

Динамика радиального прироста сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) как индикатор гидротермического режима лесостепи Западного Забайкалья

А. В. ДЕМИНА¹, Л. В. БЕЛОКОПЫТОВА¹, С. Г. АНДРЕЕВ², Т. В. КОСТЯКОВА¹, Е. А. БАБУШКИНА¹

¹ Хакасский технический институт – филиал Сибирского федерального университета
655017, Абакан, ул. Щетинкина, 27
E-mail: baranova-anastas@mail.ru

² Байкальский институт природопользования СО РАН
670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6

Статья поступила 20.01.2017

Принята к печати 28.03.2017

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты исследования радиального прироста сосны обыкновенной, произрастающей в лесостепной зоне Западного Забайкалья на пяти участках. Для каждого участка собраны дополнительные образцы, что позволило повысить надежность результатов и построить две региональные хронологии. Проведен анализ корреляций хронологий с ежемесячными температурами, осадками и гидротермическим коэффициентом Селянинова. Анализ 10-дневных скользящих климатических рядов дал возможность уточнить периоды влияния климата на прирост – основное лимитирование роста сосны в регионе наблюдается по влагообеспеченности, включая условия предыдущего (с конца июля до конца сентября) и текущего (май – середина июля) вегетационного сезона. В динамике климатических факторов и радиального прироста сосны выявлены колебания длительностью 23–35 лет.

Ключевые слова: радиальный прирост, сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*), температура, осадки, гидротермический коэффициент Селянинова, Западное Забайкалье, лесостепь.

Континентальный умеренный пояс Центральной Азии находится под влиянием достаточно суровых климатических условий – дефицита увлажнения в течение сезона роста и низких температур [Dulamsuren et al., 2009, 2014], которые ограничивают рост деревьев в высокогорных районах и определяют положение верхней границы леса [Jacoby et al., 1996]. В то же время высокая годовичная изменчивость количества осадков приво-

дит к чередованию относительно влажных периодов и засух, лимитирующих распространение древесных растений и их прирост в долинах и на равнинных территориях Центральной Азии, т. е. в лесостепном экотоне [Dulamsuren et al., 2009; Fang et al., 2010]. Это приводит к уязвимости лесостепных экосистем к колебаниям режима увлажнения в течение вегетационного сезона как вследствие уменьшения количества осадков, так

и из-за увеличения испарения и транспирации при возрастании температур. Увеличение частоты и интенсивности засух регистрируется во многих регионах Азии в рамках текущих климатических изменений, что объясняет миграции лесостепного экотона в широтном и высотном направлениях [Yatagai, Yasunari, 1995; Dai, Trenberth, 1998; Gunin et al., 1999; Tarasov et al., 2006, 2007; Dulamsuren et al., 2014].

В отличие от глобального положительно-го тренда температур, количество осадков имеет значительную пространственную изменчивость, особенно в регионах со сложным ландшафтом [Pederson et al., 2001; Vatima et al., 2005; Dulamsuren et al., 2010]. В этих условиях имеют высокую значимость исследования климата и его влияния на лесные экосистемы Центральной Азии в региональном масштабе. Один из таких регионов – Западное Забайкалье, характеризующееся развитым лесостепным экотоном и слабым охватом с точки зрения дендроэкологических исследований. В 1999 г. в данном регионе получены данные радиального прироста сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и проведен анализ влияния региональных климатических и гидрологических колебаний на этот показатель [Андреев и др., 1999, 2001а, б; Andreev, 2000]. Использована генерализованная хронология радиального прироста сосны, которая отражала региональную изменчивость прироста для обширного бассейна р. Селенга, но подробный анализ влияния местных природно-климатических условий на локальные хронологии остался за рамками работы.

В связи с этим в исследовании решались следующие задачи: повышение статистической достоверности результатов и увеличение периода сравнения хронологий радиального прироста с инструментальными климатическими данными путем увеличения выборки (количества измеренных рядов радиального прироста на участок), оценка особенности отклика прироста на климатические факторы в последние 20 лет по новой выборке, рассмотрение отклика пространственно объединенных хронологий на ведущие климатические факторы с месячным и 10-дневным разрешением, а также возможности этих

хронологий для выявления длительных колебаний увлажнения в исследуемом регионе.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Материалы для дендроэкологического исследования собраны в лесостепи Селенгинского среднегорья Западного Забайкалья (рис. 1, а). По климатическому районированию территория исследования относится к умеренному поясу континентальной лесной Восточно-Сибирской области юго-западной подобласти [Алисов, 1956; Суворова и др., 2005]. Континентальность климата характеризуется большими суточными и годовыми амплитудами температур с суровой зимой и довольно жарким летом, небольшим количеством и неравномерным пространственно-временным распределением осадков [Жуков, 1960; Фадеева, 1963]. Среднегодовая температура воздуха повсеместно отрицательная. Для региона характерна длительная (5,5 мес.) и сухая зима, среднемесячная температура января –25,4 °С. Зима устанавливается к середине октября, причем устойчивый снежный покров в котловинах появляется после начавшегося промерзания почвы. Количество зимних осадков, выпадающих в котловинах с декабря по февраль, невелико (до 10–12 мм), причем снег выпадает преимущественно в первую половину зимы. Некоторые открытые плоские увалы и склоны остаются в течение данного периода бесснежными из-за сдувания снега ветром, а в целом даже с учетом его накопления на днищах котловин высота снежного покрова не превышает 10–15 см. Это приводит к глубокому промерзанию почв и грунтов. Район исследования относится к зоне островного распространения многолетней мерзлоты.

Для оценки влияния климата на динамику прироста деревьев использовали ежемесячные и ежедневные климатические данные по приземной температуре воздуха и количеству осадков метеостанций Улан-Удэ (1886–2015 гг.) и Кяхта (1895–2015 гг.) (см. рис. 1, б), а также построенные по ним скользящие подекадные (десятидневные) ряды. Значения гидротермического коэффициента Селянинова (ГТК) рассчитывали с мая по сентябрь по декадам, по месяцам и усредняли

