

УДК 633.877+581.54

КЛИМАТИЧЕСКИЙ СИГНАЛ В РАДИАЛЬНОМ ПРИРОСТЕ ХВОЙНЫХ В ЛЕСОСТЕПИ ЮГА СИБИРИ И ЕГО ЗАВИСИМОСТЬ ОТ ЛОКАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ МЕСТОПРОИЗРАСТАНИЯ

© 2014 г. Е. А. Бабушкина, Л. В. Белокопытова

Хакасский технический институт – филиал ФГАОУ ВПО “Сибирский федеральный университет”

655017 Абакан, ул. Щетинкина, 27

e-mail: babushkina70@mail.ru, white_lili@mail.ru

Поступила в редакцию 10.09.2013 г.

Представлены результаты исследования радиального прироста лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), произрастающих в лесостепной зоне юга Сибири на участках с различным ландшафтом и почвенным увлажнением, но в однородных климатических условиях. Выявлено значимое влияние на радиальный прирост климатических факторов; наиболее значимы температуры апреля–июля и сентября, суммы осадков апреля–июля и сентября–ноября. Также выявлена его взаимосвязь с гидротермическим коэффициентом мая. Показано, что климатическая реакция в структуре древесины хвойных в лесостепной зоне различается в зависимости от локальных условий местопроизрастания и видовых особенностей.

Ключевые слова: радиальный прирост, ширина годичного кольца, климатические факторы, почвенное увлажнение, лесостепная зона.

DOI: 10.7868/S0367059714050035

В последнее время в связи с повышением интереса к изменениям климата увеличивается количество научных работ по изучению влияния различных факторов на динамику экосистем. В рамках этой области одним из перспективных направлений является дендроэкологический анализ, т.е. анализ характеристик древесины как индикаторов условий окружающей среды. Задача выявления внешнего сигнала наиболее проста в том случае, когда рост и развитие растений ограничивает один экстремальный фактор среды. Так, хорошо изучено влияние температур первой половины сезона роста на верхней и северной границах леса, осадков в наиболее засушливых регионах (Наурызбаев и др., 2003; Briffa et al., 2004; Сидорова и др., 2007; Esper et al., 2010). Однако основной массив лесных экосистем расположен в более благоприятных условиях, где наблюдается значимое влияние нескольких факторов, причем не только климатических, но и локальных, включая особенности рельефа, состава почв, режима подземных и поверхностных вод и т.д. Например, в последние годы проводятся исследования в таежных экосистемах Сибири по влиянию на ширину годичных колец (ШГК) характера мерзлотных ландшафтов (Николаев и др., 2011), влажности почвы (Велисевич, Хуторной, 2009), ландшафтной неоднородности (Кузнецова, Козлов, 2011;

Табакова и др., 2011). В то же время лесостепная зона менее изучена в этом отношении. Тем не менее можно отметить работы по дендроклиматическому анализу ШГК сосны обыкновенной на Южном Урале (Агафонов, Кукарских, 2008), в Алтае-Саянской горной области исследовали климатический отклик в приросте сосны (Магда, Ваганов, 2006) и лиственницы (Knohre et al., 2010). Все исследования подтвердили комплексный характер влияния основных компонентов климата на радиальный прирост хвойных.

В 2008 г. были начаты дендроэкологические исследования в Республике Хакасия, где на относительно небольшой территории наблюдается широкое разнообразие зон растительности, лесообразующих пород деревьев и типов ландшафта. Дендрохронологическая станция была заложена в лесостепной зоне и включала два контрастных местообитания по характеру ландшафта и почвенного увлажнения. В результате исследования динамики радиального прироста сосны обыкновенной, лиственницы сибирской и ели сибирской выявлено влияние осадков и температур первой половины вегетационного сезона, сильно различающееся в зависимости от локальных условий произрастания и видовых особенностей (Бабушкина и др., 2010, 2011). В 2012 г. исследования были расширены на базе лаборатории “Био-

