

УДК 519.688:53.083.98

## АЛГОРИТМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПЛОЩАДЕЙ ПРИРОСТА, ОСНОВАННЫЙ НА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЯХ ГОДИЧНЫХ КОЛЕЦ ДЕРЕВЬЕВ

Ю.В. Волков\*, \*\*, В.А. Тартаковский\*

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

\*\*Томский политехнический университет

E-mail: tv@imces.ru

Рассмотрен алгоритм определения площадей прироста и построения однородной картины годичных колец деревьев. Приведены результаты численного моделирования и результаты сопоставления расчетных параметров роста с параметрами, полученными в ходе анализа натуральных 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

Морфологическое строение деревьев позволяет получить информацию об окружающей среде, содержащей климатоэкологические параметры, оказывающие влияние на рост дерева. На поперечном сечении ствола дерева год за годом формируются годичные слои. Каждый слой представляет ежегодное нарастание древесины по диаметру [1–3]. В результате ежегодного прироста под влиянием климатоэкологических воздействий годичные слои приобретают неоднородную структуру и значительные отличия по форме в разных азимутальных направлениях, рис. 1, а, б.

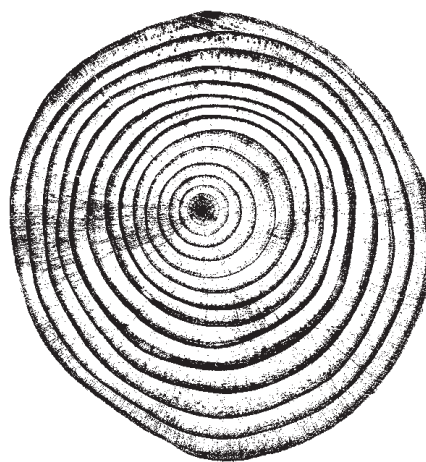
Анализ радиального прироста часто ведется по кернам, содержащим информацию о приросте в одном или нескольких радиальных направлениях поперечного сечения ствола дерева. Актуальной задачей является получение более полной информации о ежегодном радиальном приросте дерева, основанной на радиальном анализе картин годичных слоев, на поперечном спиле ствола дерева.

Комплексным показателем, характеризующим рост дерева, является площадь ежегодного прироста. В дендрохронологических исследованиях оценка климатических данных основывается на определении величины ежегодного прироста годичных колец деревьев в одном или нескольких азимутальных направлениях. При существующей неоднородности в картине колец показатели прироста значительно отличаются друг от друга в разных направлениях. Наиболее точную информацию о приросте могут дать площади прироста годичных слоев. Сложность применения для анализа площадей ежегодного прироста связана с ограниченной возможностью сбора древесных спилов. Для расчета площадей используют керны, отобранные с нескольких направлений ствола дерева, как правило, южного и северного. Полученные данные дают возможность рассчитать средний радиус колец, используемый для расчета площадей приростов с некоторой ошибкой усреднения [1, 3].

В данной работе разработан алгоритм расчета площадей прироста, основанный на геометриче-



а



б

Рис. 1. Изображение поперечного спила сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) в виде: а) градаций серого цвета; б) бинарного изображения

ском представлении годичных колец деревьев, сформированных на поперечном сечении ствола дерева, в виде однородной картины концентрических окружностей. Наряду с построением однородной картины поперечного сечения ствола дерева и определением ошибки неоднородности восстановления площадей натуральных образцов в работе реализована задача вычисления параметров прироста.

В основу математического описания для построения однородной картины поперечного сечения ствола дерева положены следующие предположения:

1. Однородная структура годичных слоев может быть построена, если потенциал прироста биомассы в стволе дерева для каждого отдельного года постоянен, а значит, площадь ежегодного прироста дерева в радиальном направлении  $S_i$  есть величина постоянная.

$$S_i = \text{const}, i = 1, 2, \dots, N,$$

где  $i$  – текущий годичный слой;  $S_i$  – площадь текущего слоя;  $N$  – количество годичных слоев.

2. Ежегодный радиальный прирост с каждым последующим годом монотонно снижается.

$$\Delta R_i = R_i - R_{i-1}, R_0 = 0 \quad (1)$$

$$\Delta R_i \neq \Delta R_{i+1}, \text{ причем } \Delta R_i > \Delta R_{i+1},$$

где  $\Delta R_i$  – величина ежегодного радиального прироста;  $R_i$  – радиус от центра до  $i$ -го слоя.

Исходя из сформулированных предположений, средняя площадь ежегодного прироста отдельного годичного слоя определяется путем деления общей площади поперечного сечения ствола дерева на количество годичных колец, сформированных за весь период роста:

$$\bar{S} = \frac{\pi \cdot R_n^2}{N}, \quad (2)$$

$$\bar{S}_i = S_i - S_{i-1}, S_0 = 0, i = 1, 2, \dots, N,$$

где  $\bar{S}$  – средняя площадь ежегодного прироста;  $S_i$  – площадь ежегодного прироста  $i$ -го годичного слоя;  $R_n$  – максимальный радиус.

