

УДК 519.688:53.083.98

СПОСОБ ОЦЕНКИ НЕОДНОРОДНОСТИ ПРИРОСТА ГОДИЧНЫХ СЛОЕВ ДЕРЕВЬЕВЮ.В. Волков^{1,2}, В.А. Тартаковский²

¹Томский политехнический университет
²Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск
E-mail: yvvolkov@tpu.ru, tv@imces.ru

Волков Юрий Викторович, канд. техн. наук, науч. сотр. лаборатории биоинформационных технологий Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск; доцент кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: yvvolkov@tpu.ru

Область научных интересов: анализ сигналов, построение математических моделей и численных алгоритмов анализа кольцевых структур биоиндикаторов.

Тартаковский Валерий Абрамович, д-р физ.-мат. наук, зав. лабораторией биоинформационных технологий Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск.
E-mail: tv@imces.ru

Область научных интересов: математическое моделирование, анализ сигналов.

Изучение неоднородности радиальных приростов стволов деревьев является актуальной задачей, так как позволяет получить по картине поперечного сечения ствола информацию о месте произрастания дерева, климате района произрастания и качестве древесины. Цель работы – построение однородной картины годичных колец поперечного сечения ствола дерева, пригодной для оценки относительной неоднородности радиального прироста. В работе предложено математическое описание для расчета прироста площадей и алгоритм построения однородной картины годичных слоев в поперечных сечениях стволов деревьев. Приведены результаты численного моделирования и результаты сопоставления расчетных параметров роста с параметрами, полученными в ходе анализа натуральных образцов. Результаты работы предложенного алгоритма в сравнении с существующими методами позволяют говорить о возможности его применения для восстановления параметров радиального прироста и исследования неоднородности. Предложенный алгоритм позволяет оценить по картине годичных колец уровень пространственного влияния внешних воздействий на радиальный прирост дерева.

Ключевые слова:

Биоиндикация, годичные кольца, прирост площади годичных слоев, математическое моделирование, анализ сигналов.

Введение

Комплексным показателем, характеризующим рост дерева, является площадь прироста ствола дерева в его поперечном сечении, складывающаяся из площадей приростов годичных слоев за периоды вегетации. Используя данный показатель, можно получить наряду с оценкой прироста биомассы древесины и ее качества также оценку изменения биологических и климатоэкологических условий, оказавших влияние на процессы роста и формирования дерева. Значения площадей прироста в поперечном сечении ствола дерева могут дополнить климатические исследования и скорректировать дендрохронологические данные о величинах ежегодных приростов годичных колец деревьев, полученных на основе изучения древесных кернов.

Наиболее используемым способом вычисления площадей годичных слоев является расчет их средних значений по величинам радиальных приростов ствола дерева в нескольких азимутальных направлениях, часто реализуемый на основе анализа древесных кернов. Керны, отбираемые, как правило, в южном и северном направлениях поперечного сечения ствола дерева, позволяют провести расчеты площадей годичных слоев, используя средний радиус годичных колец [1–5]. Существующая неоднородность в картине колец (рис. 1, а), определенная различиями радиальных приростов древесины в разных азимутальных направлениях

(рис. 2, *a*), является причиной ошибки при расчетах площадей и основным недостатком данного способа.

Другим известным способом определения площадей годовичных слоев является метод нанесения контуров годовичных колец на миллиметровую или более точную основу для вычисления сумм площадей наименьших элементов, входящих в границы каждого годовичного слоя. Точность данного способа превышает точность расчета площадей по средним радиусам. Недостатком является высокая трудоемкость и использование для расчета полной картины годовичных колец.

В данной работе предложено математическое описание годовичных слоев деревьев, сформированных на поперечном сечении ствола дерева, основанное на их геометрическом представлении в виде однородной картины концентрических окружностей.

Для расчета и оценки площадей прироста применен алгоритм распознавания годовичных слоев деревьев, позволяющий с заданной точностью выделять группы годовичных слоев (рис. 1, *б*) и рассчитывать площади по размерам и количеству пикселей, входящих в каждую группу [6, 7].

