

Е. А. БАБУШКИНА*, А. А. КНОРРЕ**, Е. А. ВАГАНОВ*, М. В. БРЮХАНОВА**

*Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

** Институт леса СО РАН, г. Красноярск

ТРАНСФОРМАЦИЯ КЛИМАТИЧЕСКОГО ОТКЛИКА В РАДИАЛЬНОМ ПРИРОСТЕ ДЕРЕВЬЕВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТОПОЭКОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ИХ ПРОИЗРАСТАНИЯ

Приводятся результаты исследования по выявлению регионального климатического сигнала, содержащегося в изменчивости ширины древесных колец хвойных видов из различных топоэкологических условий в лесостепной зоне Республики Хакасия. Установлено, что при разных условиях произрастания деревьев одних и тех же видов происходит значительная трансформация климатического сигнала. Показана возможность использования сочетания древесно-кольцевых хронологий разных видов деревьев для адекватной дендроклиматической реконструкции ведущих климатических переменных.

Ключевые слова: радиальный прирост, топоэкологические условия, климат, видоспецифичность, Хакасия.

We report the research results derived from identifying the regional climatic signal contained in the coniferous tree ring-width variability for different topoeological conditions in the forest-steppe of the Republic of Khakassia. It is found that under different growing conditions for trees of the same species the climatic signal undergoes a significant transformation. We demonstrate the possibility of using a combination of tree-ring chronologies of different tree species for an adequate dendroclimatic reconstruction of the leading climatic variables.

Keywords: radial increment, topoeological conditions, climate, species specificity, Khakassia.

ВВЕДЕНИЕ

Существенное изменение состояния окружающей среды, наблюдаемое в последние десятилетия, находит отражение на разных уровнях организации экосистем (организменный, видовой, популяционный и т. д.). Выявление видов-индикаторов, отражающих эти изменения, до сих пор остается приоритетным направлением в исследованиях, касающихся установления качественных связей между видами и определяющим фактором воздействия. Одним из ведущих направлений в данной области является дендроиндикация.

В районах с преобладанием одного лимитирующего фактора влияние топоэкологических условий (рельефа, мощности почвенного горизонта, крутизны и ориентации склонов и др.) на изменчивость радиального прироста древесных растений существенно не проявляется. Поэтому созданная сеть региональных древесно-кольцевых хронологий выявляет в изменчивости прироста деревьев значимый региональный климатический сигнал [1]. Это четко показано для субарктических и горных регионов, где летняя температура воздуха (июнь–июль) определяет синхронность радиального прироста на значительных территориях, а обобщенные (генерализованные) хронологии достаточно надежно отображают изменения региональной температуры [2, 3]. Реконструкции для таких районов позволяют оценить естественную изменчивость климата в доиндустриальное время и вклад антропогенных факторов в современные климатические колебания. Для степных и полупустынных территорий древесно-кольцевые хронологии представляют достоверный отклик прироста деревьев на условия увлажнения, что позволяет проводить реконструкции уровня рек и озер, наводнений, пожарного режима [4–6].

В оптимальных условиях, вследствие менее жесткого лимитирования физическими факторами среды, наблюдается увеличение видового разнообразия в составе древостоев. Здесь топоэкологические условия произрастания начинают играть значительную роль в трансформации единого регионально-климатического сигнала в изменчивости радиального прироста деревьев [2, 7]. Более того, разные виды древесных растений, произрастающие в одних и тех же или близких экологических условиях, трансформируют климатический сигнал видоспецифично вследствие особенностей их сезонного роста и развития [8, 9].

В лесостепной зоне Хакасии, на границах перехода лес–степь, в одном лесном ландшафте можно встретить все древесные породы данного региона, занимающие разные позиции в рельефе. Данный район является удобным полигоном для сопоставления климатических откликов как разных древесных пород, так и одних и тех же видов, занимающих разные топоэкологические ниши. В соответствии с этим перед нами стояла задача установить следующие моменты:

1) каков вклад климатических факторов в погодичную изменчивость радиального прироста различных видов деревьев в зависимости от топоэкологических условий произрастания;

2) какие климатические факторы (температура и влажность) определяют динамику прироста древесных растений при разных топоэкологических условиях;

3) возможно ли использование существенно отличающихся древесно-кольцевых хронологий для более качественной реконструкции ведущих климатических факторов.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материал для дендроэкологического исследования отбирался в лесостепной зоне Ширинского района Республики Хакасия (54°24' с. ш., 89°57' в. д.). По климатическому районированию территория района относится к Алтае-Саянской климатической области умеренного пояса с умеренно холодным континентальным климатом [10]. По данным метеостанции Ширы среднегодовая температура воздуха составляет 1,2 °С. Начало вегетации (переход суточных температур через 5 °С) приходится на последнюю декаду апреля. Длительность периода с температурой выше 10 °С равняется 110–120 дней. Среднее количество осадков составило 257 мм, при этом 72–90 % их выпадает в теплый период года (апрель–октябрь). Максимум осадков приходится на июль, минимум — на февраль–март.