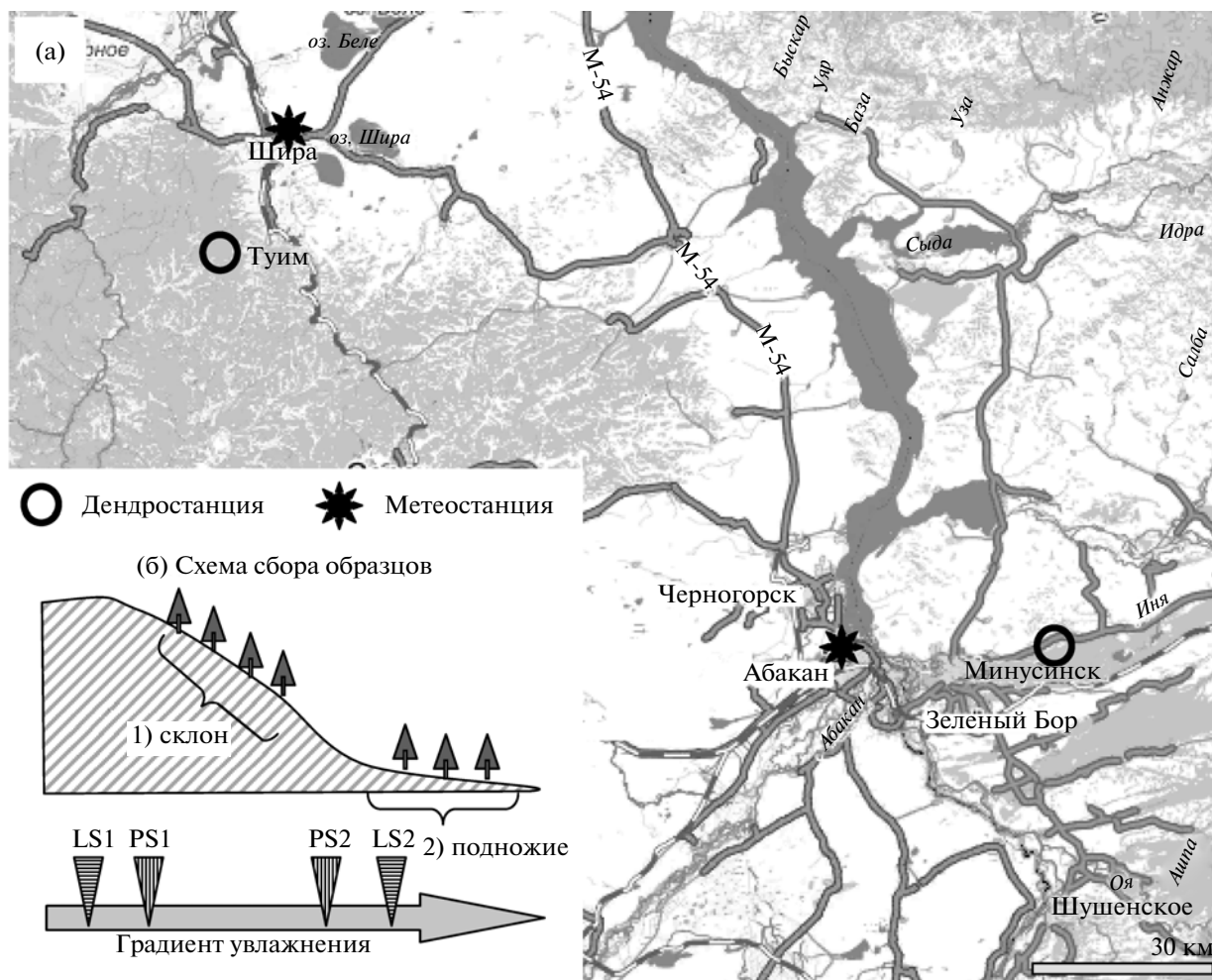


Рис. 1. Район исследования:

а – карта района исследования (Республика Хакасия и юг Красноярского края); б – схема сбора образцов древесины на дендрохронологических станциях и сравнение участков по степени почвенного увлажнения.

геохимия экосистем Евразии”, созданной в Хакасском техническом институте – филиале Сибирского федерального университета: заложено еще несколько дендростанций на территории Республики Хакасия и на юге Красноярского края.

Цель данного исследования – сравнение влияния локальных условий на радиальный прирост двух видов хвойных, имеющих ряд физиологических и экологических различий, произрастающих в однородных климатических условиях.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Материалы для дендроэкологического исследования получены с двух дендрохронологических станций на юге Сибири – в Минусинской впадине (рис. 1а). Дендростанция “Беренжак” ($54^{\circ}20'$ с.ш., $89^{\circ}44'$ в.д.) расположена на юге Чулымо-Енисейской котловины, в 32 км к юго-западу от п. Ши́ра (метеостанция #29756 “Ши́ра”, $54^{\circ}30'$ с.ш.,

$89^{\circ}56'$ в.д.). Дендростанция “Малая Минуса” ($53^{\circ}45'$ с.ш., $91^{\circ}56'$ в.д.) находится на границе ленточного бора в северной части Минусинской котловины, в 15 км к востоку от г. Минусинска (метеостанция #29866 “Минусинск, опытное поле”, $53^{\circ}41'$ с.ш., $91^{\circ}40'$ в.д.). Небольшое расстояние между дендро- и метеостанциями позволяет обеспечить высокое качество дендроклиматических исследований.

По климатическому районированию эта территория относится к Алтае-Саянской климатической области умеренного пояса с умеренно холодным континентальным климатом (Алисов, 1956). По данным метеостанции “Ши́ра”, среднегодовая температура воздуха составляет около 1°C . Начало вегетации (переход суточных температур через 5°C) приходится на последнюю декаду апреля. Длительность периода с температурой выше 10°C составляет 110–120 дней. Среднее количество осадков за год составляет 290 мм. Их ре-

