

УДК 004.42

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ В ЗАДАЧАХ ОБРАБОТКИ ДЕНДРОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ. Ч. I

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

Томский политехнический университет

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

E-mail: botygin@ad.cctpu.edu.ru

Представлены математические модели и их программная реализация (компьютерные модели) для анализа изображений годичных колец деревьев с целью выявления изменений параметров окружающей среды, отраженных в приросте дерева. В основу моделирования годичных колец деревьев положены фундаментальные свойства радиального роста дерева – монотонность роста во времени и пространстве и ограниченность его скорости, а изменения плотности древесины рассматриваются как пространственно-временной колебательный процесс.

Ключевые слова:

Дендрохронология, древесные спилы, годовые кольца деревьев, математическая модель, серверное приложение.

Key words:

Dendroecology, dendrochronology, tree stem disk, tree-rings, mathematical model, server application.

Введение

В последнее время актуальны исследования, связанные с прогнозированием климатических и экосистемных изменений под воздействием природных и антропогенных факторов [1–4]. Для решения таких задач необходимо искать аналогичные ситуации в прошлом, в частности, исследуются ряды изменения элементов климата в пределах возможного. Физические параметры климата широко измерялись последние сто лет, но для прогноза этого недостаточно. Например, годичные кольца деревьев могут дать информацию на тысячу лет назад, а по ископаемой древесине – до десяти тысяч лет назад. Кроме того, деревья, как биоиндикаторы, дают интегральную информацию о качестве жизни и в этом их преимущество перед физическими методами измерения параметров окружающей среды. Физические методы могут с высокой точностью определить значения конкретных параметров, однако живому организму важно их оптимальное сочетание, что и фиксирует биоиндикатор. 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 [5–9]. В России подобные исследования проводятся в гг. Красноярске, Екатеринбурге, Иркутске [10–13].

Анализ научных исследований в области дендрохронологии, дендрохронологии и дендроклиматологии показывает, что в настоящее время для моделирования и анализа дендрохронологических данных используется достаточно широкий спектр аппаратно-программных средств [14–17]. Необходимо отметить, что диапазон научных исследований, проводимых с помощью этих средств, охватывает всю технологическую схему работ по обработке и анализу годичных колец деревьев. Вместе с тем, суще-

ствующие аппаратно-программные комплексы и системы для анализа и обработки данных в области дендрохронологии не отвечают современным требованиям, являются ограниченными для использования и не ориентированы на решение новых задач, связанных с неоднородностью окружающего пространства. Особенностью таких задач является большой объем данных, которые необходимо хранить, обрабатывать и сопоставлять между собой, пространственная распределенность мест сбора образцов. Для математической обработки используются дескриптивные и графические методы анализа данных, статистическое оценивание, методы многомерного статистического анализа, методы спектрального анализа и т. п.

В настоящей работе проведены исследования в области математического моделирования восстановления прироста годичных колец деревьев. Рассматриваются следующие задачи: вычисление азимута и среднеквадратичной ширины области максимального прироста годичных колец деревьев, вычисление значений индексов прироста ширины годичных колец деревьев, оценка экологического состояния окружающей среды. Результатами исследований явились авторские вычислительные алгоритмы приведенных выше задач, а также их программная реализация.

Заметим, что по математическим моделям годичных колец деревьев, дающих интегральную оценку изменений природных условий, очень эффективно выявление и изучение фундаментальной академической динамики климатических трендов, выявление и изучение динамики изменения различных параметров окружающей среды под действием антропогенных факторов различной интенсивности, для выявления и изучения динамики экосистемных изменений и экологической оценки состояния лесных массивов с целью управления их формированием и многое другое.

Математическая модель годовичных колец деревьев

Годичные кольца деревьев ориентированы как во времени, так и в пространстве и с информационной точки зрения на поперечном спиле дерева представляют собой модулированный сигнал, зависящий от двух переменных. Двумерный анализ дисков не применяется в полной мере в современных методиках, даже в такой области исследований как дендрохронология, так как не имеет достаточной алгоритмической и программной поддержки и подразумевает обработку большого количества данных, собираемых в географически распределенных местах, а также сопоставление этих данных между собой. Двумерный анализ изображений дисков деревьев в сочетании с использованием распределенных вычислений дает возможность сформировать аналог «синтетической апертуры», которая позволяет зафиксировать анизотропию радиального роста дерева, вызванную неоднородностью окружающего пространства, например, флуктуациями направления ветра. Еще одним следствием является возможность ретроспективного измерения азимута солнечного меридиана, что связано с углом наклона земной оси относительно плоскости эклиптики. Иные методы в этой связи не предоставляют такую возможность для тысячелетнего периода, когда регулярные метеорологические и астрономические наблюдения, как известно, еще не проводились.