Используя формулу для определения площади круга, радиусы окружностей, соответствующих годичным слоям, можно рассчитать по следующим уравнениям:

$$R_i = \sqrt{\frac{R_n^2}{N} + R_{i-1}^2}, R_1 = \sqrt{\frac{R_n^2}{N}}, i = 1, 2, \dots, N, \quad (3)$$

В соответствии с (1) и (3) ежегодный радиальный прирост определяется уравнением:

$$\Delta R_i = \sqrt{\frac{R_n^2}{N} + R_{i-1}^2} - \sqrt{\frac{R_n^2}{N} + R_{i-2}^2}, i = 2, 3, \dots, N. \quad (4)$$

На основе данного математического описания разработан алгоритм построения однородной картины поперечного сечения ствола дерева. Данный алгоритм реализует этапы:

I. Определение среднего значения радиуса максимального годичного кольца по кернам, соответствующим двум азимутальным направлениям: южному и северному.

II. Определение общей площади прироста по среднему значению радиуса максимального годичного кольца.

III. Вычисление средней ежегодной площади прироста годичных слоев в соответствии с ур. (2).

IV. Расчет ежегодных годовых приростов (4) и построение графического представления однородной картины поперечного сечения ствола дерева.

В ходе численного моделирования для поперечного спила сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) построена однородная картина поперечного сечения ствола дерева, рис. 2, б. Из графического пред-

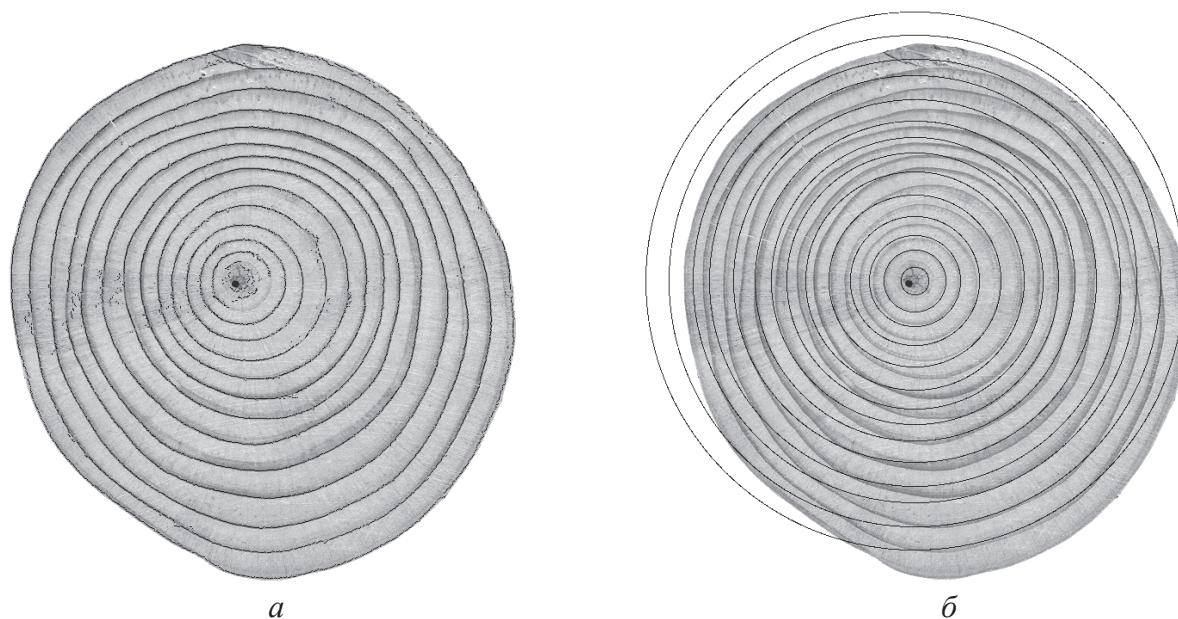


Рис. 2. Картины кольцевых структур, полученные при помощи: а) алгоритма распознавания колец; б) математического моделирования

ставления, наложенного на картину поперечного спила сосны обыкновенной, видно, насколько реальные годовичные кольца отличаются от concentрических окружностей, полученных в результате математического моделирования однородной картины.

