

Деформационная модель радиального роста древесных растений и ее аналитические возможности

А. А. КОНОВАЛОВ, С. П. АРЕФЬЕВ

Институт проблем освоения Севера СО РАН
625003, Тюмень, а/я 2774
E-mail: konov7@rambler.ru

АННОТАЦИЯ

Показана возможность описания закономерностей радиального роста древесных растений и их свойств с помощью деформационной модели. Даны примеры такого описания для субарктического и умеренного поясов в многолетнем и годовом климатических циклах.

Ключевые слова: деформация, древесная растительность, радиальный рост, сезонные циклы, годичные кольца, биологическая долговечность.

Общее описание модели. Слоисто-кольцевая структура деревьев, особенно в бореальном и субарктическом поясах, характеризующихся сезонными переходами температуры воздуха через 0 °С, отражает последовательность колебаний внешних условий и широко используется при их реконструкции и прогнозе [1, 2], в экологическом мониторинге [3], при исследовании роста насаждений [4]. Для успешного применения дендрохронологических методов важно выяснить и биологически интерпретировать физические закономерности, лежащие в основе радиального роста деревьев. Наиболее простым и наглядным представлением последнего является цилиндрическое тело, деформирующееся под растягивающей нагрузкой, равномерно распределенной по его окружности.

Цель настоящей работы – построение и интерпретация модели радиального роста деревьев на основе универсальных закономерностей деформационных процессов.

Ежегодно нарастающий слой древесины можно рассматривать как единичную деформацию растяжения ствола, а его текущий радиус – как ее кумулятивную величину. В отличие от механически нагруженных косных систем радиальный рост дерева сопровождается увеличением массы. Но это не отражается на общих, видимых, закономерностях изменения формы тела при разного рода воздействиях, в том числе и при увеличении массы, которое можно заменить эквивалентным растягивающим усилием. При деформационном подходе присущее всем зрелым системам увеличение внутренней энтропии, заключающееся в постепенном разрушении структуры, внешне проявляется устойчивым сокращением ширины годичных колец (годовой скорости радиального роста ствола) вплоть до нуля, означающего биологическую гибель дерева.

Для удобства обобщения деформацию принято выражать в относительном виде: $j = |V - V_n|/V_n$, где V_n и V – начальный и текущий объем или другой характерный размер (длина, ширина, радиус) тела; при сжатии $V < V_n$, при растяжении $V_n < V$.

Коновалов Александр Александрович
Арефьев Станислав Павлович

При растяжении в качестве репера удобно использовать не начальный, а конечный (максимальный) размер, тогда, как и при сжатии, все относительные величины укладываются в интервал 0...1. Возможны и другие комбинации текущего, начального и конечного размеров.

Масса тела учитывается введением в расчет удельных объемов, которые обратны плотности. Поэтому деформацию можно выразить и через плотность (или массу). Ее величина $j = |V/V_n - 1| = |\rho_n/\rho - 1|$ (где $\rho_n = 1/V_n$, а $\rho = 1/V$) от этого не меняется.

Метод обобщения данных путем пересчета в относительные безразмерные величины, изменяющиеся в интервале 0...1, позволяет сокращать объемы инструментальных исследований, корректно сравнивать системы разной природы и параметры с разной размерностью и делает более наглядными общие закономерности развития.

Деформация – один из важнейших показателей развития любой системы, в том числе биологической, отражающий ее проч-

ность, долговечность и другие свойства. Для древесных растений установлена его хорошая корреляция со многими параметрами: индексом охвоения [5], степенью пораженности гнилевыми болезнями [6, 7] и др. По сути, это означает, что многие, в том числе внутренние свойства системы можно выявлять по изменению ее формы. Поэтому важно уметь определять этот показатель и оперировать им при анализе.

Закономерности радиального роста. На графиках рис. 1 показаны типичные примеры увеличения относительного радиуса $j_r = r/r_m$ и площади $j_q = (r/r_m)^2$ ствольного круга сравнительно долго (более ста лет) живущих деревьев в различных климатических условиях Тюменской области (данные С. П. Арефьева) и на Аляске [8]. Здесь же, как и на большинстве последующих рисунков, приведены аппроксимационные формулы графиков с оценкой их достоверности R^2 (по программе EXCEL). Исходные данные: годовые кольца, их ширина и плотность определялись в кернах диаметром 4 мм, радиально выбурен-