Математическая модель радиального сечения дерева строится, исходя из формы и структуры концентрических годовичных слоёв, которые формируются на поперечном спиле дерева в процессе его роста. Для построения модели вводится полярная система координат, начало которой совпадает с биологическим центром диска дерева. Годичные кольца рассматриваются как функция двух переменных: ρ – радиуса (время) и θ – азимута (пространство).



Рис. 1. Радиальное сечение диска дерева

На рис. 1 показано поперечное сечение ствола дерева (пихты сибирской, *Abies sibirica* Ledeb), полученное в результате сканирования.

В модели прироста годовичных колец деревьев, отражающей биологические особенности развития дерева, внутренние и внешние факторы, влияющие на изменение роста клеток дерева, накладываются на сигнал в виде аддитивных шумов. Импульсный шум $h(\rho, \theta)$ 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, данный компонент имеет случайный характер. Занимает внутреннюю область годовичного кольца и определён в области ранней древесины, имеет малую амплитуду по отношению к амплитуде полезного сигнала. Наряду с импульсным, имеется зональный низкочастотный шум $l(\rho, \theta)$, связанный с наличием возрастных зон на поперечном спиле ствола дерева. Этот низкочастотный шум накладывается на полезный сигнал в виде колебания, период которого значительно больше периода, соответствующего наибольшему годовичному кольцу.

Исходя из вышесказанного, математическую модель радиального сечения годовичных колец можно представить в виде суммы шумов и промодулированного действительного колебания $U(\rho, \theta)$ [18]

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

где C – математическая константа, улучшающая представление функции $R(\rho, \theta)$; ρ, θ – полярные координаты (радиус, азимут); $U(\rho, \theta)$ – действительное колебание; $h(\rho, \theta)$ – импульсный шум; $l(\rho, \theta)$ – зональный низкочастотный шум.

Анализ данных о неоднородности окружающего пространства

Представленная выше модель радиального сечения была реализована для решения задачи двумерного анализа изображений годовичных колец деревьев. Для вычисления азимута и среднеквадратичной ширины области максимального прироста годовичных колец деревьев, значений индексов прироста ширины годовичных колец деревьев, оценки экологического состояния окружающей среды разработаны и реализованы авторские вычислительные алгоритмы. В качестве критерия, определяющего качество алгоритмов и их программной реализации, выбрано время выполнения, поэтому оптимизация осуществлялась по минимуму этого времени [19].

В задаче вычисления азимута и среднеквадратичной ширины области максимального прироста годовичных колец деревьев исследование включало: определение центра колец, сканирование изображения по всем азимутам, преобразование изображения из полярной системы координат в декартовую, обработку изображения медианным и полиномиальным фильтрами, преобразование изобра-

жения из градаций серого в чёрно-белое, расчёт ширины годовичных колец и интегрального прироста по всем азимутам, нормирование ширины прироста каждого кольца.

Процедура медианной фильтрации изображения использовалась для устранения импульсного шума. В результате медианной фильтрации происходит ограничение сигнала сверху и снизу отрезками, параллельными оси абсцисс. Так как исходная функция плотности древесины, наряду с импульсным шумом, содержит и низкочастотный шум, то его устранение осуществляется фильтрацией в полиномиальном базисе на основе метода наименьших квадратов. В результате фильтрации получается сигнал, из которого выделена низкочастотная составляющая и импульсный шум при сохранённой информации о переходных зонах и незначительном изменении амплитуды.

Для дальнейшего анализа в работе предложен интерактивный алгоритм объединения дискретных данных во множество годовичных колец, основанный на двумерном анализе дисков деревьев, по которому модифицируется начальное приближение исходя из незначительного изменения полезного сигнала в соседнем радиальном сечении. Особенностью алгоритма является то, что он не требует существенной априорной информации о свойствах шумов. При незначительном изменении азимута (порядка одного градуса), полезный сигнал в соседнем радиальном сечении практически совпадает с начальным. В то же время, функции роста, полученные из радиальных сечений, значительно отличаются друг от друга, имеют явно выраженные различия.