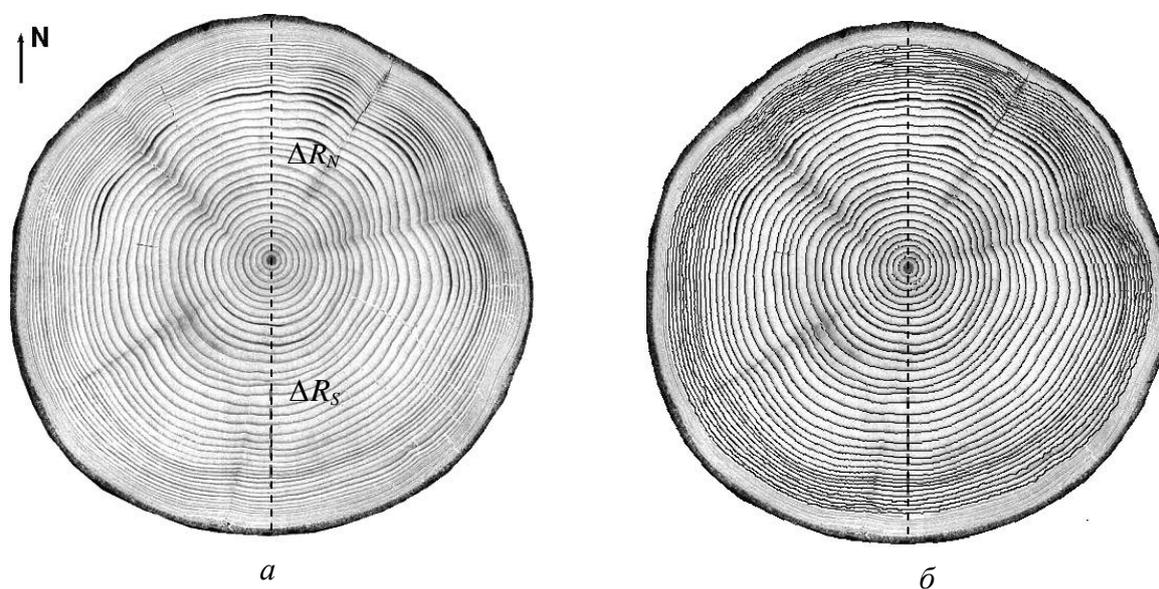
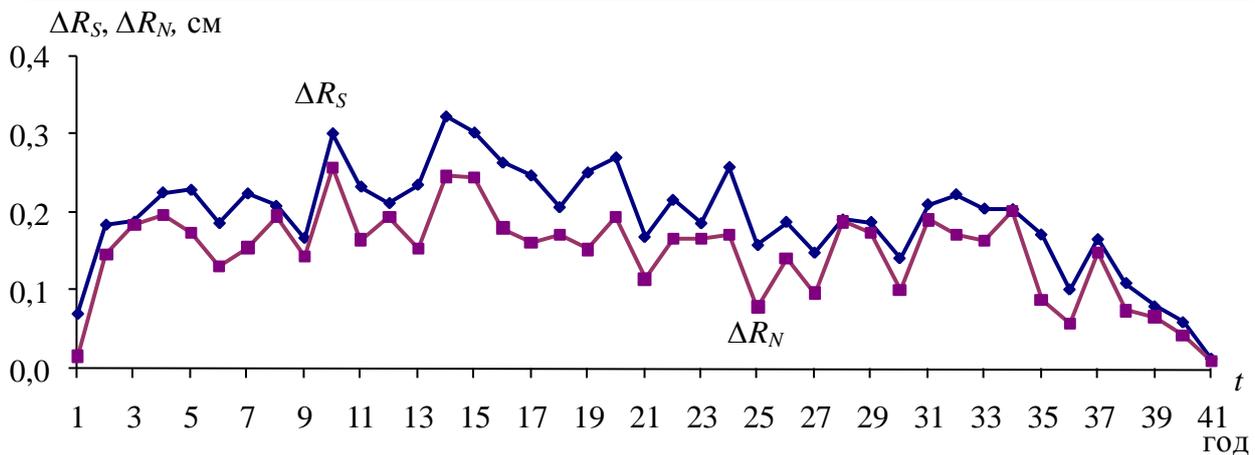
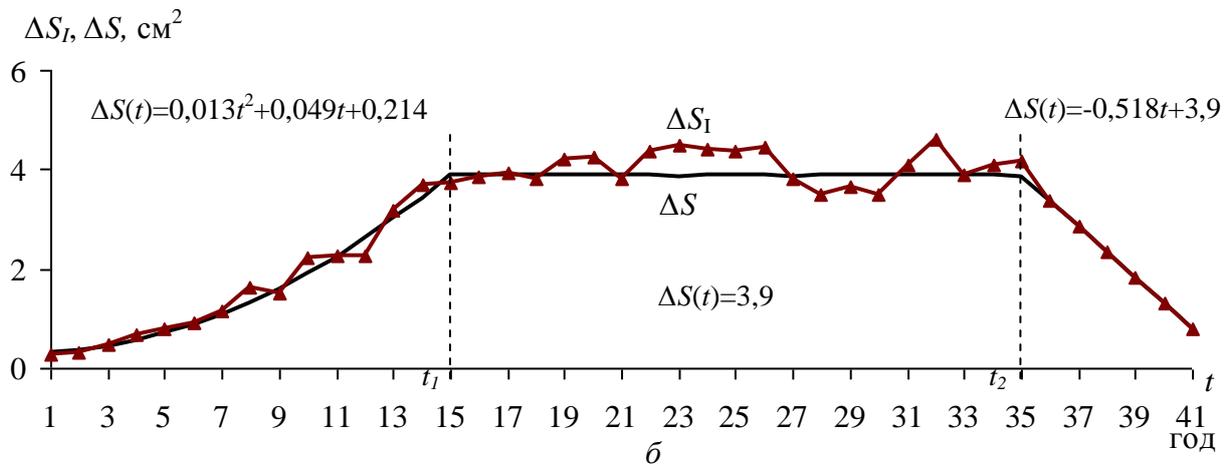


