

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

А.В. Демина^а, *, Л.В. Белокопытова^а, С.Г. Андреев^б, Костякова Т.В. , Бабушкина Е.А.

^аХакасский технический институт Сибирского федерального университета, Абакан, 655017, Россия

^бБайкальский институт природопользования, Улан-Удэ, 670047 Бурятия, Россия

*электронная почта: baranova-anastas@mail.ru

Получено 20 января 2017 г.; в окончательном виде 28 марта 2017 г.

Аннотация. Радиальный прирост сосны обыкновенной, произрастающей в лесостепной зоне Западного Забайкалья, изучается пять сайтов. Для каждого сайта собираются дополнительные образцы, что позволяет повысить надежность и Построены две региональные хронологии. Проведен анализ корреляций хронологий с месячными температурами, осадками и гидротермическим коэффициентом Селянинова. Анализ 10-дневных скользящих климатических рядов позволяет уточнить периоды воздействия климата на прирост: основное ограничение прироста сосны в регионе наблюдается по влагообеспеченности, в том числе в условиях предшествующего (с конца июля по конец Сентябрь) и текущий (май-середина июля) вегетационные сезоны. Колебания в динамике 23–35 лет Установлены зависимости климатических факторов и радиального прироста сосны.

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

DOI: 10.1134/S1995425517050031

ВВЕДЕНИЕ

Континентальная умеренная зона Центральной Азии под влиянием довольно суровых климатических условий, отсутствия влаги в течение вегетационного периода и низкие температуры (Dulamsuren et al., 2009, 2014). Низкие температуры ограничивают рост деревьев в высокогорьях и определяют положение верхней границы деревьев (Jacoby et al., 1996). В то же время высокая годовая изменчивость осадки приводят к чередованию относительно влажных периоды и засухи, ограничивающие распространение древесных растений и их произрастание в долинах и равнинах Центральной Азии, т.е. в лесостепном экотоне (Дуламсурэн и др., 2009; Фанг и др., 2010). Это приводит к уязвимости лесостепных экосистем к колебаниям режим увлажнения в течение вегетационного периода как в результате уменьшения количества осадков, а также увеличения испарения и транспирация из-за повышения температуры. увеличение частоты и интенсивности засух зафиксировано во многих регионах Азии в рамках современных климатических изменений, что объясняет миграцию лесостепной экотон в широтном и высотном направления (Ятагай и Ясунари, 1995; Дай и Тренберт, 1998; Гунин и др., 1999; Тарасов и др., 2006, 2007 г.; Дуламсурэн и др., 2014).

В отличие от глобальной положительной тенденции температуры, количество осадков демонстрирует значительную пространственную изменчивость, особенно в регионах со сложным рельефом (например, Пед-

Эрсон и др., 2001; Батима и др., 2005; Дуламсурэн и др., 2010). В этих условиях исследования климата и его влияние на лесные экосистемы Средней Азии в региональном масштабе имеют большое значение. Один из таких регион - Западное Забайкалье. Характеризуется развитый лесостепной экотон и низкая степень Дендрозоологическое исследование. В 1999 году в этом регионе были получены данные по Радиальный прирост сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и анализ его реакции на региональные климатические и гидрологические колебания были получены (Андреев и др., 1999, 2001а, 2001б; Андреев, 2000). Мы использовали обобщенная хронология радиального прироста сосны деревья, отражающие региональную изменчивость роста широкий бассейн реки Селенги, но детальный анализ влияния местных природных и климатических условий на местные хронологии остался за пределами объем работ.

В связи с этим мы ставим перед собой следующие цели: улучшить статистическая надежность результатов и увеличение период сравнения хронологий радиального приращения с инструментальными климатическими данными путем увеличения размер выборки (количество измеренных серий радиальных прирост на делянку), оценить особенности увеличение реакции на климатические факторы в последнее время 20 лет по новому образцу, изучите пространственный реакция объединенных хронологий на движущие климатические факторы с ежемесячным и 10-дневным разрешением, и оценить возможности этих хронологий для обнаружения

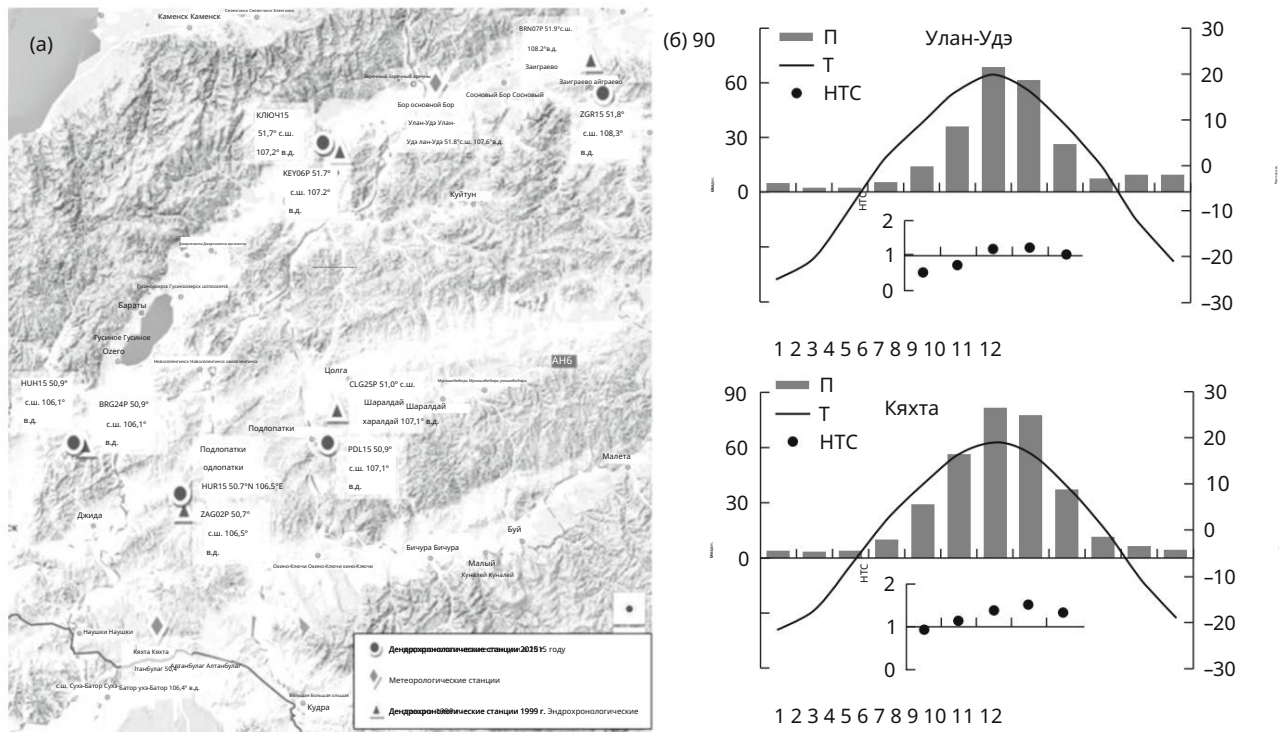


Рис. 1. Район исследований (а) и климатограммы метеостанций Улан-Удэ и Кяхта (б). Ромбы – климатические станции, треугольники – дендрохронологические станции 1999 г., кружки – дендрохронологические станции 2015 г.

многолетние колебания увлажнения в исследуемом регионе.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы для дендроэкологических исследований были собраны в лесостепи Селенгинского среднегорья Западного Забайкалья (рис. 1а).

