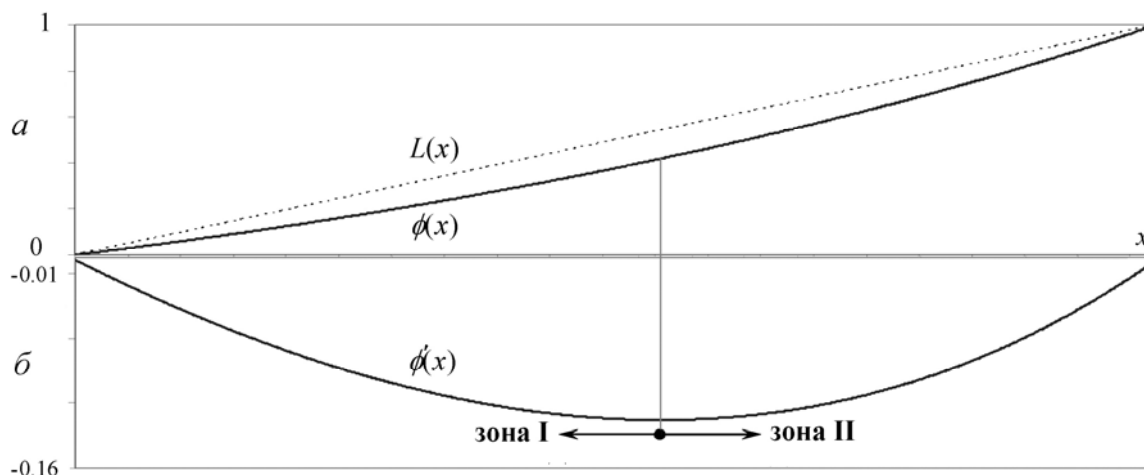


Рис. 2.7. Анализ сезонных изменений роста: а – функция фазы  $\phi(x)$ , отражающая функциональные отклонения, запрограммированные в сезонных изменениях роста дерева, от равномерного формирования трахеид  $L(x)$ , б – функция  $\phi'(x)$  отслеживания сезонных изменений роста и перехода от ранней (зона I) к поздней (зона II) древесине

Пусть радиальный размер трахеид достаточно мал, такой, что в пределах трахеиды  $\phi(x) = 2\pi nx$ , где  $n = 1, 2, \dots$ , а  $b(x) = b_n = \text{const}$ . При этих условиях получено аналитическое выражение для количества вещества в радиальном сечении трахеид:

$$R_n = 2 \int_0^{\frac{n}{2}} C(x) dx = \frac{2(1-b_n)}{\pi n(1+b_n)} \arctg \left( \frac{1+b_n}{1-b_n} \operatorname{tg}(\pi nx) \right) \Big|_0^{\frac{n}{2}} = \frac{1-b_n}{n(1+b_n)}. \quad (2.2)$$

Экспериментально наблюдается сглаженное распределение вещества в радиальном сечении годичного кольца  $R(x)$  (рис. 2.6, б), высокочастотные составляющие функции  $C(x)$  подавляются сверткой с апертурой детектора  $\Omega(x)$ , в результате чего выражение (2.2) примет следующий вид:

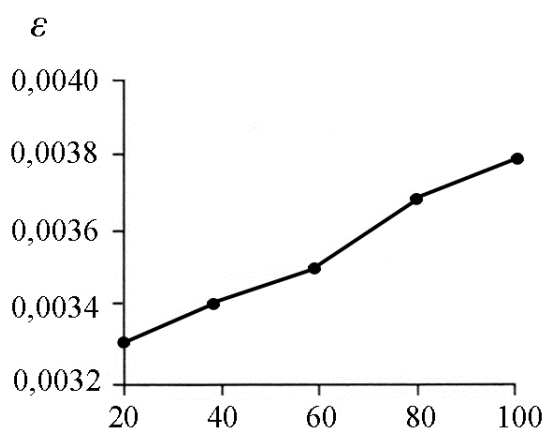
$$R(x) = C(x) \otimes \Omega(x) \approx \frac{1-b(x)}{1+b(x)}. \quad (2.3)$$

В замкнутом численном эксперименте было установлено, что при изменении числа трахеид в годичном кольце от 20 до 100, соотношение (2.3) выполняется с погрешностью меньше 0,004 (рис. 2.8). Выборочный

ансамбль для данного эксперимента состоял из 10 разных реализаций модельного сигнала с индивидуальной для каждого сигнала фазой. Для этих сигналов изменялось число периодов, соответствующих изменению количества трахеид в годичном слое от 20 до 100 с шагом 20. Оценка нормированной среднеквадратической ошибки восстановления вычислялась по формуле:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_i - R_{ei})^2}{n}}, \quad (2.4)$$

где  $R_i$  – восстановленная и  $R_{ei}$  – исходная функции,  $n$  – количество сигналов.



*Рис. 2.8. Оценка среднеквадратической ошибки восстановления нормированной функции  $R(x)$  при изменении количества трахеид в годичном кольце от 20 до 100*

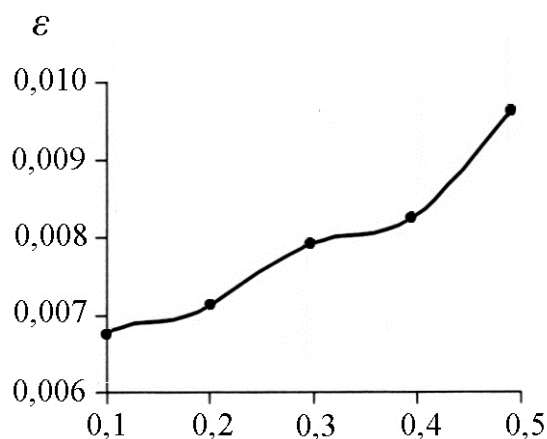
Таким образом, выражение (2.3) достаточно точно определяет распределение вещества по сечению годичного кольца и связывает это распределение с функцией  $b(x)$ , которая управляет толщиной стенки трахеиды. Этот результат соответствует известным экспериментальным данным [9].

Для оценки статистической устойчивости математической модели (2.1) проведен замкнутый численный эксперимент, для реализации которого был построен модельный сигнал, соответствующий ряду трахеид (рис. 2.6, в). На модельный сигнал накладывался равномерный аддитивный шум. Восстанавливаемой составляющей модели являлась фаза колебания, определяющая динамику роста клеток.

Выборочный ансамбль состоял для всех экспериментов из 10 разных реализаций сигналов для каждого уровня шума. Оценка среднеквадратической ошибки восстановления фазы рассчитывалась в соответствии с выражением (2.4) при изменении отношения шума к сигналу от 0,1 до 0,5 с шагом 0,1.

Отдельные контрольные эксперименты с большим объемом выборки (более 100 разных реализаций сигналов) показали, что среднее и дисперсия, полученных оценок остаются неизменными, что было расценено как наличие статистической устойчивости. При данном объеме выборки в силу центральной предельной теоремы среднее арифметическое значение будет распределено по закону, близкому к нормальному. Для статистического эксперимента представляют интерес случаи с малым среднеквадратичным отклонением, что означает устойчивость алгоритма оценивания к входным параметрам, вследствие этого среднее арифметическое как оценка ошибки  $\varepsilon$  будет близко к оценке максимального правдоподобия.

Эксперимент показал, что при демодуляции в условиях действия равномерного шума со среднеквадратичным отклонением 0,5 функция фазы восстанавливается с погрешностью менее 0,01 (рис. 2.9).



*Рис. 2.9. Оценка среднеквадратической ошибки восстановления нормированной функции фазы  $\phi(x)$  при изменении уровня аддитивного шума*

Модельные условия, созданные в замкнутом численном эксперименте и его результаты, позволяют говорить о возможности использования модели (2.1) для изучения особенностей формирования рядов трахеид за вегетационный период, а также применимости модели для разработки на ее основе численных алгоритмов позволяющих производить восстановление параметров роста трахеид из натуральных образцов.

Практическая значимость математической модели, основывается на формализме составляющих модель функций и существующих взаимосвязях, позволяющих определять физический или биологический смысл подтверждаемый экспериментально. В представленной модели (2.1) таковыми являются функции  $b(x)$  и  $\phi(x)$ . В силу своей гладкости и распределенности по всему сезону роста они более удобны для экспериментального исследования и несут большой объем полезной информации [138], нежели традиционные микроскопические дискретные параметры

клеток. Однако функция  $\phi(x)$  недоступна для изучения на уровне годового кольца, как это следует из (2.3), поэтому полный эксперимент должен включать микроденситометрирование срезов трахеид для получения распределения их вещества, с последующей демодуляцией полученных данные в соответствии с выражением (2.1).

В натурном эксперименте обрабатывались микрофотографий трахеид сосны (*Larix sibirica* Ledeb.), соответствовавшие годовичным слоям разных лет и разных деревьев. Общий объем выборки натуральных сигналов состоял из 60 различных рядов трахеид.

В результате реализации алгоритма восстановления исследуемых функции по натурным образцам выделялся исходный сигнал соответствующий оптической плотности вещества трахеид, подвергаемый фильтрации и вычислению основных частотных составляющих сигнала, соответствующих периодичности колебанию плотности в ряде трахеид. Функции фазы  $\phi(x)$  и амплитуды  $b(x)$  вычислялись, как составляющие математической модели (2.1), в соответствии с известным математическим аппаратом. По восстановленным функциям  $b(x)$  и  $\phi(x)$  определялась плотность  $C(x)$  (рис. 2.10, б), которая, в свою очередь, сравнивалась с исходной экспериментальной плотностью. Совпадение исходной и восстановленной функций оценивалось коэффициентом корреляции.

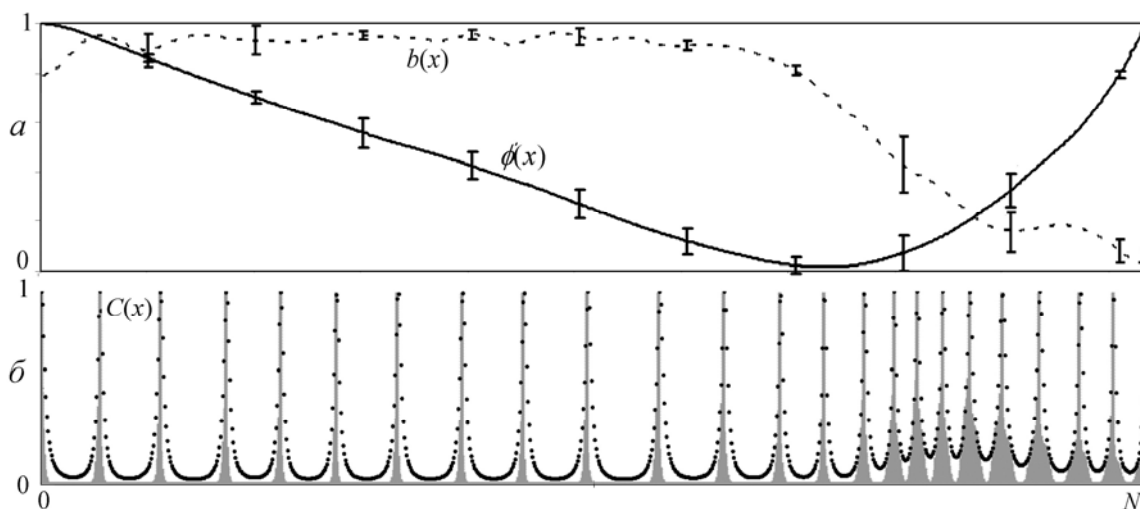


Рис. 2.10. Анализ микрофотографий трахеид: а – восстановленные функции: амплитуда  $b(x)$ , фаза  $\phi(x)$ , б – экспериментальная плотность вещества трахеид (серый тон), восстановленная плотность вещества трахеид  $C(x)$  (пунктир)

Полученные результаты (рис. 2.10, а) отражают наличие закономерности формирования функции  $\phi(x)$  и  $b(x)$  для всей выборки натуральных сигналов. Низкий уровень дисперсии полученных функции относительно средних оценок, подтверждает устойчивость и применимость модели (2.1) к работе с натурными образцами.

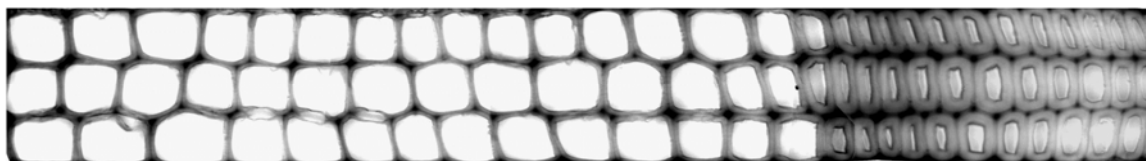


Наименьшее значение коэффициента корреляции равно 0,76, для всего выборочного ансамбля, характеризует разработанную математическую модель как достаточно точно описывающую наблюдаемый биоиндикационный объект, что позволяет говорить о применимости составляющих модель функций для более точного формального описания биоиндикационных процессов.

### **2.1.2. Алгоритм совместной фильтрации рядов клеточных структур годовых колец деревьев**

Годичные кольца, сформированные в стволе дерева рядами трахеид, являются биологическими индикаторами климатоэкологического состояния окружающей среды. Знание о биоиндикационных свойствах годовых колец может быть расширено и дополнено в результате изучения процессов роста дерева на клеточном уровне.

На поперечном сечении ствола дерева годовые слои отображаются в виде ряда клеток определенного количества (рис. 2.11), в которых каждая отдельная клетка формировалась в течение некоторого промежутка времени в пределах вегетационного периода под воздействием внешних и внутренних факторов, оказывавших определяющее воздействие на форму и размер клетки, а также на толщину клеточной стенки [9].



*Рис. 2.11. Микрофотография годового слоя сосны обыкновенной*

Таким образом, каждая отдельная клетка определяет величину ежегодного прироста и несет в себе информацию об изменениях роста в течение вегетационного периода. Выделение скрытой в структуре годового слоя информации возможно путем изучения изменений параметров клеток за вегетационный период.

С целью оценки сезонных изменений роста использованы микрофотографии рядов клеток трех климатипов сосны обыкновенной (Пинежского, Плесецкого, Чемальского), произрастающих в географических культурах Приангарья. Выбрано по 5 деревьев от каждого климатипа, у которых отобрано по два ядра. В каждом ядре исследовались два ряда клеток в годовых слоях, соответствующих 1994 и 2003 гг. Общий объем выборки составил 96 рядов.

Средние оценки изменений сезонного роста, восстановленные в соответствии с разработанным ранее алгоритмом за одинаковые вегетационные периоды, представленные на рис. 2.12, отражают сходную зако-

номерность и наличие малой (не более 20 % от среднего значения) величины среднего квадратического отклонения.

Полученные результаты подтверждают наличие в рядах сезонного роста общей для всех деревьев и локальных – индивидуальных для каждого дерева в отдельности закономерностей. Данное наблюдение позволяет сделать вывод о наличии внешних воздействий, оказывающих влияние на формирование и рост клеток в течение вегетационного периода. В связи с этим является актуальной задача выделения закономерностей внешних воздействий, формирующих исходные ряды и влияющих на процессы формирования клеток. Известно, что изменчивость климатических параметров фиксируется клетками деревьев в процессе трансформации данных изменений в дереве с определенной периодичностью [9] и может являться общим определяющим рост клеток воздействием. При восстановлении хронологических данных использован сформулированный в ходе работы принцип «общности», в соответствии с которым внешнее вынуждающее воздействие проявляется в общности существенных признаков всех хронологий одного типа в пределах физико-географической единицы. Этот принцип подтверждается наличием статистической устойчивости средних значений сезонных изменений прироста клеток за вегетационный период у исследованных натуральных образцов трех различных климатипов сосны.

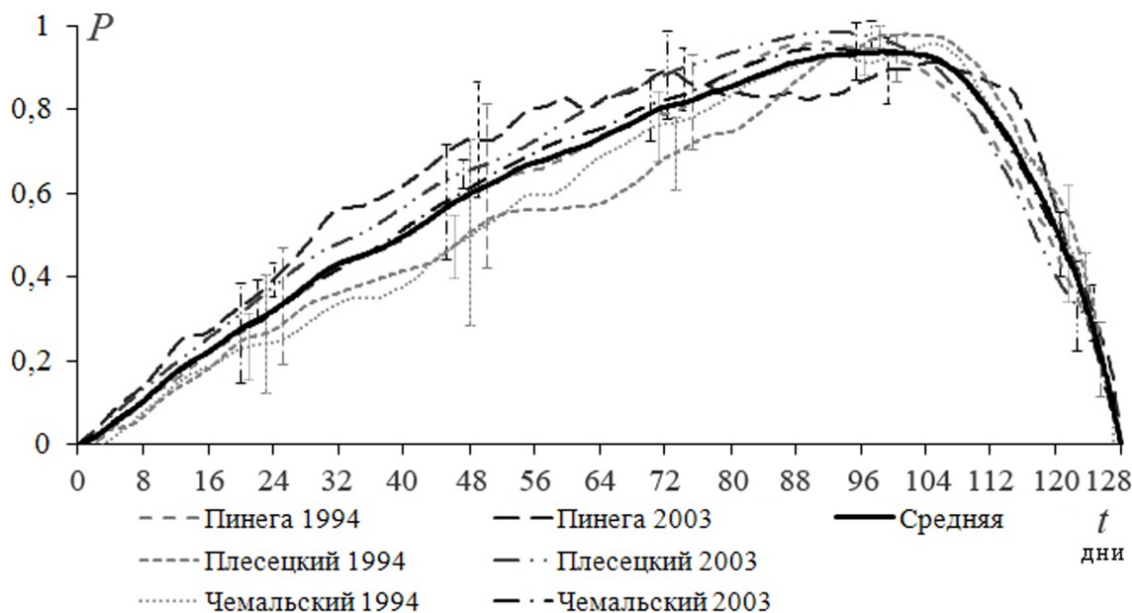


Рис. 2.12. Оценки средних значений сезонных изменений прироста клеток  $P$  за вегетационный период  $t$

Для хронологических рядов, относящихся к одинаковым географическим единицам, внешнее вынуждающее воздействия обуславливает наличие естественного механизма синхронизации рядов. Следует раз-

личать глобальные, региональные, локальные и индивидуальные, составляющие внешнего воздействия.

Основываясь на предположении о существовании общего вынуждающего воздействия, определяющего структуру годичного слоя, необходимо разработать алгоритм совместной фильтрации рядов, позволяющий выделять группы общности из исследуемой выборки сигналов, соответствующих одинаковым временным периодам.

Исследуемые сигналы удобно рассматривать как некоторое интегральное представление составляющих сигнал базисных функций. По определению общие части процессов, в данном случае рядов прироста, должны конструироваться только из тех элементов представляющего базиса, которые обладают некоторой инвариантностью при переходе от одного процесса к другому. Фильтр такого типа оставляет общие составляющие сигналов, ограничивая их изменчивость. Сигналы, оставаясь после совместной фильтрации различными, функционально сближаются, увеличивая коэффициент корреляции.

Исследуемые сигналы, рассматриваемые как действительные функции времени с ограниченной энергией, могут быть дополнены и продолжены на всю действительную ось периодически четным или нечетным способом. В этом случае для рассматриваемых функций существует преобразование Фурье, например, в тригонометрическом базисе. Полученные спектры Фурье при данных условиях продолжения функций также действительны. Положим, что инвариантом относительно смены хронологий является знак спектральной составляющей функций. Это означает, что спектр сигнала должен формироваться спектральными составляющими одного знака.

Полезность такого подхода следует из свойства скалярного произведения двух функций, которое пропорционально скалярному произведению преобразований Фурье этих функций. Выбирая спектральные составляющие с совпадающими знаками, мы максимизируем коэффициенты корреляции общих составляющих каждой пары сигналов для данной выборки.

Исследуемые ряды обозначим как  $x_i(n)$ , эти функции вещественны, а  $n$  – дискретный аргумент, принимающий целые значения значений из заданного интервала наблюдений  $N$ . Количество рядов обозначим индексом  $I$ , где индексы  $i, l$  определяют номера рядов. Для ограниченных функций конечной мощности  $x_i(n)$  имеются прямое и обратное дискретные преобразования Фурье:

$$x_i(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_i(k) e^{j \frac{2\pi nk}{N}},$$

$$X_i(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_i(n) e^{-j \frac{2\pi nk}{N}},$$

где  $j$  – мнимая единица,  $k$  – номер гармоники.

Спектр  $X_i(k)$  вещественный и выражает координаты ряда  $x_i(n)$  в пространстве тригонометрических базисных функций.

Алгоритм совместной фильтрации обозначен символами  $CF$ . На первом этапе алгоритма реализуется прямое преобразование Фурье исходных сигналов. На втором этапе производится расчет средних оценок спектра частот для всей выборки исследуемых сигналов. На третьем этапе производится фильтрация частотного спектра, реализуемая по правилу:

$$Y_i(k) = CF \{ X_i(k) \} = \begin{cases} X_i(k), & \text{sign} X_i(k) = \text{sign} \bar{M}(k) \\ 0, & \text{sign} X_i(k) \neq \text{sign} \bar{M}(k) \end{cases}$$

При фиксированном  $k$  для всех возможных  $i$  и  $l$  из набора  $I$  в спектре  $X_i(k)$  для частоты  $k$  оставляются координаты с одинаковыми знаками, а координаты для каждого отдельного ряда со знаками, отличающимися от рассчитанного среднего для общей выборки, полагаются равными нулю, как показано на рис. 2.13. В результате получается новый ряд  $Y_i(k)$ , спектральные составляющие которого, полученные как результат совместной фильтрации.

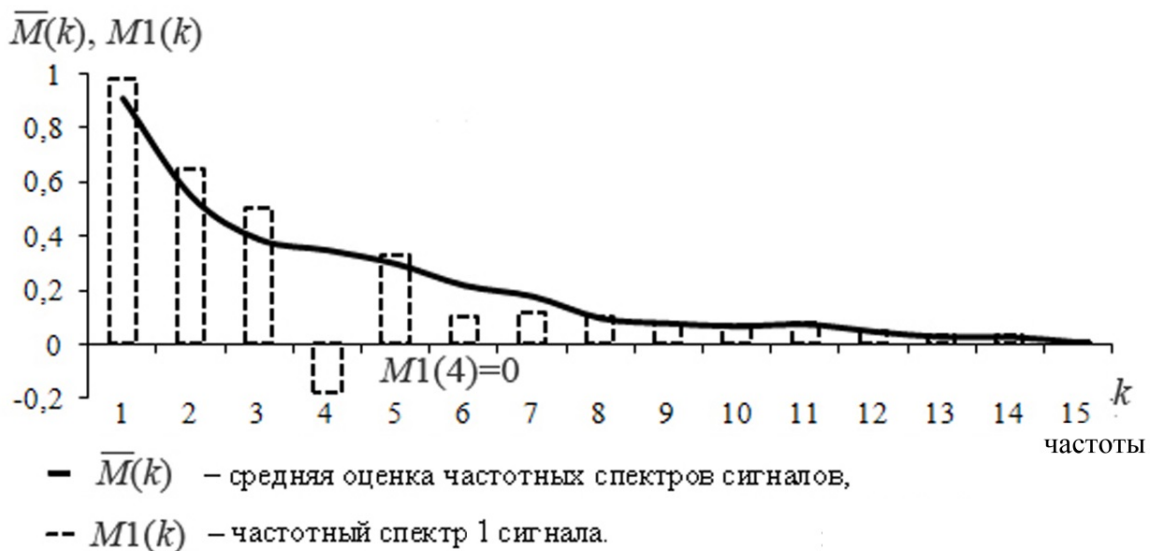


Рис. 2.13. Дискретные частотные спектры исследуемых сигналов

На четвертом этапе, после применения обратного преобразования Фурье к преобразованному спектру  $X_i(k)$  получаем общие составляющие  $y_i(n)$  от исходных сигналов  $x_i(n)$ .

Для построения оценок взаимосвязей рядов, предполагая, что исследуемые процессы имеют нулевое среднее, использованы коэффициенты корреляции для исходных  $r_0(k)$  и общих  $r_c(k)$  частей процессов, а также относительная дисперсия исследуемых рядов  $\varepsilon(k)$ :

$$r_0(k) = \frac{\langle x_i(k), x_l(k) \rangle}{\sqrt{\langle x_i(k), x_i(k) \rangle \langle x_l(k), x_l(k) \rangle}},$$

$$r_c(k) = \frac{\langle y_i(k), y_l(k) \rangle}{\sqrt{\langle y_i(k), y_i(k) \rangle \langle y_l(k), y_l(k) \rangle}},$$

$$\varepsilon(k) = \frac{\langle y_i(k), y_l(k) \rangle}{\langle x_i(k), x_l(k) \rangle}.$$

Этапы исследования были следующими: выделение функций прироста из микрофотографий годичного слоя, фильтрация исходного сигнала, восстановление функции фазы, построение общих частей и оценки вариаций сезонного роста. Исследовались образцы потомства четырех климатипов сосны обыкновенной (Пинежский, Плесецкий, Чемальский, Балгазынский Архангельской области), произрастающих в географических культурах Приангарья. Выбрано по 5 деревьев от каждого климатипа, у которых отобрано по одному керну, в каждом керне исследовались два ряда клеток в годичных слоях, соответствующих 1994 и 2003 гг. Общее количество исследованных рядов равнялось 128.

В результате применения описанного выше алгоритма совместной фильтрации к исследуемым образцам коэффициент корреляции  $r_0$ , принимает наибольшее значение для каждой пары рядов из данной выборки. Результаты применения алгоритма на примере четырех рядов данных представлены в табл. 2.1.

Анализ коэффициентов корреляции исходных рядов показывает наличие сходных реакций у деревьев одного климатипа (коэффициент корреляции изменяется от 0,65 до 0,75) и наличие индивидуальных особенностей у деревьев различных климатипов (коэффициент корреляции изменяется от 0,51 до 0,66). В результате работы алгоритма совместной фильтрации ряды функционально сближаются, минимальное значение коэффициента корреляции увеличивается до 0,83. Для всех рядов выборки состоящей из 128 рядов, соответствующих разным климатипам, также наблюдается увеличение коэффициентов взаимной корреляции.

Таблица 2.1

*Коэффициенты корреляции рядов климатипов сосны*

Ряд	Преобразованные				
	1	2	3	4	
Один климатип					
Исходные	1	1	0,87	0,88	0,89
	2	0,71	1	0,85	0,86
	3	0,67	0,65	1	0,89
	4	0,75	0,69	0,65	1
Разные климатипы					
Исходные	1	1	0,86	0,85	0,84
	2	0,51	1	0,88	0,85
	3	0,66	0,61	1	0,83
	4	0,59	0,69	0,57	1

В ходе исследования на примере рядов различных климатипов сосны проведена оценка эффективности работы алгоритма в зависимости от размеров спектрального окна и определен вклад каждой отдельной частоты (рис. 2.13).

Исходя из полученных результатов определено, что наиболее значимы являются три первых частоты дискретного частотного спектра исследованных сигналов. Эти частоты являются определяющими при формировании «общих» составляющих сигналов, все остальные частоты суммарно увеличивают коэффициент корреляции не более чем на 10 % от среднего значения и соответственно характеризуют многочисленные локальные особенности, влияющие на рост клеток за вегетационный период.

В ходе данной работы проведено сопоставление средних значений сезонных изменений прироста клеток с климатическими данными. Построена средняя оценка функции прироста для исследуемой выборки из 128 рядов четырех климатипов сосны, с использованием разработанного алгоритма совместной фильтрации, применяемого в пределах первых трех полос частотных спектров сигналов.

Наибольший коэффициент взаимной корреляции, равный 0,97, определен для температурных данных. На рис. 2.14 представлены средняя оценка функции сезонного роста и температурного тренда в пределах вегетационного периода.

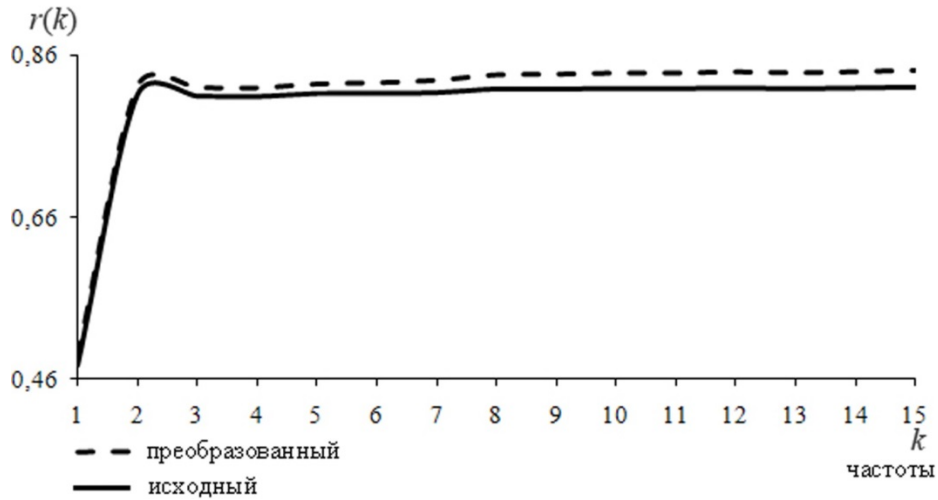


Рис. 2.14. Оценки средних значений коэффициентов корреляции в зависимости от ширины окна спектрального фильтра для исходных и преобразованных сигналов

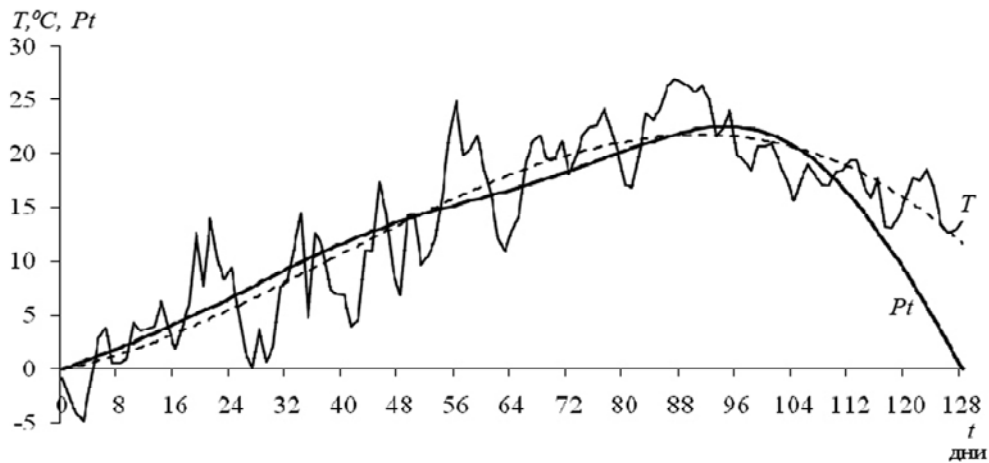


Рис. 2.15. Средняя оценка нормированного прироста  $Pt$  и температура за вегетационный период  $T$

Таким образом, функция значений сезонных изменений прироста исследованных натуральных образцов характеризует сезонную динамику усредненных (по декадам) значений температуры.

## 2.2. Биологическая природа шумов

Полученный в результате сканирования диска дерева в одном из радиальных направлений сигнал представляет собой некоторую зависимость в виде функции  $R(\rho)$ . Данная зависимость является результатом имевших место биологических процессов, повлиявших на формирование морфологической структуры древесины, и отображает сезонное изменение внутренних характеристик дерева, произошедших под влиянием изменения внешних и внутренних факторов. Задача извлечения не-

обходимой информации из полученной интегральной зависимости сводится к разделению полезного сигнала и разного рода шумов, имеющих в своей основе биологическую природу.

Возрастные изменения роста дерева, происходящие на клеточном уровне, отражаются на морфологии древесины в виде изменения плотности и химического состава. Каждый год в вегетационный сезон в камбиальной зоне дерева происходят деления клеток, которые и формируют зону прироста от поздней древесины прошлого года до ранней древесины нового года. Размер прироста в направлении одного радиуса поперечного сечения дерева имеет некоторую закономерность, обусловленную внутренними особенностями дерева. Внутренние особенности роста накладывают глобальные изменения на все радиальное сечение. Обусловлены эти изменения видовыми особенностями деревьев. Картина годичных слоев в зависимости от вида дерева может иметь форму более или менее искривленных колец на всем сечении.

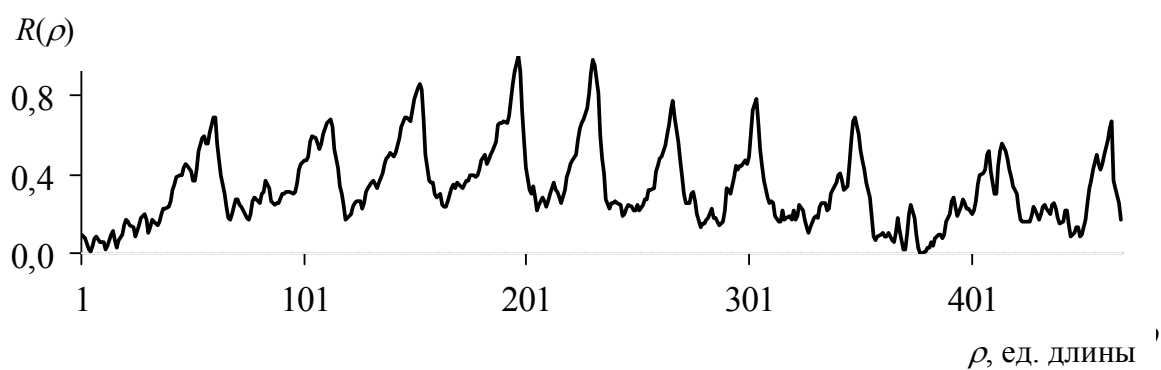
Процессы старения, зависящие как от вида дерева, так и от возраста дерева, накладываются на реальный сигнал в виде аддитивного низкочастотного шума  $l(\rho)$  (рис. 2.16, а), что связано с неравномерной окраской древесины на поперечном срезе ствола. Изменение окраски древесины с возрастом у некоторых видов деревьев происходит в результате интенсивного протекания процессов одревеснения или лигнификации [8].

Под влиянием внутренних или внешних факторов может происходить изменение обычного порядка роста клеток дерева, которые накладываются на модельный сигнал в виде аддитивного высокочастотного шума  $h(\rho)$  (рис. 2.16, б). К данной особенности роста относится так называемая «реактивная древесина». Характерная ее черта – неоднородность физиолого-анатомических и физико-механических свойств в различных частях слоя годичного прироста [3].

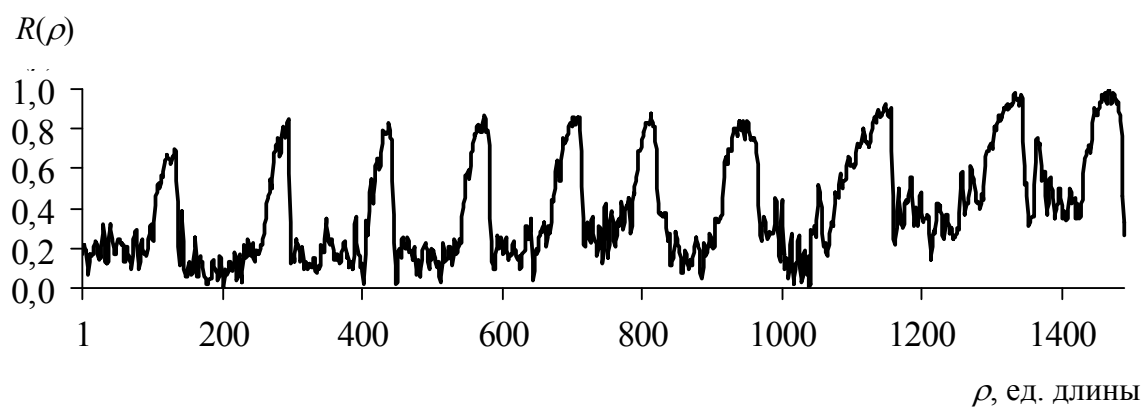
Переход растения к репродуктивному состоянию обычно сопровождается ослаблением активности меристем. Процессы роста могут прерываться продолжительными периодами торможения, наступление которых в северных широтах связано с концом лета и приближением зимы. Иногда у растений наблюдается остановка роста – состояние покоя. Покой у растений – это такое физиологическое состояние, при котором резко снижаются скорость роста и интенсивность обмена веществ [8].

Временные засухи или другие неблагоприятные для роста условия (весенние заморозки, объедание листьев насекомыми и т. п.) во время вегетационного периода могут привести к образованию внутри годичного кольца одного или нескольких слоев из мелких и темных клеток, то есть слоев, состоящих из поздней древесины. Такие слои похожи на настоящие кольца, поэтому их называют «ложными», а годичные кольца, состоящие из ложных колец, «множественными».

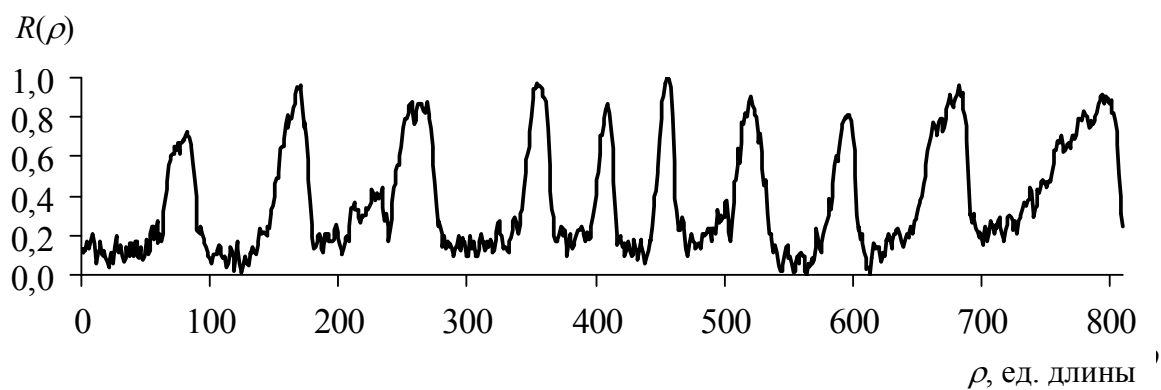




*a*



*б*



*в*

Рис. 2.16. Радиальные сечения разных видов деревьев:  
(функция  $R(\rho)$  представлена в относительных единицах) *a* – пихта сибирская (*Abies sibirica* Ledeb), *б* – лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb), *в* – сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L)

В особо неблагоприятные для жизнедеятельности деревьев годы в пределах отдельных частей поверхности ствола, ветвей и корней камбий может совсем не отложить новый слой древесины. Прекращение деятельности камбия наиболее часто происходит в основании стволов, корнях и ветвях, а также у старых и угнетенных деревьев. Такие кольца называются «выпадающими». На поперечных срезах кольцо может выпасть как в пределах отдельных частей сегментов (прерывистое выпадающее), так и по всей окружности (полностью выпадающее). Выпадение колец чаще всего наблюдается в особо неблагоприятных для роста деревьев условиях, в частности, на верхнем и полярном пределах их произрастания [8]. Подобного рода изменения накладываются на сигнал в виде модуляции фазы (рис. 2.16, в), и поэтому образцы, имеющие подобные отклонения, являются не пригодными для анализа.

Проведение исследования возможно при правильном отборе образцов и предварительном визуальном оценивании выбранных сечений, а также сравнении их с аналогичными сечениями соседних деревьев.

### **2.3. Монотонность и непрерывность роста как основа построения математической модели годичных колец**

Математическая модель радиального сечения дерева строится, исходя из формы и структуры концентрических годичных слоев, которые формируются на поперечном спиле дерева в процессе его роста. Для чего вводится полярная система координат, начало которой совпадает с биологическим центром диска дерева. Годичные кольца рассматриваются как функция двух переменных  $\rho$  и  $\theta$ . На рис. 2.17, а показано поперечное сечение ствола дерева (пихты сибирской, *Abies sibirica* Ledeb), полученное в результате сканирования с необходимой дискретностью  $R(\rho, \theta)$ .

Принимая, что функция изменения радиального сечения диска близка функции плотности древесины [14, 132], далее она будет называться функцией плотности и обозначаться  $R(\rho)$ .

Рассматривая радиальное сечение дерева, отображенное на рис. 2.17, б, легко сделать вывод, что функция  $R(\rho)$  представляет собой колебательный процесс, период которого – период радиального роста дерева непостоянен. В конце каждого периода, на границе между поздней и ранней древесиной, происходят резкие изменения функции плотности, которыми фиксируется время  $\tau$  при данных значениях отсчетов, соответствующих  $\rho$ , что фактически определяет на радиусе временные реперы.

Принимая во внимание свойства радиального роста дерева, а именно то, что радиальный рост не может убывать и меняться скачком во времени  $\tau$  в пределах вегетационного периода, считаем, что функция

роста  $\rho(\tau)$  является монотонной и имеет ограниченную производную. По этой причине обратная ей функция  $\varphi(\rho)$  также монотонна и, более того, она является строго возрастающей функцией.

Из экспериментальных данных следует, что сечение  $R(\rho)$  содержит шумы аддитивно основному колебанию. Локальный импульсный шум  $h(\rho)$  определен в области ранней древесины, он вызван главным образом недостаточной чистотой обработки поверхности поперечного спила и естественными флуктуациями размера клеток древесины. В виду того, что формирование клеток происходит под действием большого числа различных факторов, данная составляющая имеет случайный характер. Этот шум занимает внутреннюю область годичного кольца, имеет малую амплитуду, по отношению к амплитуде полезного сигнала, и расположен в области высоких частот. Наряду с высокочастотным шумом, имеется глобальный низкочастотный шум  $l(\rho)$ , связанный с наличием возрастных зон на поперечном спиле ствола дерева: сердцевины и заболони. Данная составляющая шума накладывается на полезный сигнал в виде колебания, период которого значительно больше периода, соответствующего наибольшему годичному кольцу.

Сделанных наблюдений достаточно для записи математической модели радиального сечения годичных колец (2.5) в виде положительной суммы шумов и действительного колебания  $U(\rho)$ , модулированного по амплитуде и фазе:

$$R(\rho) = C + U(\rho) + h(\rho) + l(\rho) > 0, \quad (2.5)$$

$$U(\rho) = a(\rho) \cdot \cos \varphi(\rho), \quad (2.6)$$

$$a(\rho) = 1 + \mu(\rho), \quad (2.7)$$

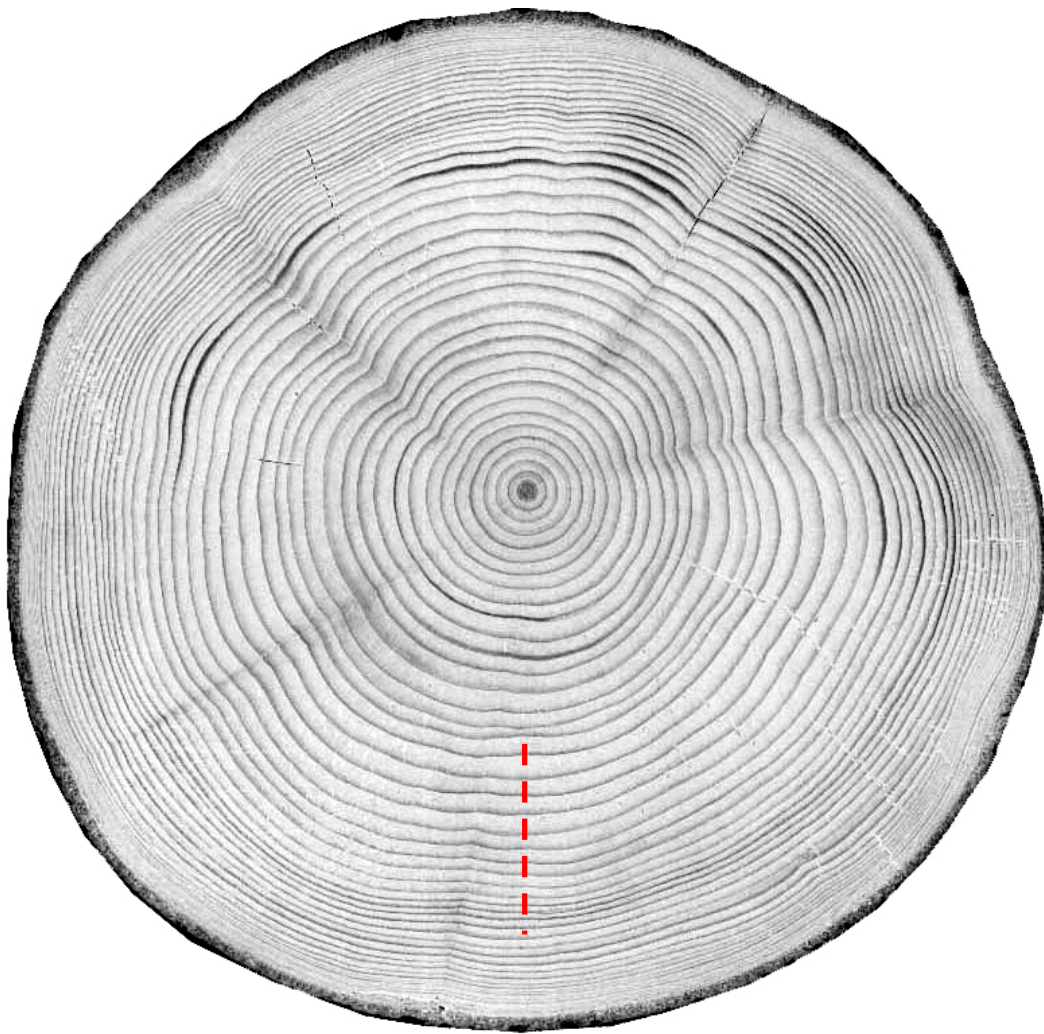
где  $|\mu(\rho)| < 1$ ,

$$\varphi(\rho) = \frac{2 \cdot \pi}{T} \tau(\rho), \quad (2.8)$$

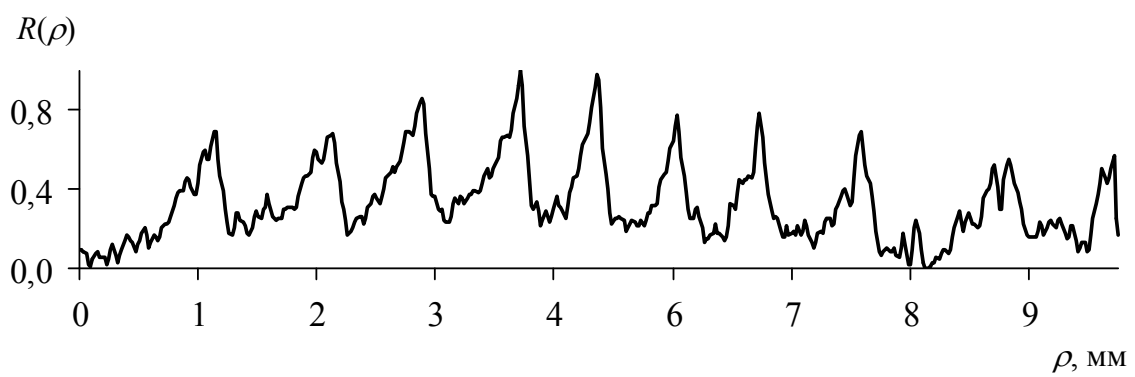
где  $a(\rho)$  – амплитуда колебания;  $\varphi(\rho)$  – фаза колебания;  $\tau(\rho)$  – время роста;  $T$  – период вегетации;  $C$  – постоянная.

Функция  $R(\rho)$  формируется биологическим объектом под влиянием внешней среды и имеет вид интерференционной картины. Поэтому естественно предположить, что она является результатом суммарного взаимодействия «биологического» и «экологического» полей.

В этой связи, данная модель применима для анализа как внешних, так и внутренних особенностей роста дерева в вегетационный период. Основой для проведения прикладного анализа роста являются свойства компонентов, входящих в математическую модель.



*a*



*б*

*Рис. 2.17. Радиальное сечение натурального диска: (функция  $R(\rho)$  представлена в относительных единицах) *a* – поперечное сечение ствола дерева (пихты сибирской *Abies sibirica* Ledeb), *б* – профиль изменения интенсивности окраски вдоль линии сканирования ( - - - )*

Главной и наиболее информативной составляющей модели является фаза, так как она связана с функцией роста обратно пропорциональной зависимостью.

Для восстановления роста следует найти из выражения (2.5) фазу, а затем определить обратную ей функцию. После последовательных преобразований функция роста будет иметь вид:

$$\rho(\tau) = \tau^{-1} \cdot \left( \frac{T \cdot \varphi}{2 \cdot \pi} \right) \quad (2.9)$$

В данном случае функция роста  $\rho(\tau)$  дает время появления каждой клетки дерева на исследуемом радиусе в процессе вегетации, т. е. для всех значений  $\rho$  в интервале между реперами.

Данное аналитическое выражение пригодно для создания алгоритма автоматического вычисления годового прироста деревьев за вегетационный период.

#### 2.4. Применение формализма аналитического сигнала для анализа математической модели

Непрерывное восстановление функции роста может быть осуществлено путем нахождения времени между реперами для всех значений радиуса  $\rho$  в соответствии с выражением (2.9). Чтобы решить эту задачу, необходимо дать формальное определение фазы  $\varphi(\rho)$ . Для чего следует уточнить свойства входящих в модель функций и сделать ее тем самым пригодной для исследования.

Сигналы, зависящие от двух переменных и имеющие вид колебания, замкнутых или незамкнутых полос могут иметь различное происхождение. В общем случае, для представления колебания в виде двух величин, амплитуды и фазы, требуется непротиворечивое определение этих понятий. Различные методы определения амплитуды и фазы полезны в рамках решаемых задач и используемых математических моделей. Однако аналитический сигнал (АС), введенный Д. Габором, получил наибольшее распространение [133–137]. АС является комплексным, его действительная часть есть исходная функция, а мнимая часть образуется применением преобразования Гильберта к действительной части.

$$W(x) = U(x) + iV(x), \quad V(x) = \frac{1}{\pi} \text{v.p.} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{U(s)}{x-s} ds \quad (2.10)$$

Здесь преобразование Гильберта, несобственный интеграл, определено на всей действительной оси  $x$ , а в тех случаях, когда  $s \rightarrow \pm \infty$  и при  $x = s$  – в смысле главного значения по Коши (v.p.).

Однако выражение (2.5) определено только на конечном интервале. Для получения точных оценок результатов эксперимента необходимо осуществить продолжение функции  $R(\rho)$  на всю ось абсцисс с максимальной гладкостью [138]. Продолжение посредством периодической функции представляет особый интерес, так как именно для таких функций предназначен алгоритм быстрого преобразования Фурье, который является базовым при численном анализе сигналов. В этой связи, какой-либо экспериментальный сигнал целесообразно дополнить функцией, плавно соединяющей его окончание с его началом на следующем периоде. Этого можно достичь, используя собственные фрагменты сигнала, или применяя сплайны. Обозначим операцию периодического продолжения символом  $C$ , а обратную ей как  $C^{-1}$ , тогда:

$$CR(\rho) = R(x) = 1 + h(x) + l(x) + a(x) \cdot \cos\varphi(x), \quad (2.11)$$

$$C^{-1}R(x) = R(\rho), \quad (2.12)$$

После введения АС амплитуду и фазу вычисляют по известным формулам, содержащим неопределенность в знаке и в количестве  $\pi$ , поэтому полученные функции необязательно единственны:

$$a(\rho) = \pm \sqrt{U^2(\rho) + V^2(\rho)}, \quad (2.13)$$

$$\varphi(\rho) = \operatorname{arctg} \frac{V(\rho)}{U(\rho)} \pm n\pi, \quad n=0, 1, 2, \dots \quad (2.14)$$

В общем случае целое число  $n$  и знаки в формулах (2.3, 2.14) могут изменяться вместе с аргументом  $x$  [18].