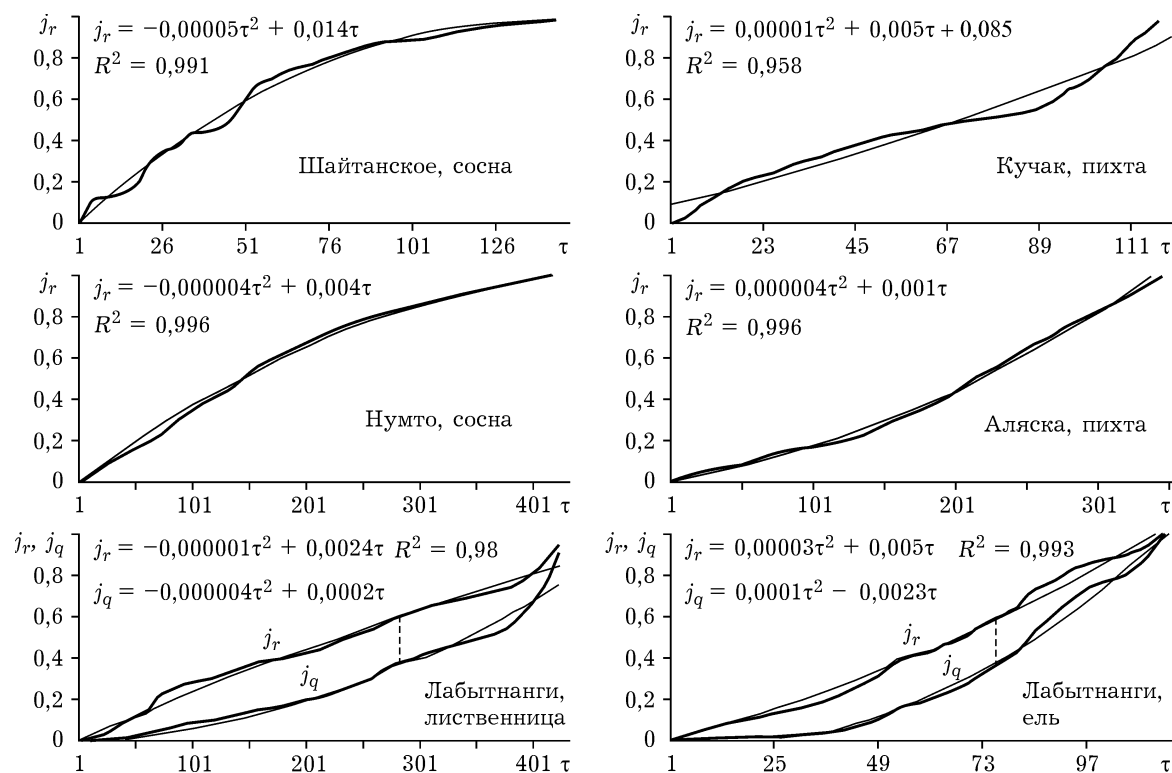


Рис. 1. Типичные примеры (графики и аппроксимационные формулы) увеличения относительного радиуса j_r и площади ствольного круга j_q долгоживущих деревьев в зависимости от их возраста τ , годы, в различных климатических условиях (толстая линия – фактические данные, тонкая – их тренд)

ных из дерева на высоте 1,3 м [6, 7]. Поэтому далее, когда речь идет о параметрах ствола, имеются в виду их значения на этом (контрольном) поперечном срезе.

Дерево в процессе естественного развития, как и все земные системы, проходит четыре возрастные стадии – одну скрытую (“утробную”, ненаблюдаемую) и три явные: раннюю (ювенильную), зрелую (стационарную) и позднюю (старость) [9] или, укрупненно и более очевидно, два полупериода: уплотнения (упрочнения) и разуплотнения, граница между которыми приходится на пик зрелости. На поперечном разрезе дерева эти полупериоды выражаются одноименными зонами: первая располагается на периферии ствольного круга, вторая – в центральной части. Явная деградация, распад, сначала проявляется в центре ствола и от него постепенно распространяется к периферии. Левые графики на рис. 1 относятся к светолюбивым породам – сосне (*Pinus silvestris*) и лиственнице (*Larix sibirica*), не выносящим светового угнетения и интенсивно растущим с самого начала, правые графики – к теневыносливым ели (*Picea obovata*) и пихте (*Abies sibirica*), в начале роста испытывающим световое угнетение со стороны быстрорастущих пород-конкурентов и вступающим в фазу интенсивного роста после выпадения последних из древостоя.

Кривые на рис. 1 хорошо описываются полиномом 2-й степени $j_r = at \pm bt^2$ (a и b – численные коэффициенты), откуда относительная скорость прироста $v = d_r/dt = a \pm 2bt$. В формуле скорости проясняется физический смысл коэффициентов a и b : a – это начальная скорость прироста; b – ускорение. Знак b зависит от условий обитания, а также от возраста: у старых деревьев он чаще положительный, у молодых – отрицательный.

Графики хода j_r и j_q (см. низ рис. 1) принципиально не отличаются, но у вторых форма изменения (выпуклость или вогнутость) выражена более четко. На оси времени выделяется особая точка, в которой $j_r + j_q = j_r + j_r^2 = 1$. Она характеризует равновесие между длиной окружности (поверхностным натяжением) и площадью круга (внутренним давлением на поверхность) на поперечном срезе растущего дерева, которое, судя по графику, возможно только при $j_r = 0,618$ и,

соответственно, $j_r^2 = 0,382$ (пунктирная вертикаль). Число 0,618 – это не что иное, как золотое сечение [10], обеспечивающее максимальную гармонию и устойчивость двухкомпонентных систем. Видимо, с этого момента нарушается равновесие между поверхностным натяжением дерева и внутренним давлением и начинается его прогрессирующая деградация (старость).

Возрастные особенности (стадийность) развития древесной растительности сильно затушевываются многолетними колебаниями тепло- и влагообеспеченности. В этих условиях на характер деформации большее влияние начинают оказывать генетические особенности древесной породы, в частности предрасположенность к свету (теплу) и теневыносливость. Это видно из рис. 1, а еще четче – из рис. 2, на котором изображены ход толщины годичного кольца Δ и ее средней текущей величины $\Delta_a = r/t$ у двух самых старых (см. рис. 1) деревьев за все время их существования и ход Δ_a в стационарный период (с малоизменяющейся или – у светолюбивых – с постоянной скоростью), начинающийся у обоих деревьев примерно с 155-го года жизни. Введение в анализ величины Δ_a приводит к эффективному сглаживанию кривой хода толщины кольца во времени за счет устранения случайных колебаний, вычленяет ее тренд, близкий к найденному традиционным методом скользящих средних, но выраженный более отчетливо. Соответственно более явственно проявляются и особенности развития древесных растений, в частности светолюбивых и теневыносливых: устойчивое, почти линейное уменьшение средней толщины годичных колец у первых и затухающее ее увеличение у вторых. Уменьшение толщины годичных колец ухудшает условия метаболизма в организме дерева и в предельном случае, при нулевой толщине кольца, приводит к гибели. В связи с чем появляется возможность приближенной оценки биологической (максимальной – в отсутствие пожаров, буреломов и других катастрофических явлений) продолжительности жизни – долговечности τ_m светолюбивых древесных пород. Выражение для τ_m сосны в Нумто и ее величину находим, подставив в формулу средней толщины кольца $\Delta_a = 0$. Тогда $\tau_m = 0,37/0,0005 + 155 = 895$ лет.

