

УДК 630*561.24:630*1

**РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ КЛИМАТИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ
РАДИАЛЬНОГО ПРИРОСТА ЛИСТВЕННИЦЫ
НА СЕВЕРЕ СРЕДНЕЙ СИБИРИ И НА УРАЛЕ¹**

**А.В. Кирдянов, П.П. Силкин,
А.А. Кнорре, В.Б. Круглов***

На основе анализа изменчивости и климатического отклика ширины и плотности годовых колец лиственницы, произрастающей вдоль меридиональных трансектов на Урале и в Сибири, показано, что реакция радиального прироста деревьев зависит от локальных условий. Из-за того, что трансекты различаются сменой условий произрастания деревьев (для Енисейского трансекта свойственен градиент температуры, а для Уральского — жесткие условия произрастания деревьев на всех участках на верхней границе леса), характер изменения связей прироста и климатических факторов на Урале и в Сибири существенно различается.

Введение

Годичные кольца деревьев являются одним из наиболее надежных и достоверных источников информации об изменении условий окружающей среды в прошлом. Это обусловило широкое распространение исследований, нацеленных на изучение связей прироста и структуры древесных колец с изменениями климата и других внешних факторов. В настоящее время в научной литературе представлено большое количество дендроклиматических и дендроэкологических работ. Наиболее интенсивно такого рода исследования проводились в США, Канаде, Европе [Dean et al., 1994; Schweingruber, 1996; Dobbertin and Braecker 2001]. В России подобные научные работы были сконцентрированы в высоких широтах и, в основном, ограничены изучением влияния на радиальный прирост деревьев температуры [Шиятов, 1986; Ваганов и др., 1996; Kirdyanov, Zakharjevski, 1996; Panyushkina et al., 1996; Briffa et al., 1998, 2001, 2004; Vaganov et al., 1999; Hughes et al., 1999]. Дендроэкологические и дендроклиматические исследования в регионах, где влияние температуры на рост деревьев не настолько выражено, были гораздо менее интенсивными. С другой стороны, изучение роста деревьев в различных условиях позволяет лучше понять пределы адаптации древесных видов к меняющимся условиям среды, что становится особенно актуальным в контексте текущих глобальных изменений климата. Цель данного исследования - выявить особенности радиального прироста деревьев в различных условиях вдоль двух меридиональных трансектов на Урале и в Сибири, существенно различающихся по характеру изменения климатических условий. В то время, как Сибирский трансект характеризуется наличием выраженного температурного градиента, участки на Урале заложены в экстремальных для произрастания лиственницы условиях на верхней границе леса.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ-ККФН 05-04-97706 и INTAS-01-0052.

* © А.В. Кирдянов, П.П. Силкин, А.А. Кнорре, Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН; В.Б. Круглов, Красноярский государственный университет, 2005.

Материалы и методика

Дендрохронологический материал (керы деревьев) был собран на шести участках, расположенных вдоль двух меридиональных трансектов: на Урале и вдоль Сибирского трансекта IGBP (IGBP - Международная гео-биосферная программа). Древесные образцы в Средней Сибири были отобраны у живых деревьев лиственницы на участках, представляющих типичные биогеоценозы лесотундры (BAV (70° 29' с.ш., 92° 50' в.д.)) и средней тайги (BUG (61° 51' с.ш., 94° 19' в.д.)). Еще один участок в пределах этого региона был заложен на границе лесотундры и северной тайги (КНА (68° 20' с.ш., 87° 50' в.д.)). На Урале сбор образцов проводился у деревьев, произрастающих вблизи верхней границы распространения древесной растительности: участок PUR (66° 49' с.ш., 65° 35' в.д., 190 м над уровнем моря) расположен на Полярном Урале, NUR (59° 38' с.ш., 59° 16' в.д., 850 м) - на Северном Урале и SUR (54° 33' с.ш., 58° 50' в.д., 1320 м) - на Южном Урале. Участок BAV на севере Средней Сибири является единственным, который представлен материалом по лиственнице Гмелина (*Larix gmelinii*, (Rupr.) Rupr.), на других участках древесные образцы были собраны у деревьев лиственницы сибирской (*Larix sibirica*, Ledeb).