Основное качество математической модели, ее пригодность для исследования, во многом определяется свойствами тех функций, из которых она составлена. При выборе класса функций для представления исследуемой величины следует принять во внимание существование преобразования Гильберта, которым вводится аналитический сигнал.

Преобразование Фурье, спектр периодических функций может иметь особенности вида  $\delta$ -функций. По теореме Винера-Пэли-Шварца такие функции являются целыми функциями экспоненциального типа (ЦФЭТ), если они имеют финитный спектр. Для них возможно обратимое дискретное представление, необходимое для численного анализа. Практический интерес представляют функции, ограниченные на действительной оси, ЦФЭТ класса А [139]. Из ограниченности ЦФЭТ следует абсолютная интегрируемость ее спектра, включая случай, когда она сама не является квадратично интегрируемой. Справедливо и обратное утверждение, а так как преобразование Гильберта от ЦФЭТ не нарушает абсолютной интегрируемости ее спектра, то Гильберт-трансформанта также будет ограниченной функцией.

Наиболее важное свойство аналитического сигнала – это причинность его спектра. Смысл этого термина в том, что спектр АС располагается по одну сторону от начала координат оси частот [30]. Причинность вытекает из свойств преобразования Гильберта, эквивалентного умножению в области частот  $\alpha$  на функцию  $i \operatorname{sgn} \alpha$ . Иными словами, АС, соответствующий данной действительной функции  $U(\rho)$ , получается путем обнуления одной половины ее спектра. Но эта операция непротиворечива только в том случае, когда  $U(\rho)$  сформирован как двухполосный сигнал, как сумма сопряженных комплексных функций с непересекающимися спектральными полосами. Эти комплексные функции будут по определению сопряженными аналитическими сигналами. Качественный признак наличия двухполосности – это большое число мало меняющихся периодов у колебания. Но при наличии шума, наблюдая, например, сечение колец  $R(\rho)$  трудно сделать вывод о выполнении данного требования.

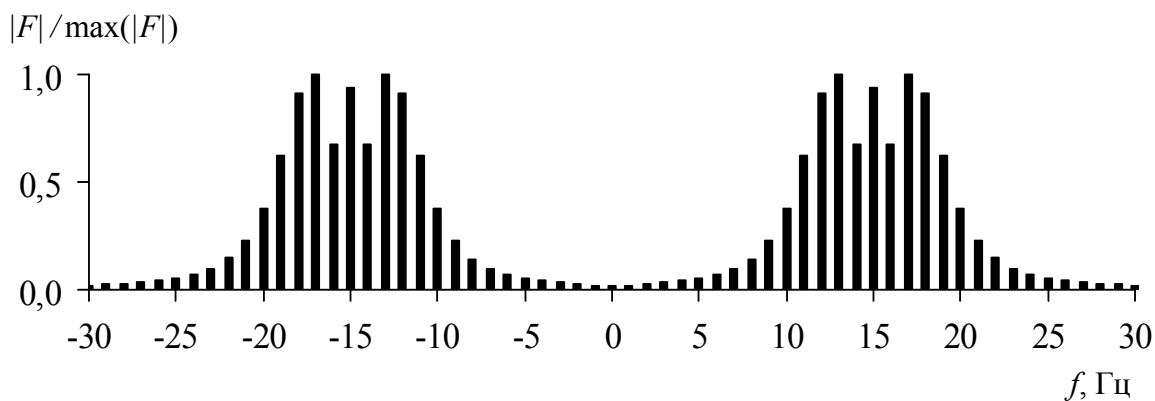
Введение аналитического сигнала  $W(x)$  дает возможность однозначного определения амплитуды и фазы как для узкополосных действительных сигналов, с полушириной спектра (полуширины спектра рассчитывается в соответствии с формулой 2.46) много меньшей несущей частоты  $\Delta f \ll f_n$ , так и для широкополосных сигналов, у которых полуширины спектра может быть меньшей или даже равной несущей частоте  $\Delta f \leq f_n$ .

В случае, когда  $\Delta f > f_n$ , определение амплитуды и фазы становится проблематичным. Если при таком соотношении частот ввести АС и сравнить его с АС, который введен для несущей частоты, сдвинутой на величину  $P$ ,  $f_n + P > \Delta f$ , то в общем случае совпадения фаз, как и амплитуд, не будет.

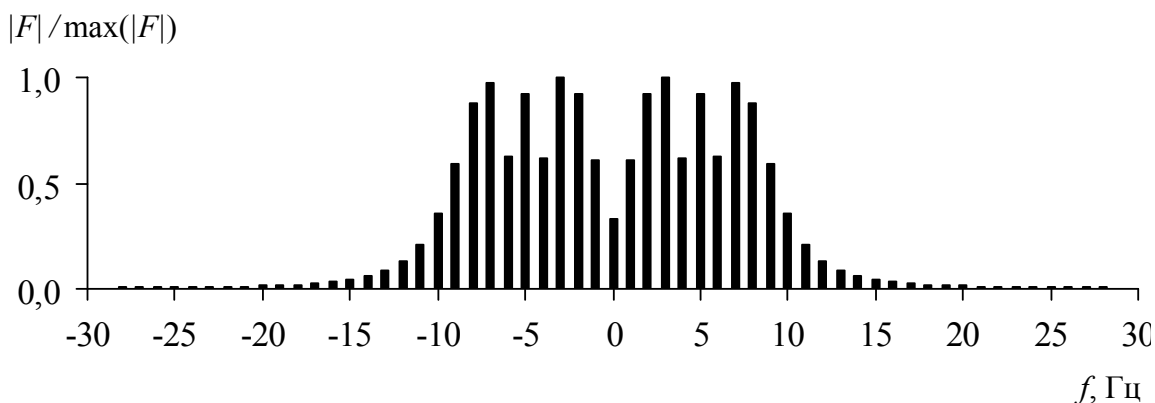
На рис. 2.19 приведены оценки нормированной среднеквадратической ошибки восстановления амплитуды, фазы (оценка нормированной среднеквадратической ошибки рассчитывается в соответствии с формулой 2.45). Амплитуда и фаза процесса, определенные через АС, сравнивались с амплитудой и фазой этого же процесса при сдвиге его спектральных полос в сторону нулевой частоты.

В тех случаях, когда спектральные полосы не пересекают границу нулевой частоты (рис. 2.18, *a*), оценка амплитуды  $\varepsilon_a$  равна нулю (рис. 2.19, *a*). Амплитуда сигнала инвариантна относительно смены знака несущей частоты, а фаза изменяет свой знак, при этом оценка фазы  $\varepsilon_\phi$  от нуля переходит к двум (рис. 2.19, *б*). Оценка нормированной среднеквадратической ошибки восстановления амплитуды становится отличной от нуля а для фазы – от нуля и от двух, когда спектр сигнала пере-

ходит область нулевой частоты (рис. 2.18, б). Оценка нормированной среднеквадратической ошибки восстановления фазы выше (примерно в два раза), чем амплитуды.



а



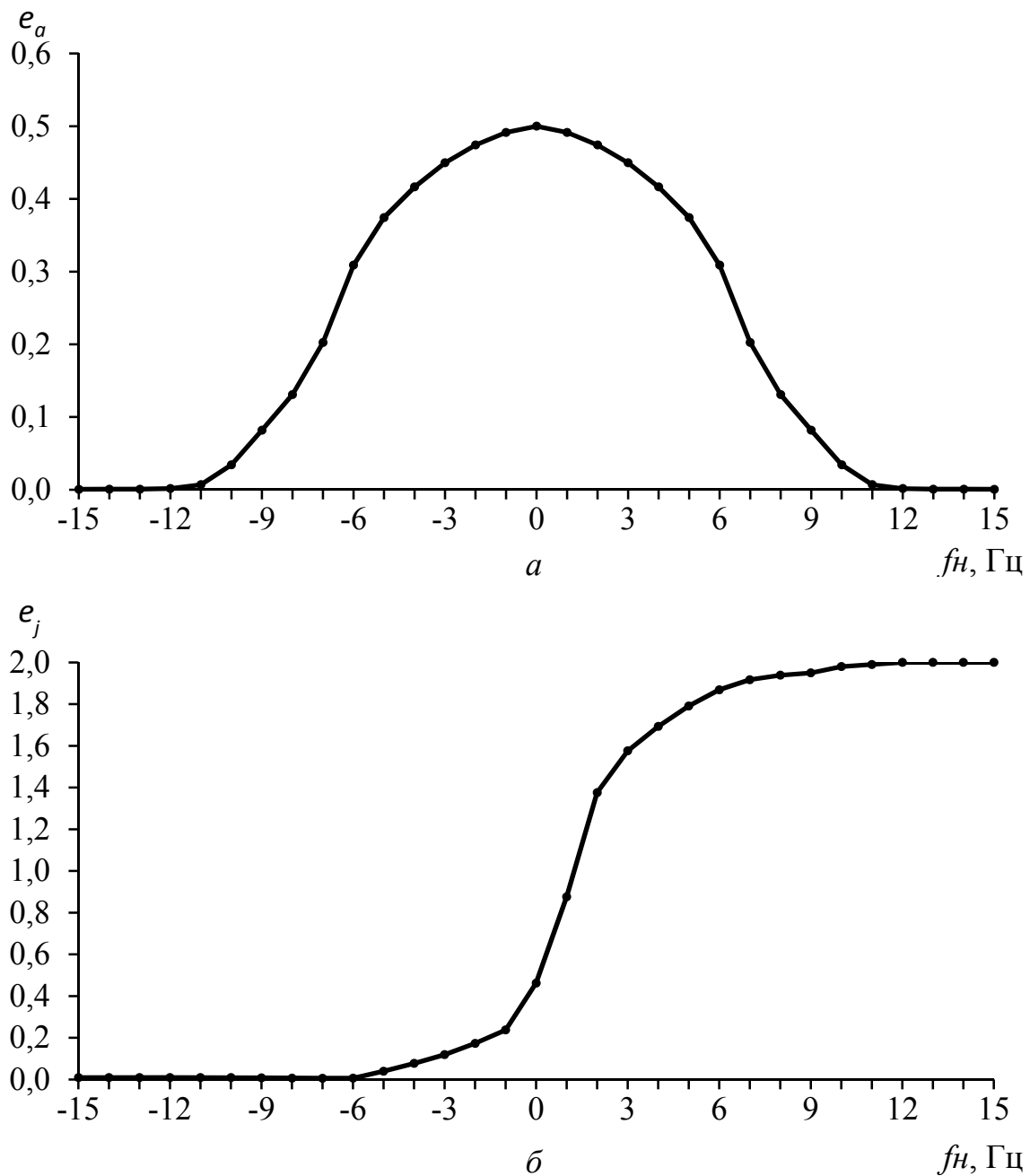
б

Рис. 2.18. Частотный спектр: а – спектр частот (полуширина спектра 4, основная частота 15), б – спектр частот (полуширина спектра 4, основная частота 5)

Проблемы определения амплитуды и фазы интенсивно обсуждаются, так как не существует единообразного подхода к построению математических моделей колебаний, волновых процессов, детекторов и систем. Кроме того, носители сигналов имеют разную физическую и биологическую природу.

Например, не является принципиальным положение начала координат относительно сигнала в пространстве, но во времени всегда существует начальный момент, до которого ничего не происходило. Однако АС дает отличную от нуля амплитуду еще до этого момента. Поэтому возникают сомнения в целесообразности такой модели, и требуется ее обоснование [28].





*Рис. 2.19. Оценки нормированной среднеквадратической ошибки восстановления амплитуды (а), фазы (б)*

Когда носитель сигнала является пространственно-временной функцией, существует проблема выбора переменной, по которой следует вводить аналитический сигнал, и о соответствии возможных одномерных аналитических сигналов друг другу [135].

Фаза характеризует некоторое расстояние от начала колебания. С точки зрения однозначности измерений, фаза должна быть монотон-

ной. Это свойство может быть априорным и следовать из схемы эксперимента. Монотонность фазы  $\varphi(\rho)$  в (2.1) вытекает из монотонности радиального роста дерева, что является его свойством. Именно монотонность вносит определенность в рассматриваемую проблему и позволяет предложить алгоритмы демодуляции годовых колец деревьев.

#### 2.4.1. Монотонность фазы как предпосылка для введения аналитического сигнала

Имея в виду, что сдвиг спектра Фурье вдоль оси частот эквивалентен добавлению линейной функции к фазе сигнала, свяжем выполнение условия причинности для спектра комплексной функции  $W(x)$  с наличием свойства монотонности у ее фазы.

Воспользуемся неравенством Бернштейна [140] в виде

$$\max \left| \frac{dW(x)}{dx} \right| \leq f_s \max |W(x)|, \quad (2.15)$$

где  $W(x) = a(x) \exp i\varphi(x)$  – функция, принадлежащая к классу ЦФЭТ,  $f_s$  – модуль верхней частоты в спектре этой функции.

Пусть амплитуда постоянна, тогда найдем

$$\max |\varphi'(x)| \leq f_s \quad (2.16)$$

По теореме о сдвиге спектра для функции  $\exp i[\varphi(x) + f_s x]$  выполняется условие причинности в частотной области, она является АС, а из неравенства Бернштейна следует, что фаза  $[\varphi(x) + f_s x]$  заведомо монотонна. Таким образом, для наличия свойства монотонности у фазы сигнала с постоянной амплитудой достаточно, чтобы спектр сигнала был причинным.

Выясним, что следует из предположения о наличии монотонности у фазы. Определим эффективную ширину спектра  $f_e$  в дисперсионном смысле, через нормированный момент второго порядка. Такой подход позволяет рассмотреть, в том числе функции, не имеющие финитного спектра.

Пусть  $W(x)$  ограниченная сверху и  $T$ -периодическая функция и ее производная ограничены сверху. Тогда для нее существует дискретный спектр Фурье  $S_k$  и его второй момент. Имея в виду равенство Парсеваля, найдем:

$$f_e^2 = \frac{\sum_{k=-\infty}^{\infty} k^2 |S_k|^2}{\sum_{k=-\infty}^{\infty} |S_k|^2} = \frac{\int_0^T |W'(x)|^2 dx}{\int_0^T |W(x)|^2 dx} = \frac{\int_0^T [a'^2 + a^2 \varphi'^2] dx}{\int_0^T a^2 dx} < A^2 + \max \varphi'^2(x), \quad (2.17)$$

где

$$A^2 = \frac{\int_0^T a'^2(x) dx}{\int_0^T a^2(x) dx}. \quad (2.18)$$

По аналогии с условием причинности введем условие дисперсионной причинности. Для его выполнения достаточно сдвинуть спектр более чем на свою эффективную ширину  $f_e$  в любую сторону, например, так

$$a(x) \exp i \left\{ \varphi(x) + x \sqrt{A^2 + \max \varphi'^2(x)} \right\}. \quad (2.19)$$

При достаточно большом сдвиге монотонность фазы и дисперсионная причинность спектра наблюдаются совместно, как это вытекает из неравенства

$$f_e < \sqrt{A^2 + \max \varphi'^2(x)} \geq \max |\varphi'(x)|. \quad (2.20)$$

Когда  $a = \text{const}$ , то  $A = 0$ , и из выражения (2.18) получим

$$\max |\varphi'(x)| > f_e. \quad (2.21)$$

Таким образом, чтобы выполнялось условие дисперсионной причинности для спектра сигнала с постоянной амплитудой, достаточно наличия свойства монотонности у фазы сигнала.

Из найденных взаимосвязей следует, что применение АС не гарантирует монотонность фазы. Для обеспечения этого требования необходимы специальные алгоритмы ее восстановления.

## 2.5. Преобразование «сжатие-растяжение»

Поскольку функция  $\varphi$  монотонна и строго возрастающая, то обратная ей функция  $\varphi^{-1}$  будет однозначна, и не будет иметь разрывов, что особенно важно для ее численной реализации. Введем преобразование «сжатие-растяжение» вдоль оси  $x$  следующим образом

$$\varphi(x) = f_c z, \quad x = \varphi^{-1}(f_c z). \quad (2.22)$$

Преобразование  $\mathbf{E}$  сжимает периоды колебания, которые больше некоторого среднего периода, и растягивает те из них, которые меньше, а обратное преобразование  $\mathbf{E}^{-1}$  возвращает колебание в исходное состояние. Пусть также  $\mathbf{H}$  есть оператор последовательного выполнения полосовой фильтрации на частоте  $f_c$  и преобразования Гильберта, тогда:

$$\begin{aligned} \mathbf{E} [1 + \mu(x)] \cos \varphi(x) &= \left\{ 1 + \mu[\varphi^{-1}(f_c z)] \right\} \cos \left\{ \varphi[\varphi^{-1}(f_c z)] \right\} = \\ &= \cos f_c z + \mu(z) \cos f_c z, \end{aligned} \quad (2.23)$$

$$\mathbf{H} \left[ \cos f_c z + \mu(z) \cos f_c z \right] = \sin f_c z, \quad (2.24)$$

$$\mathbf{E}^{-1} \sin f_c z = \sin \left\{ f_c \frac{\varphi(x)}{f_c} \right\} = \sin \varphi(x). \quad (2.25)$$

Как это следует из уравнений (2.23–2.25), преобразование «сжатие-растяжение» и полосовая фильтрация позволяют выделить из колебания с монотонной фазой гармоническое колебание с частотой  $f_c$ . Для него находится Гильберт-трансформанта, которая затем сжимается и растягивается в обратном порядке.

На рис. 2.20, б показан спектр реального, сигнала соответствующий радиальному сечению пихты сибирской (*Abies sibirica Ledeb*) (рис. 2.20, а), состоящему из десяти годовых слоев. Спектр исходного сигнала широкополосный, медленно убывающий, что делает проблематичным как введение АС, так и подавление шума. Видно, что преобразование  $\mathbf{E}$  (рис. 2.20, с) эффективно сжимает спектр радиального сечения и делает возможным применение узкополосного фильтра для выделения полезного сигнала из широкополосной смеси.

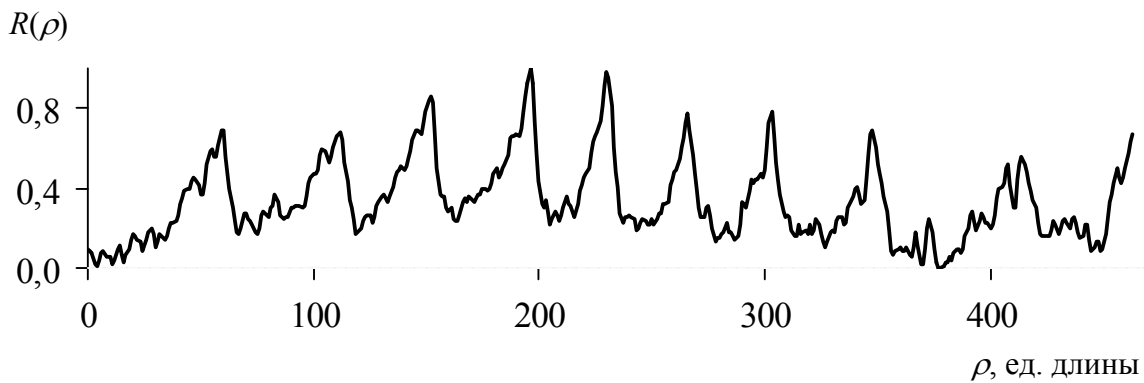
Возникает вопрос о реализации описанных операций. Действительно, для того, чтобы определить фазу  $\varphi(x)$ , зная только  $U(x)$ , эту фазу уже необходимо знать для осуществления преобразований (2.22, 2.25). Но здесь можно предположить, что величины

$$\varphi_0(x) = \operatorname{arctg} \left\{ \frac{\mathbf{H} U(x)}{U(x)} \right\} \quad (2.26)$$

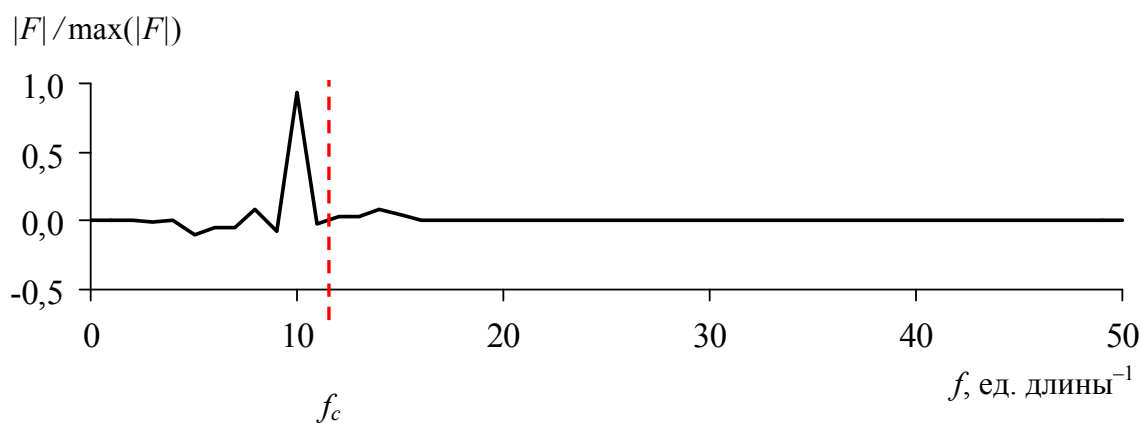
будет достаточно для осуществления начального сжатия спектра. Затем итерационный процесс осуществляется в соответствии с уравнением

$$\varphi_{n+1}(x) = \operatorname{arctg} \left\{ \frac{\mathbf{H} U \left[ \varphi_n^{-1} \left( f_c z \right) \right]}{U \left[ \varphi_n^{-1} \left( f_c z \right) \right]} \right\}_{z = \frac{\varphi_n(x)}{f_c}} \quad (2.27)$$

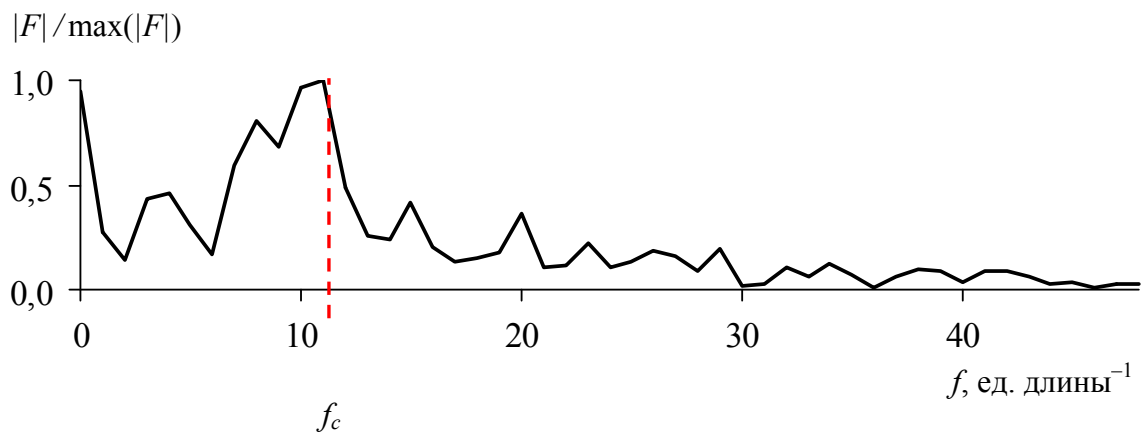
В результате многократного повторения предложенных операций (2.26), находят последовательность значений фазы. Эта последовательность будет сходиться к точному решению, если при неограниченном возрастании числа итераций будет существовать предел этой последовательности. Для определения сходимости проведен численный эксперимент, результаты которого приведены в главе 2.9.4. Итерационный процесс продолжался до тех пор, пока ошибка восстановления фазы была выше заданной погрешности ( $\varepsilon = 0,0001$ ). В результате эксперимента показано, что при СКО шума  $\sigma = 0,2$  необходимо от 5 до 9 итераций (рис. 2.35). Предложенный численный метод является сходящимся.



*a*



*б*



*в*

*Рис. 2.20. Сжатие спектра реального сигнала (функция  $R(\rho)$  представлена в относительных единицах)  
*a* – реальный сигнал, соответствующий десяти годичным слоям пихты сибирской (*Abies sibirica* Ledeb), *б* – спектр реального сигнала до сжатия спектра, *в* – спектр реального сигнала после сжатия спектра*

В результате выявленной необходимости проведения всех операций полный алгоритм вычисления функции роста  $\rho(\tau)$  выглядит так:

$$U(x) = \mathbf{PMCR}(\rho), \quad (2.28)$$

$$V(x) = \mathbf{CE}^{-1}\mathbf{H}\mathbf{CE}U(x), \quad (2.29)$$

$$\rho(\tau) = \tau^{-1} \left\{ \mathbf{C}^{-1} \left\{ \mathbf{C}^{-1} \left[ \frac{T}{2\pi} \operatorname{arctg} \frac{V(x)}{U(x)} \right] \right\} \right\} \quad (2.30)$$

Здесь символ  $\mathbf{M}$  обозначает медианный фильтр для подавления импульсного шума  $h(\rho)$  [141, 142], а символ  $\mathbf{P}$  полиномиальный фильтр для устранения низкочастотного фона  $l(\rho)$  [141, 143].

Заметим, что амплитуда  $a(\rho)$ , которая может рассматриваться как мультипликативный шум, подавляется при введении эффективного сигнала за счет деления в алгоритме (2.30).

## 2.6. Алгоритм обработки радиального сечения

Полный алгоритм вычисления годового роста дерева (рис. 2.21) состоит из пяти этапов, каждый из которых реализует отдельную операцию обработки исследуемого сигнала.

Подготовка образца – начальный этап, в ходе работы которого производится сканирование поперечного спила (диска) реального дерева. Полученное изображение представляет собой цифровой массив данных значения, которого определяют изменение уровня цветового изображения пикселей. Из полученного цифрового массива данных выбирается ряд, соответствующий радиусу на поперечном сечении ствола дерева от центра к периферии в одном из азимутальных направлений. Выбор участка исследования производится путем ограничения выбранного ряда справа и слева. Эта операция необходима для того, чтобы получить возможность исследовать годовые слои, расположенные в центральной части и таким образом убрать ненужную информацию о годовых слоях начального периода роста дерева и периода старения. Границей слева является начало первого пригодного для исследования годового слоя, границей справа конец последнего выбранного слоя. Результатом предварительной обработки исходного цифрового массива данных является дискретный цифровой сигнал, в котором наряду с полезной информацией содержатся шумы.

Алгоритм предварительной фильтрации исходного сигнала состоит из последовательного применения медианной и полиномиальной фильтрации, позволяющих удалить высокочастотную и низкочастотную составляющие шума.

Более глубокая фильтрации в частотной области сигнала связана с применением быстрого преобразования Фурье (БПФ), которое применяется при вычислении функции фазы.

При восстановлении функции роста используется новый алгоритм «сжатия-растяжения» исходного сигнала. Полученная функция роста позволяет исследовать изменение параметров роста дерева в вегетационный период.

Дальнейшая работа с полученными результатами ведется в направлении получения климатических параметров окружающей среды определяемых сезонными изменениями роста дерева.

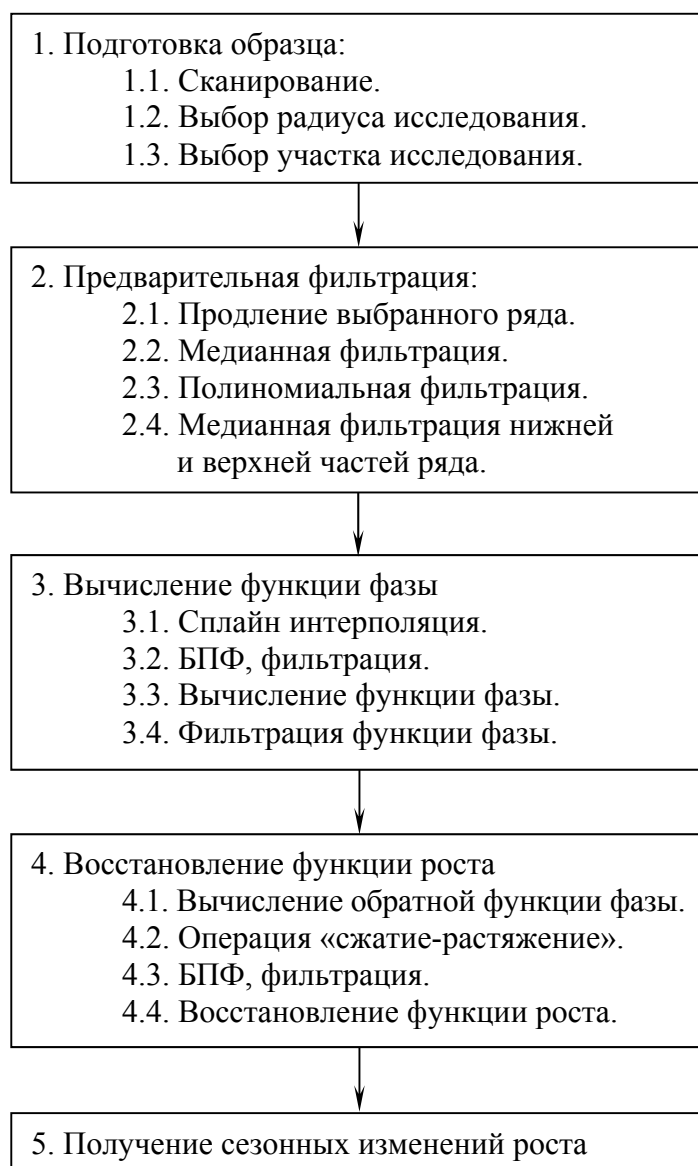


Рис. 2.21. Алгоритм вычисления годового роста дерева

## 2.7. Предварительная фильтрация шумов

Предварительная фильтрация, полученного, сигнала производится в четыре этапа. Перед применением фильтров исходный сигнал продляется для того, чтобы обеспечить правильную работу фильтров на его краях [144].

Шумы, входящие в исходный сигнал, имеют различные свойства, поэтому задача фильтрации решается последовательным применением частных алгоритмов.

Импульсный шум устраняется путем осуществления процедуры медианной фильтрации [141, 142, 145].

Как известно [146, 147], изолированные импульсы шума шириной  $k$  или меньше, независимо от их амплитуды и формы полностью убираются медианным фильтром длиной  $2 \cdot k + 1$  или больше.

Медианный фильтр длиной  $l_m = 2 \cdot k + 1$ , преобразует последовательность  $x(i)$ ,  $i = 1, 2 \dots N$  в последовательность  $y(i)$ ,  $i \in [k+1 \dots N-k]$ , где

$$y(i) = MF_k \{y(i-k), \dots, y(i-k), y(i+k)\} \quad (2.31)$$

Символ  $MF_k$  обозначает оператор нахождения медианы из набора  $2 \cdot k + 1$  элементов.

Другим свойством медианного фильтра является инвариантность монотонных последовательностей к его применению, а значит, не происходит потери информации о переходных зонах годичного слоя.

В результате медианной фильтрации происходит ограничение сигнала сверху и снизу отрезками, параллельными оси абсцисс.

По этой причине следует ожидать, [145], что ограничения сигнала сверху и снизу в совокупности на 10...15 % внесут в восстановленную фазу ошибку того же порядка.

В используемом алгоритме выстраивание элементов в возрастающую последовательность значений производится методом линейной сортировки, где на каждом этапе цикла просматривания элементов массива отбирается единственный элемент. Используя, данный метод для массива из  $n$  элементов потребуется  $n - 1$  циклов [148]. Исходя из того, что для правильной работы алгоритма медианной фильтрации достаточно произвести сортировку до центрального элемент отобранного массива, число циклов можно сократить до  $1 + [(n - 1)/2]$ . Применение метода линейной сортировки в данном алгоритме оправдано тем, что данный метод использует один массив данных для отобранной последовательности, чем экономит ресурсы памяти и с его применением удастся ускорить процесс вычислений, что нельзя сделать с применением метода основанного на сравнении элементов по парам.



На рис. 2.22, б представлен результат фильтрации сигнала медианным фильтром длиной  $l_m = 21$  при полной длине всего радиального сечения равной 1889 дискретным отсчетам. Принимая во внимание особенности медианного фильтра, исходный ряд был увеличен справа и слева на величину добавки большую, чем половина длины медианного фильтра таким образом, что в начало ряда был поставлен отрезок из конца ряда, а в конец отрезок из начала. Удлиненный таким образом ряд представляет собой продолжающееся колебание и обеспечивает полную фильтрацию исходного сигнала на краях.

Исходный сигнал, наряду с импульсным шумом, содержит низкочастотный шум, устранение которого осуществляется фильтрацией в полиномиальном базисе на основе метода наименьших квадратов [141, 143, 148].

В случае, когда функция задана последовательностью дискретных значений  $y_i = f(x_i)$ ,  $i = 1, 2 \dots N$  требуется найти многочлен (2.33) фиксированной степени  $m$ , для которого среднеквадратичное отклонение (СКО) минимально:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n+1} \cdot \sum_{i=0}^n (P_m(x_i) - y_i)^2} \rightarrow \min. \quad (2.32)$$

Общий вид многочлена:

$$P_m(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_m x^m. \quad (2.33)$$

Так как многочлен определяется своими коэффициентами, то фактически нужно подобрать набор коэффициентов  $a_0, a_1 \dots a_m$ , минимизирующих функцию:

$$\Phi(a_0, a_1, \dots, a_m) = \sum_{i=0}^n (P_m(x_i) - y_i)^2 = \sum_{i=0}^n \left( \sum_{j=0}^m (a_j x_i^j - y_i) \right)^2 \rightarrow \min \quad (2.34)$$

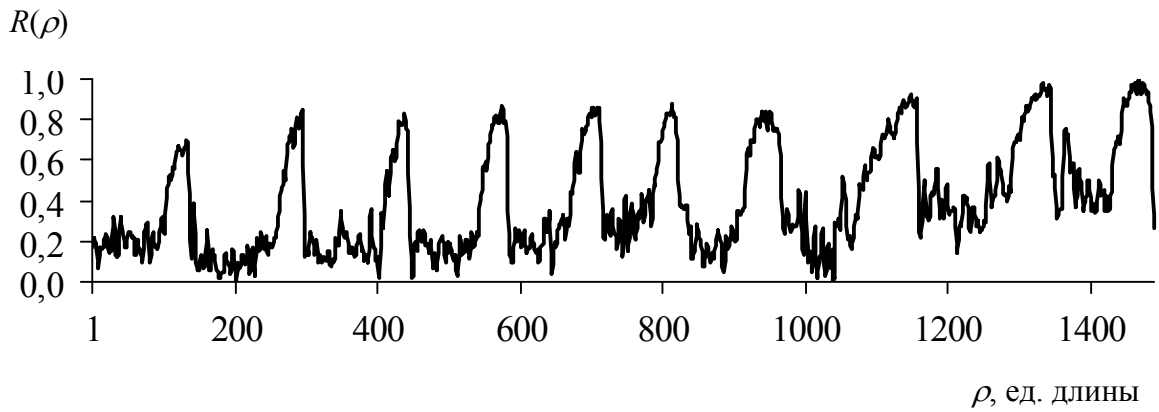
Используя необходимое условие экстремума

$$\frac{\partial \Phi}{\partial a_k} = 0, \quad k = 0, 1, \dots, m, \quad (2.35)$$

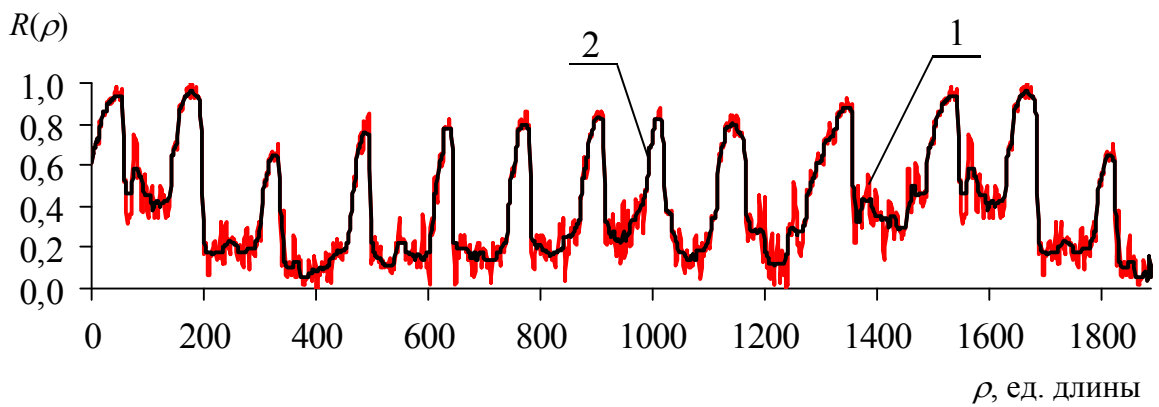
получаем, так называемую, нормальную систему уравнений метода наименьших квадратов:

$$\sum_{j=0}^m \left( \sum_{i=0}^n x_i^{j+k} \right) \cdot a_j = \sum_{i=0}^n y_i \cdot x_i^k, \quad k = 0, 1, \dots, m \quad (2.36)$$

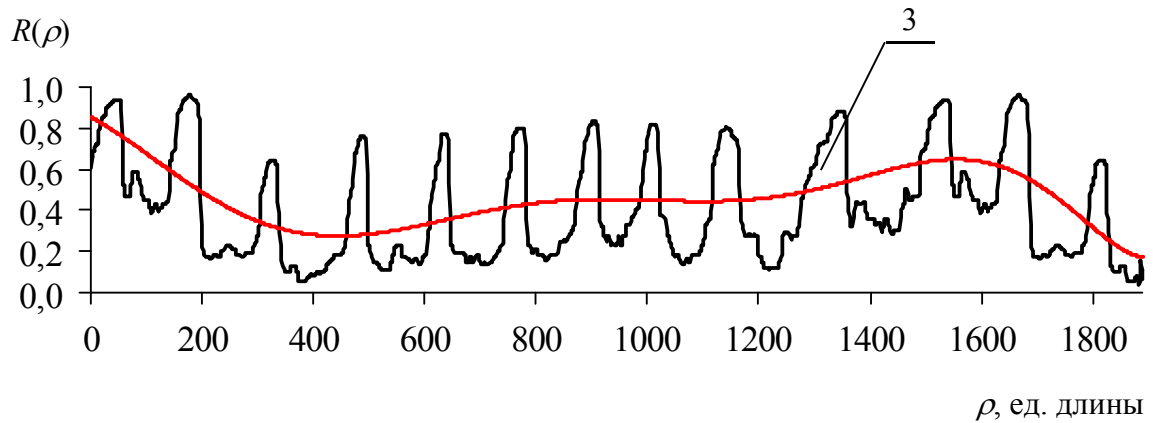
Полученная система – есть система алгебраических уравнений относительно неизвестных  $a_0, a_1 \dots a_m$ . Можно показать, что определитель этой системы отличен от нуля, то есть решение существует и единственно.



*a*



*б*



*в*

*Рис. 2.22. Фильтрация радиального сечения поперечного ствола дерева:  
 1 – исходный сигнал, 2 – отфильтрованный сигнал, 3 – тренд  
 а – радиальное сечение поперечного ствола лиственницы  $R(\rho)$  (в относительных единицах), б – медианная фильтрация всего радиального сечения,  
 в – полиномиальная фильтрация всего радиального сечения*

Однако при высоких степенях  $m$  система может быть плохо обусловленной. Если эта степень заранее неизвестна, то возникает проблема выбора оптимальной степени аппроксимирующего многочлена в условиях, когда исходные данные содержат случайные ошибки. Для решения этой задачи можно принять следующий алгоритм: для каждого  $m = 0, 1, 2, \dots$  вычисляется величина:

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{1}{n+m} \cdot \sum_{i=0}^n (P_m(x_i) - y_i)^2}. \quad (2.37)$$

За оптимальное значение степени многочлена следует принять то значение  $m$ , начиная с которого величина  $\sigma_m$  стабилизируется или начинает возрастать [143].

Решение нормальной системы находят методом Гаусса. Применение этого метода позволяет экономить ресурс оперативной памяти ЭВМ благодаря тому, что производится обработка одного цифрового массива данных, в котором часть элементов нули.

Нормальная система уравнений метода наименьших квадратов для многочлена второй степени, имеет вид:

$$\begin{cases} (n+1) \cdot a_0 + \left( \sum_{i=0}^n x_i \right) \cdot a_1 + \left( \sum_{i=0}^n x_i^2 \right) \cdot a_2 = \sum_{i=0}^n y_i \\ \left( \sum_{i=0}^n x_i \right) \cdot a_0 + \left( \sum_{i=0}^n x_i^2 \right) \cdot a_1 + \left( \sum_{i=0}^n x_i^3 \right) \cdot a_2 = \sum_{i=0}^n y_i \cdot x_i \\ \left( \sum_{i=0}^n x_i^2 \right) \cdot a_0 + \left( \sum_{i=0}^n x_i^3 \right) \cdot a_1 + \left( \sum_{i=0}^n x_i^4 \right) \cdot a_2 = \sum_{i=0}^n y_i \cdot x_i^2 \end{cases} \quad (2.38)$$

Для увеличения скорости вычисления коэффициентов вместо сумм в алгоритм закладываются формулы их прямого вычисления.

Для выбранного ряда, построен полином четвертой степени (рис. 2.22, в), после вычитания, которого исходный ряд становится знакопеременным (рис. 2.23, а).

В целях улучшения результата медианная фильтрация проводится повторно для положительной и отрицательной частей сигнала (рис. 2.23, б, в). Это обусловлено тем, что проведенной медианной фильтрации всего ряда недостаточно для удаления шумов более широкой отрицательной части.

Разделение сигнала на части производится по нулевой границе. Ширина полосы фильтрации для положительной части, выбирается меньшей, чем для отрицательной части. Для сигнала, представленного на рис. 2.23, применены фильтры со значениями ширины полосы равными:  $l_m = 11$  и  $l_m = 63$ .

В результате фильтрации получен сигнал из которого выделена низкочастотная составляющая и импульсный шум при сохраненной информации о переходных зонах и незначительном изменении амплитуды.

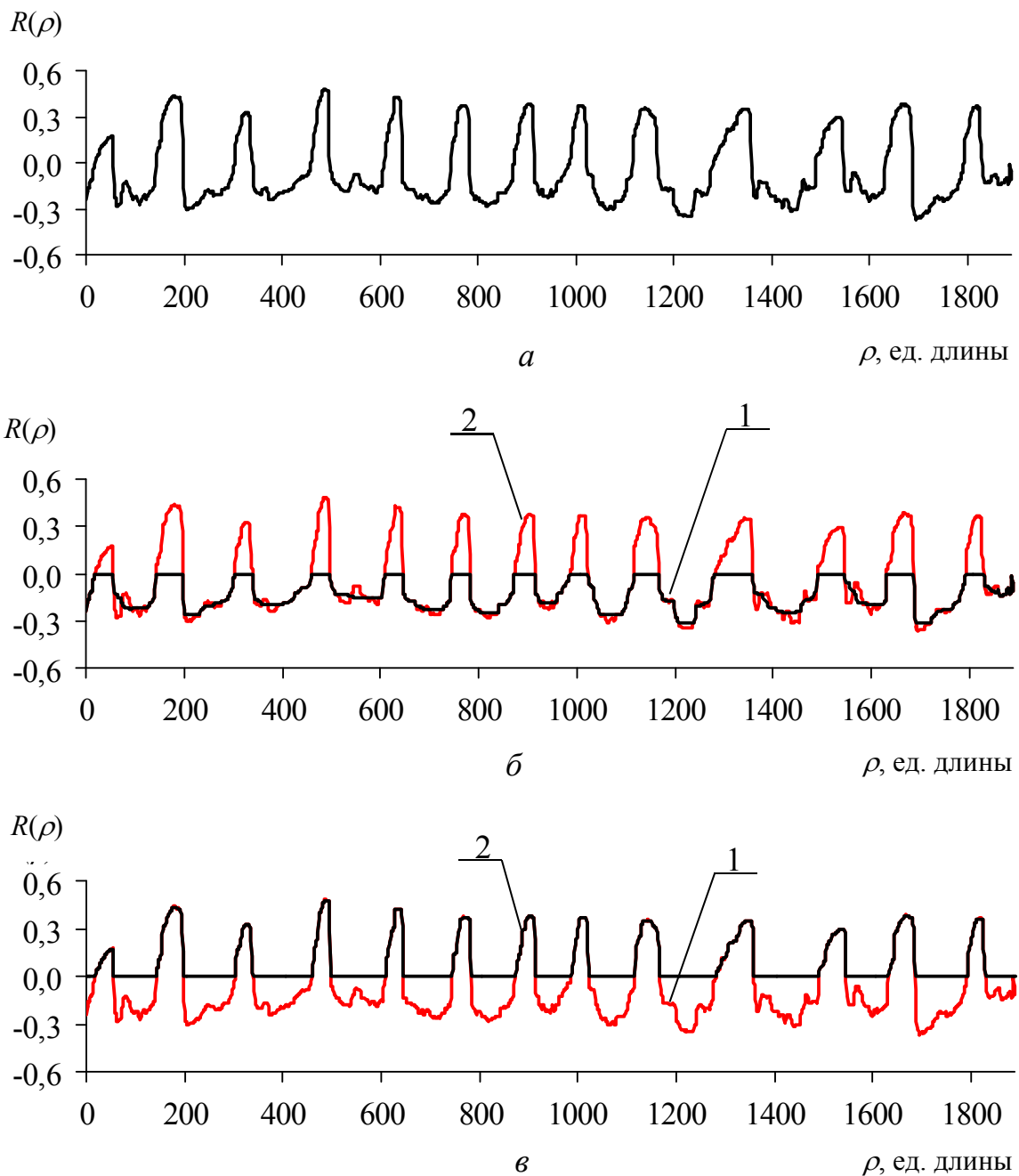


Рис. 2.23. Устранение локального импульсного шума реального сигнала:  
 1 – исходный сигнал, 2 – отфильтрованный сигнал а – функция плотности древесины,  $R(\rho)$  (в относительных единицах), б – медианная фильтрация нижней половины сигнала, в – медианная фильтрация верхней половины сигнала

## 2.8. Вычисление функции фазы

Для осуществления операции вычисления фазы переходят от действительного сигнала как аналитическому сигналу (АС). Вещественная часть АС, совпадает с исходным сигналом, мнимая часть является сопряженным сигналом, который получается из исходного с помощью преобразования Гильберта.

Основным этапом в данном алгоритме является применение преобразования Фурье [149-155].

Для функции  $f(x)$  абсолютно интегрируемой на отрезке  $[-\pi, \pi]$ , можно поставить в соответствие тригонометрический ряд Фурье:

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cdot \cos(2\pi kft) + b_k \cdot \sin(2\pi kft)) \quad (2.39)$$

Коэффициенты тригонометрического ряда Фурье вычисляются по формулам Эйлера-Фурье:

$$\begin{aligned} a_k &= \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\pi}^{\pi} x(t) \cdot \cos(2\pi kft) dt, \\ b_k &= \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\pi}^{\pi} x(t) \cdot \sin(2\pi kft) dt, \\ a_0 &= \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\pi}^{\pi} x(t) dt = \mu_f, \end{aligned} \quad (2.40)$$

где  $\mu_f$  – среднее значение процесса  $x(t)$ ;  $f$  – частота;  $k = 1, 2, \dots$

Для дискретного сигнала, заданного на конечном интервале времени применяется дискретное преобразование Фурье. Формула прямого преобразования Фурье имеет вид:

$$X(f) = \sum_{t=0}^{N-1} x(t) \cdot e^{-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t / N}. \quad (2.41)$$

Преобразование Фурье (2.37) ставит в соответствие сигналу, заданному во времени, его спектральную функцию. При этом осуществляется переход из временной области в частотную.

Обратное дискретное преобразование Фурье, осуществляющее переход от дискретного спектра к временным отсчетам сигнала выражается формулой:

$$x(t) = \frac{1}{N} \sum_{f=0}^{N-1} X(f) \cdot e^{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t / N}. \quad (2.42)$$

Для вычисления одного коэффициента дискретного преобразования Фурье по формуле (2.36) необходимо выполнить  $N$  комплексных умно-

жений и сложений. Таким образом, расчет всего ДПФ, содержащего  $N$  коэффициентов, потребует  $N^2$  пар операций «умножение-сложение».

Эффективный метод предназначенный для быстрого вычисления дискретного ряда Фурье, является быстрое преобразование Фурье (БПФ). Для вычисления БПФ используется практический алгоритмом быстрого вычисления ДПФ Кули (Cooley) и Тьюки (Tukey) [156].

Для осуществления БПФ – производится деление  $N$ -точечного ДПФ на два и более ДПФ меньшей длины, каждый из которых можно вычислить отдельно, а затем линейно просуммировать с остальными для того, чтобы получить ДПФ исходной  $N$ -точечной последовательности.

Каждое из двух ДПФ половинной размерности требует  $N^2/4$  операций. Кроме того, при вычислении окончательных результатов каждый спектральный коэффициент с нечетными номерами умножается на экспоненциальный комплексный множитель, что добавляет еще  $N/2$  операций. В итоге получается  $N(N+1)/2$  операций, что меньше почти в два раза, чем при вычислении ДПФ прямым способом. Следуя путем деления на большее число ДПФ, объем вычислений можно уменьшать и далее. Наибольшая степень ускорения вычислений может быть достигнута при  $N = 2^n$ , в этом случае деление последовательностей на две части можно продолжать до тех пор, пока не получатся двухэлементные последовательности. Число требуемых при этом пар операций «умножение-сложение» можно оценить как  $N \cdot \log_2 N$  [156, 157].

При  $N = 2^{12} = 2048$  число для прямого вычисления ДПФ составит величину равную 4 194 304, тогда как при использовании БПФ 22 528.

Для того, чтобы произвести быстрое преобразование Фурье число отсчетов исходного сигнала равное 1 489 необходимо привести к количеству  $N = 2^n$ . Задание числа отсчетов осуществляется путем интерполяция исходного ряда сплайном.

Сплайном степени  $m$  называется функция  $S_m(x)$ , обладающая свойствами:

- 1) функция  $S_m(x)$  непрерывна на отрезке  $[a, b]$  вместе со своими производными до некоторого порядка  $p$ .
- 2) на каждом частичном отрезке  $[x_{i-1}, x_i]$  функция совпадает с некоторым алгебраическим многочленом  $P_{m,i}(x)$  степени  $m$ .

Разность  $m - p$  между степенью сплайна и наивысшим порядком непрерывной на отрезке  $[a, b]$  производной называют дефектом сплайна.

Кубический сплайн  $S_3(x)$  для функции заданной таблицей трех значений состоит из двух полиномов третьей степени:

$$S_3(x) = \begin{cases} P_{1,1}(x) = a_1 + b_1 \cdot x + c_1 \cdot x^2 + d_1 \cdot x^3, & x \in [x_0, x_1] \\ P_{1,2}(x) = a_2 + b_2 \cdot x + c_2 \cdot x^2 + d_2 \cdot x^3, & x \in [x_1, x_2] \end{cases} \quad (2.43)$$

Функция  $S_3(x)$  должна удовлетворять условиям:

$S_3(x_i) = y_i, \quad i = 0, 1, 2$  – условие интерполяции;

$P'_{1,1}(x_1) = P'_{1,2}(x_1), \quad P''_{1,1}(x_1) = P''_{1,2}(x_1)$  – условие непрерывности первых и вторых производных в узлах интерполяции.

Таким образом, получили шесть условий для нахождения восьми неизвестных. Недостающие два соотношения получаются из условий закрепления концов сплайна. В частности, при свободном закреплении концов можно приравнять нулю кривизну линии в этих точках.