По климатическому районированию территория исследования относится к умеренно-континентальному лесному поясу юго-западной подзоны Восточно-Сибирского ареала (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). Средняя годовая температура воздуха повсеместно отрицательная. Для региона характерны продолжительная (5,5 месяцев) и сухая зима со средней температурой января $-25,4^{\circ}\text{C}$. Зима начинается с середины октября, устойчивый снежный покров в ложбинах образуется после наступления промерзания почвы. Количество зимних осадков, выпадающих в ложбинах с декабря по февраль, невелико (от 10 до 12 мм), снег выпадает в основном в первой половине зимы. Некоторые открытые ровные участки и склоны остаются бесснежными в течение зимы из-за сдувания снега ветром и, в целом, даже с учетом накопления снега на дне котловин, высота снежного покрова

Мощность покрова не превышает 10–15 см. Это приводит к глубокому промерзанию почвогрунтов. Район исследований находится в зоне островного распространения многолетнемерзлых пород.

Для оценки влияния климата на динамику роста деревьев использовались месячные и суточные климатические данные о температуре приземного воздуха и осадках по метеостанциям Улан-Удэ (1886–2015 гг.) и Кяхты (1895–2015 гг.) (рис. 1б), а также рассчитанные по ним скользящие декадные ряды. Значения гидротермического коэффициента (ГТК) Селянинова рассчитывались с мая по сентябрь по декадам и месяцам и усреднялись для получения сезонных значений (Селянинов, 1937). Динамика ГТК сравнивалась с индексом сухости SPEI за период с августа по июль, осредненным по географическим координатам $51,5\text{--}52^{\circ}$ с.ш. $107\text{--}108,5^{\circ}$ в.д. и $50,5\text{--}51^{\circ}$ с.ш. $106\text{--}107,5^{\circ}$ в.д. (охватывающим районы сбора материала) для Улан-Удэ и Кяхты соответственно (<https://climexp.knmi.nl>, Trouet, Oldenborgh, 2013).

Месячные данные по температуре воздуха на станциях Улан-Удэ и Кяхты показывают высокую корреляцию между собой: в теплый период (апрель–октябрь) $r = 0,78\text{--}0,92$; зимой (ноябрь–март) $r = 0,83\text{--}0,91$. Корреляции месячных данных по осадкам значительно ниже: в теплый период $r = 0,21\text{--}0,45$; зимой $r = 0,02\text{--}0,24$; а по декадным суммам осадков корреляция между станциями составляет $r = 0,20\text{--}0,60$ и $r = -0,08\text{--}0,36$ в теплый и холодный периоды соответственно. Таким образом, поле температуры в исследуемой области

Таблица 1. Локализация и характеристика дендроклиматических станций

Нет.	Код сайта	Географические координаты, высота над уровнем моря, м, локализация	Краткая характеристика растительности и места произрастания
1	ZGR 51,8° с.ш. 108,8° в.д., 600 м	Западный склон Худанского хребта, долина реки Илька, восточная часть села Заиграево	Западный пологий склон: 1°–2°. Сосновый лес на песках. Разновозрастной. h ~ 20 м, Ø ~ 50–60 см. Кустарнички: 5%, травянистый покров: 5%. Следы многочисленных пожаров.
2	КЛЮЧ 51,7° с.ш. 107,2° в.д., 700 м.	Иволгинский район, 1,5 км южнее села Ключи.	Западный склон: 20°. Мертвопокровно-лишайниковый сосняк. Разновозрастной. h ~ 22–24 м, Ø ~ до 40 см. Кустарничков нет, травянистый покров: 15% (сухие злаки), мохово-лишайниковый покров: 5% (до 40% в понижении сухого сброса). Почва примитивная с включениями камней.
3	PDL 51,0° с.ш. 107,1° в.д., 600 м. Мухомобирский район, южная граница с. Подлопатка, Хилок Река		Дно Тугнуйской котловины: 0°. Остепненный сосновый лес на песках бугров. Проективное покрытие: 0,1 (редкие насаждения). Одновозрастной. h ~ до 20 м, Ø ~ 60–80 см. Травянистый и кустарниковый покров отсутствует. Песчаная почва на аллювиальных отложениях.
4	HUN 50,9° с.ш., 106,1° в.д., 700 м.	Селенгинские горы, 9 км к западу от села Селендума	Вершина холма и ее северный склон: 15°–20°. Осоковый и мертвопокровный сосновый лес. Покрытие: 0,3–0,4. Хорошее размножение. h ~ 22 м, Ø ~ 48–52 см. Кустарнички: 5%, травянистый покров: 40%, подстилка: 30%. Супесь с крупной галькой и включениями камней.
5	часов 50,7° с.ш., 106,5° в.д., 850 м.	Кяхтинский район, Хурайский хребет.	Западный склон котловины сухого сброса: 5°. Сосновый лес злаково-разнотравный мертвопокровный. h ~ 15 м, Ø ~ до 60 см. Травянисто-кустарниковый покров отсутствует. Кустарнички сосна. Почва супесчаная на карбонатных породах. Следы многочисленных пожаров. В котловине сухого сброса сохранились самые старые деревья.

территория относительно однородна, и осадки в север и юг региона существенно различаются. Значения ГТК на севере и юге

исследуемой области значительно коррелируют, но в некоторой степени меньшая степень, чем температура: $r = 0,25–0,65$; корреляция между годовыми рядами индекса SPEI для север и юг области составляет 0,69.

На территории Селенгинского среднегорья в межгорных впадинах и склонах широких В долинах формируются ландшафты сосново-лиственничных лесов, глубоко проникающих в степи. Сбор образцов (керна) сосны были выполнены на пяти участках, расположенных вблизи мест сбора материалов в 1998–1999 гг. (Рис. 1а). Сеть охватывала центральные и южные районы части среднегорья Селенги. Это районы притоков Селенги: Чикой и Хилок; пойма реки Илька; и Хилокский, Тугнуйский и Гусиноозерская котловины, расположенные между отрогами хребты Цаган-Дабан, Боргойский, Заганский и Худанский (таблица 1).

Сбор, транспортировка и первичная обработка кернов производились с использованием стандартных методы дендрохронологии (Шиятов и др., 2000),

и измерения радиального прироста были сделаны с измерительная система LINTAB 5 со специализированными Пакет TSAP Win с точностью 0,01 мм (Ринн, 2011). Датировка образцов (определение календарный год для каждого кольца) был подтвержден кросс-корреляционным анализом в специализированном COFECNA программа (Холмс, 1999). Дальнейшая процедура стандартизации (индексации) проводилась с помощью Программа ARSTAN (Кук и Крушик, 2005). стандартизация отдельных серий, в первую очередь этапе мы удалили возрастную тенденцию, для описания которые мы использовали отрицательную экспоненциальную и линейную функции. На втором этапе мы удалили автокорреляционную зависимость первого порядка. После каждого этапа отдельные индексированные ряды прироста были усреднены для получения местных и региональных стандартных и остаточных хронологии (Шиятов и др., 2000). Объединение локальные хронологии на группы с максимальным Сходство динамики радиального прироста было проведенных по их иерархической классификации (метод полной связи; мерой сходства были коэффициенты корреляции между хронологиями в течение общий период 1807–2015 гг.) с учетом

Географическое положение пунктов сбора и метеостанций, выполненное с помощью программы STATISTICA (Statsoft, 2013). Локальные хронологии были интегрированы в региональные с использованием метода первого главный компонент (Joliffe, 2002; Touchan et al., 2011).