В лабораторных условиях в соответствии со стандартной методикой денситометрических измерений [Schweingruber 1988; Кирдянов, 1999a] были получены профили изменения плотности в годовых кольцах деревьев. В качестве характеристики профилей плотности древесных колец в дальнейшей работе используется лишь два наиболее широко распространенных в дендроклиматических исследованиях параметра: ширина годового кольца (ШГК) и максимальная плотность поздней древесины (МАКС). Для этих параметров были получены временные серии погодических изменений их величины - хронологии. Перекрестная датировка хронологий, выполненная графически и с использованием специализированной программы COFESHA из пакета дендрохронологических программ DPL [Holmes, 1992], позволила определить календарный год образования каждого кольца.

Датированные хронологии, полученные по исходным данным, были проиндексированы относительно кривых, описывающих возрастные изменения ширины и плотности годовых колец. Затем индивидуальные индексные хронологии для каждого участка были объединены в обобщенные серии, характеризующие изменения параметров кольца для каждого местопроизрастания в целом. При расчете обобщенных хронологий было использовано авторегрессионное моделирование, которое позволило исключить составляющую изменчивости, обусловленную физиологическими особенностями прироста годовых колец [Ваганов и др., 1996], и усилить внешний сигнал, содержащийся в этой изменчивости.

Сравнение обобщенных хронологий проводилось с использованием традиционных для дендрохронологии параметров: длительность хронологий, среднее значение параметра кольца, его стандартное отклонение. Для оценки согласованности изменений параметров рассчитывались коэффициенты корреляции индивидуальных хронологий со средней серией и коэффициент согласованности. Величина коэффициента корреляции варьирует от -1 до 1, а согласованности - от 0 до 1 и является более высокой у хронологий тех участков, где рост деревьев подвержен более сильному влиянию факторов внешней среды, согласующих изменения прироста и структуры колец. Коэффициент чувствительности характеризует величину внешнего сигнала, содержащегося в изменчивости хронологий. Считается, что хронологии ШГК, коэффициент чувствительности которых выше 0,2, пригодны для дендроклиматического анализа, а коэффициент выше 0,4 характеризует временной ряд как очень чувствительный [Шиятов, 1986]. Хронологиям МАКС свойственны меньшие значения коэффициента чувствительности вследствие большей стабильности этого параметра колец.

Для определения степени влияния климата на радиальный прирост и структуру колец были рассчитаны коэффициенты корреляции между обобщенными хронологиями и рядами среднемесячных температур и осадков ближайших к участкам метеорологических станций. В работе использовали данные метеорологической станции Волочанка (70° 57' с.ш., 94° 30' в.д.) для сравнения с хронологиями BAV, Туруханска (66° 48' с.ш., 87° 57' в.д.) - с КНА, Байкита (61° 42' с.ш., 94° 24' в.д.) - с BUG. Для хронологий Полярного Урала брали данные Салехарда (66° 31' с.ш., 66° 36' в.д.), Северного Урала - Карпинска (59° 45' с.ш., 60° 01' в.д.), Южного Урала - Таганая (55° 22' с.ш., 59° 54' в.д.).

Результаты и обсуждение

Сравнительный анализ основных дендрохронологических параметров хронологий ШГК и МАКС, полученных для двух меридиональных трансектов (табл. 1 и 2), показывает, что при продвижении с севера на юг уменьшается длительность хронологий. Эта тенденция отражает средний возраст деревьев в пределах каждой лесорастительной зоны, поскольку дендрохронологический материал был собран у деревьев, произрастающих в типичных для каждой зоны условиях. Средняя ширина годовых колец и, в меньшей степени, средняя величина МАКС увеличиваются в направлении с севера на юг. Этот факт особенно интересен в связи с тем, что данный тренд четко выражен для обоих трансектов, характеризующихся различными тенденциями в изменениях условий роста деревьев. В то время как температурные условия для роста деревьев вдоль Енисейского меридиана улучшаются при продвижении с севера на юг, т.е. вдоль трансекта четко выражен температурный градиент, условия для роста деревьев на верхней границе леса на Урале остаются достаточно жесткими.