Рис. 1. Изображение поперечного сечения ствола ели (*Picea*): *a* – годовичные слои в градациях серого цвета; *б* – контуры границ групп годовичных слоев, наложенные на исходное изображение



а



б

Рис. 2. Показатели прироста в поперечном сечении ствола ели (*Picea*): а – радиальный прирост годовых колец в южном (ΔR_S) и северном (ΔR_N) направлениях; б – площадь прироста годовых слоев (ΔS_I) и ее интерполяционная модель (ΔS)

Математическое описание

В основу предлагаемого математического описания положено знание о биологических особенностях роста ствола дерева, в соответствии с которыми формирование годовых слоев проходит три временных этапа [1–3]. На первом этапе в стволе дерева формируются годовые слои, отражающие интенсивный рост, и площадь слоев с каждым годом увеличивается (рис. 3, а). Третий этап характеризуется возрастным замедлением роста, что сказывается на снижении площади прироста. Второй этап наиболее важен для исследования климатических влияний, так как для дерева он является наиболее продолжительным и сбалансированным по параметрам роста. На протяжении данного этапа значение прироста площадей годовых слоев колеблется вблизи некоторого постоянного значения (рис. 3, а). Данные колебания прироста площадей обусловлены существенными изменениями внешних и внутренних воздействий, к которым можно отнести естественные климатические изменения, конкуренцию внутри древесного сообщества, пожары, вырубку, плодоношение [1].

В работе сделано предположение, что потенциал прироста биомассы на втором этапе роста будет оставаться постоянным при стабильности внешних и внутренних воздействий. Данное предположение позволяет представлять ежегодный прирост площади в виде постоянной величины.