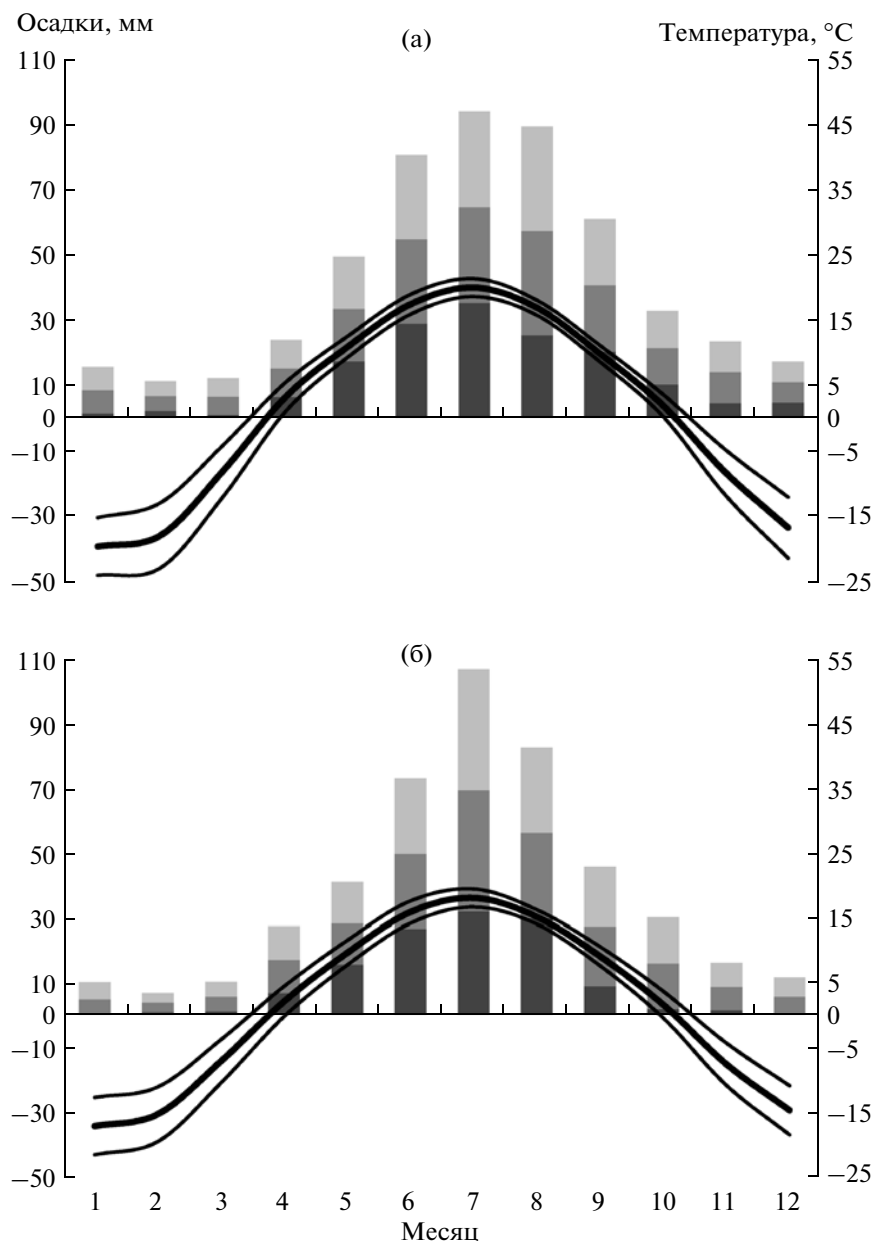


Рис. 2. Климатограммы метеостанций “Минусинск” (а) и “Шира” (б): данные за 1915–2012 гг. по средней температуре (линии) и количеству осадков (столбцы) с указанием средних значений и стандартного отклонения (средние и верхние/нижние линии и столбцы соответственно).

жим характеризуется хорошо выраженным летним максимумом: 86–94% осадков выпадает в теплый период года (апрель–октябрь). Максимум приходится на июль, минимум – на февраль – март (рис. 2). В г. Минусинске климат имеет небольшие отличия: при той же среднегодовой температуре зима на 1–2°C теплее, а лето на 1–2°C холоднее; средняя сумма осадков за год составляет 330 мм, при этом их летний максимум менее выражен (81–91% осадков за апрель–октябрь), так как зимы более снежные. Тем не менее в целом климатические условия исследуемых

участков сходны, что позволяет эффективно их сравнивать. В работе использовали ежемесячные данные метеостанций по средней приземной температуре и сумме осадков за 1924–2008 гг., а также рассчитанные значения гидротермического коэффициента Селянинова (ГТК) по месяцам с мая по август (Селянинов, 1937).