Таблица 1

Дендрохронологические параметры хронологий Енисейского меридиана

Участок	Период	Среднее значение параметра	Стандартное отклонение	Кэфф. корреляции со средней	Согласованность	Кэфф. чувствительности
Ширина годичных колец						
BAV	1689-2002	0,34 мм	0,23	0,83	0,92	0,578
KHA	1723-1998	0,45 мм	0,26	0,71	0,82	0,367
BUG	1770-1994	0,51 мм	0,36	0,70	0,71	0,212
Максимальная плотность поздней древесины						
BAV	1689-2002	0,81 г/см ³	0,16	0,82	0,92	0,184
KHA	1723-1998	0,94 г/см ³	0,12	0,69	0,77	0,088
BUG	1770-1994	1,07 г/см ³	0,10	0,72	0,74	0,037

Таблица 2

Дендрохронологические параметры хронологий на верхней границе леса на Урале

Участок	Период	Среднее значение параметра	Стандартное отклонение	Кэфф. корреляции со средней	Согласованность	Кэфф. чувствительности
Ширина годичных колец						
PUR	1641-2001	0,40 мм	0,26	0,84	0,90	0,423
NUR	1816-2003	0,47 мм	0,26	0,76	0,88	0,356
SUR	1861-2002	0,88 мм	0,50	0,83	0,91	0,415
Максимальная плотность поздней древесины						
PUR	1641-2001	0,81 г/см ³	0,17	0,77	0,85	0,153
NUR	1816-2003	0,90 г/см ³	0,14	0,78	0,91	0,103
SUR	1861-2002	0,88 г/см ³	0,11	0,80	0,91	0,095

Согласованность погодичных изменений ШГК и МАКС у отдельных деревьев на каждом из участков уменьшается в направлении с севера на юг вдоль Енисейского меридиана. Вдоль трансекта на Урале подобной закономерности не наблюдается. Более того, коэффициенты корреляции и согласованности у МАКС на Урале увеличиваются с севера на юг.

Для ШГК вдоль Енисейского меридиана, так же как и для МАКС вдоль обоих трансектов, характерно уменьшение чувствительности при переходе к более южным участкам. Для ШГК вдоль трансекта на Урале такой зависимости от широты не наблюдается. Единственной хронологией ШГК, характеризующей коэффициентом чувствительности меньшим 0,35 является серия, полученная для участка BUG в средней тайге Средней Сибири. Более высокие коэффициенты чувствительности северных и высокогорных хронологий ШГК свидетельствуют о большем влиянии внешних факторов на радиальный прирост в более жестких условиях.

В целом, собранный дендрохронологический материал имеет высокую чувствительность параметров структуры колец к изменению внешних условий. Кроме того, изменчивость ширины и плотности древесных колец у отдельных деревьев на каждом из участков отличается высокой согласованностью. Подобная картина типична для ненарушенных лесных экосистем, подверженных сильному воздействию общих внешних факторов.

Для определения того, от каких климатических параметров зависит изменчивость прироста и структуры колец лиственницы на рассматриваемых участках, был проведен дендроклиматический анализ. Результаты этого анализа (табл. 3 и 4) показывают, что в наибольшей степени на прирост деревьев влияют летние температуры. Для ШГК практически всех участков определяющей являются температуры июня и июля. Для северных районов значение температуры июля выше, чем июня. При смещении к югу возрастает относительное влияние июньской температуры, и на участке BUG в средней тайге Средней Сибири на ШГК значимое влияние оказывает только температура июня. Кроме того, для ШГК этого участка велико значение температуры апреля (отрицательная корреляция).