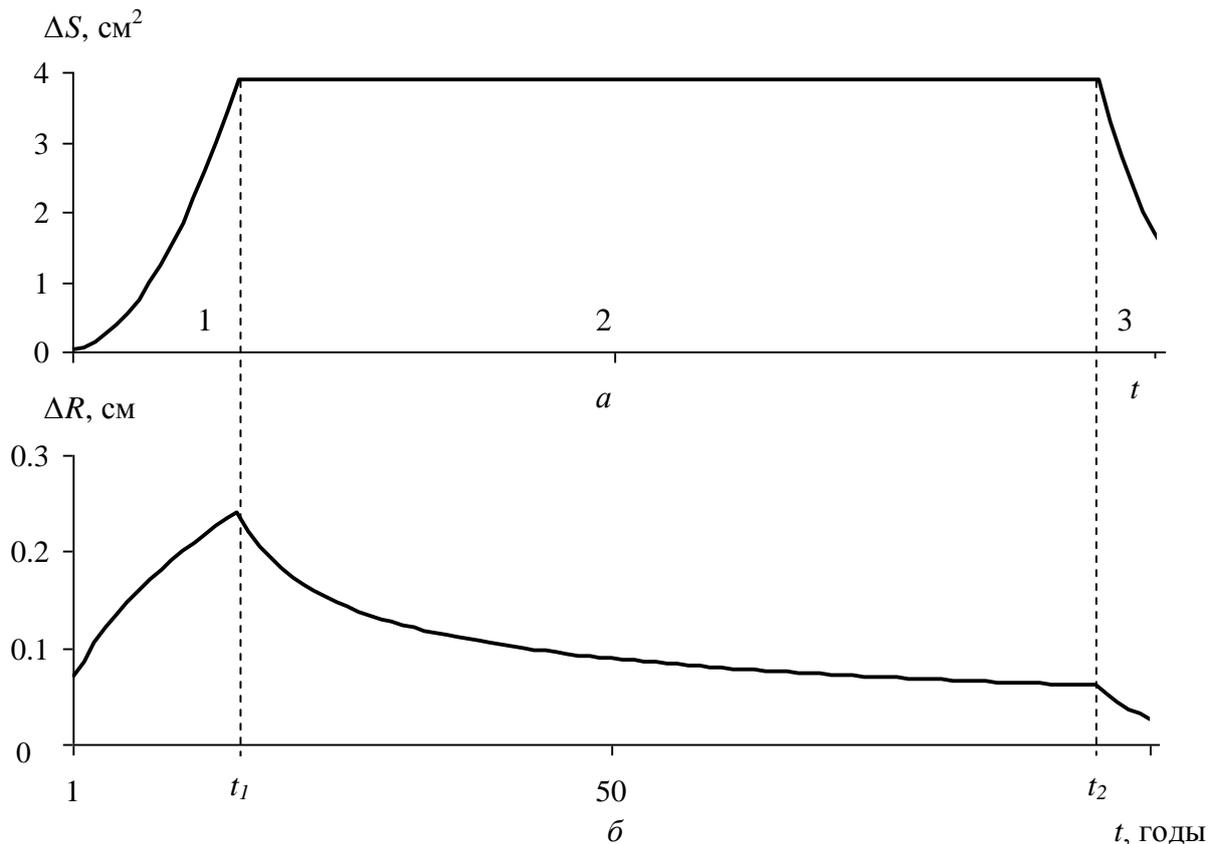


Рис. 3. Графическое представление: a – прироста площадей годичных слоев; b – ежегодного радиального прироста годичных колец

В соответствии с имеющимся знанием и сделанным предположением сформировано математическое представление для прироста площадей (1). Определение границ временных этапов произведено путем вычисления экстремумов средних оценок функций прироста. Отдельно для каждого этапа роста на основе метода наименьших квадратов построены функции прироста площадей $\Delta S(t)$ годичных слоев (рис. 2, б). Результат представлен в виде кусочно-заданной функции:

$$\Delta S(t) = \begin{cases} k_1 \cdot t^2 + k_2 \cdot t + S_1 & \text{при } t < t_1 \\ \bar{S} & \text{при } t_1 \leq t \leq t_2 \\ k_3 \cdot t + \bar{S} & \text{при } t > t_2 \end{cases}, \quad (1)$$

где $\bar{S}(t)$ – среднее значение площади годичного слоя второго этапа роста; S_1 – площадь первого годичного слоя; t – вегетационные периоды; t_1, t_2 – временные значения завершения первого и второго этапов роста; k_1, k_3 – коэффициенты изменения прироста площадей годичных слоев первого и третьего этапов роста.