Сбор материала проводился на двух участках, крайне отличающихся по степени почвенного увлажнения, — склон южной экспозиции (ЮС) и пойма ручья Тунгужуль (ПР). Исследовалась изменчивость радиального прироста четырех древесных видов: для участка ЮС — лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.), сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и березы белой (*Betula alba* L.); для участка ПР — лиственницы сибирской и ели обыкновенной (*Picea obovata* Ledeb.). На участке ЮС в верхней части склона преобладает лиственница, в средней — сосна, береза встречается только в нижней части склона.

Отбор образцов древесины производился в виде кернов с помощью шведского возрастного бура на высоте 1,3 м по двум радиусам ствола. Сбор, транспортировка и первичная обработка кернов проводились по стандартным методикам, принятым в дендрохронологии [11], измерения — на полуавтоматической измерительной установке LINTAB с применением специализированного пакета TSAP (точность 0,01 мм) [12]. Датировка образцов (определение календарного года каждого кольца) подтверждалась кросскорреляционным анализом, выполняемым в программе COFECNA, входящей в специализированный пакет программ DPL [13].

Для выделения климатического сигнала, влияющего на ширину годичного кольца, проводилась процедура стандартизации (индексации), позволяющая выделить климатически обусловленную изменчивость радиального прироста [11, 14]. При проведении стандартизации использовалась функция заданного вида — *сплайн-функция* (кусочно-сопряженную). Определение параметров возрастной кривой с заданным окном сплайна (67 % от длины ряда) и уровнем подавления дисперсии (50 %) осуществлялся подбором значений кривой, описываемой кусочно-сопряженной функцией, с наименьшим среднеквадратичным отклонением аппроксимации (метод наименьших квадратов) [15]. Процедуры расчетов выполнены в специализированном программном пакете для дендрохронологических исследований DPL и STATISTICA'99 Edition [13, 16].

Индивидуальные индексированные кривые прироста, построенные для деревьев одного вида, затем усреднялись для получения так называемой *обобщенной (генерализированной)* или локальной хронологии для отдельных видов и участков [14] с безразмерной стационарной серией индексов прироста, где средняя приблизительно равна 1,0, а дисперсия постоянна во времени [17]. Процедура стандартизации выполнялась с помощью программы ARSTAN, входящей в пакет DPL. В процессе стандартизации было получено два массива данных: стандартные обобщенные хронологии (std) и остаточные обобщенные хронологии (res), в которых существенно устраняется автокорреляция — зависимость прироста текущего года от прироста предыдущего [18].

Для оценки влияния климата на динамику прироста деревьев использованы ежемесячные климатические данные метеостанции Ширы по приземной температуре воздуха (за период 1966–2008 гг.) и по количеству осадков (за период 1937–2008 гг.). Связь радиального прироста деревьев с температурой рассматривалась за период с сентября предыдущего по сентябрь текущего года [2, 7].

Статистический анализ связи прироста с климатическими компонентами оценивался по коэффициентам корреляции между климатическими факторами и индексами радиального прироста. Полученные гистограммы корреляции между температурой и осадками отдельных месяцев и индексами прироста рассматривались как суррогат климатических функций отклика [7]. Для реконструкции ведущего климатического фактора по нескольким древесно-кольцевым сериям использовался аппарат множественной линейной регрессии [11].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Показатели хронологий и их взаимосвязи. Для двух выделенных участков (ЮС и ПР) построено пять древесно-кольцевых хронологий (по лиственнице, сосне и березе для участка ЮС, по листвен-