Количественно оценить работу алгоритма можно путем сравнения площадей годовичных слоев, а также ежегодных радиальных приростов, полученных в результате расчета, и в ходе эксперимента с использованием натуральных данных. Для проведения оценки в работе использованы, наряду с ре-

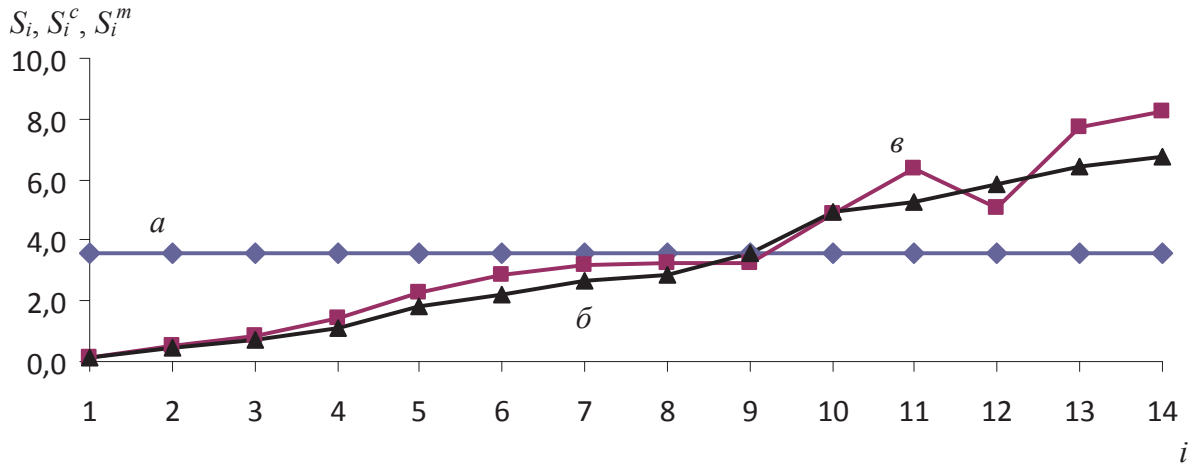


Рис. 3. Оценки площадей годовичных слоев, полученные в результате: а) математического моделирования; б) работы алгоритма распознавания колец; в) расчета по средним радиусам

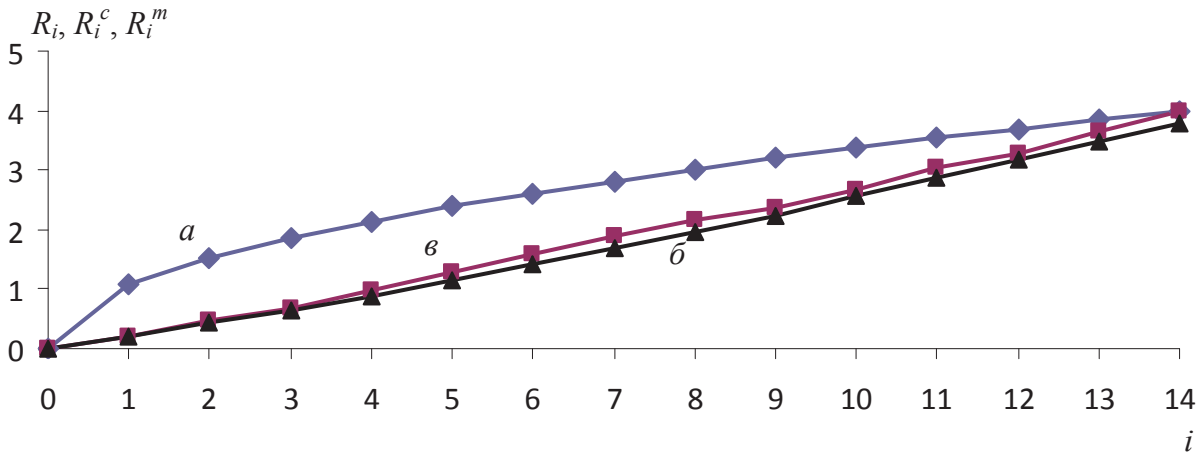


Рис. 4. Оценки радиусов годовичных слоев, полученные в результате: а) математического моделирования; б) работы алгоритма распознавания колец; в) расчета по средним радиусам