Взаимосвязь площадей годичных слоев и радиальных приростов годичных колец выражается через формулу вычисления площади окружности. Используя данные геометрических закономерностей, реализуется переход от значений приростов площадей к значениям ежегодных радиальных приростов (рис. 3, б). Изменение радиального прироста отдельного вегетационного периода определяется следующим выражением:

$$\Delta R_t = R_t - R_{t-1}, t = 1, 2, \dots, N, R_0 = 0,$$

где ΔR_t – величина ежегодного радиального прироста; R_t – радиус от центра до t -го слоя; R_{t-1} – радиус от центра до $(t-1)$ -го слоя; t – текущий годичный слой; N – количество годичных слоев (вегетационных периодов).

В соответствии с предлагаемым математическим описанием разработан алгоритм построения однородной картины годичных слоев, состоящий из следующих этапов:

1. Определение входных параметров функции (1): общей площади прироста, количества годичных слоев – вегетационных периодов.
2. Определение временных периодов роста дерева путем нахождения экстремумов многократно осредненных функций приростов.
3. Вычисление площадей и радиусов годичных слоев для всех вегетационных периодов.
4. Построение однородной картины годичных слоев в полярной системе координат.
5. Вычисление индексов приростов по площадям, определение размеров азимутальной неоднородности годичных слоев деревьев.

Натурный эксперимент

Для количественной оценки разработанного математического описания проведено сравнительное исследование. В качестве натурального образца использована картина поперечного сечения ствола ели (рис. 1, а). Оценки приростов площадей годичных слоев (рис. 4, а) определялись тремя способами: при помощи численного моделирования, в результате расчета площадей годичных слоев по средним радиусам и при помощи алгоритма распознавания колец. В качестве эталонной оценки приняты значения, полученные при помощи алгоритма распознавания колец.

Из результатов исследования видно, что модельные оценки описывают существующую общую закономерность изменений приростов площадей. Отклонения исследованных параметров натурального образца от модельных связаны с изменениями влияющих на рост дерева внешних воздействий.