Такая функция, называемая свободным кубическим сплайном, обладает свойством минимальной кривизны, т. е. она самая гладкая среди всех интерполяционных функций данного класса [148].

Из условий нулевой кривизны на концах следуют равенства нулю вторых производных в этих точках:

$S'_3(x_0) = 0, \quad S'_3(x_2) = 0$  – дополнительные граничные условия.

После вычисления коэффициентов системы уравнений  $a_1, b_1, c_1, d_1, a_2, b_2, c_2, d_2$ , строят интерполированный ряд (рис. 2.24, а).

Спектральный анализ с использованием быстрого преобразования Фурье основан на переносе сведений о функции, заданной  $2^n$  отсчетами во временной области  $R(t)$ , в частотную область  $R(f)$ . На рис. 2.24, б, в представлен модуль спектральной функции (амплитудный спектр) полученный для функции плотности (рис. 2.24, а).

Наиболее распространенный тип фильтрации – частотная фильтрация, для реализации которой применяются весовые функции (окна), используя которые уменьшают растекание спектра.

Частотный спектр исследуемой функции фильтруется окном с экспоненциальным профилем (рис. 2.25, в). Дополнительно в частотном спектре действительной части (рис. 2.25, б) исследуемого сигнала отсекается часть высоких и низких частот путем задания в алгоритме дополнительных ограничений.

В результате произведенной фильтрации исходный сигнал в значительной мере избавлен от высокочастотных и низкочастотных шумовых помех, маскирующих полезный сигнал.

Для преобразованного сигнала вычисление фазы производится по формуле (2.14). Учитывая то, что полученная дискретная фаза (рис. 2.26, б) может не достигать максимального или минимального значения на концах периода, связанного с возникновением неточностей при округлении значений фазы, для установления значений на краях периода применяется отдельная операция, которая определяет границу периода и добавляет к значению фазы недостающую часть

Восстановление функции фазы производится при помощи операции сшивания, в ходе которой непрерывные отрезки фазы сшиваются, основываясь на невозможности скачков фазы при правильном выборе числа отсче-

тов для сигнала. Для этого отрезки главных значений фазы последовательно смещаются на  $2^n$  по непрерывности. Результатом этих действий является непрерывная и монотонно возрастающая функция фазы (рис. 2.26, в).

Прежде чем перейти к процедуре восстановления функции роста, функцию фазы подвергают медианной фильтрации, предварительно удлив ее на краях на величину добавки большую половины длины медианного фильтра.

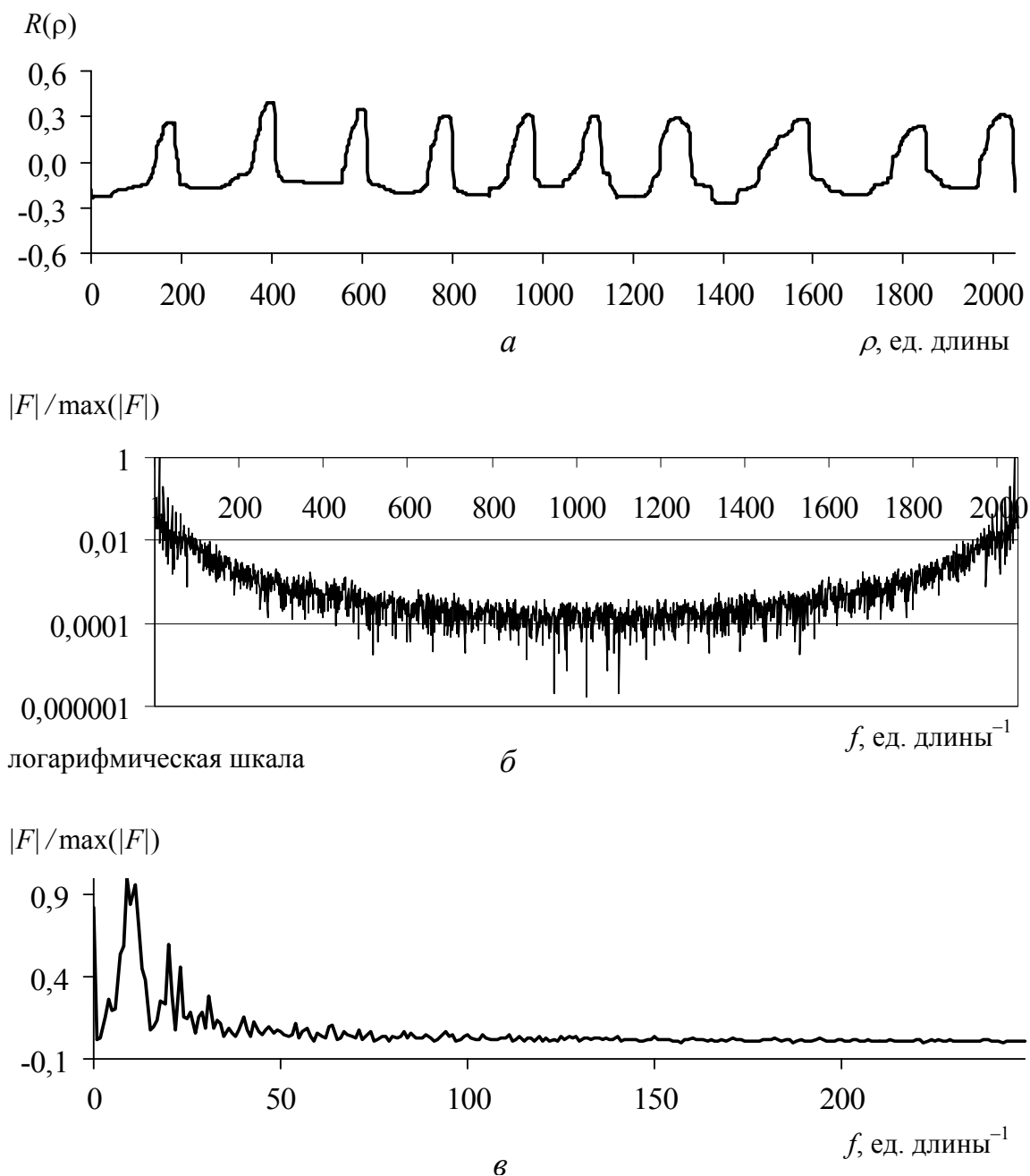
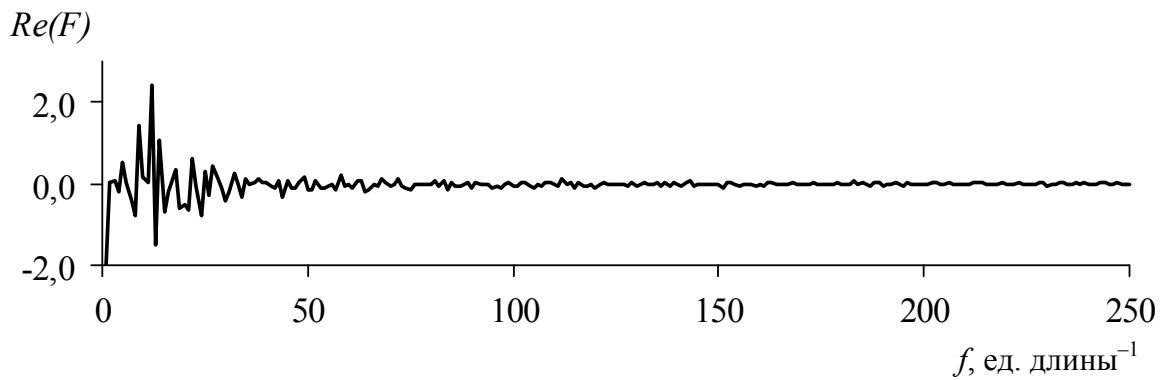
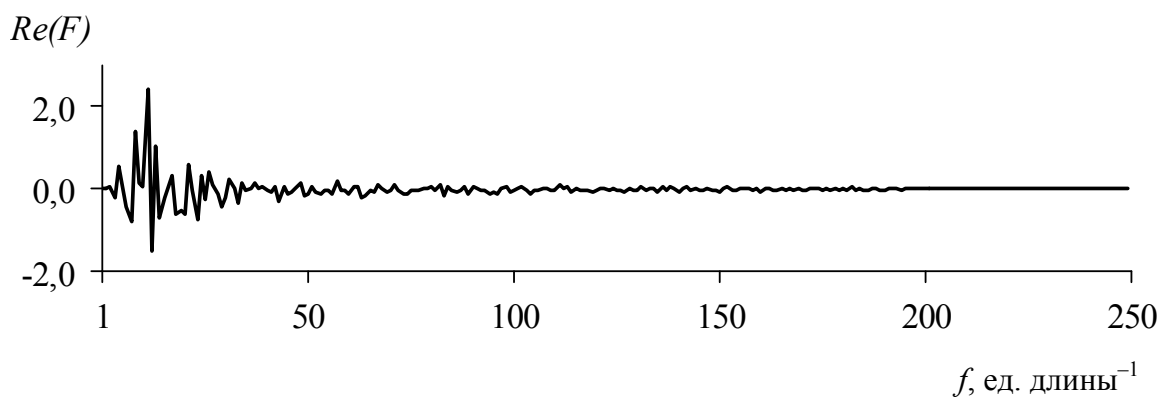


Рис. 2.24. Частотный спектр сигнала ( $R(\rho)$  в относительных единицах)  
 а – интерполированный сигнал, б – модуль спектральной функции,  
 в – часть модуля спектра

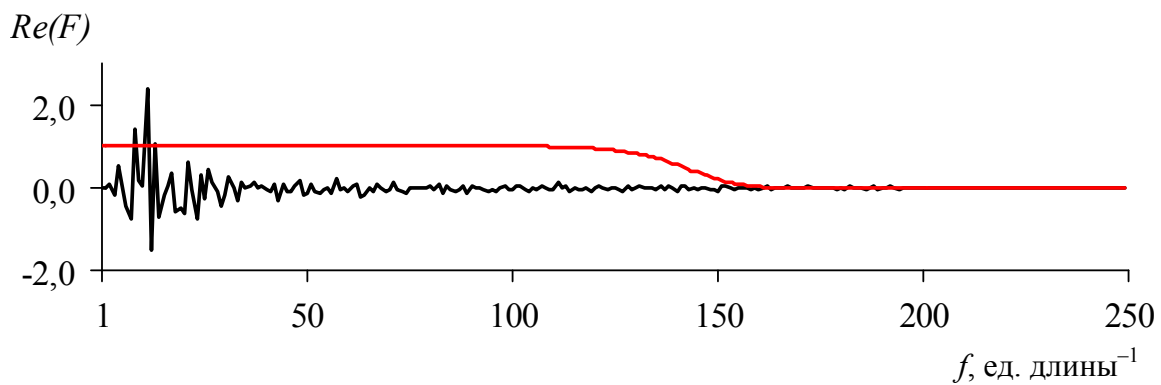




*a*

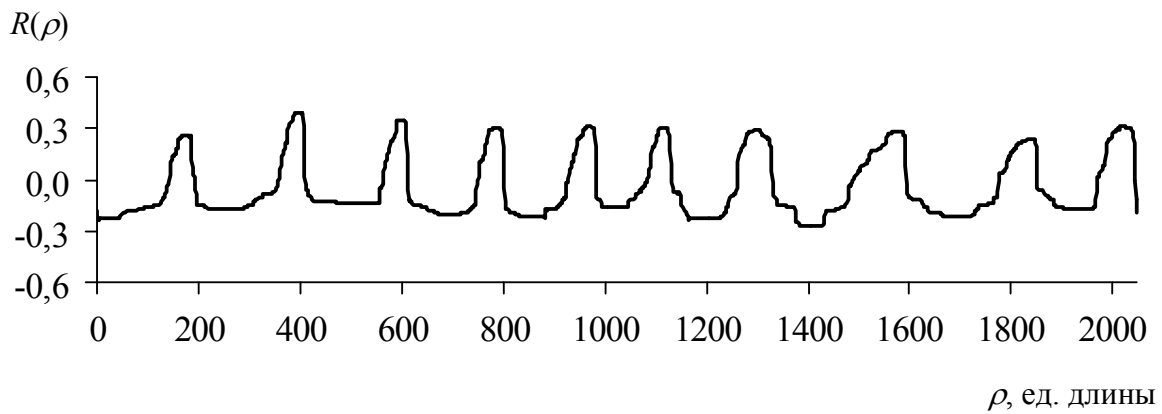


*б*

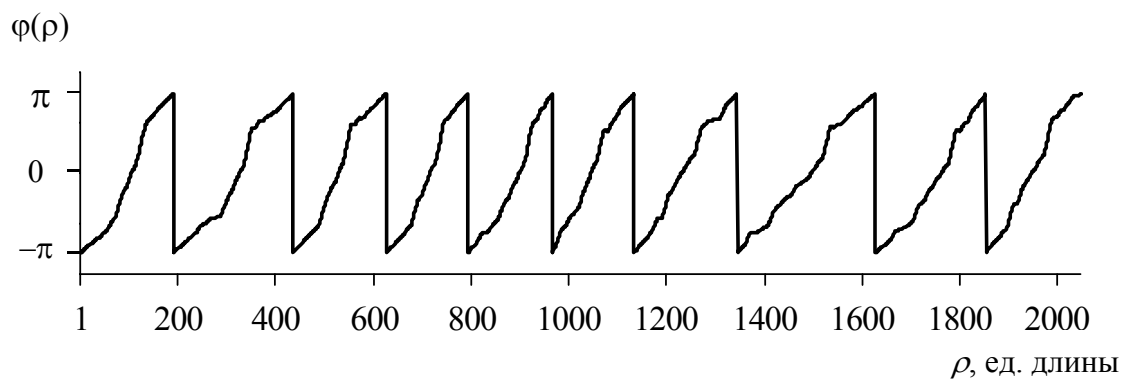


*в*

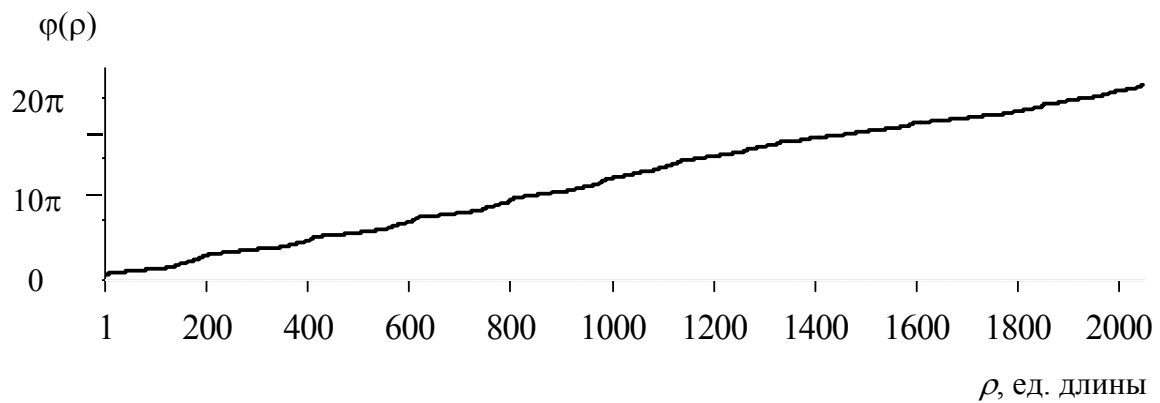
*Рис. 2.25. Частотный анализ и фильтрация частот: а – действительная часть частотного спектра, б – отсечение низких и высоких частот, в – фильтрация в экспоненциальном профиле*



*a*



*б*



*в*

*Рис. 2.26. Восстановление функции фазы ( $R(\rho)$  в относительных единицах):  
*a* – сигнал после БПФ, *б* – ступенчатая фаза, *в* – шитая функция фазы*

## 2.9. Восстановление функции роста

Для восстановления функции роста необходимо связать изменения функции фазы со временем.

Фазу сигнала  $\varphi(\rho)$  обычно выражают в угловой мере и считая, что в интервале между двумя соседними точками перемены знака она изменяется непрерывно на величину, равную,  $\pi$  принимая значения  $0, 2\pi, 3\pi, \dots$ . Фаза сигнала  $\varphi(\rho)$  есть огибающая этих отсчетных значений. Значит, функция  $\varphi(\rho)$  позволяет судить о законе следования по времени точек, в которых колебание изменяет знак [158].

Таким образом, проводя сопоставление изменения функции фазы во времени, переходим к функции временного роста. Имея подобную зависимость можно изучать непрерывные изменения параметров радиального сечения дерева, что важно для получения дополнительной информацию о интенсивности протекания процессов сезонного формирования древесины наряду с информацией об общем ежегодном приросте дерева.

Функция роста в данном случае представляет собой обратную функции от функции фазы.

### 2.9.1. Вычисление обратной функции фазы

Для того, чтобы функция фазы  $\varphi(\rho)$ , определенная на некотором промежутке, имела обратную функцию, нужно, чтобы она была непрерывной и монотонной на этом промежутке. Тогда обратная функция фазы  $\varphi^{-1}(\rho)$  тоже будет монотонной и непрерывной на множестве значений функции  $\varphi(\rho)$  [159].

Обратная функция фазы должна быть построена с учетом свойств взаимно обратимых функций. Если функция  $\varphi^{-1}(\rho)$  является обратной для функции  $\varphi(\rho)$ , то и функция  $\varphi(\rho)$  будет обратной для функции  $\varphi^{-1}(\rho)$ . Область определения функции  $\varphi(\rho)$  является областью изменения ее обратной функции  $\varphi^{-1}(\rho)$ , а область изменения  $\varphi^{-1}(\rho)$  являлась областью определения  $\varphi(\rho)$ . Графики взаимно обратных функций симметричны относительно биссектрисы первого и третьего координатных углов координатной плоскости  $Oxy$ .

Сложность вычисления функции обратной от функции фазы заключается в расчете значений из области изменения обратной функции соответствующих значениям из области определения исходной функции. Для выполнения данного преобразования в операции вычисления обратной функции (рис. 2.27) используется интерполяции исходной функции сплайном.

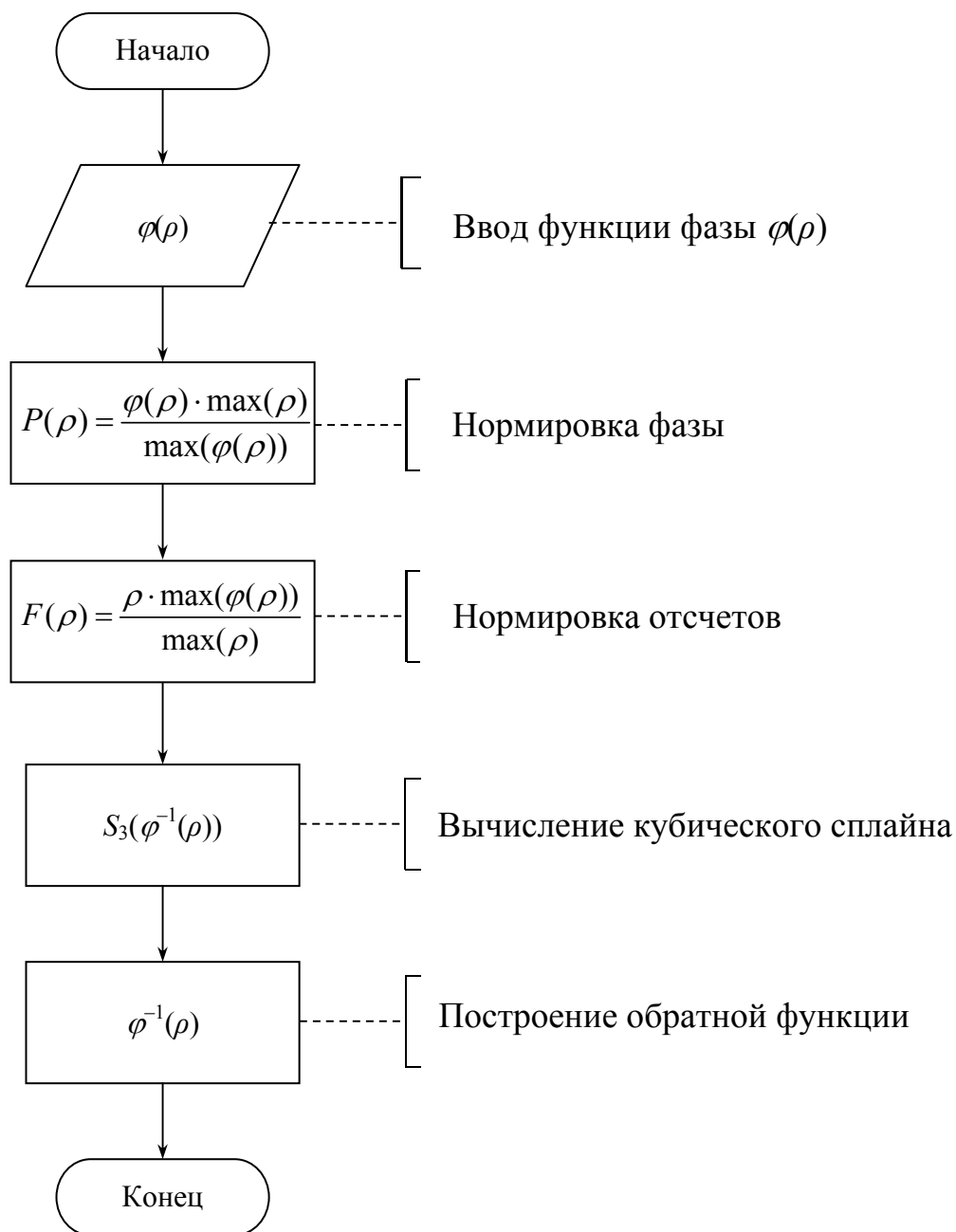


Рис. 2.27. Алгоритм вычисления обратной функции

Переход от функции фазы к обратной функции производится путем замены значений функции фазы значениями отсчетов. При помощи функции сплайна рассчитываются значения обратной функции соответствующие отсчетам исходной функции фазы.

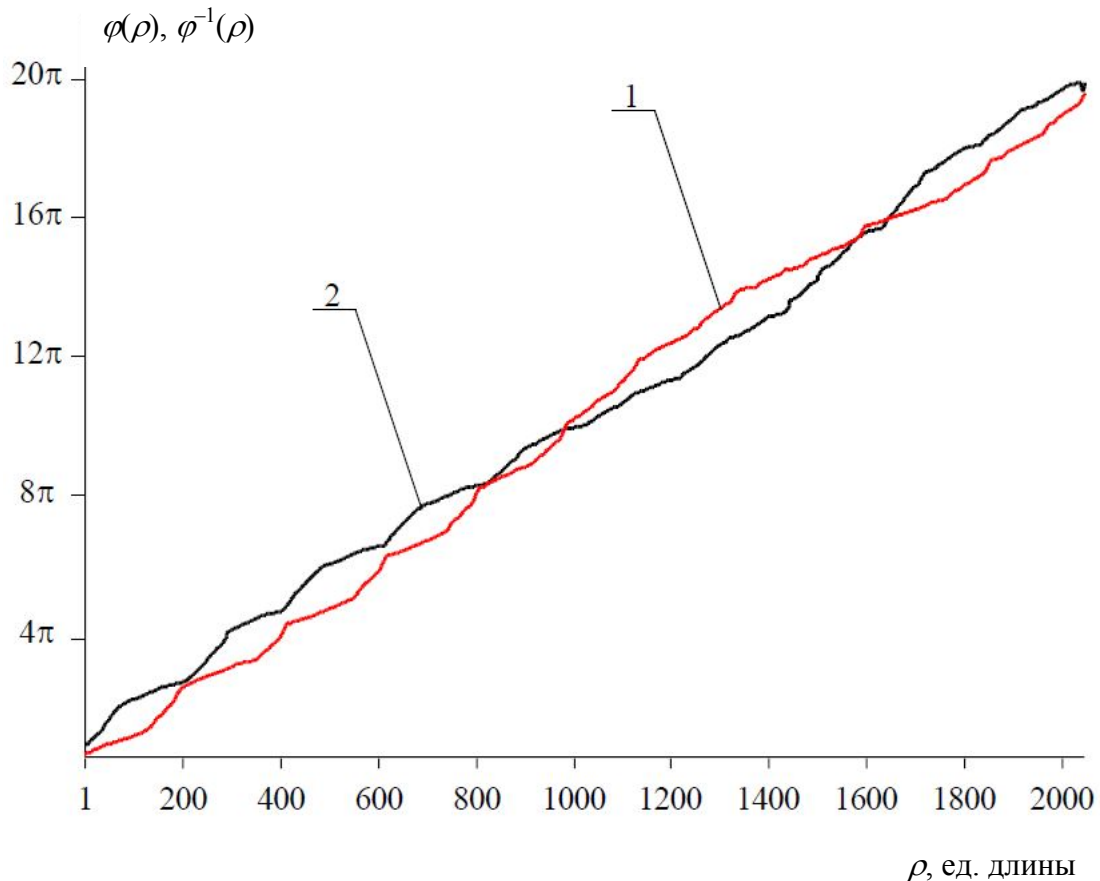


Рис. 2.28. Функция фазы и обратная ей функция:  
 1 – функция фазы  $\varphi(\rho)$ , 2 – обратная функция  $\varphi^{-1}(\rho)$

На рис. 2.28 показаны взаимно обратимые функции, полученные в результате операции восстановления обратной функции фазы. Обратная функция и функция фазы симметричны относительно биссектрисы первого координатного угла координатной плоскости  $Oxy$ .

### 2.9.2. Операция «сжатие-растяжение»

Вычисленная обратная фаза используется в алгоритме «сжатие-растяжение» (рис. 2.29), где при помощи сплайн интерполяции рассчитываются значения функции плотности радиального сечения в нормированных значениях фазы.

В результате данной операции периоды колебания, которые больше некоторого среднего периода сжимаются, а те, которые меньше, растягиваются (рис. 2.30, а).

Преобразование «сжатие-растяжение» сжимает спектр радиального сечения. Применяя преобразование «сжатие-растяжение» совместно с

полосовой фильтрацией можно выделить из колебания с монотонной фазой гармоническое колебание с определенной частотой.

Частотный спектр действительной части сигнала после преобразования «сжатие-растяжение» подвергается фильтрации спектральным окном гауссового типа (рис. 2.30, б).

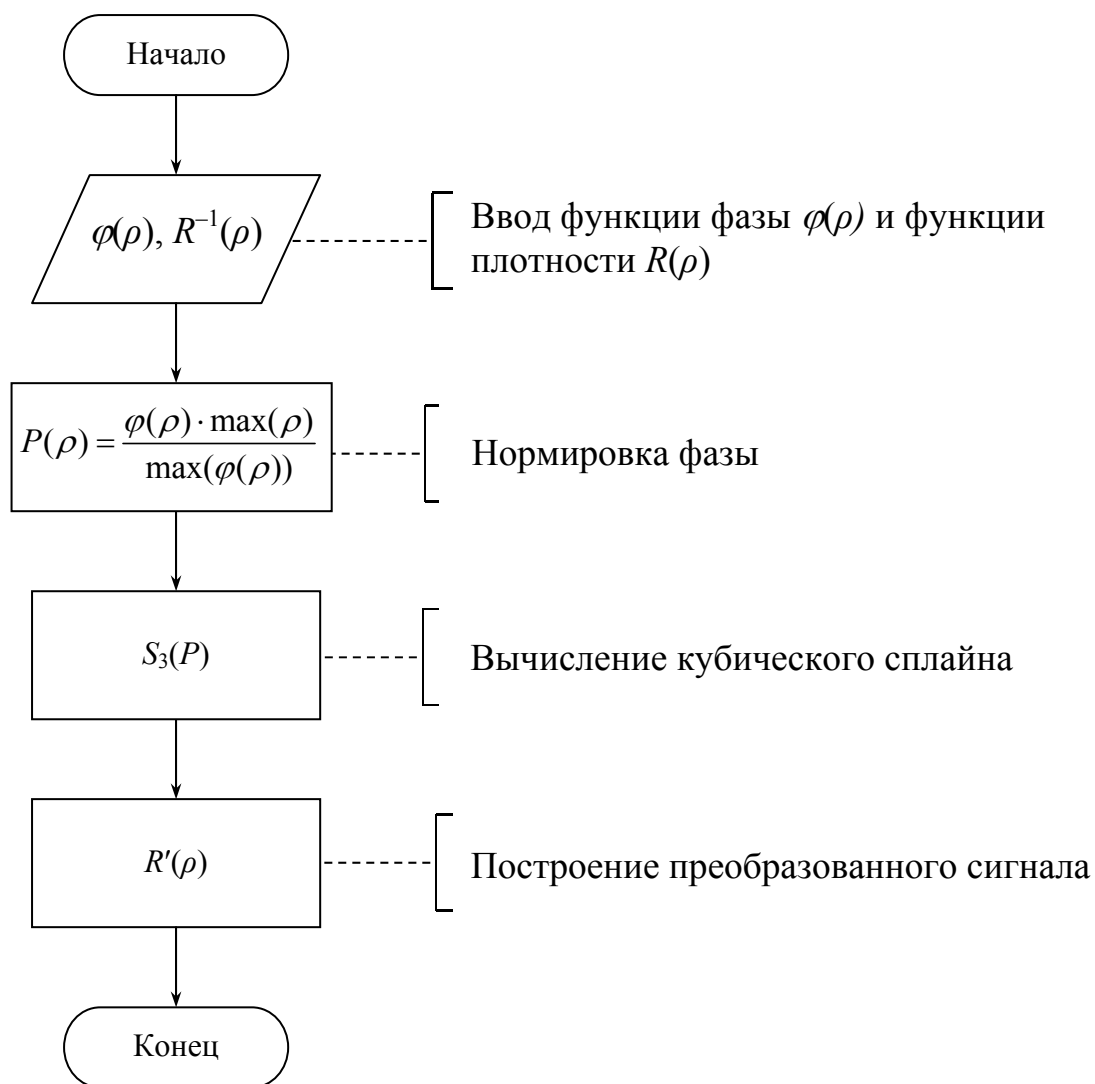
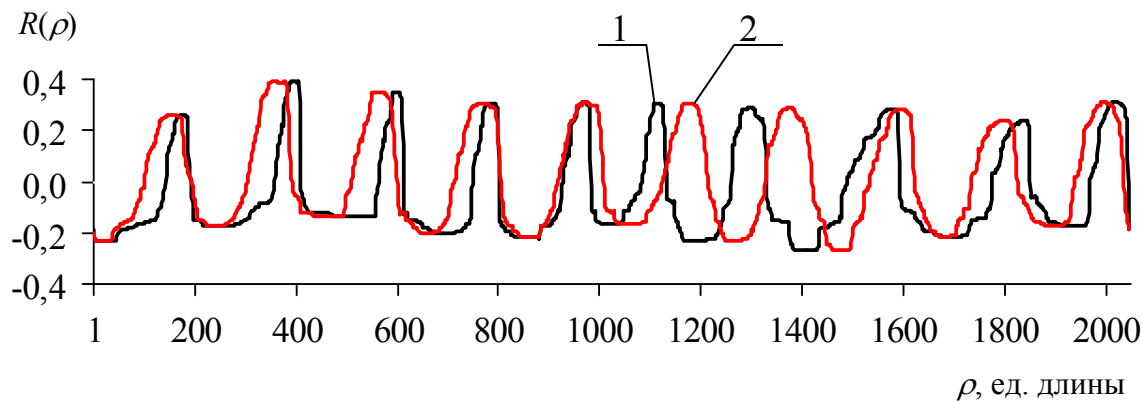
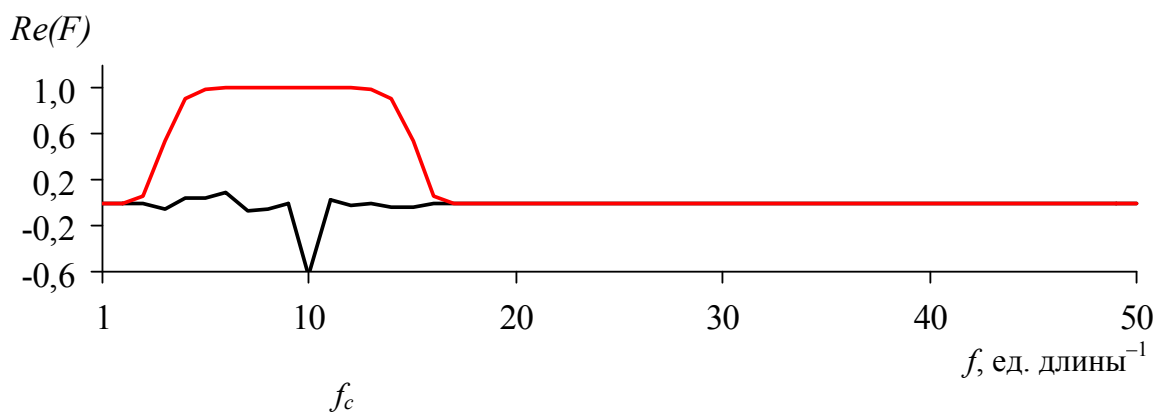


Рис. 2.29. Алгоритм операции «сжатие-растяжение»



*a*



*б*

*Рис. 2.30. Сжатие-растяжение сигнала и полосовая фильтрация  
 1 – исходный сигнал, 2 – преобразованный сигнал  
 а – сжатие-растяжение исходного сигнала,  $R(\rho)$  (в относительных единицах),  
 б – фильтрация со спектральным окном гауссового типа*

Отфильтрованный сигнал после обратного преобразования Фурье имеет вид гармонического колебания с основной частотой равной  $f_c = 10$  (рис. 2.31, *a*).

Обратное преобразование «сжатие-растяжение» возвращает колебание в исходное состояние путем наложения информации о фазе колебания на преобразованный сигнал (рис. 2.31, *б*).

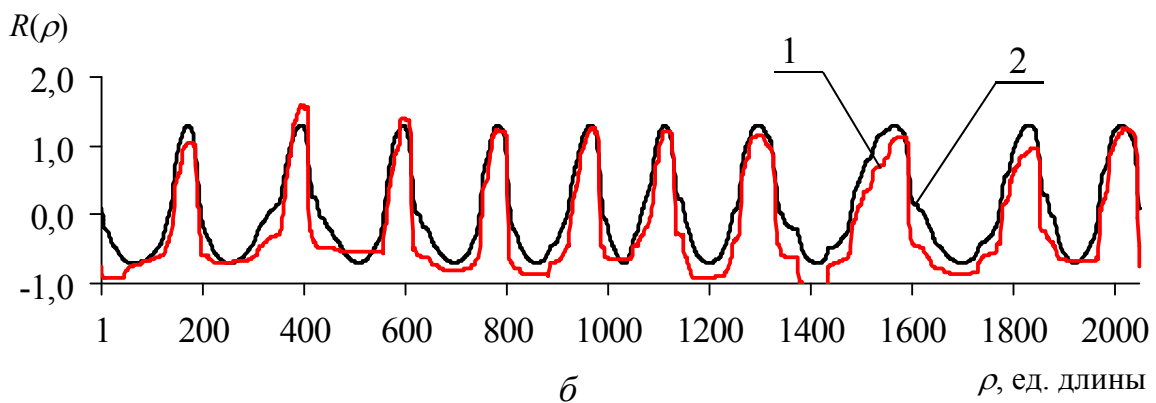
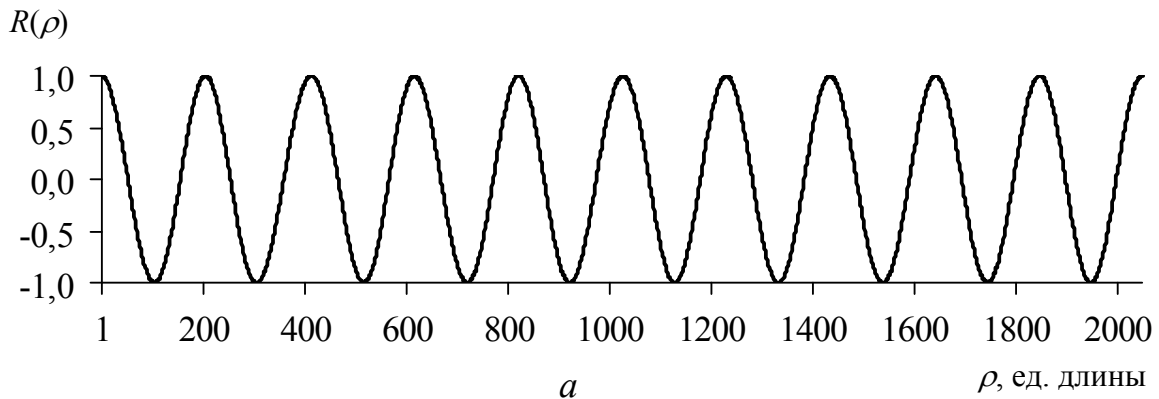


Рис. 2.31. Восстановление исходного сигнала  $R(\rho)$  (в относительных единицах): 1 – исходный сигнал, 2 – преобразованный сигнал; а – выделенное гармоническое колебание, б – восстановленный исходный сигнала

### 2.9.3. Численное исследование качества оценок фазы

Цель численного эксперимента – получение результатов работы операции «сжатие-растяжение» при разных уровнях и видах вносимого в исходный сигнал шума, а также при исходных сигналах с разной шириной спектра частот.

Порядок проведения численного эксперимента состоял из следующих операций:

1. Формирование исходного сигнала и сигнала с шумом.

Исходный сигнал задавался в соответствии с математической моделью (2.2). В качестве фазы в модельном сигнале использовалась функция следующего вида:

$$\varphi_e(x) = \frac{(x-1) \cdot 2 \cdot \pi \cdot T_n}{N} + a \cdot \sin \left[ \frac{(x-1)^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot T_n}{N^2} \right] + b \cdot \sin \left[ \frac{(x-1) \cdot 2 \cdot \pi}{N} \right], \quad (2.44)$$

где  $\varphi_e$  – исходная фаза;  $N$  – количество отсчетов  $x$ ;  $a$ ,  $b$  – постоянные коэффициенты;  $T_n$  – количество периодов колебания,  $T_n = 10$ .



Сигнал с шумом формировался как исходный сигнал, содержащий аддитивную или мультипликативную составляющую шума. Шум задавался в частотной области. За центр интервала полосы частот принималась основная частота исходного сигнала. Для генерации шума применялся датчик случайных чисел программы «Mathcad», который создавал вектор из заранее заданного количества случайных чисел имеющих равномерное распределение. Сформированный сигнал, являющийся шумом, вводился в исходный сигнал аддитивно или мультипликативно. Уровень шума определялся как отношение СКО шума к СКО исходного сигнала.

2. Восстановление фазы из сигнала с шумом после проведения операции «сжатие-растяжение» и вычисление оценки нормированной среднеквадратической ошибки восстановления фазы.

Вычисление фазы осуществлялось в соответствии формулой (2.14). Восстановление функции фазы производилось путем последовательного сшивания элементов дискретной фазы.

Оценка нормированной среднеквадратической ошибки восстановления фазы вычислялась по формуле:

$$\varepsilon_{\varphi} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta\varphi_i - \bar{\Delta\varphi})^2}{\sum_{i=1}^N (\varphi_i^e - \bar{\varphi}^e)^2}} \quad (2.45)$$

где  $\Delta\varphi$  – разность между исходной и восстановленной фазами,  $\bar{\Delta\varphi}$  – среднеарифметическое значение разности фаз,  $\varphi^e$  – разность между исходной фазой и прямой, проведенной через начальное и конечное значение исходной фазы,  $\bar{\varphi}^e$  – среднеарифметическое значение разности между исходной фазой и прямой,  $N$  – количество отсчетов.

В ходе эксперимента варьируемыми параметрами являлись уровень шума, интервал частот наложения шума, исходная информация о функции фазы вводимая в операцию «сжатия-растяжения».

Выборочный ансамбль состоял для всех экспериментов из 100 разных реализаций сигналов для каждого уровня шума.

Отдельные контрольные эксперименты с большим объемом выборки равной 225 реализациям сигнала показали, что среднее и дисперсия не меняются. Это было расценено как наличие статистической устойчивости.

При данном объеме выборки в силу центральной предельной теоремы среднее арифметическое  $\langle \varepsilon_{\varphi} \rangle$  будет распределено по закону, близкому к нормальному. При проведении статистического эксперимента представляют интерес случаи с малым  $\sigma_{\varepsilon_{\varphi}}$ , что означает устойчивость алгоритма оце-

нивания фазы к входным параметрам, вследствие этого среднее арифметическое как оценка  $\varepsilon_\varphi$  будет близко к оценке максимального правдоподобия.

#### 2.9.4. Результаты численного эксперимента

Результаты численного эксперимента разделены на несколько групп в зависимости от изменяемых параметров и вида исследования.

Исследование влияния уровня шума на оценку нормированной среднеквадратической ошибки восстановления фазы проводилось отдельно для мультипликативного и аддитивного шума.

Восстановление функции фазы из полученного сигнала с шумом осуществлялось после применения операции «сжатие-растяжение» и входящей в эту операцию полосовой фильтрации частот. Ширина полосового фильтра задавалась постоянной для всех численных экспериментов.

Шум накладывался в диапазоне спектра частот от нуля до удвоенного значения основной частоты исходного сигнала  $f_o=10$ . В качестве информации для осуществления растяжения и сжатия сигнала использовалась исходная фаза. Оценка нормированной среднеквадратической ошибки восстановления фазы рассчитывалась при изменении отношения шума к сигналу от 0,1, до 0,7.

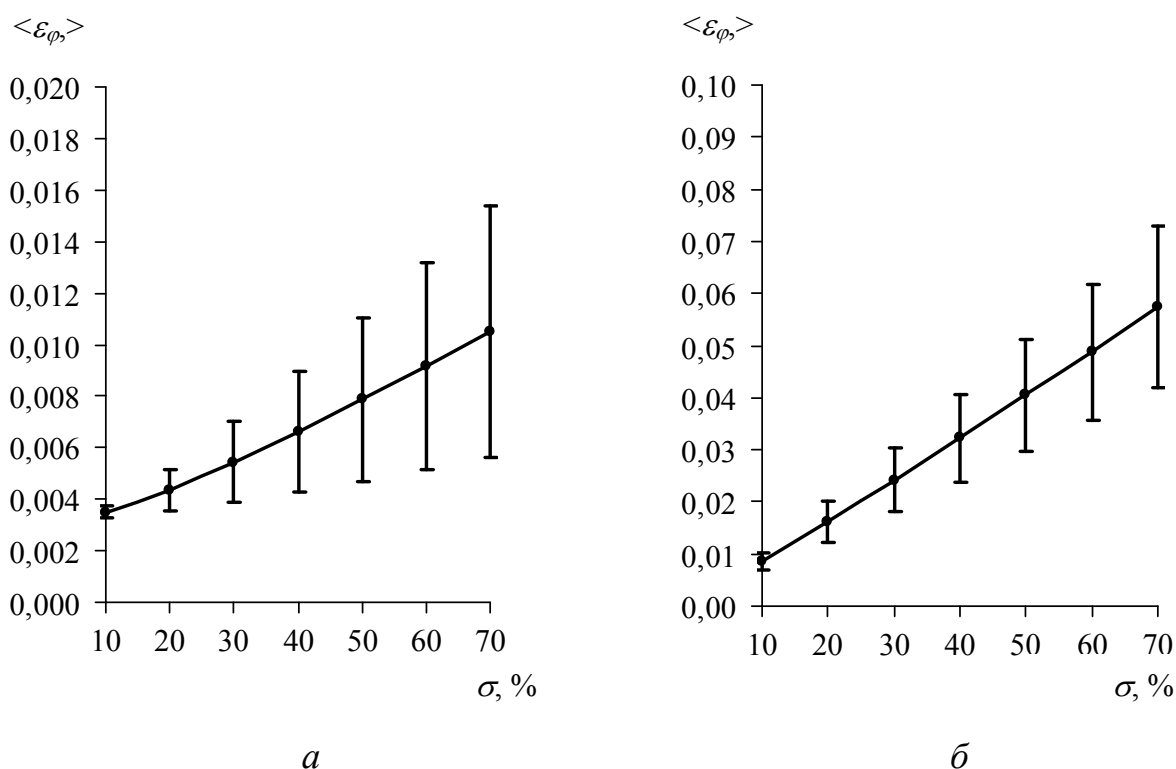


Рис. 2.32. Оценки нормированной среднеквадратической ошибки восстановления фазы после операции «сжатие-растяжение» с исходной фазой: а – оценка при мультипликативном шуме, б – оценка при аддитивном шуме

Из полученных данных, представленных на рис. 2.32, а, б видно, что с увеличением уровня шума растет среднее значение нормированной среднеквадратической ошибки восстановления фазы и увеличивается ее среднеквадратическое отклонение. Сравнение оценок нормированной среднеквадратической ошибки восстановления фазы при мультипликативном и аддитивном шуме позволяет сделать вывод о том, что наибольшую ошибку в восстановление фазы вносит аддитивный шум. Полученные оценки определяют потенциальную точность операции «сжатие-растяжение».

При проведении анализа реальных сигналов исходная фаза может быть неизвестной, поэтому для осуществления операции «сжатие-растяжение» применяют функцию фазы, восстановленную из реального сигнала. По результатам проведенного эксперимента, с использованием в качестве исходной информации для осуществления операции «сжатие-растяжение» восстановленной фазы, представленных на рис. 2.33, б для мультипликативного шума и на рис. 2.34, б для аддитивного, можно сделать вывод о том, что исходная информация о фазе оказывает существенное влияние на ошибку ее восстановления (ошибка выше в 3–5 раз).

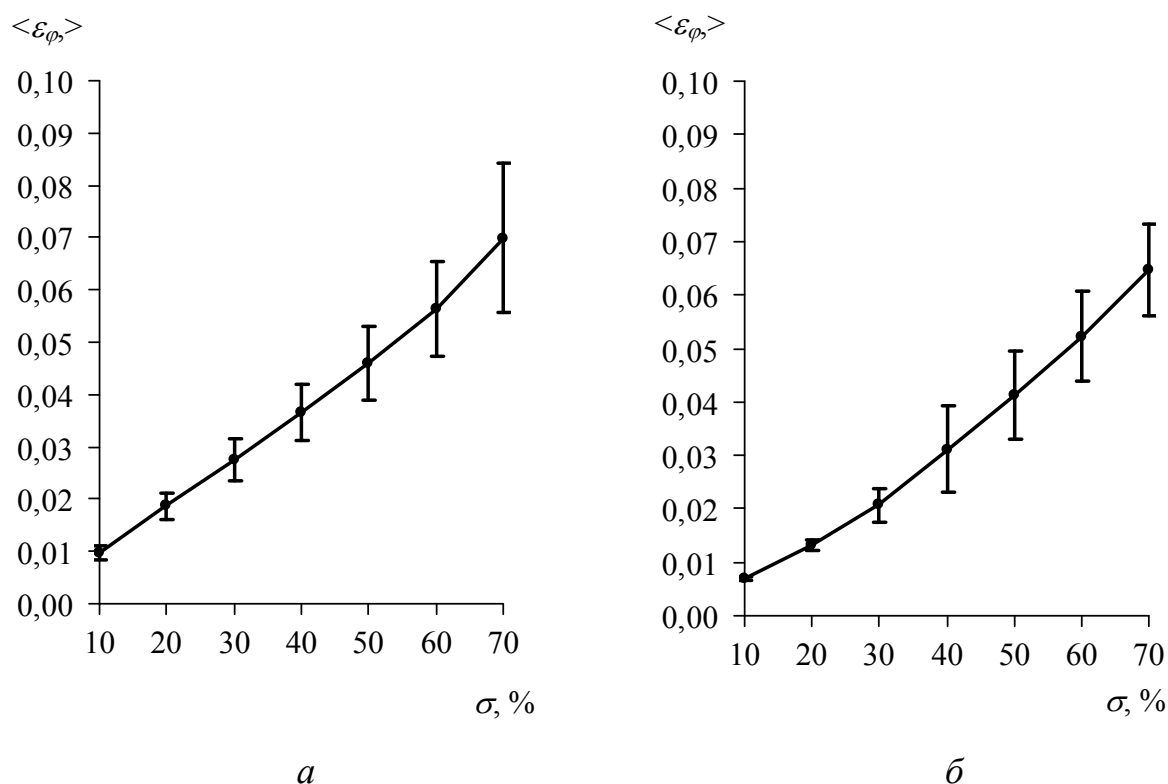


Рис. 2.33. Оценки нормированной среднеквадратической ошибки восстановления фазы при мультипликативном шуме: а – после полосовой фильтрации, б – после операции «сжатие-растяжение» с восстановленной фазой

Проведено сравнение, полученных оценок нормированной среднеквадратической ошибки восстановления фазы после применения операции «сжатие-растяжение», включающей полосовую фильтрацию (рис. 2.33, б; рис. 2.34, б) и полосовой фильтрации спектра аналогичных сигналов без применения «сжатия-растяжения» (рис. 2.33, а; рис. 2.34, а). Данные результаты показывают, что оценка нормированной среднеквадратической ошибки восстановления фазы после применения операции «сжатие-растяжение» с исходной фазой в несколько раз ниже (для мультипликативного шума в 3–7 раз, для аддитивного шума в 2–3 раза) по сравнению с результатами полосовой фильтрации без применения «сжатия-растяжения». В результате замены исходной фазы на восстановленную в операции «сжатие-растяжение», ее эффективность по отношению к полосовой фильтрации без применения «сжатия-растяжения» снизилась (ошибка стала ниже для мультипликативного шума в 1,5 раза; для аддитивного шума в 1,3 раза).

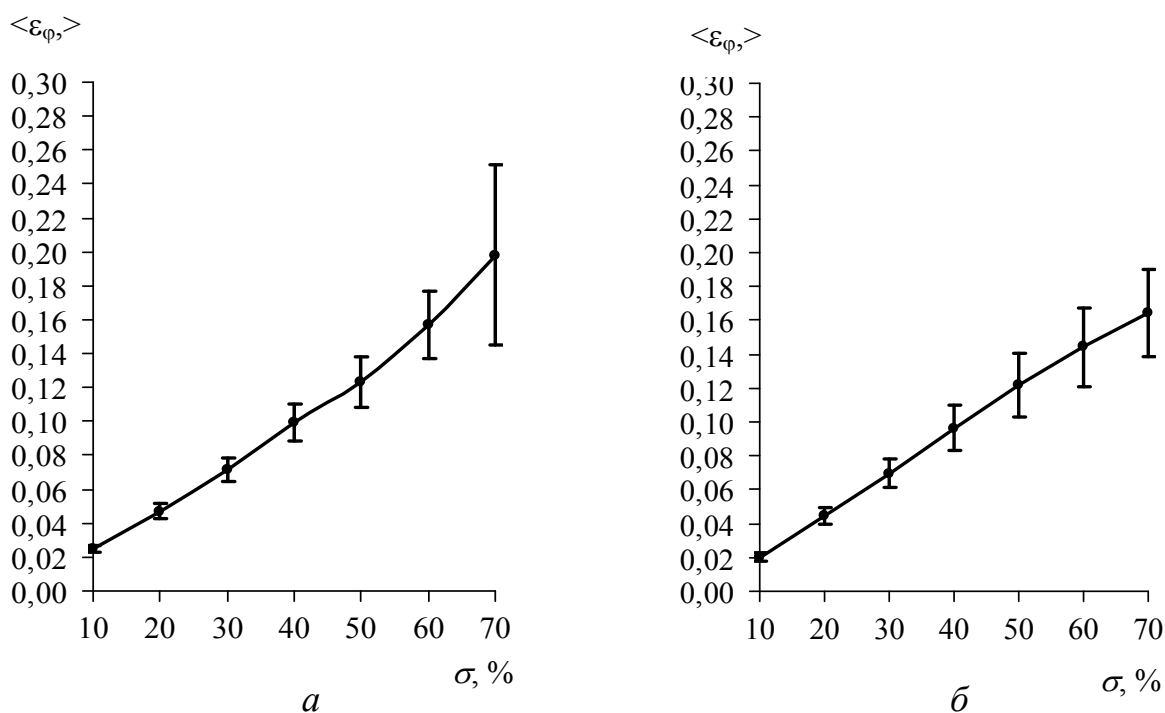


Рис. 2.34. Оценки нормированной среднеквадратической ошибки восстановления фазы при аддитивном шуме: а – после полосовой фильтрации, б – после операции «сжатие-растяжение» с восстановленной фазой

Общий вывод для данного исследования состоит в том, что операция «сжатие-растяжение» наиболее эффективна при наличии информации о исходной фазе.