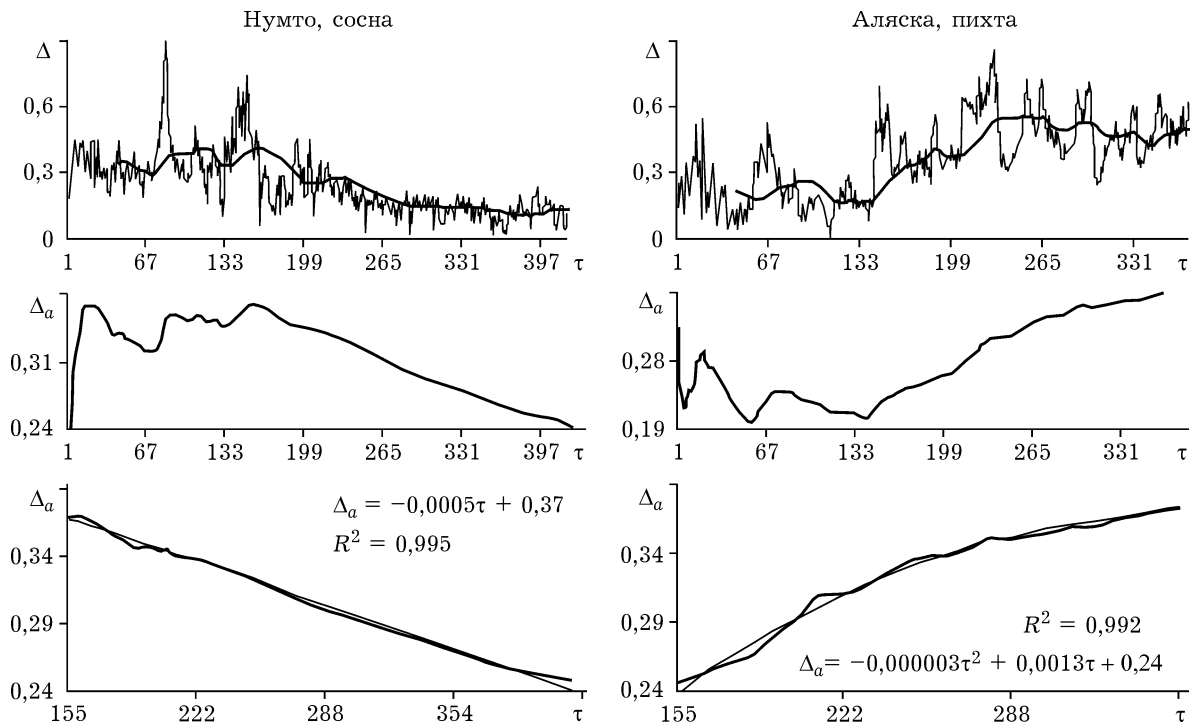


Рис. 2. Изменение толщины годичного кольца Δ , мм, и ее средней текущей величины Δ_a , мм, у двух самых старых (по рис. 1) деревьев в зависимости от возраста τ , годы (верхние четыре графика; толстая линия – скользящая средняя за 44 года), а также ход Δ_a в стационарный период (нижние два графика; тонкая линия – тренд) и его аппроксимация

Величина τ_m у теневыносливых деревьев более неопределенна, но при некоторых допущениях ее приближенная оценка также возможна. Судя по рис. 2, толщина годичных колец у теневыносливой пихты в отличие от светолюбивой сосны со временем увеличивается, но само ускорение уменьшается. Взяв производную из формулы Δ_a (это и есть ускорение) и приравняв ее нулю, находим точку на оси времени τ_c , в которой скорость деформации достигает максимума и начинает понижаться: $\tau_c = 0,0013/0,000006 + 155 = 372$ года. Логично предположить, что τ_c лежит в середине жизненного цикла дерева, тогда у теневыносливых деревьев $\tau_m \approx 2\tau_c$, конкретно у пихты по рис. 2 $\tau_m \approx 744$ года.

Вообще, более или менее достоверная оценка долговечности древесной растительности возможна только у относительно долго живущих особей, предположительно не менее 200–250 лет, достаточно приспособившихся к данным условиям обитания, но уже имеющих определенные признаки деградации, появление которых на деформационной

модели отражается началом ускорения (замедления) или даже сменой вектора временного хода различных показателей формы – радиуса (площади, объема) ствола, толщины годичных колец.

Плотность. Уже сказано, что деформационные кривые можно строить и по данным об изменении плотности. Плотность древесины зависит в основном от влажности (w , %). В таблице приведены: плотности при влажности 0; 12 и 50 % (ρ_0 , ρ_{12} и ρ_{50}) распространенных древесных пород [11]. Анализ таблицы показывает, что зависимость ρ от w линейна: $\rho = Aw + B$, где A и B – численные коэффициенты, определяемые по двум последним столбцам таблицы.

Установлено, в частности для кедра (*Pinus sibirica*) [6], что плотность древесины годичного кольца при прочих равных условиях заметно зависит и от его толщины Δ (рис. 3). В пределах $\Delta = 0...0,6$ см эта зависимость хорошо описывается полиномом 5-й степени (рис. 3, а, формула не показана из-за громоздкости). Последовательно складывая со-

Плотность древесины ρ , г/см³ при влажностях 0, 12 и 50 %, а также коэффициенты A и B в формуле $\rho(w)$

Порода	ρ_0	ρ_{12}	ρ_{50}	A	B
Лиственница	0,63	0,66	0,81	0,0037	0,6239
Сосна	0,47	0,50	0,62	0,003	0,4672
Кедр	0,41	0,43	0,54	0,0026	0,4075
Ель	0,42	0,44	0,55	0,0027	0,4148
Пихта	0,35	0,38	0,45	0,002	0,3528
Береза	0,60	0,63	0,77	0,0035	0,595
Осина	0,47	0,49	0,61	0,0029	0,4637