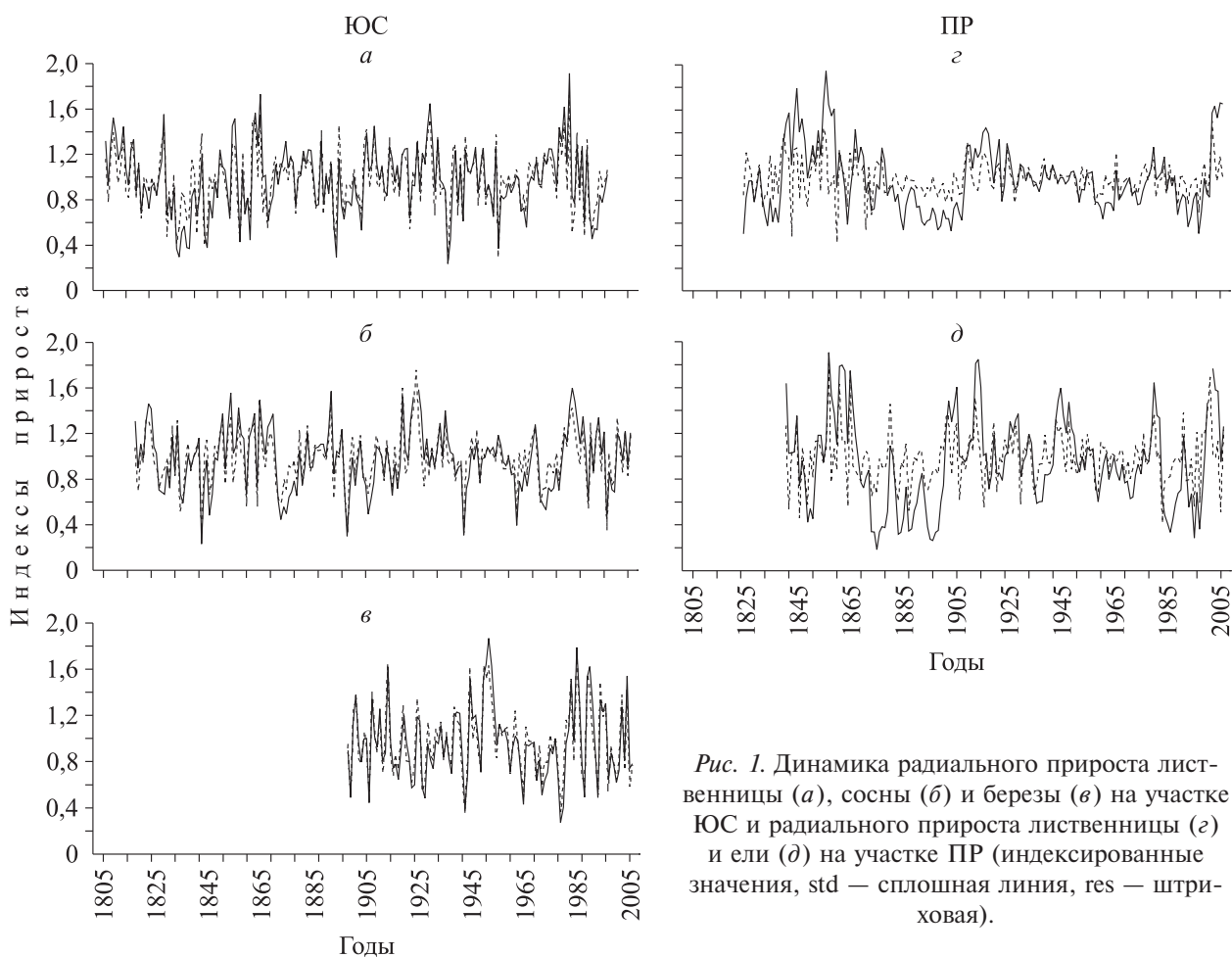


Рис. 1. Динамика радиального прироста лиственницы (а), сосны (б) и березы (в) на участке ЮС и радиального прироста лиственницы (з) и ели (д) на участке ПР (индексированные значения, std — сплошная линия, res — штриховая).

нице и ели для участка ПР). Для участка ЮС с условиями недостаточного почвенного увлажнения все три хронологии (рис. 1, а–в) имеют статистически достоверно (90 %) заполненный ряд по количеству образцов и покрывают период от 100 (для березы) до 200 лет (для лиственницы). Средние показатели ширины годичного кольца достаточно высоки и варьируют от 0,76 мм (у лиственницы) до 0,92–0,94 мм (у сосны и березы). Стандартизированные хронологические ряды по лиственнице и сосне имеют близкие показатели значений дисперсии, чувствительности и автокорреляции (табл. 1). Кроме того, у данных хронологий практически совпадают экстремальные величины прироста: максимальные значения индексов прироста приходятся на 1808, 1819, 1859, 1870, 1915, 1926, 1986, 1992 гг., минимальные — на 1838, 1845, 1849, 1862, 1875, 1900, 1908, 1944, 1964, 1998, 2001 гг. Хронология по березе также показывает экстремумы, совпадающие с хронологиями хвойных видов, но характеризу-

Таблица 1

Статистические характеристики древесно-кольцевых хронологий

Хронологии	Период, годы	Кол-во ядер/деревьев	std			res		
			среднеквадр. отклонение (SD)	коэф. чувствительности	автокорреляция (AR)	среднеквадр. отклонение (SD)	коэф. чувствительности	автокорреляция (AR)
<i>Участок ЮС</i>								
<i>Larix sibirica</i> (LS1)	1810–2008	14/2	0,31	0,29	0,35	0,28	0,32	0,01
<i>Pinus sylvestris</i> (PS1)	1821–2008	15/2	0,29	0,26	0,46	0,24	0,28	0,01
<i>Betula alba</i> (BA1)	1901–2008	11/2	0,35	0,30	0,47	0,30	0,34	0,01
<i>Участок ПР</i>								
<i>Larix sibirica</i> (LS2)	1858–2008	12/2	0,42	0,22	0,82	0,23	0,25	0,04
<i>Picea obovata</i> (PO2)	1886–2008	10/2	0,35	0,14	0,80	0,16	0,15	0,07