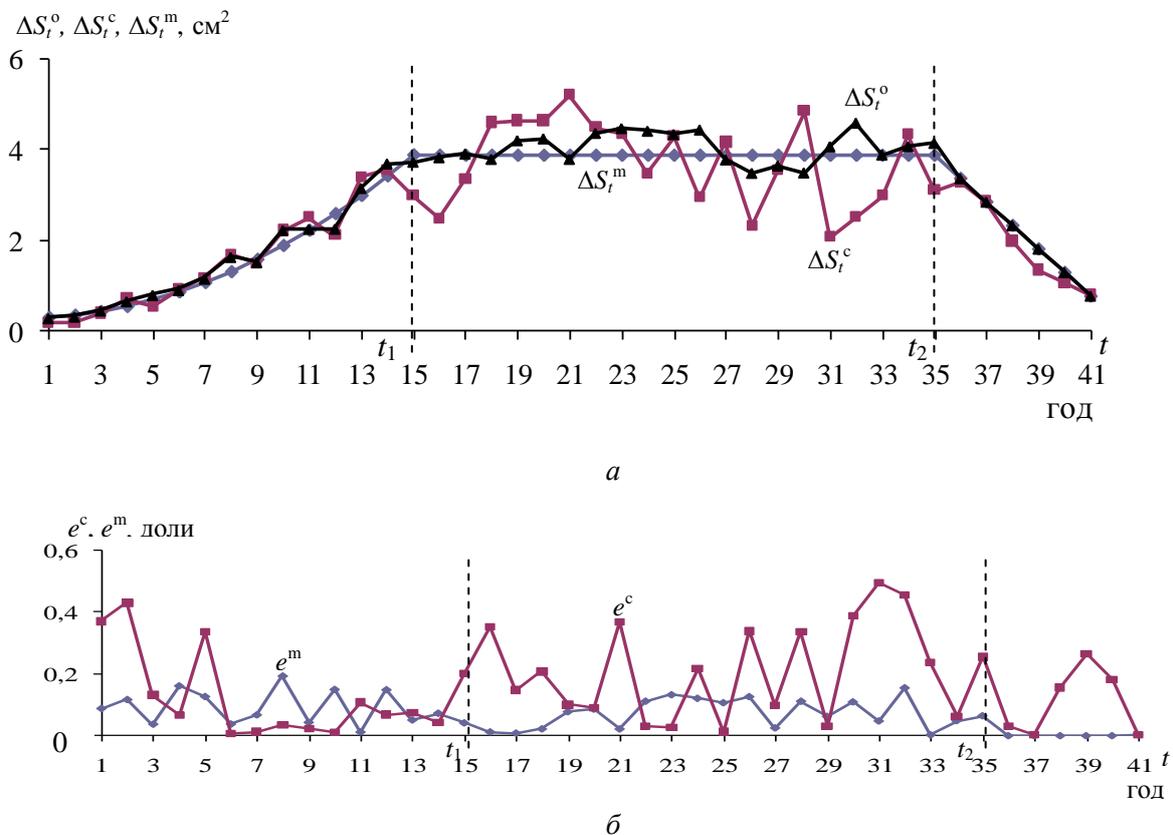


Рис. 4. Оценки: моделирования (m), алгоритма распознавания колец (o) и расчета по средним радиусам (c): а – площадей годичных слоев (ΔS); б – ошибок вычисления площадей (e)

В работе проведен расчет ошибок вычисления в виде отклонения оценок прироста площадей, полученных при помощи модели и рассчитанных по средним радиусам от эталонных (рис. 4, б). Максимальная ошибка модели – 19,36 %, метода средних радиусов – 49,37 %. Наибольшая ошибка модели приходится на первый этап роста, когда дерево испытывает значительную конкурентную борьбу. На втором этапе, когда дерево переходит в «зрелую» фазу своего развития, прирост по площади становится более стабильным, наблюдается более тесная взаимосвязь геометрических размеров, и максимальная ошибка вычисления снижается до 15,88 %. Ошибка вычисления метода расчета прироста площадей по средним радиусам возрастает с увеличением изменчивости формы годичного кольца. Изменчивость формы колец (кривизна кольца) увеличивается с каждым годом.

Практическое применение

Размеры годичных колец используются в дендрохронологии для построения хронологических рядов данных, характеризующих отклик дерева на изменяющиеся климатические и экологические параметры окружающей среды. Оценки изменения климатических параметров определяются в виде индексов прироста. Расчет индексов производится путем вычитания из абсолютных величин радиального прироста ствола дерева «кривой большого роста» [1], определяемой на практике по методу наименьших квадратов.

Учитывая азимутальную неоднородность ствола дерева, индексы приростов, вычисленные по отдельным радиальным направлениям, будут содержать ошибки неоднородности. Применение метода наименьших квадратов вносит дополнительные ошибки в виде искажения хронологических кривых.

Интегральным показателем прироста является площадь годичного слоя. Индексы прироста, вычисленные по площадям, содержат более достоверную и точную информацию.

Предлагаемое математическое описание позволяет определять индексы радиального прироста (рис. 5), используя величины площадей годичных слоев, и рассчитывать функции, соответствующие «кривым большого роста», не используя метод наименьших квадратов.

