

УДК 630*561.24+551.583(470.56)

ОСТРОВНЫЕ БОРЫ ЮЖНОГО УРАЛА И ЛЕНТОЧНЫЕ БОРЫ АЛТАЯ КАК ОБЪЕКТЫ ДЕНДРОКЛИМАТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

© 2021 г. Л. И. Агафонов^а, М. А. Гурская^{а, *}, В. В. Кукарских^а,
М. О. Бубнов^а, Н. М. Дэви^а, А. А. Галимова^а

^аИнститут экологии растений и животных УрО РАН, Россия 620144 Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202/3

*e-mail: marina_gurskaya@mail.ru

Поступила в редакцию 25.01.2021 г.

После доработки 16.04.2021 г.

Принята к публикации 19.04.2021 г.

В последнее время обсуждается корректность использования региональных древесно-кольцевых хронологий в пространственно-временных климатических реконструкциях, поскольку спектр природно-климатических условий и факторов в регионах может быть неоднороден в масштабе от микро до глобального уровней. Нами исследована реакция радиального прироста сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) из степной зоны островных боров Южного Урала и ленточных боров Алтая на климат. Выявлены региональные черты и различия у древесно-кольцевых хронологий в сезон формирования годичных колец (май–июль), а также пространственно-временная асинхронность многолетней динамики радиального прироста сосны в исследуемых регионах.

Ключевые слова: древесно-кольцевые хронологии, сосна обыкновенная, Южный Урал, Алтай, климат, радиальный прирост

DOI: 10.31857/S0367059721050036

В дендрохронологии и дендроклиматологии все чаще обсуждается проблема адекватности пространственно-временной реакции радиального прироста деревьев на меняющиеся условия природной среды, а также на инструментально фиксируемые метеорологическими службами изменения компонентов климата – температуры воздуха и атмосферных осадков [1–3]. Различия в отклике прироста могут быть обусловлены не только удаленностью территорий, но и различиями макросреды на локальном/топографическом/региональном уровнях и могут проявляться в отклике прироста на уровне микросреды [4–8]. Все эти аспекты важны, поскольку на основе древесно-кольцевых хронологий (ДКХ) выполняется большое количество пространственно-временных реконструкций климата и отдельных его компонентов. Если используется случайный набор ДКХ, имеющих различия в отклике радиального прироста на компоненты климата, то получаемые реконструкции не будут воспроизводить корректно климатические условия территории или региона [9–13].

Упомянутые выше и многие другие исследования выполнялись преимущественно для зоны бореальных лесов. Нам известна лишь одна публикация, в которой сравнивались ДКХ Южного Урала и Алтая [14]. Цель нашей работы – срав-

нить реакцию ДКХ сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) из двух регионов степной зоны России с сухим климатом – в островных борах Южного Урала и ленточных борах Алтая, потенциально пригодных для климатических реконструкций. Исходя из того, что детально такие исследования в этих регионах еще не выполнялись, были поставлены следующие задачи: 1) выявление региональных особенностей на уровне неиндексированных хронологий; 2) выявление региональных реакций прироста индексированных ДКХ на компоненты климата – температуру воздуха и атмосферные осадки; 3) проверка стабильности климатического сигнала в региональных хронологиях; 4) возможность использования хронологий для пространственной реконструкции климата.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Сбор полевого материала в виде кернов древесины с живых деревьев сосны выполнен в островных борах Южного Урала в подзоне северной степи Челябинской области [15] и в юго-западной части ленточных боров Алтайского края в подзонах засушливой и сухой степи [16] (рис. 1). На Южном Урале материал собран в Варламовском (код тест-полигонов (ТП) и хронологий CVL и CPA), Черном (CZI), Джабык-Карагайском (CDK) и Пес-