Ниже представлены основные шаги интерактивного алгоритма объединения дискретных данных во множество годовичных колец (рис. 2). Первые два шага алгоритма основаны на информации, заданной исследователем. Последующие шаги построения выходных функций роста осуществляются без участия исследователя. При несовпадении количества годовичных колец, выделенных исследователем, и выделенных в процессе работы алгоритма, управление передаётся исследователю с целью построения нового начального приближения для той входной функции роста, на которой произошла ошибка.

Шаг 1. Исследователь указывает начальное приближение границ годовичных колец деревьев (кусочно-линейную функцию) на входной функции роста.

Шаг 2. Выходная функция роста строится вычитанием значений кусочно-линейной функции из соответствующей ей входной функции (рис. 3). При этом выходная функция роста приобретает положительные и отрицательные значения, по которым, в дальнейшем, определяются границы годовичных колец. Положительные значения этой функции (кольца светлого цвета и меньшей плотности древесины (рис. 1)) соответствуют летнему приросту, а отрицательные (кольца тёмного

цвета и большей плотности древесины (рис. 1)) – зимнему.

Шаг 3. Вычисляется разность между значениями предыдущей и последующей (соседними) входными функциями роста (дискриминант).

Шаг 4. Для построения последующей кусочно-линейной функции из значения предыдущей кусочно-линейной функции вычитается дискриминант, вычисленный на предыдущем шаге (рис. 4).

Шаг 5. Построенная на предыдущем шаге кусочно-линейная функция сглаживается полиномиальной функцией.

Шаг 6. Выходная функция роста строится вычитанием значений сглаженной кусочно-линейной функции из соответствующей ей входной функции (рис. 5).

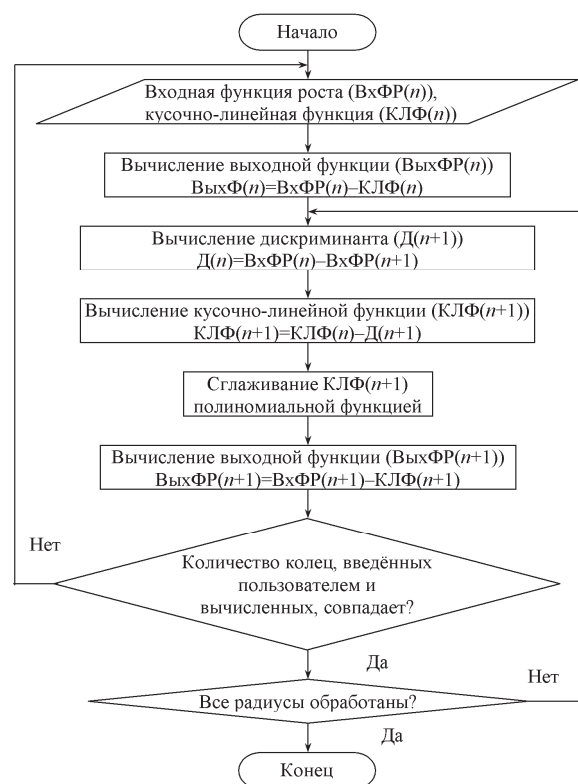


Рис. 2. Интерактивный алгоритм объединения дискретных данных во множество годовичных колец

На основе полученных данных становится возможным решение таких задач двумерного анализа изображений годовичных колец деревьев как вычисление азимута и среднеквадратичной ширины области максимального прироста годовичных колец деревьев и вычисление значений индексов прироста ширины годовичных колец деревьев.

Выводы

1. Выполнено математическое моделирование динамики прироста годовичных колец деревьев.
2. Показано, что математическую модель радиального сечения дерева следует строить, исходя из формы и структуры концентрических годич-