Приблизиться к потенциальной точности данной операции можно путем многократного ее повторения. Для определения необходимого количества итераций для заранее заданной допустимой погрешности

( $\varepsilon = 0,0001$ ) был проведен эксперимент при изменяющемся уровне аддитивного шума. Результаты эксперимента представлены на рис. 2.35. Видно, что при СКО шума  $\sigma = 0,2$  необходимо от 5 до 9 итераций.

Наиболее интересным исследованием является определение влияния ширины частотного спектра шума на работоспособность операции «сжатие-растяжение». Данное исследование проводилось при постоянном уровне шума ( $\sigma = 0,4$ ).

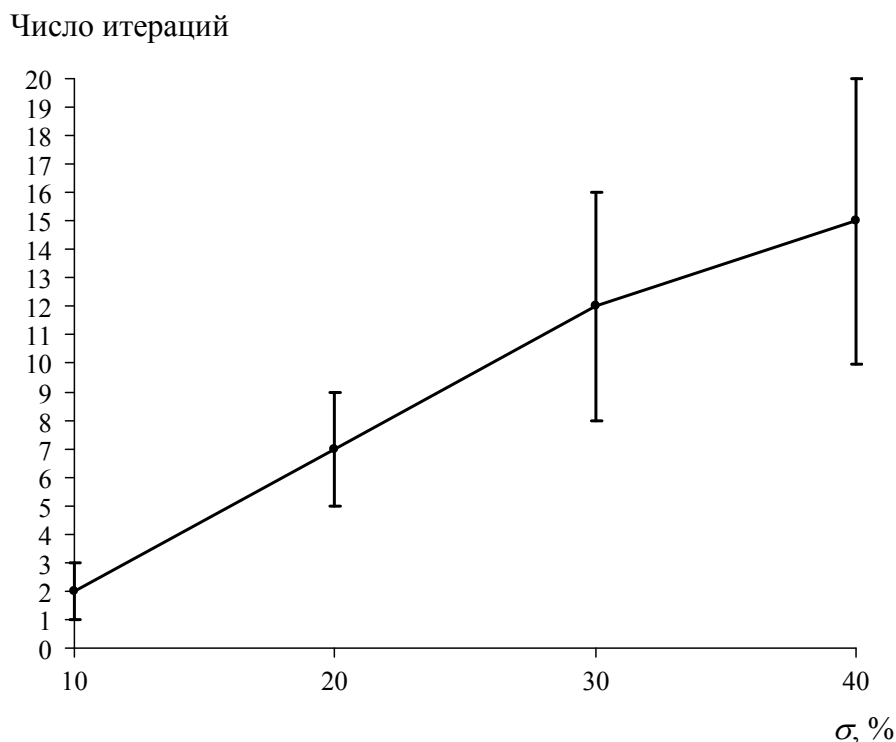


Рис. 2.35. Необходимое количество итераций при аддитивном шуме

Интервал частот наложения шума, варьировался от 0 до 80 Гц при основной частоте исходного сигнала  $f_0 = 10$  Гц.

Результаты данного численного эксперимента, представленные на рис. 2.36, а, б, показывают, что диапазон шума не оказывает влияния на изменение ошибки при использовании операции «сжатия-растяжения» в отличие от полосовой фильтрации без применения «сжатия-растяжения», при которой оценка нормированной среднеквадратической ошибки восстановления фазы растет с увеличением диапазона аддитивного шума.

Вторым важным исследованием является применение операции «сжатие-растяжение» для сигналов с широким частотным спектром так, как именно такими являются сигналы соответствующие радиальным сечениям годовичных колец деревьев. Эксперимент проводился для аддитивного шума постоянного уровня ( $\sigma = 0,4$ ).

Варьируемым параметром в данном эксперименте являлась ширина частотного спектра исходного сигнала (рассматривались сигналы с шириной спектра 6, 8, 10, 12 частотных полос при основной частоте  $f_0=10$ ).

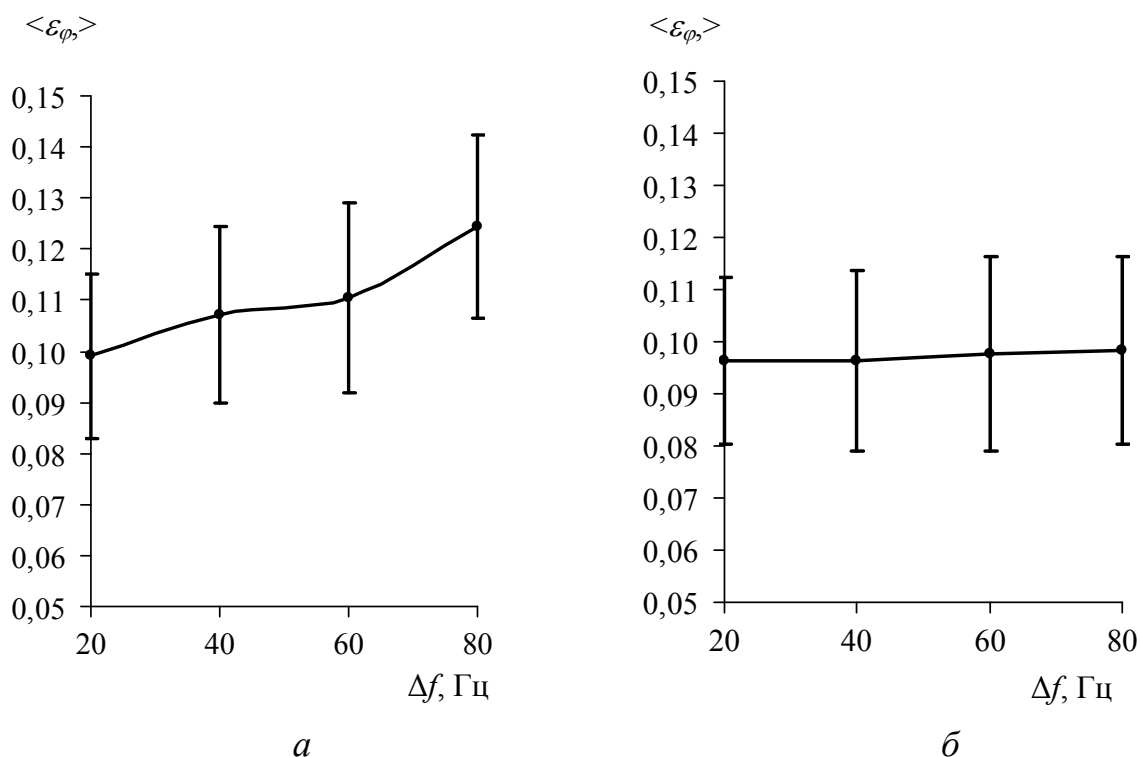


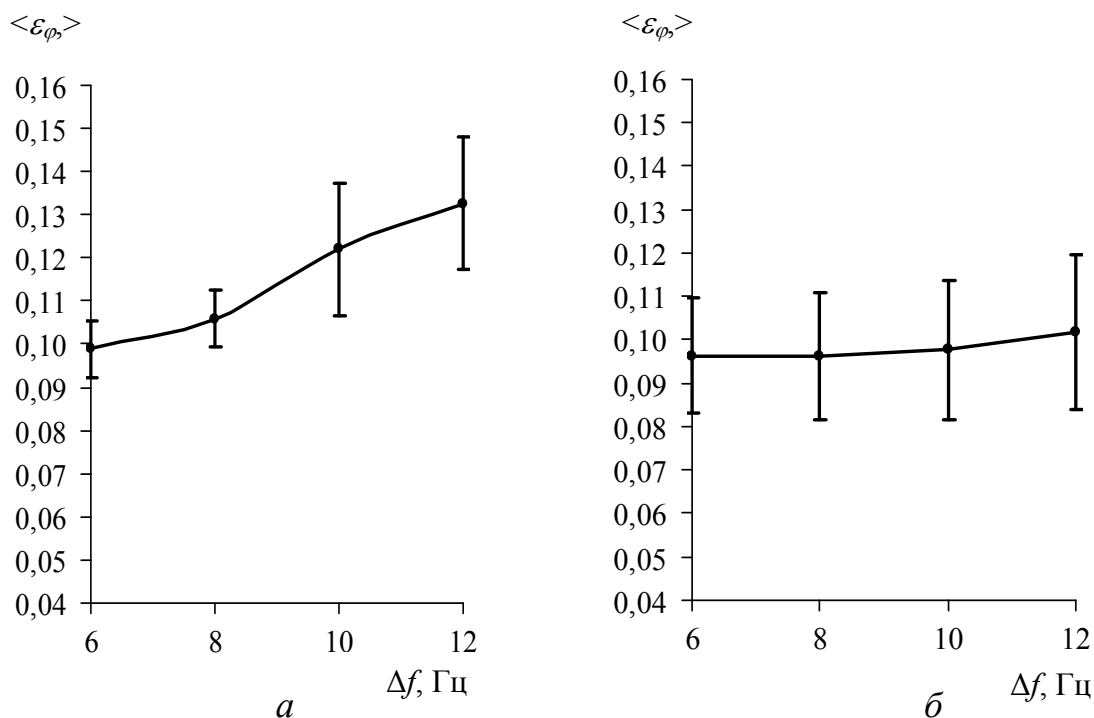
Рис. 2.36. Оценки нормированной среднеквадратической ошибки восстановления фазы при изменении диапазона аддитивного шума а – после полосовой фильтрации, б – после операции «сжатие-растяжение» с восстановленной фазой

Расчет полуширины спектра сигнала проводится по формуле:

$$\Delta f = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (f_i - f_0)^2 \cdot |M_i|^2}{\sum_{i=1}^N |M_i|^2}}, \quad (2.46)$$

где  $f_0$  – основная частота исходного сигнала,  $f_i$  – текущее значение частоты,  $|M_i|^2$  – амплитудный спектр,  $N$  – количество частот.

Из результатов проведенного эксперимента (рис. 2.37, а, б) следует, что изменение ширины спектра сигнала не оказывает влияния на изменение оценки нормированной среднеквадратической ошибки восстановления фазы при использовании операции «сжатие-растяжение» до тех пор, пока выполняется условие  $\Delta f \leq f_0$ , а при полосовой фильтрации без применения «сжатия-растяжения» наблюдается постоянное ее увеличение при расширении спектра частот сигнала.

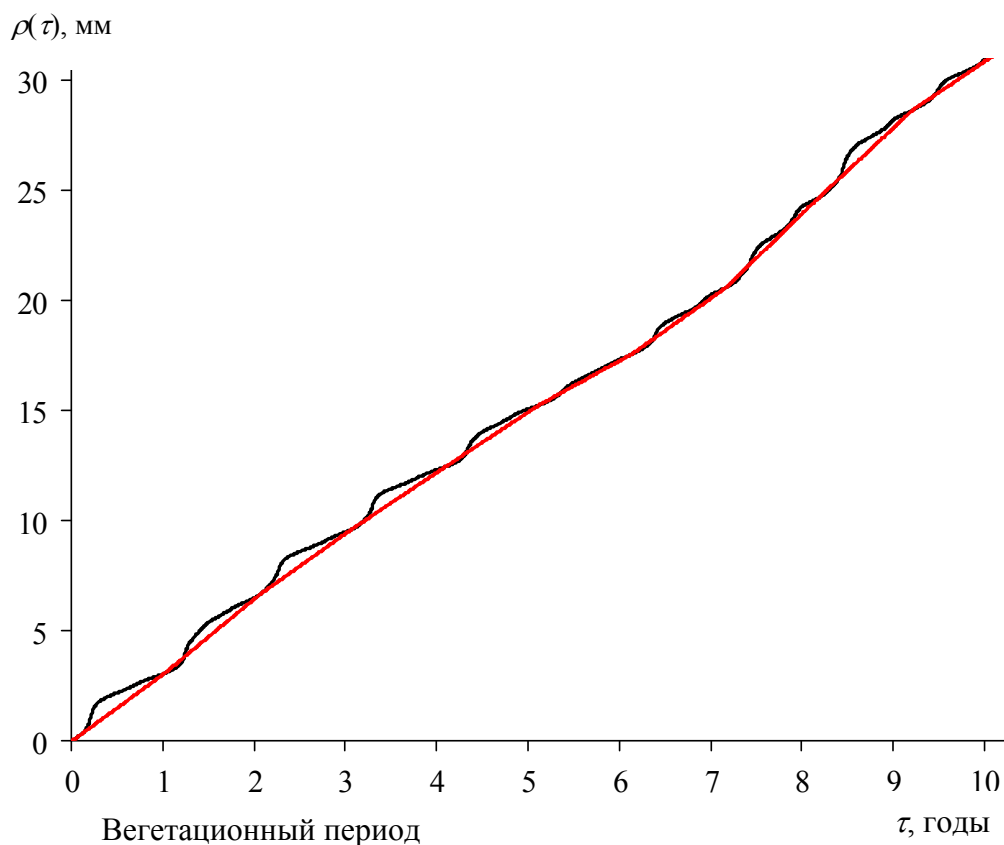


*Рис. 2.37. Оценки нормированной среднеквадратической ошибки восстановления фазы для сигналов с разной шириной спектра частот при аддитивном шуме: а – после операции полосовой фильтрации, б – после операции «сжатие-растяжение» с восстановленной фазой*

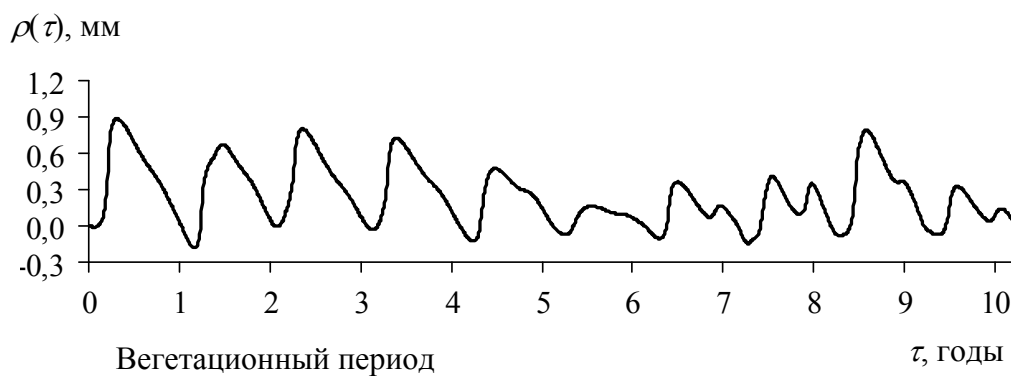
Основываясь на результатах проведенного численного эксперимента можно сделать вывод о том, что операция «сжатие-растяжение» пригодна и будет давать более точные результаты при работе с сигналами, имеющими широкий спектр частот, а также при работе с сигналами, в состав которых входит широкополосный шум. Наиболее эффективна операция «сжатие-растяжение» при наличии информации о фазе сигнала. Несмотря на не высокую эффективность операции при отсутствии исходной информации о фазе увеличить точность можно путем повторного ее применения.

## 2.10. Получение сезонных изменений радиального роста

Обратная по отношению к фазе колебания монотонная функция, отнесенная ко времени, определяет радиальный рост дерева. Каждый период колебания функции плотности, как и каждый элемент дискретной фазы, соответствует одному году. Для анализа сезонного роста переходят от отсчетов к годам, путем сопоставления начального значения каждого элемента дискретной фазы году (временному реперу), соответствующего сезону роста (рис. 2.38, а).



*a*



*б*

*Рис. 2.38. Сезонные изменения радиального сечения: а – кусочно-линейная аппроксимация функции роста, б – сезонные изменения радиального сечения*

Особенности сезонной динамики отражаются на скоростях каждого из процессов дифференциации клеток (деления, растяжения, утолщения клеточной стенки) [9], что оказывает влияние на изменение картины годичных слоев и всего радиального сечения.

Сезонные изменения радиального сечения можно получить в результате вычитания из функции радиального роста кусочно-линейной функции, проведенной через все временные точки (рис. 2.38, а).



Полученная зависимость имеет связь со временем, поэтому, эти данные можно использовать для изучения протекания процессов роста дерева за вегетационный период.

### **2.10.1. Формирование однородной выборки радиальных сечений**

Рассматривая картину годичных слоев сечения ствола дерева, становится очевидной некоторая неоднородность прироста древесины по разным азимутальным направлениям. Для получения достоверной информации о росте дерева нельзя ограничиваться исследованием одного радиального сечения, так как результат исследования не может быть предсказан с полной определенностью ввиду случайности процессов деления клеток. Правильные выводы о процессах роста дерева можно сделать по результатам большего числа подобных исследований. С этой целью для анализа выбирается некоторый ансамбль, представляющий собой набор идентичных радиальных сечений. Сечения предполагаются идентичными в том смысле, что каждое из них удовлетворяет одним и тем же условиям роста. К условиям способным оказать влияние на рост дерева относятся внутренние особенности роста дерева и внешние факторы среды. Внутренние особенности роста для отдельного дерева одинаковы. Внешние факторы можно считать одинаковыми в пределах одного азимутального направления. Добиться идентичности сечений можно путем отбора исследуемых образцов в области изотропности диска. Сектор поперечного сечения ствола дерева, в котором сформировались годовые кольца с одинаковой реакцией на изменявшиеся параметры окружающей среды, считается лежащим в интервале изотропности. Реакция годовых колец на внешние изменения оценивается по величине прироста древесины в границах исследуемой области за каждый отдельный вегетационный период. Сечения, имеющие выпадающие годовые кольца, резкие изменения в росте и другие подобные отклонения исключаются из выборочного ансамбля. Сечения без резких изменений величины прироста древесины за весь период исследования, расположенные в одном азимутальном направлении, где наблюдается одинаковая реакция на изменение внешних и внутренних факторов роста, отбираются в качестве исследуемых

Оценить годовой прирост для выбранных сечений можно путем вычисления выборочного среднего значения.

Исходя из условий выбора исследуемых образцов можно предположить, что распределение случайных величин прироста близко к нормальному. Степень изменчивости прироста можно определить, вычислив выборочную дисперсию.

По этой причине, для получения достоверных результатов, прибегают к формированию однородной выборки из радиальных сечений, расположенных в границах определенного азимутального направления поперечного спила дерева.

Поперечное сечение лиственницы сибирской (*Larix sibirica Ledeb*) представлено на рис. 2.39. За основное азимутальное направление выбрано направление на Юг. Относительно основного азимутального направления отбирались девять радиусов, соответствующих разным направлениям, для которых вычислялась в соответствии с предложенным алгоритмом функция роста. В результате последовательного прохождения по всей окружности поперечного сечения была выявлена область однородности соответствующая углу  $30^\circ$  при средней длине радиуса от центра до последнего исследуемого годичного кольца равной 40 мм.

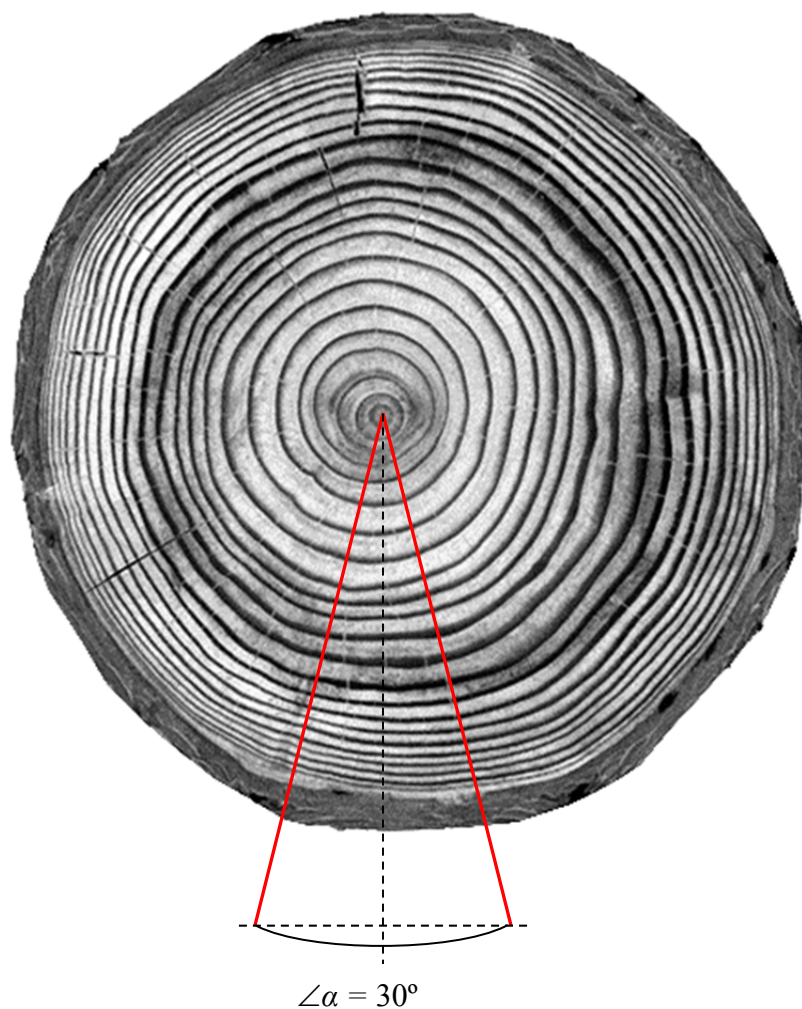


Рис. 2.39. Поперечное сечение лиственницы сибирской (*Larix sibirica Ledeb*)  
Линиями выделен сектор, из которого выбирались сечения для анализа.  
Средний радиус сечений 40 мм

В качестве статистической оценки использовалось среднее арифметическое рассчитанное по девяти реализациям восстановленной функции роста. Разброс значений относительно среднего оценивался по величине стандартного отклонения, малая величина которого означает устойчивость к входным параметрам.

Контрольные эксперименты с большим объемом выборки равной 25 радиальным сечениям из сегмента сечения соответствующего углу 30° показали, что среднее и дисперсия не меняются.

Результаты, полученные для данного образца подтверждены результатами исследования радиальных сечений девяти дополнительно отобранных поперечных спилов. Для полученной повторности результатов количество проведенных исследований радиальных сечений разных образцов можно считать достаточным [160].

### **2.10.2. Результаты анализа радиальных сечений дерева**

Отбор образцов является наиболее важным этапом при исследовании радиальных сечений и общего роста дерева. От правильности отбора зависит соответствие получаемых результатов оцениваемым климатическим параметрам.

Используемые для анализа образцы сечений принадлежат лиственнице сибирской (*Larix sibirica* Ledeb), произрастающей на участке леса в пределах территории Томского научного центра СО РАН с 1975 по 2002 год.

При проведении отбора образцов особое внимание уделялось факторам среды способным оказать воздействие на рост дерева таким, как солнечная радиация, температурный режим воздуха, увлажненность почвы и др. [161, 162].

Выбранное дерево росло, обособлено, в незатененном месте, на увлажненной почве. Ствол дерева, не имел видимых дефектов роста. Растительное сообщество разновозрастное, среди которого попадаются более взрослые деревья. Соседние деревья – преимущественно лиственницы.

Высота ствола выбранного дерева 21 метр. Образцы поперечных спилов отобраны с разных высот (1, 2 и 3 метра) с предварительной разметкой ствола – указанием направление на север и направление роста дерева вверх. Спилов производились в том месте ствола, где нет сучков и ветвей т. к. их наличие изменяют картину годовых слоев.

Поверхности исследования отобранных поперечных спилов шлифовались. Эта операция позволяет убрать с поверхности диска разного рода неровности и добиться контрастного отображения годовых слоев. После тщательной шлифовки и полировки диск сканировалась с заданной плотностью, данные сохранялись в память компьютера.

Полная радиальная картина годовичных слоев на поперечном сечении ствола дерева не является однородной. Этот вывод можно сделать по результатам сравнения большого числа радиальных сечений, соответствующих разным азимутальным направлениям.

Это связано с изменением параметров окружающей дерево среды, которые независимо друг от друга формируют комплекс постоянно меняющихся воздействий, под влиянием которого происходят случайные изменения роста дерева.

Радиальные сечения выделялись с помощью графического редактора. Из изображения радиального сечения вырезался сектор с углом в  $30^\circ$ , ориентированный на юг, с выраженными переходными зонами между ранней и поздней древесиной. В секторе были выбраны 9 радиальных сечений, на которых располагалось 10 годовичных колец. Длина сечений изменялась в диапазоне от 30 до 31 мм. Типичная реализация радиального сечения показана на рис. 2.40, а.

Применяемые алгоритмы обеспечили прохождение функции роста  $\rho(\tau)$  точно через реперные точки, соответствующие резкому переходу от поздней к ранней древесине, что подтверждает правильность результата, (рис. 2.40, а, б).

Вычитая из функции  $\rho(\tau)$  кусочно-линейную функцию, проведенную через реперные точки, (рис 2.40, б) получены сезонные вариации роста в пределах вегетационного периода  $\delta\rho(\tau)$ . Оценка этой функции  $\langle\delta\rho(\tau)\rangle$  показана на (рис. 2.40, в), она определялась как среднее арифметическое по девяти реализациям.

Оценки имеют малую дисперсию, что характеризует устойчивость алгоритмов к входным данным. Тогда оценка  $\langle\delta\rho(\tau)\rangle$  распределена приблизительно нормально и будет центром интервала  $\langle\delta\rho(\tau)\rangle \pm \sigma N^{-0,5} t_{N-1}^{-0,5}(1-p/2)$ , где  $\sigma$  есть выборочное стандартное отклонение функции  $\delta\rho(\tau)$ . Для доверительной вероятности  $p = 0,05$ , объема выборки  $N = 9$  из таблиц распределения Стьюдента найдем  $tg(0,975) = 2,25$ , тогда  $\langle\delta\rho(\tau)\rangle \pm 0,75\sigma$ . Этот доверительный интервал показан (рис. 2.40, в), из его величины следует, что точность оценки приемлема.

Таким образом, существует область изотропности, и в ней находится выбранный для анализа сектор диска. В этой области для различных азимутов, в сечениях с приведенной длиной, сохраняются сезонные вариации радиального роста.

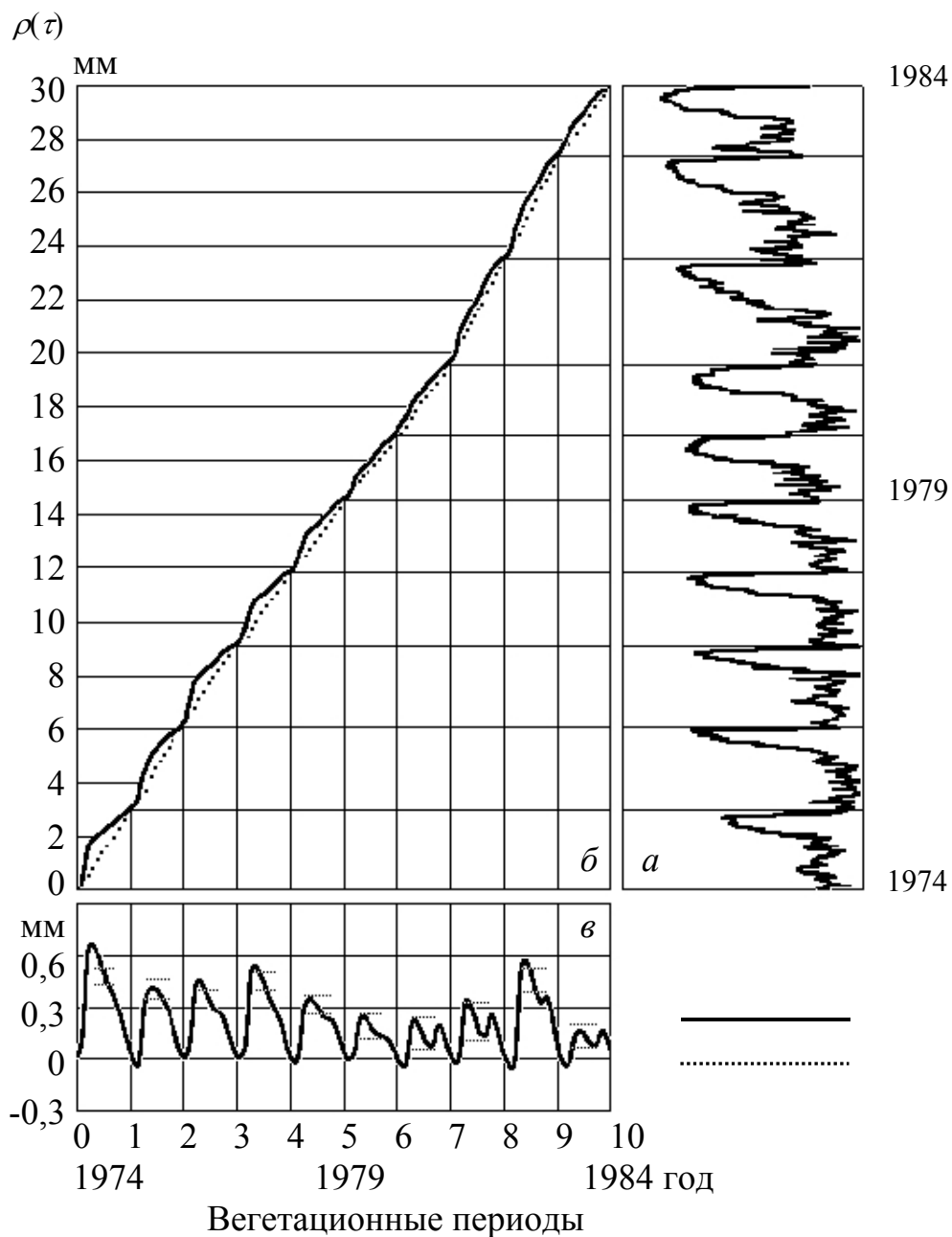
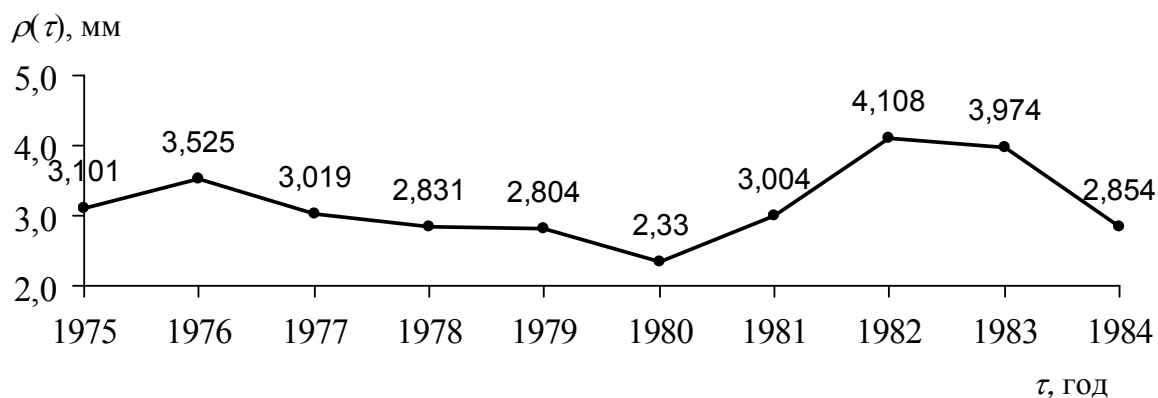


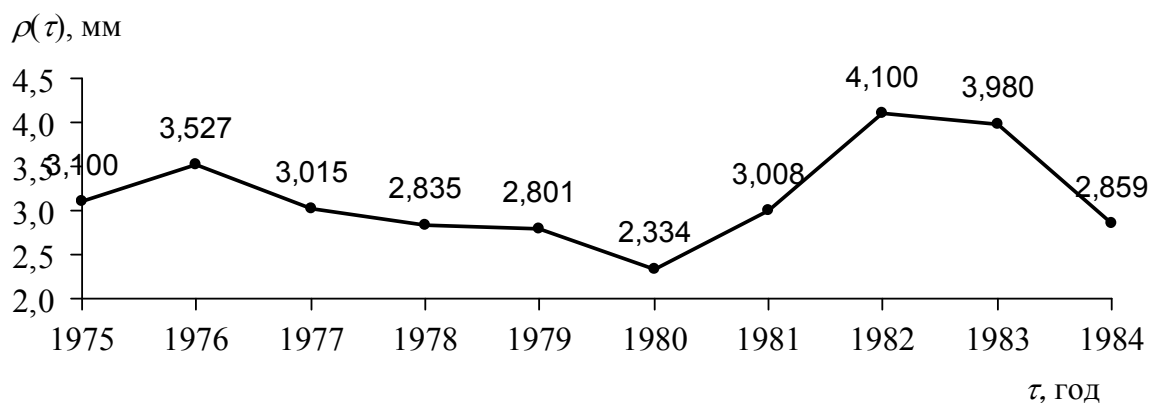
Рис. 2.40. Восстановление сезонных вариаций радиального сечения дерева а – радиальное сечение диска дерева  $R(\rho)$  в относительных единицах из сектора на рис. 2.39, показаны десять годичных колец, б – восстановленный радиальный рост  $\rho(\tau)$ , кусочно-линейная аппроксимация роста, в – оценка сезонных вариаций радиального роста  $\langle \delta r(\tau) \rangle$ , пунктиром показан доверительный интервал для полугодия

Восстановленная в соответствии с разработанным алгоритмом непрерывная функция роста связана со временем, и позволяет вычислить радиальный рост дерева за отдельный вегетационный период соответствующего году. Полученные результаты прироста годичных слоев

представлены на рис. 2.41, б. Для сравнения полученных результатов определение величины прироста годичных слоев того же радиального сечения было проведено классическим методом (рис. 2.41, а). Исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что разработанный алгоритм позволяет вычислять величину радиального прироста с необходимой точностью. Точность вычисления можно повысить при увеличении плотности сканирования исследуемого образца.



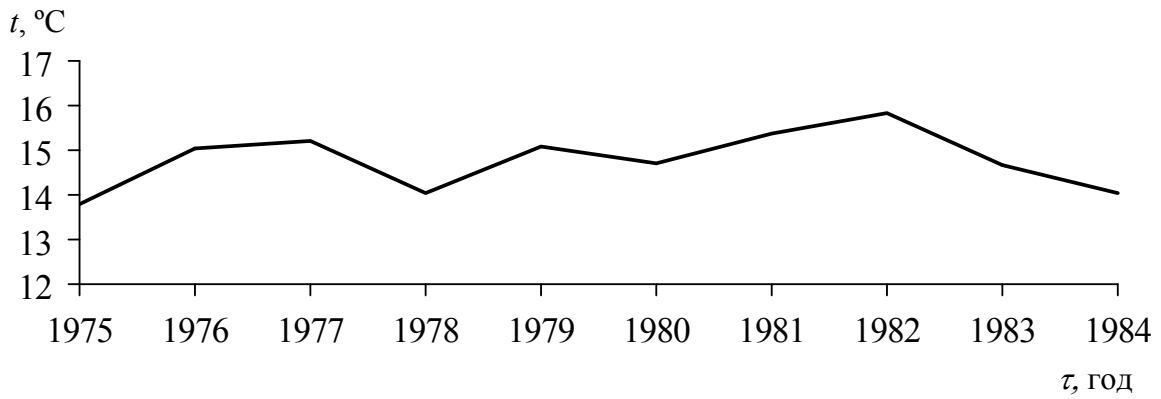
а



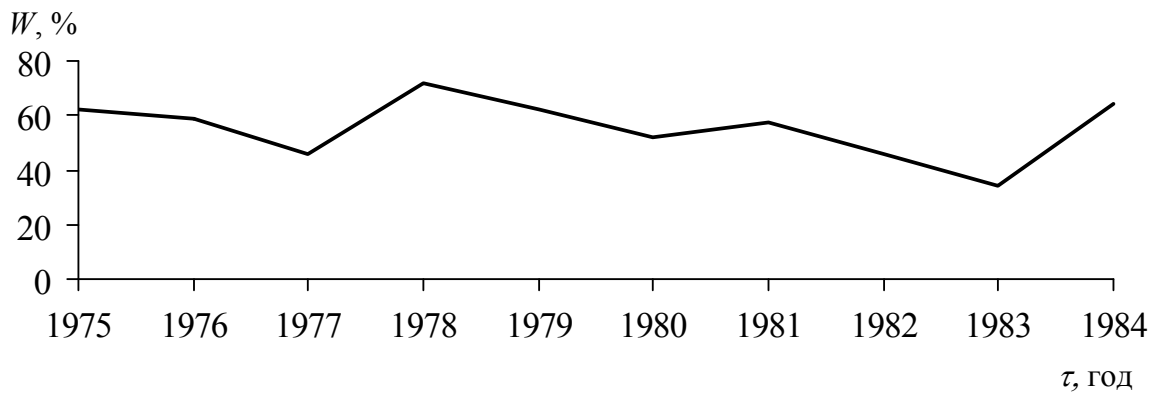
б

Рис. 2.41. Прирост годичных слоев дерева: а – прирост, определенный классическим методом, б – прирост восстановленный

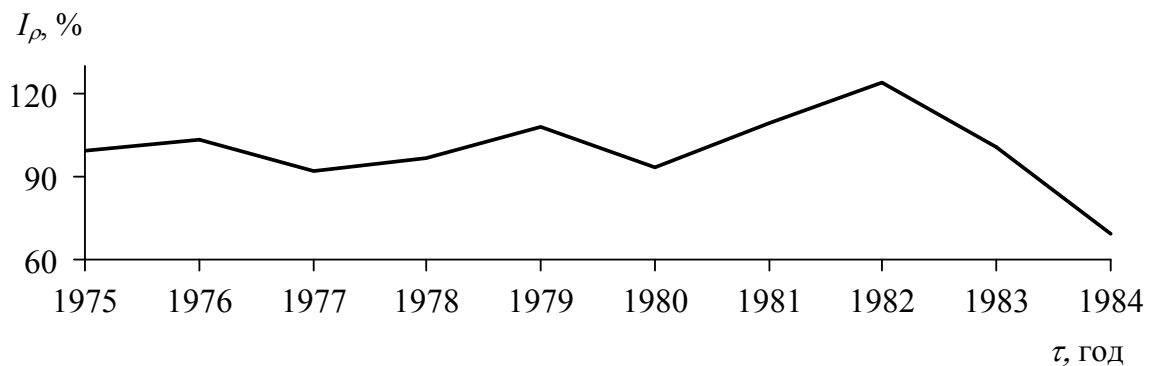
Полученные значения прироста используются при восстановлении климатических параметров окружающей среды. Для определения влияния климатических параметров на радиальный рост исследуемого образца было проведено вычисление стандартным методом [3] индекса прироста и сравнение с данными температуры и влажности, полученных метеостанцией города Томска (рис. 2.42).



*a*



*б*

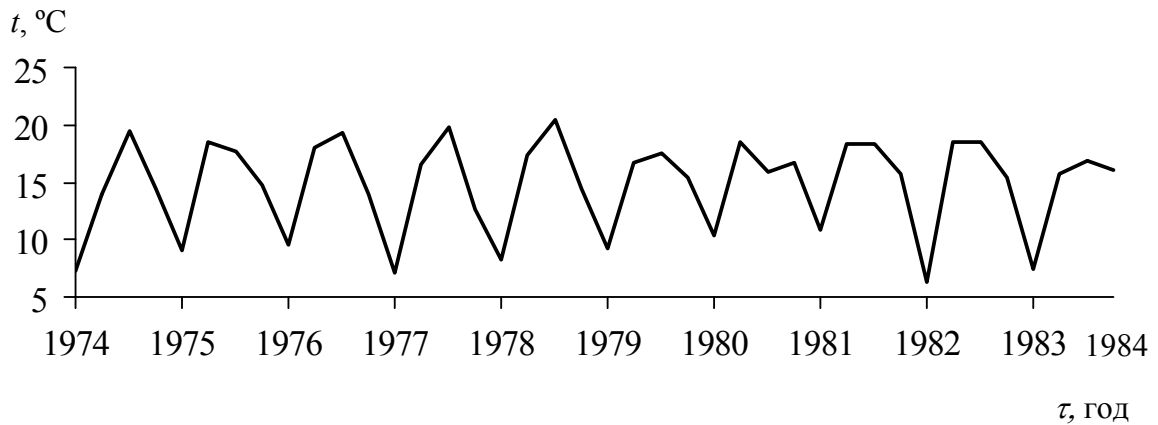


*в*

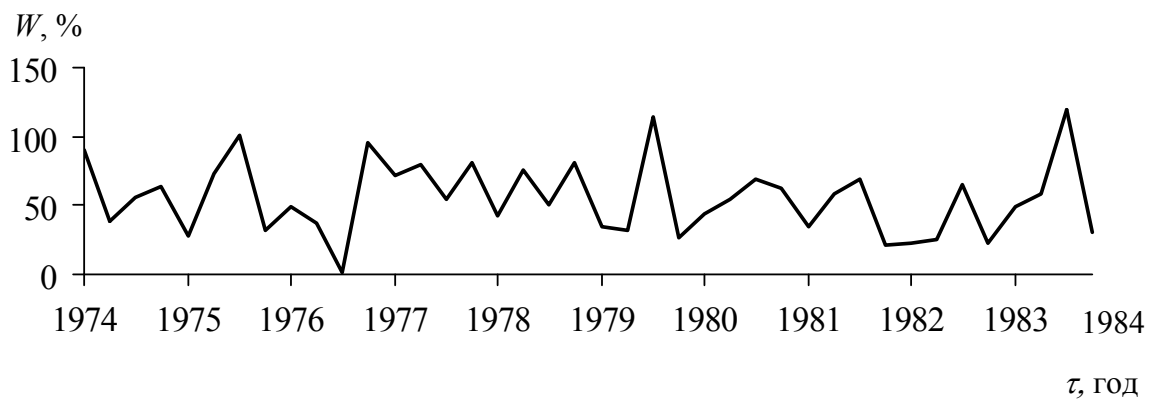
*Рис. 2.42. Климатические параметры по данным метеостанции г. Томска: а – температура, за исследуемый период, б – влажность, за исследуемый период, в – индекс прироста годичного слоя дерева*

Для оценки влияния температуры и влажности на рост дерева произведен расчет коэффициента корреляции величина, которого при расчете влияния на рост температуры составила значение 0,687, при расчете влияния на рост влажности 0,123.

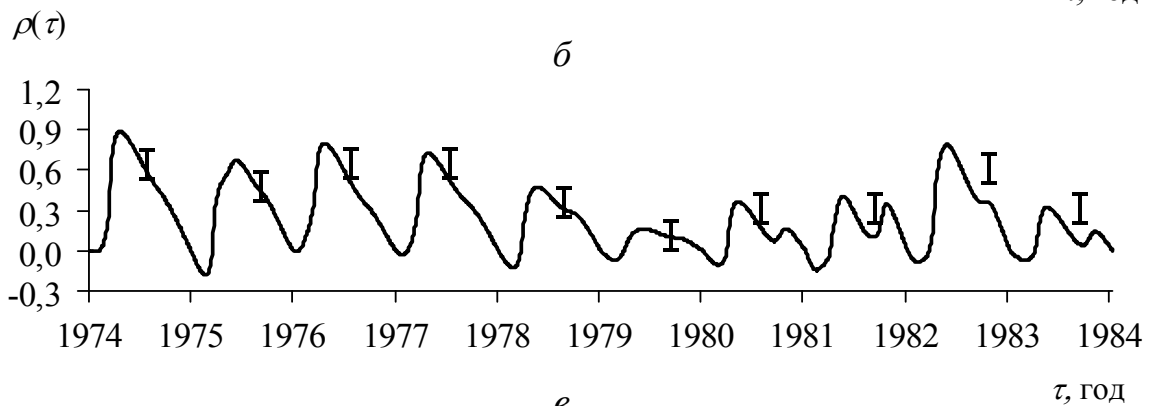
Полученный результат говорит о преимущественном влиянии на рост исследуемого образца температурного режима.



*a*



*б*



*в*

*Рис. 2.43. Сезонные изменения климатических параметров: а – температура, за соответствующий сезон роста, б – влажность, за соответствующий сезон роста, в – сезонные изменения радиального сечения*

Температура воздуха, почвы оказывает значительное воздействие на интенсивность процессов роста дерева. В литературных данных начало вегетаций связывается с определенными температурными значениями и указывается на наличие прямолинейной связи между максимальной температурой воздуха и скоростью роста [163]. Определив температуру, при которой возможно протекание процессов роста в дереве, можно более точно определить временной период роста и развития клеток.



Принимая продолжительность вегетационного периода четыре месяца (апрель, май, июнь, июль) были построены графики изменения значений среднемесячной температуры и влажности (рис. 2.43, *a*). При сравнении полученных кривых с восстановленной функцией сезонных изменений радиального сечения обнаружено сходство с кривой сезонного изменения температур.

Объяснением данного сходства является то, что функция сезонных изменений радиального сечения определяется изменяющейся окраской годичного слоя, которая зависит от интенсивности протекания процессов роста клеток.

Полученный результат позволяет говорить о наличии связи между изменением климатических параметров и картиной радиального сечения, формирующейся за вегетационный период на поперечном сечении ствола дерева.

Изучение сезонных изменений можно проводить более подробно, заменяя среднемесячные температуры на среднесуточные, благодаря непрерывному восстановлению функции роста в течение вегетационного периода.

### **2.11. Алгоритм анализа площадей годичных слоев деревьев**

Радиальный прирост деревьев – комплексный показатель, позволяющий проследить изменение их состояния в течение всей жизни и учесть климатическую составляющую. Анализ радиального прироста часто ведется по кернам, содержащим информацию о приросте в одном поперечном сечении дерева. Актуальной задачей является получение более полной информации о ежегодном радиальном приросте дерева, основываясь на азимутальном анализе картины годичных слоев, отраженной на поперечном спиле ствола дерева, рис. 2.44, *a*.

Решение данной задачи сводится к разработке численного алгоритма, позволяющего с достаточной точностью отследить границы годичных слоев и рассчитать площади для каждого отдельного годичного слоя. Для определения границ годичных слоев изображение переводится в бинарный вид относительно выбранной границы интенсивности цвета каждого пикселя в массиве (рис. 2.44, *a*). На бинарном графическом изображении годичных слоев наряду с информацией о границах годичных слоев отражается большое количество шумов, связанных как с процессами механической обработки древесины, так и с биологическими процессами, происходящими в дереве в процессе его роста. Одним из таких процессов является старение древесины, в результате которого ее цвет изменяется на более темный. Для изображения, соответствующего

натурному образцу сосны (рис. 2.44, а) применена предварительная фильтрация по радиусам. Использован полиномиальный фильтр – для фильтрации низкочастотной составляющей и медианный фильтр – для фильтрации высокочастотных шумов. В результате применения процедур фильтрации снижена составляющая шумов при сохранении полезной информации (рис. 2.44, б), но для точного выделения контуров годовичных колец необходима разработка дополнительных алгоритмов.

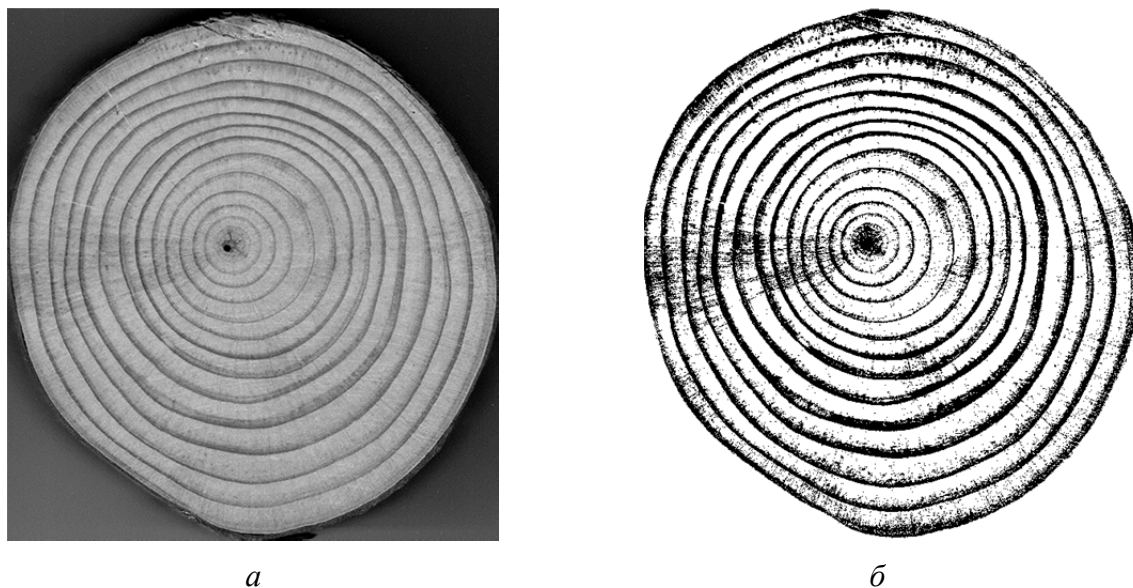


Рис. 2.44. Изображение поперечного спила сосны обыкновенной в виде:  
а) градаций серого цвета; б) бинарного изображения

Алгоритм отслеживания колец, основанный на алгоритме простого последовательного перебора элементов массива в годовичном слое с одновременным выделением границ перехода по признаку изменения цвета между соседними элементами от темного к светлому, несмотря на высокую скорость выполнения операций и простоту, оказался неустойчивым в работе при наличии шумов смыкающих годовичные слои и при наличии частичной потери информации (разрывы годовичных слоев).

Для точного восстановления границ годовичных колец разработан новый алгоритм, основанный на кластерном анализе. Каждая единица совокупности в кластерном анализе рассматривается как точка в заданном признаковом пространстве. Значение каждого из признаков у данной единицы служит ее координатой в этом «пространстве». Таким образом, признаковое пространство – это область варьирования всех признаков совокупности изучаемых явлений. Если предположим, что это пространство подобно обычному пространству, имеющему евклидову метрику, то тем самым, получим возможность измерять «расстояния»

между точками признакового пространства. Евклидовы расстояния вычисляются по тем же правилам, как и в обычной евклидовой геометрии, вычисляется расстояние  $D$  между точками на плоскости, т. е. в двухмерном пространстве, по формуле:

$$D = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2},$$

где  $x_A, y_A$  и  $x_B, y_B$  – координаты точек А и В,  $D$  – расстояние между точками А и В.

На основе расчета расстояний, являющихся мерой близости отдельных объектов, построен алгоритм группировки элементов графического массива (рис. 2.44, б). Классификационной группой в графической картине поля годичных колец является отдельный годичный слой. Объединение отдельных элементов графического массива в группы, соответствующие отдельным годичным слоям, производится по признаку расстояния элемента от центра.

Графическая картина поля годичных колец является неоднородной, поэтому не удастся описать годичное кольцо простым уравнением окружности:

$$R^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2,$$

где  $x_0, y_0$  – координаты центра окружности,  $R$  – радиус окружности.