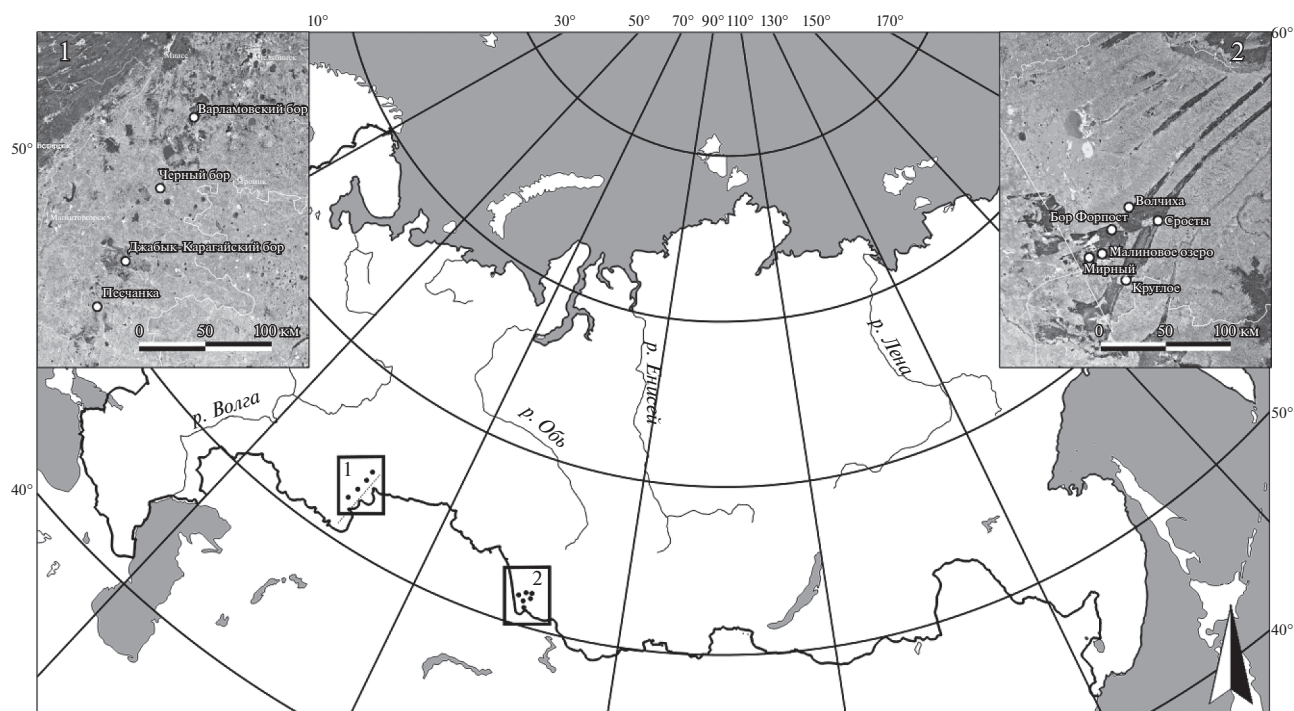


Рис. 1. Карта-схема районов сбора образцов: 1 — Южный Урал, 2 — Алтай. Точками обозначены тест-полигоны, прямоугольниками — границы использованных в работе грид (CRU TS 4.04). На врезках приведено детальное расположение тест-полигонов.

чанском (CPS) островных борах. В Варламовском бору ТП расположены в чистых сосняках с растительным покровом из разнотравья. По составу пород Черный бор — чистый сосновый древостой, в Джабык-Карагайском бору до 5% составляет доля березы. В растительном покрове обоих ТП доминируют злаки и лишайники. В чистом сосновом древостое Песчанского бора в живом напочвенном покрове доминируют злаки. По данным GPS, высоты варьируют от 250 м (Песчанский бор) до 320 м над ур. м. (Черный бор) (см. рис. 1).

В Алтайском крае сборы выполнены в южной части Касмалинской и Барнаульской боровых лент в зоне их смыкания на ТП Бор Форпост (СВФ), Круглое (СКУ), Малиновое озеро (СМО), Мирный (СМР), Сросты (ССС) и Волчиха (СВО). Все древостой по составу древесных пород чистые сосняки, лишь на ТП Сросты до трех единиц приходится на березу и осину. В растительном покрове ТП Бор Форпост и Круглое доминируют злаки, на ТП Малиновое озеро и Мирный — злаки с участием лишайников, на ТП Сросты и Волчиха живой напочвенный покров представлен разнотравьем. По данным GPS, высоты на ТП варьируют от 170 м (Малиновое озеро) до 240 м над ур. м. (Сросты).

При подготовке кернов для измерений руководствовались методикой [17]. Измерения шири-

ны годовых колец и визуальная перекрестная датировка индивидуальных хронологий выполнены на комплексе LINTAB 5 в программном пакете TSAP [18]. Качество перекрестного датирования ДКХ проверяли в программе COFECNA [19].

