

УДК 519.688:53.083.98

## АЛГОРИТМ АНАЛИЗА ПЛОЩАДЕЙ ГОДИЧНЫХ СЛОЕВ ДЕРЕВЬЕВ

Ю.В. Волков, В.А. Тартаковский

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск

E-mail: tv@imces.ru

*Рассмотрен алгоритм распознавания границ годичных колец деревьев и вычисления площадей годичных слоев, отображенных на картине поперечного сечения ствола дерева, основанный на методе группировки. Приведены результаты численного исследования предлагаемого алгоритма и результаты его применения к анализу натурных образцов.*

### Ключевые слова:

*Биоиндикация, годичные кольца, сезонный рост, математическое моделирование, анализ сигналов, распознавание образов.*

### Key words:

*Bioindication, tree-ring, vegetative growth, mathematical simulation, signal analysis, object identification.*

### Введение

Биоиндикация основана на выявлении естественных колебаний природных процессов и экологически значимых изменений на основе реакции на них живых организмов и их сообществ. Растения обладают относительно высокой чувствительностью к изменению окружающей среды, что позволяет использовать их в качестве биологических индикаторов для определения уровней внешних воздействий.

Возможность получения биоиндикационной информации по поперечному срезу дерева заключается в особенностях его строения. Ствол дерева на поперечном сечении состоит из концентрических слоев. Каждый слой представляет ежегодное нарастание древесины по диаметру и называется годичным слоем или годичным кольцом. На поперечном разрезе ствола эти слои можно различить благодаря образованию ранней и поздней древесины, откладывающейся в течение вегетационного периода. Граница каждого годичного слоя обозначена более

резко, чем переход от ранней древесины к поздней в пределах одного слоя. Это объясняется различием между последними элементами поздней древесины предыдущего годичного слоя и первыми элементами ранней древесины последующего [1–3].

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. 1, а.

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

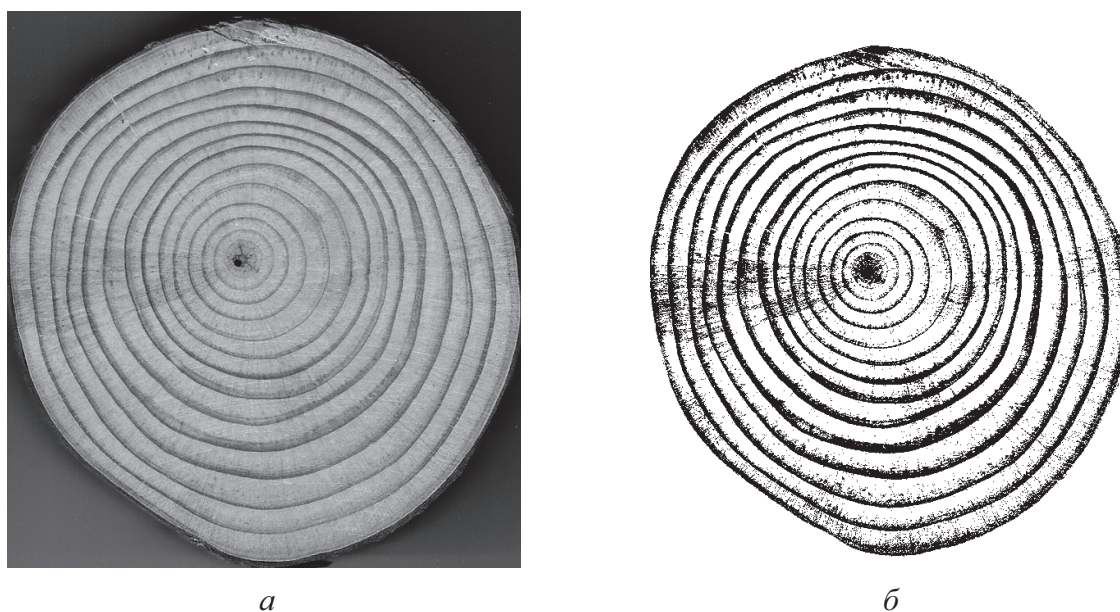


Рис. 1. Изображение поперечного спила сосны обыкновенной в виде: а) градаций серого цвета; б) бинарном

слоев изображение переводится в бинарный вид относительно выбранной границы интенсивности цвета каждого пикселя в массиве (рис. 1, а). На бинарном графическом изображении годичных слоев наряду с информацией о границах годичных слоев отражается большое количество шумов, связанных как с механической обработкой древесины, так и с биологическими процессами, происходящими в дереве в период 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. 1, а), применена предварительная фильтрация по радиусам [2]. 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. 1, б), но для точного выделения контуров годичных колец необходима разработка дополнительных алгоритмов.