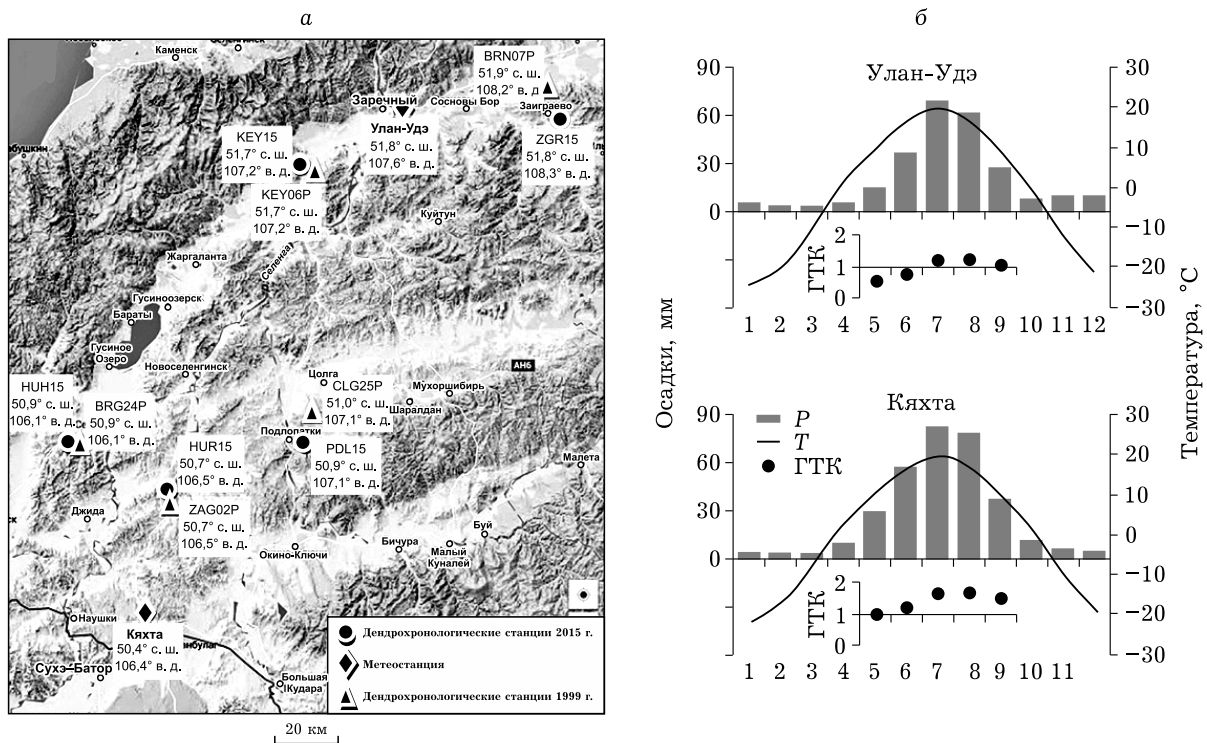


Рис. 1. Район исследования (а) и климатограммы метеостанций Улан-Удэ и Кяхта (б). Ромбами отмечены метеостанции, треугольниками – дендрохронологические станции 1999 г., кругами – дендрохронологические станции 2015 г.

для получения сезонных значений [Селянинов, 1937]. Динамику ГТК сравнивали с индексом сухости SPEI за период с августа по июль, усредненным по географическим координатам 51,5–52° с. ш. 107–108,5° в. д. и 50,5–51° с. ш. 106–107,5° в. д. (покрывающим участки сбора материала) для Улан-Удэ и Кяхты соответственно [https://climexp.knmi.nl, Trouet, Oldenborgh, 2013].

Ежемесячные данные метеостанций Улан-Удэ и Кяхта по температуре показывают высокие корреляции между собой: в течение теплого периода (апрель – октябрь) $r = 0,78–0,92$, зимой (ноябрь – март) – $r = 0,83–0,91$. Корреляции ежемесячных данных по осадкам намного ниже: в теплый сезон $r = 0,21–0,45$, зимой $r = 0,02–0,24$, соотношения декадных сумм осадков между метеостанциями составляют $r = 0,20–0,60$ и $r = -0,08–0,36$ в теплый и холодный период соответственно. Таким образом, температурное поле в исследуемом районе относительно однородно, а осадки на севере и юге региона существенно различаются. Значения ГТК на севере и юге исследуемого района значимо

коррелируют между собой, но в меньшей степени, чем температуры – $r = 0,25–0,65$. Соотношение между рядами годового индекса SPEI для севера и юга района составляет 0,69.

На территории Селенгинского среднегорья по межгорным понижениям и склонам широких долин, глубоко проникая в зону степей, формируются сосново-лиственничные лесостепные ландшафты. Сбор образцов (керна) сосны проводился на пяти участках, расположенных вблизи от мест сбора материала в 1998–1999 гг. (см. рис. 1, а). Сеть участков охватила центральную и южную часть Селенгинского среднегорья: районы междуречий Селенги – Чикой – Хилок, пойму р. Илька, а также Хилокскую, Тугнуйскую и Гусиноозерскую котловины, располагающиеся между отрогов Цаган-Дабана, Боргойского, Заганского и Худанского хребтов (табл. 1).

Сбор, транспортировку и первичную обработку кернов проводили по стандартным методикам, принятым в дендрохронологии [Шиятов и др., 2000], измерения радиального прироста – на измерительной установке LINTAB 5 с применением специализирован-

Местоположение и описание дендроклиматических станций

Номер	Код участка	Географические координаты, высота над ур. м., местоположение	Краткая характеристика местопроизрастания и растительности
1	ZGR	51,8° с. ш., 108,3° в. д., 600 м. Западный склон Худанского хребта, пойма р. Илька, восточная окраина с. Заиграево	Западный пологий склон – 1–2°. Сосняк на борových песках. Состав – 10С. Разновозрастный. $h \sim 20$ м, $\varnothing \sim 50\text{--}60$ см. Кустарнички – 5 %, травяной покров – 5 %. Следы многократных пожаров
2	KEY	51,7° с. ш., 107,2° в. д., 700 м. Иволгинский р-н, в окрестностях с. Ключи, южнее на 1,5 км	Западный склон – 20°. Сосняк мертвопокровно-лишайниковый. Разновозрастный. $h \sim 22\text{--}24$ м, $\varnothing \sim$ до 40 см. Кустарничков нет, травяной покров – 15 % (сухие злаки), мохово-лишайниковый покров – 5 % (в ложбине сухого стока до 40 %). Почва примитивная с выходом горных пород
3	PDL	51,0° с. ш., 107,1° в. д., 600 м. Мухоршибирский р-н, южная граница с. Подлопатки, р. Хилок	Дно Тугнуйской котловины – 0°. Сосняк остепненный на борových песках донного всхолмления. Сомкнутость – 0,1 (редкостойный). Одновозрастный. $h \sim$ до 20 м, $\varnothing \sim 60\text{--}80$ см. Травяно-кустарничковый покров – отсутствует. Почва песчаная на аллювиальных отложениях
4	HUN	50,9° с. ш., 106,1° в. д., 700 м. Селенгинское среднегорье, в 9 км на запад от с. Селендум	Вершина холма и его северный склон – 15–20°. Сосняк осочково-мертвопокровный. Сомкнутость – 0,3–0,4. Хорошее возобновление. $h \sim 22$ м, $\varnothing \sim 48\text{--}52$ см. Кустарнички – менее 5 %, травяной покров – 40 %, опад – 30 %. Почва супесчаная, крупнощебнистая с выходом горных пород
5	HUR	50,7° с. ш., 106,5° в. д., 850 м. Кяхтинский р-н, Хурайский хребет	Западный склон ложбины сухого стока – 5°. Сосняк злаково-разнотравный мертвопокровный. $h \sim 15$ м, $\varnothing \sim$ до 60 см. Травяно-кустарничковый покров – отсутствует. Подрост – сосна. Почва песчано-суглинистая на карбонатных породах. Следы от многократных пожаров. Наиболее старые деревья сохранились в ложбине сухого стока

ного пакета TSAP Win с точностью 0,01 мм [Rinn, 2011]. Датировка образцов (определение календарного года каждого кольца) подтверждалась кросскорреляционным анализом в специализированной программе COFESHA [Holmes, 1999]. Далее проводили процедуру стандартизации (индексации) с помощью программы ARSTAN [Cook, Krusic, 2005]. При ее проведении из индивидуальных рядов на первом этапе удаляли возрастной тренд, для описания которого использовали негативную экспоненциальную и линейную функции, на втором этапе проводили удаление автокорреляционной зависимости первого порядка. После каждого этапа индивидуальные индексированные ряды прироста усредняли для получения локальных и региональных хро-

нологий – стандартных и остаточных соответственно [Шиятов и др., 2000]. Анализ локальных хронологий для их объединения в группы с максимальным сходством динамики радиального прироста проводили путем иерархической классификации (метод полной связи, мера близости – коэффициенты корреляции между хронологиями за общий период 1807–2015 гг.) с учетом географического расположения участков сбора материалов и метеостанций в программе STATISTICA [Statsoft, 2013]. Объединение локальных хронологий в региональные проводилось методом выделения первой главной компоненты [Jolliffe, 2002; Touchan et al., 2011].