Расстояние, определенное как признак группировки элементов массива, не может быть задано одним значением радиуса  $R$  на протяжении всего годичного слоя. Не возможно получить точную группировку и при использовании радиусов вписанной и описанной окружностей, рассчитанных для годичных слоев вследствие того, что области в пределах этих двух окружностей в графической картине поля годичных слоев будут иметь наложения для соседних годичных слоев, и элементы массива по признаку расстояния будут принадлежать одновременно к областям разных годичных слоев.

Области не будут иметь пересечений на бесконечно малом отрезке массива. Принимая в качестве признака группировки радиус начального элемента, дополнительно задается интервал однородности массива, для чего в поле колец выделяется ограниченный сегмент, в котором происходит группировка элементов массива. Чем меньше размеры сегмента, тем точнее будет проведена группировка.

Работа алгоритма группировки может быть описана последовательными этапами:

1. Задание оператором начальных значений расстояний годичных колец.
2. Вычисление расстояний от центра до границ перехода годичных слоев и формирование массива расстояний.

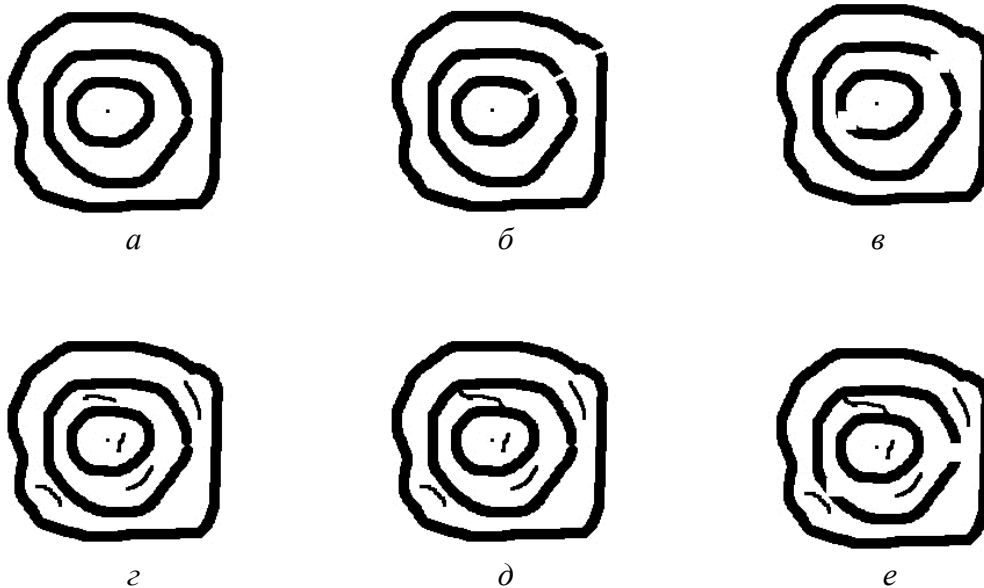
3. Группировка элементов массива путем сравнения расстояний между элементами соседних рядов на заранее заданном интервале однородности. Группировка реализуется путем переноса элемента с наименьшим расстоянием в столбец под эталонным элементом. Одновременно проводится сравнение расстояний между найденным элементом и элементом, расположенным под эталонным. В случае, если расстояние между эталонным и найденным элементами окажется меньше, чем расстояние между эталонным и существующим элементами, то условие выполняется. Существующий элемент переносится в освобождающуюся позицию и используется при дальнейшей оценке.

4. Элементы массива, не отнесенные в границах выделенного сегмента к группам, соответствующим годичным слоям, относятся к группе шум и обнуляются.

5. Проверка условий: наличия выпадающих колец, наличия разрывов, монотонного возрастания значений расстояний годичных колец и наличия пересечений годичных слоев.

6. Медианная фильтрация сгруппированных рядов с целью минимизации ошибки группировки, вызванных резкими локальными изменениями при наличии разрывов (при потере информации).

7. Вычисление площади прироста для каждого отдельного годичного слоя.



*Рис. 2.45. Графические модели: а) эталонная модель; б) модель с разрывом по типу № 1; в) модель с разрывом по типу № 2; г) модель с шумом по типу № 1; д) модель с шумом по типу № 1; е) модель с комбинацией шумов по типу № 1 и с разрывом по типу № 1*

Для оценки работоспособности предлагаемого алгоритма проведен численный эксперимент, в котором задана эталонная графическая модель, состоящая из трех слоев, разделенных черными линиями. Построены пять экспериментальных графических моделей, на основе эталонной графической модели, с возможными проявлениями графических картин, характерных для годовичных слоев деревьев (рис. 2.45).

В период формирования годовичного слоя дерево подвержено воздействию разных климатических факторов, которые отражаются на изменении радиального прироста дерева и форме годовичных колец. Внешние и внутренние особенности роста выражаются в неоднородностях годовичных слоев, отраженных на поперечном сечении ствола дерева. Графические экспериментальные модели сформированы на основании изучения графических картин поперечных спилов деревьев и биологических особенностей роста и формирования колец. В моделях предусмотрены наиболее часто встречающиеся изменения: разрыв годовичных слоев по типу № 1, рис. 2.45, б, учитывающий разрыв в виде луча, проходящего от центра к периферии через все годовичные слои, разрыв по типу № 2, рис. 2.45, в, учитывающий разрыв в одном слое, шум по типу № 1, рис. 2.45, г, включающий шумы биологического и механического происхождения между годовичными слоями, шум по типу № 2, рис. 2.45, д, шум, смыкающий годовичные слои, комбинация шумов по типу № 1 и 2 и с разрывом по типу № 1, рис. 2.45, е.

В результате работы алгоритма рассчитаны площади годовичных слоев для каждой экспериментальной графической модели.

Ошибка вычисления площади определялась как разница между значением площадей эталонной и экспериментальной моделей, отнесенная к площади эталонной модели:

$$\varepsilon = \frac{|S - S_i|}{S},$$

где  $S$  и  $S_i$  – площадь эталонной и экспериментальной графической модели.

Результаты вычисления средних значений ошибок для разных графических моделей представлены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

*Среднее значение ошибки вычисления площадей*

Тип модели	Ошибка, %
Эталонная	0
С разрывом по типу № 1 (разрыв в одном слое)	0,90
С разрывом по типу № 2 (разрыв в виде луча)	0,21
С шумом по типу № 1 (шум между слоями)	0,05
С шумом по типу № 1 (шум смыкающий слои)	3,49
С комбинацией шумов по типу № 1 и 2 и с разрывом по типу № 1	3,68

Максимальное значение средней ошибки вычисления площадей при геометрических размерах модельного графического изображения  $276 \times 276$  пикселей, составило 3,68 %. Аналогичные эксперименты для больших размеров графических моделей (на уровне  $4000 \times 4000$  пикселей) и большего числа слоев (более 90 слоев) показали максимальную ошибку не более 20 %, что соответствует уровню точности, заложенному в разработанном алгоритме.

Апробация работы алгоритма проводилась на натурном образце, соответствующем поперечному спилу ствола сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*), рис. 2.44, а. Целью применения разработанного алгоритма группировки являлось точное вычисление площадей всех годовых колец формирующих ствол.

Исследование спила дерева проводилось по нескольким этапам. *Первый* этап – подготовительный. Прежде чем произвести сканирование, проведена предварительная механическая обработка спила дерева. Поперечный срез обработан мелким абразивным материалом, благодаря чему с поверхности убраны различные неровности. В результате удалось получить более четкое разделение годовых слоев. *Второй* этап – сканирование поперечного спила дерева. Варьируемыми параметрами изображения при сканировании являются: плотность изображения, масштаб, цветовая палитра. Изменение контрастности и яркости изображения при сканировании не производится.

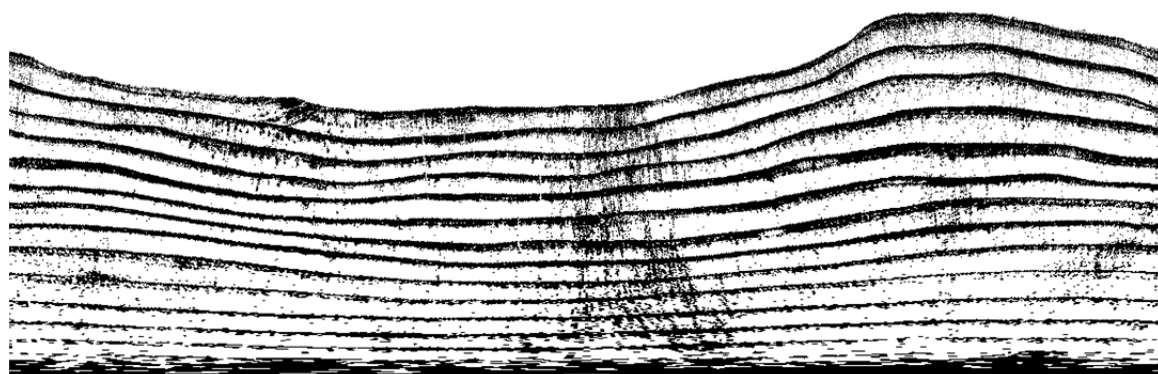
Сканирование проводится в градациях серого цвета, что позволяет уменьшить величину графического файла по сравнению с цветным изображением и не потерять информацию об интенсивности цвета каждого пикселя. *Третьим* этапом является перевод графического изображения к бинарному виду, рис. 2.44, б, удобному для математической обработки. На *четвертом* этапе, для удобства обработки, изображение концентрических колец разворачивается по радиусам, рис. 2.46, а. Производится фильтрация графического изображения по отдельным радиальным сечениям. Для фильтрации последовательно применяется полиномиальный и медианный фильтры в соответствии с алгоритмом, описанным ранее [138].

На *пятом* этапе реализуется алгоритм группировки, в результате которого вычисляются границы годовых слоев, рис. 2.46, б.

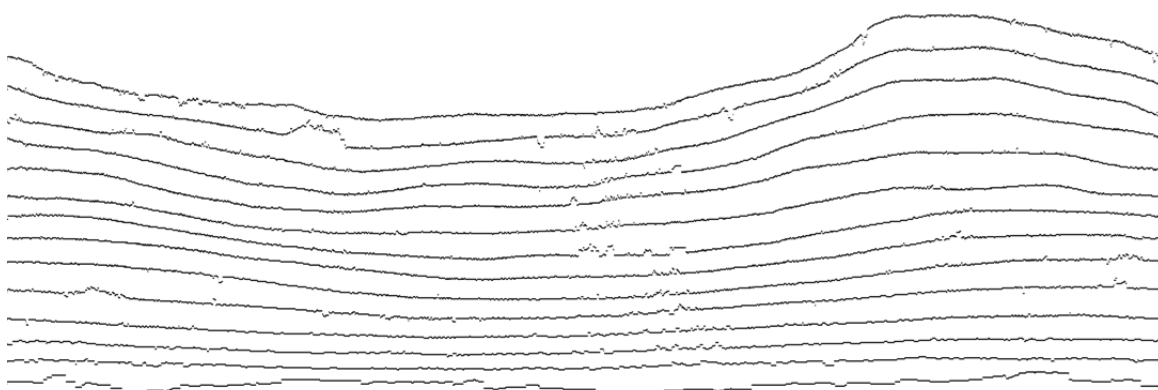
*Шестой* этап – перевод графической картины из декартовой системы в полярную – возврат к исходной графической картине в преобразованном виде, рис. 2.47, а.

*Седьмой* этап – расчет площадей отдельных годовых слоев. Для расчета площадей графическое изображение преобразуется к виду полей прироста биомассы, рис. 2.47, б, в, путем разделения годовых сло-

ев по уровням. По сумме элементов, принадлежащих уровню, вычисляется площадь каждого годичного слоя, рис. 2.48.



*a*

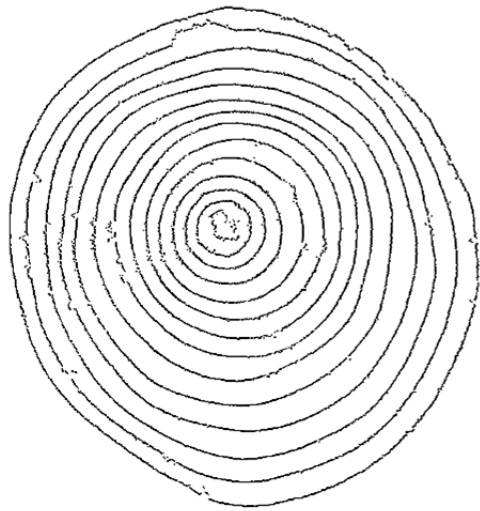


*б*

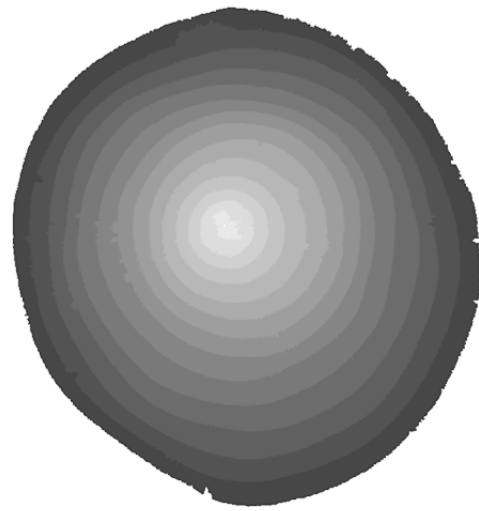
*Рис. 2.46. Графическое представление годичных колец в декартовой системе координат: а) исходного графического изображения; б) вычисленных границ годичных слоев*

Наложение вычисленных границ годичных слоев на исходное графическое изображение поперечного спила дерева, рис. 2.47, *в*, подтверждает высокую точность вычисления и пригодность разработанного алгоритма для работы с натурными образцами. Ошибки вычисления годичных колец обнаружены в тех областях графического изображения, где имеются существенные изменения структуры древесины, связанные с недостаточной механической обработкой или биологическими процессами, способными изменить интенсивность ее окраски.

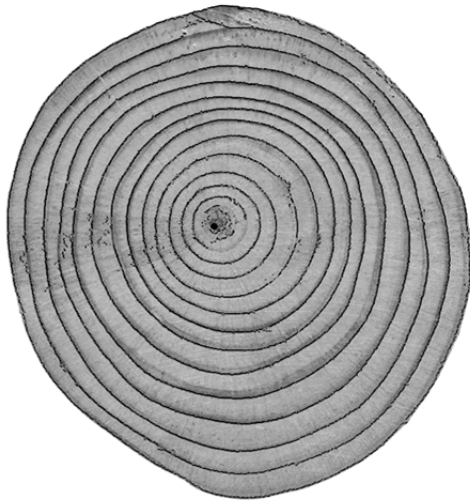
С учетом графических параметров исходного изображения получены значения площади прироста для исследованного образца поперечного спила ствола сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*), рис. 2.48.



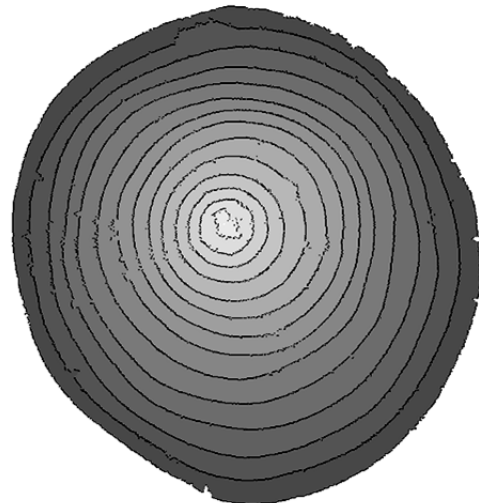
*a*



*б*



*в*



*г*

*Рис. 2.47. Графическое представление групп годовых слоев в полярной системе координат: а) вычисленные границы; б) картина прироста в виде поля; в) наложение вычисленных границы на исходное графическое изображение; г) поле в виде годовых слоев*



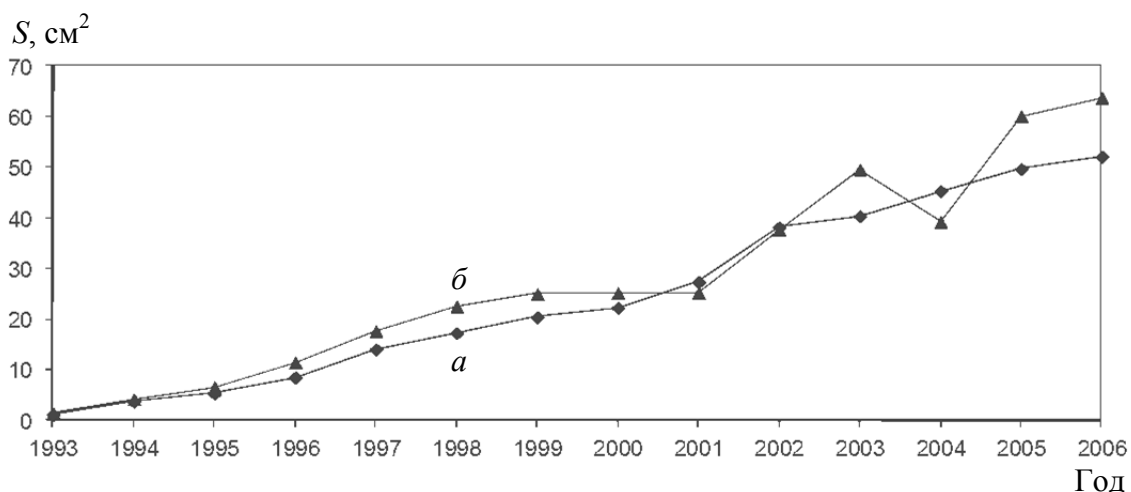


Рис. 2.48. Распределение по годам площадей годовых слоев на поперечном срезе ствола сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*): а) полученных с использованием алгоритма группировки; б) рассчитанных по средним радиусам

В соответствии с расчетом, проведенным с использованием алгоритма группировки, площадь прироста сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) увеличилась с 1993 по 2006 гг. с 1,1 до 52,1 см<sup>2</sup>, рис. 2.48, а.

Для сравнения точности вычисления, рис. 2.48, б, приведены результаты расчета площадей годовых слоев по средним радиусам, определенным в двух азимутальных направлениях. По результатам численного эксперимента ошибка определения площадей по средним радиусам может достигать 45 % и более, в зависимости от диаметра ствола и азимутальной неоднородности формы годовых слоев. Ошибка вычисления с использованием алгоритма группировки не может превышать 20 %.

Для представленного натурального образца ошибка определения площадей по средним радиусам, относительно значений, полученных при помощи метода группировки, лежит в интервале от 1,37 до 34,97 %.

### **3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОБРАБОТКИ ГОДИЧНЫХ КОЛЕЦ ДЕРЕВЬЕВ**

Исследование задач обработки дендрозкологических данных и инструментально-программных средств их решения выявили трудоемкость и сложность создания соответствующего программного обеспечения. Для успешного проектирования и реализации программного обеспечения обработки дендрозкологических данных должны быть построены его полные и непротиворечивые как функциональные, так и информационные модели, структура основных компонентов программного комплекса и алгоритмы их функционирования. Ниже описаны исследования и разработки по указанным этапам работы.

#### **3.1. Использование технологии и инструментальных средств Rational Software и AllFusion для разработки информационно-программного обеспечения комплекса**

Анализ средств объектно-ориентированного анализа и проектирования по таким критериям как обеспечение целостности проекта и контроля за его состоянием, независимость от платформы и СУБД, открытость архитектуры, качество технической поддержки, простота освоения и использования позволяет сделать вывод о пакете Rational Rose 2000 [164] как о наиболее оптимальном средстве анализа и проектирования вычислительной структуры, а о пакете AllFusion ERwin Data Modeler 4 [165] как о наиболее оптимальном средстве анализа и проектирования баз данных.

С использованием пакета Rational Rose были разработаны диаграммы различных типов, представляющие основные потоки работ и фазы процесса анализа и проектирования применительно к комплексу обработки дендрозкологических данных. Разработаны диаграммы вариантов использования (use case diagram) (рис 3.1), позволяющие более четко представить его исходную концептуальную модель комплекса и процессы, поддерживающие его функционирование, как со стороны исследователя, так и со стороны администратора (описывают функциональное ядро комплекса). Основной учетной единицей здесь является функциональная задача. С пользовательской стороны это такие задачи, как обработка изображения медианным и полиномиальным фильтрами, вычисление азимута и среднеквадратичной ширины области максимального прироста, вычисление индексов прироста по ширине годовых колец деревьев и среднего значения по индексам прироста и др.

С системной стороны это такие задачи, как формирование профилей вычислительных серверов, обеспечение оптимальной загрузки имеющихся вычислительных серверов, оптимизация взаимодействия с сервером базы данных, контроль и разграничение прав доступа к информационно-вычислительным ресурсам комплекса и др. Каждая выделенная функциональная задача (процесс) включает алгоритм обработки, входные и выходные данные, средства их визуализации.

С помощью диаграммы кооперации (collaboration diagram) (статическое представление структуры комплекса) был определен полный контекст взаимодействий процессов как временной «срезы» совокупности объектов, взаимодействующих между собой для выполнения определенных задач комплекса. Полная совокупность методов и данных, структурированных в абстрактных объектах типа класс, и обеспечивающая функционирование многомашинного комплекса обработки дендрологических данных в различных режимах, была определена с помощью диаграмм классов (class diagram). С точки зрения учета временного фактора многомашинный комплекс обработки дендрологических данных не является строго системой реального времени. Если асинхронность в обработке событий в комплексе присутствует, то жестко заданные временные рамки выполнения функций комплекса отсутствуют. Поэтому, детализация поведения комплекса не так важна и сразу можно приступить к разработке дальнейших диаграмм функционирования комплекса.

С помощью диаграммы развертывания (deployment diagram) было уточнено и конкретизировано решение таких вопросов, как формирование физической топологии узлов комплекса (коммуникационный и вычислительные серверы, рабочие станции, сервер базы данных и каналы связи), размещение функциональных задач по вычислительным серверам, обеспечение безопасности и разграничение прав доступа к информации для исследователей. При разработке диаграммы компонентов (component diagram) была осуществлена визуализация общей структуры исходных кодов многомашинного комплекса обработки дендрологических данных, получен его исполняемый вариант, устойчивый к сбоям и ошибкам, обеспечено многократное использование отдельных фрагментов программного кода. Завершающим этапом процесса анализа и проектирования является этап тестирования, на котором проверяются результаты реализации. Для данного этапа была разработана модель тестирования, которая включала тестовые компоненты и примеры, процедуры тестирования. В технологии Rational Rose визуализация этого процесса (построение диаграмм тестирования) не предусмотрена.

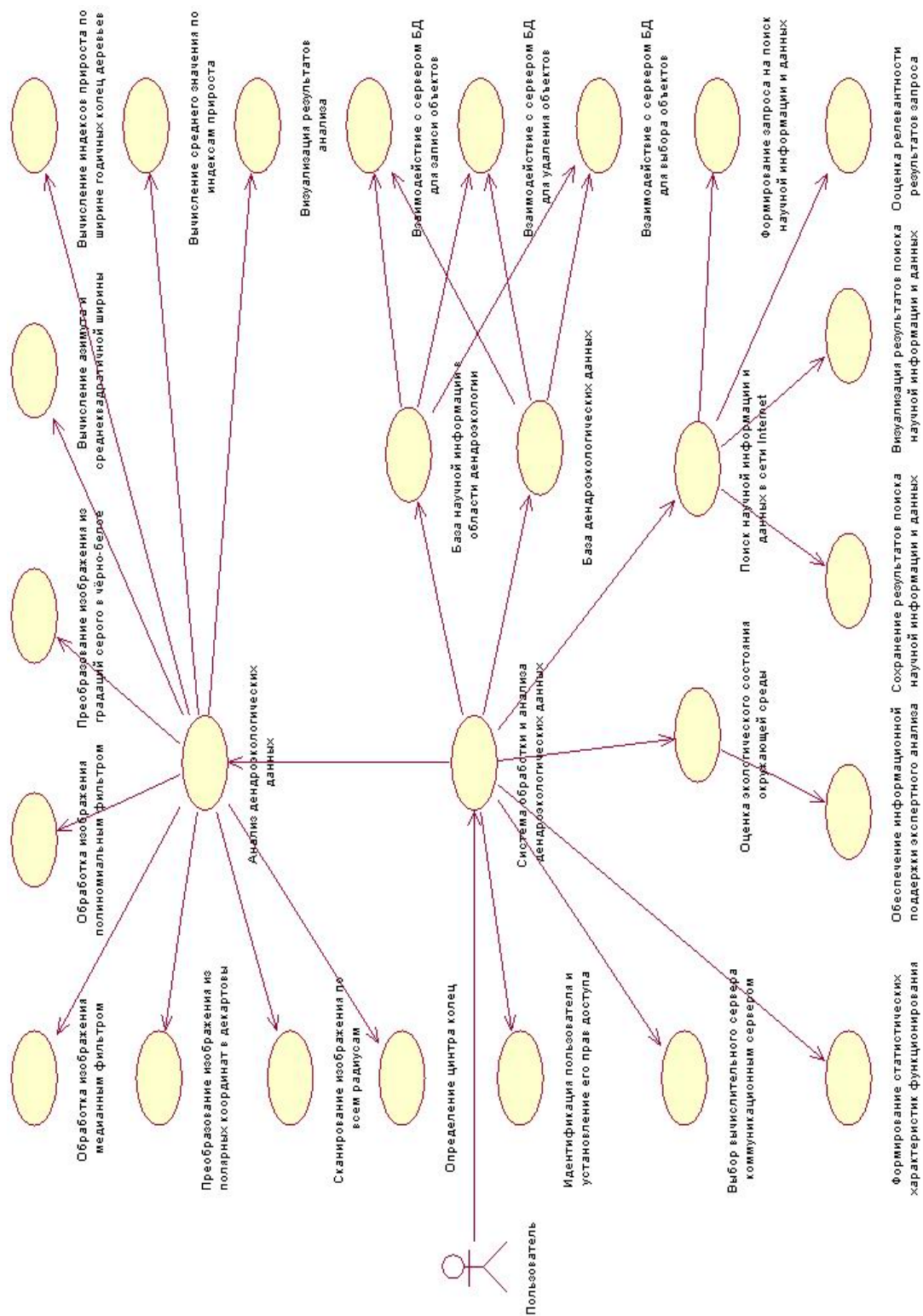


Рис. 3.1. Диаграмма вариантов использования блока анализа дендрологических данных

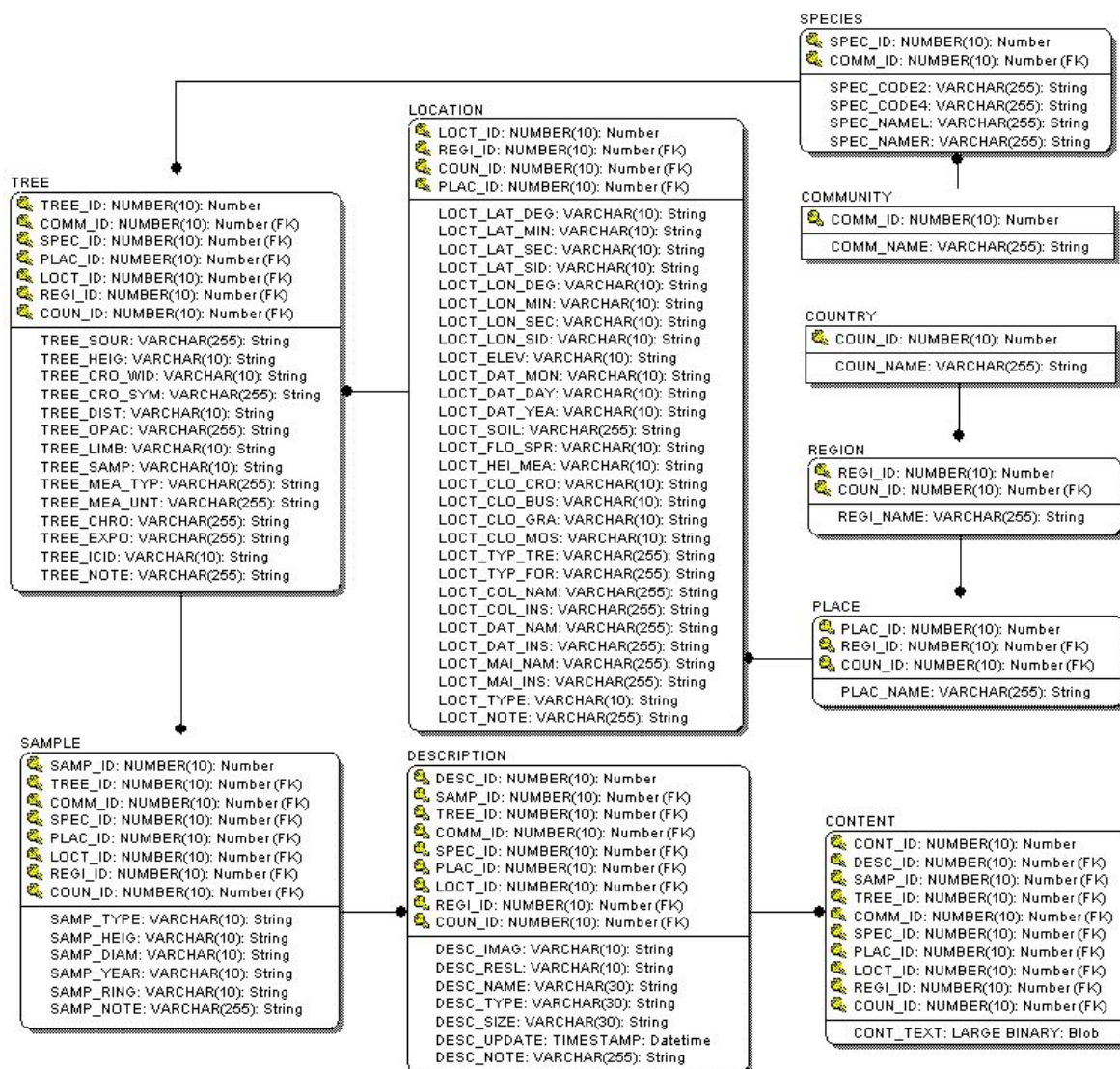


Рис. 3.2. Диаграмма структуры таблиц дендрозкологических данных

Проектирование модели базы данных состояло из двух этапов: составление логической модели и создание на ее основе физической модели. Логическое моделирование данных с использованием AllFusion ERwin Data Modeler было направлено на формирование описания схемы базы данных и разработку взаимосвязанных таблиц используемых данных. В этих таблицах хранятся все необходимые данные о дендрозкологических образцах. Уточнение содержания полей таблиц дендрозкологических данных приведено на рис. 3.2. Полная информация о структуре таблиц и спецификациях их полей приведена в разделе 4.5.3.

Таблицы COUNTRY, REGION и PLACE содержат название страны (поле COUN\_NAME), региона (поле REGI\_NAME) и места сбора (поле PLAC\_NAME) дендрозкологических образцов. Таблицы COMMUNITY и SPECIES содержат название сообщества деревьев (поле COMM\_NAME),

код (поля SPEC\_CODE2 и SPEC\_CODE4) и название вида дерева (поля SPEC\_NAME1 и SPEC\_NAME2), с которого взяты образцы. Таблица LOCATION содержит данные о широте места сбора (поля LOCT\_LAT\_DEG, LOCT\_LAT\_MIN, LOCT\_LAT\_SEC и LOCT\_LAT\_SID) и долготе места сбора (поля LOCT\_LON\_DEG, LOCT\_LON\_MIN, LOCT\_LON\_SEC и LOCT\_LON\_SID), его высоте над уровнем моря (поле LOCT\_ELEV), дате сбора (поля LOCT\_DAT\_MON, LOCT\_DAT\_DAY и LOCT\_DAT\_YEA), почве (поле LOCT\_SOIL), окружающей растительности (поле LOCT\_FLO\_SPR), фамилии сборщика (поле LOCT\_COL\_NAM), фамилии датировщика (поле LOCT\_DAT\_NAM) и т. д.

Таблица TREE содержит данные о высоте дерева (поле TREE\_HEIG), его ширине (поле TREE\_CRO\_WID), затененности (поле TREE\_OPAC), количестве образцов (поле TREE\_SAMP) и т. д. Таблица SAMPLE содержит данные о типе образца (поле SAMP\_TYPE), его высоте отбора (поле SAMP\_HEIG), размерах (поле SAMP\_DIAM), количестве годовых колец (поле SAMP\_RING) и т. д.

Таблица CONTENT содержит изображение годовых колец деревьев (поле CONT\_TEXT), а таблица DESCRIPTION содержит данные о типе изображения (поле DESC\_IMAG), его разрешении (поле DESC\_RESL), имени (поле DESC\_NAME), типе (поле DESC\_TYPE), размере файла с изображением (поле DESC\_SIZE) и т. д.

### **3.2. Архитектура и системные решения при реализации распределенных вычислений**

В настоящее время концепция распределенных вычислений нашла свое развитие в концепции grid-вычислений (grid-технологий) [166, 167]. Grid-технологии (метакомпьютинг) отличаются от существующей практики коллективного использования информационно-вычислительных ресурсов нацеленностью на инновационные grid-приложения, требующих значительных информационно-вычислительных ресурсов для обработки данных, иногда и в реальном времени. Классические grid-технологии, как правило, опираются на инфраструктуру глобальных телекоммуникаций и включают программное обеспечение следующих компонентов, объединенных в виде специального коммуникационного программного обеспечения (middleware): слой адаптации (предоставление вычислительных и информационных ресурсов для внешнего использования), слой связи (обеспечение коммуникации и безопасности), слой доступа к ресурсам (удаленное использование ресурсов без учета глобального состояния grid-системы), слой кооперации (организация взаимодействия с совокупностью распределенных ресурсов), слой координации (распределение использования ресурсов grid-систем во времени, путем диспетчирования

выполнения ее информационных сервисов и служб) и прикладное программное обеспечение (grid-приложения), ключевой особенностью которого является способность работать в grid-системе (географически распределенной и неоднородной вычислительной среде).

В настоящее время в применении grid-систем достаточно условно по функциональному назначению и режимам работы можно выделить пять основных классов приложений [168]:

- распределенные супервычисления (Distributed Supercomputing) – задачи, требующие значительной оперативной памяти и мощности процессорных ресурсов, возможности их масштабирования до сотен тысяч узлов.
- вычисления с высокой пропускной способностью (High-Throughput Computing) – подразумевает использование временно простаивающих по каким-либо причинам процессоров;
- вычисления по запросу (On-Demand Computing) – система информационных сервисов и служб, ориентированная, прежде всего, на аренду через Интернет в режиме защищенной связи (VPN) процессорного времени организациями и учреждениями, нуждающихся в больших вычислительных мощностях или в обработке больших объемов информации;
- вычисления с интенсивным обменом данными (Data-Intensive Computing) – ориентированы на планирование и описание конфигурации сложного, объемного пространства территориально распределенных данных со сложной иерархической структурой;
- совместные вычисления (Collaborative Computing) – нацелены на эффективное использование распределенных вычислительных ресурсов при совместной работе специалистов над проектами, обеспечивая при этом, главным образом, технологичность, экономичность и безопасность разнообразного информационного взаимодействия между ними.

Отметим, что обработка дендроэкологических данных требует разработки такого их информационного и программного обеспечения, которое бы поддерживало разделение и согласованное использование разнообразных территориально и организационно распределенных ресурсов с обеспечением требуемого качества обслуживания.

### **3.3. Разработка обобщенной функциональной структуры и алгоритмов функционирования многомашинного вычислительного комплекса**

Несмотря на усилия GGF (Global Grid Forum) выработать единую стратегию проектирования grid-систем на основе стандарта OGSA (Open Grid Services Architecture) и ее реализацию в виде клонов Globus Toolkit, рассчитывать на универсальность этой платформы и достаточность ее инструментария для разработки всех возможных grid-приложений на данный момент не приходится. Конкретика отдельных

сфер приложения может потребовать либо дополнительного отсутствующего в платформе инструментария, либо показать не эффективность и громоздкость существующих стандартных решений. Типичным примером подобной ситуации являются исследования по сбору, систематизации, хранению и обработке данных биоиндикации. Даже, если ограничиться только дендроэкологией, то масштабность задачи не снижается.

Ниже приведены критерии и требования, положенные в основу реализации многомашинного вычислительного комплекса для удаленного анализа изображений годичных колец деревьев, построенного на идеях grid-систем, разработанные на основе классических работ по grid-технологиям [166, 167] и многочисленных Интернет-публикаций на эту тему. Критерии и требования являются достаточно полными и обеспечивают функциональный набор операций, достаточных для эффективной реализации многочисленных приложений в области дендроэкологии: возможность одновременного использования нескольких компьютеров для выполнения разных частей заданий; обеспечение удаленного доступа к выполнению заданий; обеспечение инструментарием независимого включения и предоставления частных информационно-вычислительных ресурсов в состав программного комплекса; визуализация выполняемых в программном комплексе заданий и необходимых для их выполнения данных; обеспечение исследователей гарантированным запуском выбранных заданий с автоматической настройкой на необходимые для их выполнения вычислительных и информационных ресурсов; обеспечение безопасности используемых заданиями информационных и вычислительных ресурсов; многофункциональный мониторинг хода выполнения заданий и загрузки комплекса; унифицированный интерфейс всех уровней программного комплекса; независимое размещение информационных материалов и данных; открытость программного комплекса для возможных изменений его состава и адаптации под конкретные выполняемые задачи.

### ***3.3.1. Формирование профилей вычислительных серверов***

В управлении распределенными ресурсами одним из важнейших этапов является формирование (построение) согласованного проблемно-ориентированного описания схем вычислений многомашинного вычислительного комплекса (профилей вычислительных серверов), обеспечивающего единое информационное пространство и управляемость инфраструктурой компонентов, входящих в МВК.

Заметим, что процесс формирования профилей (метаописаний) вычислительных серверов базируется на ряде вспомогательных служб и сервисов его поддержки. Именно метаописание обеспечивает переносимость приложений, их функциональную расширяемость и интерактивное взаимодействие в рамках МВК.



Метаописание обеспечивает: интеграцию разнородных (гетерогенных) технических, программных и информационных ресурсов МВК, построение графа (дерева) распределения информационных ресурсов по компонентам МВК, динамичное масштабирование МВК для повышения его функциональности и вычислительной мощности, динамичную адаптацию структуры МВК под выполняемые задачи, идентификацию вычислительных серверов в МВК с необходимыми вычислительными алгоритмами и программами математической обработки данных, осуществление коллективного доступа к ресурсам МВК в режиме on-line, единый интерфейс работы с базой экспериментальных данных (доступность, управляемость, защищенность).

Описание физической структуры МВК (вычислительных серверов) формируется в таблице процессоров и включает основную и вспомогательную части (табл. 3.1).

Основная часть таблицы состоит из следующих полей: идентификационный номер вычислительного сервера, универсальный локатор ресурса (DNS-имя вычислительного сервера), универсальный локатор ресурса (IP-адрес вычислительного сервера), количество пользователей, использующих данный вычислительный сервер, максимальное количество одновременно работающих пользователей, состояние вычислительного сервера (Вкл./Выкл.).

Вспомогательная часть таблицы состоит из следующих полей: тактовая частота процессора вычислительного сервера, объем оперативной памяти вычислительного сервера, емкость накопителя на магнитных дисках вычислительного сервера, тип процессора вычислительного сервера, тип операционной системы вычислительного сервера, примечание.

Таблица 3.1

*Описание физической структуры МВК (вычислительных серверов)*

Основная часть						Вспомогательная часть					
ID сервера	DNS-имя	IP-адрес	Кол-во польз.	Макс. кол-во польз.	Вкл./Выкл.	Проч. ГГц	Память Мб	НМД. Гб	Тип проц.	Тип ОС.	Примеч.
1	www.trl1.ru	4.2.0.1	1	2	1	2,4	256	40	AMD	Unix	
2	www.trl2.ru	4.2.0.2	1	3	1	3,4	512	60	Intel	Windows	
3	www.trl3.ru	4.2.0.3	1	2	0	2,6	1024	80	Intel	OS Macintosh	
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Описание соответствия задач, имеющихся в МВК, и вычислительных серверов, выполняющих эти задачи (планирование распределения задач по компонентам МВК), формируется в таблице соответствия задач (табл. 3.2).

Полями таблицы соответствия задач являются: идентификационный номер задачи, идентификационный номер вычислительного сервера.

Описание вычислительной схемы задач и интерфейс по передаче управления формируется в таблице задач (табл. 3.3).

Основная часть таблицы состоит из следующих полей: идентификационный номер задачи, функциональное название задачи, частный локатор ресурса (путь к задаче на вычислительном сервере).

Вспомогательная часть таблицы состоит из следующих полей: рекомендуемая тактовая частота процессора вычислительного сервера для решения задачи, рекомендуемый объем оперативной памяти вычислительного сервера для решения задачи, рекомендуемая емкость накопителя на магнитных дисках вычислительного сервера для решения задачи, примечание.

Таблица 3.2

*Описание соответствия задач МВК и вычислительных серверов*

ID задачи	ID сервера
1	2
1	1
2	3
...	...

Таблица 3.3

*Описание вычислительной схемы задач и интерфейс по передаче управления*

Основная часть			Вспомогательная часть			
ID задачи	Название	Путь	Проц. ГГц	Память Мб	НМД. Гб	При меч.
1	Вычисление максимального прироста	/growth/index.php	1,7	128	0.1	
2	Вычисление индексов прироста	/index/index.php	2,2	256	0.3	
...	...	...	...	...	...	...

В рамках такого обобщенного метаописания структуры многомашинного вычислительного комплекса обеспечивается: универсальность использования функциональных программных решений обработки данных, единообразный интерфейс обращения к данным, распределенное хранилище данных (на основе серверов баз данных, поддерживающих SQL-запросы), адаптируемость (гибкость и настраиваемость) МВК на

решение функциональных задач, масштабируемость (расширение) компонентов МВК, контроль доступа к ресурсам МВК (защита) и учет их использования [169, 170].

### **3.3.2. Разработка алгоритма функционирования коммуникационного сервера**

С целью повышения реакции МВК (уменьшения времени отклика комплекса) на запросы пользователей и повышения надежности его работы, диспетчирование процессами обработки данных возложено на специальный коммуникационный сервер. Взаимодействие всех пользователей с многомашинным комплексом обработки осуществляется только через коммуникационный сервер. Основной задачей коммуникационного сервера является обеспечение оптимальной загрузки имеющихся в его распоряжении вычислительных серверов и обеспечение режима работы в реальном времени (online) пользователей. В такой ситуации пользователю уже не важно, на каком конкретном компоненте МВК выполняется его задача; он просто потребляет определенное количество виртуальной процессорной мощности, имеющейся в МВК.

Алгоритмы выбора вычислительного сервера могут быть различными. Например, первый найденный в таблице процессоров, выбранный случайным образом, наименее часто используемый и др. В реальных условиях, при ограниченном числе компонентов МВК и их многофункциональности (на вычислительный сервер возложено решение нескольких задач обработки данных), задача разработки оптимального алгоритма очень важна.

Схема разработанного алгоритма выбора вычислительного сервера коммуникационным сервером (рис. 3.3) основывается на информации, содержащейся в профилях (метаописаниях) вычислительных серверов. Основным критерий выбора заключается в поиске такого сервера, для которого разность между количеством пользователей, использующих данный вычислительный сервер, и максимальным количеством одновременно работающих пользователей максимальна.

Основные шаги алгоритма иллюстрируются на гипотетическом профиле МВК, который отображается только основной частью:

Шаг 1. На основании идентификатора задачи, указанной пользователем, из таблицы процессоров (табл. 3.1) формируется список вычислительных серверов, которые могут выполнить эту задачу. Предположим, что из списка выбрано пять серверов, включающих инфраструктуру для выполнения данной задачи (табл. 3.4).

Шаг 2. Из сформированного списка вычислительных серверов исключаются выключенные серверы (табл. 3.5). Основанием для исключения является значение поля Вкл. / Выкл.

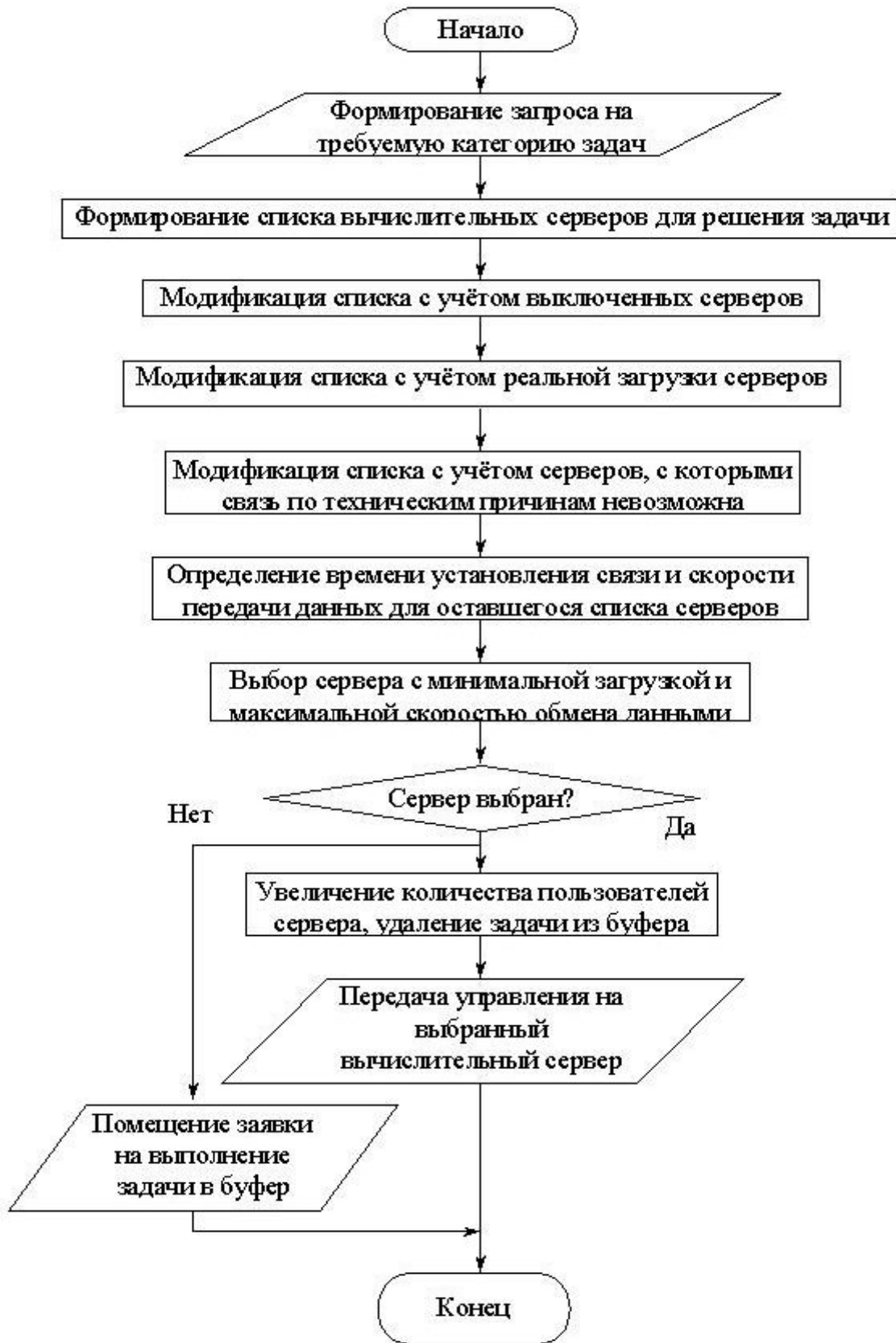


Рис. 3.3. Блок-схема алгоритма функционирования коммуникационного сервера

Шаг 3. Из оставшегося списка вычислительных серверов исключаются серверы, для которых количество пользователей, использующих данный вычислительный сервер, равно максимальному количеству одновременно работающих пользователей (табл. 3.6).

Таблица 3.4

*Результат шага 1 алгоритма выбора вычислительного сервера*

Основная часть					
ID сервера	DNS-имя	IP-адрес	Кол-во польз.	Макс. кол-во польз.	Вкл./Выкл.
1	www.tr11.ru	4.2.0.1	1	3	1
2	www.tr12.ru	4.2.0.2	3	4	1
3	www.tr13.ru	4.2.0.3	2	4	1
4	www.tr14.ru	4.2.0.4	3	3	1
5	www.tr15.ru	4.2.0.5	1	3	0

Таблица 3.5

*Результат шага 2 алгоритма выбора вычислительного сервера*

Основная часть					
ID сервера	DNS-имя	IP-адрес	Кол-во польз.	Макс. кол-во польз.	Вкл./Выкл.
1	www.tr11.ru	4.2.0.1	1	3	1
2	www.tr12.ru	4.2.0.2	3	4	1
3	www.tr13.ru	4.2.0.3	2	4	1
4	www.tr14.ru	4.2.0.4	3	3	1
<del>5</del>	<del>www.tr15.ru</del>	<del>4.2.0.5</del>	<del>1</del>	<del>3</del>	<del>0</del>

Таблица 3.6

*Результат шага 3 алгоритма выбора вычислительного сервера*

Основная часть					
ID сервера	DNS-имя	IP-адрес	Кол-во польз.	Макс. кол-во польз.	Вкл./Выкл.
1	www.tr11.ru	4.2.0.1	1	3	1
2	www.tr12.ru	4.2.0.2	3	4	1
3	www.tr13.ru	4.2.0.3	2	4	1
<del>4</del>	<del>www.tr14.ru</del>	<del>4.2.0.4</del>	<del>3</del>	<del>3</del>	<del>1</del>

Шаг 4. Далее исключаются серверы, с которыми связь по техническим причинам невозможна (табл. 3.7). Исключение вычислительных серверов по доступности осуществляется на основе результатов установки с ними сетевого соединения.

Шаг 5. Для всех оставшихся вычислительных серверов определяется время установления связи и скорость передачи данных (на основе передачи контрольных пакетов информации) (табл. 3.8).

Шаг 6. Определяется сервер с максимально свободной вычислительной мощностью, т. е. рабочим вычислительным сервером становится тот, у которого разность между количеством пользователей, использующих данный вычислительный сервер, и максимальным количеством одновременно работающих пользователей максимальна (табл. 3.9).

Шаг 7. При наличии нескольких серверов с одинаковой вычислительной мощностью выбирается тот сервер, с которым скорость обмена данными выше.

Шаг 8. После выбора вычислительного сервера значение поля Количество пользователей увеличивается на единицу (табл. 3.10). Если задача на выполнение была выбрана из буфера коммуникационного сервера, то происходит ее удаление из очереди.

Шаг 9. При отсутствии серверов со свободными вычислительными мощностями заявка на выполнение задачи помещается в буфер коммуникационного сервера. Дисциплина выбора задач из буфера на выполнение осуществляется по принципу FIFO (первым зашел – первым обслужен) в моменты времени, когда завершается выполнение какой-либо задачи и происходит переформирование в таблице процессоров (табл. 3.1).

Шаг 10. Управление передается на выбранный вычислительный сервер, а коммуникационный сервер переходит в режим ожидания различных управляющих команд.