Для устранения в индивидуальных хронологиях сигналов неклиматического характера (влияние возраста деревьев, особенностей микро рельефа, случайных кратковременных воздействий различной природы) и получения обобщенных ДКХ по каждому ТП все хронологии были стандартизированы в специальном дендрохронологическом программном пакете ARSTAN [20], который позволяет получить хронологии в виде безразмерной величины индексов прироста относительно нормы, рассчитываемой для каждого года. При стандартизации применяли две процедуры получения индексированной хронологии: первое индексирование выполняли с использованием негативной экспоненты, второе — кубического сплайна, составляющего 67% от общей протяженности индивидуальной хронологии. В дальнейшем анализе использовали стандартные обобщенные хронологии, которые сохраняют низкочастотную изменчивость прироста (>10 лет). На основе обобщенных локальных хронологий по регионам, посредством их усреднения методом взвешенной средней, для каждого региона получены генера-

Таблица 1. Статистические характеристики неиндексированных региональных древесно-кольцевых хронологий

Код ДКХ	Число деревьев	Период, годы	Длина ДКХ, лет	Межсерийный коэффициент корреляции	Коэффициент чувствительности	Ширина годичного кольца		Выпавшие годичные кольца, %	АК*
						средняя ± SD, мм	макс., мм		
Алтайские ленточные боры									
CBF	18	1851—2018	168	0.53	0.16	2.05 ± 1.55	9.67	0.16	0.92
CKU	24	1825—2018	195	0.56	0.16	1.38 ± 0.79	6.58	0.2	0.82
CMO	5	1812—2019	207	0.31	0.2	1.79 ± 1.03	7.02	0	0.84
CMR	10	1703—2019	317	0.40	0.16	1.19 ± 0.87	6.65	0.05	0.88
CSS	37	1793—2018	226	0.47	0.13	1.79 ± 0.95	8.17	0	0.82
CVO	25	1801—2018	218	0.48	0.16	1.50 ± 0.87	7.64	0	0.79
Южно-Уральские островные боры									
CDK	18	1782—2020	239	0.75	0.28	0.97 ± 0.67	6.78	0.11	0.74
CPA	22	1826—2007	182	0.77	0.31	1.28 ± 0.97	7.31	0.68	0.80
CPS	19	1790—2015	226	0.75	0.34	0.97 ± 0.77	5.82	0.69	0.73
CZI	62	1737—2015	279	0.75	0.21	0.55 ± 0.37	4.24	0.45	0.75
CVL	24	1818—2014	197	0.67	0.27	1.70 ± 1.12	8.87	0.38	0.84

* АК – коэффициент автокорреляции.

лизированные хронологии – южно-уральская и алтайская ДКХ [21].

Корреляционный (парные коэффициенты корреляции Пирсона) и регрессионный анализы были проведены для оценки климатического отклика хронологий на компоненты климата – среднемесячные значения приземной температуры воздуха и количество атмосферных осадков. В качестве метеоданных использовались grids CRU TS 4.04 (Climatic Research Unit gridded Time Series [22]) за период 1936–2019 гг. с пространственным разрешением $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ по широте и долготы, которые покрывают территорию с расположенными на ней ТП (52.5° – 54° с.ш., 60° – 61° в.д. для Южного Урала и 51° – 53° с.ш., 79° – 82° в.д. для Алтая; см. рис. 1). Данные доступны на сайте Королевского метеорологического института Нидерландов (the Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI), <http://climexp.knmi.nl/>).

Стабильность климатического сигнала во времени (stationarity test, [3]) оценивали в генерализированных ДКХ методом bootstrap analysis в программе Dendroclim2002 [23]. Проверку стабильности сигнала осадков и температуры в ДКХ выполняли для временных интервалов длительностью 50 лет с шагом 1 год.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Максимальная длительность хронологий в алтайских ленточных борах изменяется от 317 до 168 лет, в южно-уральских островных – от 182 до 279 лет (табл. 1). В обобщенных алтайских хроно-

логиях возраст деревьев на ТП различается на 2–9 классов возраста (40–180 лет, ТП CBF и CMR соответственно), в южно-уральских – на 2–5 классов возраста (40–100 лет, ТП CPA и CZI соответственно). Различия в возрасте деревьев на ТП обусловлены длительной, до 300 лет, эксплуатацией лесов в обоих регионах. Измеренная средняя ширина годичного кольца среди алтайских ДКХ имеет коэффициент варьирования 19%, у южно-уральских – 39% (см. табл. 1), что, вероятно, связано с особенностями природно-климатических условий регионов.

Выявлены различия в ДКХ на уровне межсерийных коэффициентов корреляции (корреляция между индивидуальной и совокупной хронологиями для каждого ТП [24]) и коэффициентов чувствительности хронологий (показывает степень воздействия высокочастотных факторов, в основном внешних, на изменение величины радиального прироста; хронология считается чувствительной при значении коэффициента >0.3 [21]). Межсерийный коэффициент корреляции заметно выше в хронологиях южно-уральских островных боров (среднее значение по всем хронологиям 0.738), чем в алтайских ленточных (0.458). То же самое характерно для коэффициентов чувствительности (указаны для стандартных индексированных ДКХ): в уральских хронологиях он выше (0.280), чем в алтайских (0.160).