Мы использовали следующие статистические характеристики хронологии: среднее арифметическое, стандартное отклонение, средний коэффициент чувствительности (отношение разницы между двумя соседними значениями переменной к их среднее арифметическое, усредненное по всей серии), и коэффициент автокорреляции первого порядка (Фриттс, 1976; Wigley et al., 1984). Коэффициент чувствительности позволяет оценить изменчивость радиального прироста под воздействием быстроменяющихся внешних факторов, в первую очередь климатических.

Зависимость радиального прироста деревьев с климатическими факторами оценивалась по корреляции коэффициенты между индексированными хронологиями годовых колец и температурой, осадками и ГТК в различные периоды (10-дневные, ежемесячные и для нескольких месяцев) с июля предыдущего года по август текущего года текущего года (Фриттс, 1976; Швайнгрубер, 1996). Для анализ более длительных колебаний роста сосны и климатические переменные, соответствующие ряды были сглажены с использованием кубического сглаживания трендов с фиксированной длиной окна 11 лет в программе ARSTAN (Кук и Krusic, 2005); затем мы провели корреляционный анализ сглаженных рядов. Для этого шага мы использовали стандартные хронологии радиального приращения, поскольку они сохраняют большую долю низкочастотной изменчивости чем остаточная изменчивость (Методы..., 1990).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Первоначально для каждого участка были разработаны местные хронологии Радиальный прирост деревьев сосны строился отдельно для образцов, отобранных в 1999 и 2015 годах. Коэффициенты корреляции между локальными хронологиями территориально близких образцов, отобранных в разные годы, были 0,63–0,95, что позволяет нам строить более обобщенные локальные хронологии для каждого участка из объединенной выборки в 1999 и 2015 годах (рис. 2). Что касается периода сравнение добавлено после припоминания материалов (1996–2015) по хронологиям радиального приращения с инструментальные климатические данные в стандартных хронологиях два северных участка (ЗГР и КИ), индексы прирост показал отрицательную тенденцию: средний уменьшаться на 0,04 в год ($R^2 = 0,32-0,54$). Это в соответствии с тенденцией годового количества осадков в метеостанция Улан-Удэ в тот же период, показывает снижение в среднем на 4,3 мм/год ($R^2 = 0,23$). Значимых тенденций в радиальном прирост сосны (PDL, HUN и HUR) и в годовая сумма осадков в южной части учебная зона.

Принимая во внимание тенденции в динамике радиального прироста, значения коэффициентов корреляции

Таблица 2. Коэффициенты корреляции между локальными

стандартизированными древесно-кольцевыми хронологиями (после объединения территориально близких выборок в 1999 и 2015 гг.)

	КЛЮЧ PDL	HUN HUR		
ЗГР	$\frac{0,65}{0,51}$	$\frac{0,61}{0,52}$	$\frac{0,45}{0,41}$	$\frac{0,48}{0,46}$
КЛЮЧ		$\frac{0,55}{0,52}$	$\frac{0,60}{0,58}$	$\frac{0,52}{0,50}$
ПДЛ			$\frac{0,60}{0,59}$	$\frac{0,70}{0,72}$
ХМ				$\frac{0,77}{0,76}$

* Числитель содержит коэффициенты корреляции для стандарта хронологии; знаменатель содержит те, которые для остаточных. Все Коэффициенты корреляции значимы при $p < 0,05$.

между местными хронологиями, а также расположением мест отбора проб и метеорологических станций на карте, все Местные хронологии были разделены на две группы (таблица 2, Рис. 3). В результате обобщения получили две региональные хронологии: северная BUR-N и южный BUR-S, имеющий высокую корреляцию между каждым другие — $r = 0,77$ для стандарта и $r = 0,66$ для остаточного хронологии (рис. 2). Процент дисперсии дисперсия радиального прироста сосны, объясняемая первым главным компонент, на севере исследуемой области - 51,5%, а на юге — 72,7%.

Статистические характеристики обобщенных хронологий приведены в таблице 3. Межсерийные коэффициенты корреляции показывают наличие сильной общей связи. внешний сигнал на местном и региональном уровнях в Динамика прироста сосны. Это также подтверждается высокими значениями стандартного отклонения и коэффициента чувствительности. Увеличение размера выборки (число серий) привело к более высоким значениям выраженных Популяционный сигнал на всем протяжении хронологий. Их превышение над пороговым значением 0,85 для северная и южная региональные хронологии были наблюдалось с 1733 и 1786 годов соответственно, что является примерно на 80 лет раньше, чем в выборке 1999 года. Стандартные хронологии, особенно на севере исследования области, характеризуются высокой автокорреляцией первого порядка, отражающая зависимость приращения текущий год от роста деревьев и внешних условий предыдущего года. Кроме того, все хронологии имеют практически те же годы-указатели: максимальные значения индексов прироста приходятся на 1782–1783, 1820, 1886, 1891, 1908–1909, 1911–1912, 1918, 1927 и 1933, а минимальные приходятся на 1794, 1823, 1863, 1874, 1956 и 1980–1982. В целом статистические характеристики хронологий указывают на их пригодность для дендрологические исследования.

Дендроклиматический корреляционный анализ показал слабую кумулятивный отрицательный эффект на прирост сосны температуры вегетационного периода, которые более