В данной работе использовали следующие статистические характеристики хронологий:

среднее арифметическое значение, стандартное отклонение, средний коэффициент чувствительности (отношение разности двух соседних значений переменной к их арифметическому среднему, усредненное по всему ряду) и коэффициент автокорреляции первого порядка [Fritts, 1976; Wigley et al., 1984]. При этом коэффициент чувствительности позволяет оценить степень изменчивости радиального прироста, обусловленную быстро изменяющимися внешними факторами, в первую очередь климатическими.

Связь радиального прироста деревьев с климатическими факторами оценивали по соотношению между индексированными хронологиями радиального прироста и температурами, осадками и ГТК за различные периоды (10-дневные, ежемесячные и за несколько месяцев) с июля предыдущего по август текущего года [Fritts, 1976; Schweingruber, 1996]. Для анализа более длительных колебаний прироста сосны и климатических переменных соответствующие ряды сглаживали с помощью кубических сглаживающих трендов с фиксированной длиной окна 11 лет в программе ARSTAN [Cook, Krusic, 2005] и проводили корреляционный анализ данных рядов с использованием стандартных хронологий радиального прироста, поскольку они сохраняют большую долю низкочастотной изменчивости, чем остаточные [Methods..., 1990].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Изначально для каждого участка построены локальные хронологии радиального прироста сосны отдельно для сборов 1999 и 2015 гг. Коэффициенты корреляции между локальными хронологиями территориально близких выборок разных лет составляют 0,63–0,95, что позволяет построить на их основе более обобщенные локальные хронологии для каждого участка по общей выборке 1999 и 2015 гг. (рис. 2). Что касается периода сравнения хронологий радиального прироста с инструментальными климатическими данными, добавленного после повторного сбора материала (1996–2015 гг.), в стандартных хронологиях двух северных участков (ZGR, KEY) индексы прироста имеют отрицательный тренд – уменьшение в среднем на 0,04 в год

($R^2 = 0,32–0,54$), что согласуется с трендом годовой суммы осадков на метеостанции Улан-Удэ за этот же период – уменьшение в среднем на 4,3 мм/год ($R^2 = 0,23$). В южной части исследуемого района значимые тренды отсутствуют как в радиальном приросте сосны (PDL, HUH, HUR), так и в годовой сумме осадков.

Учитывая тенденции в динамике радиального прироста, значения коэффициентов корреляции между локальными хронологиями и расположение участков сбора материала и метеостанций на карте, все локальные хронологии разделены на две группы (табл. 2, рис. 3). В результате обобщения получены две региональные хронологии – северная BUR-N и южная BUR-S, имеющие высокую корреляцию между собой ($r = 0,77$ для стандартных и $r = 0,66$ для остаточных хронологий) (см. рис. 3). Процент дисперсии радиального прироста сосны, объясненный первой главной компонентой, на севере района исследования составляет 51,5, на юге – 72,7 %.

Статистические характеристики обобщенных хронологий приведены в табл. 3. Межсерийные коэффициенты корреляции показывают наличие в динамике прироста сосны достаточно сильного общего внешнего сигнала как на локальном, так и на региональном уровне. Это подтверждается также высокими значениями стандартного отклонения и коэффициента чувствительности. Увеличение объема выборки (количества рядов) привело к получению более высоких значений выраженного сигнала популяции по всей длине хронологий. Их превышение над пороговым значением 0,85 для северной и южной региональных хронологий наблюдается с 1733 и 1786 гг. соответственно, что примерно на 80 лет раньше, чем по сборке 1999 г. Для стандартных хронологий, особенно на севере исследуемого района, характерна высокая автокорреляция первого порядка, отражающая зависимость прироста текущего года от прироста и внешних условий предыдущего. Кроме того, у всех хронологий практически совпадают реперные годы: максимальные значения индексов прироста приходятся на 1782–1783, 1820, 1886, 1891, 1908–1909, 1911–1912, 1918, 1927, 1933 гг., минимальные – на 1794, 1823, 1863, 1874, 1956, 1980–1982 гг. В целом

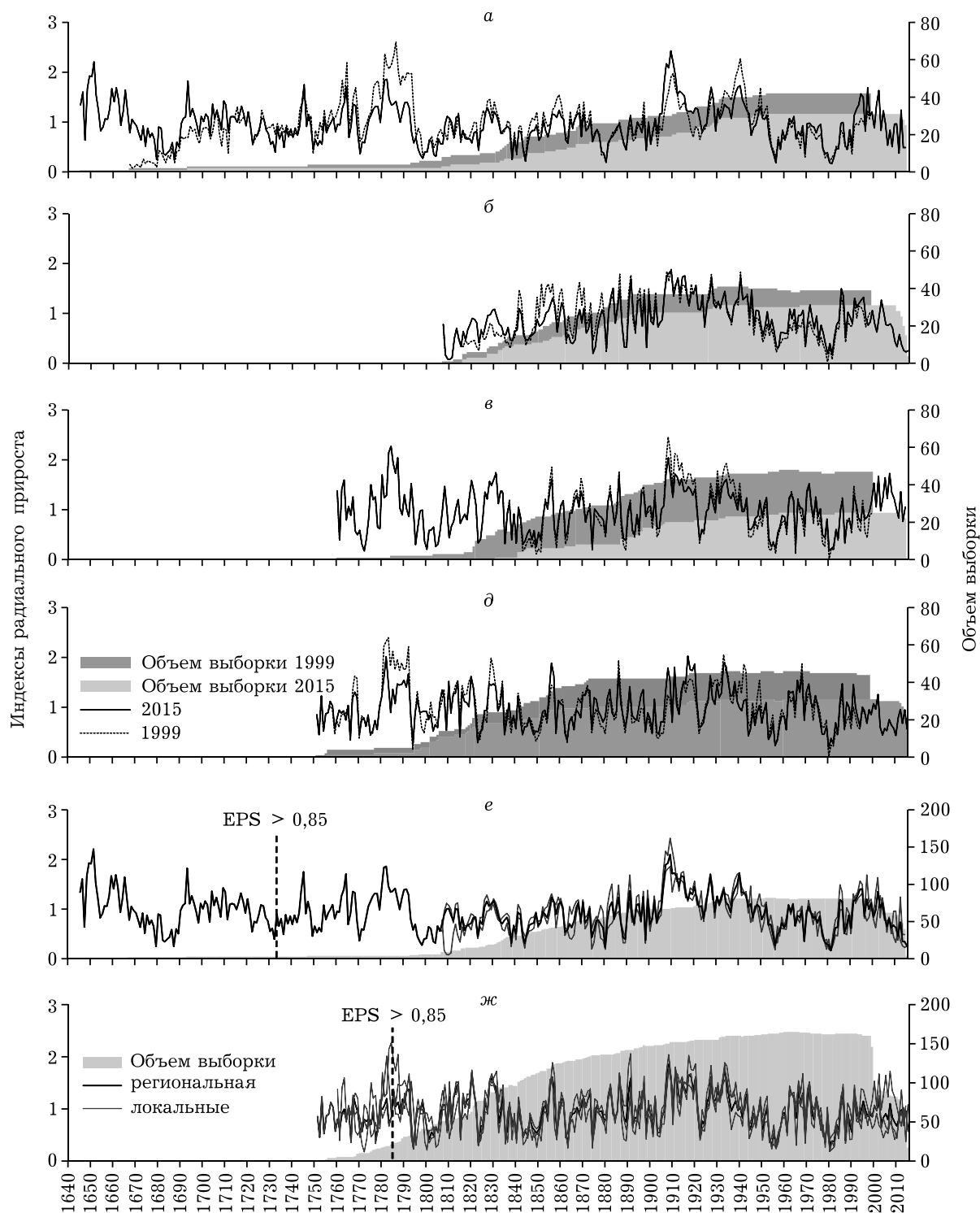


Рис. 2. Динамика радиального прироста сосны: локальные (сбор 1999 и 2015 гг.) и региональные стандартные хронологии с указанием объема выборки для каждого года: а – ZGR; б – KEY; в – PDL; г – HUH; д – HUR; е – BUR-N; жс – BUR-S

статистические характеристики хронологий свидетельствуют об их пригодности для дендроэкологических исследований.