Выявлены различия в доле выпадающих годичных колец в региональных ДКХ (см. табл. 1). Частота выпадающих колец в южно-уральских хронологиях выше, чем в алтайских, – 0.46 и 0.07% со-

Таблица 2. Матрица коэффициентов корреляций между индексированными хронологиями островных боров Южного Урала и ленточных боров Алтая (общий период 1851–2007 гг.)

Код ДКХ	CBF	CKU	CMO	CMR	CSS	CVO	CDK	CPA	CPS	CZI
CKU	0.45									
CMO	0.21	0.32								
CMR	0.35	0.55	0.39							
CSS	0.43	0.62	0.34	0.38						
CVO	0.53	0.70	0.36	0.47	0.57					
CDK	0.24	–0.05	0	0	0.16	0.04				
CPA	0.17	0	0.1	0.1	0.21	0.11	0.56			
CPS	0.18	0.15	0.3	0.20	0.34	0.21	0.65	0.54		
CZI	0.24	0.02	0.03	0.06	0.09	0	0.69	0.65	0.52	
CVL	0.19	–0.04	0.12	0	0.19	0.05	0.53	0.82	0.52	0.56

Примечание. Заливкой отдельно выделены коэффициенты для алтайских и южно-уральских хронологий. Значимые коэффициенты ($p \leq 0.05$) выделены жирным шрифтом.

ответственно, т.е. выпавшие кольца встречаются в южно-уральских хронологиях в 6.6 раза чаще, чем в алтайских.

При высоких значениях во всех региональных ДКХ коэффициента автокорреляции (характеризует зависимость величины прироста от условий предшествующего сезона/сезонов роста дерева [24]) в среднем он выше в алтайских ДКХ по сравнению с уральскими – 0.85 и 0.77 соответственно.

Схожие региональные особенности показывают индексированные ДКХ, в которых минимизировано влияние факторов неклиматического характера. Корреляционный анализ этих ДКХ выполнен для каждого географического района, результаты представлены матрицей коэффициентов корреляции (табл. 2). Коэффициенты корреляции алтайских ДКХ на общем интервале 1851–2018 гг. варьируют от 0.21 до 0.70 (в среднем 0.40), южно-уральских (1826–2007 гг.) – от 0.52 до 0.82 (в среднем 0.60). Средний коэффициент корреляции между алтайскими и южно-уральскими хронологиями на общем интервале 1851–2007 гг. равен 0.11.

Отклик радиального прироста сосны региональных ДКХ на климатические переменные имеет характерный для засушливых регионов вид – значимая положительная связь с осадками, значимая отрицательная связь с температурой в текущем сезоне вегетации и отсутствие значимых связей с климатическими переменными предшествующего года. Анализ связи генерализированных хронологий Южного Урала и Алтая с компонентами климата выявил как общие черты, так и региональные особенности: обе хронологии имеют высокую значимую связь с осадками мая, однако связь у алтайской хронологии более тесная, чем у уральской ДКХ (рис. 2а). На этом сходство в отклике хронологий заканчивается, поскольку да-

лее проявляются региональные отличия. В июне южно-уральская ДКХ показывает еще более тесную связь с осадками, чем в мае, а связь алтайской хронологии с осадками в этом месяце незначима (см. рис. 2а). В июле и августе становится незначимой связь южно-уральской ДКХ с осадками этого сезона, тогда как у алтайской появляется значимая и усиливающаяся к августу связь с осадками. Отметим также, что алтайская ДКХ показывает значимую связь прироста с осадками сентября предшествующего года (см. рис. 2а).

Анализ связи генерализированных южно-уральской и алтайской хронологий с температурой выявил единый характер, различия проявляются лишь в тесноте связей. Для обеих хронологий характерна значимая отрицательная связь с температурой мая, июня и июля, однако теснота этих связей выше у южно-уральской ДКХ (см. рис. 2б). Для нее характерно нарастание тесноты связи в июле и снижение в августе, тогда как алтайская хронология демонстрирует постепенное ослабление связи от мая к августу. При этом алтайская ДКХ проявляет невысокую, но значимую связь с температурой января и февраля.

Анализ стабильности во времени сигнала осадков в генерализированных ДКХ показал стабильную высокосignificantную положительную связь прироста сосны с осадками мая текущего года роста у обеих ДКХ (рис. 3а, б). Еще более значимая и стабильная связь у южно-уральской хронологии с осадками июня (рис. 3а), тогда как у алтайской хронологии эта связь утрачивает стабильность и снижается теснота значимой связи (рис. 3б). В июле связь прироста с осадками вновь значима для обеих ДКХ, но у южно-уральской хронологии она выше, чем у алтайской.