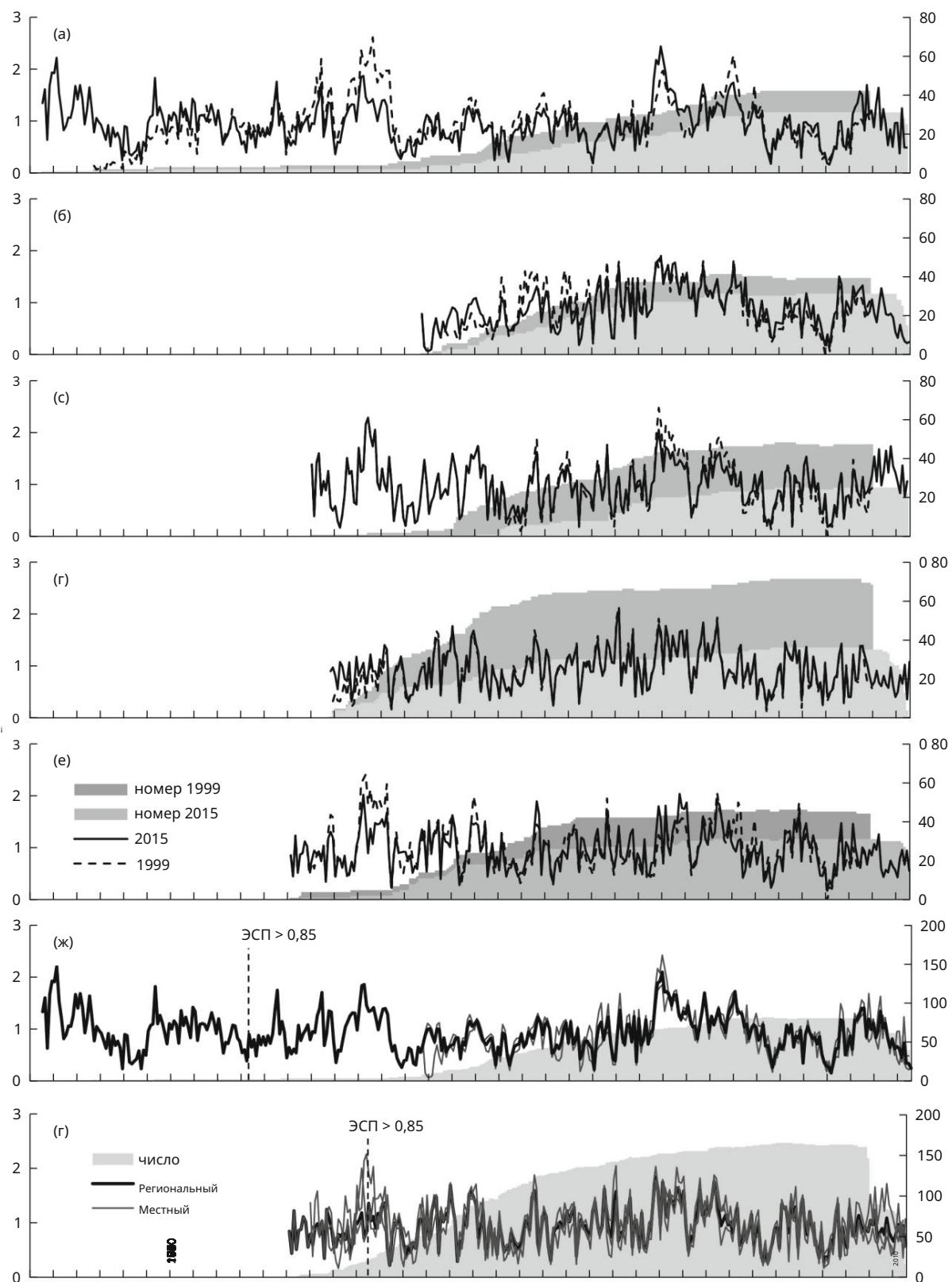


Рис. 2. Динамика радиального прироста сосны: локальная (сборы 1999 и 2015 гг.) и региональная стандартная хронологии с указанием размера выборки для каждого года: (а) ZGR, (б) KEY, (в) PDL, (д) HUN, (е) HUR, (ф) BUR-N и (г) BUR-S.

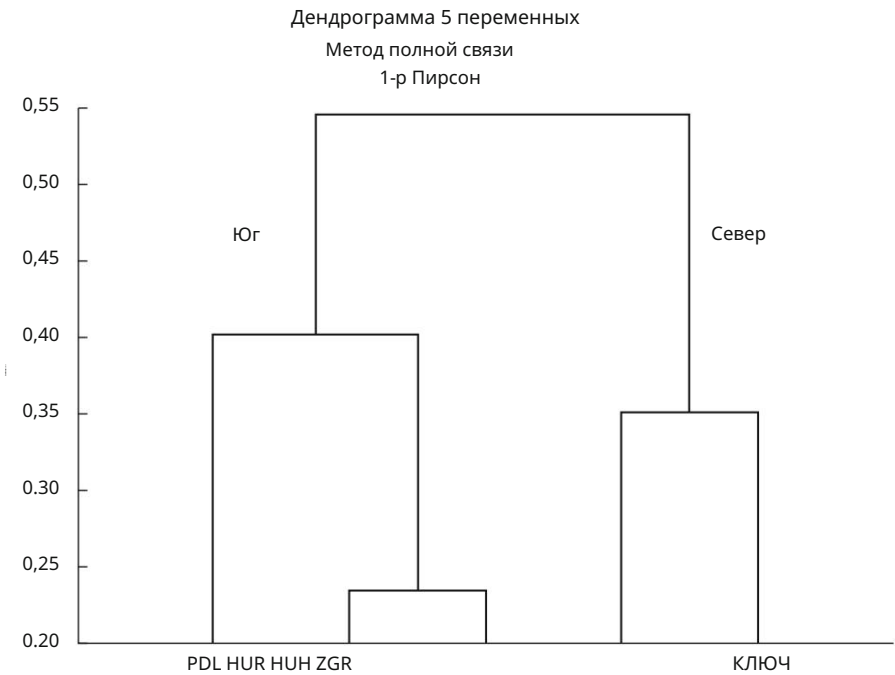


Рис. 3. Иерархическая классификация стандартных локальных хронологий радиального прироста сосны.

выраженный в северной части исследуемой территории (рис. 4а, 4б). В первой половине сезона (май–июля) колебания температуры отражаются на текущее годовое кольцо и во второй половине (август–Сентябрь) в кольце следующего года. На севере, наблюдалось отрицательное влияние на прирост для зимних температур ноября, декабря и Март. В южной части зимняя температура не оказывает существенного влияния на прирост. Ответ на осадки с мая–июня по сентябрь положительные

Таблица 3. Статистические характеристики индексированных древесно-кольцевых хронологий

Характеристика	ZGR	KEY	PDL	HUH	HUR	BUR-N	BUR-S				
Общая характеристика											
Продолжительность, лет	370	209	255	248	265	370	265				
Период, лет	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 годовых колец	6573	6110	6956	13250	8130	12683	28336				
Характеристики индексированных хронологий*											
Средний межсериальный коэффициент корреляции	0,56	0,47	0,51	0,59	0,57	0,48	0,48				
	0,49	0,53	0,56	0,64	0,61	0,44	0,51				
Выраженный популяционный сигнал	0,89	0,97	0,96	0,99	0,98	0,90	0,99				
	0,88	0,97	0,97	0,99	0,98	0,89	0,99				
Стандартное отклонение	0,39	0,39	0,42	0,37	0,39	0,36	0,33				
	0,27	0,28	0,34	0,33	0,32	0,26	0,30				
Коэффициент чувствительности	0,28	0,32	0,37	0,38	0,35	0,27	0,33				
	0,32	0,32	0,42	0,42	0,40	0,30	0,39				
Коэффициент автокорреляции 1-го порядка	0,69	0,63	0,55	0,39	0,47	0,69	0,42				
	0,11	0,02	0,01	0,08	0,08	0,09	0,15				
Коэффициенты корреляции между стандартной и остаточной хронологиями	0,66	0,79	0,80	0,91	0,86	0,68	0,90				

* В числителе указаны коэффициенты для стандартных хронологий; в знаменателе указаны коэффициенты для остаточных хронологий.