Корреляционный дендроклиматический анализ показал, что в районе исследования наблюдается слабое кумулятивное отрица-

Т а б л и ц а 2
Коэффициенты корреляции между локальными стандартизованными древесно-кольцевыми хронологиями (после объединения территориально близких выборок 1999 и 2015 гг.)

	KEY	PDL	HUH	HUR
ZGR	$\frac{0,65}{0,51}$	$\frac{0,61}{0,52}$	$\frac{0,45}{0,41}$	$\frac{0,48}{0,46}$
KEY		$\frac{0,55}{0,52}$	$\frac{0,60}{0,58}$	$\frac{0,52}{0,50}$
PDL			$\frac{0,60}{0,59}$	$\frac{0,70}{0,72}$
HUH				$\frac{0,77}{0,76}$

* В числителе показаны коэффициенты корреляции для стандартных хронологий, в знаменателе для остаточных. Все коэффициенты корреляции значимы при $p < 0,05$.

тельное влияние температур вегетационного сезона на прирост сосны, более выраженное на севере района (рис. 4, а, б). В первой половине сезона (май – июль) колебания температуры отражаются в текущем годовичном

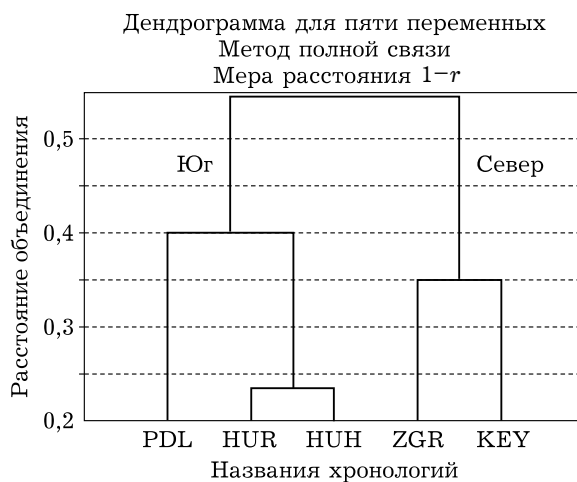


Рис. 3. Иерархическая классификация стандартных локальных хронологий радиального прироста сосны

кольце, а во второй (август – сентябрь) – в кольце следующего года. Также на севере отрицательное влияние на прирост наблюдается для зимних температур – ноября, декабря и марта, на юге района они на при-

Т а б л и ц а 3
Статистические характеристики индексированных древесно-кольцевых хронологий

Характеристика	ZGR	KEY	PDL	HUH	HUR	BUR-N	BUR-S
Общие характеристики							
Длительность, годы	370	209	255	248	265	370	265
Период, годы	1645–2014	1807–2015	1760–2014	1768–2015	1751–2015	1645–2014	1751–2015
Количество деревьев	42	42	51	73	48	84	172
Общее количество годовичных колец	6573	6110	6956	13250	8130	12683	28336
Характеристики индексированных хронологий*							
Средний межсерийный коэффициент корреляции	$\frac{0,56}{0,49}$	$\frac{0,47}{0,53}$	$\frac{0,51}{0,56}$	$\frac{0,59}{0,64}$	$\frac{0,57}{0,61}$	$\frac{0,48}{0,44}$	$\frac{0,48}{0,51}$
Выраженный сигнал популяции	$\frac{0,89}{0,88}$	$\frac{0,97}{0,97}$	$\frac{0,96}{0,97}$	$\frac{0,99}{0,99}$	$\frac{0,98}{0,98}$	$\frac{0,90}{0,89}$	$\frac{0,99}{0,99}$
Стандартное отклонение	$\frac{0,39}{0,27}$	$\frac{0,39}{0,28}$	$\frac{0,42}{0,34}$	$\frac{0,37}{0,33}$	$\frac{0,39}{0,32}$	$\frac{0,36}{0,26}$	$\frac{0,33}{0,30}$
Коэффициент чувствительности	$\frac{0,28}{0,32}$	$\frac{0,32}{0,32}$	$\frac{0,37}{0,42}$	$\frac{0,38}{0,42}$	$\frac{0,35}{0,40}$	$\frac{0,27}{0,30}$	$\frac{0,33}{0,39}$
Коэффициент автокорреляции первого порядка	$\frac{0,69}{-0,11}$	$\frac{0,63}{-0,02}$	$\frac{0,55}{0,01}$	$\frac{0,39}{-0,08}$	$\frac{0,47}{-0,08}$	$\frac{0,69}{-0,09}$	$\frac{0,42}{-0,15}$
Коэффициенты корреляции между стандартными хронологиями и остаточными	0,66	0,79	0,80	0,91	0,86	0,68	0,90

* В числителе показаны коэффициенты для стандартных хронологий, в знаменателе – для остаточных.