На каждой дендростанции образцы брали в двух различных местообитаниях: 1) крутой (около 20–30°) склон южной экспозиции; 2) подножие склона вблизи от водотока (пересыхающий ручей) с относительно высоким уровнем грунтовых вод

(см. рис. 16). На дендростанции “Беренжак” склоновый участок покрыт сосново-лиственничным злаково-разнотравным лесом с березой, произрастающим на горной серой лесной почве неполноразвитого профиля со скальниками; пойменный участок лесостепной, лес представлен ельником кустарниковым осоково-зеленомошным (приручейным) с единичными деревьями лиственницы и березы, почва лугово-черноземная оподзоленного ряда. На дендростанции “Малая Минуса” оба участка покрыты березово-сосновым злаково-разнотравным лесом, произрастающим на слаборазвитых слоисто-эоловых гумусовых черноземах; на склоновом участке травяно-кустарничковый ярус более скудный, почва содержит большее количество песка; в пойменном участке выражен моховой покров (покрытие до 30%). Таким образом, на обеих станциях подобраны контрастные по степени увлажнения участки, особенно на станции «Беренжак». Сравнительная оценка участков по степени увлажнения почвы (выявленная по составу растительности, особенностям почвы и характеру ландшафта) представлена на рис. 16.

Исследовали изменчивость радиального прироста двух древесных видов: на станции “Беренжак” – лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.), на станции “Малая Минуса” – сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Сбор, транспортировку и первичную обработку кернов проводили по стандартным методикам, принятым в дендрохронологии (Шиятов и др., 2000), измерения – на измерительной установке LINTAB 5 с применением специализированного пакета TSAP Win (точность 0.01 мм) (Rinn, 2011). Датировку образцов (определение календарного года каждого кольца) подтверждали кросскорреляционным анализом в специализированной программе COFECNA. Для выделения климатического сигнала, влияющего на ширину годичного кольца, проводилась процедура стандартизации (индексации). При стандартизации индивидуальных хронологий на первом этапе удаляли возрастной тренд, для описания возрастного тренда использовали негативную экспоненциальную и линейную функции, на втором этапе проводили удаление автокорреляционной зависимости. Затем индивидуальные индексированные кривые прироста усредняли для получения локальной хронологии (Шиятов и др., 2000). Процедуру стандартизации выполняли с помощью программы ARSTAN. Расчет статистических характеристик древесно-кольцевых хронологий, корреляционный анализ и анализ значимости различий между выборками выполнены в программах STATISTICA 10 (Новый сайт StatSoft Russia, 2013) и Microsoft Excel 2007.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Были получены по четыре локальных измеренных и индексированных хронологии: по лиственнице – LS1 на склоне и LS2 в пойме, по сосне – PS1 на склоне и PS2 в пойме (рис. 3). Анализ статистических характеристик измеренных хронологий показал следующие результаты: на участках с более высоким почвенным увлажнением для обоих видов радиальный прирост выше, о чем свидетельствуют как максимальные, так и средние значения ШГК (табл. 1). Следовательно, значимость влияния этого внешнего фактора для процессов формирования древесины очевидна. Более широкие кольца у сосны объясняются меньшим возрастом деревьев и большей длительностью периода формирования ксилемы в течение сезона (Бабушкина и др., 2010).

Более высокие значения стандартного отклонения и коэффициента вариации в пойменных участках свидетельствуют о большей изменчивости ШГК, однако влияние внешних факторов более высокое на склонах (где выше коэффициент чувствительности), т.е. в пойме изменчивость в большей степени обусловлена влиянием внутренних и фитоценологических факторов.

Значения коэффициентов корреляции индивидуальных хронологий с локальной, отношения сигнала к шуму и выраженного сигнала популяции, традиционно используемых для определения наличия внешнего сигнала и пригодности хронологии для дендроэкологических исследований (Cook, 1985), достаточно высоки как для измеренных, так и для индексированных хронологий.

Анализ сходства между индексированными хронологиями по уровню значимости коэффициентов корреляции показал, что наиболее значимые взаимосвязи наблюдаются между хронологиями в пределах дендростанции, причем между хронологиями сосны на станции “Малая Минуса” корреляция наиболее значимая ($p < 0.0005$), что связано с меньшей степенью контрастности условий местообитания по сравнению со станцией “Беренжак” (табл. 2). Между хронологиями на склоновых участках также наблюдается положительная корреляция, но менее значимая, что обусловлено как видовыми различиями в климатическом отклике, так и пространственной удаленностью. При большем увлажнении корреляции между хронологиями сосны и лиственницы не наблюдаются, что указывает на большую оптимальность локальных условий, приводящую к снижению уровня общего сигнала (Шиятов, 1986; Fritts, 1976; Vaganov et al., 2006). Для хронологий, различающихся как по видовой принадлежности, так и по условиям местообитания, взаимосвязь отсутствует, несмотря на однородные климатические условия, т.е. реакция ШГК на климат в лесо-