Таблица 3.7

Результат шага 4 алгоритма выбора вычислительного сервера

Основная часть					
ID сервера	DNS-имя	IP-адрес	Кол-во польз.	Макс. кол-во польз.	Вкл./Выкл.
1	www.tr11.ru	4.2.0.1	1	3	1
2	www.tr12.ru	4.2.0.2	3	4	1
3	www.tr14.ru	4.2.0.4	2	4	1

Таблица 3.8

Результат шага 5 алгоритма выбора вычислительного сервера

ID сервера	Время установления связи	Скорость передачи данных
1	0.263	39090
2	1.195	18170

Таблица 3.9

*Результат шага 6 алгоритма выбора вычислительного сервера*

Основная часть					
ID сервера	DNS-имя	IP-адрес	Кол-во польз.	Макс. кол-во польз.	Вкл./Выкл.
1	www.trl1.ru	4.2.0.1	1	3	1
<del>2</del>	<del>www.trl2.ru</del>	<del>4.2.0.2</del>	<del>2</del>	4	<del>1</del>

Таблица 3.10

*Результат шага 8 алгоритма выбора вычислительного сервера*

Основная часть					
ID сервера	DNS-имя	IP-адрес	Кол-во польз.	Макс. кол-во польз.	Вкл./Выкл.
1	www.trl1.ru	4.2.0.1	1	3	1

Заметим, что коммуникационный сервер инициализируется и после завершения очередной задачи вычислительным сервером и подтверждения пользователем ее окончания. В этом случае происходит передача управляющей информации коммуникационному серверу, в соответствии с которой изменяется профиль МВК (уменьшаются значения поля Количество пользователей для соответствующего вычислительного сервера, в таблице процессоров). Далее коммуникационный сервер анализирует содержимое буфера и при наличии заявки инициирует выбор вычислительного сервера для ее выполнения.

В целях повышения эффективности работы МВК все запущенные вычислительные серверы постоянно контролируются на активность работы. В случае их бездействия в течение определенного времени (таймаута, определяемого настройками администратора) происходит освобождение соответствующего вычислительного ресурса (изменение профиля МВК) [169].

### **3.3.3. Разработка алгоритма динамического определения реального времени отклика вычислительных серверов**

С целью минимизации времени взаимодействия пользователя с МВК, а также в целях повышения отказоустойчивости МВК, разработан специальный алгоритм динамического определения реального времени отклика вычислительных серверов (ВС). Эта процедура востребована в алгоритме выбора ВС для решения функциональной задачи, а также при реализации административного и пользовательского интерфейсов. По умолчанию алгоритмом осуществляется проверка связи и определения скорости обмена данными по стандартному порту web-обозревателей (80).

Проверка связи осуществляется контрольной установкой сетевого соединения с указанным вычислительным сервером и программой, закрепленной на нем за стандартным портом web-обозревателя. При этом возможно задание времени, в течении которого будет устанавливаться связь (таймаут). По истечении этого времени, если связь с сервером не установлена, выдается ошибка и данный ВС считается неработоспособным. Для работы алгоритма существенно максимальное время выполнения РНР-программы, заданное в настройках РНР. В случае, если это время меньше времени, необходимого для установления реальной связи с ВС, то работа алгоритма прекращается без результатов диагностики, так как исчерпан лимит времени работы программы. Если же за время работы программы фиксируется явное отсутствие связи с ВС, то определяется код ошибки (не равный нулю) и текст сообщения об ошибке. В случае успешного установления связи производится расчет времени соединения с ВС.

Следующий этап работы алгоритма связан с определением скорости обмена данными. В стандартный порт web-обозревателя удаленного ВС посылается HTTP-запрос и принимается ответ вместе с заголовками и главной страницей сервера. При этом фиксируется время начала передачи запроса и время прихода ответа, а также количество принятых данных. На основе этой информации определяется реальная скорость передачи данных с конкретным ВС. Эта операция проводится несколько раз, таким образом, рассчитывается средняя скорость передачи данных и работа программы заканчивается [169].

#### ***3.3.4. Разработка подсистемы контроля и разграничения прав доступа к информационно-вычислительным ресурсам комплекса***

Уже сам процесс авторизации (мандатный доступ), если он осуществлен корректно, предоставляет пользователю определенные права на доступ к ресурсам и их использованию. Уровень привилегий пользователя определяется принадлежностью введенного логического имени к той или иной рабочей группе. Формирование стандартных привилегий для рабочих групп осуществляется на этапе формирования выполняемых комплексом задач.

В приведенных ниже таблицах (табл. 3.11–3.14) описывается формирование фрагментов доступа к ресурсам. Для пользователя с идентификационным номером 1 (табл. 3.11) по санкционированной для него задаче с идентификационным номером 2 (табл. 3.12) разрешены операции с идентификационными номерами 2 и 3 (табл. 3.13, 3.14).

Такое штатное разграничение прав доступа не достаточно для обеспечения гибкой политики доступа к информационно-вычислительным



ресурсам МВК, так как и в рамках рабочей группы не всем ее пользователям должны быть полностью доступны ее ресурсы и сервисы.

Таблица 3.11

*Описание пользователей*

ID пользователя	ФИО	Организация	Ранг	...	Примечание
1				...	
2				...	
3				...	
...	...	...	...	...	...

Таблица 3.12

*Описание соответствия задач МВК и пользователей*

ID задачи	ID пользователя
1	2
2	1
1	3
...	...

Таблица 3.13

*Описание соответствия операций и пользователей*

ID операции	ID пользователя
1	2
2	1
3	1
...	...

Таблица 3.14

*Описание операций*

ID операции	Название операции	Примечание
1	Вставить	
2	Обновить	
3	Удалить	
...	...	...

Разграничение же прав доступа пользователей к информационно-вычислительным ресурсам комплекса на основе матрицы доступа (дискреционный доступ) слишком громоздко (не рационально хранить имена всех пользователей и ресурсов МВК в одной таблице).

Кроме того, существенным недостатком мандатного и дискреционного методов доступов является возможность полного доступа в рамках рабочей группы к ресурсам при несанкционированном получении логического имени и пароля. Так как разграничение прав доступа конкретного пользователя уже статически априорно заданно.

С целью устранения этого недостатка в данной работе дополнительно осуществляется динамическое формирование описания прав доступа пользователей к ресурсам при выполнении конкретных проектов. В соответствии с выполняемым проектом, только определенный круг пользователей получает те или иные права доступа к информационно-вычислительным ресурсам МВК. Формирование списков привилегий (для задач – исполнение, для системы управления базами данных – вставка, обновление, удаление и т. д.) осуществляется локальными администраторами комплекса на основе официальной информации от участников проекта по конкретным исследованиям (табл. 3.15).

В табл. 3.15 используются следующие обозначения для манипулирования с ресурсами: И – исполнение, В – вставка, О – обновление, У – удаление, З – запрет использования. Так для пользователя с идентификационным номером 1 в работе над проектом разрешены следующие операции: с ресурсом 1 – исполнение, с ресурсом 2 – вставка, обновление и удаление, с ресурсом 3 – запрет на использование.

Таблица 3.15

*Описание прав доступа пользователей к ресурсам*

Название проекта				
ID пользователя	Ресурс 1	Ресурс 2	Ресурс 3	...
1	И	В О У	З	...
2	И	В У	З	...
3	З	В	И	...
...	...	...	...	...

Таким образом, реализуется более высокая степень защиты ресурсов от их несанкционированного использования. Кроме того, при таком формировании прав доступа не возникает неоднозначности в использовании ресурсов при участии одного пользователя в работе над несколькими проектами, так как для каждого проекта динамически формируется индивидуальная матрица доступа [169].

### **3.3.5. Разработка подсистемы инструментальных средств администратора комплекса**

Исторически сложившаяся концепция централизованного управления вычислительными комплексами, и широко используемая на начальном этапе их эксплуатации, не может быть использована при реализации технологии распределенных вычислений. В виду громоздкости и сложности таких технологий, слишком большая нагрузка по изменению режимов работы отдельных вычислительных серверов, параметров конфигурации и т. д. ложится на операционную систему и администра-

тора многомашинного комплекса, поддерживающего эту технологию. Объединение нескольких вычислительных серверов для решения одной функциональной задачи, но работающих под разными операционными системами, требует не только тщательного продуманного интерфейса по данным, но и делегирования определенных полномочий по управлению и на сами вычислительные серверы.

В данной работе схема администрирования многомашинного вычислительного комплекса представлена в виде двух уровней. В такой схеме выделены функции администрирования верхнего и нижнего уровней. В соответствии с ними различаются и две группы администраторов. Эти группы администраторов имеют явно выраженную иерархическую структуру – администратор верхнего уровня обладает более высокими полномочиями по сравнению с администраторами нижнего уровня. Такое разграничение полномочий по управлению МВК введено для обеспечения оперативности управления и повышения устойчивости работы комплекса.

Функционирование многомашинного вычислительного комплекса поддерживается многочисленными администраторскими функциями. Администратору верхнего уровня (администратору МВК) доступен весь набор функций управления. Администраторам же нижнего уровня управления (администраторам вычислительных серверов) доступна только некоторая часть этих функций. Набор функций управления МВК является функционально полным и классифицирован как для верхнего, так и нижнего уровней следующим образом: функции формирования конфигурации МВК, функции формирования и изменения профилей пользователей, функции редактирования структуры и содержимого базы данных, функции мониторинга и контроля работы МВК, функции диалога администраторов, внутренние системные функции.

Функции формирования конфигурации МВК. Обеспечивают добавление или удаление как аппаратных, так и программных (функциональных) компонентов МВК. Именно эти функции обеспечивают реализацию масштабируемости аппаратных компонентов многомашинного вычислительного комплекса и расширение его функциональности. Функции формирования конфигурации обеспечивают распознавание добавляемых ресурсов (вычислительный сервер, сервер базы данных), резервирование вычислительных серверов и серверов баз данных, настройку добавляемых ресурсов, а также добавление или удаление функциональных задач и схем их реализации на вычислительных серверах МВК.

Для обеспечения мобильности описания схем расположения функциональных обрабатываемых компонентов на вычислительных серверах, администраторам ВС доступны функции изменения содержимого

полей таблицы процессоров. Это необходимо, например, при изменении физического расположения вычислительных модулей или при изменении параметров вычислительного сервера и т. д.

Процедура добавления вычислительного сервера в МВК выполняется по следующей схеме:

- 1) развертывание на добавляемом сервере администратором ВС или МВК локальной системной части программных средств комплекса;
- 2) формирование администратором МВК в таблице процессоров записи о добавленном ВС.

Процедура добавления функциональной задачи на свободный ВС в МВК выполняется по следующей схеме:

- 1) формирование администратором ВС описания реальной схемы размещения функциональных модулей для задач;
- 2) развертывание на свободном ВС администратором ВС или МВК функциональных модулей выполняемой задачи, в соответствии с описанием реальной схемы их размещения;
- 3) формирование администратором МВК в таблице задач записи о функциональной задаче, выполняемой на свободном ВС.

Функции удаления как аппаратных, так и функциональных компонентов МВК осуществляется по аналогичным процедурам.

Функции формирования и изменения профилей пользователей. Включают регистрацию и удаление пользователей, формирование привилегий и прав доступа к ресурсам для исследователей, изменение приоритетов выбора заданий на выполнение из буфера коммуникационного сервера.

Функции редактирования структуры и содержимого базы данных. Включают корректировку структуры базы данных (создание, удаление и модификация таблиц), корректировку содержимого базы данных (вставка, удаление и модификация данных). Набор этих функций позволяет администратору МВК, не обращаясь к разработчикам, полностью контролировать и реализовать необходимые для работы МВК структуру и содержимое базы данных.

Функции мониторинга и контроля работы МВК. Обеспечивают ведение и просмотр системных журналов (лог-файлов), в которых фиксируются действия всех пользователей (администраторов и исследователей) МВК при использовании или модификации его информационно-вычислительных ресурсов. Формирование системных журналов на каждом вычислительном сервере обеспечивается автономно. Результаты такого системного автономного мониторинга обновляются в базе данных по завершению работы пользователей и в любой момент доступны администратору МВК.

При необходимости, администратор МВК имеет возможность осуществить проверку (контроль) работоспособности комплекса на тестовой задаче. Тестовая задача включает минимальный спектр функций, необходимых для проверки нормального функционирования комплекса (диалог, математическая обработка и взаимодействие с базой данных). Тестовая задача и данные для ее работы непосредственно встроены в локальную системную часть ВС. Основное назначение этой функции – проверка работоспособности ВС при его первом включении в МВК.

Функции диалога администраторов. Функции обеспечивают, в первую очередь, информационную поддержку диалога администраторов верхнего и нижнего уровней при масштабировании МВК и расширении спектра выполняемых им задач.

Кроме того, администраторы могут обмениваться между собой короткими сообщениями (до 256 символов) по внутренней почте, что увеличивает оперативность взаимодействия.

Внутренние системные функции. Это многочисленные функции внутреннего системного ядра МВК, поддерживающие его функционирование в различных режимах. Например, это функции внутренней адаптации к изменениям параметров работы вычислительных и информационных ресурсов. В частности, это функции, поддерживающие задание тайм аута активности пользователя и обработку его завершения. Задание тайм аута, в основном для пользователей ВС, очень важно в функционировании МВК, так как позволяет исключить «сумеречную зону» пользователей, т. е. корректно завершить работу пользователей, по каким-либо причинам, не выполнившим правильное завершение транзакций с коммуникационным сервером. Это и функции, обеспечивающие единый логический адрес вычислительных серверов в структуре МВК (при физическом переконфигурировании), и функции манипулирования с ресурсами (файлами), которые не являются объектами централизованного управления, и функции диспетчеризации и синхронизации выполнения функциональной задачи и т. д. [169].

### ***3.3.6. Разработка интерфейсных средств пользователей комплекса***

Предоставление качественных информационно-вычислительных сервисов исследователям очень важно, а использование самих сервисов должно быть достаточно технологично. Все функции интерфейсных средств пользователей классифицированы следующим образом: функции работы с базами данных, функции работы с задачами, функции экспорта и импорта данных, функции навигации по программному комплексу, функции диалога с администраторами, справочно-информационные функции.

Функции работы с базами данных. Исследователям, в соответствии с назначенным администратором маркером прав доступа, предоставлено в той или иной степени использование следующих функций: поиск информации, просмотр, добавление, удаление и обновление данных.

Функции работы с задачами. Исследователям предоставлена возможность выбора необходимых функциональных задач, их инициализация, контроля их удаленного выполнения, визуализация и сохранения результатов.

Функции экспорта и импорта данных. Исследователям предоставлена возможность импорта данных для обработки и анализа как в виде графических файлов в формате \*.png, содержащих изображение годовых колец деревьев, так и в виде текстовых файлов в формате \*.txt, содержащих оцифрованные данные ширины годовых колец деревьев. Для удобства обработки и анализа данных используется специальный внутренний формат их хранения. Результаты обработки и анализа данных исследователям могут сохранить в базе дендроэкологических данных и экспортировать в виде графических или текстовых файлов.

Функции навигации по программному комплексу. Функции навигации предоставляют исследователям многочисленные процедуры по взаимодействию с многомашинным комплексом от получения справочной информации и работой с базами данных, до решения необходимых функциональных задач.

Функции диалога с администраторами. Функции обеспечивают, в первую очередь, информационную поддержку диалога исследователей с администраторами с целью получения консультаций при работе с комплексом. Кроме того, исследователи могут обмениваться короткими сообщениями (до 256 символов) по внутренней почте и между собой.

Справочно-информационные функции. Справочно-информационные функции включают получение информационных материалов по предоставляемым функциональным возможностям многомашинного комплекса, материалы по практической работе с ним, получение статистических данных по выполнению задач, получение различной научной информации в области дендроэкологии [169].

### **3.3.7. Архитектура многомашинного вычислительного комплекса**

Стратегия разработки архитектуры многомашинного вычислительного комплекса обработки дендроэкологических данных направлена на обеспечение возможности управления использованием его ресурсов не как совокупностью компьютеров, а как набором информационных сервисов, каждый из которых использует определенный объем ресурсов. При таком управлении виртуализируются три основных технических

ресурса, на которых и строится высокопроизводительный многомашинный комплекс обработки дендрэкологических данных (вычислительные серверы, серверы баз данных и глобальные коммуникации). Таким образом, не только технические, но и программные ресурсы объединяются в единый виртуальный компьютер, а затем предоставляются в виде информационных сервисов исследователям. Такая стратегия разработки архитектуры комплекса уменьшает сложность при создании инфраструктур и сервисов, поддерживающих обработку дендрэкологических данных, сокращает время подготовки данных и инициализации функциональных задач, повышает уровень эффективности использования как технических, так и программных ресурсов.

В соответствии с принятой стратегией разработки архитектуры комплекса и на основе полученной диаграммы развертывания (раздел 3.1) разработана обобщенная функциональная структура многомашинного вычислительного комплекса обработки дендрэкологических данных (рис. 3.4), обеспечивающая иерархическое децентрализованное распределение и выполнение заданий. Структура отображает сетевую среду распределенных вычислений с децентрализованной иерархической системой управления, объединяющую разнородные информационно-вычислительные ресурсы. На верхнем уровне иерархии коммуникационный сервер распределяет задачи по вычислительным серверам сегментов в соответствии с разработанным алгоритмом оптимальной загрузки. В случае необходимости непосредственного обращения исследователя к определенному вычислительному сегменту, на нижнем уровне иерархии должен быть установлен управляющий сервер, который координирует выполнение заданий на вычислительных серверах своего сегмента.

Сетевая среда представляется совокупностью вычислительных сегментов, ассоциирующихся с локальными сетями информационно-вычислительных ресурсов организаций и предприятий, и связанных каналами передачи данных для предоставления исследователям прозрачного доступа к информационно-вычислительным ресурсам сетевой среды.

В общем случае в вычислительном сегменте предусматривается неограниченное число вычислительных серверов и серверов баз данных. Как было отмечено выше, управление вычислительными серверами сегмента и координация взаимодействия с коммуникационным сервером или с другими вычислительными сегментами может быть возложено на специальный управляющий сервер. В частном случае вычислительный сегмент может быть представлен одним компьютером, содержащим все перечисленные выше серверы.

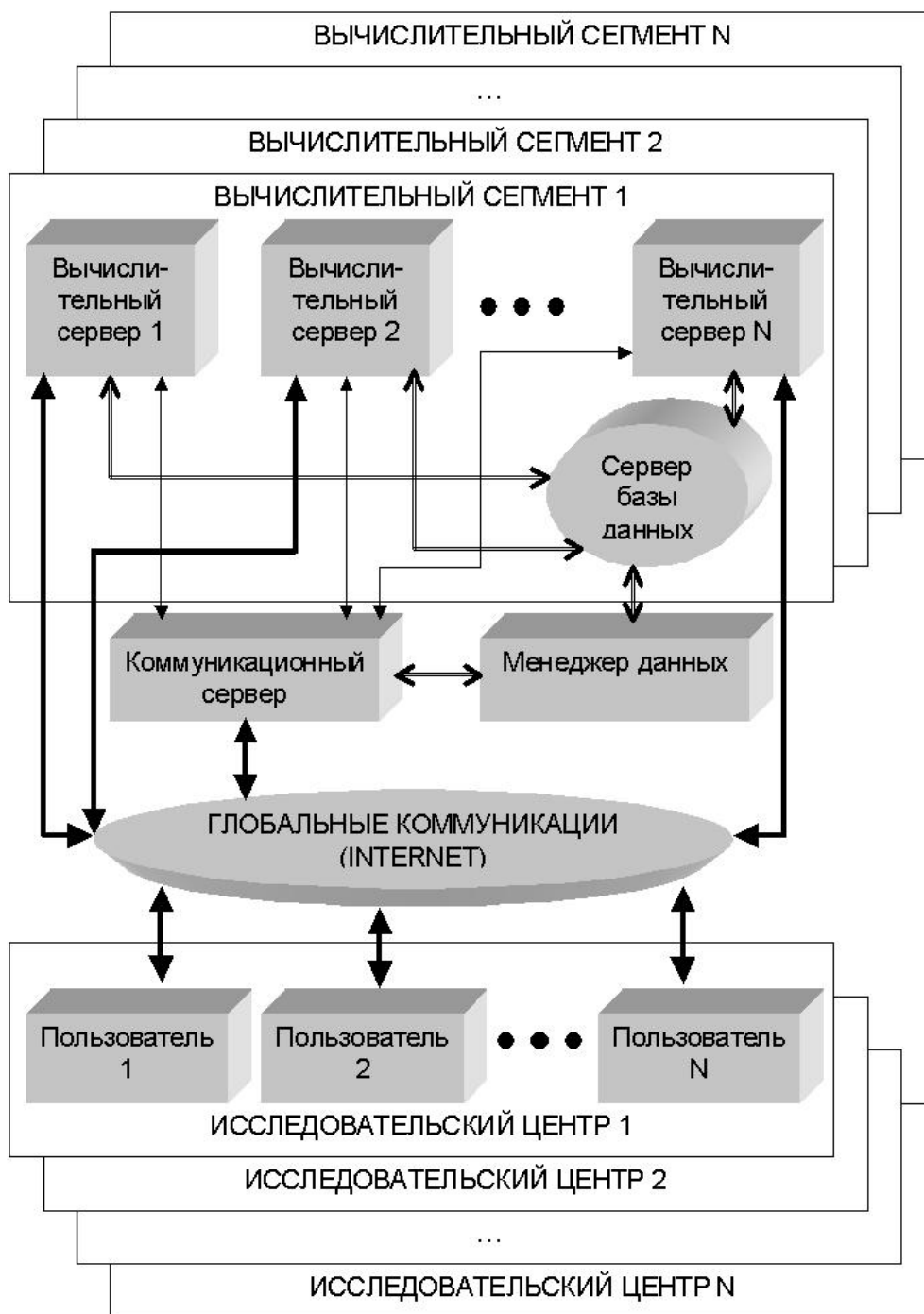


Рис. 3.4. Виртуальный центр обработки дендрэкологических данных

В структуре многомашинного вычислительного комплекса обработки дендрэкологических данных выделены вычислительные серверы, коммуникационный сервер и сервер баз данных. Сложившиеся научные школы в обработке дендрэкологических данных объединяются в рамках специализированных вычислительных центров (вычислительных сегментов), включающих вычислительные серверы для решения их функциональных задач.



Управление процессами обработки дендрэкологических данных возложено на специальный коммуникационный сервер. Взаимодействие всех исследователей с комплексом обработки осуществляется, в основном, через коммуникационный сервер. Основной задачей коммуникационного сервера является обеспечение оптимальной загрузки имеющихся в его распоряжении вычислительных серверов и обеспечение режима работы в реальном времени (online) исследователей. В такой ситуации исследователю уже не важно, на каком конкретном вычислительном сервере выполняется его задание; он просто потребляет определенное количество виртуальной процессорной мощности, имеющейся в комплексе. В базе данных коммуникационного сервера хранится информация о всех вычислительных серверах комплекса.

Также может быть предоставлена возможность непосредственного взаимодействия исследователей для выполнения заданий с конкретным вычислительным сегментом через дополнительно установленный управляющий сервер, которому доступны информационно-вычислительные ресурсы только своего сегмента. В этом случае исследователю предоставляется информация о спектре задач, которые можно выполнить в данном сегменте, и загруженности его вычислительных серверов. И решение о запуске задания принимает сам исследователь. Если исследователь принял решение о выполнении задания на данном вычислительном сегменте, то сервер, принявший работу, модифицирует соответствующие записи о своем состоянии в базе данных коммуникационного сервера и управляющего сервера своего сегмента. В базе данных управляющего сервера хранится информация о всех вычислительных серверах сегмента.

Функциональные задачи, на решение которых направлены алгоритмы математической обработки, реализованные на серверах вычислительных сегментов, могут быть самыми различными. Например, вычисление радиального роста дерева в период вегетации, построение длительных древесно-кольцевых хронологий и т. д. Для обеспечения возможности включения функциональных задач в пул информационно-вычислительных ресурсов необходимо, чтобы они придерживались единого интерфейса для связи с коммуникационным сервером.

Для полноценного функционирования комплекса анализа дендрэкологических данных необходимо организовать автоматизированный сбор, систематизацию и хранение научной информации в области дендрэкологического мониторинга, а также формирование и ведение базы дендрэкологических данных. Выполнение этих задач возложено на менеджера данных. Менеджер данных управляет работой распределенных серверов баз данных, расположенных в вычислительных сегментах. Взаимодействие менеджера данных с серверами баз данных осуществ-

ляется через специальный модуль административной части многомашиного вычислительного комплекса.

Модель управления вычислительными серверами сегментов основана на создании пула анонимных и лишенных самостоятельности информационно-вычислительных ресурсов (обобщенного описания состояния ресурсов). Управление подразумевает конфигурирование, администрирование и мониторинг этого пула ресурсов. В пуле предусмотрено управление пользовательским интерфейсом, управление данными, управление коммуникацией (связью) компонентов комплекса как единым целым, управление интеллектуальной обработкой дендроэкологических данных в вычислительных центрах. Описание пула ресурсов (метаописание пула) фиксируется в специальных таблицах базы данных. Для решения разнообразных экологических задач администраторами верхнего и нижнего уровней в таком метаописании формируются профили вычислений и вычислительных задач, что обеспечивает единое информационное пространство и управляемость инфраструктурой компонентов, входящих в многомашиный вычислительный комплекс. Для каждого выполняемого задания существует метаописание, в котором указываются необходимые для решения прикладной задачи данные и требования к вычислительным ресурсам. Инициализация задания осуществляется исследователем через специальный сервис взаимодействия с комплексом. Планирование выполнения заданий в многомашином вычислительном комплексе состоит в поиске для каждого задания необходимого вычислительного ресурса. Алгоритм выделения вычислительных ресурсов нацелен на выравнивание загрузки многомашиного вычислительного комплекса и основывается на результатах работы специальных сервисных модулей и профилях вычислений. Сервисные модули собирают информацию о загруженности вычислительного ресурса. Профили вычислений позволяют объединить несколько серверов в единый вычислительный ресурс и осуществить диспетчеризацию (управление) обработки дендроэкологических данных. Наличие в профиле вычислений специального блока разграничения прав доступа (политики доступа) дополнительно к диспетчеризации, позволяет изменить обычный алгоритм отправки задания на выполнение – диспетчер заданий руководствуется не только наличием свободных ресурсов, но и тем, имеет ли данный пользователь соответствующие права. После передачи коммуникационным или управляющим сервером задания конкретному вычислительному серверу, последний передает информацию об изменении своего состояния в базы данных коммуникационного и управляющего серверов.

Администрирование многомашиного вычислительного комплекса обработки дендроэкологических данных включает получение данных мониторинга и статистики по работе его компонентов и на их основе

оптимизацию использования информационно-вычислительных ресурсов. Например, административный интерфейс позволяет задавать различные параметры вычислительных задач, такие, как приоритеты, требуемые ресурсы оборудования, временные характеристики выполнения, права пользователей на доступ к тем или иным ресурсам и др. [169].

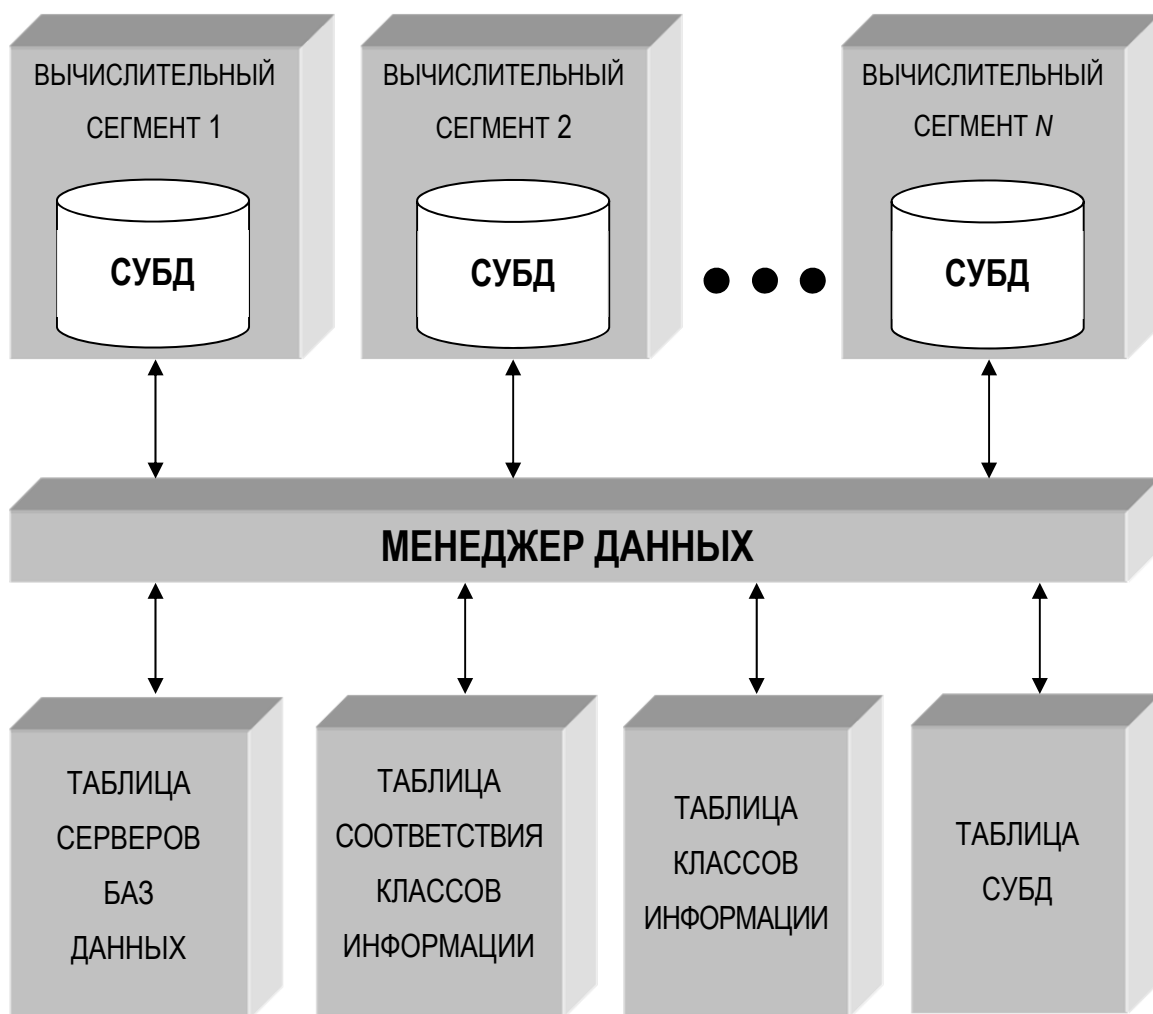
Эффективность предлагаемой функциональной структуры и схемы распределения заданий доказывается имитационными экспериментами (раздел 4.1) и практической апробацией при реализации многомашинного вычислительного комплекса удаленного анализа изображений годичных колец деревьев (раздел 4.4).

### **3.4. Разработка обобщенного алгоритма управления данными в многомашинном вычислительном комплексе**

Технологии распределенной обработки информации, как правило, подразумевают использование и распределенных систем хранения данных. В своем развитии, системы хранения данных прошли большой путь от СУБД, функционирующих на одной машине, до объектно-ориентированных и виртуальных информационных систем, интегрирующих разнородную информацию, размещенную на различных ЭВМ (концепция виртуальных хранилищ данных). Под виртуализацией понимается логическое объединение в одном пуле всех используемых накопителей информации и реализация интерфейса для обеспечения единообразного доступа к ним [171].

С целью не нарушения существующей технологии и практики работы с базами данных в настоящей работе, в качестве одного из решений проблемы виртуализации хранения информации, представлена концепция интеграции баз данных (информационных ресурсов), основанная на «общении» менеджера данных с серверами распределенных баз данных и обеспечивающая создание единого информационного пространства. Отметим, что объединяются ресурсы любых систем управления базами данным, поддерживающих технологию SQL-запросов. Обобщенная схема взаимодействия менеджера данных с распределенными базами данных приведена на рис. 3.5.

Функционирование менеджера данных основывается на информации, формируемой в системной базе данных в таблицах серверов баз данных, соответствия классов информации и описания классов информации. Содержимое указанных таблиц формируется и корректируется как на этапе описания конфигурации МВК (статическое формирование), так и в процессе его работы (динамическое формирование).



*Рис. 3.5. Схема взаимодействия менеджера данных с распределенными базами данных*

Описание физической структуры серверов баз данных и включенных в логическую виртуальную информационную инфраструктуру МВК формируется в таблице серверов баз данных (табл. 3.16).

Полями таблицы серверов баз данных являются: идентификационный номер сервера базы данных, логическое имя для входа в базу данных, пароль для входа в базу данных, тип протокола, на котором работает сервер базы данных, универсальный локатор сервера базы данных (DNS-имя), универсальный локатор сервера базы данных (IP-адрес), признак функционального режима сервера базы данных (0 – данные отсутствуют, 1 – разрешены операции чтения, записи, редактирования и удаления, 2 – данные доступны для чтения, редактирования и удаления), состояние сервера базы данных (Вкл./Выкл.), примечание.

Описание соответствия классов информации, серверов баз данных, на которых хранится эта информация и типом СУБД, которая управляет

данными, формируется в таблице соответствия классов информации (табл. 3.17).

Таблица 3.16

*Описание серверов баз данных*

ID сервера	Логическое имя	Пароль	Протокол	DNS-имя	IP-адрес	Функционирование	Вкл./Выкл.	Примеч.
1	sql1	sql1	TCP	www.sql1.ru	4.2.0.1	0	1	
2	sql2	sql2	TCP	www.sql2.ru	4.2.0.2	1	1	
3	sql3	sql3	TCP	www.sql3.ru	4.2.0.3	2	0	
...	...	...	...	...	...	...	...	...

Таблица 3.17

*Описание соответствия классов информации*

ID класса информации	ID сервера базы данных	ID СУБД
1	2	1
1	1	2
2	3	1
...	...	...

Полями таблицы соответствия классов информации являются: идентификационный номер класса информации, идентификационный номер сервера базы данных, идентификационный номер СУБД.

Описание классов информации формируется в таблице классов информации (табл. 3.18).

Полями таблицы описания классов информации являются: идентификационный номер класса информации, функциональное название класса информации, примечание.

Таблица 3.18

*Описание классов информации*

ID класса информации	Название класса информации	Примеч.
1	База научной информации	
2	База дендрэкологических данных	
...	...	...

Описание СУБД формируется в таблице СУБД (табл. 3.19).

Полями таблицы СУБД являются: идентификационный номер СУБД, название СУБД, состояние сервера базы данных (Вкл. / Выкл.), примечание.

## Описание СУБД

ID СУБД	Название СУБД	Функционирование	Примеч.
1	Oracle	0	
2	MySQL	1	
...	...		...

Как было отмечено выше (раздел 3.3.7), работа по взаимодействию с серверами баз данных возложена на менеджер данных. Именно менеджер данных координирует распределение и использование информации, находящейся в локальных базах данных и тем самым виртуализирует накопители данных, объединяя их в единый логический информационный ресурс.

Активизация работы менеджера данных осуществляется при выполнении большинства пользовательских функций. Обобщенный алгоритм функционирования менеджера данных приведен на рис. 3.6 и состоит из следующих шагов:

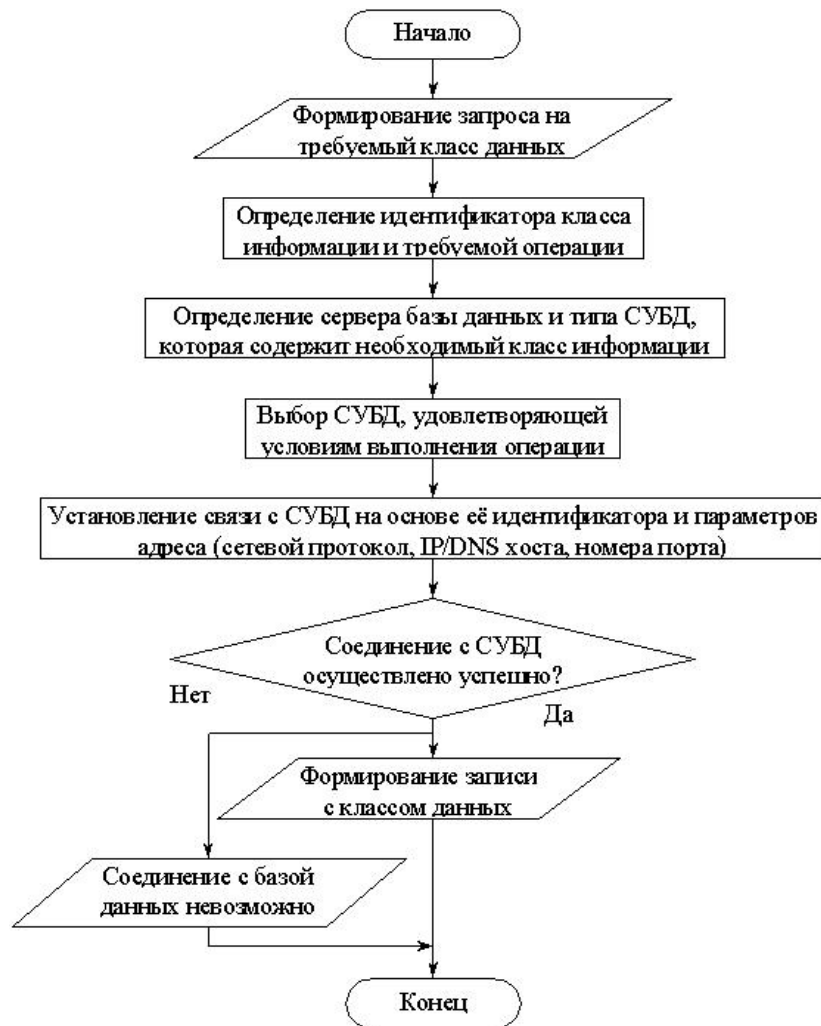


Рис. 3.6. Блок-схема алгоритма функционирования менеджера данных

Шаг 1. На основе запроса от исследователя при использовании функций работы с базами данных, менеджер данных определяет из таблицы описания классов информации идентификатор требуемого класса.

Шаг 2. Выбранный идентификатор класса информации используется для определения идентификационного номера сервера базы данных и идентификационного номера типа СУБД из таблицы соответствия классов информации.

Шаг 3. Найденные идентификационные номера СУБД используются для выбора тех СУБД, которые могут выполнить требуемую операцию (на основе определения функционального режима, установленного для СУБД).

Шаг 4. Определенные на шаге 2 идентификационные номера серверов баз данных и выбранные СУБД на шаге 3 используются для установления связи с теми СУБД, на которых хранится необходимый класс информации и которые могут выполнить запрашиваемую операцию.

Шаг 5. В случае успешного соединения с СУБД и выполнения операции результаты поступают исследователю. Иначе появляется информация об ошибке [169].

С целью оптимизации взаимодействия с серверами баз данных были проведены исследования по реализации сложных (вложенных) запросов. Традиционно, такую сложную операцию можно реализовать, используя команду *SELECT* на каждом этапе выборки. Одним из решений в данной ситуации, позволяющим увеличить скорость выполнения запроса, является использование операции присоединения таблиц, например *LEFT JOIN*. Эффективность такой коррекции запроса пропорциональна глубине их вложенности, чем более сложный (вложенный) запрос, тем эффективнее такая схема реализации запроса. Проведенные исследования (табл. 3.20) показали ускорение выполнения SQL-запроса, в среднем, в 2,15 раза ( $0,03064/0,01424 = 2,15168$ ).

Таблица 3.20

*Временные оценки выполнения операций выборки*

Время выполнения запроса с использованием множественного обращения к команде выборки <i>SELECT</i>		Время выполнения запроса с использованием операции присоединения таблиц <i>LEFT JOIN</i>	
Время в эксперименте (с)	Среднее время (с)	Время в эксперименте (с)	Среднее время (с)
1	0,0300	1	0,0141
2	0,0290	2	0,0133
3	0,0321	3	0,0141
4	0,0305	4	0,0152
5	0,0316	5	0,0145
	0,03064		0,01424

Еще одним примером рациональной записи SQL-запроса является ситуация возложения на запрос комплексной функции выполнения. Например, при записи данных из текстового файла в таблицу базы данных. Стандартным решением в этом случае является использование команды вставки *INSERT INTO*, которая используется столько раз, сколько имеется строк в файле. Комплексное выполнение подобной операции с использованием команды *LOAD DATA INFILE*, когда на одну команду сразу возлагается и поиск концов строк, и разбиение строки на поля, и выполнение вставки форматированных данных в таблицу, позволяет существенно повысить эффективность ее выполнения. Проведенные исследования (табл. 3.21) показали ускорение выполнения SQL-запроса, в среднем, в 1,66 раза ( $0,0057/0,00342 = 1,66666$ ).

Таблица 3.21

*Временные оценки выполнения операций вставки*

Время выполнения запроса с использованием команды вставки <i>INSERT INTO</i>		Время выполнения запроса с использованием команды <i>LOAD DATA INFILE</i>	
Время в эксперименте (с)	Среднее время (с)	Время в эксперименте (с)	Среднее время (с)
1	0,0066	1	0,0033
2	0,0054	2	0,0032
3	0,0055	3	0,0034
4	0,0054	4	0,0033
5	0,0056	5	0,0039
	0,0057		0,00342

В целом, эффективность выполнения SQL-запросов зависит от специфики используемой базы данных и тщательности ее проектирования.



## **4. РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ГОДИЧНЫХ КОЛЕЦ ДЕРЕВЬЕВ В МНОГОМАШИННОМ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ**

Для практической реализации комплекса в настоящей работе использовался стек программных продуктов LAMP [172] – набор свободно распространяемого инструментария: HTTP сервер Apache 1.3.14 – web-узел и его администрирование, SQL СУБД MySQL 3.22.21 – автономная отладка взаимодействия с базой данных, язык сценариев PHP 4.2 – интерактивное взаимодействие с пользователем, реализация алгоритмов вычислительных задач и административно-системных функций комплекса, а также сервер баз данных Oracle 8i для постоянного хранения информации. Отметим, что grid-системой, реализованной с использованием стека LAMP, является, например, компонент GridPremis [173] французского grid-проекта Grid'5000.

### **4.1. Имитационное моделирование систем распределенных вычислений**

Классическими методами исследования распределенных систем обработки являются математические методы теории систем массового обслуживания (СМО) [174]. В частности, аналитические методы теории очередей [175] могут быть использованы для определения критериев и характеристик распределенных систем. Это могут быть математические модели, основанные на марковских или полумарковских системах, многолинейных, приоритетных или многофазных системах, системах с повторными вызовами, с зависимым обслуживанием и др. [176].

Вместе с тем, исследование эффективности сложных программных комплексов, построенных с использованием grid-технологий, практически невозможно с использованием математических моделей (функционирование grid-системы формализовано трудно описать). Поэтому только имитационное моделирование grid-систем позволяет оценить и спрогнозировать их производительность, загруженность всех входящих в ее состав информационных и вычислительных компонентов, получить статистически обоснованные временные и экстремальные оценки всевозможных характеристик, интересующих разработчиков (с точки зрения оптимизации структуры) и пользователей (с точки зрения производительности). Для описания моделей СМО при их исследовании на ЭВМ широко используется язык имитационного моделирования GPSS World [177]. Система GPSS World обеспечивает исследователя всеми функциями, необходимыми для модельного описания систем массового обслуживания. Имитационная модель в GPSS World представляет собой алгоритм, отражающий изменения состояния моделируемой системы во времени при заданных потоках заданий, поступающих на ее входы.

В настоящей работе в качестве базового исследуемого объекта при разработке имитационной модели была взята инфраструктура разработанного программного комплекса обработки дендрэкологических данных (раздел 3.3), а в качестве специализированного языка моделирования был выбран язык описания моделей, являющийся составной частью системы имитационного моделирования GPSS World (GPSS Student Version 4.3.4).

#### ***4.1.1. GPSS-модель для оценки эффективности функционирования grid-систем произвольной структуры***

В соответствии с разработанной функциональной структурой много-машинного вычислительного комплекса обработки дендрэкологических данных (раздел 3.3) основными объектами моделируемой системы являются: потоки входных заданий, вычислительные сегменты, управляющие серверы сегментов, вычислительные серверы сегментов, коммуникационный сервер, серверы баз данных, менеджеры баз данных. С использованием указанных объектов осуществляется моделирование функциональной обработки заданий. Особенность реализации программного обеспечения много-машинных программных комплексов, использующих идеи grid-систем, учтена многослойной структурой его построения. Введены следующие дополнительные объекты моделируемой системы: слой адаптации, слой связи, слой доступа к ресурсам, слой кооперации и слой координации. С использованием данных объектов моделируется предоставление как вычислительных, так и информационных ресурсов для внешнего использования, обеспечение коммуникации и безопасности, удаленное использование ресурсов без учета общего состояния МВК, организация взаимодействия с распределенными ресурсами, распределение использования ресурсов МВК во времени.

В качестве модели источника входных потоков заданий использована независимая модель источника. В этой модели вычисление моментов появления заданий (случайной величины, связанной с промежутком времени между появлениями двух соседних заданий) осуществляется по нормальному закону распределения. Частично использовалась и модель зависимых источников входных потоков заданий, в которой определение моментов появления заданий осуществляется при поступлении на некоторый вход других заданий (синхронизирующих), в частности, заданий, отклоненных из-за невозможности восстановления сбойного вычислительного сервера.

Модели основных объектов устройств отражают выработку интервалов обслуживания (также значений случайной величины, распределенной по экспоненциальному закону). Кроме того, модели устройств отражают управление очередями в соответствии с заданной дисциплиной обслуживания и приоритетами поступающих заданий.

Моделями объектов очередей имитируются ожидания заданий на обслуживание. Длина очереди также определяется как случайная величина, причем законы распределения зависят от типа заданий.

В модели имитируются перенаправления маршрутов движения заданий в МВК. Перенаправление движения заданий осуществляется либо по определенному, либо по случайно выбранному маршруту в зависимости от типа заданий или выполнения некоторых условий.

При имитационном моделировании использовался событийный метод, а конкретные значения атрибутов объектов и процессов моделирования, результаты моделирования (относительное и абсолютное время моделирования, число заданий на обслуживание за заданный промежуток времени, среднее время пребывания заданий в очереди, средняя длина очереди, максимальная длина очереди, нагрузка устройства и т. д.) определялись спецификой проводимых имитационных экспериментов и описаны в разделе 4.1.2.

#### ***4.1.2. Результаты имитационного моделирования многомашинного вычислительного комплекса удаленного анализа изображений годичных колец деревьев***

Имитационная модель для оценки эффективности функционирования спроектированного многомашинного вычислительного комплекса произвольной структуры разработана на языке GPSS World (приложение 1). Изменяемыми параметрами модели являются: количество вычислительных серверов, максимальное время обработки задания, количество типов заданий, средний интервал между заданиями, доля параллельных заданий, доля отклоненных заданий, среднее время обработки заданий коммуникационным сервером, отклонение от среднего времени обработки заданий коммуникационным сервером, вероятность сбоя вычислительных серверов, вероятность восстановления вычислительных серверов, среднее время восстановления вычислительного сервера, отклонение от среднего времени восстановления вычислительного сервера, количество коммуникационных серверов, максимальное время обработки задания администратора, количество типов заданий, средний интервал между заданиями, среднее время восстановления вычислительного сервера, отклонение от среднего времени восстановления вычислительного сервера.

В работе проведено исследование зависимостей таких критериев как: количество заданий общее, отклоненных заданий, заданий без параллелизма, заданий с параллелизмом, аварийных ситуаций с восстановлением, аварийных ситуаций без восстановления, аварийных ситуаций с восстановлением (для заданий с параллелизмом), аварийных ситуаций без восстановления (для заданий с параллелизмом), заданий в оче-

реди, от следующих параметров: количество вычислительных серверов (рис. 4.1), максимальное время обработки задания (рис. 4.2), количество типов заданий (рис. 4.3), интервал между заданиями (рис. 4.4), количество коммуникационных серверов (рис. 4.5).

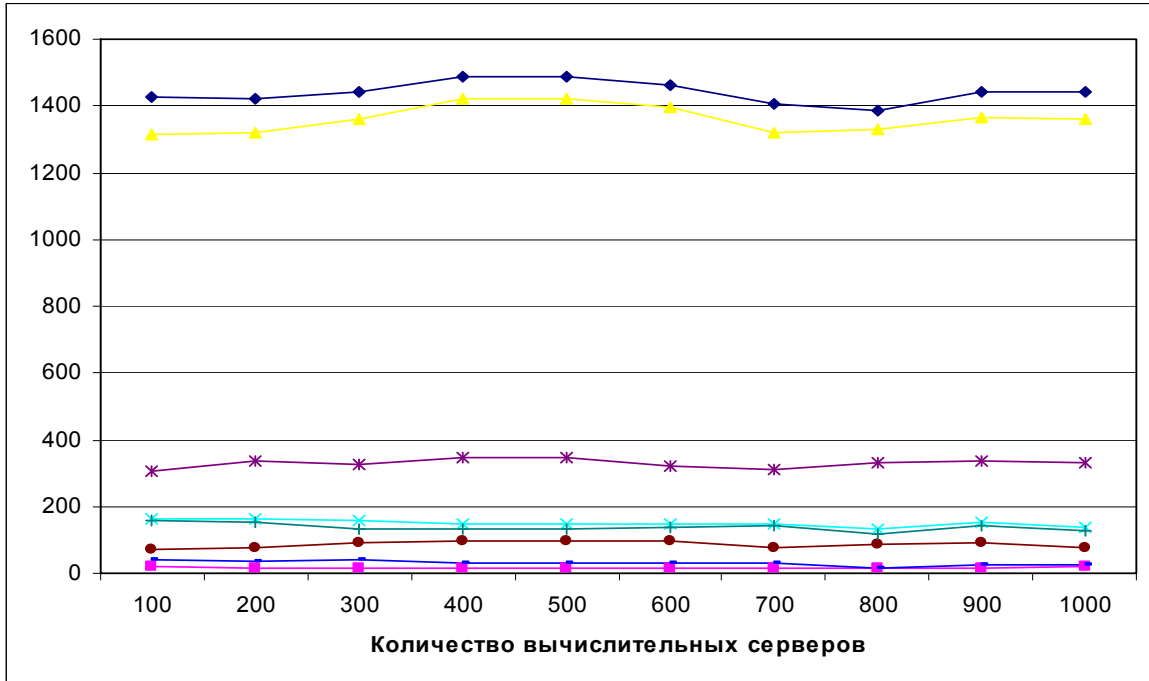


Рис. 4.1. Зависимости критериев от количества вычислительных серверов

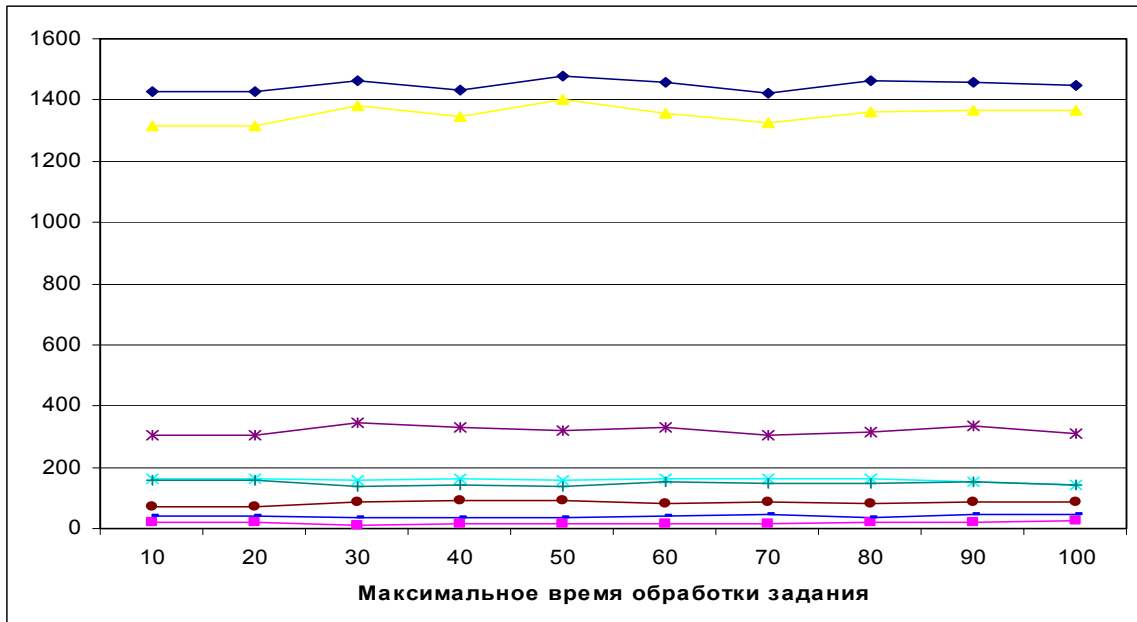


Рис. 4.2. Зависимости критериев от максимального времени обработки задания

По оси  $Y$  приведены полученные значения исследуемых критериев (рис. 4.6) – абсолютные численные значения количества, а по оси  $X$  – абсолютные численные значения соответствующих изменяемых параметров.