МАКС всех участков, за исключением BUG, положительно коррелирует с температурой более продолжительного периода, чем ШГК. На верхней границе леса на Полярном и Южном Урале МАКС положительно связана с температурой с мая по август, на Северном Урале - с температурой с июня по август. В Средней Сибири четко прослеживается меридиональная зависимость продолжительности периода со значимой корреляцией между МАКС и температурой. Если на севере (BAV) значимо влияние температуры с июня по август, то для более южного участка KHA наблюдается сдвиг периода со значимой температурой на более ранние даты с мая по август, а в средней тайге (BUG) на МАКС существенно влияет только температура июня. Для BUG также сказывается отрицательное влияние температуры апреля.

Значимые ($p < 0.05$) коэффициенты корреляции хронологий ширины (ШГК) и максимальной плотности годовых колец (МАКС) лиственницы на участках вдоль Енисейского трансекта со среднемесячной температурой (Т) и осадками (О)

Параметр кольца		Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август
		Участок BAV											
ШГК	Т										0,34	0,47	
	О										-0,33		
МАКС	Т										0,56	0,57	0,29
	О												
Участок КНА													
ШГК	Т	0,32									0,37	0,49	
	О	0,27											
МАКС	Т									0,30	0,44	0,50	0,33
	О												
Участок BUG													
ШГК	Т								-0,38		0,36		
	О									0,30			
МАКС	Т								-0,28		0,33		
	О						-0,36		-0,34				

Таблица 4

Значимые ($p < 0.05$) коэффициенты корреляции хронологий ширины (ШГК) и максимальной плотности годовых колец (МАКС) лиственницы на Урале со среднемесячной температурой (Т) и осадками (О)

Параметр кольца		Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август
		Участок PUR											
ШГК	Т										0,37	0,61	
	О												
МАКС	Т									0,26	0,53	0,53	0,34
	О				-0,31								
Участок NUR													
ШГК	Т										0,49	0,26	
	О										-0,34	-0,28	
МАКС	Т										0,46	0,40	0,27
	О										-0,33	-0,31	
Участок SUR													
ШГК	Т										0,48	0,36	
	О										-0,44		
МАКС	Т									0,22	0,40	0,41	0,24
	О										-0,41	-0,30	

Корреляционная связь ШГК и МАКС с осадками в Средней Сибири выражена значительно меньше, чем с температурой. Наиболее существенное значение для прироста и структуры колец в этом регионе осадки имеют на самом южном участке. На Урале влияние осадков значительно выше. Для деревьев на Полярном Урале проявляется отрицательное влияние зимних осадков на МАКС. На Северном и Южном Урале и МАКС, и ШГК отрицательно коррелируют с летними осадками июня и июля.

Полученные связи параметров годовых колец с температурой и осадками подтверждают ранее полученные результаты для высокогорных и высокоширотных регионов. В этих условиях раннелетняя температура является основным фактором, определяющим величину годового прироста (ШГК) лиственницы [Шиятов, 1986; Ваганов и др., 1996; Kirdeyanov, Zakharjevski, 1996; Ваганов и др., 1999; Briffa et al., 2004]. Также в работах, анализирующих связи максимальной плотности древесины с температурой, говорится о большей продолжительности периода, для которого отмечается положительное влияние температуры на МАКС, чем на ШГК [Schweingruber, 1988; Кирдянов, 2003]. Еще одним фактором, в значительной степени определяющим прирост и структуру годовых колец, служит дата схода снежного покрова [Ваганов и др., 1999; Vaganov et al., 1999; Kirdeyanov et al., 2003], которая в значительной степени определяется зимними

осадками. По нашим данным, наиболее четко зависимость структуры радиального прироста от зимних осадков наблюдается для участков на Полярном Урале и в средней тайге Средней Сибири, что согласуется с результатами Мазепы [1999] и Кирдянова [1999б].