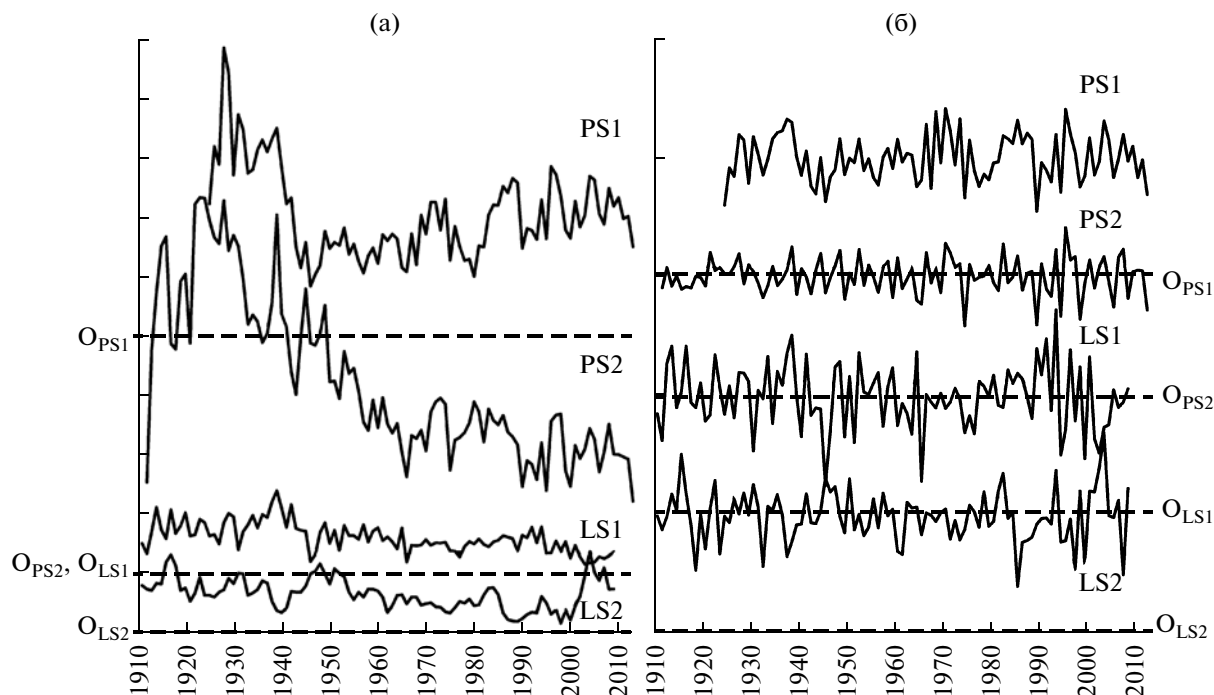


Рис. 3. Локальные измеренные (а) и индексированные (б) хронологии ширины годичных колец за период 1910–2012 гг. Шаг сетки по вертикали: а – 1 мм, б – 1; хронологии сдвинуты относительно друг друга по вертикали для удобства сравнения, для каждой хронологии отмечено нулевое значение.

степной зоне очень сильно зависит от локальных условий и видовых особенностей.

Оценку климатической реакции проводили в первую очередь методом корреляционного анализа с ежемесячными значениями температур и осадков (рис. 4).

На дендростанции “Малая Минуса” климатический сигнал хронологий сосны в целом сходен, однако имеет и различия. Более значимые корреляции с температурой и осадками наблюдаются на склоне. Это связано с тем, что при отсутствии близких грунтовых вод единственным источником влаги являются осадки, которые значительно влияют на радиальный прирост в первой половине сезона, особенно в мае. В то же время в течение большей части сезона роста повышение температуры усиливает испарение с поверхности почвы и транспирацию, что приводит к развитию водного стресса и, следовательно, угнетает формирование ксилемы. У подножия склона гидрологический режим почвы иной за счет стекания осадков со склона (в том числе через хорошо дренированную песчаную почву), более высокого уровня грунтовых вод и близости р. Минусинки. Вследствие этого в первой половине сезона влияние осадков и температур меньше, чем на склоне, а в июле, напротив, усиливается (так как к этому моменту уровень грунтовых вод и воды в реке понижается). Влияние осадков октября–ноября предыдущего сезона на обоих участках выражается в наращива-

нии снежного покрова, защищающего корневую систему зимой и служащего источником влаги в начале вегетационного сезона. Положительная, хотя и имеющая невысокий уровень значимости (0.071), корреляция ШГК сосны на склоне с температурой февраля – самого морозного месяца (см. рис. 2) – может быть обусловлена меньшей высотой снежного покрова, сдуваемого со склонов, и подмерзанием корневой системы сосны в сильные морозы.

На более сухой и менее плодородной почве склонового участка важным фактором для деревьев оказывается длящийся практически до конца сентября процесс накопления ассимилятов, от результатов которого зависит скорость процессов роста в самом начале следующего сезона. Вследствие этого наблюдается положительная корреляция ШГК сосны с осадками сентября. Температура в этот период, как и летом, действует иссушающе. Аналогичная зависимость (хотя и более слабая) проявляется и у ШГК лиственницы на дендростанции “Беренжак”, произрастающей на склоне. Отсутствие значимых корреляций с осенними осадками может быть вызвано большей континентальностью климата на этой станции, т.е. меньшим количеством осенних осадков по сравнению с г. Минусинском, приводящим к более раннему окончанию процесса накопления ассимилятов. Положительная реакция ШГК на осадки первой половины сезона и отрицательная – на тем-