ответственные величины ρ и Δ и деля сумму ρ на суммы Δ , находим новую зависимость: средней радиальной плотности кольца ρ_a от его толщины Δ (см. формулу на рис. 3, а). Толщина годовых колец хвойных пород редко превышает 0,35 см (на северной границе леса обычно $\Delta < 0,1$ см). В этих пределах зависимость ρ от Δ более простая (рис. 3, б). Анализ фактических значений ρ_a по рис. 3, а показывает, что с ростом Δ они сначала растут, достигая максимума $\rho_a \approx 0,43$ г/см³ примерно при $\Delta = 0,3 \dots 0,35$ см, а затем незначительно уменьшаются с тенденцией к выполаживанию кривой этой зависимости, т. е. геометрическое место точек (окружность) с максимальной плотностью находится где-то в центральной части кольца. То же можно сказать и в отношении толщины всего ствола, поскольку закономерности развития обоих примерно подобны [2]. Наиболее широкие и, значит, наиболее плотные кольца приурочены к срединной части радиуса ствола, в обе стороны от нее они сужаются. Соответственно убывает и плотность, к сердцевине ствола – из-за перезрелости (старости) годовичных колец ядровой древесины, утративших связь и

обмен с живыми тканями дерева, а к коре – из-за недозрелости молодого прироста (заболонной древесины), структура которой, выполняющая пока в основном водопроводящую функцию и имеющая вид заполненных водой сосудов, еще не вполне сформировалась.

Удельная и объемная масса. Умножив ρ_a на текущий радиус ствола, получаем его удельную (на единицу площади контрольного среза) массу M_y (г/см²) – функцию времени. Этот показатель можно найти и как сумму удельных масс каждого (i -го) кольца, из которых состоит радиус. Разделив текущее значение удельной массы M_y на максимальное M_m (на момент наблюдений), находим относительную (безразмерную, обобщенную) величину удельной массы: $j_{mc} = M_y/M_m$.

Масса контрольного среза – поперечного диска единичной высоты (за единицу высоты примем 1 см) – $M = \rho_a \cdot V_d$, г, где V_d – объем диска, равный $3,14r^2 \cdot 1$ (см³). На рис. 4 показан ход изменения этих величин для тех же трех деревьев. Рис. 4, а свидетельствует о значительном увеличении скорости радиального прироста древесной массы при дви-

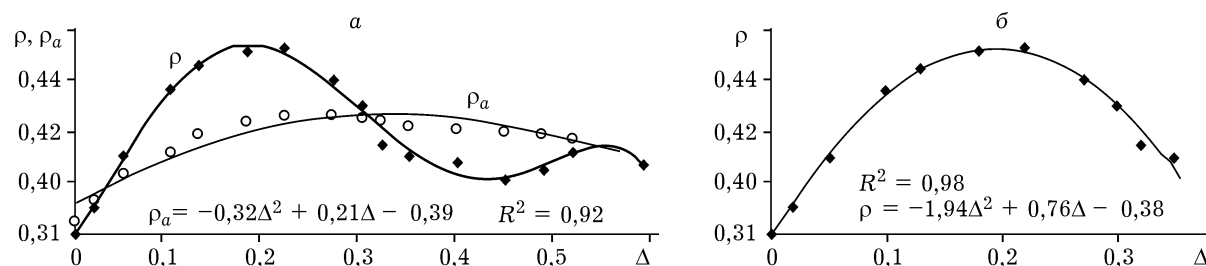


Рис. 3. Зависимость плотности данного древесного кольца ρ и ее текущего среднерадимального значения ρ_a , г/см³, от ширины кольца Δ , см, в широком (а) и обычном (б) диапазоне (значки – фактические данные, огибающая линия – тренд)

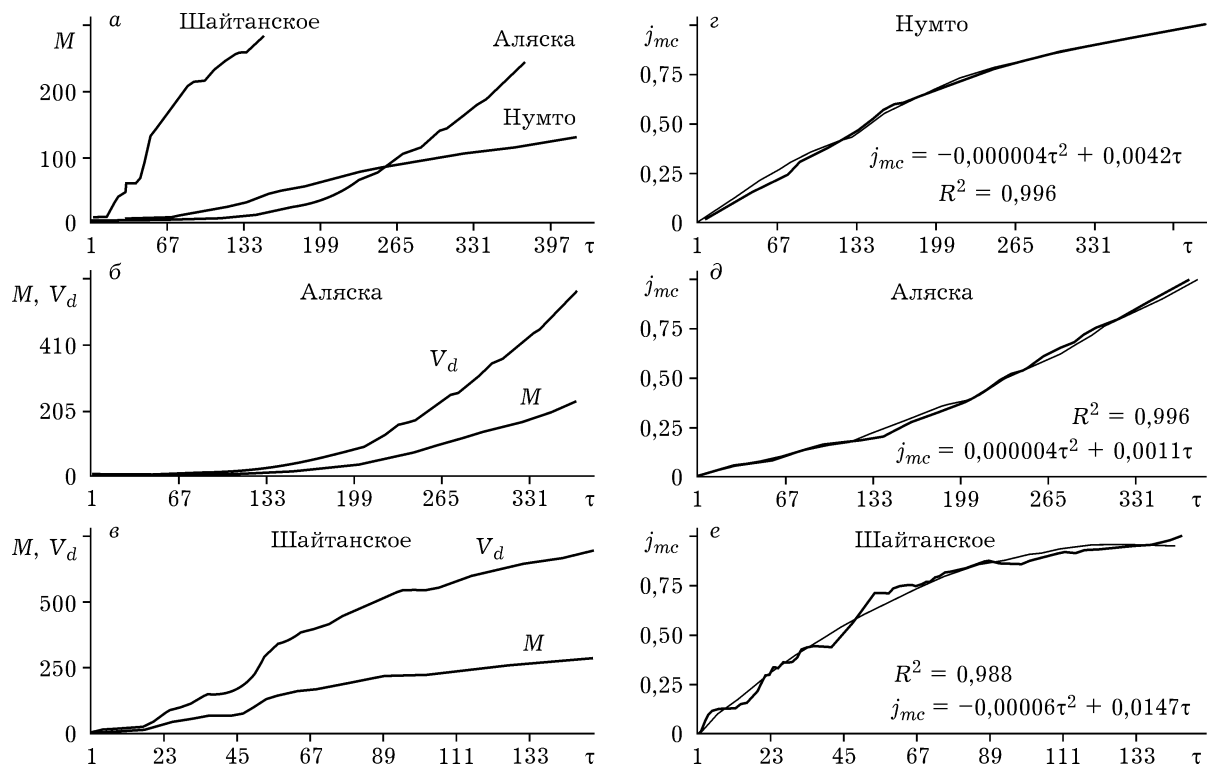


Рис. 4. Многолетний ход объема V_d , см³, и массы M , г, единичного диска древесины в контрольном срезе ствола, а также его относительной удельной массы j_{mc} (толстая линия – скользящая средняя за 22 года, тонкая – тренд) с аппроксимацией тренда в различных лесорастительных условиях