Связь между стандартизированными (стандартными (std) и остаточными (res)) древесно-кольцевыми хронологиями

	std					res				
	LS1	PS1	BA1	LS2	PO2	LS1	PS1	BA1	LS2	PO2
LS1	1,00					1,00				
PS1	0,50	1,00				0,55	1,00			
BA1	0,21	0,19	1,00			0,15	0,17	1,00		
LS2	-0,08	0,14	-0,06	1,00		0,14	0,25	-0,09	1,00	
PO2	0,19	0,28	0,02	0,57	1,00	0,27	0,29	-0,03	0,38	1,00

Примечание. Жирным шрифтом выделены значимые (при $p < 0,05$) коэффициенты корреляции.

ются чуть более высокими значениями SD и коэффициента чувствительности. Визуальное сравнение стандартных (std) и остаточных (res) хронологий для отдельных видов, произрастающих на южном склоне, показывает их значительное сходство. Тем не менее корреляционный анализ хронологий выявляет существенные отличия (табл. 2). Если между хронологиями лиственницы и сосны (средняя и верхняя часть склона) существует значимая и достаточно высокая корреляция, то хронология по березе, несмотря на совпадение отдельных экстремумов в приросте, в целом показывает значительные различия с хронологиями хвойных.

Хронологии по лиственнице и ели, полученные для пойменного участка (ПР), не превышают 180 лет (см. рис. 1, з, д). Динамика радиального прироста этих пород отличается при одинаковых условиях роста. Так, у ели, начиная с 1945 г., значения ширины годичных колец (ШГК) не превышали 0,45 мм, тогда как у лиственницы в это же время отмечается значительное их увеличение до 1,15 мм. Максимальные индексы прироста отмечены в 1843, 1847, 1859, 1863, 1867, 1914, 1981, 2003 гг., минимальные — в 1851, 1875–1877, 1885–1887, 1897, 1900, 1960, 1996, 1998 гг. Стандартные и остаточные хронологии на отдельных временных интервалах существенно отличаются друг от друга. Это свидетельствует о том, что в отдельные периоды на прирост ели и лиственницы в пойме ручья влияют факторы неклиматической природы. Например, подавление прироста у лиственницы отмечалось с 1880 по 1910 г., а у ели — с 1875 по 1900 г. (заметное расхождение между стандартными и остаточными хронологиями).

При сравнении стандартизированных хронологий с разных участков более высокую чувствительность показывают временные серии южного склона (0,26–0,30 для std), а более низкую — серии поймы ручья (0,14–0,22 для std). Данные показатели коэффициентов чувствительности свидетельствуют о том, что климатический сигнал в хронологиях изменяется от значимого до сильного. Стандартное отклонение, характеризующее амплитуду изменчивости прироста, у всех серий варьирует от 0,29 до 0,42 (для std). При удалении из std хронологий автокорреляции первого порядка показатели SD немного снижаются, в то время как коэффициент чувствительности увеличивается (res хронологии).

Автокорреляция обусловлена в основном физиологическими причинами и в некоторой степени возрастным трендом хронологии, но может определяться и климатической циклически [14]. В остаточных хронологиях (res), в отличие от стандартных (std), автокорреляция практически полностью подавлена (коэффициенты близки к нулю). Значение дисперсии, объясненной приростом предыдущего года (для стандартных хронологий), на южном склоне составляет 12 и 21 % для лиственницы и сосны соответственно и чуть выше для березы (22 %). В пойменном участке этот показатель составляет 67 % для лиственницы и 64 % для ели.

Внутри каждого участка согласованность изменений прироста гораздо выше, чем между участками, что отражается и в более высоких значениях коэффициентов парной корреляции (см. табл. 2). Все полученные хронологии статистически значимо ($p < 0,05$) связаны между собой внутри одного участка. Наибольшие коэффициенты корреляции между стандартными индексами прироста хронологий разных видов зафиксированы для сосны и лиственницы ($R = 0,50$) на участке ЮС и лиственницы и ели ($R = 0,57$) — на участке ПР. Наименьшие — между хронологиями сосны и березы ($R = 0,19$) на участке ЮС.

Отклик хронологий на климатические изменения. Коэффициенты корреляции между индексными значениями радиального прироста исследуемых древесных видов и основными климатическими факторами среды (температурой и влажностью) приведены на рис. 2. В целом стандартные хронологии показывают большее число значимых корреляций (при $p < 0,05$) с климатическими факторами отдельных месяцев, чем остаточные: восемь против семи для южного склона и пять против двух — для поймы ручья. Тем не менее основные факторы, оказывающие значимое влияние на прирост деревьев, полностью отображаются как у стандартных, так и у остаточных хронологий.