Таблица 1. Статистические характеристики древесно-кольцевых хронологий

Характеристика	LS1	LS2	PS1	PS2
Общие				
Длительность, годы	272	165	89	105
Период, годы	1737–2008	1844–2008	1924–2012	1911–2012
Количество деревьев	14	10	12	17
Общее количество годовых колец	2138	1331	793	1319
Характеристики измеренных хронологий				
Наименьшее значение, мм	0.130	0.169	0.850	1.216
Наибольшее значение, мм	1.830	2.880	4.875	6.349
Среднее значение, мм	0.721	0.781	2.076	3.252
Стандартное отклонение, мм	0.330	0.476	0.769	1.372
Коэффициент вариации	0.458	0.610	0.370	0.422
Коэффициент чувствительности	0.296	0.234	0.202	0.169
Средний коэффициент корреляции с локальной хронологией	0.727	0.713	0.649	0.698
Отношение сигнала к шуму	20.45	8.92	5.67	12.64
Выраженный сигнал популяции	0.953	0.899	0.850	0.927
Характеристики индексированных хронологий				
Стандартное отклонение	0.281	0.228	0.198	0.374
Коэффициент чувствительности	0.325	0.252	0.228	0.229
Средний коэффициент корреляции с локальной хронологией	0.739	0.634	0.704	0.630
Отношение сигнала к шуму	14.08	4.98	10.93	10.65
Выраженный сигнал популяции	0.934	0.853	0.916	0.914

Таблица 2. Соотношения между локальными индексированными хронологиями

Характеристика	LS1/LS2	PS1/LS1	PS1/LS2	PS2/LS1	PS2/LS2	PS1/PS2
Коэффициент корреляции	0.186*	0.205	–0.048	0.009	–0.078	0.674
Длина сопоставляемого периода, лет	165	85	85	101	101	89
Уровень значимости	0.017	0.060	0.665	0.928	0.441	0.000

* Жирным шрифтом отмечены значения коэффициента корреляции, значимые при $p < 0.05$.

пературу мая у лиственницы на склоне вызвана тем же причинами, что и у сосны, а ее меньшая выраженность может объясняться экологической приспособляемостью лиственницы к различным условиям (Дылис, 1961; Судачкова, 1977). При достаточном увлажнении осадки значимо не влияют на ШГК лиственницы; температура июня оказывает прямое положительное воздействие, стимулируя фотосинтез и, следовательно, про-

цессы роста. В апреле в районе исследования часты длительные оттепели, инициирующие раннее начало вегетации. Во время последующих заморозков сочетание высокой влажности в пойменном участке и поверхностного расположения корневой системы лиственницы может привести к повреждению ее тканей (Ваганов, Круглов, 2007), на что указывает отрицательная корреляция с температурой апреля ($p = 0.052$).