жении в сторону гидротермического оптимума – из северной (Нумто) и горной (Аляска) тайги в подтайгу (Шайтанское). Рис. 4, б–в показывают, что скорость радиального нарастания размеров ствола (V_d) в 2–3 раза превышает скорость нарастания его массы (M); т. е. рост дерева в ширину сопровождается не только увеличением массы, выражающемся в утолщении клеточных стенок (скелетной основы дерева), но и, в большей степени, ее относительными механическими перемещениями с образованием зон разуплотнения [12], что говорит о накоплении энтропии. Наконец, сравнение рис. 4, з–е и рис. 1 демонстрирует практически полное совпадение относительных деформаций, рассчитанных по изменению радиуса и массы: $j_r \approx j_{mc}$

Анализ таблицы показывает, что соотношения плотностей любой пары древесных пород не зависят от влажности и являются постоянными величинами. В частности, отношения плотности сосны, лиственницы, кедра, ели и пихты к плотности кедра при лю-

бой влажности равны 1,16; 1,52; 1; 1,01 и 0,85 соответственно. Это позволяет распространение описанных выше количественных закономерностей, установленных для плотности кедра [6], на плотности (и массы) других древесных пород (для них следует подставлять свое значение плотности).

Интерпретация характерных параметров деформационных кривых. Площадь ствольного круга (диска сантиметровой высоты) можно трактовать как условную энергетическую емкость или как условную же внутреннюю энергию (в относительном виде это одно и то же), состоящую из двух частей: уже использованной, связанной $j_r = r/r_m$ и свободной $j_z = 1 - j_r$. Их сумма равна 1, а произведение или *производство* продукта их взаимодействия имеет смысл квадрата среднего геометрического (j_{az}) между j_r и j_z , т. е. $C = j_r \cdot j_z = j_r - j_r^2 = j_{az}^2$, где $j_{az} = (j_r \cdot j_z)^{0,5}$. На рис. 5 даны графики изменения этих параметров, обобщенно обозначенных j_i , во времени (“полный” график для Нумто с выделенным золотым сечением и половинные, в

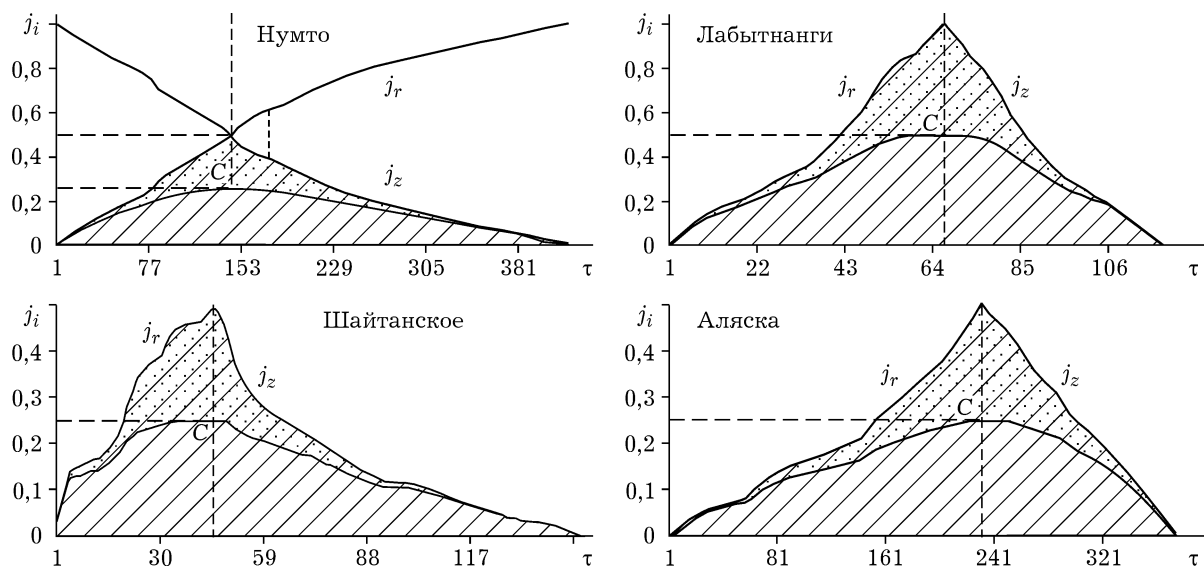


Рис. 5. Изменение относительных радиальных параметров ствола с постоянным знаменателем: j_r , j_z и их произведения C во времени τ , годы, в различных лесорастительных условиях (пояснения в тексте)

пределах $j_i \in [0, 0,5]$, для остальных пунктов), построенные по данным рис. 1. Кривая, состоящая из отрезков кривых зависимостей $j_r(t)$ и $j_z(t)$ ниже $j_i = 0,5$ – это ход обратимой (условно упругой) деформации j_y , который, как и ход параметра C , придает развитию циклический характер. Общая деформация j_r состоит из упругой и пластичной (остаточной) $j_{pl} = j_r - j_y$. Расчеты показывают, что $j_y > C$, но в начале и конце области, выделенной на рис. 5 наклонными линиями, их графики практически сливаются, и здесь $j_y \approx C$, а $j_{pl} \approx j_r - C$. Разницу $(j_y - C) = j_{rp}$ можно интерпретировать как часть обратимой энергии, которая отвечает только за репродуктивную (семяпроизводящую, “детородную”) способность дерева (верхняя часть области C , на рис. 5 выделенная точками). Этой энергией обладает только крона дерева, по мере роста дерева перемещающаяся снизу вверх. Наличие репродуктивной энергии j_{rp} по времени примерно совпадает со 2-й, стационарной стадией (стадией зрелости) и иссякает раньше, чем другая часть обратимой энергии, отвечающая за прирост толщины дерева. Отметим, что, как и у всех организмов, включая высшие, детородная энергия и ее субстанция (пыльца, споры...) имеют строго целевое назначение и регулярно (периодически) выделяются и в отсутствие возможности оплодотворения, прорастания, т.е. в

большинстве случаев избыточно и бесполезно для собственного воспроизводства. В рамках деформационной модели образование кроны дерева (или отдельного кустарника) объясняется тем, что растягивающее усилие здесь приложено не ко всей окружности ствола, а сосредоточено преимущественно в одной или нескольких точках, а энергия радиального прироста расходуется в основном на образование не кольца, а боковых побегов (веток), которые затем развиваются подобно основному стволу.