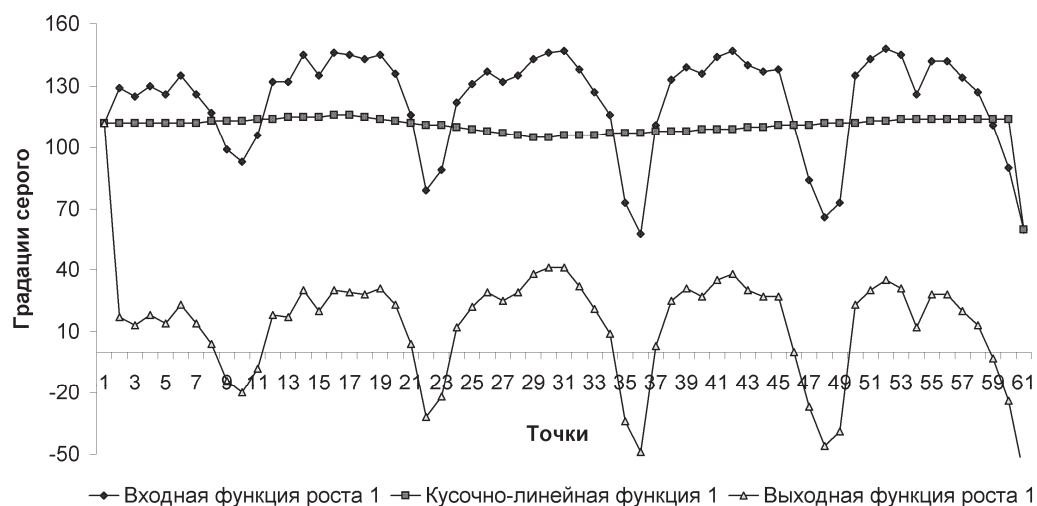


Рис. 3. Вычисление выходной функции роста

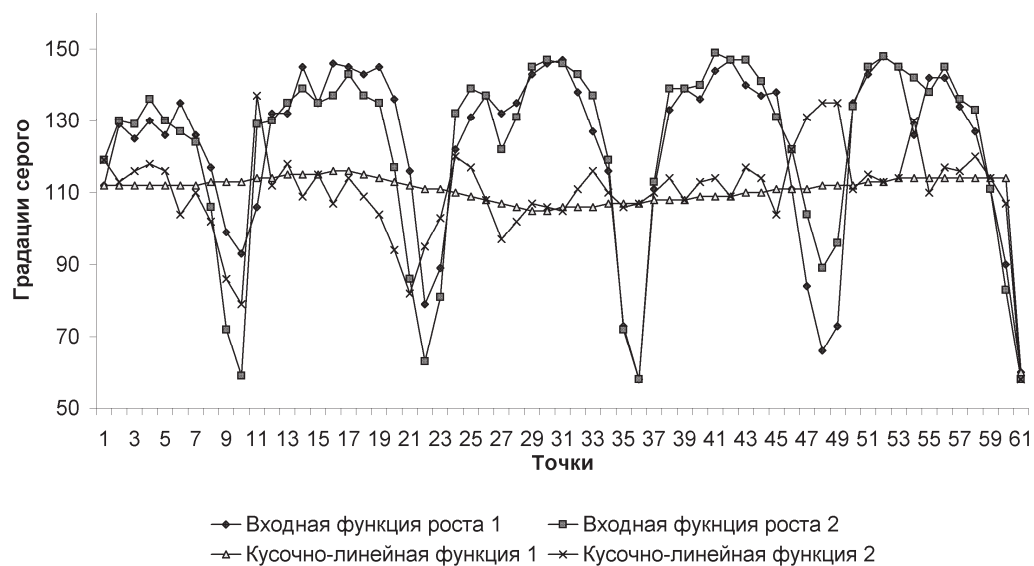


Рис. 4. Вычисление последующей кусочно-линейной функции

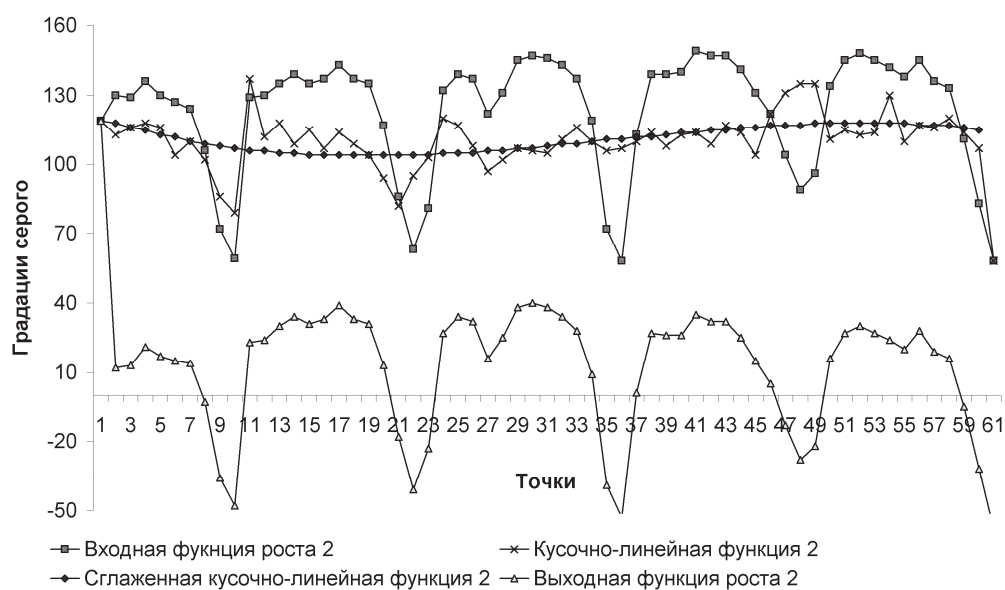


Рис. 5. Вычисление последующей выходной функции роста

- ных слоёв, формируемых на поперечном спиле дерева в процессе роста.
3. Динамику роста колец можно представить в виде суммы высоко- и низкочастотных шумов, наложенных на несущую частоту. Изменение амплитуды сигнала, полученного при сканировании поперечного спила дерева, соответствует распределению плотности древесины.
 4. Разработаны алгоритмы координатного преобразования изображения, предварительной

фильтрации шумов, вычисления направления и среднеквадратичной ширины области максимального прироста годовых колец деревьев, позволяющие восстанавливать функцию роста в пределах вегетационного периода.

5. Разработан интерактивный алгоритм восстановления непрерывных годовых колец из дискретных данных дендрохронологических измерений, не требующий априорной информации о свойствах шума и полезного сигнала.

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., Ваганов Е.А., Кирдянов А.В., Круглов В.Б., Мазепа В.С., Наурзбаев М.М., Хантемиров Р.М. Методы дендрохронологии. Ч. I. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации. — Красноярск, 2000. — 80 с.
4. Ваганов Е.А., Шашкин А.В. Рост и структура годовых колец хвойных. — Новосибирск: Наука, 2000. — 232 с.
5. Schweingruber F.H. Tree Rings and Environment. Dendroecology. — Birmensdorf, Berne, Stuttgart, Vienna, 1996. — 609 p.
6. Laboratory of Tree-Ring Research, The University of Arizona // Dendrochronological Software. 2010. URL: <http://www.ltrr.arizona.edu/pub/dpl/> (дата обращения: 23.06.2010).
7. Frank Rinn, Heidelberg, Germany // LignoVision. 2010. URL: <http://www.rinntech.com/Products/Lignovision.htm> (дата обращения: 23.06.2010).