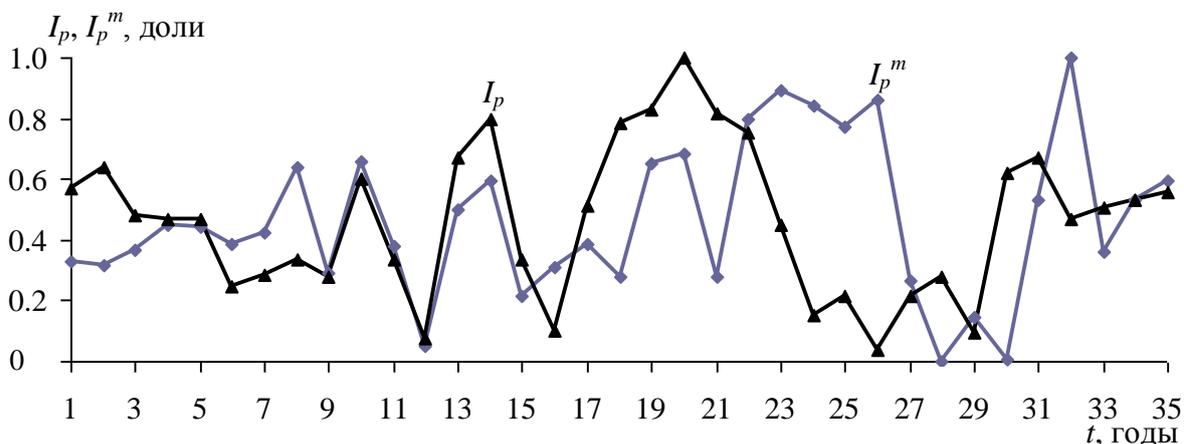


Рис. 5. Оценки индексов прироста, вычисленные по радиусам (I_p) и по площадям (I_p^m)

При сопоставлении индексов прироста по площадям, отражающих интегральный отклик дерева на изменяющиеся внешние условия окружающей среды, с индексами прироста, рассчитанными для одного радиального направления, видно несоответствие, являющееся причиной ошибок в хронологических рядах. Применение разработанного математического описания дает более точные результаты при вычислении индексов прироста. Максимальная ошибка расчета индексов прироста для выбранного натурального образца с использованием разработанного математического описания составила 2 %, для расчета по отдельным радиусам ошибка – 40 %.

В результате применения предложенного в работе алгоритма для поперечного спила натурного образца ели (*Picea*) построена однородная картина поперечного сечения ствола дерева (рис. 6, а). Из графического представления, наложенного на картину поперечного спила ели, видно, насколько реальные годовичные кольца отличаются от концентрических окружностей, полученных в результате математического моделирования однородной картины.