Разработанный ранее алгоритм отслеживания колец [3], основанный на алгоритме простого последовательного перебора элементов массива в годичном 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 годичные слои, и при наличии частичной потери информации (разрывы годичных слоев).

Для точного восстановления границ годичных 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 предположить, что это пространство подобно обычному пространству, имеющему евклидову метрику, то получим возможность измерять «расстояния» между точками признакового пространства. Евклидовы расстояния вычисляются 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. 1, б). Классификационной группой в графической картине поля годичных колец является отдельный годичный слой. Объединение отдельных элементов графического массива в группы, со-

ответствующих 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:

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

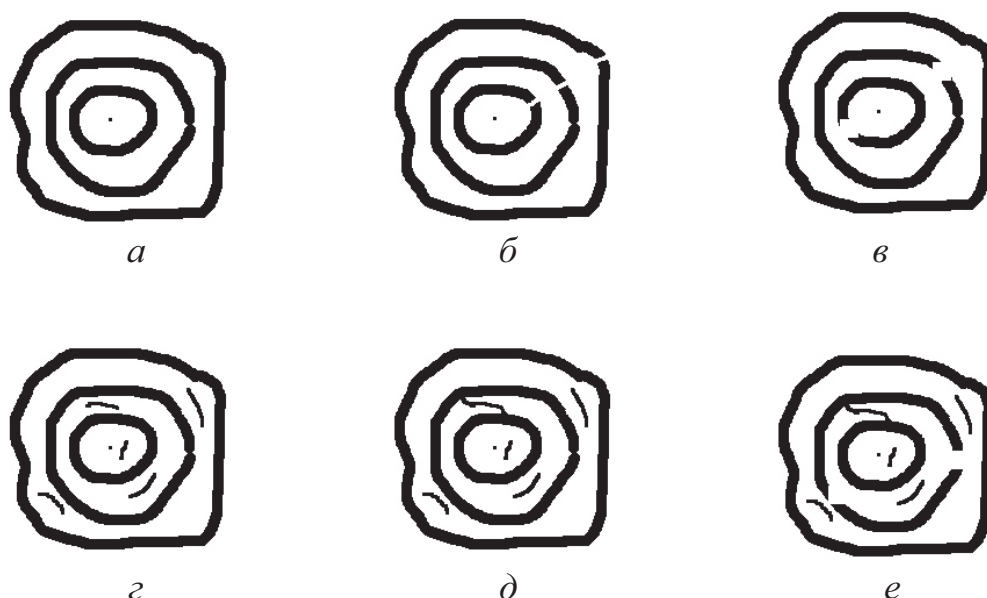
где  $x_0$ ,  $y_0$  — координаты центра окружности;  $R$  — радиус окружности.

Расстояние, определенное как признак группировки элементов массива, не может быть задано одним значением радиуса  $R$  на протяжении всего годичного слоя. Невозможно 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 на соседние годичные слои, 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 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 и/или разрывов, монотонного возрастания расстояний и наличия их пересечений.



**Рис. 2.** 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 № 2; е) модель с комбинацией шумов по типу № 1 и 2 и с разрывом по типу № 1

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 годовичного слоя.

#### Численный эксперимент

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, с возможными проявлениями графических картин, характерных для годовичных слоев деревьев (рис. 2).

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, б, учитывающий разрыв в виде луча, проходящего от центра к периферии через все годовичные слои; разрыв по типу № 2, рис. 2, в, учитывающий разрыв в одном слое; шум по типу № 1, рис. 2, г, включающий шумы биологического и механического происхождения между годовичными

слоями, шум по типу № 2, рис. 2, д; шум, смыкающий годовичные слои, комбинация шумов по типу № 1 и 2 и с разрывом по типу № 1, рис. 2, 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 таблице.

**Таблица.** 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 № 2 (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 276×276 пикселей, составило 3,68 %. Аналогичные эксперименты для больших размеров графических моделей (на уровне 4000×4000 пикселей) и большего числа сло-

ев (более 90 слоев) показали максимальную ошибку не более 20 %, что соответствует уровню точности, заложенному в разработанном алгоритме.