Стабильная во времени и высоко значимая отрицательная корреляционная связь характерна

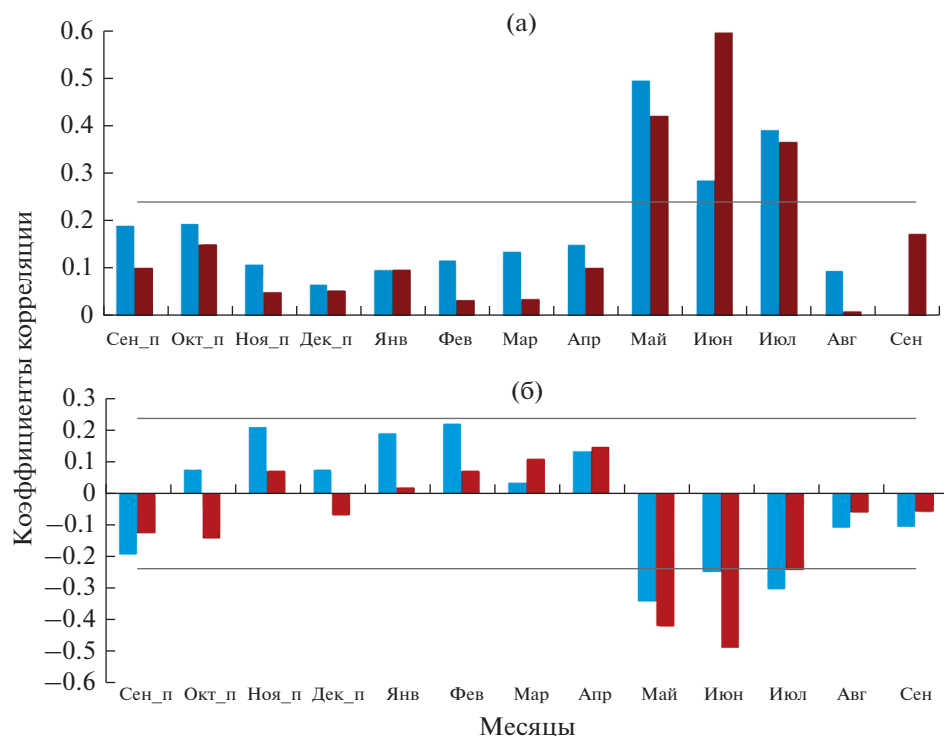


Рис. 2. Коэффициенты корреляции радиального прироста генерализованных хронологий из островных боров Южного Урала (серые столбики) и ленточных боров юга Алтая (темные столбики) с атмосферными осадками (а) и температурой воздуха (б) с сентября предшествующего (Сен_п) по сентябрь текущего сезона. Результаты показаны для периода, когда наблюдаются значимые корреляции между приростом и климатическими переменными.