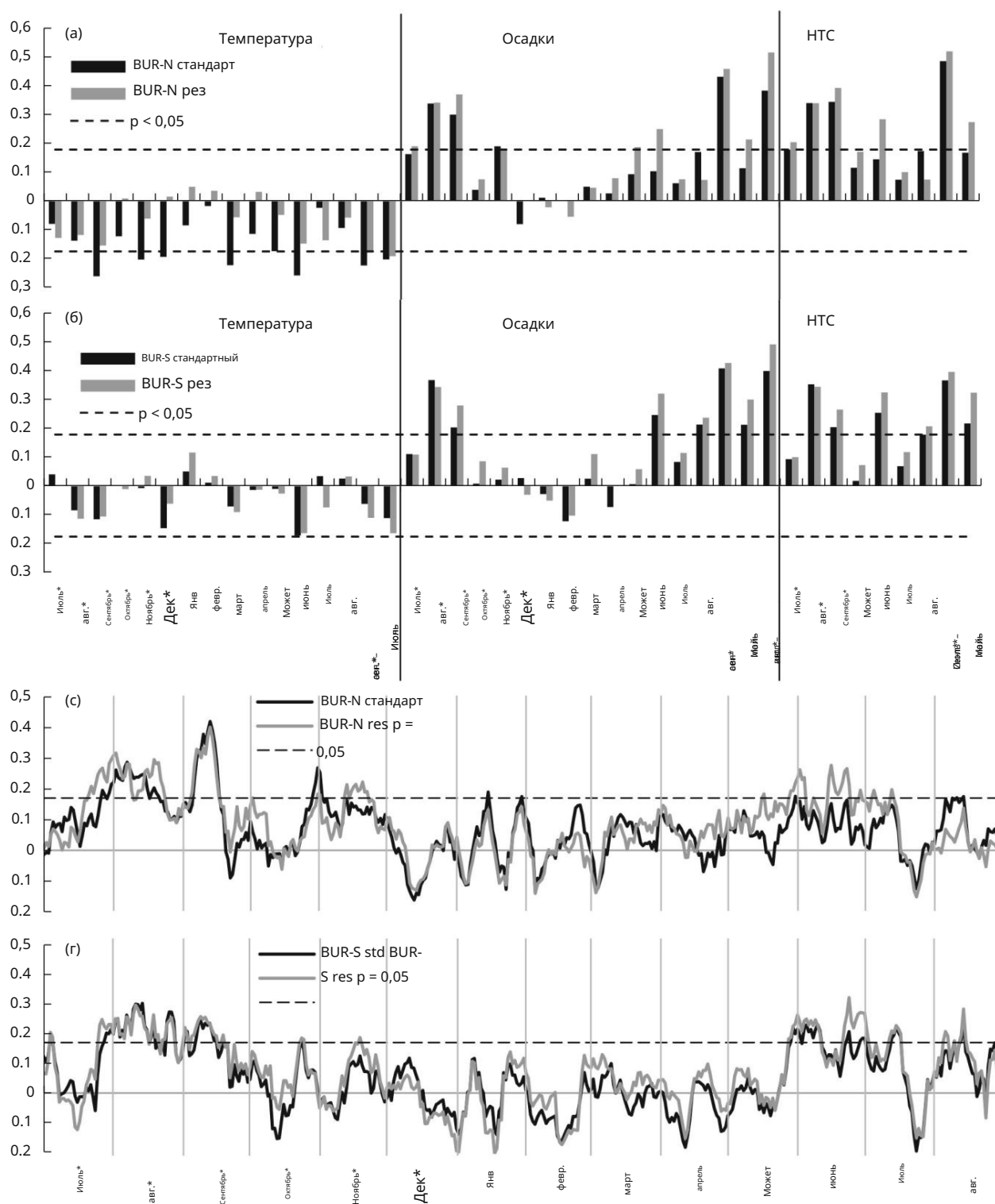


Рис. 4. Коэффициенты корреляции индексированных региональных хронологий с климатическими факторами: а) хронологии BUR-N и месячных температур, осадков и ГТК; б) хронологии BUR-S и месячных температур, осадков и ГТК; в) хронологии BUR-N и декадных сумм осадков по данным климатической станции Улан-Удэ; г) хронологии BUR-S и декадных сумм осадков по данным климатической станции Кяхта.

и сильнее, чем на температуру. Наиболее сильно на радиальный прирост влияют осадки во второй половине предыдущего вегетационного сезона. Осадки мая–июня текущего сезона влияют на прирост слабее, и отклик сильнее выражен в остаточных хронологиях. В зимний период осадки незначительны, и их положительное влияние значимо только в ноябре для севера исследуемой территории. Годовое количество осадков максимально отражается на радиальном приросте в период с августа по июль. Гидротермический коэффициент объединяет температуру и осадки, поэтому отклик радиального прироста сосны на ее колебания несколько выше, чем на осадки, но имеет те же закономерности. Проверка возможности использования ИПВ в качестве интегрального показателя увлажнения показала, что его корреляция с радиальным приростом сосны ниже ГТК тех же месяцев на 0,05–0,1, при той же закономерности.

Анализ 10-дневных рядов климатических факторов позволил определить периоды влияния климата на прирост в течение вегетационного сезона; радиальный прирост наиболее чувствителен к осадкам третьей декады мая – первой декады июня. Влияние на текущий прирост наблюдается до второй декады июля включительно (рис. 4в, 4г). Начиная с третьей декады июля и до конца сентября климатический фактор влияет на прирост следующего года. Таким образом, в каждом годичном кольце максимальное влияние годовой суммы осадков должно наблюдаться в период с третьей декады июля предыдущего года по вторую декаду июля текущего года. Действительно, корреляции осадков в этот период с хронологиями прироста сосны составляют $r = 0,43\text{--}0,61$, тогда как в период с августа по июль $r = 0,38\text{--}0,51$. Что касается температур и ГТК, то максимальную корреляцию с приростом проявляют значения этих величин, усредненные за период суммы с третьей декады июля по третью декаду сентября предыдущего года и с третьей декады мая по вторую декаду июля текущего года, то есть фактически за один и тот же годовой период, за исключением его холодной части. Значения корреляций составляют $r = 0,42\text{--}0,64$ для ГТК и $r = -0,27\text{--}-0,19$ для температур.

Для оценки отражения долговременных климатических колебаний в приросте сосны нами были проанализированы ряды климатических факторов для выделенных периодов максимального отклика, сглаженные с 11-летним окном, и сопоставлены с соответствующими сглаженными стандартными хронологиями прироста (рис. 5). Для всей исследуемой территории характерен длительный период снижения прироста в жаркие и сухие периоды. Климатически обусловленные депрессии прироста в 1951–1961 и 1975–1985 гг. наблюдались в обеих хронологиях (ср. с контрольными годами 1956 и 1980–1982 гг.). После 2000 г. наблюдалось выраженное снижение прироста на севере, синхронное с отмеченным выше отрицательным трендом осадков. Это подтверждается

Коэффициенты корреляции сглаженных рядов климатических переменных и приращения: $r = 0,37\text{--}0,72$, $0,45\text{--}0,77$ и $-0,11\text{--}-0,30$ для ГТК, осадков и температуры соответственно.

ОБСУЖДЕНИЕ

Высокая согласованность дендрохронологических данных 1999 и 2015 гг. позволила получить локальные и региональные хронологии с более выраженным популяционным сигналом, а значит, более достоверно отражающие общий внешний сигнал. Расширение выборки путем повторной выборки позволило выявить различия в динамике прироста внутри региона за последние десятилетия, связанные с разными тенденциями климатической динамики на севере и юге. Это связано с уменьшением годового количества осадков по данным метеостанции Улан-Удэ. Однако однородность температурных условий и значимые корреляции между осадками на севере и юге области обуславливают высокое сходство динамики прироста в пределах всего исследуемого региона, что позволяет использовать две региональные хронологии (отражающие климатическую динамику на севере и юге соответственно) и одну общую хронологию, использовавшуюся в предыдущих исследованиях изменений окружающей среды в более крупном пространственном масштабе (Андреев и др., 1999, 2000, 2001а, 2001б).

Общие закономерности реакции прироста сосны на климат типичны для аридных регионов континентального умеренного пояса Центральной Азии и обусловлены малым количеством осадков, выпадающих преимущественно в теплый период года, высокой сезонной амплитудой температур, сочетанием жаркого лета и морозной зимы (Суворова и др., 2005; Магда, Ваганов, 2006; Бабушкина, Белокопытова, 2014; Бочаров, Савчук, 2015; Муханов и др., 2015; Лу и др., 2013; Ши и др., 2016; Градель и др., 2017).

Север региона характеризуется более суровыми климатическими условиями из-за более морозных зим и меньшего количества осадков, что обуславливает большую интенсивность климатической реакции.

Определенные по декадным климатическим данным временные границы отклика указывают на конец июля как на приблизительное время окончания активного радиального прироста сосны в этом регионе. К этому времени завершаются процессы деления клеток и их роста растяжением. Формирование вторичных клеточных стенок в поздней древесине, продолжающееся до конца сентября, не вносит вклад в ширину текущего кольца (Бабушкина и др., 2010; Cuny and Rathgeber, 2014; Бабушкина и Белокопытова, 2015). Однако в этот период полученные растениями ассимиляты используются не только для построения клеточных стенок древесины, но и запасаются растением для использования в следующем вегетационном сезоне (Судачкова, 1977).