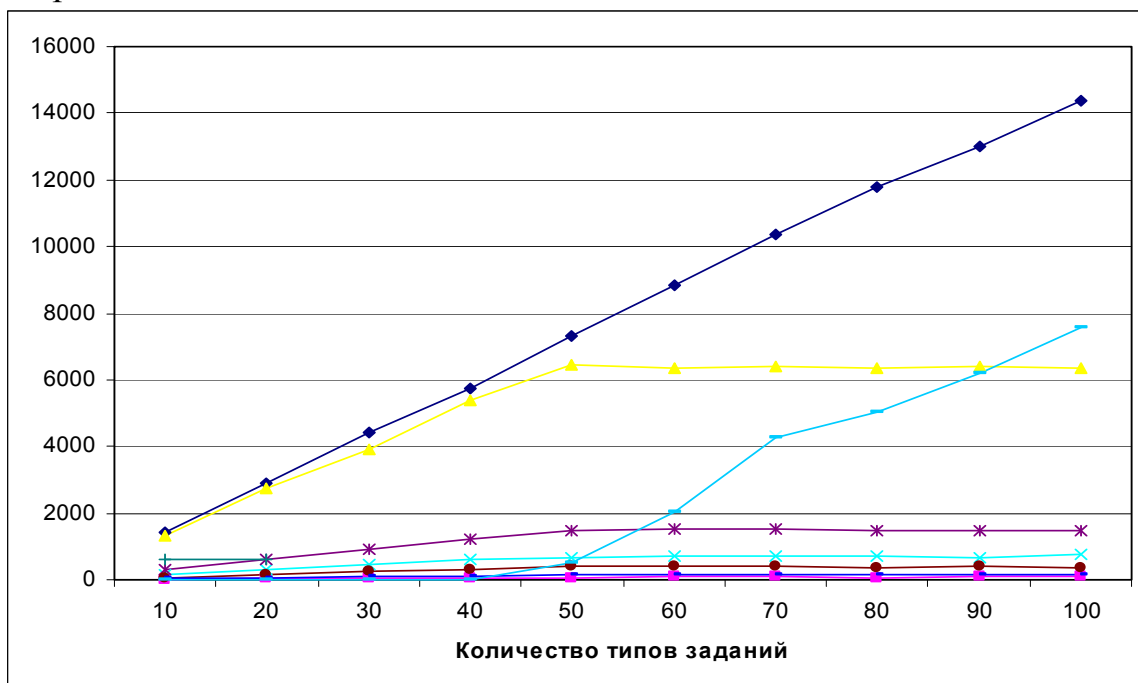


Рис. 4.3. Зависимости критериев от количества типов заданий

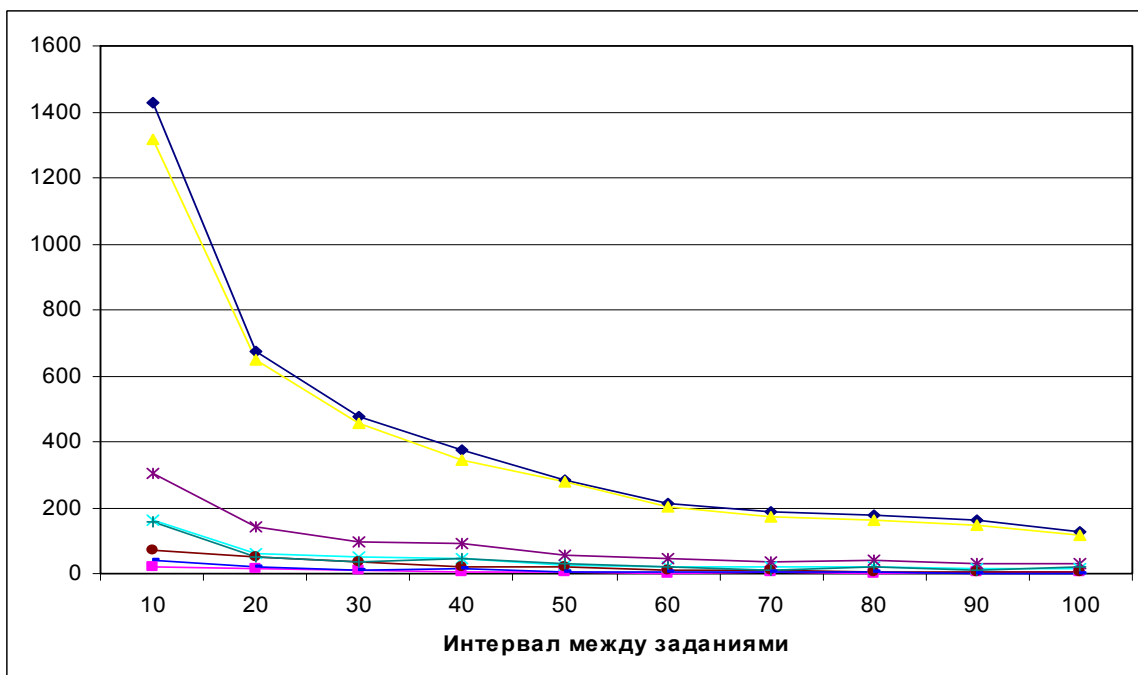


Рис. 4.4. Зависимости критериев от интервала между заданиями

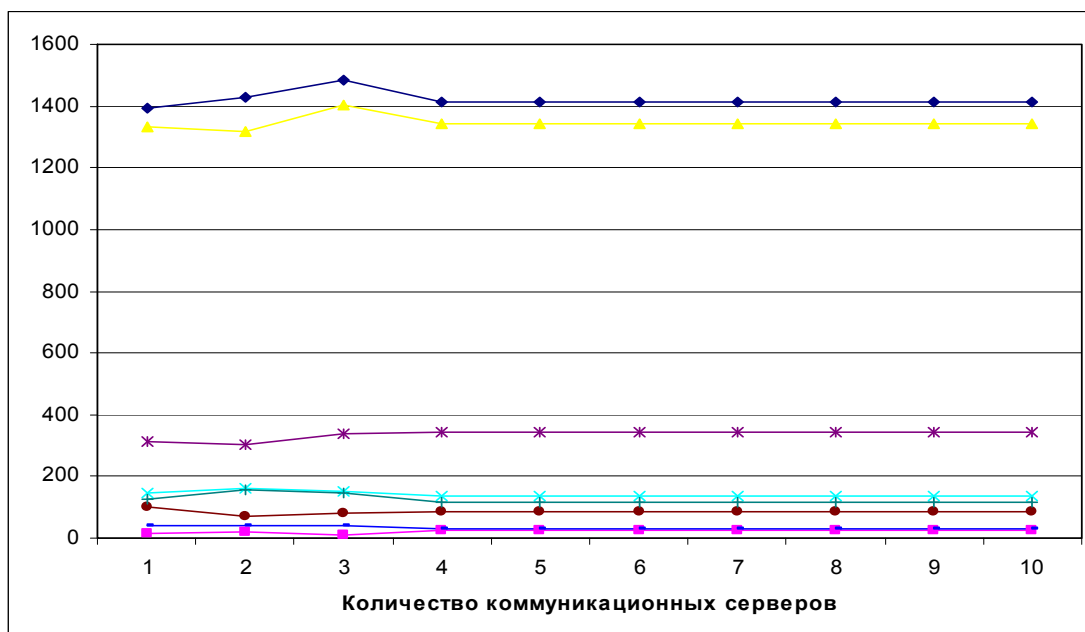


Рис. 4.5. Зависимости критериев от количества коммуникационных серверов

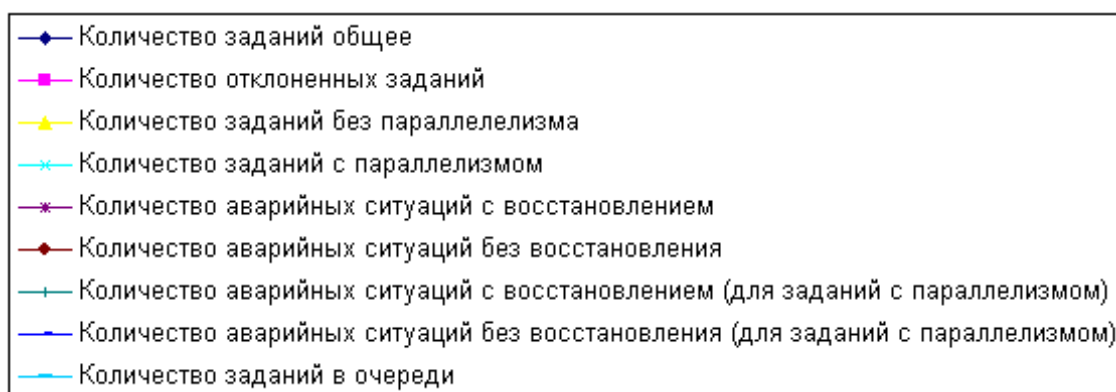


Рис. 4.6. Условные обозначения исследуемых критериев

Во всех экспериментах моделирование осуществлялось в течении 24 часов (модельное время).

При выбранных в модели параметрах быстродействия вычислительных серверов: их количество (свыше 100), максимального времени обработки задания (до 100 единиц), количество коммуникационных серверов (до 10) практически не влияет на исследуемые критерии. Количество типов выполняемых заданий значительно влияет на число выполненных в МВК заданий, а также на очередь к коммуникационному серверу. Изменение интервала поступления заданий значительно влияет на исследуемые критерии, особенно на начальных этапах его увеличения.

Результаты моделирования подтверждают работоспособность разработанной структуры программного обеспечения МВК, описанной в разделе 4.2.

## 4.2. Многоуровневая схема построения системных и обрабатывающих модулей комплекса

Вся совокупность программных средств многомашинного комплекса обработки годовых колец деревьев представлена в двух основных разрезах: пользовательском и системном. Укрупненная структурная схема построения системных и обрабатывающих модулей комплекса представлена на рис. 4.7.



Рис. 4.7. Схема построения системных и обрабатывающих модулей комплекса

Реализация и взаимодействие программных модулей обеспечивают конфигурирование структуры комплекса (описание), распределенное выполнение функциональных задач по обработке годовых колец деревьев, работу с базами данных, визуализацию результатов обработки и т. д. в соответствии с разработанной функционально-логической структурой программного обеспечения обработки годовых колец деревьев (раздел 3.3.7).

Интерфейсные средства исследователя и администратора определяют состав диалоговых форм, необходимых для организации функционирования комплекса и взаимодействия с ним при выполнении функциональных и системных задач.

Поступающие от исследователя или администратора запросы обрабатываются в интерпретаторе форм.

Запросы администратора, например, связанные с конфигурированием многомашинного комплекса, с включением в него функциональных вычислительных задач, с редактированием структуры таблиц и их содержимого и т. д., обрабатываются в блоке модулей системных задач. Результаты обработки системных запросов через модуль диагностической информации возвращаются администратору комплекса.

Запросы исследователя, например, связанные с требованием выполнения функциональных задач, с экспортом и импортом данных, с получением справочной информации и т. д. обрабатываются в блоке модулей функциональных задач. Результаты выполнения функциональных задач через модуль отчетов обработки возвращаются исследователю.

Для реализации просмотра результатов ранее обработанных дендрологических данных используется модуль постпроцессорной визуализации.

Для информационной поддержки работы модулей функциональных и системных задач используются две базы данных (дендрологическая и системная). Каждая база данных имеет индивидуальный интерфейс для взаимодействия и набор отношений для хранения информации.

#### **4.3. Административно-системная часть многомашинного вычислительного комплекса обработки годичных колец деревьев**

Набор функций управления МВК является функционально полным и классифицирован как для верхнего, так и нижнего уровней следующим образом: формирование конфигурации МВК, формирование и изменение профилей пользователей, редактирование структуры и содержимого базы данных, мониторинг и контроль работы МВК, диалог администраторов, внутренние системные функции.

В эксперименте по функционированию многомашинного комплекса обработки дендрологических данных было задействовано три вычислительных сервера и коммуникационный сервер. С точки зрения выполняемых функциональных задач все три вычислительных сервера предоставили один и тот же ресурс – серверные приложения анализа годичных колец деревьев. С информационной точки зрения одним вычислительным сервером была предоставлена СУБД Oracle, а двумя – СУБД MySQL. Системная часть комплекса была размещена на коммуникационном сервере. На этом же сервере была размещена и системная база данных на основе СУБД MySQL. Два вычислительных сервера функционировали под управлением операционной системы FreeBSD, один – под управлением Windows XP. Коммуникационный сервер также функционировал под управлением Windows XP.



Выбор пользователем класса решаемых задач осуществляется путем настройки на соответствующий пункт меню при установлении связи с коммуникационным сервером. Алгоритм выбора вычислительного сервера коммуникационным сервером приведен в разделе 3.3.2.

#### 4.4. Автоматизированное рабочее место исследователя для анализа годовичных колец деревьев

Модули автоматизированного рабочего места исследователя обеспечивают выполнение всех необходимых функций при проведении исследований, связанных с обработкой годовичных колец деревьев. Набор основных функций, доступных исследователю, приведен в разделе 3.3.6.

С точки зрения исследователя, наибольший интерес представляют функции работы с задачами математической обработки данных. В данной работе реализованы следующие задачи математической обработки изображений годовичных колец деревьев: вычисление азимута и среднеквадратичной ширины области максимального прироста годовичных колец деревьев, вычисление значений индексов прироста ширины годовичных колец деревьев.

**Вычисление азимута и среднеквадратичной ширины области максимального прироста годовичных колец деревьев.** Последовательность действий исследователя при выполнении этой задачи включает:

1. Определение центра колец.
2. Сканирование изображения по всем азимутам.
3. Преобразование изображения из полярной системы координат в декартовую (рис. 4.8).

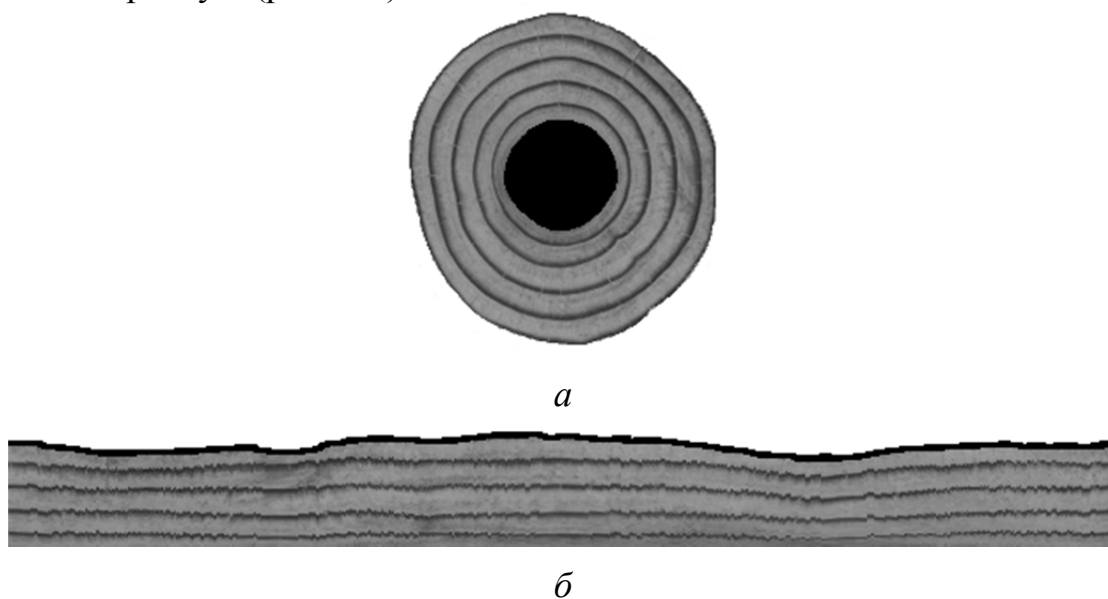


Рис. 4.8. Диск дерева в полярной системе координат (а), его развертка в декартовой системе координат (б)

#### 4. Выделение в изображении границ годовичных колец.

Выделение в изображении границ годовичных колец возможно несколькими способами. Один из подходов заключается в обработке изображения медианным (рис. 4.9, *а*) и полиномиальным (рис. 4.9, *б*) фильтрами. Перед применением фильтров исходный сигнал может продляться для того, чтобы обеспечить правильную работу фильтров на его краях. Процедура медианной фильтрации изображения использовалась для устранения импульсного шума. В результате медианной фильтрации происходит ограничение сигнала сверху и снизу отрезками, параллельными оси абсцисс. На рис. 4.9, *а* изображен сигнал до и после применения медианной фильтрации с пятиэлементным окном. Так как исходный сигнал наряду с импульсным содержит и низкочастотный шум, то его устранение осуществляется фильтрацией в полиномиальном базисе на основе метода наименьших квадратов. На рис. 4.9, *б* видно, что сигнал после полиномиальной фильтрации (полином пятой степени) не ухудшил своего вида, а низкочастотный шум исчез. В целях улучшения результата медианная фильтрация может проводиться повторно для положительной и отрицательной частей сигнала. Это обусловлено тем, что проведенной медианной фильтрации всего ряда недостаточно для удаления шумов более широкой его части. В результате фильтрации получается сигнал, из которого выделена низкочастотная составляющая и импульсный шум при сохраненной информации о переходных зонах и незначительном изменении амплитуды.

Заметим, что использование методов фильтрации не всегда позволяет четко выделить в изображении границы годовичных колец из-за сложности древесно-кольцевой картины. В настоящей работе предложен интерактивный алгоритм восстановления непрерывных годовичных колец из дискретных данных дендрохронологических измерений, основанный на двумерном анализе дисков деревьев, по которому модифицируется начальное приближение исходя из малости изменения полезного сигнала в соседнем радиальном сечении. Особенностью алгоритма является то, что он не требует существенной априорной информации о свойствах шумов. На рис. 4.10, *а* показаны две функции роста, полученные из соседних радиальных сечений (с разностью 1 градус). Из рисунка видно, что при незначительном изменении азимута (порядка одного градуса), полезный сигнал в соседнем радиальном сечении практически совпадает с начальным. В тоже время, функции роста, полученные из радиальных сечений, значительно отстоящих друг от друга (с разностью 180 градусов), имеют явно выраженные различия (рис. 4.10, *б*).

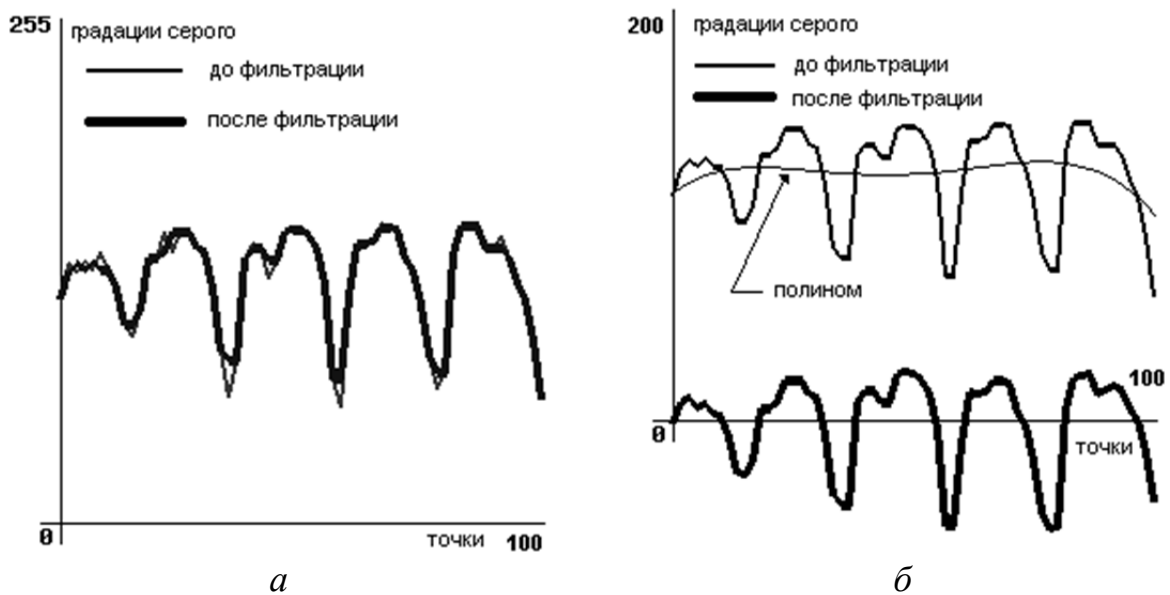


Рис. 4.9. Медианная фильтрация (а) и полиномиальная фильтрация (б)

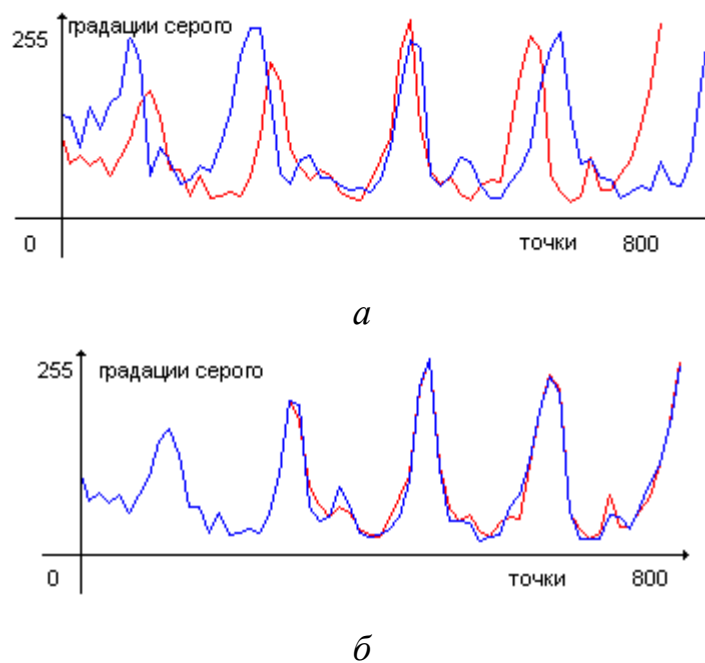


Рис. 4.10. Соседние радиальные сечения диска дерева (а) и радиальные сечения, расположенные на разных азимутах (б)

Основные шаги интерактивного алгоритма (рис. 4.11) представлены ниже. Первые два шага работы алгоритма основаны на информации, заданной исследователем. Последующие шаги построения выходных функций роста осуществляются без участия исследователя. При несовпадении количества годовичных колец, введенных пользователем, и выделенных в процессе работы алгоритма, управление передается пользова-

телю с целью построения нового начального приближения для той входной функции роста, на которой произошла ошибка.

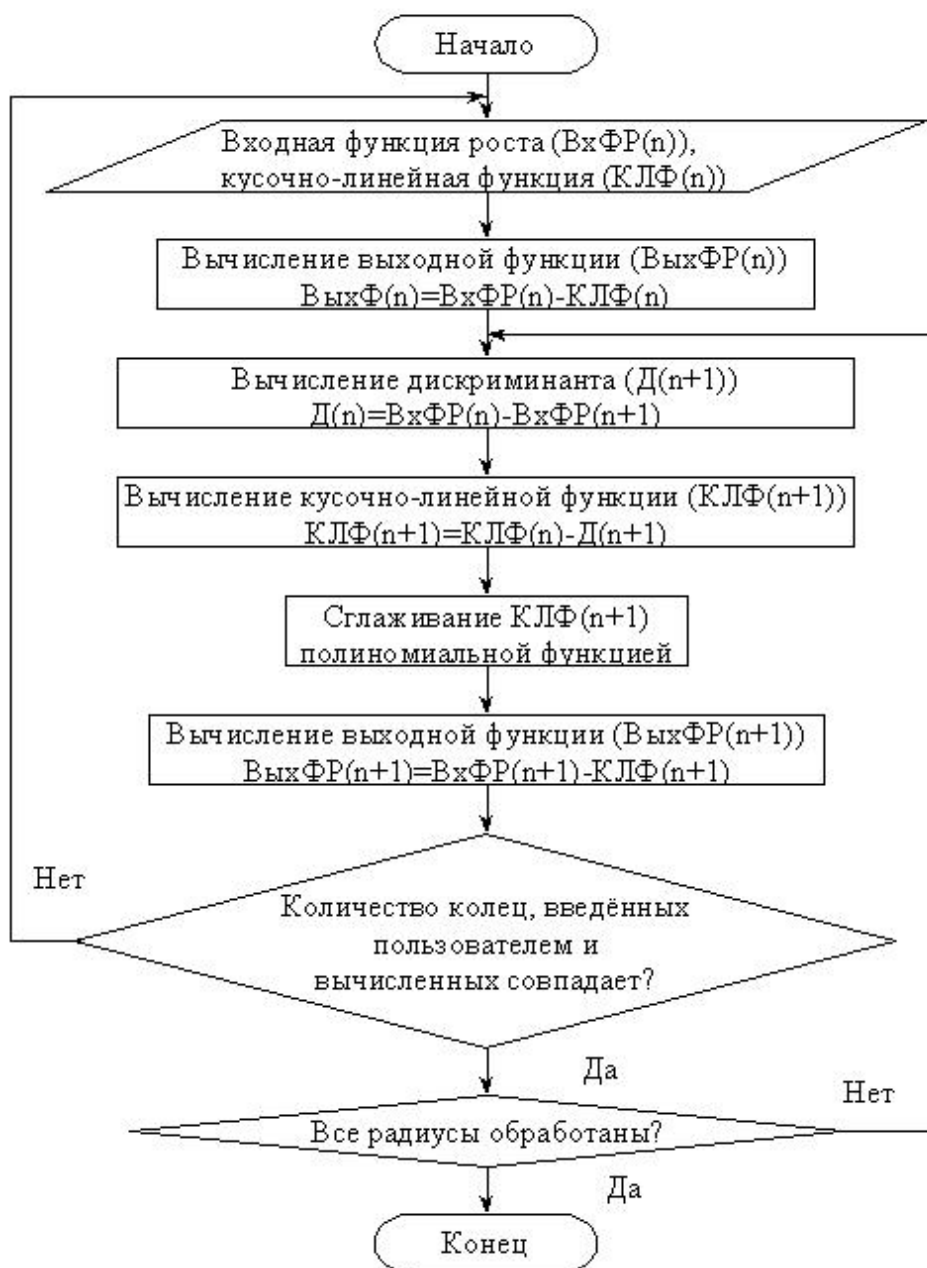


Рис. 4.11. Блок-схема интерактивного алгоритма выделения полезного сигнала о росте дерева из аддитивной смеси

Шаг 1. Исследователь указывает начальное приближение границ годовых колец деревьев (кусочно-линейную функцию) на входной функции роста (рис. 4.12).

Шаг 2. Выходная функция роста строится вычитанием значений кусочно-линейной функции из соответствующей ей входной функции (рис. 4.12).

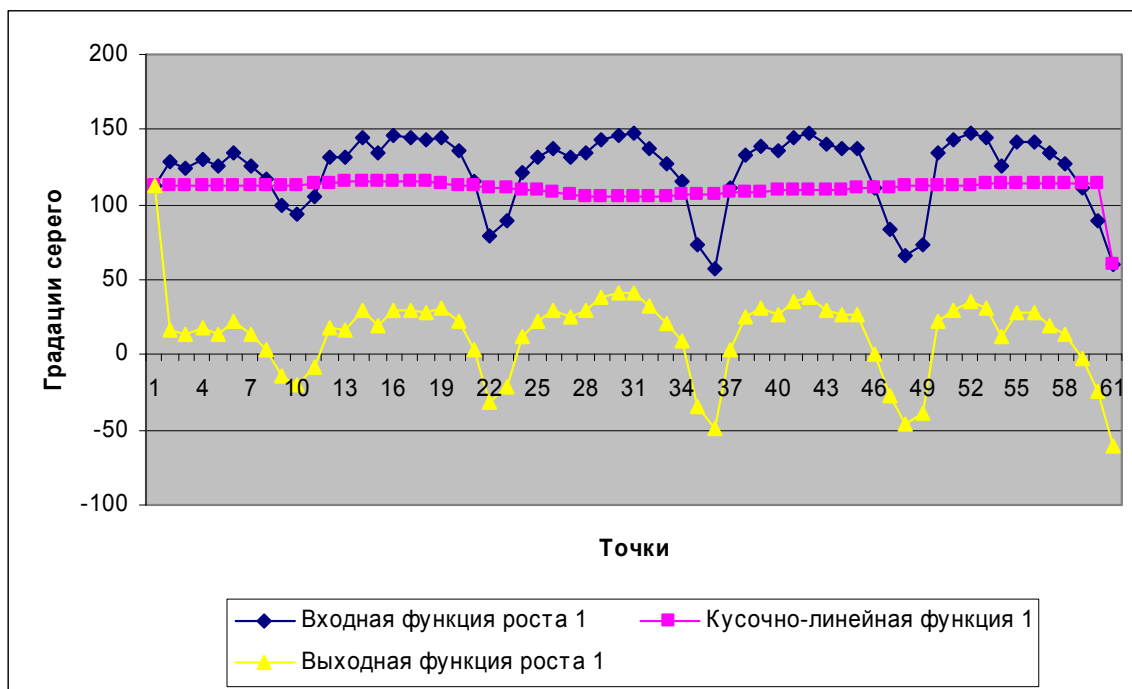


Рис. 4.12. Построение выходной функции роста из входной

Шаг 3. Вычисляется разность между значениями предыдущей и последующей (соседними) входными функциями роста (дискриминант) (рис. 4.13).

Шаг 4. Для построения последующей кусочно-линейной функции из значения предыдущей кусочно-линейной функции вычитается дискриминант, вычисленный на предыдущем шаге (рис. 4.13).

Шаг 5. Построенная на предыдущем шаге кусочно-линейная функция сглаживается полиномиальной функцией (рис. 4.14).

Шаг 6. Выходная функция роста строится вычитанием значений сглаженной кусочно-линейной функцией из соответствующей ей входной функции (рис. 4.14).

5. Преобразование изображения из градаций серого в черно-белое (прослеживание границ колец).
6. Расчет ширины годовых колец и интегрального прироста по всем азимутам.
7. Нормирование ширины прироста каждого кольца.
8. Определение азимута и среднеквадратичной ширины области максимального прироста.

На рис. 4.15 толстой линией показано направление максимального прироста, а тонкими — среднеквадратичная ширина области максимального прироста.

9. Расчет среднего сезонного и годового прироста.

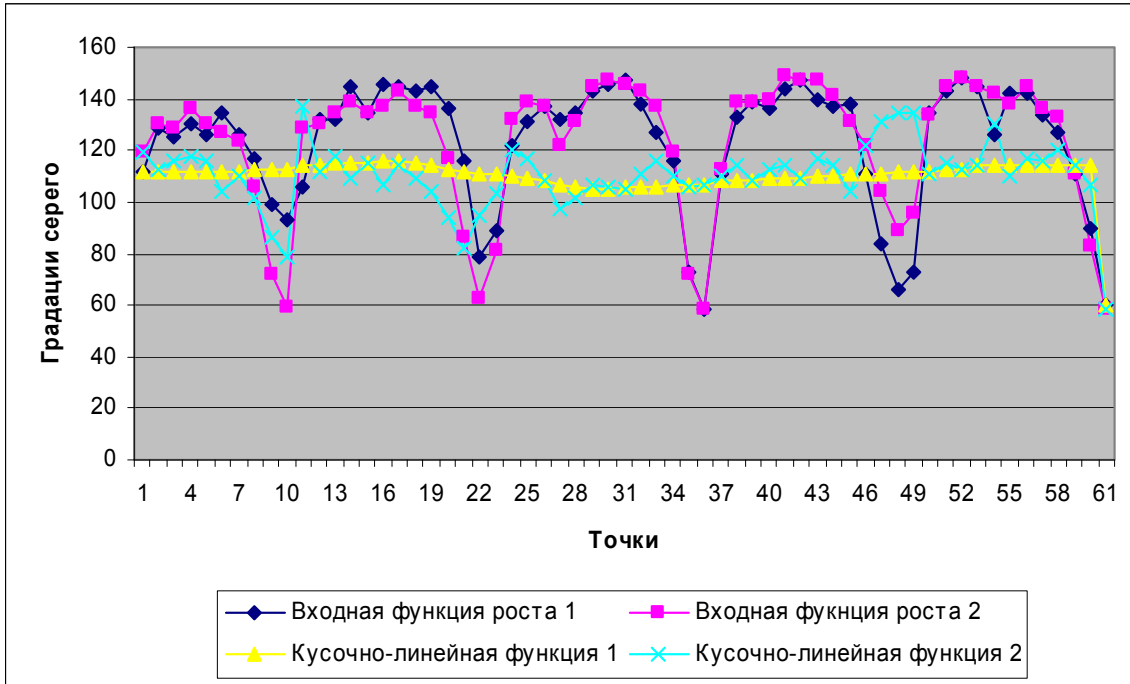


Рис. 4.13. Определение разности между соседними функциями роста

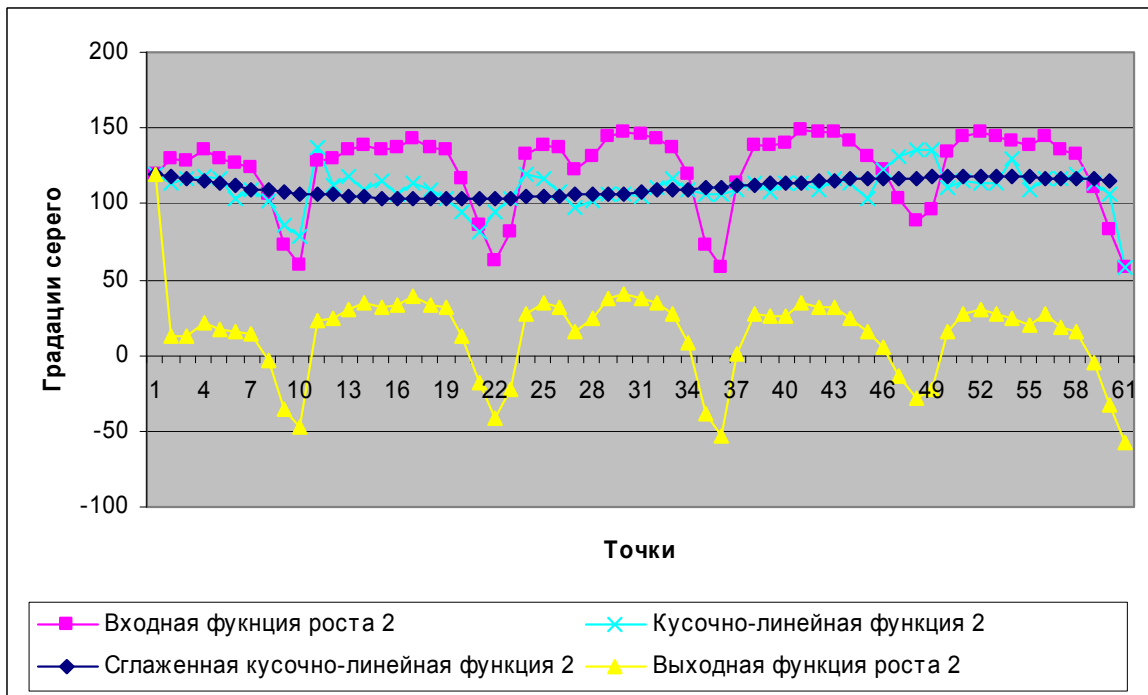


Рис. 4.14. Построение следующей выходной функции роста

На рис. 4.16 первый график отражает сезонный рост, а второй – годичный в десятых долях миллиметров по годам.

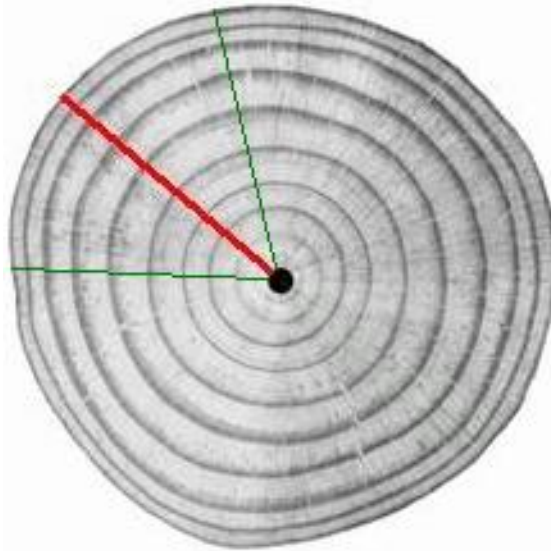


Рис. 4.15. Азимут и среднеквадратичная ширина области максимального прироста

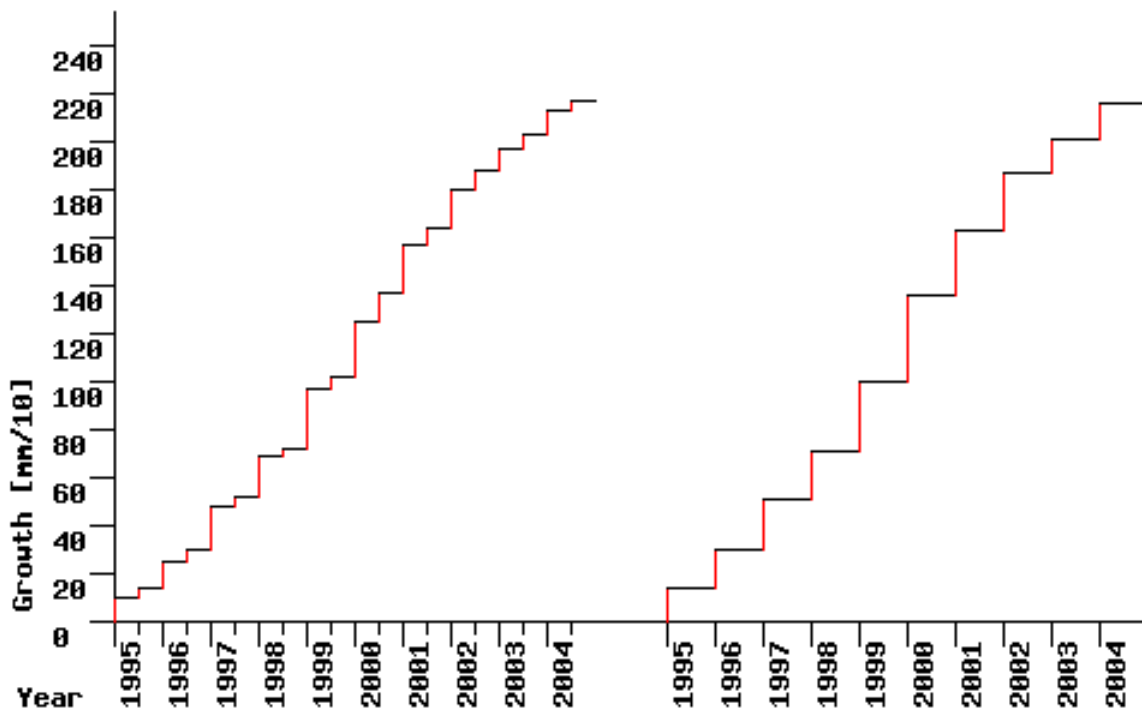


Рис. 4.16. Средний сезонный и годичный прирост

Проведенный анализ годовых колец позволяет с большей точностью оценить направление максимального прироста дерева. Наибольшая погрешность определения направления максимального прироста  $S_{\max}$  прямо пропорциональна числу обрабатываемых азимутов  $R$  и определяется как  $S_{\max} = 180/R$ . На рис. 4.17 представлена зависимость точности определения направления максимального прироста в градусах от числа обрабатываемых азимутов.

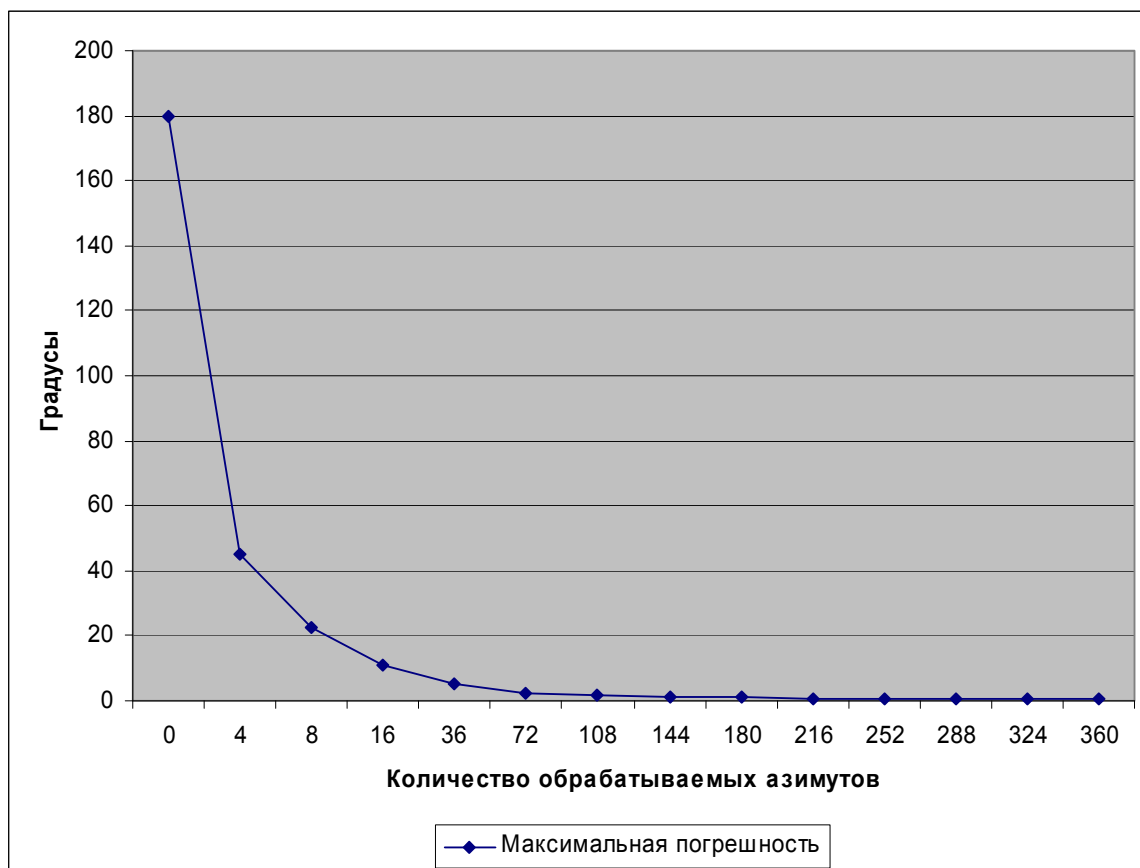


Рис. 4.17. Зависимость наибольшей погрешности определения направления максимального прироста

**Вычисление значений индексов прироста ширины годичных колец деревьев.** Вычисление значений индексов прироста ширины годичных колец деревьев осуществляется в целях стандартизации представления данных. Стандартизация устраняет из исходных измерений ширины годичных колец возрастную тренд, переводя последовательность в безразмерное значение индексов ширины годичных колец. В изменчивости индексов влияние внешних условий максимально и процедуры дальнейшего анализа позволяют выделить ведущие факторы среды и оценить их относительный вклад. Здесь индекс прироста (индекс ширины годичных колец) – трансформированное значение ширины годичных колец, полученное путем деления ее на соответствующее ей значение на сглаженной кривой для выполнения операции стандартизации.

Вычисление значений индексов прироста ширины годичных колец деревьев включало:

*а) вычисление значений индексов прироста по ширине годичных колец деревьев:*

1. Сканирование изображения (рис. 4.18) по выбранному сечению.
2. Обработка изображения полиномиальным фильтром.

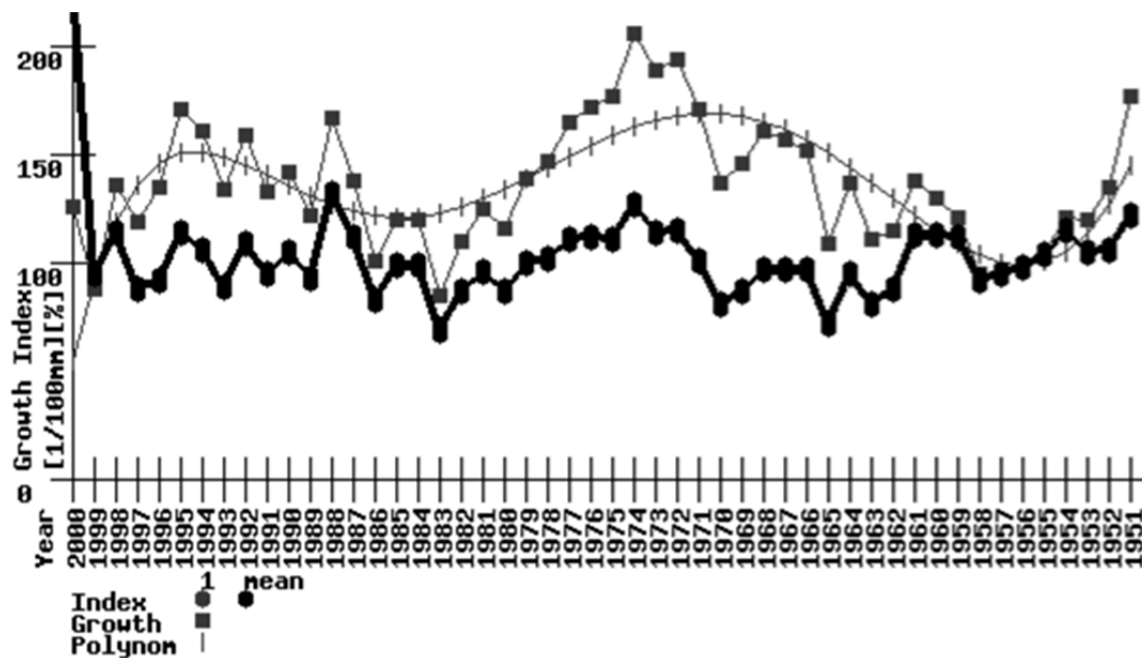


3. Преобразование изображения из градаций серого в черно-белое.
4. Вычисление значений индексов прироста по ширине годичных колец деревьев.



*Рис. 4.18. Керн дерева*

На рис. 4.19 приведена иллюстрация вычисления значений индексов прироста по данным исследования годичных колец деревьев за 50 лет.



*Рис. 4.19. Вычисление значений индексов прироста*

На графике по оси  $x$  отложены года, по оси  $y$  прирост и значение индекса. Исходные данные ширины годичных колец деревьев представлены в виде кривой, отмеченной квадратами в узловых точках. Сглаживающая кривая отмечена вертикальными прямыми. Индексы ширины годичных колец отмечены окружностями в узловых точках.

б) вычисление среднего значения по индексам прироста годичных колец деревьев.

На рис. 4.20 приведена иллюстрация вычисления среднего значения по индексам прироста по данным исследования годичных колец деревьев за 50 лет.

На графике по оси  $x$  отложены года, по оси  $y$  значение индекса. Исходные данные по индексам прироста годичных колец деревьев представлены в виде тонких кривых, отмеченных окружностями в узловых точках. Среднее значение индексов прироста отмечено толстой кривой, отмеченной окружностями в узловых точках.

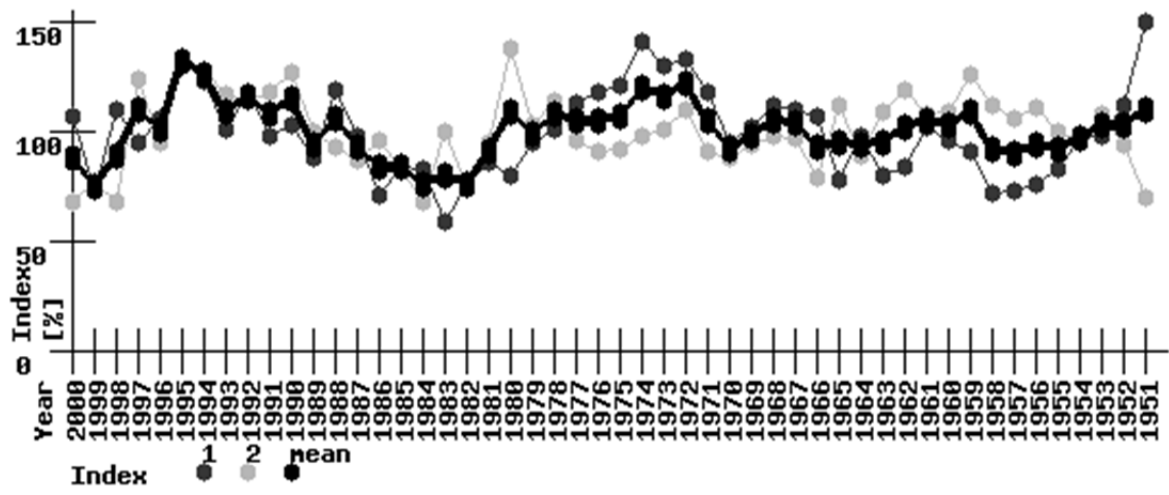


Рис. 4.20. Вычисление среднего значения по индексам прироста

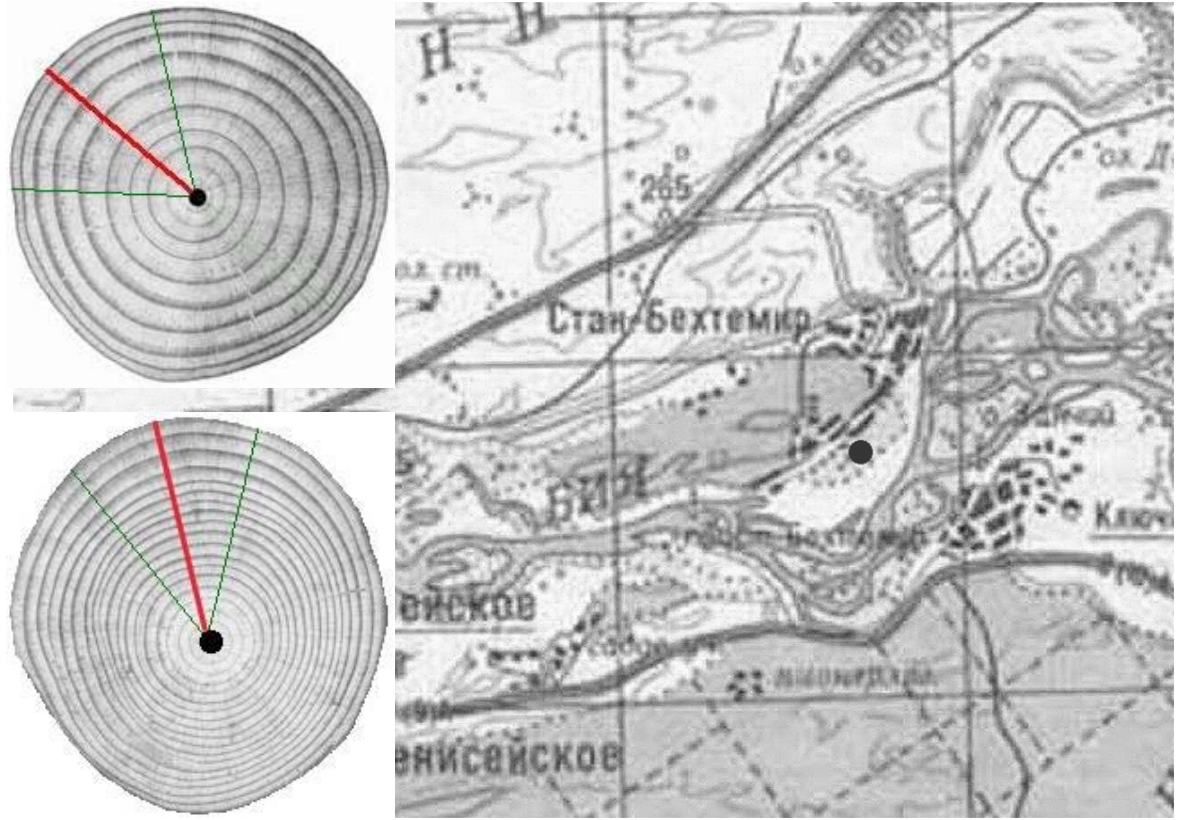


Рис. 4.21. Результаты обработки поперечных спилов сосны

На рис. 4.21 представлены результаты обработки поперечных спилов сосны, отобранные в верхней террасе долины реки Бия (п. Стан Бехтемир, Алтайский край). Место сбора отмечено на карте точкой. Карта и спилов ориентированы в одном направлении. В результате были получены данные, которые совместно с картографической информацией позволяют объяснить неравномерный рост дерева на границе природных зон.