Графики деформаций, отнесенных к деформации на момент наблюдений, типа изображенных на рис. 1, отражают действительные соотношения между параметрами j_i только при совпадении момента наблюдений с биологической смертью дерева или с концом вегетационного периода (при рассмотрении годичного кольца как самостоятельной особи). В остальных случаях они условны, их назначение: дать наглядное представление о составляющих деформации и их соотношениях.

Выразим текущий радиус ствола и его ежегодный прирост (скорость) через отношение меньшего радиуса кольца r_1 к большему r_2 : $j_k = r_1/r_2$; $j_v = 1 - r_1/r_2$. Это более реальные информационные параметры, имеющие строгий физический (энтропийный) смысл: j_k – экспонента сезонной энтропии, равная $[\exp S/k = \exp(\ln r_1/r_2) = r_1/r_2]$, j_v – ее обрат-

ная (отнятая от единицы) величина, так же, как j_r и j_z , изменяющиеся в интервале 0...1. Но в отношениях j_r и j_z переменный только числитель, знаменатель – постоянная величина, а в j_k и j_v – переменны и числитель, и знаменатель; j_r и j_z могут служить показателями многолетней энтропии, а j_k и j_v – годичной, сезонной.

В течение жизни j_k повышается, особенно интенсивно в ее начале, до 90 % от конечной величины в первые 10–15 лет, а j_v , наоборот, понижается. На рис. 6 приведены графики хода во времени j_k , j_v , а также показателя упругости $C = j_k \cdot j_v$ у тех же четырех деревьев за первые 20 лет жизни. Как и на рис. 5, область, ограниченная отрезками кривых j_v и j_k ниже горизонтали $j_{vi} = 0,5$, характеризует “жизненную силу” (упругость) дерева. Заштрихована ее часть, отвечающая за репродукцию (семяпроизводство). Это генетически запрограммированная, наследуемая сила, которая, как видно из рис. 6, исчезает на данном срезе дерева (на высоте 1,3 м) уже на 6–12-м году жизни, перемещаясь вслед за кроной на более высокие отметки. Графики функции $j_v(\tau)$ на рис. 6 аппроксимируются одинаково и у светолюбивых, и у теневыносливых растений степенной зависимостью: $j_v = a\tau^b$, где a , b – численные коэффициенты.

Биологическая долговечность τ_m . Биологическая смерть дерева наступает при достижении шириной кольца предельно малого, близкого к нулю, значения, при котором кольцо становится непроходимым и делает невозможным метаболизм. Для установления такой предельно малой ширины кольца нужны специальные исследования. Определение биологической долговечности дерева существенно облегчается при устранении влияния на ход развития колебаний внешних условий, точнее – их линейаризации. Для этого существуют разные приближенные методы [12] с примерно одинаковой степенью правомочности их применения. Хорошие результаты дает метод осреднения показателей по текущим координатам пространства и времени. Выше этот метод уже применялся для определения среднерадимальной ширины кольца $\Delta_a = r/\tau$ на рис. 2. Так же можно осреднить и величины j_v ; получаем: $j_{va} = \Sigma j_v / \tau$ (где Σj_v – сумма j_v за текущее время τ). Анализ показал, что функция $j_{va}(\tau)$, как и $j_v(\tau)$, описывается степенной зависимостью, причем многолетние колебания полностью нивелируются, а через 100...150 лет степенная зависимость вырождается в линейную. Зависимость j_{va} от τ у деревьев, достигших этого возраста, и ее формулы приведены на рис. 7. Подставляя в них

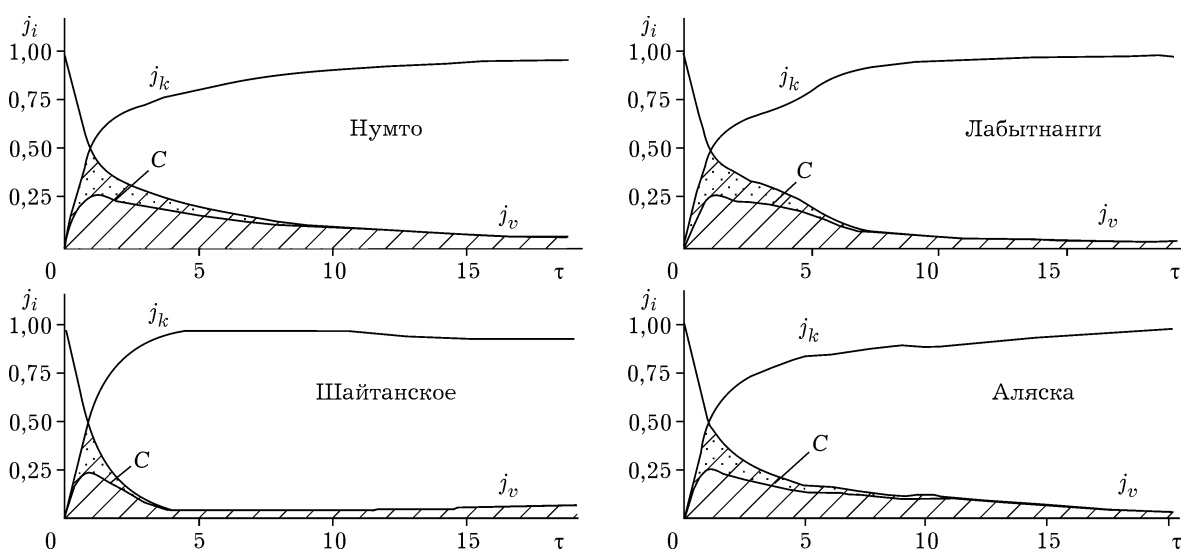


Рис. 6. Изменение относительных радиальных параметров ствола с переменным знаменателем: j_k , j_v и их произведения C во времени τ , первые 20 лет жизни тех же (по рис. 5) деревьев (пояснения в тексте)