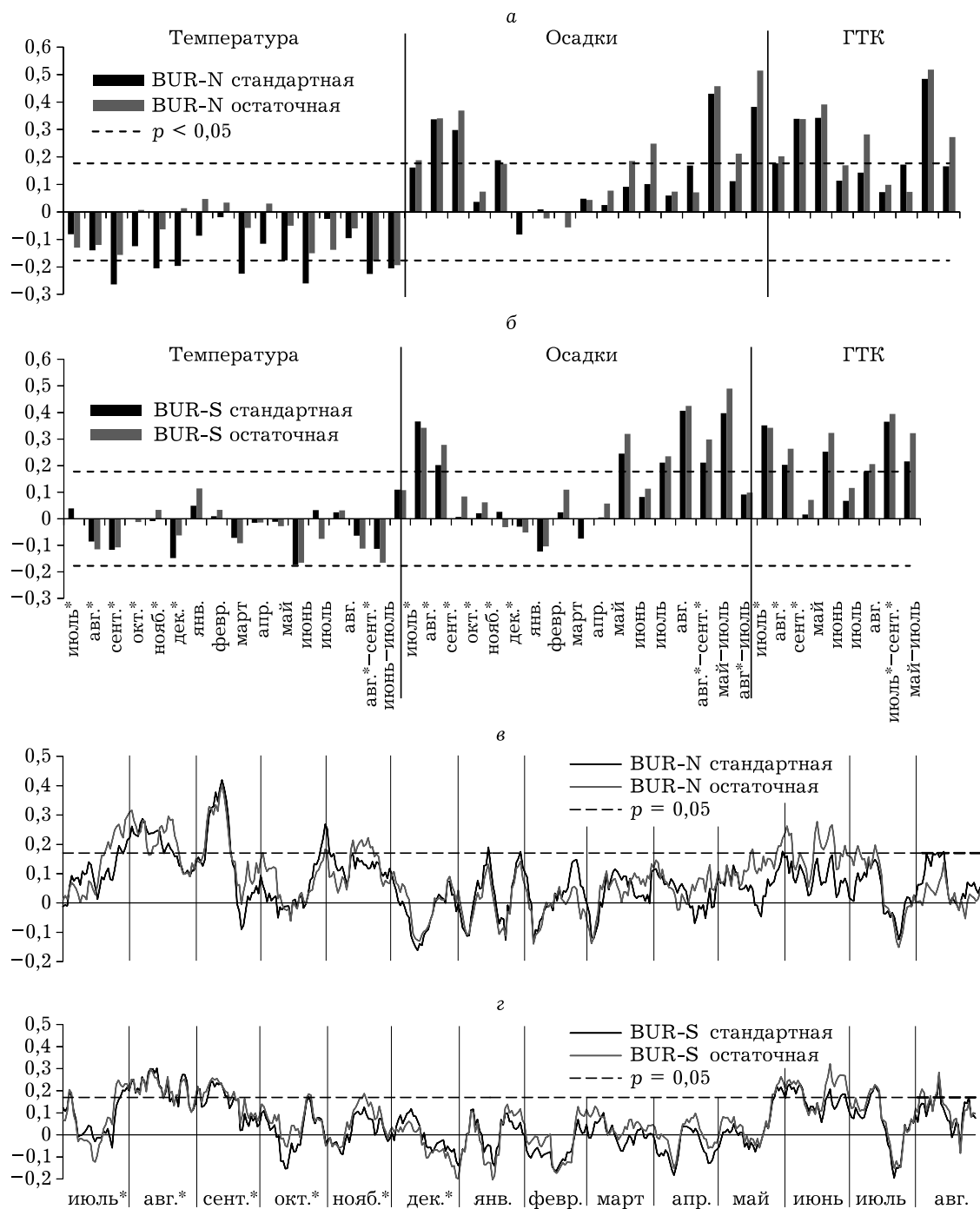


Рис. 4. Коэффициенты корреляции индексированных региональных хронологий с климатическими факторами: а – хронологии BUR-N и ежемесячные температуры, осадки и ГТК; б – хронологии BUR-S и ежемесячные температуры, осадки и ГТК; в – хронологии BUR-N и 10-дневные суммы осадков по данным метеостанции Улан-Удэ; г – хронологии BUR-S и 10-дневные суммы осадков по данным метеостанции Кяхта

рост значимо не влияют. Реакция на осадки с мая – июня по сентябрь положительна и более выражена, чем на температуры. При этом наиболее сильно в радиальном приросте

проявляется влияние осадков второй половины предыдущего вегетационного сезона. Поступление влаги в мае – июне текущего сезона влияет на прирост слабее, и отклик

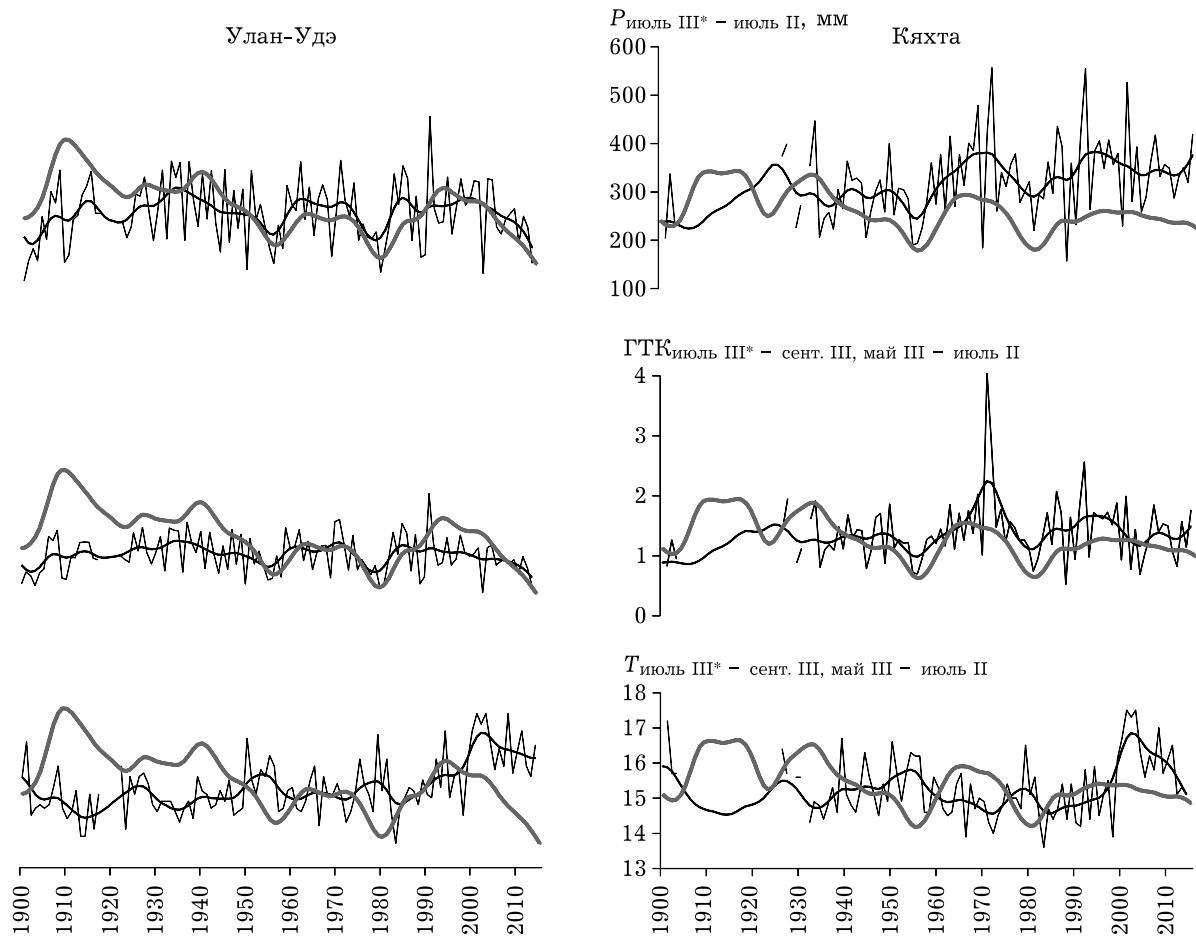


Рис. 5. Погодичные и сглаженные 11-летними сплайнами колебания наиболее значимых для прироста сосны климатических факторов. Для сравнения серыми линиями показаны соответствующие сглаженные стандартные древесно-кольцевые хронологии

более выражен в остаточных хронологиях. В зимний период осадки незначительны, и их положительное влияние значимо только в ноябре для севера исследуемого района. Годовое количество влаги максимально отражается в радиальном приросте для периода с августа по июль. Гидротермический коэффициент объединяет в себе температуру и осадки, поэтому отклик радиального прироста сосны на его колебания при сохранении тех же закономерностей чуть выше, чем на осадки. Проверка возможности использования SPEI как интегрального показателя увлажнения показала, что его корреляции с радиальным приростом сосны ниже на 0,05–0,1, чем ГТК тех же месяцев, при тех же закономерностях.