Интересен факт отрицательного влияния температуры апреля на ширину и максимальную плотность колец лиственницы на наиболее южном участке в Средней Сибири (BUG). То есть температурные условия временного интервала, предшествующие началу вегетационного периода, влияют на радиальный прирост текущего года. Подобное явление ранее было отмечено для лиственницы, произрастающей в условиях северной тайги Средней Сибири [Panyushkina et al., 1996]. Наличие отрицательной связи может быть объяснено тем, что ранняя инициация ростовых процессов в апреле под влиянием положительных температур может быть приостановлена или прервана последующими заморозками. Зачастую такая ситуация ведет к повреждению камбиальных клеток ветвей и, соответственно, возникновению так называемых морозобойных колец. Последнее, безусловно, нарушает проводимость ветвей, что сказывается на всех ростовых процессах дерева в течение вегетационного периода. Косвенно это предположение подтверждается тем, что по инструментальным данным метеорологической станции Байкита среднемесячная температура апреля в отдельные годы незначительно выше нуля, т.е. ранние оттепели в апреле могут сопровождаться заморозками, что приводит к описанным выше нарушениям.

Сравнительный анализ результатов, приведенных в табл. 3 и 4, позволяет выявить особенности реакции радиального прироста лиственницы и максимальной плотности колец на изменение климатических условий вдоль меридиональных трансектов на Урале и в Сибири. Основная особенность Енисейского меридиана - наличие четко выраженного температурного градиента в направлении север-юг [Лесные экосистемы..., 2002]. Именно с этим и связано смещение периода со значимыми для роста колец температурами на более ранние даты и увеличение роли температуры более раннего периода для деревьев, произрастающих южнее. Еще одной особенностью влияния климатических факторов на прирост деревьев вдоль трансекта в Сибири является возрастание роли осадков (водного режима) для более южного участка. Возрастание роли зимних осадков с одновременным уменьшением степени влияния летней температуры на прирост и структуру древесных колец хвойных вдоль Енисейского трансекта отмечалось и ранее [Кирдянов, 1999б; Ваганов, Кирдянов, 2002].

Участки на Урале были заложены вблизи верхней границы леса, где прирост деревьев, в основном, лимитируется температурным режимом вегетационного периода [Шиятов, 1986]. Соответственно, вдоль меридионального трансекта на Урале не наблюдается значительного изменения корреляционных связей ШПК и МАКС с температурой. Однако и здесь при продвижении с севера на юг происходит усиление влияния на ШПК температуры более раннего периода (июня) относительно температуры июля и изменение характера корреляционных связей с осадками. Также важно отметить, что в целом осадки оказывают большее влияние на радиальный прирост деревьев, произрастающих на Урале.

В целом, полученные результаты позволяют заключить, что реакция радиального прироста лиственницы на изменение климатических параметров в значительной степени зависит от локальных условий. По нашим данным, этот вывод верен даже для жестких условий севера Средней Сибири и верхней границы леса на Урале. Необходимо также отметить, что реакция прироста и структуры годичных колец на климатические изменения вдоль двух меридиональных трансектов существенно различается. Связано это с тем, что трансекты различаются характером смены условий произрастания деревьев: для Енисейского трансекта свойственен градиент температуры, а для Уральского - жесткие условия произрастания деревьев на всех участках на верхней границе леса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ваганов Е.А. Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской Субарктике / Е.А. Ваганов, С.Г. Шиятов, В.С. Мазепа. - Новосибирск: Наука, 1996. - 246 с.
2. Ваганов Е.А. Значение раннелетней температуры и сроков схода снежного покрова для роста деревьев в субарктической зоне Сибири / Е.А. Ваганов, А.В. Кирдянов, П.П. Силкин // Лесоведение. - 1999. - N 6. - С. 3-13.
3. Ваганов Е.А., Кирдянов А.В. Рост, структура годичных колец хвойных пород и реконструкция изменений климата. Лесные экосистемы Енисейского трансекта / Е.А. Ваганов, А.В. Кирдянов // Под ред. Ф.И. Плешикова. - Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. С. 181-196.
4. Кирдянов А.В. Использование характеристик плотности древесины в дендроклиматических исследованиях / А.В. Кирдянов // Сибирский экологический журнал. - 1999а. - N 2 (т. VI). - С. 193-201.
5. Кирдянов А.В. Сравнительный анализ роста и структуры годичных колец хвойных в лесотундре, северной и средней тайге Средней Сибири: Автореф. дисс. канд. биол. наук / А.В. Кирдянов. - Красноярск, 1999б.
6. Лесные экосистемы Енисейского меридиана / Под ред. Ф.И. Плешикова. - Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002.
7. Мазепа В.С. Влияние осадков на динамику радиального прироста хвойных в субарктических районах Евразии / В.С. Мазепа // Лесоведение. - 1999. - N 6 - С. 14-21.