Однако из-за различий между отдельными деревьями в сроках стадий формирования древесины (например, доминирующие деревья имеют более длительный период активности

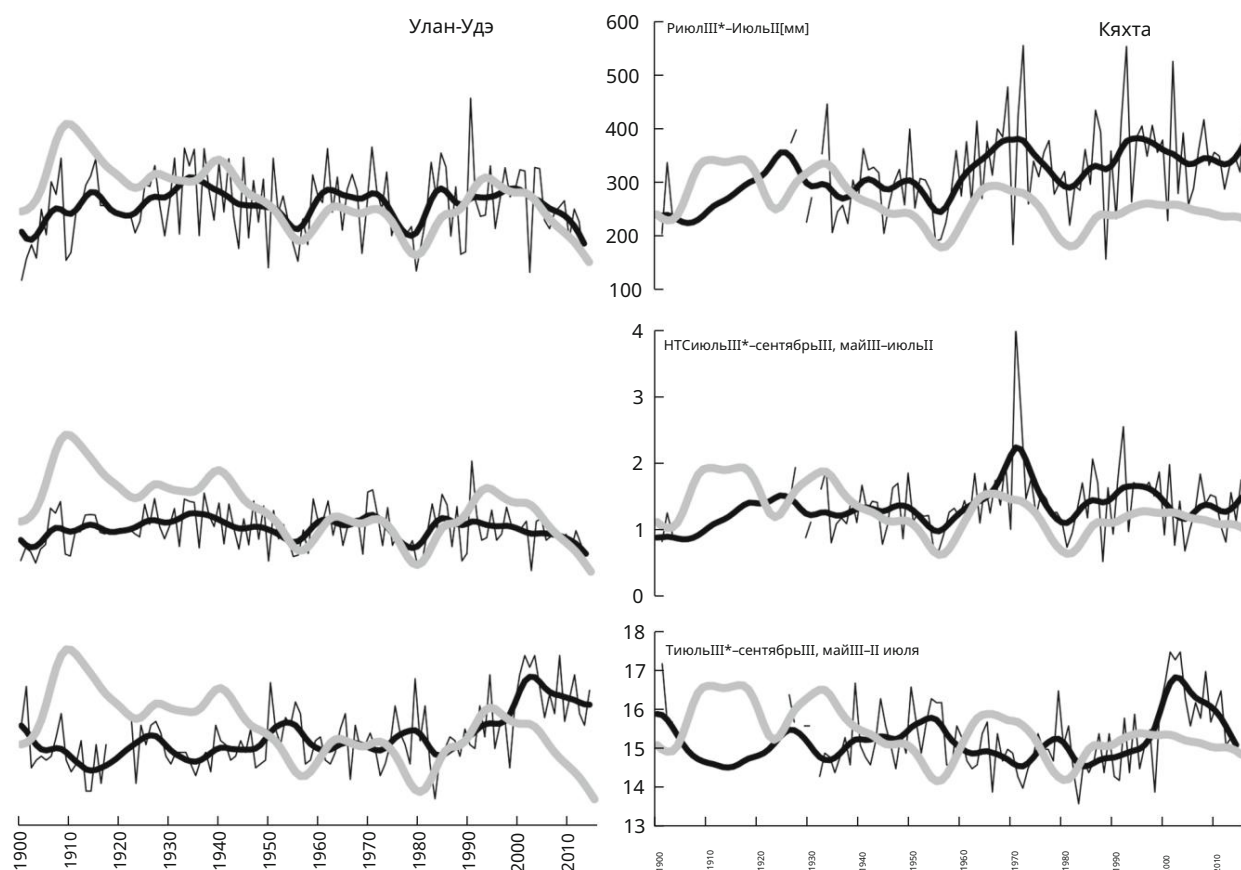


Рис. 5. Межгодовые и сглаженные 11-летними сплайнами колебания климатических факторов, наиболее значимых для прироста сосны. Серыми линиями обозначены соответствующие сглаженные стандартные древесно-кольцевые хронологии, приведенные для сравнения

камбия, чем угнетенных (ср. Бабушкина и др., 2015)) и климатически обусловленных межгодовых колебаний этих сроков, в первой половине августа также наблюдается слабая реакция прироста сосны на осадки.

Начиная с конца июля температура воздуха постепенно снижается, что даже при снижении количества осадков приводит к постепенному увеличению запасов влаги в почве вплоть до момента ее замерзания. Имеются следующие данные по оценке эффективности накопления влаги из осадков в почве: 9% во второй половине лета и до 66% в конце осени (при сохранении растительной массы на полях) для сельскохозяйственных аридных регионов США (Фарахани, 1998; Нильсен, 2006). В естественном лесостепном ландшафте Забайкалья на песчаных и каменистых почвах и при покрытии травянистой растительностью 10–15%, характерном для мест отбора образцов, запасание влаги менее эффективно, но отмеченные выше закономерности имеют место (ср.

Lampurlanes et al., 2002; Kargas et al., 2012). В начале зимы температуры резко падают, что при малом снежном покрове приводит к быстрому промерзанию корнеобитаемого слоя почвы и консервации содержащейся в нем воды до оттаивания в конце зимы.

начало вегетационного сезона (Роде, 1965; Шильдингер и др., 2010). Небольшое количество зимних осадков в условиях предгорий приводит к формированию небольшого снежного покрова и его сдуванию в понижения рельефа. В результате снег не вносит существенного вклада в весеннюю влагообеспеченность почвы. С другой стороны, в ноябре–декабре и марте температуры могут регулировать влагообеспеченность почвы (Дуламсурэн и др., 2011; Хишигджаргал и др., 2014; Градель и др., 2017). Следует отметить, что сосна, как вечнозеленое хвойное растение, в исследуемом регионе начинает свой рост в апреле–мае (Судачкова, 1977; Суворов, 2005). Поэтому осадки, накопленные в почве со второй половины предыдущего теплого сезона, являются существенным источником влаги с начала вегетации до третьей декады мая.

К этому времени запасы почвенной влаги исчерпываются за счет ее использования растительностью и испарения при повышении температуры, и основным источником воды становятся текущие осадки. В результате годовой радиальный прирост сосны интегрирует влияние климатических факторов в период с третьей декады предыдущего июля по вторую декаду текущего июля с преобладанием воздействия климата теплого сезона.

Изменчивость прироста сосны имеет выраженную низкочастотную составляющую, обусловленную многолетними колебаниями осадков и температуры. В связи с более суровыми климатическими условиями на севере исследуемой территории амплитуда низкочастотных колебаний прироста там существенно выше, чем на юге. Несмотря на региональные различия, в обеих хронологиях наблюдаются практически синхронные циклы продолжительностью 23–35 лет, характерные для цикличности колебаний режима увлажнения (осадки, показатели увлажнения, гидрологические переменные) и наблюдавшиеся ранее в древесно-кольцевых хронологиях (Шнитников, 1969; Балыбина, 2006; Муханова и др., 2015). Однако из-за пространственной неравномерности распределения осадков полученные циклы, годы-пойнтеры и более продолжительные засушливые/влажные периоды не совпадают с наблюдаемыми для других регионов Сибири, Монголии и Северного Китая (Балыбина, 2006; Лу и др., 2013; Муханова и др., 2015; Ши и др., 2016).