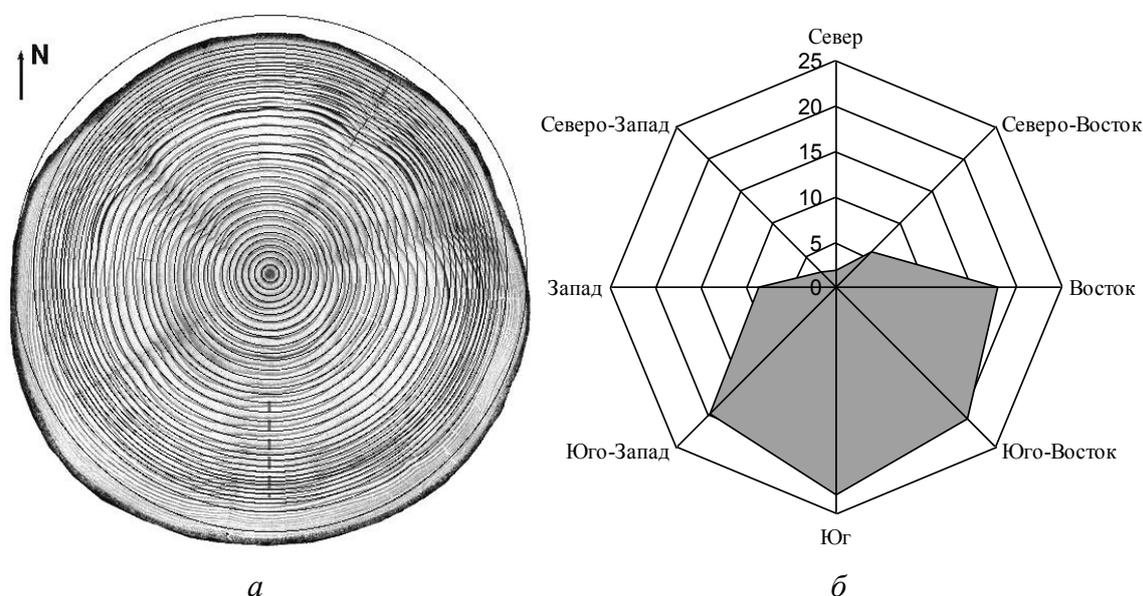


Рис. 6. Графическое представление: а – кольцевых структур, полученных при помощи моделирования, наложенных на картину поперечного сечения ствола ели (*Picea*); б – пространственной неоднородности интегрального радиального прироста годовичных слоев в процентах от общей площади прироста

Размер азимутальной неоднородности годовичных слоев рассчитан в виде отклонений интегрального прироста годовичных слоев от базовой картины концентрических окружностей в восьми азимутальных направлениях, соответствующих сторонам света. В соответствии с полученными результатами расчета (рис. 6, б) можно сделать вывод о том, что наибольший интегральный прирост древесины в стволе дерева определен в четырех азимутальных направлениях: юго-запад – 19,81 %, юг – 23,04 %, юго-восток – 20,8 %, восток – 17,94 %.

Результаты проведенного исследования подтверждают возможность использования математического описания и предлагаемого алгоритма для построения точных значений индексов прироста, формирования однородных структур годовичных слоев с учетом биологических особенностей роста деревьев. Разработанный алгоритм может быть применен как для изучения азимутальной неоднородности роста и формирования древесины в стволе дерева, так и для решения обратной задачи – восстановления площадей прироста по известному распределению неоднородности. Азимутальная неоднородность может использоваться для оценки качества древесины.

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

Заключение

В данной статье было предложено математическое описание для расчета прироста площадей годовичных слоев деревьев. Показано, что использование при расчете индексов прироста

колец предлагаемого в работе математического описания позволяет увеличить точность расчетов по сравнению с расчетами по отдельным радиусам.

Представлен алгоритм построения однородной структуры поперечного сечения ствола дерева и получены результаты исследования неоднородности годичных слоев, сформированных на поперечном сечении ствола ели (*Picea*) в восьми азимутальных направлениях, позволяющие оценить уровень пространственного влияния внешних воздействий на рост клеток в период вегетации дерева.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ваганов Е.А., Шашкин А.В. Рост и структура годичных колец хвойных. – Новосибирск: Наука, 2000. – 232 с.
2. Коновалов А.А. Деформационная модель развития экогеосистем. – Новосибирск: Гео, 2011. – 146 с.
3. Николаева С.А., Савчук Д.А. Метод реконструкции развития деревьев и древостоев с учетом дендроэкологической информации // Новые методы в дендроэкологии / под ред. В.И. Воронина. – Иркутск: Изд-во Ин-та географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2007. – С. 181–183.
4. Тартаковский В.А., Волков Ю.В. Математическая модель микроструктуры годичных слоев деревьев // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 314. – № 5. – С. 117–120.
5. Тартаковский В.А., Волков Ю.В. Математическая модель годичных колец деревьев на микро- и макроуровне // Новые методы в дендроэкологии / под ред. В.И. Воронина. – Иркутск: Изд-во Ин-та географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2007. – С. 150–152.
6. Тартаковский В.А., Волков Ю.В. Алгоритм восстановления площадей прироста, основанный на геометрических особенностях годичных колец деревьев // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 5. – С. 146–150.
7. Тартаковский В.А., Волков Ю.В. Алгоритм анализа площадей годичных слоев деревьев // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 5. – С. 112–117.

Поступила 23. 11. 2013 г.