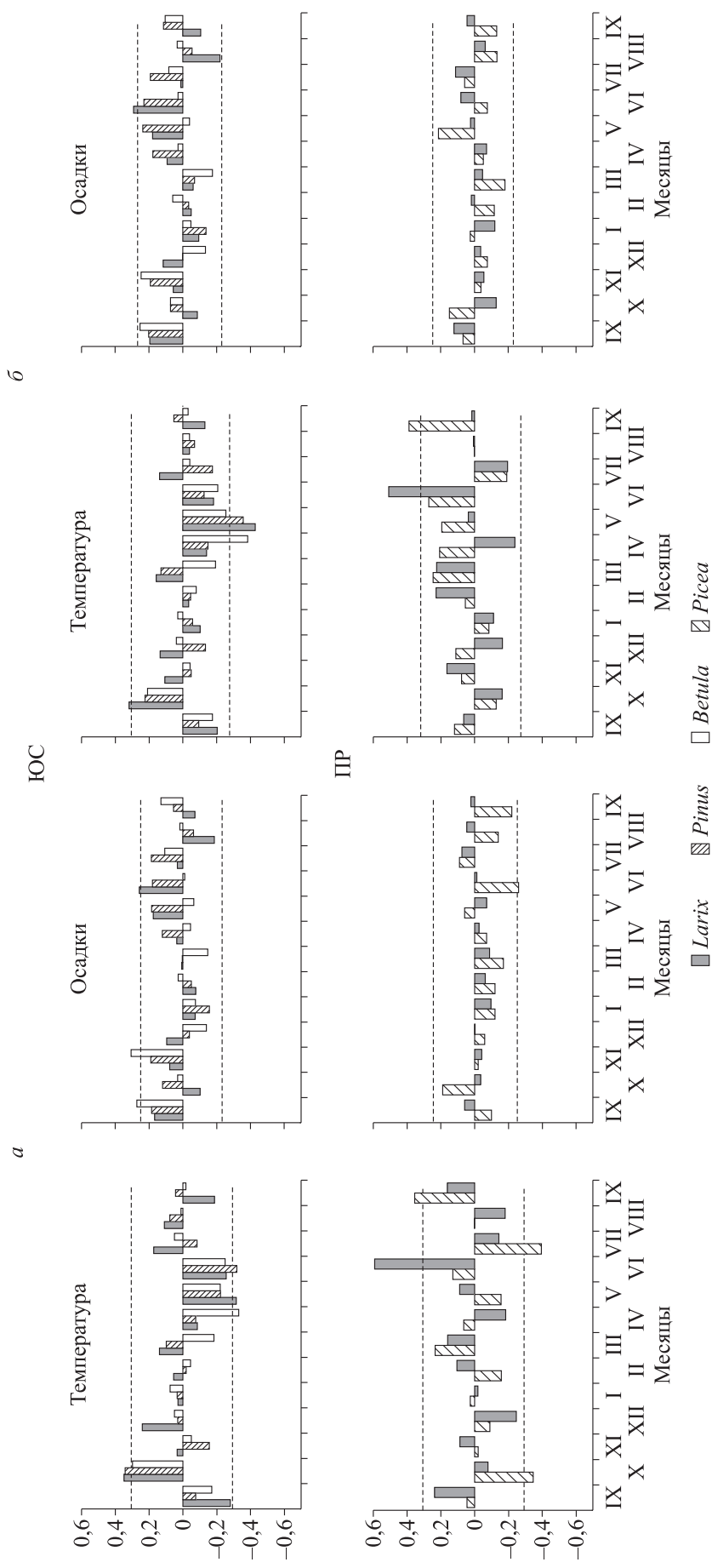


Рис. 2. Коэффициенты корреляции индексированных хронологий (а — std, б — ges) с метеоданными за период 1936–2008 гг. по осадкам и за период 1966–2008 гг. по температурам (пунктиром обозначен уровень значимости).

Анализ климатического отклика показал, что для южного склона влияние одних и тех же климатических факторов на разные породы различается. Лиственница положительно реагирует на увеличение количества атмосферных осадков в июне и отрицательно — на высокие температуры начала вегетации, а именно мая и июня. Также отрицательно сказываются высокие температуры воздуха в июне на радиальный прирост сосны. Кроме того, прирост сосны и лиственницы положительно связан с температурой октября ($R = 0,35$ для лиственницы и $R = 0,34$ для сосны). Для березы выявлена отрицательная связь радиального прироста с температурой апреля ($R = -0,33$) и положительная с осадками сентября предшествующего года ($R = 0,31$).