На рис. 4.22 показаны индексы прироста кедров сибирского с 1890 по 1990 годы, полученные как среднее арифметическое по выборке из 23 образцов, отобранных п. Зоркальцево. Также показаны изменения количества летних осадков (июнь, июль) по метеостанции Томск за этот же период. Анализ приведенных данных позволяет сделать вывод о наличии влияния осадков на радиальный прирост. Высокие значения индексов прироста наблюдаются при большом количестве осадков.

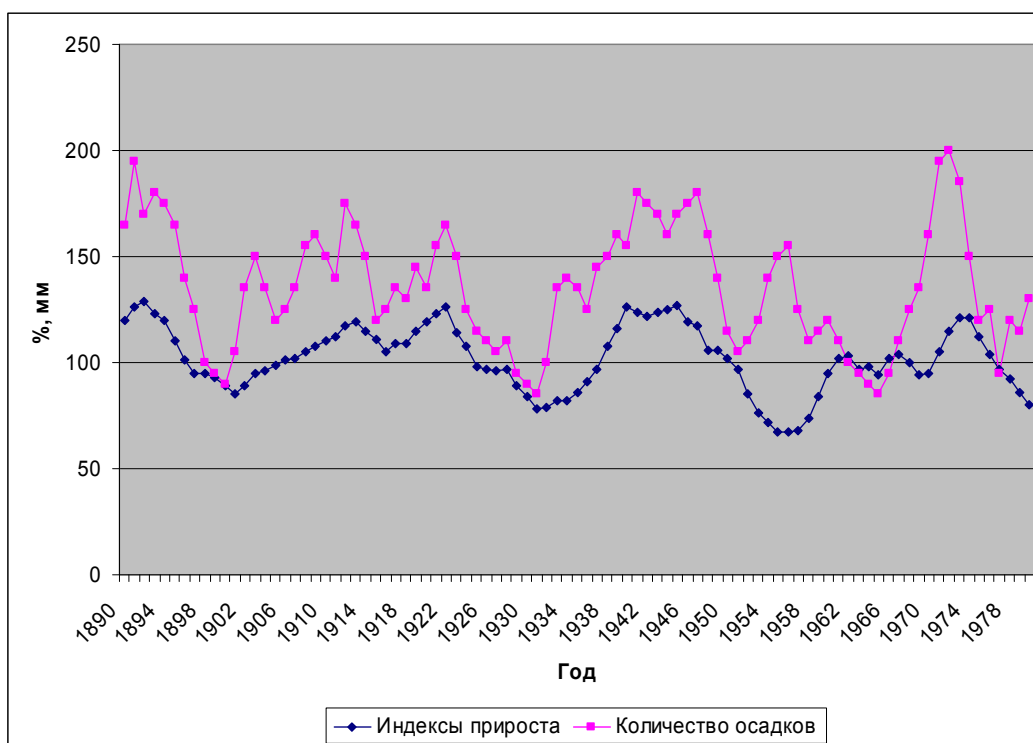


Рис. 4.22. Связь индексов прироста кедров сибирского и летних осадков

Вывод результатов обработки данных осуществляется в виде графиков и таблиц [178–184].

Каталог программных модулей автоматизированного рабочего места исследователя соответствует диаграмме компонентов, спроектированной в разделе 3.1.

#### 4.5. Формирование и ведение баз данных многомашинного вычислительного комплекса

Информационная поддержка функционирования многомашинного вычислительного комплекса обработки годовых колец деревьев включает формирование и ведение базы научной информации, базы дендро-экологических данных и системной базы данных. Все взаимодействия в МВК сведены в следующие группы: инициированные администраторами комплекса, исследователями и гостевым посещением.

#### 4.5.1. Системная база данных

На системную базу данных возложено хранение информации, которая обеспечивает работоспособность многомашинного вычислительного комплекса обработки годичных колец деревьев. Информационная поддержка всего ряда разработанных системных функций (раздел 3.3.5) осуществляется ведением многочисленных таблиц.

Так работа функций формирования конфигурации МВК поддерживается информацией из таблиц, приведенных в разделе 3.3.1. Функции формирования и изменения профилей пользователей используют информацию из таблиц, приведенных в разделе 3.3.4. Функции мониторинга и контроля работы МВК используют таблицы, содержащие как статическую (табл. 4.1), так и динамическую (табл. 4.2) информацию о пользователях, используемых ими ресурсах и выполняемых операциях.

Таблица 4.1

##### *Описание статической информации*

Имя поля	Тип переменной	Описание переменной
StatID	int, primary key	Идентификационный номер записи
StatLogin	varchar	Логин пользователя
StatTimeStart	varchar	Время начала работы
StatTimeEnd	varchar	Время завершения работы
StatTask	varchar	Выполняемая функция (задача)
StatBase	varchar	Используемый ресурс (база данных)

Таблица 4.2

##### *Описание динамической информации*

Имя поля	Тип переменной	Описание переменной
DinID	int, primary key	Идентификационный номер записи
DinLogin	varchar	Логин пользователя
DinTimeStart	varchar	Время начала работы

Таблица 4.3

##### *Описание диалога администраторов*

Имя поля	Тип переменной	Описание переменной
MailID	int, primary key	Идентификационный номер сообщения
MailType	varchar	Тип письма (от администратора МВК/администратора ВС)
MailFrom	varchar	Идентификационный номер отправителя
MailTo	varchar	Идентификационный номер получателя
MailNew	varchar	Сообщение прочитанное/непрочитанное
MailSubject	varchar	Тема сообщения
MailText	varchar	Текст сообщения
MailDate	varchar	Дата сообщения

Таблица 4.4

*Описание активности пользователей*

Имя поля	Тип переменной	Описание переменной
ActID	int, primary key	Идентификационный номер записи
ActAdminMVK	varchar	Время бездействия администратора МВК
ActAdminVC	varchar	Время бездействия администратора ВЦ
ActUser	varchar	Время бездействия пользователя

Ниже приведена структура таблицы, которая поддерживает функции диалога администраторов (табл. 4.3).

Спектр внутренних системных функций, выполняемых в МВК достаточно широк. В качестве примера реализации ниже приведена таблица, иллюстрирующая работу такой внутренней системной функции как выход пользователя из системы по превышению им времени бездействия (не активности) (табл. 4.4).

**4.5.2. База данных научной информации**

Основное назначение базы данных научной информации – сбор, систематизация и хранение научной информации в области дендрэкологического мониторинга. Информация включает как ссылки на соответствующие материалы, в том числе и web-узлы, где можно найти научную информацию, так и полнотекстовые документы.

Таблица 4.5

*Описание документа*

Имя поля	Тип переменной	Описание переменной
DocID	int, primary key	Идентификационный номер документа
DocAuthor	varchar	Автор документа
DocTitle	varchar	Название документа
DocNote	varchar	Комментарий к документу
FileName	varchar	Имя файла
FileType	varchar	Тип файла
FileSize	varchar	Размер файла
FileDate	varchar	Дата внесения файла

Таблица 4.6

*Описание содержания документа*

Имя поля	Тип переменной	Описание переменной
ContentID	int	Идентификационный номер файла
ContentText	blob	Содержание файла

С точки зрения исследователя база данных научной информации МВК обеспечивает: получение теоретического материала в области

дендрэкологии (учебники и монографии, отдельные статьи и доклады тематических конференций и другие информационные материалы); получение библиографических данных, в том числе и Интернет-ссылок, по различным видам деятельности в области дендрэкологии; возможность удаленного внесения различной научной информации в базу данных. Также возможно автономное формирование этой базы данных через интерфейс, предоставленный администраторам МВК.

Ниже приведена структура основных отношений базы данных научной информации в области дендрэкологии – информация о документе (табл. 4.5) и содержание самого документа (табл. 4.6).

#### 4.5.3. База дендрэкологических данных

Обработка годичных колец деревьев предусматривает формирование и ведение базы экспериментальных дендрэкологических данных (исходные и обработанные изображения годичных колец деревьев). База данных формируется за счет проведения на вычислительных серверах обработки изображений годичных колец деревьев (графических файлов) и при непосредственном вводе новых изображений. Вместе с изображением годичных колец деревьев в базу данных заносится и информация о диске дерева: порода дерева, его ориентация, широта, долгота и место сбора, климатические данные и т. д. Непосредственная работа с базой данных предусмотрена через специально разработанный для этих целей интерфейс исследователя. Также возможно автономное формирование этой базы данных через интерфейс, предоставленный администраторам МВК.

Ниже приведена структура основных отношений базы дендрэкологических данных – информация по группе образцов, взятых с одного дерева (табл. 4.7), по каждому образцу отдельно (табл. 4.8), по уровню обработки изображения образца (табл. 4.9) и само изображение (табл. 4.10).

Таблица 4.7

*Описание группы образцов с одного дерева*

Имя поля	Тип переменной	Описание переменной
SampleID1	int, primary key	Идентификационный номер образцов с одного дерева
CommunityName	varchar	Название сообщества (фитоценоз)
SpeciesCode2	varchar	Код рода / вида двух символьный
SpeciesCode4	varchar	Код рода / вида четырех символьный
SpeciesNameLatin	varchar	Название вида латинское
SpeciesNameRussian	varchar	Название вида русское
CountryName	varchar	Страна сбора
RegionName	varchar	Район сбора
PlaceName	varchar	Место сбора

Имя поля	Тип переменной	Описание переменной
LocationLatitudeDegree	varchar	Широта градусы
LocationLatitudeMinute	varchar	Широта минуты
LocationLatitudeSecond	varchar	Широта секунды
LocationLatitudeSide	varchar	Широта северная / южная
LocationLongitudeDegree	varchar	Долгота градусы
LocationLongitudeMinute	varchar	Долгота минуты
LocationLongitudeSecond	varchar	Долгота секунды
LocationLongitudeSide	varchar	Долгота восточная / западная
LocationElevation	varchar	Высота над уровнем моря
LocationDate	varchar	Дата сбора
LocationSoil	varchar	Почва (тип, состав)
LocationFloraSpread	varchar	Предел распространения древесной растительности
LocationTreeMean	varchar	Средняя высота деревьев
LocationCloseCrown	varchar	Сомкнутость крон
LocationCloseBushes	varchar	Сомкнутость кустарникового яруса
LocationCloseGrass	varchar	Сомкнутость травянистого яруса
LocationCloseMoss	varchar	Сомкнутость мохового покрова
LocationTreeType	varchar	Основные виды деревьев
LocationForestType	varchar	Тип леса
LocationNote	varchar	Комментарий
LocationCollectorName	varchar	Имя сборщика
LocationCollectorInstitution	varchar	Организация сборщика
LocationDaterName	varchar	Имя датировщика
LocationDaterInstitution	varchar	Организация датировщика
LocationMeasurerName	varchar	Имя главного исследователя
LocationMeasurerInstitution	varchar	Организация главного исследователя
LocationCategory	varchar	Категория данных
TreeSource	varchar	Источник сбора
TreeHeight	varchar	Высота дерева
TreeCrownWidth	varchar	Ширина кроны
TreeCrownSymmetry	varchar	Симметрия кроны
TreeDistance	varchar	Расстояние до деревьев
TreeOpacity	varchar	Затененность
TreeLimb	varchar	Количество веток
TreeSample	varchar	Всего образцов
TreeMeasurementType	varchar	Тип измерения
TreeMeasurementUnit	varchar	Единица измерения
TreeChronologyInterval	varchar	Интервал хронологии
TreeExposure	Varchar	Экспозиция
TreeIcidence	varchar	Наклон

Таблица 4.8

*Описание каждого образца отдельно*

Имя поля	Тип переменной	Описание переменной
SampleID2	int, primary key	Идентификационный номер образца
SampleID1	int	Идентификационный номер образцов с одного дерева
SampleType	varchar	Тип образца спил / керн
SampleHeight	varchar	Высота отбора образца
SampleDiameter	varchar	Диаметр / длина образца
SampleYear	varchar	Год роста последнего внешнего кольца
SampleRing	varchar	Количество годовых колец

Таблица 4.9

*Описание уровня обработки изображения образца*

Имя поля	Тип переменной	Описание переменной
DescriptionID3	int, primary key	Идентификационный номер образца по уровню обработки
DescriptionID2	int	Идентификационный номер образца
DescriptionImage	varchar	Тип изображения образца
DescriptionResolution	varchar	Разрешение изображения образца
DescriptionName	varchar	Имя файла
DescriptionType	varchar	Тип файла
DescriptionSize	varchar	Размер файла
DescriptionDate	varchar	Дата файла

Таблица 4.10

*Описание содержания изображения*

Имя поля	Тип переменной	Описание переменной
SampleID3	int	Идентификационный номер файла образца по уровню обработки
ContentText	blob	Содержание файла

#### **4.6. Тестирование и оценка качества многомашинного вычислительного комплекса на соответствие оценочным элементам государственного стандарта**

Классический подход к тестированию программных средств основывается на разработке системы научно обоснованных процедур (тестов), зачастую с учетом требований заказчика, обеспечивающих диагностику состояния и качества испытываемых программных средств. Разработка средств тестирования представленного в работе многомашинного вычислительного комплекса – достаточно трудоемкий процесс, соизмеримый по затратам времени на разработку самого комплекса. Поэтому разработка спе-



циальных тестирующих средств не производилась, а оценка качества функционирования многомашинного вычислительного комплекса осуществлялась в соответствии с государственным стандартом, устанавливающим общие положения по оценке качества программных средств вычислительной техники. Заметим, что в оценке качества функционирования программных комплексов определяющую роль играют выбор факторов, на основе которых и осуществляется оценка характеристик качества комплексов. Международные стандарты серии ISO 9000 (вплоть до версий 2004 г.), в значительной степени ориентируют на управление качеством выпускаемой организациями продукции и не очень удобны для оценки качества программных средств. Вместе с тем, в Российской Федерации существует национальный стандарт ГОСТ 28195-89 [185], направленный на оценку качества программных продуктов. В соответствии с указанным стандартом для оценки качества многомашинного вычислительного комплекса выбраны шесть характеристик – надежность, корректность, удобство применения, эффективность, универсальность и сопровождаемость. Поскольку аналога разработанного многомашинного вычислительного комплекса не существует, оценка расчетных значений показателей качества не производилась ввиду отсутствия эталонных значений. Из предлагаемого ГОСТ 28195-89 критериев качества по фактору «надежность» удовлетворяется 48 % оценочных элементов, по фактору «корректность» удовлетворяется 75 % оценочных элементов, по фактору «удобство применения» удовлетворяется 95 % оценочных элементов, по фактору «эффективность» удовлетворяется 63 % оценочных элементов, по фактору «универсальность» удовлетворяется 76 % оценочных элементов, по фактору «сопровождаемость» удовлетворяется 93 % оценочных элементов. Таким образом, усредненная оценка удовлетворения оценочных элементов многомашинного вычислительного комплекса по всем используемым факторам составляет 75 %.

Дополнительно в процессе использования многомашинного вычислительного комплекса оценивался и пользовательский аспект качества. В частности, отсутствовали замечания по таким критериям как:

- отказы многомашинного вычислительного комплекса в процессе применения по назначению;
- претензии пользователей к замедленному времени работы многомашинного вычислительного комплекса и задержкам представления им промежуточной и выходной информации;
- претензии пользователей к неполноте отражения информации;
- претензии пользователей по неадекватности функционирования многомашинного вычислительного комплекса;
- нарушения конфиденциальности информации;
- несоответствие хранимых данных информации, вводимой оператором.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основными результатами исследований являются:

1. Особенности строения годичных колец деревьев позволяют применить количественные методы исследования их структуры и оценить взаимосвязь прироста деревьев с состоянием окружающей среды и влияние окружающей среды на сезонный рост деревьев необходимо изучать с использованием более полной информации о временной изменчивости структуры годичных колец.

2. Проведенный анализ известных методов измерения радиального роста дерева внутри вегетационного периода показал, что существует необходимость в конструктивном математическом описании этих процессов и разработке алгоритмов для его измерения в практике дендрохронологических исследований.

3. Разработана математическая модель радиального сечения годичных колец деревьев, в которой влияние внутренних или внешних факторов на изменение роста клеток дерева учитывается наложением на сигнал аддитивных шумов. Применение формализма аналитического сигнала для анализа годичных колец деревьев практически обосновано условием дисперсионной причинности. Показано, что функция изменения плотности древесины представляет собой колебательный процесс и соответствует изменению уровня цветового изображения. Такая математическая модель радиального сечения годичных колец в виде колебания с монотонной фазой позволяет восстанавливать непрерывные изменения параметров радиального роста дерева.

4. Предложен алгоритм, основанный на применении математического аппарата аналитического сигнала, позволяющий восстанавливать непрерывную функцию радиального роста и его сезонные вариации в пределах вегетационного периода.

5. Определено, что операция «сжатие-растяжение» полезна для работы с широкополосными сигналами, ее эффективность может быть повышена за счет итераций и более полной априорной информации.

6. Установлено, что сезонные вариации радиального роста синхронны в различных радиальных сечениях с приведенной длиной в пределах области однородности.

7. Выполнен обзор аппаратно-программных комплексов и систем для анализа и обработки данных в области дендроэкологии, а также обзор современных решений в области grid-технологий. Показано, что в рассмотренных комплексах и системах не применяется двумерный анализ дисков деревьев. Отмечено, что в современных технологиях обработки и анализа дендроэкологических данных целесообразно применение новых технологий распределенных вычислений.

8. На основе обзора современных решений в области распределенных вычислений и результатах объектно-ориентированного анализа и проектирования разработана обобщенная функциональная структура многомашинного вычислительного комплекса обработки дендроэкологических данных. Для обеспечения его функционирования были разработаны: алгоритм функционирования коммуникационного сервера, алгоритм функционирования менеджера баз данных, алгоритм динамического определения реального времени отклика вычислительных серверов, алгоритм контроля и разграничения прав доступа к информационно-вычислительным ресурсам комплекса. Была проведена оптимизация SQL-запросов, разработаны подсистема инструментальных средств администратора комплекса и интерфейсные средства пользователей комплекса.

9. Разработаны и реализованы следующие алгоритмы обработки изображений годичных колец деревьев: интерактивный алгоритм восстановления непрерывных годичных колец из дискретных данных дендрохронологических измерений, алгоритм преобразования изображения из полярной системы координат в декартовую, алгоритм предварительной фильтрации шумов, алгоритм вычисления направления и среднеквадратичной ширины области максимального прироста годичных колец деревьев, алгоритм вычисления значений индексов прироста ширины годичных колец деревьев. Представлена имитационная модель в GPSS World многомашинного вычислительного комплекса обработки дендроэкологических данных.

10. Представлена практическая реализация многомашинного вычислительного комплекса обработки годичных колец деревьев. В эксперименте по функционированию многомашинного комплекса обработки дендроэкологических данных было задействовано три вычислительных сервера и коммуникационный сервер, функционирующие под управлением операционных систем FreeBSD и Windows и предоставившие в пользование СУБД Oracle и MySQL. На трех вычислительных серверах были развернуты одинаковые серверные приложения анализа годичных колец деревьев, реализующие задачи вычисления азимута и среднеквадратичной ширины области максимального прироста и вычисления значений индексов прироста. Информационная поддержка функционирования МВК включала формирование и ведение базы научной информации, базы дендроэкологических данных и системной базы данных. Была проведена оценка качества многомашинного вычислительного комплекса на соответствие оценочным элементам государственного стандарта ГОСТ 28195-89.

11. Представлены результаты обработки поперечных спилов сосны, отобранные в верхней террасе долины р. Бия (п. Стан Бехтемир, Алтайский край) и связь индексов прироста кедра сибирского (п. Зоркальцево) и летних осадков (метеостанция Томск).

Таким образом, итогом исследований по применению новых информационных технологий в области охраны окружающей среды и экологии человека явилась разработка и реализация информационно-управляющей инфраструктуры распределенных вычислений для обработки годичных колец деревьев, характеризующаяся возможностью наращивания технических ресурсных характеристик, возможностью наращивания функциональных ресурсных характеристик, возможностью адаптации к имеющимся составу и структуре ресурсных характеристик, способностью работать на различных аппаратных платформах с различными операционными системами и серверами баз данных.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биоиндикация загрязнений наземных экосистем / под ред. Р. Шуберта – М.: Мир, 1998. – 350 с.
2. Розенберг Г.С. Биоиндикация: теория, методы приложения. – М.: Наука, 1983. – 163 с.
3. Шиятов С.Г. Дендрохронология, ее принципы и методы // Записки Всесоюзного ботанического общества. Вып. 6, 1973. С. 53.
4. Реймерс Н.Ф. Природопользование: Словарь – справочник. – М.: Мысль, 1990. – 437 с.
5. Шиятов С.Г. Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской Субарктике. – Новосибирск: Наука, 1996. 254 с.
6. Дмитриева Е.В. Опыт анализа влияния климата на прирост деревьев различных местообитаний на Карельском перешейке. // Бот. ж., 1959, Т. 44, № 3. С. 12–15.
7. Ваганов Е.А., Шиятов С.Г. Роль дендроклиматических исследований в разработке глобальных и региональных экологических проблем (на примере азиатской части России) // Сибирский экологический журнал. – 1999. № 2. С. 111–116.
8. Яковлев Г.П. Ботаника. – М.: Высш. Школа, 1990. – 364 с.
9. Ваганов Е.А., Шашкин А.В. Рост и структура годичных колец хвойных. – Новосибирск: Наука, 2000. – 232 с.
10. Козубова Г.М., Зотова-Спановская Н.П. Диагностические признаки древесины и целлюлозных волокон, применяемых в целлюлозно-бумажной промышленности СССР. – Петрозаводск.: Карельский филиал АН СССР. 1976. 152 с.
11. Экологическая биофизика. Учебное пособие: под ред. И.И. Гиттельсона, Н.С. Печуркина. Т. 2. Биофизика наземных и водных экосистем. – М.: Логос, 2002. – 360с.
12. Шиятов С.Г., Ваганов Е.А., Кирдянов А.В., Круглов В.Б., Мазепа В.С., Назурбаев М.М., Хантемиров Р.М. Методы дендрохронологии. Часть 1. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации: учебно-методич. пособие. – Красноярск: КрасГУ, 2000. – 80 с.
13. Лобжанидзе Э.О. Камбий и формирование годичных колец древесины. – Тбилиси: Изд-во АН СССР, 1961. – 159 с.
14. Schweingruber F.H. Tree Rings and Environment. Dendroecology. Birmensdorf, Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research. Berne, Stuttgart, Vienna, Haupt. 1996. – 609 pp.

15. Абламейко С.В., Лагуновский Д.М. Обработка изображений: технология, методы, применение. Учебное пособие. – М.: Амалфея, 2000. – 304 с.
16. Гришин М.П. Автоматическая обработка фотографических изображений с применением ЭВМ. – Минск.: Наука и техника, 1976. – 232 с.
17. Душин Л.А., Привезенцев В.И., Таран В.С., Ямницкий В.А. Многоградационная автоматическая обработка оптических интерферограмм плазмы на ЭВМ // Автометрия. 1974. № 3. С. 35–40.
18. Becker F., Meier G.E.A., Wegner H. Automatic evaluation of interferograms // Proc. SPIE. – 1982. V. 359. P. 386–393.
19. Агурок И.П. Исследование возможностей автоматизированной обработки интерферограмм в системе с ПЗС-матрицей путем моделирования на ЭВМ // Оптико-механическая промышленность. 1983. № 11. С. 14–17.
20. Арсенин В.Я., Бурдонский И.Н., Кондрашов В.Н. и др. Обработка интерферограмм на ЭВМ. // Диагностика плазмы. – М.: Энергоиздат, 1981. – Вып. 4 П. – С. 54–160.
21. Ярославский Л.П., Фаянс А.М. Исследование возможностей обработки и анализа интерферограмм на ЦВМ. – М.: Наука, 1975. С. 27–49.
22. Wyant J.C. Interferometric optical metrology: basic principles and new systems // Laser Focus. 1982. – V. 18, № 5. P. 65–71.
23. Kuchel F.M., Schmieder Th., Tiziani H.J. Beitrag zur Verwendung von Zernike-Polynomen bei der automatischen Interferenzstreifenauswertung // Optik. – 1983. B. 65. № 2 – S. 123–142.
24. Mertz L. Complex interferometry // Appl. Opt. – 1983. V. 22, № 10. – P. 1535–1539.
25. Mertz L. Real-time fringe-pattern analysis // Appl. Opt. – 1983. V. 22, № 10. – P. 1535–1539.
26. Вайнштейн Л.А., Вакман Д.Е. Разделение частот в теории колебаний и волн. – М.: Наука, 1983. – 287 с.
27. Вакман Д.Е. Об определении понятий амплитуды, фазы и мгновенной частоты сигнала // Радиотехника и электроника. 1977. Т. 17, № 5. С. 972–978.
28. Вакман Д.Е., Вайнштейн Л.А. Амплитуда, фазы частота – основные понятия теории колебаний // Успехи физических наук. 1977. Т. 123. Вып. 4. С. 657–682.
29. Коржик В. И. Огибающая сигнала и некоторые ее свойства // Радиотехника. – 1968. – Т. 23, № 4. – С. 243–245.
30. Нуссенцвейг Х.М. Причинность и дисперсионные соотношения. – М.: Мир. 1976. – 208 с.

31. Райс С.О. Огибающие узкополосных сигналов // ТИИЭР. – 1982. Т. 70, № 7, С. 5–13.
32. Laboratory of Tree-Ring Research, The University of Arizona // Dendrochronological Software. 2014. URL: <http://www.ltrr.arizona.edu/pub/dpl/> (дата обращения: 23.05.2014).
33. Laboratory of Tree-Ring Research, The University of Arizona // Files for DPL and Documentation. 2014. URL: <http://www.ltrr.arizona.edu/pub/dpl/A-INFO.HTM> (дата обращения: 23.05.2014).
34. Laboratory of Tree-Ring Research, The University of Arizona // Files for PRECON and Documentation. 2014. URL: <http://www.ltrr.arizona.edu/webhome/hal/precon.html> (дата обращения: 23.05.2014).
35. Laboratory of Tree-Ring Research, The University of Arizona // Files for Tree-Ring Growth Simulation Program and Documentation. 2014. URL: <http://www.ltrr.arizona.edu/people/Hal/halmodel.html> (дата обращения: 23.05.2014).
36. Ultimate Tree-Ring Web Pages // Software used in Dendrochronology. 2014. URL: <http://web.utk.edu/~grissino/software.htm> (дата обращения: 23.05.2014).
37. Frank Rinn, Heidelberg, Germany // LignoVision. 2014. URL: <http://www.rinntech.de/content/view/18/49/lang,english/index.html> (дата обращения: 23.05.2014).
38. Frank Rinn, Heidelberg, Germany // TSAP-Win. 2014. URL: <http://www.rinntech.de/content/view/17/48/lang,english/index.html> (дата обращения: 23.05.2014).
39. Reno Tree-Ring Laboratory, The University of Nevada // DendroClim 2002. 2014. URL: <http://woods.geography.unr.edu/dendroclim2002.htm> (дата обращения: 23.05.2014).
40. Regent Instruments // WinDENDRO. 2014. URL: [http://www.regent.qc.ca/assets/windendro\\_about.html](http://www.regent.qc.ca/assets/windendro_about.html) (дата обращения: 23.05.2014).
41. IEH-Elektronik GmbH // DendroLab 470. 2014. URL: <http://www.ess.ch/ieh/Dendro.html> (дата обращения: 23.05.2014).
42. Bernhard Knibbe Software Development // PAST 32. 2014. URL: <http://www.sciem.com/products/past/> (дата обращения: 23.05.2014).
43. Bernhard Knibbe Software Development // OSM 3.10. 2014. URL: <http://www.sciem.com/products/osm/> (дата обращения: 23.05.2014).
44. ProjectJ2X. MeasureJ2X // The tree ring measuring program. 2014. URL: <http://www.voortech.com/projectj2x/index.html> (дата обращения: 23.05.2014).
45. Зуев В.В., Бондаренко С.Л. Реконструкция палеоповедения озонового слоя на основе дендрохронологических данных и спутниковых данных TOMS // Исследование Земли из Космоса. – 2002. – № 6. – С. 19–24.

46. Агеев Б.Г., Несвитайло В.Д., Пономарев Ю.Н., Сапожникова В.А. Дендрохроноиндикация с использованием газоанализа // Сибирский экологический журнал. –2005. – № 1, С. 61–65.
47. Батоврин В.К., Гуляев Ю.В., Ижванов Ю.Л., Олейников А.Я., Сигов А.С., Тихонов А.Н. Применение технологии открытых систем для построения и использования инфраструктуры высокопроизводительных ресурсов для науки и образования // Институт Радиотехники и Электроники РАН. 2014. URL: [http://www.cplire.ru/win/casr/os/3\\_12/8/sp2.htm](http://www.cplire.ru/win/casr/os/3_12/8/sp2.htm) (дата обращения: 02.04.2014).
48. Попов М. На счет grid // Компьютерра-Онлайн. 2014. URL: <http://pda.cio-world.ru/?action=article&id=37649> (дата обращения: 15.03.2014).
49. Globus. 2014. URL: <http://www.globus.org> (дата обращения: 16.03.2014).
50. Globus Toolkit Homepage. 2014. URL: <http://www-unix.globus.org/toolkit/> (дата обращения: 17.03.2014).
51. Legion. 2014. URL: <http://legion.virginia.edu/> (дата обращения: 18.03.2014).
52. Virtual Data Toolkit. 2014. URL: <http://www.cs.wisc.edu/vdt> (дата обращения: 18.03.2014).
53. Condor. 2014. URL: <http://www.cs.wisc.edu/condor/> (дата обращения: 24.03.2014).
54. Ninf: A Global Computing Infrastructure. 2014. URL: <http://ninf.apgrid.org/> (дата обращения: 07.05.2014).
55. EGEE (Enabling Grids for E-sciencE). 2014. URL: <http://www.eu-egee.org/> (дата обращения: 05.04.2014).
56. Unicore. 2014. URL: <http://www.unicore.org> (дата обращения: 23.05.2014).
57. Коваленко В.Н., Корягин Д.А. Организация grid: есть ли альтернативы? // Открытые системы. 2014. URL: <http://www.osp.ru/os/2004/12/034.htm> (дата обращения: 19.03.2014).
58. DataSynapse Inc. 2014. URL: <http://www.datasynapse.com/> (дата обращения: 19.03.2014).
59. United Devices Inc. 2014. URL: <http://www.ud.com/> (дата обращения: 19.03.2014).
60. Sybase Inc. 2014. URL: <http://www.sybase.com/products/developmentintegration/avakieii> (дата обращения: 19.03.2014).
61. NorduGrid middleware. Advanced Resource Connector. 2014. URL: <http://www.nordugrid.org/middleware/> (дата обращения: 30.03.2014).
62. Application Grid Laboratory for Science. Grid3. 2014. URL: <http://www.ivdgl.org/grid2003/> (дата обращения: 31.03.2014).



63. Open Science Grid. 2014. URL: <http://www.opensciencegrid.org/> (дата обращения: 31.03.2014).
64. Oak Ridge National Laboratory. 2014. URL: <http://www.ornl.gov/> (дата обращения: 23.03.2014).
65. PACX-MPI. 2014. URL: <http://www.hlrs.de/organization/amt/projects/> (дата обращения: 24.03.2014).
66. CrossGrid. 2014. URL: <http://www.crossgrid.org/> (дата обращения: 16.03.2014).
67. Application Grid Laboratory for Science. Applications. 2014. URL: <http://www.ivdgl.org/grid2003/applications/index.php> (дата обращения: 31.03.2014).
68. PPDG. 2014. URL: <http://www.ppdg.net/> (дата обращения: 01.04.2014).
69. Grid Physics Network. 2014. URL: <http://www.griphyn.org/> (дата обращения: 01.04.2014).
70. LCG. 2014. URL: <http://lcg.web.cern.ch/> (дата обращения: 01.04.2014).
71. iVDGL. 2014. URL: <http://www.ivdgl.org/> (дата обращения: 01.04.2014).
72. World Community Grid. 2013. URL: <http://www.worldcommunitygrid.org> (дата обращения: 02.04.2013).  
Welcome to the Worldwide LHC Computing Grid // WLCG Project Office. [2008-2012]. URL: <http://www.worldcommunitygrid.org> (дата обращения: 02.04.2013).
73. FightAIDS@Home. 2013. URL: [http://www.worldcommunitygrid.org/projects\\_showcase/viewFaahResearch.do](http://www.worldcommunitygrid.org/projects_showcase/viewFaahResearch.do) (дата обращения: 02.04.2013).
74. Human Proteome Folding Project. 2013. URL: <http://www.worldcommunitygrid.org> (дата обращения: 02.04.2013).
75. TeraGrid. 2014. URL: <http://www.teragrid.org/> (дата обращения: 02.04.2014).
76. CosmoGrid. 2014. URL: <http://www.cosmogrid.ie/> (дата обращения: 03.04.2014).
77. DataTAG. 2014. URL: <http://datatag.web.cern.ch/datatag/> (дата обращения: 05.04.2014).
78. GRID.IT: An Italian National Research Council Project on Grid Computing. 2014. URL: <http://www.grid.it/> (дата обращения: 07.04.2014).
79. Computational Chemistry Grid. 2014. URL: <http://www.gridchem.org/> (дата обращения: 07.04.2014).

80. Earth System Grid. 2014. URL: <https://www.earthsystemgrid.org/> (дата обращения: 07.04.2014).
81. Russian Data Intensive GRID, RDIG. 2014. URL: <http://rus.egee-rdig.ru/> (дата обращения: 10.04.2014).
82. EGEE в ИФВЭ. 2014. URL: <http://www.ihep.su/> (дата обращения: 10.04.2014).
83. EGEE В ИМПБ РАН. 2014. URL: <http://www.impb.ru/> (дата обращения: 11.04.2014).
84. EGEE В ИТЭФ. 2014. URL: <http://egee.iter.ru/> (дата обращения: 12.04.2014).
85. Joint Institute for Nuclear Research (JINR). 2014. URL: <http://www.jinr.ru/> (дата обращения: 12.04.2014).
86. ИПМ РАН. 2014. URL: <http://www.keldysh.ru/> (дата обращения: 13.04.2014).
87. EGEE-RDIG в НИИ Ядерной физики. 2014. URL: <http://egee.sinp.msu.ru/> (дата обращения: 14.04.2014).
88. GRID в ПИЯФ. 2014. URL: <http://egee.pnpi.nw.ru/cgi/index.cgi> (дата обращения: 15.04.2014).
89. РИЦ «Курчатовский Институт» в RDIG и EGEE. 2014. URL: <http://grid.kiae.ru/> (дата обращения: 15.04.2014).
90. Global Grid Forum. 2014. URL: <http://www.ggf.org/> (дата обращения: 21.04.2014).
91. Enterprise Grid Alliance. 2014. URL: <http://www.gridalliance.org/> (дата обращения: 26.04.2014).
92. OASIS. 2014. URL: <http://www.oasis-open.org/> (дата обращения: 26.04.2014).
93. Pacific Rim Application and Grid Middleware Assembly. 2014. URL: <http://www.pragma-grid.net/> (дата обращения: 07.05.2014).
94. High Performance Computing and Networking Center. 2013. URL: <http://hpcnc.sre.ku.ac.th/> (дата обращения: 07.05.2013).
95. Nordic Grid Consortium. 2013. URL: <http://www.nordicgrid.org/> (дата обращения: 30.06.2013).
96. International Grid Trust Federation. 2013. URL: <http://www.gridpma.org/> (дата обращения: 30.06.2013).
97. Globus Alliance. 2014. URL: <http://www.globus.org/> (дата обращения: 21.04.2014).
98. Globus Consortium. 2014. URL: <http://www.globusconsortium.org/> (дата обращения: 21.04.2014).
99. Austrian Grid. 2014. URL: <http://www.austriangrid.at/> (дата обращения: 03.05.2014).

100. BELNET Grid Initiative. 2013. URL: <http://grid.belnet.be/> (дата обращения: 02.06.2013).
101. Thailand National Grid Project. 2013. URL: <http://www.thaigrid.or.th/en/> (дата обращения: 29.04.2013).
102. National Research Grid Initiative. 2014. URL: <http://www.naregi.org/> (дата обращения: 11.05.2014).
103. K\*Grid project. 2013. URL: <http://gridcenter.or.kr/> (дата обращения: 05.05.2013).
104. Academia Sinica Grid Computing Centre. 2014. URL: <http://www.twgrid.org/> (дата обращения: 21.05.2014).
105. China National Grid. 2013. URL: [http://www.cngrid.org/en\\_index.htm](http://www.cngrid.org/en_index.htm) (дата обращения: 08.06.2013).
106. Grid Canada. 2013. URL: <http://www.gridcanada.ca/> (дата обращения: 05.06.2013).
107. Danish Center for GRID Computing. 2013. URL: <http://www.dcgsc.dk/> (дата обращения: 09.06.2013).
108. Grid'5000. 2013. URL: <https://www.grid5000.fr/> (дата обращения: 09.06.2013).
109. D-Grid Initiative. 2013. URL: <http://www.d-grid.de/> (дата обращения: 24.06.2013).
110. Grid-Ireland. 2013. URL: <http://cagraidsvr06.cs.tcd.ie/index.html> (дата обращения: 23.06.2013).
111. Grid Consortium Japan. 2013. URL: <http://www.jpgrid.org/english/index.html> (дата обращения: 29.06.2013).
112. National e-Science Centre. 2014. URL: <http://www.nesc.ac.uk/> (дата обращения: 22.04.2014).
113. GRIDS Center. 2014. URL: <http://www.grids-center.org/> (дата обращения: 26.04.2014).
114. Australian Grid Forum. 2013. URL: <http://www.ausgrid.org/twiki/bin/view/Forum/WebHome> (дата обращения: 26.04.2013).
115. Israeli Association of Grid Technologies. 2014. URL: <http://www.grid.org.il/> (дата обращения: 28.04.2014).
116. Hellas Grid Task Force. 2013. URL: <http://www.hellasgrid.org/> (дата обращения: 29.04.2013).
117. Grid Forum Netherlands. 2014. URL: <http://gridforum.nl> (дата обращения: 29.04.2014).
118. Spanish National Research Network. 2014. URL: <http://www.rediris.es/index.en.html> (дата обращения: 29.04.2014).
119. HPCNC and Univeristy of Malaya Collaborate in building Geranium Grid. 2013. URL: [http://hpcnc.cpe.ku.ac.th/Members/ssy/news/um\\_training\\_05/news](http://hpcnc.cpe.ku.ac.th/Members/ssy/news/um_training_05/news) (дата обращения: 07.05.2013).

120. Armenian e-Science Foundation. 2014. URL: <http://www.escience.am/> (дата обращения: 22.04.2014).
121. OurGrid. 2013. URL: <http://www.ourgrid.org/> (дата обращения: 05.06.2013).
122. BioPaua. 2013. URL: <https://www.biopaua.lncc.br/> (дата обращения: 05.06.2013).
123. GerpavGrid. 2013. URL: <http://cpad.pucrs.br/gerpavgrid/> (дата обращения: 05.06.2013).
124. GridVida. 2013. URL: <http://www.nutes.ufpe.br/gridvida/> (дата обращения: 05.06.2013).
125. GridUnit. 2013. URL: <http://gridunit.sourceforge.net/> (дата обращения: 05.06.2013).
126. PortalGiga. 2013. URL: <http://portalgiga.unisantos.edu.br/> (дата обращения: 05.06.2013).
127. SegHidro. 2013. URL: <http://seghidro.lsd.ufcg.edu.br/> (дата обращения: 05.06.2013).
128. RoGrid. 2013. URL: <http://www.rogrid.ro/?newlang=eng> RoGrid (дата обращения: 30.06.2013).
129. National Grid. 2013. URL: <http://www.ngp.org.sg/index.html> (дата обращения: 30.06.2013).
130. Хорафас Д.Н. Системы и моделирование. – М.: Мир, 1967. – 419 с.
131. Битвинскас Т.Т. Дендроклиматические исследования. – Л., Гидрометеиздат, 1974. – 172 с.
132. Спиоров В.В., Тресков И.А., Ваганов Е.А. Исследование роста деревьев на микрофотометрическом анализаторе // Дендроклиматохронология и радиоуглерод. Материалы второго всесоюзного совещания по дендрохронологии и дендроклиматологии. Каунас. 1972 г. С. 137-140.
133. Витриченко Э. А., Пушной Л. А., Тартаковский В. А. Доклады АН СССР. 1983. Т.268. №1. С. 91-95.
134. Золотарев И.Д. Проблема «амплитуда, фаза, частота» и ее решение в радиотехнике // Техника радиосвязи. 1997. № 3. С. 3-14.
135. Тартаковский В.А. Оптика атмосферы и океана. 1997. Т.10. №3. С. 301–315.
136. Cohen L. Loughlin P. Vakman D. On an ambiguity in the definition of the amplitude and phase of a signal // Signal Processing. – 1999. – № 79. – P. 301–312.
137. Vakman D. On the analytic signal, the Teager – Kaiser energy algorithm, and other methods for defining amplitude and frequency // IEEE Trans. Signal processing. 1996. 44. № 4. P. 791.

138. Тартаковский В.А., Волков Ю.В., Исаев Ю.Н., Несветайло В.Д., Попов В.Н. Математическая модель радиального сечения годовичных колец деревьев. // Автометрия. 2003. № 5. С. 118–127.
139. Левин Б.Я. Распределение корней целых функций – М.: Гостехиздат. 1956. – 269 с.
140. Хургин Я.И., Яковлев В.П. Прогресс в Советском Союзе в области теории финитных функций и ее применений в физике и технике // ТИИЭР. 1977. 65. № 7. С. 16–21.
141. Витриченко Э.А., Лукин В.П., Пушной Л.А., Тартаковский В.А. Проблемы оптического контроля. – Новосибирск.: Наука. Сиб. Отд-ние, 1990. – 351 с.
142. Питербарг Л.И. Гриценко В.А. Устранение «выбросов» в рядах гидрофизических измерений с помощью медианной фильтрации // Океанология. – 1983. – Т. 23, вып. 1. – С. 161–163.
143. Вержбицкий В.М. Численные методы. (математический анализ и обыкновенные дифференциальные уравнения). – М.: Высш. шк., 2001. – 328.
144. Тартаковский В.А. О продолжении интерферограмм за пределы области определения // Оптика атмосферы и океана. 1993. 6. № 12. С. 51–68.
145. Пестряков В.Б. Фазовые радиотехнические системы (основы статистической теории). – М.: Наука, 1977. – 336 с.
146. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений / Под ред. Д. Малакары. – М.: Машиностроение, 1984. – 224 с.
147. Питербарг Л.И. Медианная фильтрация случайных процессов. // Проблемы передачи информации. – 1984. – Т. 20, вып. 1. – С. 65-73.
148. Турчак Л.И. Основы численных методов: учеб. пособие. – М.: Наука, 1987. – 320 с.
149. Бендат Дж., Пирсол А. Изменение и анализ случайных процессов. – М.: Мир, 1974. – 464 с.
150. Бендат Дж., Пирсол А. Применения корреляционного и спектрального анализа. – М.: Мир, 1983. – 312 с.
151. Дженкинс Г., Д. Ваттс. Спектральный анализ и его приложения. – М.: Мир, 1971. – 316с.
152. Иванов М.Т. Теоретические основы радиотехники: учеб. пособие. – М.: Высш. шк., 2002. – 306 с.
153. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. – СПб.: Питер, 2003. – 608 с.
154. Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К. Машинные методы математических вычислений. – М.: Мир, 1980. – 279 с.

155. Френкс Л. Теория сигналов / пер. с англ., под ред. Д. Е. Вакмана. – М.: Советское радио, 1974, – 344 с.
156. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. – М.: Мир, 1978. – 848 с.
157. Отнес Р., Эноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. Основные методы: – М.: Мир, 1982. – 428 с.
158. Трахтман А. М. Введение в обобщенную спектральную теорию сигналов. – М.: Советское радио, 1972, – 352 с.
159. Мышкис А.Д. Лекции по высшей математике. – М.: Наука, 1964. – 608с.
160. Феклистов П.А., Евдокимов В.Н., Барзут В.М. Биологические и экологические особенности роста сосны в северной подзоне Европейской тайги. – Архангельск: ИПЦ АГТУ, 1997. – 140 с.
161. Воронов А.Г. Геоботаника. – М.: Высш. Школа, 1973. – 384 с.
162. Дендрология. Руководство к выполнению лабораторных занятий и учебной практики. Для студентов лесохозяйственного факультета. Ленинград, 1968. – 28 с.
163. Орлов А.Я., Кошельков С.П. Почвенная экология сосны. – М.: Наука, 1971. – 323 с.
164. Rational Software. 2013. URL: <http://www-306.ibm.com/software/rational/> (дата обращения: 28.07.2013).
165. Computer Associates International. 2013. URL: <http://www.ca.com/> (дата обращения: 14.04.2013).
166. Фостер Я. Кессельман К. Тьюке С. Анатомия грид. Создание масштабируемых виртуальных организаций. 2013. URL: <http://www.gridclub.ru/library/publication.2004-11-29.7104738919> (дата обращения: 16.11.2013).
167. Фостер Я. Кессельман К. Ник Д.М. Тьюке С. Физиология грид. Открытая архитектура грид-служб для интеграции распределенных систем. 2013. URL: <http://www.gridclub.ru/library/publication.2004-11-29.8307957187> (дата обращения: 16.11.2013).
168. Технология Grid. 2013. URL: [http://www.csa.ru/skif/kurs\\_2/gg/applications.html](http://www.csa.ru/skif/kurs_2/gg/applications.html) (дата обращения: 15.03.2013).
169. Попов В.Н. Ботыгин И.А. Тартаковский В.А. Технология вычислительных кластеров в задачах дендрэкологической диагностики // Оптика атмосферы и океана. – 2005. – Т. 18. – № 01–02. – С. 114–119.
170. Ботыгин И.А., Попов В.Н., Волков Ю.В., Тартаковский В.А. Вычислительные технологии в задачах обработки дендрэкологических данных // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 6. – С. 170–174.

171. Евтеев М. ERwin – трудно сделать только первый шаг. 2013. URL: <http://www.interface.ru/public/erwintxt/erwintxt.htm> (дата обращения: 14.04.2013).
172. Черняк Л. Кластер для облегченных архитектур // Открытые системы. – 2006. – № 3.
173. GridPrens. 2013. URL: <https://www.grid5000.fr/mediawiki/index.php/Grid5000:Software> (дата обращения: 17.07.2013).
174. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. – М.: Машиностроение, 1979. – 432 с.
175. Рыжиков Ю.И. Теория очередей и управления запасами. – Питер, 2001. – 376 с.
176. Вишневский В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. – М.: Техносфера, 2003. – 512 с.
177. Minuteman Software. 2013. URL: <http://www.minutemansoftware.com/> (дата обращения: 25.07.2013).
178. Попов В.Н., Волков Ю.В., Ботыгин И.А., Тартаковский В.А. Информационный сервер для математического моделирования и анализа экспериментальных данных в области дендрэкологии // Наука. Техника. Инновации. Тезисы докладов Региональная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2001. – Ч. 1. – С. 95–96.
179. Ботыгин И.А., Волков Ю.В., Попов В.Н., Тартаковский В.А. Система удаленного интерактивного анализа экспериментальных данных в области дендрэкологии // Экология и безопасность жизнедеятельности. Сборник материалов Международной научно-практической конференции. – Пенза, 2002. – С. 237–239.
180. Ботыгин И.А. Попов В.Н. Волков Ю.В. Тартаковский В.А. Моделирование в виртуальной дендрэкологической лаборатории // Моделирование. Теория, методы и средства. Материалы Второй Международ. науч.-прак. конф. – Новочеркасск: ООО НПО «ТЕМП», 2002. – Ч. 2. – С. 19–21.
181. Попов В.Н. Волков Ю.В. Ботыгин И.А. Тартаковский В.А. Интернет-доступная система для анализа годовых колец деревьев // Измерения, моделирование и информационные системы как средства снижения загрязнений на городском и региональном уровне. ENVIROMIS 2002. Программа и тезисы международной конференции. – Томск, 2002. – С. 103–104.
182. Попов В.Н. Волков Ю.В. Ботыгин И.А. Тартаковский В.А. Технология и программные средства удаленного использования вычислительных ресурсов для обработки данных в области дендрэкологии // Вычислительно-информационные технологии для наук об

- окружающей среде. CITES 2003. Программа и тезисы международной конференции и школы молодых ученых. – Томск, 2003. – С. 45.
183. Попов В.Н., Волков Ю.В., Ботыгин И.А., Тартаковский В.А. Дистанционная информационно-вычислительная технология анализа годичных колец деревьев // ENVIROMIS 2004. Международная конференция по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды. Программа и тезисы. – Томск, 2004. – С. 61–62
184. Попов В.Н., Ботыгин И.А., Волков Ю.В., Тартаковский В.А. Информационная технология анализа годичных колец деревьев // Четвертый международный симпозиум «Контроль и реабилитация окружающей среды». Материалы симпозиума. Томск, 2004. – С. 80–81.
185. ГОСТ 28195-89. Оценка качества программных средств. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 38 с.



Научное издание

БОТЫГИН Игорь Александрович  
ВОЛКОВ Юрий Викторович  
ПОПОВ Владимир Николаевич  
ТАРТАКОВСКИЙ Валерий Абрамович

## МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КЛИМАТОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ ДЕНДРОХРОНОИНДИКАТОРОВ

Монография

**Издано в авторской редакции**

Научный редактор *доктор технических наук,  
профессор В.К. Погребной*


Компьютерная верстка *Д.В. Сотникова*  
Дизайн обложки *А.И. Сидоренко*

Подписано к печати 16.01.2015. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл. печ. л. 10,76. Уч.-изд. л. 9,73.  
Заказ 18-15. Тираж 100 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Система менеджмента качества  
Издательства Томского политехнического университета  
сертифицирована в соответствии с требованиями ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30  
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru