

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

В.Р. Цибульский, С.П. Арефьев

ДИНАМИКА ДРЕВЕСНО-КОЛЬЦЕВЫХ ХРОНОЛОГИЙ СОСНЫ В РАЙОНЕ ОЗЕРА НУМТО

В работе получены статистика и спектральные характеристики временных дендрорядов от начала роста до даты проведения замеров. Предложена методика оценки изменения (смещения) природно-климатических зон для северных широт на основе потери стационарности.

Древесно-кольцевые хронологии, статистика, спектр, сосна, озеро Нумто.

Одним из главных показателей роста дерева является ширина годичных колец. Известно, что «молодое» дерево в хороших лесорастительных условиях растет интенсивнее с почти экспоненциальной скоростью. Напротив, «старое» снижает темпы роста по мере приближения к предельному возрасту. В обоих случаях причины носят внутренний генетический характер и определяют возрастной тренд. Основную долю случайности вносят природно-климатические процессы и антропо-, техногенные влияния. Причем для северных природно-климатических зон характерно слабое влияние суточной гармоник.

Существует мнение, что при достаточно устойчивых климатических условиях границы природных зон (тундра — тайга) находятся в равновесии, то есть границы не сдвигаются [1, 2, 8].

Следовательно, обнаружив неустойчивость, можно предположить начало сдвига рассматриваемой природной зоны. Предполагается, исследуя временной дендроряд за достаточно большой промежуток времени 300–400 лет, найти в нем интервалы появления неустойчивости, то есть движения границ зон.

Использование для данных целей трахеидограмм затруднительно, так как указанные в имеющихся публикациях [1] промежутки времени, за которые происходит заметный сдвиг природных зон, колеблются в пределах 100 лет. По другим источникам промежутки времени, в пределах которых происходят эти сдвиги, находятся в интервале 600–700 лет [12]. Необходимо исследовать цикличности 11 лет и более, чтобы «поймать» начало этих изменений.

Предлагается использовать частотный метод оценки потери устойчивости. Это влечет за собой получение частотной характеристики для определенного окна и выбор одного из частотных методов. Для выбора методов необходима статистическая оценка временных дендрорядов.

Одной из распространенных моделей таких дендрорядов является модель, предложенная Куном и развитая Е.А. Вагановым с соавторами [8] и другими исследователями, где ширина годичных колец представляет собой

$$R(t) = A(t) + C(t) + \delta D_1(t) + \delta D_2(t) + E(t),$$

причем $A(t)$ — возрастной тренд, $C(t)$ — климатическая компонента, $D_1(t)$ — эндогенное влияние («факторы»), $D_2(t)$ — экзогенные неклиматические факторы, $E(t)$ — прочие (чаще всего это ошибки измерения).

Исследования рассматриваемых рядов проводятся с целью идентификации изменения природно-климатических условий и влияния этих изменений на

сами природные комплексы. Для этих целей используют измерения $R(t)$ у нескольких деревьев одного вида, находящихся поблизости, то есть в одних природно-климатических условиях.

Для идентификации климатического влияния производят стандартизацию (нормирование) и индексацию данных [8]. Для первой процедуры необходима теоретически максимально и номинально возможная величина $R(t)$ или каждого фактора, влияющего на нее, или самого прироста ширины колец. Подсчет их достаточно приближителен и вносит значительную ошибку. Кроме того, в вышеприведенной модели весьма условно разбиение на эндогенные, экзогенные, климатические и возрастные факторы, так как последние два входят в первые. Сама по себе ширина древесных колец за год является показателем темпа роста или прироста, а это означает, что ряды являются динамическими и для них возможна модель цепочечного типа, в которой нормирование производится по отношению не к базисному, а к предыдущему значению радиуса колец.

Для обоснования выбора модели динамического ряда необходимо статистическое исследование рассматриваемых дендрорядов.

Известно, что климатическое влияние носит циклический характер: это сезонные, 11-летние (активность солнца), вековые и другие, часто не связанные гармоники [9, 10].

Для уверенной оценки спектральной характеристики временных рядов необходима их централизация, то есть исключение средней величины и устранение тренда. В рассматриваемом случае рядов с цепочечной моделью достаточно исключения тренда.

В статье А.А. Коновалова и С.П. Арефьева [11] отмечается, что тренд хорошо аппроксимируется полиномом первой степени после 155 лет. Следовательно, при предварительной обработке этих рядов есть два варианта аппроксимации тренда: 1) нахождение методом скользящего среднего точки перегиба и затем вычисление полинома; 2) исключить начальный этап длительностью 150–155 лет и затем аппроксимировать тренд полиномом той степени, при которой, например, минимизируется среднеквадратическое отклонение остаточного ряда.

Для уточнения этих особенностей обработки данных и получения спектра преобладающих частот, связанных циклическостей необходимы вначале исследования их статистических свойств. В качестве образцов взяты дендроряды сосны, полученные С.П. Арефьевым в результате измерения кернов по двум радиусам (рис. 1) в районе оз. Нумто Белоярского р-на Ханты-Мансийского автономного округа — Югры (ХМАО — Югра). Отбор образцов проводился на южном побережье озера в лишайниково-бруснично-багульниковом сосняке в сентябре 1999 г.¹ Для получения значений ширины годичных колец в миллиметрах (мм) необходимо данные, приведенные на рисунках, делить на 70.

Визуальный анализ динамических рядов, приведенных на рис. 1, говорит о том, что достаточно заметны циклы 20, 40, 80 лет. На рис. 1 (д, е) наблюдается циклическость около 200 лет. В целом это случайный процесс, требующий в первую очередь исследований на стационарность. На рис. 1 (ж) приведен усредненный ряд по шести соснам и по двум радиусам у образцов № 1, 17, 14, по трем радиусам у № 3 и 4. Усреднение по радиусам дает возможность уменьшить влияние ориентации по частям света, а по различным соснам — расположения относительно друг друга и местного ландшафта, но приводит к уменьшению среднеквадратического отклонения на 10–15 %.

¹ Ориентация R_1 , R_2 , R_3 по частям света не производилась.

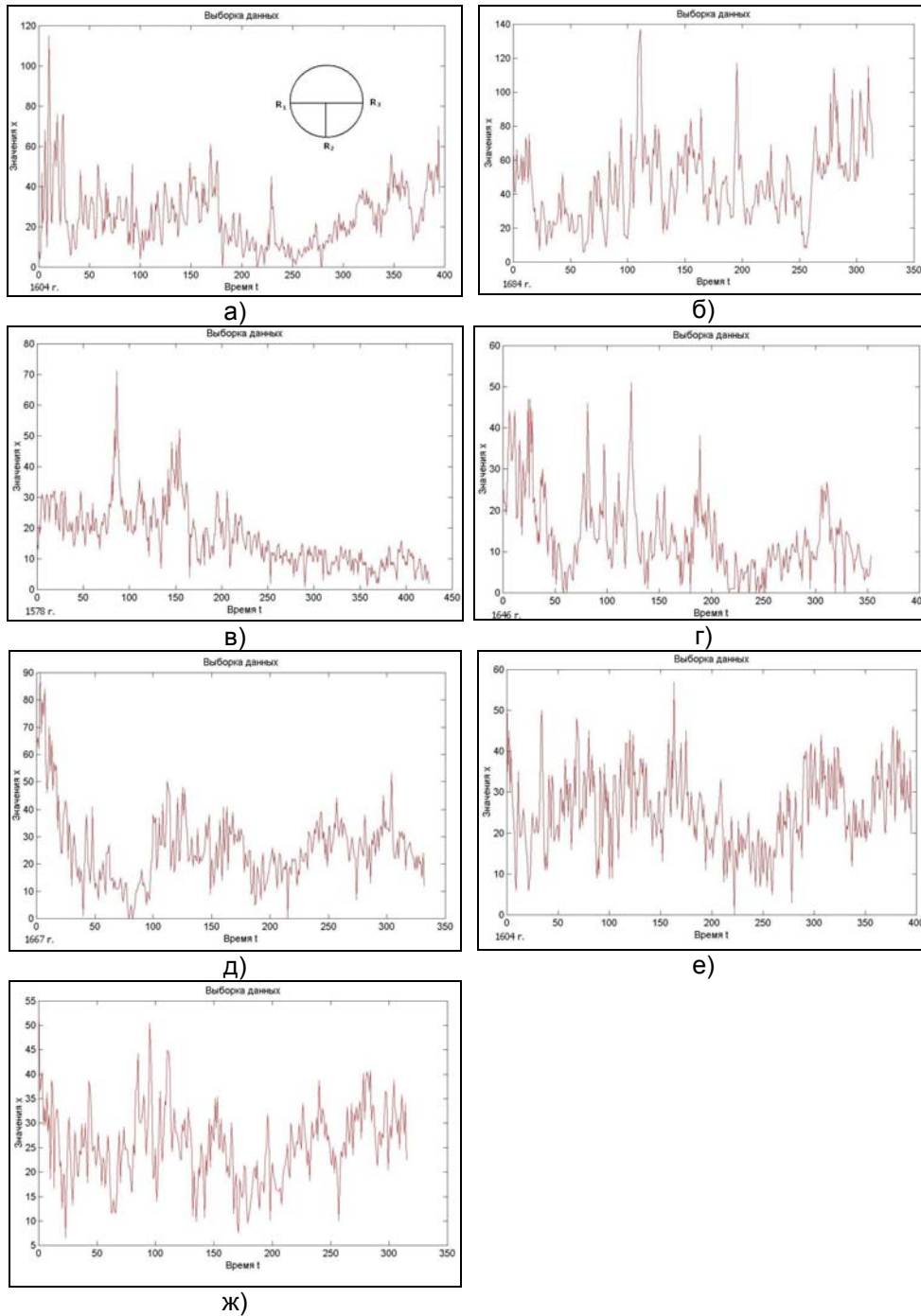


Рис. 1. Временные дендроряды $\Delta R(t)$ исследуемых сосен: а) № 1, б) № 2, в) № 3, г) № 4, д) № 14, е) № 17, ж) ряд, полученный как среднее по всем соснам и радиусам в интервале 1684–1999 г. Приведенные дендроряды получены на основе кернов, взятых по радиусу R_1 (рис. 1, а)

У исследуемых образцов № 1 (д, г) замечен усиленный рост в «молодом» возрасте. Для других это не очевидно. Это может быть связано с тем, что при измерении не удалось получить данные первых лет роста в силу разных причин, включая ядровую гниль и прочее. Ближе к полярному кругу падает число дней с положительными температурами, и эффект усиленного «молодого» роста не так очевиден.

Практически у всех сосен и в усредненном варианте обращает на себя внимание резкий всплеск (усиленный рост) в промежутке 1700–1800 гг. (рис. 1, г, ж). Возможно, именно в этом интервале произошла потеря устойчивости и сдвиг природно-климатических зон. Все вышеизложенное является предположением и требует подтверждения результатами исследований.

В табл. 1 приведены статистические характеристики исследуемых дендрорядов, включая усредненные. Анализ средних значений ширины колец и их отклонений говорит о достаточной статистической близости этой группы деревьев и слабом влиянии усреднения на нее.

Таблица 1

Статистика дендрорядов

Статистические показатели	Номера исследованных сосен							
	1	2	3	3*	4	14	17	4*
Среднее значение	25,0	46,5	17,2	17,4	13,7	25,9	25,9	16,4
Среднеквадратическое отклонение	15,1	22,9	9,8	10,4	9,6	13,5	9,4	10,7
Тест стационарности	+	+	–	+	+	+	+	+
Возраст	396	315	426	343	354	333	396	318

Примечание: 3*, 4* — статистика усредненных по трем радиусам дендрорядов сосен № 3 и 4. Все значения, приведенные в таблице, необходимо разделить на 70, чтобы получить в метрической системе в мм.

Для дальнейшего анализа рядов можно выбрать группу с близкими статистиками и одинаковым трендом в начале ряда. Например, это сосны № 1, 14, 17, имеющие средние значения радиуса, около 25 (0,35–0,4 мм) или № 3, 4 со средним около 15 (0,2–0,25 мм). В табл. 1 знаком «+» показано, что исследуемый ряд прошел тест стационарности (при длине реализации 20 лет). В дальнейшем остановимся на второй группе, несмотря на то, что не все ряды прошли тест стационарности (№ 3). Однако усреднение по трем радиусам, то есть устранение зависимости от частот света, позволяет организовать группу стационарных рядов и в этом случае. На рис. 2 приведены дендроряды этой группы, усредненные по трем направлениям.

Таким образом, в силу стационарности рядов и отсутствия очевидного усиленного роста в «молодом» возрасте, в исследуемой группе можно ограничиться линейной аппроксимацией тренда. Кроме того, дополнительным аргументом является тот факт, что в конечном счете нас интересует влияние 100–200-летних гармоник на сдвиг природных зон, и применение полиномов 2-й, 3-й и выше степеней приведет к затруднению наблюдения этого влияния.

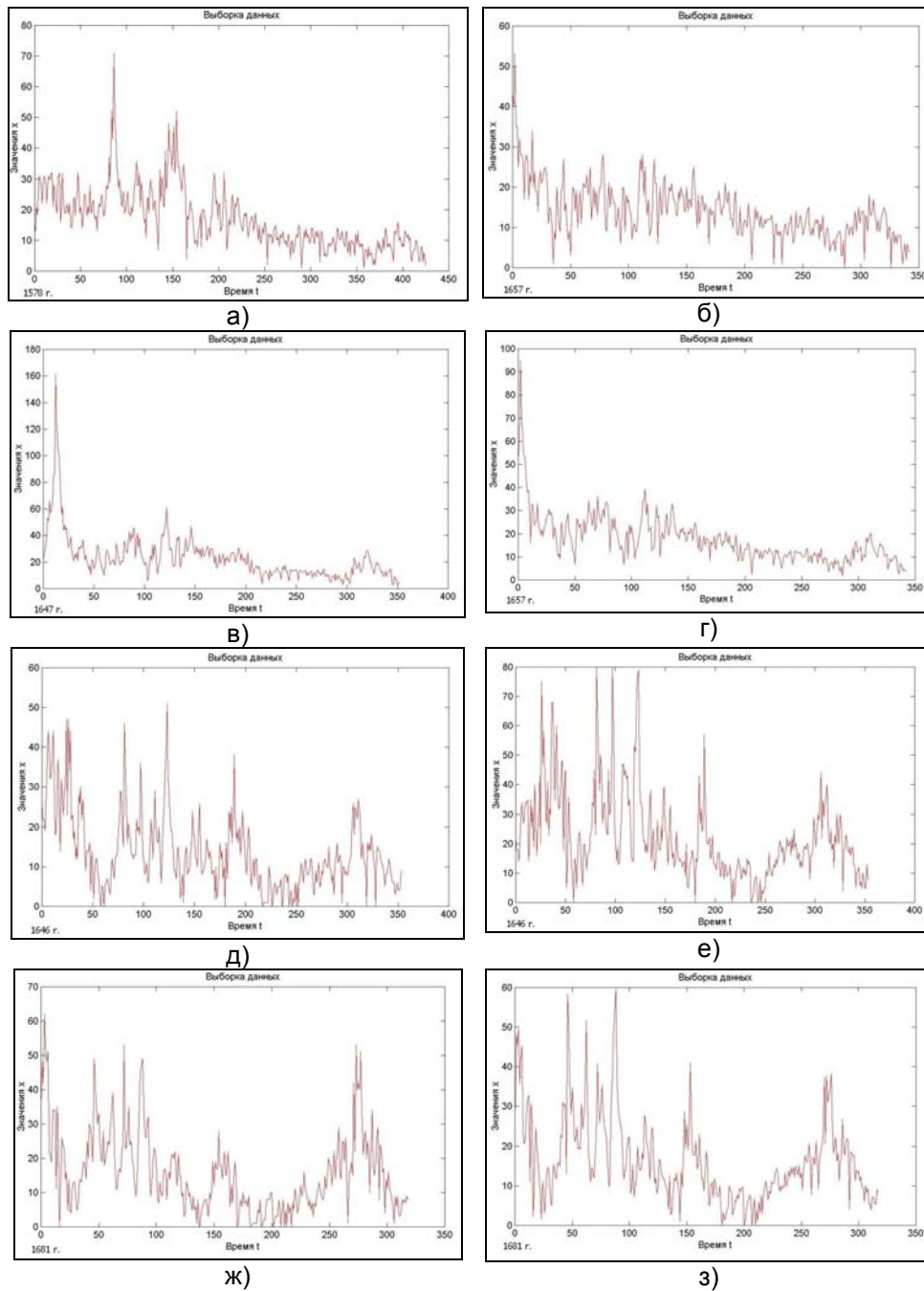


Рис. 2. Дендроряды сосны № 3 по направлениям R_1 , R_2 , R_3 (а, б, в) и усредненный (г); № 4 (д, е, ж) и усредненный (з). Все временные ряды заканчиваются в 1999 г. (время измерений), начальные даты указаны на рисунках

В табл. 2 приведены аппроксимации трендов выбранной группы.

Таблица 2

Номер сосны	Модель тренда
3*	$\Delta R(t)_T = 29,5 \cdot t - 0,07$
4	$\Delta R(t)_T = 21,22 \cdot t - 0,043$
4*	$\Delta R(t)_T = 23,14 \cdot t - 0,042$

На рис. 3 приведены графики трендов $\Delta R(t)_T$ № 3*, № 4, 4*. Все тренды этой группы имеют небольшой спад и характеризуют естественное уменьшение роста ширины колец с возрастом дерева. Остаточный ряд при этом у всех имеет среднее значение, равное нулю.

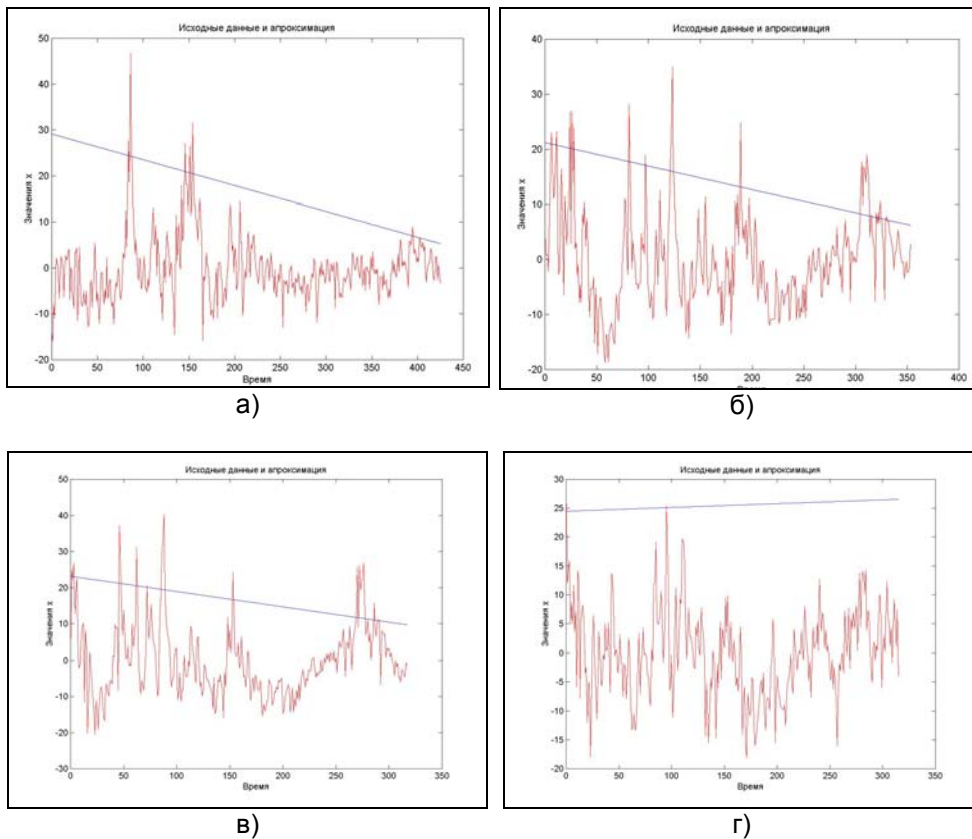


Рис. 3. Тренд и остаточный ряд выбранной группы сосен: а) № 3*; б) № 4; в) № 4*; г) для сравнения приведен тренд ряда, усредненного по всем 6 соснам и радиусам

Следующим этапом исследования дендрорядов является спектральный анализ. Цель — определить наличие преобладающих гармоник с периодами, влияющими на смещение (движение) природно-климатических зон. Особенностью этих гармоник является несвязанность, например, 11- и 22-летние не связаны со 100- и 200-летними по происхождению. Следовательно, необходимо выбрать метод, дающий реальный спектр как сумму несвязанных гармо-

ник. Таким выбран обобщенный метод Прони [7], базирующийся на авторегрессионном методе. Модель ряда, полученного этим методом, представляет собой набор из экспоненциальных функций с несвязанными амплитудами, фазами, частотами и коэффициентами затухания. В нашем (дискретном) варианте это

$$\Delta R_n = \sum_{m=1}^P b_m \cdot a_m^n,$$

где P — произвольное число экспонент, $n = 0, \dots, N-1$ — индекс измеренных значений, $b_m = \Delta R_m \exp(j\Theta_m)$, $a_m = \exp[(\alpha_m + j2\pi f_m)\Delta t]$, ΔR_m — амплитуда, Θ_m — фаза, α_m — затухание, f_m — частота, Δt — интервал дискретизации.

Ошибка аппроксимации минимизируется по методу наименьших квадратов. На рис. 4. приведены спектры выбранных дендрорядов после вычитания тренда. Практически все спектры (огibaющая) в достаточной степени схожи, и выделяются гармоники: около 4, 11, 22, 100 лет.

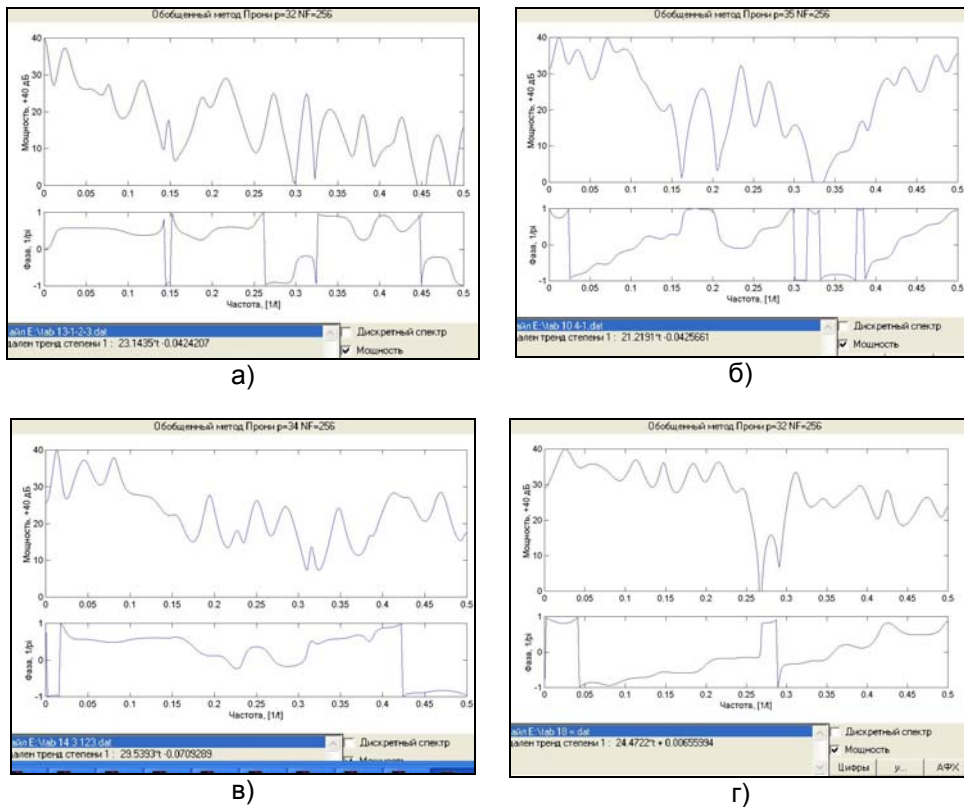


Рис. 4. Амплитудный и фазовый спектры выбранной группы сосен № 4* (а), 4 (б), 3* (в) и усредненного ряда по всем шести образцам (г). Частота f выражена в долях $1/12 \Delta t$, где $\Delta t = 1$ год

В табл. 3 приведены данные вещественного спектра (или преобладающих гармоник) исследуемых сосен.

Таблица 3

Преобладающие частоты в спектрах исследуемой группы деревьев*

№ сосны	Частота, f_m	Амплитуда, R_m	Фаза, Θ_m	Затухание, α_m
3*	0,013	7,3	0,2	-0,03
	0,08	7,05	-1,65	-0,046
	0,2	2,3	-2,8	-0,04
4	0,012	15,7	-1,02	-0,05
	0,071	13,3	1,12	-0,05
	0,47	10,6	-1,43	-0,06
	0,23	5,3	2,79	-0,04
	0,27	4,4	-1,69	-0,05
4*	0,31	3,2	2,6	-0,036
	0,27	3,45	0,37	-0,046
	0,38	2,27	-2,56	-0,048
Среднее по семи соснам	0,11	7,9	0,92	-0,07
	0,18	7,5	1,18	-0,07
	0,3	5,0	2,0	-0,05
	0,15	4,1	1,5	-0,04

* Данные, приведенные в табл., округлены, и симметричные значения с отрицательными частотами опущены.