В пойме температура и осадки по-разному воздействуют на прирост лиственницы и ели. Так, если прирост лиственницы в большей степени зависит от термического режима начала вегетации (значение коэффициента корреляции между индексами ШГК и температурой июня составляет 0,59), то наиболее значимым фактором, влияющим на прирост ели, оказывается избыточное увлажнение. Связь между ШГК ели и количеством осадков июня имеет отрицательный характер ($R = -0,26$). Положительно на радиальный прирост ели влияет увеличение температуры сентября предшествующего года ($R = 0,35$).

Температура активной части сезона является наиболее значимым фактором в изменчивости прироста деревьев в обоих местообитаниях, но с разным по величине и направлению знаком.

Реконструкция среднемесячной температуры воздуха июня. Сравнительный анализ откликов радиального прироста хвойных из двух контрастных топоэкологических условий произрастания показывает, что хронологии деревьев южного склона отрицательно откликаются на повышение июньской температуры, а хронологии поймы — положительно. Это позволяет использовать две хронологии для поиска регрессионного уравнения, в котором климатическая переменная (температура июня) является зависимой переменной, а индексы прироста (ИНД) — независимыми переменными. Реализация этого поиска привела к множественной линейной регрессионной модели:

$$T_{\text{июня}} = 14,09 - 1,489 \times \text{ИНД}_{\text{сосна}} + 3,210 \times \text{ИНД}_{\text{листв}}$$

со следующими статистическими оценками: коэффициент множественной регрессии 0,56; критерий Фишера $F = 9,26$; $p < 0,0005$. Хорошую сходимость реальных (измеренных на метеостанции Шира) и рассчитанных по хронологиям величин можно видеть на рис. 3, где они сопоставлены в динамике. Отметим, что угол наклона регрессии при сопоставлении измеренных и рассчитанных значений практически не отличается от единицы (подчеркивая качество и адекватность модели). Практически совпадают средние значения расчетных и измеренных температур (15,79 и 15,81 соответственно), однако заметно отличаются дисперсии приведенных рядов (8,2 и 16,4), что соответствует уровню дисперсии измеренного ряда. Независимой проверкой стало сопоставление реконструированного ряда температуры июня по древесно-кольцевым хронологиям и более длительного (чем на метеостанции

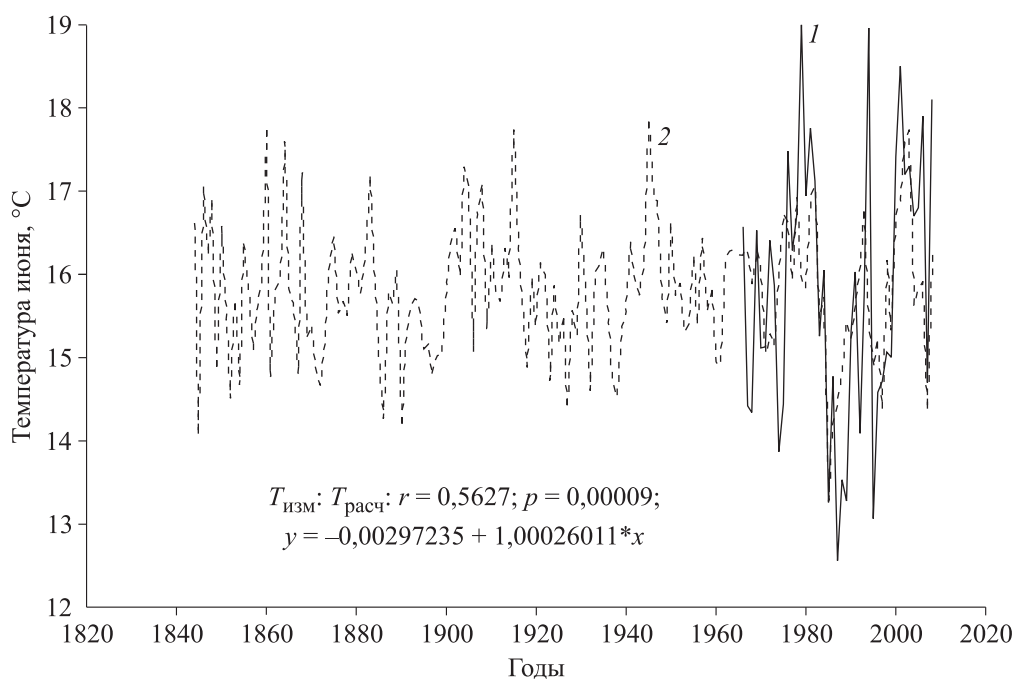


Рис. 3. Реконструированный ряд (штриховая линия) температуры июня и ряд наблюдений (сплошная линия) по данным метеостанции Шира.

Шира) ряда изменения температуры июня на метеостанции Минусинск (около 120 км от места исследования). За более длительный период времени оба ряда показали высокосignificantную корреляцию ($R = 0,39$; $p < 0,001$).

ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные исследования направлены на изучение особенностей формирования радиального прироста древесины хвойных в разных топоэкологических условиях и трансформации регионального сигнала в зависимости от условий местообитания. Несомненно, что разные виды, даже в практически совпадающих условиях обитания, показывают различающиеся отклики на изменения климатических условий. Так, на южном склоне береза более чутко (чем сосна и лиственница) реагирует на повышение температуры в самом начале сезона и показывает значимое положительное влияние осадков осени и начала зимы предшествующего года. Эта реакция березы обусловлена особенностями фенофаз (сроками сокодвижения, разворачивания листвы, сезонной динамикой роста листвы). У сосны на южном склоне подавляющее прирост повышение температуры возрастает от мая к июню.

Тем не менее общие для местообитания климатические отклики присутствуют: положительное влияние повышения температуры в октябре (потенциальное удлинение периода роста корневой системы, способствующее увеличению радиального прироста в следующем сезоне за счет использования дополнительно запасенных ассимилятов — питательных веществ и регуляторов роста [19]) и подавление прироста высокими температурами в апреле–июне (косвенное влияние через ускорение иссушения почвы).

Особенности разной климатической реакции можно отметить, сравнивая хронологии лиственницы и ели в пойме ручья. Прирост лиственницы чутко откликается на повышение температуры июня, что объясняется главным образом достатком проточной влаги в данных условиях. В то же время реакция ели на повышение температуры июня незначима, зато повышение температуры в июле заметно подавляет ее прирост. Сравнивая строение корневых систем этих хвойных в увлажненных условиях обитания, можно предположить, что именно различие в строении корневых систем объясняет и особенности климатической реакции. Более поверхностная корневая система у ели не позволяет полноценно использовать влагу глубоких горизонтов (доступную для лиственницы), а при высоких температурах июля иссушение поверхностных горизонтов даже в пойме ручья приводит к дефициту влагообеспеченности ростовых процессов у ели.

Древесно-кольцевые хронологии хвойных на южном склоне демонстрируют более высокую чувствительность, чем таковые на пойменном участке. Возможно, на южном склоне к лимитированию (в определенные периоды сезона) «температурой» добавляется и фактор лимитирования «недостатком увлажнения», который, во всяком случае в начальный период сезона, не играет существенной роли в условиях поймы. Более высокие значения средней величины прироста, коэффициента автокорреляции и процента объясненной дисперсии для древесных растений, произрастающих в пойме ручья, свидетельствуют о благоприятных условиях, нивелирующих влияние единого лимитирующего фактора.

Дендроклиматический анализ позволяет выделить специфические особенности реакции деревьев на изменения погодных условий в разных местах произрастания. Несмотря на непосредственную близость выбранных участков, разные виды древесных растений показали значимые различия в реакции прироста на климат, что характеризует их биоэкологические особенности. Реакция лиственницы на два абсолютно противоположных условия роста (сухой склон и влажные условия в пойме реки) говорит о ее пластичности как вида.

Значимые связи выявлены между радиальным приростом и температурой активной части сезона: на склоне (май) — отрицательные, в пойме (июль) — положительные. В условиях дефицита влаги (склон) в самом начале вегетационного периода, который для данной территории наступает в середине — конце мая [20], повышение температуры воздуха способствует увеличению ее испарения. Данные метеорологических измерений за последние 40 лет свидетельствуют о значительном (более чем на 1°C) повышении температур мая, что обуславливает более раннее начало вегетации [21]. Для лиственницы характерна интенсивная инициация ростовых процессов именно в начальный период сезона роста [22, 23]. Поэтому высокие температуры воздуха способствуют иссушению почвы и тем самым вызывают снижение радиального прироста. Отметим, что чувствительность к иссушению у лиственницы несколько выше, чем у сосны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты свидетельствуют о том, что топоэкологические условия произрастания одних и тех же древесных пород существенно трансформируют региональный климатический сигнал в изменчивости радиального прироста. Вместе с тем даже в сходных условиях произрастания (склон,

пойма) хвойные и лиственные породы показывают видоспецифические особенности в климатическом отклике. С одной стороны, это расширяет возможность применения древесно-кольцевых хронологий для анализа зависимости роста от климатических изменений, а с другой, расширяет возможность более адекватной дендроклиматической реконструкции ведущих климатических переменных, используя сочетание разных древесно-кольцевых хронологий, где эти факторы значимы. Такую возможность удалось продемонстрировать для реконструкции прошлых вариаций температуры июня.