#### Натурный эксперимент

Апробация работы алгоритма проводилась на натурном образце, соответствующем поперечному спилу ствола сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*), рис. 1, *а*. Целью применения разработанного алгоритма группировки являлось точное вычисление площадей всех годовичных 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 годовичных слоев. *Второй* этап — сканирование поперечного спила дерева. Варьируемыми параметрами изображения при сканировании являются: оптическая плотность изображения, масштаб, цветовая палитра. Изменение контрастности и яркости изображения при сканировании не производится.

Сканирование проводится в градациях серого цвета, что позволяет уменьшить величину графиче-

ского 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. 1, *б*, удобному для математической обработки. На *четвертом* этапе, для удобства обработки, изображение concentрических колец разворачивается по радиусам, рис. 3, *а*. Производится фильтрация графического изображения по отдельным радиальным сечениям. Для фильтрации последовательно применяется полиномиальный и медианный фильтры в соответствии с алгоритмом, описанным ранее [4, 5].

На *пятом* этапе реализуется алгоритм группировки, в результате которого вычисляются границы годовичных слоев, рис. 3, *б*.

*Шестой* этап — перевод графической картины из декартовой системы в полярную — возврат к исходной графической картине в преобразованном виде, рис. 4, *а*.

*Седьмой* этап — расчет площадей отдельных годовичных слоев. Для расчета площадей графическое изображение преобразуется к виду полей прироста биомассы, рис. 4, *б*, *г*, путем разделения годовичных слоев по уровням. По сумме элементов, принадлежащих уровню, вычисляется площадь каждого годовичного слоя, рис. 5.

Наложение вычисленных границ годовичных слоев на исходное графическое изображение попереч-