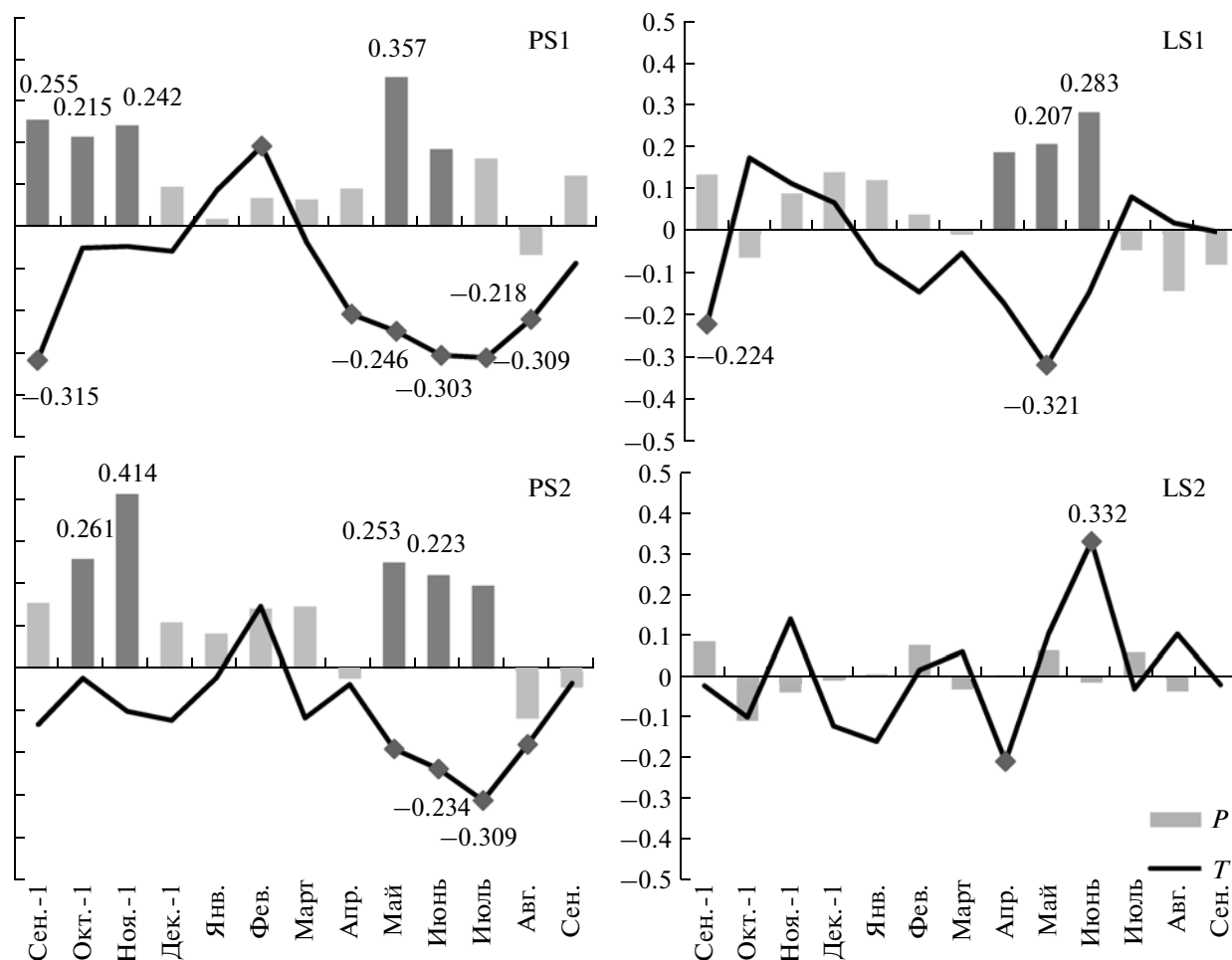


Рис. 4. Коэффициенты корреляции древесно-кольцевых хронологий со среднемесячной температурой (*T*) и количеством осадков (*P*) за общий для всех хронологий период 1924–2008 гг. Выделены (тоном, маркерами) коэффициенты корреляции, значимые при $p < 0.10$, подписаны – значимые при $p < 0.05$.

Поскольку для трех участков из четырех наблюдается одновременное положительное влияние осадков и отрицательное – температур (в мае–июле), представляло интерес рассмотреть в качестве экологического фактора какой-либо из индексов засухи, к примеру гидротермический коэффициент Селянинова за отдельные месяцы сезона роста. Однако корреляционный анализ не выявил значимых взаимосвязей, поэтому применили иной подход: из всех лет, для которых был вычислен ГТК (1915–2012 гг.), были выбраны так называемые “реперные” годы, когда большая часть деревьев имеет наиболее узкие или, наоборот, наиболее широкие годовичные кольца (Шиятов и др., 2000). При этом можно отметить, что выборки реперных лет для склона и подножия практически совпали на обеих станциях, поэтому различия между участками по реакции на изменчивость ГТК не выявляли. Затем проводили сравнение трех выборок ГТК: за весь период, только за отрицательные реперные годы и только за по-

ложительные реперные годы. Наличие значимой разницы между средними выборочными значениями сигнализирует о существовании зависимости радиального прироста от ГТК в мае и июне для сосны, только в мае – для лиственницы (табл. 3). Таким образом, в лесостепи Минусинской впадины наиболее значимое влияние на рост и развитие хвойных оказывает гидротермический режим мая, в меньшей степени – июня.

В результате исследования выявлены следующие закономерности:

1) в лесостепной зоне хронологии радиального прироста хвойных несут в себе достаточно сильный климатический сигнал при условии объединения в локальную хронологию деревьев одного вида, произрастающих в однородных условиях места произрастания; построение генерализированной хронологии в данных природных условиях нецелесообразно;

2) в более сухих местах произрастания межвидовые различия в климатическом сигнале ШГК

Таблица 3. Анализ отличий ГТК (с мая по август) реперных лет от их среднеголетних значений

Среднее значение	ГТК _{май}	ГТК _{июнь}	ГТК _{июль}	ГТК _{авг}
Метеостанция “Минусинск”				
За весь период	1.003	1.082	1.094	1.129
За отрицательные реперные годы	0.679* <i>p</i> < 0.054	0.942 <i>p</i> < 0.648	0.821 <i>p</i> < 0.118	1.049 <i>p</i> < 0.813
За положительные реперные годы	1.439 <i>p</i> < 0.031	1.527 <i>p</i> < 0.023	1.206 <i>p</i> < 0.427	1.172 <i>p</i> < 0.801
Метеостанция “Шира”				
За весь период	0.935	1.065	1.236	1.184
За отрицательные реперные годы	0.704 <i>p</i> < 0.178	0.871 <i>p</i> < 0.307	1.031 <i>p</i> < 0.504	1.223 <i>p</i> < 0.749
За положительные реперные годы	1.446 <i>p</i> < 0.043	1.162 <i>p</i> < 0.611	1.012 <i>p</i> < 0.606	0.911 <i>p</i> < 0.326

* Жирным шрифтом отмечены значения, значимо отличающиеся от среднеголетних при *p* < 0.10.