ВЫВОДЫ

Анализ связей радиальных приростов сосны обыкновенной в лесостепи Западного Забайкалья с климатическими переменными, проведенный с использованием большого объема данных, позволил выделить наиболее значимые периоды формирования годичных колец. Основное ограничение прироста сосны в регионе наблюдается по влагообеспеченности, в том числе условиями предыдущего (с 20 июля по 30 сентября) и текущего (с 20 мая по 20 июля) вегетационных сезонов. При этом проводником влияния условий предыдущего теплого сезона является почва как резервуар, удерживающий влагу в зимний период. Неоднородность изменчивости осадков в пределах исследуемой территории привела к различиям между ее северной и южной частями в динамике прироста сосны и ее климатической реакции. При большом пространственном масштабе это обусловило несоответствие контрольных лет и многолетних колебаний прироста хронологиям других регионов.

Предложенные в работе механизмы влияния климатических переменных на формирование древесины хвойных пород нуждаются в дальнейшей проверке. Поэтому наибольший интерес представляют следующие направления исследований: сравнительный анализ различных регионов в пределах лесостепного экотона и анализ связей изменчивости древесно-кольцевых хронологий с глобальными климатическими колебаниями. Выделение особенностей физиологических реакций древесины может быть полезным для моделирования ее формирования в данных климатических условиях на клеточном уровне с использованием имитационной модели Ваганова–Шашкина (Ваганов и др., 2006, 2011).

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа была поддержана Российским фондом. на фундаментальные исследования, проект № 17-04-00315А.

ССЫЛКИ

- Алисов, Б.П., Климат СССР, Москва
корова: МГУ, 1956.
- Андреев, С., К проблеме мониторинга гидрологического режима в Байкальском регионе с использованием дендрохронологических методов, Труды Международной конференции по прошедшим глобальным изменениям (PAGES) «Климатические изменения верхнего плейстоцена и голоцена», 6–9 сентября 2000 г., Прага, 2000, стр. 69–71.
- Андреев С.Г., Ваганов Е.А., Наурзбаев М.М., Тулохонов А.К. Регистрация многолетних изменений атмосферных осадков, стока реки Селенги и уровня озера Байкал по годичным кольцам сосны // Докл. Науки о Земле, 1999, т. 368, стр. 1008–1011.
- Андреев С.Г., Тулохонов А.К., Наурзбаев М.М. Региональная динамика роста сосны в степной зоне Бурятии // Геогр. Природ. Ресур., 2001а, вып. 1, стр. 73–78.
- Андреев С.Г., Ваганов Е.А., Наурзбаев М.М., Тулохонов А.К. Радиальный рост деревьев как индикатор длительных изменений гидрологического режима в бассейне оз. Байкал // Геогр. Природ. Ресур., 2001б, вып. 4, стр. 49–54.
- Бабушкина Е.А., Белокопытова Л.В. Климатический сигнал в радиальном приросте хвойных деревьев лесостепи Южной Сибири и его зависимость от локальных условий произрастания // Экология. – 2014. – Т. 45, № 5. – С. 325–332.
- Бабушкина Е.А., Белокопытова Л.В. Камбиальная зона как центральный объект воздействия внешних факторов на развитие годичных колец хвойных пород // Изв. Учебн. Завед., Лесн. Ж., 2015, вып. 6, стр. 35–45.
- Бабушкина Е.А., Ваганов Е.А., Силкин П.П. Влияние климатических факторов на ячеистую структуру годичных колец хвойных пород, произрастающих в разных топоэкологических условиях лесостепной зоны Хакасии // Журн. Сиб. Федеральный университет, Биол., 2010, т. 3, № 2, стр. 159–176.
- Бабушкина Е.А., Ваганов Е.А., Белокопытова Л.В., Шишов В.В., Грачев А.М. Эффект конкурентоспособности в реакции радиального прироста сосны обыкновенной на климат в лесостепи юга Центральной Сибири // Древесные кольца. 2015. Т. 71. № 2. С. 106–117.
- Балыбина А.С. Климатические факторы динамики радиального прироста хвойных пород Приангарья // Вычислит. Технол., 2006, вып. 11, стр. 104–108.
- Батима, П., Нацагдорж, Л., Гомблудэв, П. и Эрдэ-нэцэг, Б., Наблюдаемое изменение климата в Монголии, рабочий документ AIACC № 12, Вашингтон, округ Колумбия: Ass. Воздействия Адаптация. Климат. Изменение, 2005, т. 12, стр. 1–26.
- Бочаров А.Ю., Савчук Д.А. Структура леса и климатическая реакция деревьев в контактной зоне «лес-степь» (Горный Алтай) // Журн. биологии Сибирского федерального университета. 2015. Т. 8, № 4. С. 426–440.
- Кук, Э.Р. и Крушик, П.Дж., Программа ARSTAN (версия 41d), 2005. <http://www.ldeo.columbia.edu/tree-ring-laboratory/resources/software>.
- Куни, Х.Э. и Ратгебер, СВК, Синтез сюр-функции и регулирования процесса клеточного формирования леса, преп. Фор. Пт., 2014, вып. 67, нет. 6, стр. 761–777.
- Дай, А. и Тренберт, К.Е., Глобальные изменения засух и влажных периодов: 1900–1995 гг., Geophys. Res. Lett., 1998, т. 25, стр. 3367–3370.