Таким образом, исследуемые динамические дендроряды представляют собой стационарный случайный процесс, для которого можно предложить аддитивную модель с двумя входами и одним выходом. Один вход — это природно-климатические влияния, другой — прочие, включающие ошибки измерения, посторонние внутренние и внешние факторы. Имея частотные характеристики, можно оценить взаимную когерентность между выходом и первым входом и, в конечном итоге, потерю устойчивости (в смысле стационарности), упомянутую в начале статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мочалов А.А., Пархоменко В.П., Тарко А.М. Глобальное потепление и Арктика. Избранные статьи. Экология. Человек. Общество [Электрон. ресурс]. — Режим доступа: www/ecolife.ru/journal/ecap/1999-4-2.shtml.
2. Анисимов О.А., Жильцова Е.Л., Ренева С.А. Оценка критических уровней воздействия климата на природные экосистемы суши на территории России // Метеорология и гидрология. — М., 2011. — № 11. — С. 31–41.
3. Ботыгин И.А., Попов В.Н., Тартаковский В.А. Математические модели в задачах обработки дендрозоологических данных. Ч. 1. — Томск: Известия Томского политехн. ун-та, 2011. — № 5. — Т. 319. — С. 118–122.
4. Джансеитов К.К., Ивановский А.Б., Джансеитов Ю.К., Яковлев В.В. Имитационная модель формирования годичного кольца древесных растений // Математическое и компьютерное моделирование. — Красноярск: КГУ. — 2005. — № 4. — С. 202–211.
5. Математическая модель роста дерева. Форум [Электронный ресурс]. — Режим доступа: www.chronologia.org/deforum/DCFORUMID14/10010/html.
6. Тартаковский В.А., Исаев Ю.Н., Несветайло В.Д., Волков Ю.В., Попов В.П. Математическая модель радиального сечения годичных колец деревьев / Автометрия. — Новосибирск: СО РАН, 2003. — № 5. — Т. 39. — С. 118–127.
7. Кей С.М., Марпл С.Л. Современные методы спектрального анализа: обзор. ТИИЭР. — М.: МИР. — Т. 69. — № 11. — С. 5–51.

8. Ваганов Е.А., Шиятов С.Г., Мазепа В.С. Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской Арктике. — Новосибирск: Наука. СИФ РАН, 1996. — 246 с.
9. Мак-Кормак Б., Селига Т., Робертс У. Солнечно-земные связи, погода и климат: пер. с англ. / Под ред. Б. Мак-Кормака, Т. Селиги. — М.: Мир, 1982. — 384 с.
10. Чижевский А.Д. Земное эхо солнечных бурь. — М.: Мысль, 1976. — 367 с.
11. Коновалов А.А., Арефьев С.П. О деформационной модели развития геосистем (на примере радиального роста древесных растений) / Вестн. экологии, лесоведения и ландшафтоведения. — Тюмень: Изд-во ИПОС СО РАН. — 2008. — № 9. — С. 18–36.
12. Телятников М.Ю. Особенности распределения тундровой растительности Сибирского сектора Арктики. Дис. ... д-ра биол. наук. Новосибирск: ЦСБС СО РАН, 2005. 363 с. [Электрон. ресурс]. — Режим доступа: <http://byrranga.ru/docs/telyatnicov.pdf>.

Тюмень, ИПОС СО РАН
v-tsib@yandex.ru
sp_arefyev@mail.ru

V.R. Tsibulsky, S.P. Arefyev

*Dynamics of tree-ring chronologies of a pine (*Pinus silvestris*) near Numto lake*

Are received statistics and spectral of tree-ring chronologies from the beginning of growth before date of measurements. The method of an assessment of change (shift) of landscape and climatic zones for northern latitudes on the basis of stationarity loss is offered.

Tree-ring chronologies, statistics, spectral characteristics, pine, Numto lake, West Siberia.