Анализ десятидневных рядов климатических факторов позволил уточнить периоды

влияния климата на прирост в течение вегетационного сезона: радиальный прирост наиболее чувствителен к осадкам третьей декады мая – первой декады июня, и влияние на текущий прирост наблюдается до второй декады июля включительно (см. рис. 4, в, г). Начиная с третьей декады июля и до конца сентября климатический фактор оказывает воздействие на прирост последующего года. Таким образом, в каждом годичном кольце максимальное влияние годовой суммы осадков должно наблюдаться для периода с третьей декады июля предшествующего года по вторую декаду июля текущего года. Действительно, корреляции осадков данного периода с хронологиями прироста сосны составляют $r = 0,43–0,61$, в то время как для периода с августа по июль – $r = 0,38–0,51$. Что касается температур и ГТК, то максималь-

ную корреляцию с приростом имеют значения этих переменных, усредненные за суммарный период с третьей декады июля по третью декаду сентября предшествующего года и с третьей декады мая по вторую декаду июля текущего года, т. е. фактически за тот же годовой период с удалением его холодной части. Значения корреляций составляют для ГТК $r = 0,42-0,64$ и для температур $-r = -0,27...-0,19$.

Для оценки отражения в приросте сосны длительных климатических колебаний рассмотрены ряды климатических факторов для выявленных периодов максимального отклика, сглаженные с 11-летним окном, и проведено их сравнение с соответствующими сглаженными стандартными хронологиями прироста (рис. 5). Для всего района исследования характерно длительное падение прироста в засушливые и жаркие периоды: климатически обусловленные депрессии прироста в 1951–1961 и 1975–1985 гг. наблюдаются в обеих хронологиях (ср. реперные 1956, 1980–1982 гг.), а после 2000 г. ярко выражено падение прироста на севере, синхронное с упомянутым выше отрицательным трендом в количестве осадков. Это подтверждается коэффициентами корреляции сглаженных рядов климатических переменных и прироста: $r = 0,37-0,72$, $0,45-0,77$ и $-0,11...-0,30$ для ГТК, осадков и температуры соответственно.

ОБСУЖДЕНИЕ

Высокая согласованность дендрохронологических данных 1999 и 2015 гг. позволила получить локальные и региональные хронологии с более высоким выраженным сигналом популяции, т. е. более надежно отражающие общий внешний сигнал. Также дополнение выборки путем повторного сбора материала привело к выявлению различий в динамике прироста в пределах региона за последние десятилетия, связанным с различающимися трендами климатической динамики на севере и юге, а именно уменьшением годового количества осадков по данным метеостанции Улан-Удэ. Однако однородность температурных условий и значимые корреляции между осадками на севере и юге рай-

она обуславливают высокое сходство динамики прироста в пределах всего исследуемого региона, позволяющей использовать как две региональные хронологии (отражающие климатическую динамику на севере и юге соответственно), так и одну общую, использованную в предыдущих исследованиях изменений окружающей среды в большем пространственном масштабе [Андреев и др., 1999, 2001а, б].

Общие закономерности климатического отклика в приросте сосны характерны для засушливых регионов континентального умеренного пояса Центральной Азии и обусловлены небольшим количеством осадков, выпадающих по большей части в течение теплого сезона, и высокой сезонной амплитудой температур – сочетанием жаркого лета и морозной зимы [Суворова и др., 2005; Магда, Ваганов, 2006; Lu et al., 2013; Бабушкина, Белокопытова, 2014; Бочаров, Савчук, 2015; Муханова и др., 2015; Shi et al., 2016; Gradel et al., 2017]. Север региона вследствие более морозных зим и меньшего количества осадков характеризуется очень суровыми климатическими условиями, что приводит к большей интенсивности климатического отклика.

Определенные по декадным климатическим данным временные границы отклика указывают на конец июля как примерный срок окончания активного радиального прироста сосны в данном регионе. К этому моменту практически завершаются процессы деления клеток и их роста растяжением, продолжающееся до конца сентября формирование вторичных клеточных стенок в поздней древесине не вносит вклад в ширину текущего кольца [Бабушкина и др., 2010; Sunu, Rathgeber, 2014; Бабушкина, Белокопытова, 2015]. Однако в этот период получаемые растением ассимиляты уходят не только на построение клеточных стенок в древесине, но и запасаются растением для использования в следующем сезоне роста [Судачкова, 1977].

Вследствие различий между отдельными деревьями в сроках этапов формирования древесины (например, доминантные деревья имеют более длительный период активности камбия, чем угнетенные) [Babushkina et al.,

2015] и климатически обусловленной годичной вариации этих сроков, в первой половине августа также наблюдается слабый отклик прироста сосны на осадки.

Начиная с конца июля температура воздуха постепенно уменьшается, что даже при снижающемся количестве осадков приводит к постепенному увеличению запаса влаги в почве вплоть до момента ее промерзания. Так, существуют следующие данные по оценке эффективности запаса влаги осадков в почве: 9 % во второй половине лета и до 66 % к концу осени (при сохранении на полях растительной массы) для сельскохозяйственных засушливых регионов США [Farahani, 1998; Nielsen, 2006]. В естественном лесостепном ландшафте Забайкалья на песчаных и каменистых почвах и при покрытии травянистой растительностью 10–15 %, характерном для участков сбора материала, запасаение влаги менее эффективно, но вышеупомянутые закономерности работают [Lampurlanes et al., 2002; Kargas et al., 2012]. В начале зимы температуры падают очень резко, что при невысоком снеговом покрове приводит к быстрому промерзанию корнеобитаемого слоя почвы и консервированию содержащейся в ней воды (предотвращению ее испарения) до оттаивания в начале вегетационного сезона [Роде, 1965; Schillinger et al., 2010]. Небольшое количество зимних осадков в условиях предгорий приводит к формированию малого снегового покрова и его сдуванию во впадины рельефа, в результате чего снег не вносит значимого вклада в весенние почвенные запасы влаги. С другой стороны, в ноябре – декабре и в марте температуры могут регулировать запасы почвенной влаги [Dulamsuren et al., 2011; Khishigjargal et al., 2014; Gradel et al., 2017]. Следует учесть, что сосна как вечнозеленое хвойное растение в регионе исследования начинает вегетацию в апреле – мае [Судачкова, 1977; Суворова, 2005]. Поэтому запасы в почве осадки второй половины предыдущего теплого сезона для нее являются значимым источником влаги с начала вегетации до третьей декады мая. К этому моменту почвенные запасы влаги исчерпываются вследствие ее использования растительностью и испарения при повышении темпе-

ратуры, поэтому основным источником воды становятся текущие осадки. В результате годичный радиальный прирост сосны интегрирует в себе влияние климатических факторов в течение периода с третьей декады предшествующего июля по вторую декаду текущего июля, с преобладанием воздействия климата теплого сезона.

Изменчивость прироста сосны имеет выраженную низкочастотную составляющую, обусловленную длительными колебаниями как осадков, так и температуры. Из-за более суровых климатических условий на севере района исследования амплитуда низкочастотных колебаний прироста существенно выше, чем на юге. Несмотря на региональные отличия, в обеих хронологиях наблюдаются практически синхронные циклы длительностью 23–35 лет, характерные для цикличности колебаний режима увлажнения (осадков, индексов увлажнения, гидрологических переменных) и отмечавшиеся в древесно-кольцевых хронологиях и ранее [Шнитников, 1969; Balybina, 2006; Муханова и др., 2015]. Однако вследствие пространственной неравномерности выпадения осадков полученные циклы, реперные годы и более длительные сухие/влажные периоды не совпадают с отмеченными для других регионов Сибири, Монголии и Северного Китая [Balybina, 2006; Lu et al., 2013; Муханова и др., 2015; Shi et al., 2016].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ взаимосвязей радиального прироста сосны обыкновенной в лесостепи Западного Забайкалья с климатическими переменными, проведенный по увеличенной выборке данных, позволил уточнить периоды, наиболее значимые для формирования годичных колец. Основное лимитирование роста сосны в регионе наблюдается по влагообеспеченности, включая условия в течение предыдущего (с 20 июля по 30 сентября) и текущего (с 20 мая по 20 июля) вегетационного сезона. При этом проводником влияния условий предыдущего теплого сезона является почва как резервуар, сохраняющий влагу в течение зимы. Изменчивость осадков в пределах района исследования обусловила

различия между его северной и южной частью в динамике прироста сосны и его климатическом отклике, а в больших пространственных масштабах – несовпадение реперных лет и длительных колебаний прироста с хронологиями других регионов.