8. Шиятов С.Г. Дендрохронология верхней границы леса на Урале / С.Г. Шиятов. - М.: Наука, 1986.
9. Briffa K.R., Schweingruber F.H., Jones P.D., Osborn T.J., Harris I.C., Shiyatov S.G., Vaganov E.A., Grudd H. Trees tell of past climates: but are they speaking less clearly today? *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B.* 1998. 353: 65-73
10. Briffa K.R., Osborn T.J., Schweingruber F.H., Harris I.C., Jones P.D., Shiyatov S.G., Vaganov E.A. Low frequency temperature variations from a northern tree-ring density network. *Journal of Geophysical Research* 2001. 106: 2929-2941
11. Briffa K.R., Osborn T.J., Schweingruber F.H. Large-scale temperature inferences from tree rings: a review. *Global Planet Change.* 2004. N 40. P. 11-26.
12. Dean, J.S., Meko, D.M., and Swetnam, T.W. (Eds.). Tree rings, environment and humanity. Proceedings of the International Conference. Tucson, Arizona, 17-21 May. *Radiocarbon.* 1994
13. Dobbertin M.K., Braecker O.U. (Eds.). Abstracts of the International Conference on the Future of Dendrochronology. Publ. by Swiss Federal Research Institute WSL. 2001
14. Holmes R.L. Program COFECHA: Version 3. The University of Arizona, Tucson, 1992
15. Hughes M.K., Vaganov E.A., Shiyatov S., Touchan R., Funkhouser G. Twentieth-century summer warmth in northern Yakutia in a 600-year context. *The Holocene* 1999.9 (5): 629-634
16. Kirdjanov A.V., Zaharjevsky D.V. Dendroclimatological study on tree-ring width and maximum density chronologies from *Picea obovata* and *Larix sibirica* from the north of Krasnoyarsk region (Russia). *Dendrochronologia*, 1996, 14: 227-236.
17. Kirdeyanov A., Hughes H., Vaganov E., Schweingruber F., Silkin P. The importance of early summer temperature and date of snow melt for tree growth in Siberian Subarctic. *Trees*, 2003, 17: 61-69
18. Panyushkina I.P., Vaganov E.A., Shishov V.V. Spatial-temporal variation of radial tree-growth in relation to climate in the north of Middle Siberia. *Dendrochronologia*, 1996, 14: 115-126
19. Schweingruber F.H. Tree rings: Basics and applications of dendrochronology. - Dordrecht: Reidel Publ., 1988. - 276 p.
20. Schweingruber F.H. Tree Rings and environment. Dendrochronology. - Berne; Stuttgart; Vienna: Paul Haupt Birmensdorf, Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, 1996
21. Vaganov E.A., Hughes M.K., Kirdeyanov A.V., Schweingruber, F.H., Silkin P.P. Influence of snowfall and melt timing on tree growth in subarctic Eurasia, *Nature*, 1999, v. 400, # 6740: 149-151.

REGIONAL FEATURES OF CLIMATIC RESPONSE OF LARCH RADIAL TREE GROWTH IN THE NORTH OF MIDDLE SIBERIA AND THE URALS

**A.V. Kirdeyanov, P.P. Silkin,
A.A. Knorre, V.B. Kruglov**

Based on the comparative and dendroclimatic analyses of tree-ring width and maximum latewood density chronologies of larch growing along the longitudinal transects in Siberia and the Urals, it was shown that tree radial growth response depend on local conditions. The transects investigated are characterized by different patterns of climatic condition changes for larch growth: temperature gradient is characteristic of the Siberian transect, but sites in the Urals were installed under very severe conditions at the upper tree-line. This difference in changes of conditions along the transects is the reason for different pattern in dendroclimatic response of larch at sites located along the transects.