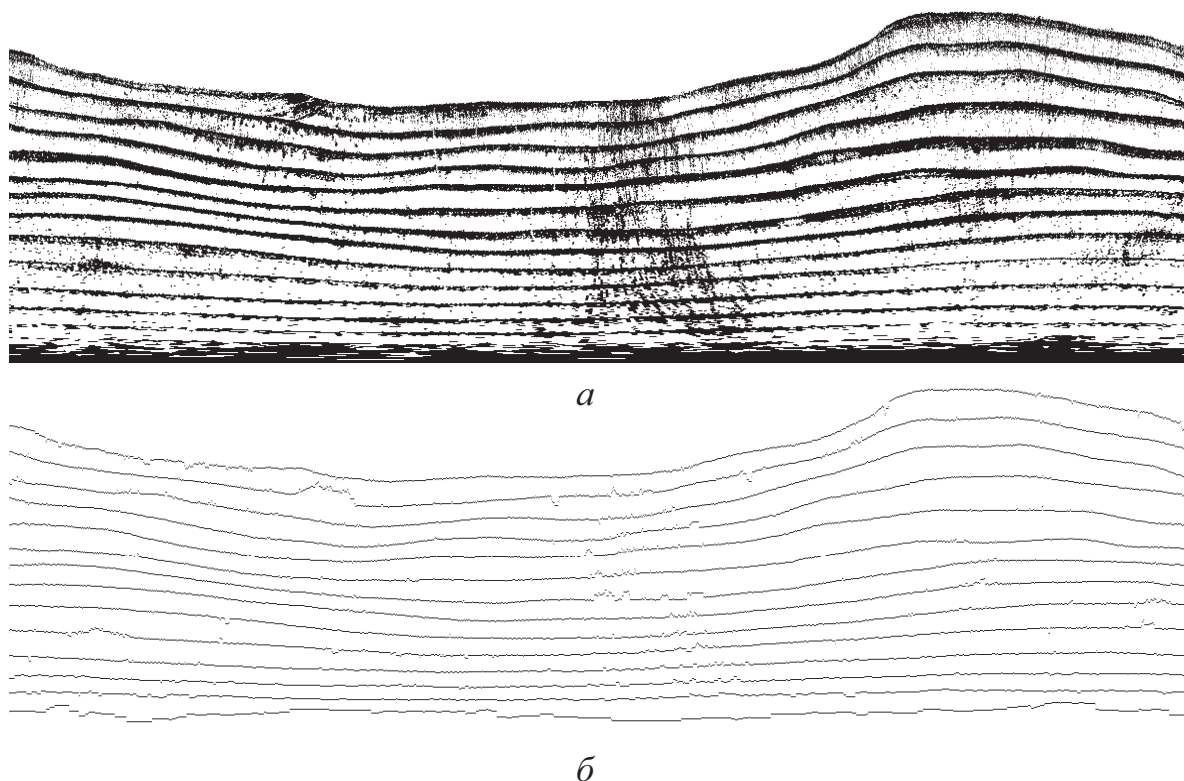
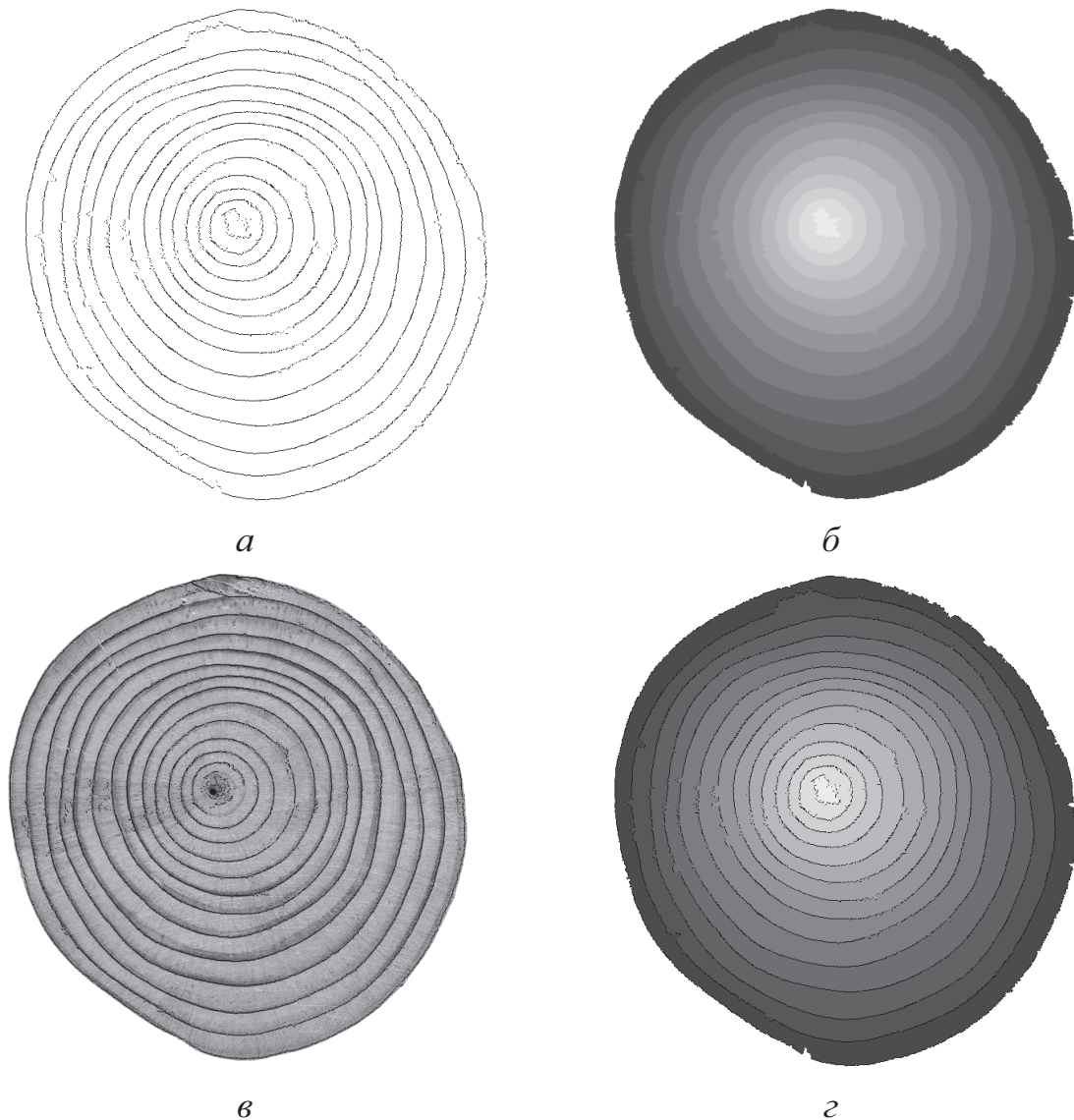


Рис. 3. Графическое представление годовичных колец в декартовой системе координат: а) исходного графического изображения; б) вычисленных границ годовичных слоев





**Рис. 4.** Графическое представление групп годичных 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 годичных слоев

ного спила дерева, рис. 4, 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. 5.