Предложенные в данной работе механизмы воздействия климатических переменных на формирование древесины хвойных нуждаются в дальнейшей проверке. Поэтому представляют интерес следующие направления исследований: сравнительный анализ разных регионов в пределах лесостепного экотона и анализ взаимосвязей изменчивости древесно-кольцевых хронологий с глобальными климатическими осцилляциями. Для выделения особенностей физиологических реакций древесины может оказаться полезным проведение моделирования ее формирования в данных климатических условиях на клеточном уровне с помощью имитационной модели Ваганова – Шашкина [Vaganov et al., 2006, 2011].

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 17-04-00315А).

ЛИТЕРАТУРА

- Алисов Б. П. Климат СССР. М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 1956. 125 с.
- Андреев С. Г., Ваганов Е. А., Наурзбаев М. М., Тулохонов А. К. Регистрация годичными кольцами сосны многолетних колебаний атмосферных осадков, стока реки Селенги и уровня озера Байкал // ДАН. 1999. Т. 368, № 3. С. 400–403 [Andreev S. G., Vaganov E. A., Naurzbaev M. M., Tulokhonov A. K. Registration of long-term variations in the atmospheric precipitation, Selenga River runoff, and Lake Baikal level by annual pine tree rings // Dokl. Acad. Sci. USSR. Earth Sci. Ser. 1999. Vol. 368. P. 1008–1011].
- Андреев С. Г., Тулохонов А. К., Наурзбаев М. М. Региональные закономерности изменчивости прироста сосны в степной зоне Бурятии // Геогр. и прир. ресурсы. 2001а. № 1. С. 73–78.
- Андреев С. Г., Ваганов Е. А., Наурзбаев М. М., Тулохонов А. К. Радиальный прирост деревьев как индикатор длительных изменений гидрологического режима в бассейне озера Байкал // Там же. 2001б. № 4. С. 49–54.
- Бабушкина Е. А., Белокопытова Л. В. Камбиальная зона – основная мишень влияния внешних факторов на формирование годичных колец хвойных // ИВУЗ Лесной журнал. 2015. № 6. С. 35–45.
- Бабушкина Е. А., Белокопытова Л. В. Климатический сигнал в радиальном приросте хвойных в лесостепи Юга Сибири и его зависимость от локальных условий местопроизрастания // Экология. 2014. № 5. С. 323–331 [Babushkina E. A., Belokopytova L. V. Climatic signal in radial increment of conifers in forest steppe of Southern Siberia and its dependence on local growing conditions // Rus. Journ. Ecol. 2014. Vol. 45, N 5. P. 325–332].
- 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. Сиб. фед. ун-та. Биология. 2010. Т. 3, № 2. С. 159–176.
- Бочаров А. Ю., Савчук Д. А. Структура лесов и климатический отклик деревьев в зоне контакта “лес – степь” (Горный Алтай) // Там же. 2015. Т. 8, № 4. С. 426–440.
- Жуков В. М. Климат Бурятской АССР. Улан-Удэ, 1960. 188 с.
- Магда В. Н., Ваганов Е. А. Климатический отклик прироста деревьев в горных лесостепях Алтае-Саянского региона // Изв. РАН. Сер. географическая. 2006. № 5. С. 92–100.
- Муханова М. В., Сыромятина М. В., Чистяков К. В. Динамика прироста лиственницы сибирской в горах Тувы и Монгольского Алтая // Геогр. и прир. ресурсы. 2015. № 1. С. 113–119 [Mukhanova M. V., Syromyatina M. V., Chistyakov K. V. The Siberian larch growth dynamics in the mountains of Tuva and Mongolian Altai // Geography and Natural Res. 2015. Vol. 36, N 1. P. 79–85].
- Роде А. А. Основы учения о почвенной влаге. М.: Гидрометиздат, 1965. Т. 1. 663 с.
- Селянинов Г. Т. Методика сельскохозяйственной характеристики климата // Мировой агроклиматический справочник. Л.: Гидрометеиздат, 1937. С. 5–27.
- Суворова Г. Г., Янькова Л. С., Копытова Л. Д., Филиппова А. К. Максимальная интенсивность фотосинтеза сосны обыкновенной и ели сибирской в Предбайкалье // Сиб. экол. журн. 2005. № 1. 97–108.
- Судачкова Н. Е. Метаболизм хвойных и формирование древесины. Новосибирск: Наука, 1977. 230 с.
- Фадеева Н. В. Селенгинское Среднегорье. Улан-Удэ: Бурят. кн. изд-во, 1963. 169 с.
- Шитов С. Г., Ваганов Е. А., Кирдянов А. В. и др. Методы дендрохронологии. Ч. I. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации: учеб.-метод. пособие. Красноярск: КрасГУ, 2000. 80 с.
- Шнитников А. В. Внутривековая изменчивость компонентов общей увлажненности. Л.: Наука, 1969. 245 с.
- Andreev S. On the problem of monitoring of hydrological in the Baikal region using dendrochronological methods // Upper Pleistocene and Holocene Climatic Variations: Materials to the Int. Conf. on Past Global Change (PAGES). Praha, 6–9 September 2000. P. 69–71.
- Babushkina E. A., Vaganov E. A., Belokopytova L. V., Shishov V. V., Grachev A. M. Competitive strength effect in the climate response of scots pine radial growth in south-central siberia forest-steppe // Tree Ring Res. 2015. Vol. 71, N 2. P. 106–117.
- Balybina A. S. Climatic factors of radial growth dynamics of coniferous species in the Angara region // Вычисл. технол. 2006. Vol. 11. P. 104–108.