уменьшаются, при умеренном увлажнении – усиливаются;

3) выявлены наиболее значимые климатические факторы для двух видов в различных условиях места произрастания: температуры апреля–июля и сентября, осадки апреля–июля и сентября–ноября.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках государственного задания на оказание услуг СФУ № 5.7917.2013.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агафонов Л.И., Кукарских В.В. Изменения климата прошлого столетия и радиальный прирост сосны в степи Южного Урала // Экология. 2008. № 3. С. 173–180.
- Алисов Б.П. Климат СССР. М.: Изд-во МГУ, 1956. 128 с.
- Бабушкина Е.А., Ваганов Е.А., Силкин П.П. Влияние климатических факторов на клеточную структуру годичных колец хвойных, произрастающих в различных топоэкологических условиях лесостепной зоны Хакасии // Журн. СФУ. Биология. Красноярск, 2010. Т. 3. № 2. С. 159–176.
- Бабушкина Е.А., Кнорре А.А., Ваганов Е.А., Брюханова М.В. Трансформация климатического отклика в радиальном приросте деревьев микроэкологическими условиями их произрастания // География и природные ресурсы. Иркутск, 2011. № 1. С. 159–166.
- Ваганов Е.А., Круглов В.Б. Экология древесных растений [Электронный ресурс]: Курс лекций. Красноярск: СФУ, 2007. 230 с. URL: http://library.krasu.ru/ft/ft/_umkd/317/u_lectures.pdf (Дата обращения: 30.11.2010).
- Велисевич С.Н., Хуторной О.В. Влияние климатических факторов на радиальный прирост кедра и лиственницы в экотопах с различной влажностью почвы на юге Западной Сибири // Журн. СФУ. Биология. Красноярск, 2009. Т. 2. № 1. С. 117–132.
- Дылис Н.В. Лиственница Восточной Сибири и Дальнего Востока. Изменчивость и природное разнообразие. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 210 с.
- Кузнецова Е.П., Козлов Д.Н. Внутриландшафтная изменчивость радиальных приростов лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) Терехольской долины Тывы в XX в. // Журн. СФУ. Биология. Красноярск, 2011. Т. 4. № 4. С. 325–337.
- Магда В.Н., Ваганов Е.А. Климатический отклик прироста деревьев в горных лесостепях Алтае-Саянского региона // Изв. РАН. Серия географич. 2006. № 5. С. 92–100.
- Наурызбаев М.М., Ваганов Е.А., Сидорова О.В. Изменчивость приземной температуры воздуха на севере Евразии по данным тысячелетних древесно-кольцевых хронологий // Криосфера Земли. 2003. № 7(2). С. 84–91.
- Николаев А.Н., Федоров А.Н., Угаров И.С. и др. Влияние характера мерзлотных ландшафтов на рост лиственных древостоев в Центральной Якутии // Вестн. Северо-Восточного федерального ун-та им. М.К. Аммосова. Якутск: Изд-во СВФУ, 2011. № 1. С. 25–35.
- Новый сайт StatSoft Russia [Электронный ресурс]. [2013] URL: <http://www.statsoft.ru/> (Дата обращения: 19.02.2013).
- Селянинов Г.Т. Методика сельскохозяйственной характеристики климата // Мировой агроклиматический справочник. Л.: Гидрометеиздат, 1937. С. 5–27.
- Сидорова О.В., Ваганов Е.А., Наурызбаев М.М. и др. Региональные особенности радиального прироста лиственницы на севере Средней Сибири по тысячелетним древесно-кольцевым хронологиям // Экология. 2007. № 2. С. 99–103.
- Судацкова Н.Е. Метаболизм хвойных и формирование древесины. Новосибирск: Наука, 1977. 230 с.

- Табакова М.А., Кирдянов А.В., Брюханова М.В., Прокушкин А.С. Зависимость радиального прироста лиственницы Гмелина на севере Средней Сибири от локальных условий произрастания // Журн. СФУ. Биология. Красноярск, 2011. Т 4. № 4. С. 314–324.
- Шиятов С.Г. Дендрохронология верхней границы леса на Урале. М.: Наука, 1986. 136 с.
- Шиятов С.Г., Ваганов Е.А., Кирдянов А.В. и др. Методы дендрохронологии. Ч. I. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации: Учебно-методич. пос. Красноярск: КрасГУ, 2000. 80 с.
- Briffa K.R., Osborn T.J., Schweingruber F.H. Large-scale temperature inferences from tree rings: a review // Global and Planetary Change. 2004. № 40. P. 11–26.
- Cook E.R. A time series approach to tree-ring standardization: Ph. D. dissertation. Tucson: Arizona University Press, 1985. 171 p.
- Esper J., Frank D.C., Büntgen U. et al. Trends and uncertainties in Siberian indicators of 20th century warming // Global Change Biology. 2010. № 16. P. 386–398.
- Fritts H.C. Tree-ring and climate. London; New-York; San Francisco: Acad. Press, 1976. 567 p.
- Knorre A.A., Siegwolf R.T.W., Saurer M. et al. Twentieth 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 // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. 2010. V. 115. Iss. G3. P. 1–12.
- Rinn F. TSAP Win. Time Series Analysis and Presentation for Dendrochronology and Related Applications. Version 4/64 for Microsoft Windows: User Reference. Germany, Heidelberg, 2011. 110 p.
- Vaganov E.A., Hughes M.K., Shashkin A.V. Growth dynamics of conifer tree rings: an image of past and future environments. Berlin: Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2006. 368 p.