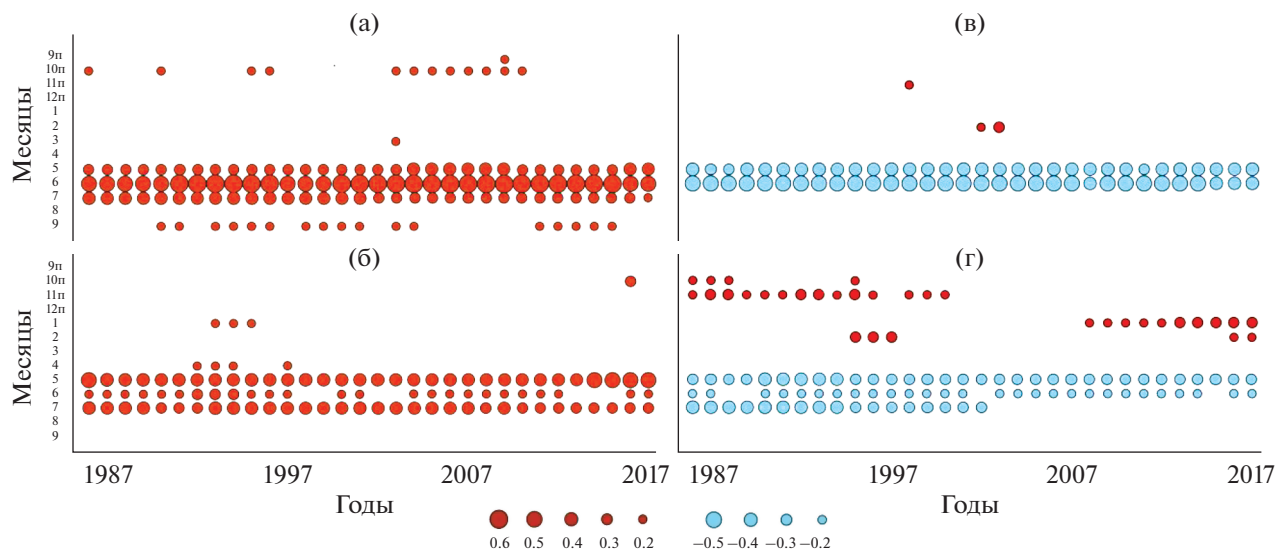


Рис. 3. Коэффициенты корреляции стабильности связи радиального прироста сосны с сентября предшествующего (9п) по сентябрь текущего сезона роста с атмосферными осадками (а, б) и температурой воздуха (в, г) в окне 50 лет с шагом 1 год на интервале 1937–2018 гг. для генерализованных южно-уральской (а, в) и алтайской хронологий (б, г). Показаны только значимые коэффициенты. Размер маркера соответствует начальному значению коэффициента.

для южно-уральской ДКХ с температурой мая и июня (см. рис. 3в), тогда как алтайская хронология проявляет стабильную во времени значимую связь индексов прироста с температурой только в

мае, а для июня и июля характерна значимая, но не стабильная связь во времени (см. рис. 3г). Отметим нестабильные во времени проявления значимой положительной связи южно-уральской

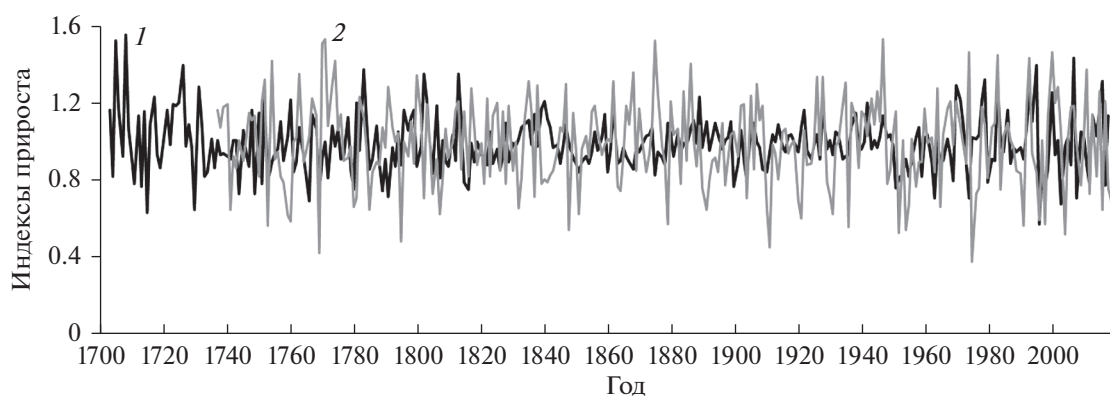


Рис. 4. Генерализованные хронологии юга ленточных боров Алтая (1) и островных боров Южного Урала (2). Коэффициент корреляции между хронологиями 0.12.

ДКХ с осадками октября предшествующего года и сентября текущего сезона роста (см. рис. 3а) и нестатистическую положительную связь алтайской ДКХ с температурой ноября и января, предшествующих сезону роста (см. рис. 3г). При этом связь с температурой ноября характерна для первой половины анализируемого периода, а с температурой января — для его последней трети.

Сравнение генерализованных хронологий островных боров Южного Урала и юга ленточных боров Алтая показало (рис. 4), что теснота связи между ними отсутствует (коэффициент корреляции 0.12). Для отдельных серий лет характерна противофаза в динамике прироста — увеличение прироста в одном регионе и снижение в другом, и наоборот.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как отмечалось выше, даже неиндексированные региональные хронологии показывают различия в реакции радиального прироста сосны (см. табл. 1). Южно-уральские хронологии в сравнении с алтайскими имеют более высокие средний коэффициент межсерийной корреляции (0.738 против 0.458) и средний коэффициент чувствительности (0.364 против 0.250), что свидетельствует о более высокой чувствительности южно-уральских ДКХ к факторам внешней среды, среди которых климат один из основных. Это же отмечают и авторы работы [25], которая выполнена на 4900-километровой трансекте в лесостепной зоне юга Сибири. При исследовании реакции радиального прироста сосны на климат обнаружено, что климатический контроль прироста проявляется сильнее на западных участках трансекты и ослабевает к востоку.