8. Reno Tree-Ring Laboratory, The University of Nevada // DendroClim. 2002. URL: <http://woods.geography.unr.edu/dendrosite/software/DendroClim.html> (дата обращения: 23.06.2010).
9. IEH-Elektronik GmbH // DendroLab 470. 2010. URL: <http://www.ess.ch/ieh/Dendro.html> (дата обращения: 23.06.2010).
10. Шиятов С.Г., Ваганов Е.А. Методические основы организации системы дендроклиматического мониторинга в лесах азиатской части России // Сибирский экологический журнал. — 1998. — № 1. — С. 31–38.
11. 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.
12. Агеев Б.Г., Несветайло В.Д., Пономарев Ю.Н., Сапожников В.А. Дендрохроноиндикация с использованием газоанализа // Сибирский экологический журнал. — 2005. — № 1. — С. 61–65.
13. Зуев В.В., Бондаренко С.Л. Реконструкция многовекового хода общего содержания озона на основе дендрохронологических данных // Доклады РАН. — 2003. — Т. 392. — № 5. — С. 682–685.
14. Ultimate Tree-Ring Web Pages // Software used in Dendrochronology. 2010. URL: <http://web.utk.edu/~grissino/software.htm> (дата обращения: 23.06.2010).
15. Laboratory of Tree-Ring Research, The University of Arizona // Files for DPL and Documentation. 2010. URL: http://www.ltrr.arizona.edu/pub/dpl/AA_INFO.HTM (дата обращения: 23.06.2010).
16. Regent Instruments // WinDENDRO. 2010. URL: <http://www.regent.qc.ca/products/dendro/DENDRO.html> (дата обращения: 23.06.2010).
17. Bernhard Knibbe Software Development // PAST 32. 2010. URL: <http://www.sciem.com/p32feat.html> (дата обращения: 23.06.2010).
18. 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.
19. Botygin I.A., Popov V.N., Volkov J.V., Tartakovsky V.A. Information technology of tree-ring processing // Proc. of the 8th Korea-Russia Intern. Symp. on Science and Technology — KORUS 2004. — Tomsk, 2004. — V. 1. — P. 15–18.

Поступила 29.06.2011 г.