- Batima P., Natsagdorj L., Gombluudev P. et al. Observed climate change in Mongolia // Assessments of Impacts and Adaptations of Climate Change. Working Papers. 2005. Vol. 12. P. 1–26.
- Cuny Henri E., Rathgeber Cyrille B. K. Une synthèse sur le fonctionnement et la régulation des processus cellulaires de la formation du bois // Revue Forestiere Francaise. 2014. Vol. LXVI, N 6. P. 761–777.
- Cook E. R., Krusic P. J. Program ARSTAN (Version 41d). 2005. <http://www.ldeo.columbia.edu/tree-ring-laboratory/resources/software>
- Dai A., Trenberth K. E. Global variations in droughts and wet spells: 1900–1995 // Geophys. Res. Lett. 1998. Vol. 25. P. 3367–3370.
- Dulamsuren C., Hauck M., Bader M. et al. Water relations and photosynthetic performance in *Larix sibirica* growing in the forest-steppe ecotone of northern Mongolia // Tree Physiol. 2009. Vol. 29. P. 99–110.
- Dulamsuren C., Hauck M., Khishigjargal M. et al. Diverging climate trends in Mongolian taiga forests influence growth and regeneration of *Larix sibirica* // Oecologia. 2010a. Vol. 163. P. 1091–102.
- Dulamsuren C., Hauck M., Leuschner H. H., Leuschner C. Climate response of tree ring width in *Larix sibirica* growing in the drought-stressed forest-steppe ecotone of northern Mongolia // Ann. For. Sci. 2011. Vol. 68, N 2. P. 275–282.
- Dulamsuren C., Khishigjargal M., Leuschner C. et al. Response of tree-ring width to climate warming and selective logging in larch forests of the Mongolian Altai // J. Plant Ecol. 2014. Vol. 7, N 1. P. 24–38.
- Fang K., Gou X., Chen F. et al. Comparisons of drought variability between central high Asia and monsoonal Asia: inferred from tree rings // Front Earth Sci China. 2010. Vol. 4. P. 277–288.
- Farahani H. J., Peterson G. A., Westfall D. G., Sherrod L. A., Ahuja L. R. Soil water storage in dryland cropping systems: The significance of cropping intensification // SSSA Journ. 1998. Vol. 62, N 4. P. 984–991.
- Fritts H. C. Tree-ring and Climate. London; New-York; San Francisco: Acad. Press, 1976. 567 p.
- Gradel A., Haensch C., Ganbaatar B. et al. Response of white birch (*Betula platyphylla* Sukaczew) to temperature and precipitation in the mountain forest steppe and taiga of northern Mongolia // Dendrochronologia. 2017. Vol. 41. P. 24–33.
- Gunin P. D., Vostokova E. A., Dorofeyuk N. I. et al. Vegetation Dynamics of Mongolia. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1999. 240 p.
- Holmes R. L. Dendrochronology program library. Users manual. Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, 1999.
- Jacoby G. C., D'Arrigo R. D., Davaajamts T. Mongolian tree rings and 20th-century warming // Science. 1996. Vol. 273. P. 771–773.
- Jolliffe I. T. Principal Component Analysis. New York: Springer-Verlag, 2002. 487 p.
- Kargas G., Kerkides P., Poulouvassilis A. Infiltration of rain water in semi-arid areas under three land surface treatments // Soil and Tillage Res. 2012. Vol. 120. P. 15–24.
- Khishigjargal M., Dulamsuren C., Leuschner H. H., Leuschner C., Hauck M. Climate effects on inter- and intra-annual larch stemwood anomalies in the Mongolian forest-steppe // Acta Oecologica. 2014. Vol. 55. P. 113–121.
- Lampurlanes J., Angas P., Cantero-Martínez C. Tillage effects on water storage during fallow, and on barley root growth and yield in two contrasting soils of the semi-arid Segarra region in Spain // Soil and Tillage Res. 2002. Vol. 65, Iss. 2. P. 207–220.
- Lu R. J., Gao S. Y., Wang Y. J. et al. Tree-ring based drought reconstruction at the northwestern margin of monsoon region of China since 1862 // Quaternary Int. 2013. Vol. 283. P. 93–97.
- Methods of Dendrochronology. Applications in the Environmental Sciences / eds. E. R. Cook, L. A. Kairiukstis. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 1990. 394 p.
- Nielsen D. C. Crop residue and soil water // Proc. Central Plains Irrigation Conf. Colby, Kansas: Central Plains Irrigation Association, 2006.
- Pederson N., Jacoby G., D'Arrigo R., Buckley B., Dugarjav C., Mijiddorj R. Hydrometeorological reconstructions for Northeastern Mongolia derived from tree rings: 1651–1995 // J. Climate. 2001. Vol. 14, Iss. 5. P. 872–881.
- 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.
- Schillinger W. F., Papendick R. I., McCool D. K. Soil and water challenges for Pacific Northwest agriculture // Soil and water conservation advances in the United States / eds. T. M. Zobeck, W. F. Schillinger. Wisconsin: Madison, 2010. P. 47–79.
- Schweingruber F. H. Tree-rings and Environment. Dendroecology. Bern; Stuttgart; Vienna: Haupt, 1996. 609 p.
- Shi Zhongjie, Xu Lihong, Dong Linshui et al. Growth-climate response and drought reconstruction from tree-ring of Mongolian pine in Hulunbuir, Northeast China // J. Plant Ecol. 2016. Vol. 9, Iss. 1. P. 51–60.
- StatSoft, Inc., 2013. Electronic Statistics Textbook. Tulsa. <http://www.statsoft.com/textbook/>.
- Tarasov P., Jin G., Wagner M. Mid-Holocene environmental and human dynamics in northeastern China reconstructed from pollen and archaeological data // Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol. 2006. Vol. 241. P. 284–300.
- Tarasov P., Williams J. W., Andreev A. et al. Satellite- and pollen-based quantitative woody cover reconstructions for northern Asia: verification and application to late-Quaternary pollen data // Earth Planet. Sci. Lett. 2007. Vol. 264. P. 284–298.
- Touchan R., Woodhouse C. A., Meko D. M., Allen C. Millennial precipitation reconstruction for the Jemez Mountains, New Mexico, reveals changing drought signal // Int. Journ. Climatol. 2011. Vol. 31. P. 896–906.
- Trouet V., Oldenborgh G. J. KNMI Climate Explorer: A web-based research tool for high-resolution paleoclimatology // Tree-Ring Res. 2013. Vol. 69, N 1. P. 3–13.
- Vaganov E. A., Anchukaitis K. J., Evans M. N. How well understood are the processes that create dendroclimatic records? A mechanistic model of the climatic control on conifer tree-ring growth dynamics // Dendroclimatology / ed. by M. K. Hughes, T. W. Swet-

- nam, H. F. Diaz. Netherlands, Dordrecht: Springer, 2011. P. 37–76.
- 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. 354 p.
- Wigley T. M. L., Briffa K. R., Jones P. D. On the average value of correlated time series, with application in dendrochronology and hydrometeorology // *J. Climate and Appl. Meteorol.* 1984. Vol. 23, N 2. P. 201–213.
- Yatagai A., Yasunari T. Interannual variations of summer precipitation in the arid/semi-arid regions in China and Mongolia: Their regionality and relation to the Asian summer monsoon // *J. Meteorol. Soc. Jpn.* 1995. Vol. 73. P. 909–923.

Radial Growth Dynamics of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) as an Indicator of the Hydrothermal Regime of the Western Transbaikalia Forest-Steppe

A. V. DEMINA¹, L. V. BELOKOPYTOVA¹, S. G. ANDREEV², T. V. KOSTYAKOVA¹,
E. A. BABUSHKINA¹

¹ *Khakasia Technical Institute, Siberian Federal University*
655017, Abakan, Shchetinkina str., 27
E-mail: baranova-anastas@mail.ru

² *Baikal Institute of Nature Management (BINM)*
670047, Ulan-Ude, Sakhyanova str., 6

Radial growth of the Scots pine growing in the forest-steppe zone of Western Transbaikalia on five sites was studied. For each site additional samples were collected, which allowed to increase reliability and build two regional chronologies. The analysis of correlations between chronology and such factors as monthly temperatures, precipitation and Selyaninov hydrothermal coefficient was performed. The analysis of a 10-day moving climatic series made it possible to clarify the periods of climate impact on growth: the basic limitation of pine growth in the region was observed by moisture availability, including conditions during the previous (from late July to late September) and current (May-mid-July) vegetative season. Also fluctuations of 23–35 years in the dynamics of climatic factors and radial growth of the pine were revealed.

Key words: radial growth, Scots pine (*Pinus sylvestris*), temperature, precipitation, Selyaninov hydrothermal coefficient, Western Transbaikalia, forest-steppe.