В соответствии с расчетом, проведенным с использованием алгоритма группировки, площадь прироста слоев сосны в поперечном сечении ствола

увеличилась с 1993 по 2006 гг. с 1,1 до 52,1 см<sup>2</sup>, рис. 5, а.

Для сравнения точности вычисления, рис. 5, б, приведены результаты расчета площадей годичных 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 годичных 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 %.

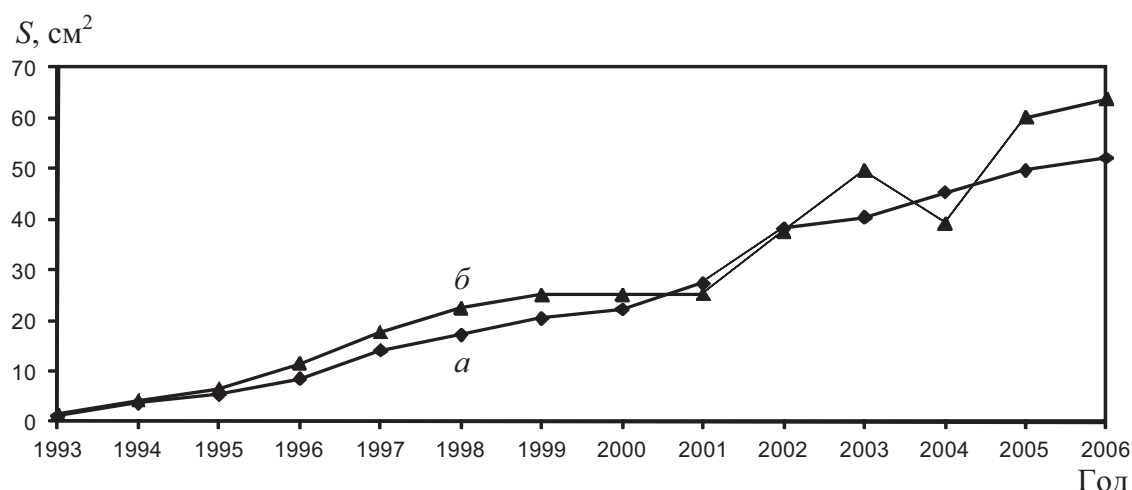


Рис. 5. Распределение по годам площадей годовых слоев на поперечном спиле ствола сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*): а) полученных с использованием алгоритма группировки; б) рассчитанных по средним радиусам

### Заключение

Разработан алгоритм распознавания границ годовых колец деревьев и вычисления площадей годовых слоев, который реализует метод группировки элементов графического массива с последующим распознаванием образов годовых колец по изображению поперечного сечения ствола.

Точность работы с натурными образцами подтверждается совпадением границ годовых слоев

при наложении их на исходное графическое изображение. Максимальная ошибка расчета площадей не превышает 20 %, что подтверждается результатами численного эксперимента.

Алгоритм группировки позволяет восстанавливать картину поля отдельных годовых слоев, несущих информацию о пространственной неоднородности распределения биомассы, и может быть использован при оценке пространственного влияния внешних параметров на рост дерева.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ваганов Е.А., Шашкин А.В. Рост и структура годовых колец хвойных. – Новосибирск: Наука, 2000. – 232 с.
2. Тартаковский В.А., Волков Ю.В. Математическая модель микроструктуры годовых слоев деревьев // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 314. – № 5. – С. 117–120.
3. Тартаковский В.А., Волков Ю.В. Математическая модель годовых колец деревьев на микро- и макроуровне // Новые методы в дендрэкологии / под ред. В.И. Воронина. – Иркутск: Изд-во Ин-та географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2007. – С. 150–152.
4. Тартаковский В.А., Исаев Ю.Н., Несветайло В.Д., Волков Ю.В., Попов В.Н. Математическая модель радиального сечения годовых колец деревьев // Автометрия. – 2003. – Т. 38. – № 5. – С. 118–127.
5. Isaev Y.N., Tartakovskiy V.A., Volkov Y.V. Mathematical Model of Tree-Rings as a Detector of the Ecological Field Dendro-Optical Analogy // 5<sup>th</sup> Korea-Russia Intern. Symp. on Science and Technology, 2001, CD. ISBN 0-7803-7008-2 (Softbound).

Поступила 28.09.2011 г.