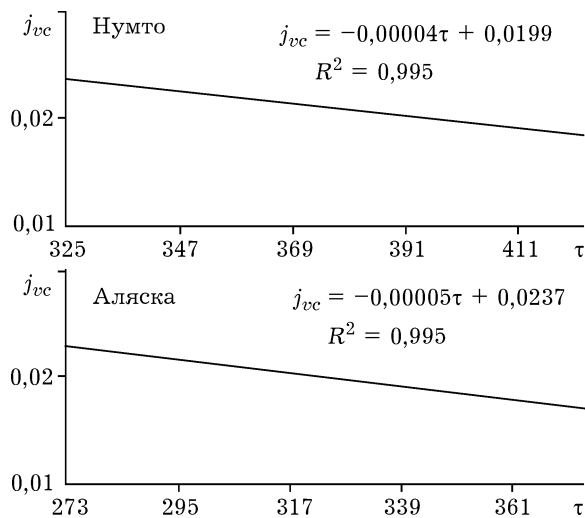


Рис. 7. Зависимость среднерадialного относительного показателя годичной энтропии j_{vc} сосны в Нумто и пихты на Аляске от времени τ , годы, на ее линейном участке (пояснения в тексте)

$j_{va} = 0$, находим τ_m для сосны в Нумто: $\tau_m = 273 + 0,024/0,00005 = 753$ года; для пихты на Аляске: $\tau_m = 273 + 0,023/0,00006 = 656$ лет.

Как видим, величины τ_m , рассчитанные этим способом и изложенным выше, отличаются не очень сильно – на 13...18 %, причем в обоих случаях τ_m на 100...150 лет больше у сосны в Нумто. Поэтому уместно говорить не об одном значении τ_m , а о ее возможном диапазоне, определяемом расчетом по обеим формулам: для сосны в Нумто $\tau_m = 753...895$ лет, для пихты на Аляске $\tau_m = 656...744$ года. Долговечность рекомендуется оценивать по меньшей цифре (с запасом).

Сезонный ход деформации. Каждое годичное кольцо можно рассматривать и как особь – “потомка”, подчиняющегося в своем развитии тем же закономерностям, что и “материнская” система – ствол, подобно ей [12]. На рис. 8 показан сезонный ход относительных показателей деформации сосны в Московской области: а – скорости роста годичных колец v , %/сут и б – относительного радиуса j_r , параметров $j_z = 1 - j_r$ и $C = j_r \cdot j_z$, обозначенных общим символом j_i . Рис. 8, а заимствован из [12], график на рис. 8, б перестроен из графика на рис. 8, а путем сложения скоростей. Сглаженные линии – аппроксимации функций $v(\tau)$ и $j_r(\tau)$, в первом случае полиномом 6-й степени (формула не

приводится из-за громоздкости), во втором – полиномом 2-й степени; его формула дана на рис. 8, б. Как видим, деформационные кривые на рис. 8, б идентичны таковым на рис. 1. Формулы для их описания в похожих природных условиях схожи между собой (ср. формулы на рис. 8, б для сосны в Подмосковье и на рис. 1 для сосны в Шайтанском под Тюменью) с той разницей, что в первом случае время выражено в сутках, а во втором в годах. То есть сутки в сезонном ходе утолщения ствола примерно эквивалентны году в его многолетнем ходе. Аналогичные результаты получены для сосны под Красноярском [12]. Графики функции $j_r(\tau)$, приведенные в [12], подобны графикам на рис. 8, б и 1, кроме того, красноярскими учеными установлена идентичность сезонного роста относительных величин толщины ствола (j_r) и числа клеток в его радиальных рядах.

Формирование (деформация) годичного кольца, его структурное обособление, в значительной мере определяется фазовыми переходами древесной влаги и ее тепло-водопроводящими свойствами. На рис. 9, а изоб-

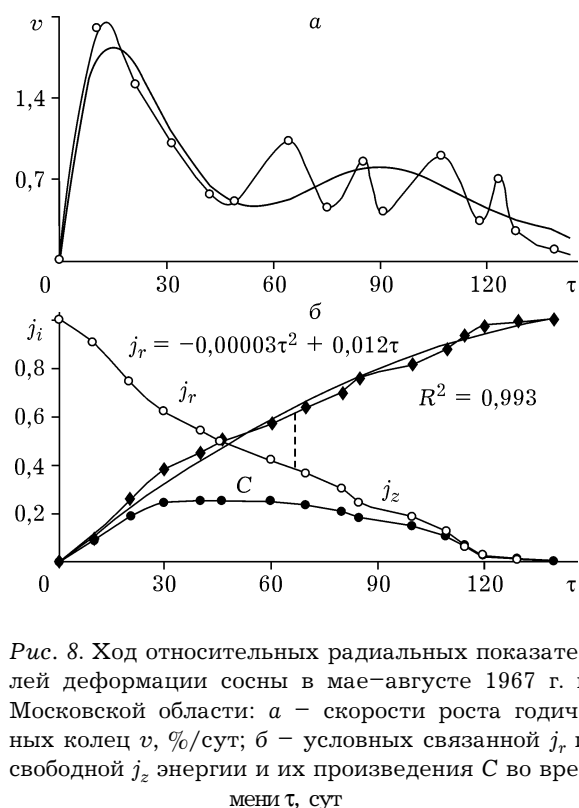


Рис. 8. Ход относительных радиальных показателей деформации сосны в мае-августе 1967 г. в Московской области: а – скорости роста годичных колец v , %/сут; б – условных связанной j_r и свободной j_z энергии и их произведения C во времени τ , сут