- Дуламсурэн, К., Хаук, М., Бадер, М. и др., Водные отношения и эффективность фотосинтеза у *Larix sibirica*, произрастающей в лесостепном экотоне северной Монголии, *Tree Physiol.*, 2009, т. 29, стр. 99–110.
- Дуламсурэн, К., Хаук, М., Хишигджаргал, М. и др., Расходящиеся климатические тенденции в таежных лесах Монголии влияют на рост и возобновление *Larix sibirica*, *Oecologia*, 2010, т. 163, стр. 1091–102.
- Дуламсурэн, К., Хаук, М., Лейшнер, Х.Х. и Лейшнер, К., Климатическая реакция ширины годовых колец у *Larix sibirica*, произрастающей в засушливых лесостепных условиях северной Монголии, *Ann. For. Sci.*, 2011, т. 68, № 2, стр. 275–282.
- Дуламсурэн, Ч., Хишигджаргал, М., Лейшнер, Ч. и др., Реакция ширины годовых колец на потепление климата и выборочные рубки в лиственных лесах Монгольского Алтая, *J. Plant Ecol.*, 2014, т. 7, № 1, стр. 24–38.
- Фадеева Н. В., Селенгинское Среднегорье (Селенгинское Среднегорье), Улан-Удэ: Бурят. Книжн. Изд., 1963.
- Фан, К., Гоу, С., Чен, Ф. и др., Сравнение изменчивости засухи между Центральной Высокой Азией и муссонной Азией: выводы из годовых колец деревьев, *Front. Earth Sci. China*, 2010, т. 4, стр. 277–288.
- Фарахани, Х. Дж., Петерсон, Г. А., Вестфолл, Д. Г., Шеррод, Л. А. и Ахуджа, Л. Р., Запасы почвенной воды в системах земледелия на засушливых землях: значение интенсификации земледелия, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1998, т. 62, № 4, стр. 984–991.
- Фриттс, ХК, Годичное кольцо и климат, Лондон: Академический, 1976.
- Градель А., Хенш К., Ганбаатар Б. и др., Реакция березы белой (*Betula platyphylla Sukacshchev*) на температуру и осадки в горной лесостепи и тайге северной Монголии, *Дендрохронология*, 2017, том . 41, стр. 24–33.
- Гунин П.Д., Востокова Е.А., Дорофеюк Н.И. и др. Динамика растительности Монголии. Дордрехт: Kluwer, 1999.
- Холмс, Р. Л., Библиотека программы дендрохронологии. Руководство пользователя, Тусон: Университет Аризоны, 1999.
- Якоби, Г. К., Д'Арриго, Р. Д. и Давааджамтс, Т., Годичные кольца монгольских деревьев и потепление 20-го века, *Science*, 1996, т. 273, стр. 771–773.
- Джоллифф, И.Т., Анализ главных компонент, Нью-Йорк: Springer-Verlag, 2002.
- Каргас, Г., Керкидес, П. и Пуловассилис, А., Инфильтрация дождевой воды в полусухих районах при трех видах обработки поверхности земли, *Soil Tillage Res.*, 2012, т. 120, стр. 15–24.
- Хишигджаргал, М., Дуламсурэн, К., Лейшнер, Х. Х., Лейшнер, К. и Хаук, М., Влияние климата на меж- и внутригодовые аномалии стволовой древесины лиственницы в лесостепи Монголии, *Acta Oecol.*, 2014, т. 55, стр. 113–121.
- Лампурланес, Дж., Ангас, П. и Кантеро-Мартинес, К., Влияние обработки почвы на сохранение воды во время парования, а также на рост корней и урожайность ячменя на двух контрастных почвах полусухого региона Сегарра в Испании, *Soil Tillage Res.*, 2002, т. 65, № 2, стр. 207–220.
- Лу, Р. Дж., Гао, С. Й., Ван, И. Дж. и др., Реконструкция засухи на основе годовых колец на северо-западной окраине муссонного региона Китая с 1862 г., *Quat. Int.*, 2013, т. 283, стр. 93–97.
- Магда В.Н., Ваганов Е.А. Климатическая реакция роста деревьев в горных лесостепях Алтае-Саянского региона // *Известия РАН, Серия география*, 2006, № 5, с. 92–100.
- Методы дендрохронологии. Приложения в науках об окружающей среде, Кук, Э.Р. и Кайрюкстис, Л.А., ред., Дордрехт: Kluwer, 1990.
- Муханова М. В., Сыромятина М. В., Чистяков К. В. Динамика роста лиственницы сибирской в горах Тувы и Монгольского Алтая // *Геогр. Нат. Ресурс.*, 2015, вып. 36, нет. 1, стр. 79–85.
- Нильсен, Д.К., Остатки урожая и почвенная влага, Труды конференции по ирригации Центральных равнин, Колби: Ассоциация ирригации Центральных равнин, 2006.
- Педерсон, Н., Якоби, Г., Д'Арриго, Р., Багли, Б., Дугаржав, К. и Миджиддорж, Р., Гидрометеорологические реконструкции для северо-восточной Монголии, полученные на основе годовых колец деревьев: 1651–1995, *J. Clim.*, 2001, т. 14, № 5, стр. 872–881.
- Ринн, Ф., TSAP Win. Анализ и представление временных рядов для дендрохронологии и смежных приложений. Версия 4/64 для Microsoft Windows: Справочник пользователя, Гейдельберг, 2011.
- Роде А. А. Основы учения о почвенной влажности . М.: Гидрометеиздат, 1965, т. 1, с. 1.
- Шиллингер, У. Ф., Папендик, Р. И. и МакКул, Д. К., Проблемы почвы и воды в сельском хозяйстве Тихоокеанского северо-запада, в книге «Достижения в области сохранения почвы и воды в Соединенных Штатах», под ред. Зобека, Т. М. и Шиллингера, У. Ф., Мэдисон, 2010. стр. 47–79.
- Швайнгрубер, Ф. Х., Годичные кольца и окружающая среда. Дендрозология, Берн: Paul Haupt, 1996.
- Селянинов Г.Т. Метод сельскохозяйственной характеристики климата // *Мировой агроклиматический справочник* . Л.: Гидрометеиздат, 1937. С. 5–27.
- Ши, З., Сюй, Л., Донг, Л. и др., Реакция роста на климат и реконструкция засухи по годовым кольцам монгольской сосны в Хулунбуире, Северо-Восточный Китай, *J. Plant Ecol.*, 2016, т. 9, № 1, стр. 51–60.
- Шиятов С.Г., Ваганов Е.А., Кирдянов А.В. и др. Методы дендрохронологии. Часть 1. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации: Учебно-методическое пособие . Красноярск: Красн. Гос. ун-т, 2000.
- Шнитников А.В. Внутривековая изменчивость компонентов общей увлажненности. Л.: Наука, 1969.
- StatSoft, Электронный учебник по статистике, Талса, 2013. <http://www.statsoft.com/textbook/>.
- Судачкова Н. Е. Метаболизм хвойных и формирование древесины . Новосибирск: Наука, 1977.
- Суворова Г.Г., Янькова Л.С., Копытова Л.Д., Филиппова А.К. Максимальная интенсивность фотосинтеза сосны обыкновенной и ели сибирской в Предбайкалье // *Сиб. экологический журнал*. 2005. № 1. С. 97–108.

- Тарасов, П., Цзинь, Г. и Вагнер, М., Динамика окружающей среды и населения в среднем голоцене на северо-востоке Китая реконструирован на основе пыльцы и археологических данных, Палеогеогр., палеоклиматол., палеоэкол., 2006, т. 241, стр. 284–300.
- Тарасов, П., Уильямс, Дж. В., Андреев, А. и др., Количественные реконструкции древесного покрова на основе спутниковых и пыльцевых данных для Северной Азии: проверка и применение Данные по позднечетвертичной пыльце, Earth Planet Sci. Let., 2007, т. 264, стр. 284–298.
- Тучан, Р., Вудхаус, Калифорния, Меко, Д.М., и Аллен, К., Реконструкция тысячелетних осадков для Хемеса Горы, Нью-Мексико, показывают изменение сигнала засухи, Int. J. Climatol., 2011, т. 31, стр. 896–906.
- Труэ В. и Олденбург Г. Дж., исследователь климата KNMI: веб-инструмент для исследований палеоклиматологии высокого разрешения, Tree-Ring Res., 2013, т. 69, № 1, стр. 3–13.
- Ваганов, Е.А., Анчукайтис, К.Дж., и Эванс, М.Н., Как хорошо ли понятны процессы, которые создают дендроклиматические записи? Механистическая модель климатического контроль динамики роста годичных колец хвойных деревьев в дендроклиматологии, Хьюз, МК, Суэтнэм, ТВ, и Диас, Х.Ф., ред., Дордрехт: Springer-Verlag, 2011. стр. 37–76.
- Ваганов Е.А., Хьюз М.К., Шашкин А.В. Рост Динамика годичных колец хвойных деревьев: образ прошлого и Будущая среда, Берлин: Springer-Verlag, 2006.
- Вигли, Т.М.Л., Бриффа, К.Р. и Джонс, П.Д., О среднем значении коррелированных временных рядов с применением в дендрохронология и гидрометеорология, Ж. Клим. Appl. Meteorol., 1984, т. 23, № 2, стр. 201–213.
- Ятагай, А. и Ясунари, Т., Межгодовые колебания летних осадков в засушливых/полузасушливых регионах Китай и Монголия: их региональность и связь с летний азиатский муссон, J. Meteorol. Soc. Jpn., 1995, т. 73, стр. 909–923.
- Жуков В.М., Климат Бурятской АССР (Климат Бурятии). АССР), Улан-Удэ, 1960.

Перевод С. Кузьмина