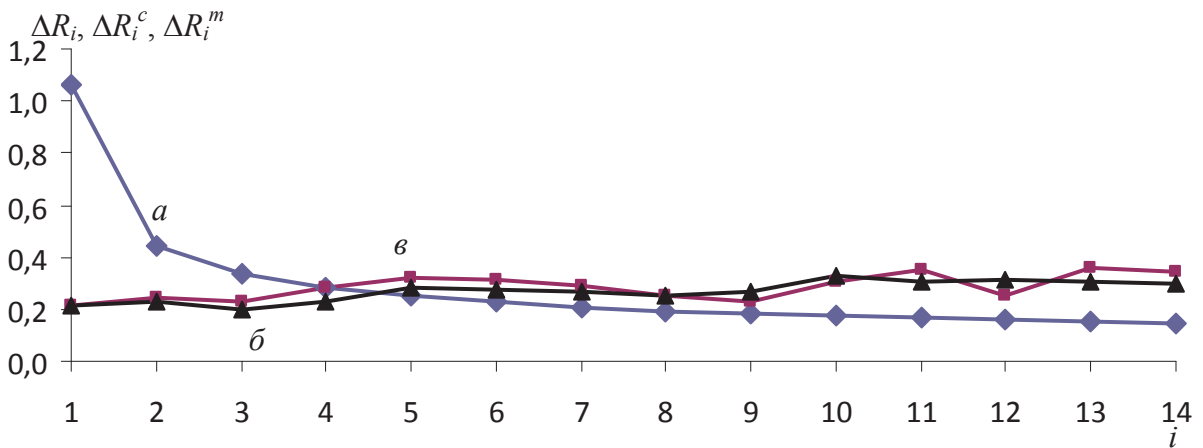


Рис. 5. Оценки ежегодных приростов годовичных слоев, полученные в результате: а) математического моделирования; б) работы алгоритма распознавания колец; в) расчета по средним радиусам

зультатами численного моделирования, результаты работы алгоритма распознавания колец, рис. 2, *a*, позволяющего с высокой точностью определить границы колец и рассчитать площади годовичных слоев [4, 5], а также результаты применяемого в дендрохронологии метода расчета площадей годовичных слоев по средним радиусам [1, 3].

На примере исследуемого образца сосны обыкновенной, рис. 1, *a*, определен радиус южного направления, равный 4,643 см, радиус северного 3,333 см, и диаметр, равный 7,976 см. При общем числе сформированных годовичных колец, равном 14, средний радиус максимального годовичного кольца составил 3,988 см. Подобным образом определены средние радиусы для каждого из 14 годовичных колец. Рассчитаны площади ежегодных приростов для каждого годовичного слоя  $S_i^c$ . В ходе исследования, по результатам математического моделирования, расчета по средним радиусам и применения алгоритма распознавания колец, получены оценки площадей ежегодных приростов годовичных слоев, рис. 3, оценки радиусов годовичных слоев, рис. 4, оценки ежегодных приростов, рис. 5.

Эталонными значениями для определения ошибки приняты результаты расчета параметров с применением алгоритма распознавания колец, как наиболее точные. Максимальное значение средней ошибки вычисления с использованием средних значений радиальных размеров годовичных колец составило для площадей 28,57 %, для радиусов – 11,50 %, для ежегодных приростов – 293,44 %. Максимальное значение средней ошибки, полученной в результате математического моделирования, составило для площадей 2324,94 %, для радиусов – 392,44 %, для ежегодных приростов

– 393,44 %. Аналогичные результаты получены для 9 подобных натуральных образцов одного вида.

По результатам проведенного исследования можно сделать вывод о том, что математическая модель, позволяющая сформировать однородную структуру, не соответствует выбранным натурным образцам. Исходя из биологических особенностей, рост деревьев может иметь периоды с характерными особенностями формирования годовичных колец. В период формирования молодого ствола возможны процессы интенсивного накопления биомассы в годовичных слоях, с последующим выравниванием скорости накопления [1]. Разработанная математическая модель должна быть применена для анализа зрелых деревьев. При использовании математической модели на практике необходима ее адаптация к биологическим особенностям роста и формированию ствола дерева.

Наличие ошибки при определении площадей по средним радиусам позволяет говорить об актуальности разработки математического описания для анализа картин годовичных колец и дальнейшего исследования взаимосвязи точности вычисления площадей от кривизны колец.

#### Заключение

Разработано математическое описание, алгоритм построения однородной структуры годовичных колец деревьев и вычисления площадей прироста годовичных слоев.

Реализовано сравнение трех разных методов вычисления площади ежегодного прироста годовичных слоев.

Проведена оценка результатов работы алгоритма и анализ причин несоответствия полученных результатов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ваганов Е.А., Шашкин А.В. Рост и структура годовичных колец хвойных. – Новосибирск: Наука, 2000. – 232 с.
2. Тартаковский В.А., Волков Ю.В. Математическая модель микроструктуры годовичных слоев деревьев // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 314. – № 5. – С. 117–120.
3. Тартаковский В.А., Волков Ю.В. Математическая модель годовичных колец деревьев на микро- и макроуровне // Новые методы в дендрохронологии / 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., Волков Ю.В. Алгоритм анализа площадей годовичных слоев деревьев // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 5. – С. 112–117.
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 // Intern. Symp. on Science and Technology: Proceedings of the V<sup>th</sup> Korea–Russia symp. – Мест проведения, 2001, CD. ISBN 0–7803–7008–2 (Softbound).

Поступила 24.09.2011 г.