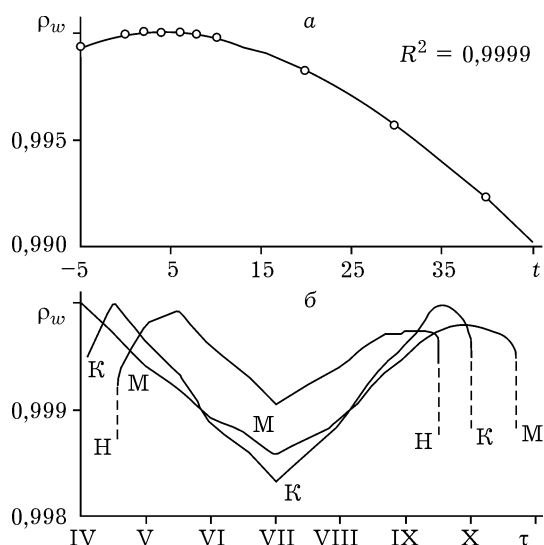


Рис. 9. Зависимость плотности воды ρ_w от температуры t (а) и месяца года, τ (б) в климатических условиях Москвы – М, Красноярска – К и Нумто – Н

ражен график зависимости плотности воды ρ_w от температуры t °C [13], аппроксимированный формулой: $\rho_w = 5 \cdot 10^{-8} \cdot t^3 - 8 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 7 \cdot 10^{-5} \cdot t + 1$.

При кристаллизации древесной влаги в начале зимы ее объем резко увеличивается, создавая растягивающие напряжения. При превышении ими предельных сопротивлений разрыву стенок трахеид или коры в них образуются морозобойные трещины. Кроме того, кристаллы льда закрывают проводящие каналы, прерывая метаболизм. Декристаллизация влаги (в апреле – мае в умеренном поясе и в мае–июне в субарктическом) с сокращением ее объема на 8,33 % вызывает образование пустот внутри древесного тела, ориентированных по пути перемещения оттаявшей влаги. Как следствие, в трахеидах, имеющих форму продольных каналов, связанных в единую систему, возникает отрицательное давление, втягивающее в них грунтовую влагу – сырье для древесной ткани, до их полного насыщения. Плотность у влажной древесины примерно вдвое меньше, чем у воды, поэтому ее производство сопровождается увеличением объема.

На рис. 9, б показан ход ρ_w в теплые месяцы года в Красноярске (К), Москве (М) и

в Нумто (Н), рассчитанный по приведенной выше ее формуле по данным метеостанций. Выделяются два пика повышенной плотности воды: весенне-летний на подъеме и летне-осенний на спаде, определяющие морфологические особенности ранней и поздней древесины. Вода с пониженной плотностью более подвижна, что способствует процессам метаболизма в камбии и образованию на временном отрезке между пиками плотности древесной ткани. Размеры клеток в этот период достигают максимальных размеров. По-видимому, именно дефицит плотности (при увеличивающемся объеме – дефицит массы) в “потенциальной яме” между этими пиками обеспечивает физическую возможность нарастания скелетной массы дерева.

Таким образом, предложенная модель радиального роста древесных растений, основанная на универсальных законах деформации физических тел, адекватно объясняет структурно-функциональную динамику биологических процессов древесного организма.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ловелиус Н. В. Изменчивость прироста деревьев // Дендроиндикация природных процессов и антропогенных воздействий. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1979. 230 с.
2. Ваганов Е. А., Шиятов С. Г., Мазепа В. С. Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской Субарктике. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1996. 246 с.
3. Антанайтис В. В., Загребев В. В. Прирост леса. М.: Лесная пром-сть. 1981. 200 с.
4. Комин Г. Е. Применение дендрохронологических методов в экологическом мониторинге лесов // Лесоведение. 1990. № 2. С. 3–11.
5. Srerba H., Eckmüllner O. Nadelverlust – Zuwachsrückgang: Doch eine Beziehung // Osteur. Forstztg. 1988. Bd. 99, N 10. S. 52–53.
6. Арефьев С. П. Гнилевые болезни сосны сибирской в лесах среднетаежного Прииртышья: Дис... канд. биол. наук. Свердловск: УЛТИ, 1990. 154 с.
7. Арефьев С. П. Формирование устойчивости к гнилям кедровников в Западной Сибири // Лесное хозяйство. 2001. № 6. С. 20–22.
8. Карлстром Т. В. История оледенения Аляски и ее значение для теории палеоклимата // Солнечная активность и изменения климата. Л.: Гидрометеоздат, 1966. С. 119–177.
9. Коновалов А. А., Иванов С. Н. Климат, фитопродуктивность и палиноспектры: связи, распределение и методика палеореконовструкций. Новосибирск: “Гео”, 2007. 130 с.

10. Сороко Э. М. Структурная гармония систем. Минск: Наука и техника, 1984. 265 с.
11. Михайличенко А. Л., Сметанин И. С. Практикум по древесиноведению и лесному товароведению. М.: Лесная пром-сть, 1989. 104 с.
12. Ваганов Е. А., Пашкин А. В., Сви́дeрская И. В., Высоцкая Л. Г. Гистометрический анализ роста древесных растений. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1985. 102 с.
13. Кошкин И. И., Ширкевич М. Г. Справочник по элементарной физике. М.: Наука, 1974. 235 с.

Deformation Model of the Radial Growth of Wood Plants and its Analytical Possibilities

A. A. KONOVALOV, S. P. AREFYEV

*Institute of the Problems of the Development of the North SB RAS
625003, Tyumen, P.O. box 2774
E-mail: konov7@rambler.ru*

Possibility to describe the regularities of the radial growth of wood plants and their properties using the deformation model is demonstrated. Examples of such a description for the subarctic and temperate zones in the perennial and annual climatic cycles are given.

Key words: deformation, wood plants, radial growth, seasonal cycles, annual rings, biological longevity.