В этом же контексте можно интерпретировать частоту выпадающих годовичных колец в южно-уральских и алтайских хронологиях (среднее значение 0.46% против 0.07%). В условиях сухого

климата структура годовичных колец и феномен выпадающих колец обусловлены засухами в сезон вегетации и их суровостью [26–28]. На основе анализа инструментальных метеонаблюдений показано, что в период с 1891 г. по 2010 г. сильные засухи в Уральском и Западно-Сибирском регионах случались 24 и 15 раз соответственно, с повторяемостью 20 и 12% [29], т.е. влияние этого фактора на радиальный прирост сосны проявляется сильнее на Южном Урале, чем на Алтае.

Чтобы разобраться в региональных особенностях сезонных связей прироста сосны с климатом, мы сравнили средние многолетние значения осадков и температуры воздуха за 1936–2019 гг., вычисленные по градам. Регионы имеют сходные по динамике, но достоверно различающиеся в июне–июле и по сезонам в период активной вегетации количество выпадающих атмосферных осадков и температуру воздуха (рис. 5, табл. 3). Различия в осадках обусловлены градиентом континентальности — известно, что при движении с запада на восток воздушные массы теряют влагу и количество выпадающих осадков уменьшается.

Однако мы предположили, что значимые региональные различия в абсолютном количестве осадков (в гидрометеорологическом контексте) не настолько велики в рассматриваемые месяцы (разница 11.2 мм, или 16.6% в июле (табл. 3), что равно 11.2 л на 1 м²) и сезоны (25.1 мм (12.9%) или 25.1 л на 1 м² за май–август), чтобы быть критическими для обеспечения влагой физиологических процессов у деревьев сосны и тем самым обуславливать региональные различия. Поскольку в условиях сухого климата именно осадки оказывают положительное влияние на величину радиального прироста сосны, мы полагаем, что сезонные различия в отклике региональных ДКХ связаны не с количеством осадков, а с почвенно-грунтовыми условиями, обуславливающими их аккумуляцию и доступность влаги в почве.

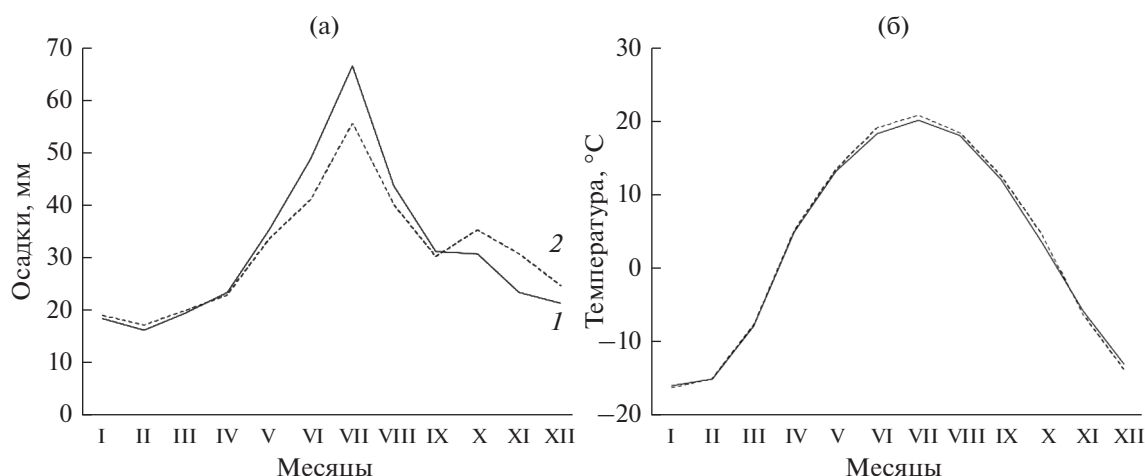


Рис. 5. Распределение в течение года многолетних средних значений (1936–2019 гг.) атмосферных осадков (а) и температуры воздуха (б), рассчитанные на основе климатических грид (CRU TS 4.04) для Южного Урала (1) и Алтая (2).

Южно-Уральские островные боры расположены в области Зауральского пенеблена, Восточно-Уральской мегазоны Челябинско-Суундукского антиклинория с крупными массивами двупалеошпатных слюдяных гранитов и гранитоидов [30], которые на значительной территории выходят на дневную поверхность и протянулись с севера на юг более чем на 200 км. Почвенный профиль здесь маломощный, иногда не более 20–30 см (собственные наблюдения на ТП CDK, CPS, CZI), зачастую островные боры приурочены к выходам горных пород (ТП CZI). Ленточные боры Алтая расположены на Приобском плато в субпараллельных долинах, расчленяющих это плато, перекрыты аллювиальными, золовыми и лёссовидными отложениями с песчаными или супесчаными почвами в верхних горизонтах [31].