Несомненно, что аналогичный подход весьма перспективен и в других исследованиях, где есть возможность оперировать с набором длительных древесно-кольцевых хронологий для древесных растений, различающихся по топоэкологическим условиям произрастания.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (09–04–01380, 09–05–00900, 09–04–92515), программы АВЦ «Развитие научного потенциала высшей школы» (№ 2.1.1/6131), проекта СФУ (№ 1.7.09), НШ–65610.2010.4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Briffa K. R., Jones P. D., Schweingruber F. H. et al.** Reduced sensitivity of recent tree-growth to temperature at high northern latitudes // *Nature*. — 1998. — Vol. 391. — P. 672–682.
2. **Schweingruber F. H.** *Tree-rings and Environment. Dendroecology*. — Bern, Stuttgart, Vienna, Haupt, 1996. — 609 p.
3. **Briffa K. R., Osborn T. J., Schweingruber F. H. et al.** Low frequency temperature variations from a northern tree-ring density network // *Journ. Geophys. Res.* — 2001. — Vol. 106. — P. 2929–2941.
4. **Андреев С. Г., Ваганов Е. А., Наурызбаев М. М., Тулохонов А. К.** Регистрация годичными кольцами сосны многолетних колебаний атмосферных осадков, стока реки Селенги и уровня озера Байкал // *Докл. РАН*. — 1999. — Т. 368, № 3. — С. 400–403.
5. **Магда В. Н., Зеленова А. В.** Радиальный прирост сосны как индикатор атмосферного увлажнения в Минусинской котловине // *Изв. РГО*. — 2002. — Т. 134, вып. 1. — С. 73–79.
6. **Meko D. M., Cook E. R., Stahle D. W. et al.** Spatial patterns of tree-growth anomalies in the United States and southeastern Canada // *Journ. Clim.* — 1993. — Vol. 6. — P. 1773–1786.
7. **Fritts H. C.** *Tree-ring and climate*. — London; New-York; San Francisco: Acad. Press, 1976. — 567 p.
8. **Ваганов Е. А., Шашкин А. В.** *Рост и структура годичных колец хвойных*. — Новосибирск: Наука, 2001. — 232 с.
9. **Wilson R., Elling W.** Temporal instabilities of tree-growth/climate response in the Lower Bavarian Forest Region: Implications for dendroclimatic reconstruction // *Trees*. — 2003. — Vol. 18 (1). — P. 19–28.
10. **Алисов Б. П.** *Климат СССР*. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1956. — 128 с.
11. **Methods of Dendrochronology. Application in Environmental Sciences / Eds. E. R. Cook et al.** — Dordrecht; Boston; London: Kluwer Acad. Publ., 1990. — 394 p.
12. **Rinn F.** TSAP V 3.6 Reference manual: computer program for tree-ring analysis and presentation. — Germany, Heidelberg, 1996. — 263 p.
13. **Holmes R. L.** *Dendrochronology program library — users manual*. — Tucson, Arizona. Updated September 1998 (электронная версия). — <http://www.ldeo.columbia.edu/trl>
14. **Briffa K. R., Wigley T. M. L., Jones P. D.** Towards an objective approach to standardization // *Methods of Dendrochronology / Eds. K. Kairiukstis, Z. Bednarz and E. Feliksik*. — IIASA/Polish Acad. of Sci., Warsaw, 1987. — P. 69–86.
15. **Cook E. R. and Krusic P.** Arstan, Version 2005. Tree-ring laboratory, Lamont-Doherty Earth Obs. — <http://www.ldeo.columbia.edu/trl>
16. <http://www.StatSoft.ru>
17. **Matalas N. C.** Statistical properties of tree-ring data // *Bull. of the Intern. Association of Hydrology*. — 1962. — Vol. 7. — P. 39–47.
18. **Мазепа В. С.** Влияние осадков на динамику радиального прироста хвойных в субарктических районах Евразии // *Лесоведение*. — 1999. — № 6. — С. 14–21.
19. **Судачкова Н. Е.** *Метаболизм хвойных и формирование древесины*. — Новосибирск: Наука, 1977. — 230 с.
20. **Бугорина Т. Н.** *Биоклиматическое районирование Красноярского края*. — Новосибирск, 1979. — 232 с.
21. **Knorre A. A., Siegwolf R., Saurer M. et al.** 20th century trends in tree-ring stable isotopes ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$) of *Larix sibirica* under dry conditions in the forest-steppe in Siberia. // *Journ. Geophys. Res.* — 2010. — DOI: 10.1029/2009JG000930.
22. **Vaganov E. A., Hughes M. K., Kirilyanov A. V. et al.** Influence of snowfall and melt timing on tree growth in subarctic Eurasia // *Nature*. — 1999. — Vol. 400. — P. 149–151.
23. **Wang L., Payette S., Begin Y.** Relationship between anatomical and densitometric characteristics of black spruce and summer temperature at tree line in northern Quebec // *Canad. Journ. of Forest Res.* — 2002. — Vol. 32. — P. 477–486.

Поступила в редакцию 27 апреля 2010 г.