Различия почвенных условий произрастания деревьев сравниваемых регионов и условия накопления влаги в почве, ее доступность для деревьев в течение сезона роста очевидны. Почвы легкого механического состава алтайских ленточных боров больше инфильтруют и аккумулируют влаги в почвенном профиле, чем маломощные, близко к поверхности подстилаемые горными породами почвы островных боров Южного Урала. Насыщение почв ленточных боров влагой от снеготаяния и осадками мая, на который приходится начало сезонного роста деревьев, обуславливает высокую тесноту связи прироста с осадками этого месяца. В профиле песчаных почв влага способна проникать на большие глубины и там аккумулироваться, а их легкий механический состав способствует развитию мощной, глубоко проникающей в почвенный профиль корневой системы сосны, которая может использовать накопленную нижними

Таблица 3. Средние многолетние значения (1936–2019 гг.) атмосферных осадков и температуры воздуха сезона вегетации и за гидрологический год, рассчитанные по гридам (52.5°–54° с.ш., 60°–61° в.д. для Южного Урала и 51°–53° с.ш., 79°–82° в.д. для Алтая)

Параметр	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Гидрологический год	Май–июнь	Май–июль	Май–август
Осадки, мм:									
Южный Урал	35.4	49.0	67.3	43.5	27.9	380.5	84.4	151.7	195.2
Алтай	33.2	40.7	56.1	40.1	27.1	345.6	73.9	130.0	170.1
Разность осадков, мм	2.2	8.3	11.2	3.4	0.8	34.9	10.5	21.7	25.1
Температура, °C:									
Южный Урал	13.2	18.3	20.1	18.1	11.8	3.0	15.8	17.2	17.4
Алтай	13.4	19.0	20.8	18.4	11.9	2.9	16.2	17.7	17.9
Разность температур, °C	0.2	0.7	0.7	0.3	0.1	0.1	0.4	0.5	0.5

Примечание. Жирным шрифтом выделены достоверные различия между районами исследования (t-test Стьюдента, $N = 82$, $p < 0.05$).

горизонтами влагу достаточно долго. Это позволяет объяснить отсутствие связи прироста с осадками июня в ленточных борах Алтая, когда деревья используют накопленную влагу глубинных горизонтов почвы. В июле деревья начинают испытывать недостаток влаги на фоне наибольшего в сезоне повышения температуры воздуха и транспирации, чем и объясняется появление значимой связи прироста с осадками июля (см. рис. 2а).

На Южном Урале связь прироста сосны с осадками мая объясняется так же, как и для Алтая. Это начало сезонного роста, для которого необходимо достаточное количество влаги. Однако из-за эдафических особенностей территории (высокая щебнистость, меньшая мощность почвенного профиля, высокая степень физического испарения влаги с выходящих на поверхность или неглубоко залегающих горных пород) влага в недостаточной степени аккумулируется почвенным профилем. К тому же деревья на таких почвах имеют менее мощную и неглубоко проникающую корневую систему и в большей степени зависят от доступной почвенной влаги и атмосферных осадков, что и отражается на высокой тесноте связи прироста с осадками мая и, особенно, июня, когда может проявляться их дефицит.

Негативное влияние температуры на радиальный прирост сосны в обоих регионах обусловлено тем, что ее значения в сезоне выше оптимальных (16.5–17.5°C [32–34]) снижают фотосинтетическую активность ассимиляционного аппарата и синтез органического “строительного” материала, и соответственно снижается величина радиального прироста деревьев [35]. Наиболее негативно влияние температуры на прирост проявляется в условиях недостаточного увлажнения [36, 37].

Тест на стабильность связи прироста сосны южно-уральских островных и алтайских ленточных боров с осадками и температурой во времени (см. рис. 3), по нашему мнению, логично укладывается в модель, объясняющую характер связей с эдафической компонентой природной среды — процессами аккумуляции влаги в почве и ее доступностью для корневой системы сосны. Не располагая данными наблюдений за влажностью почв, авторы понимают необходимость полевых исследований, которые могли бы подтвердить высказанную модель комплексности сезонных связей прироста сосны с климатом и эдафическими условиями.

Поскольку сами по себе сходные в сезон вегетации климатические условия Южного Урала и Алтая, даже при эдафических различиях регионов, не могут определять пространственно-временную несинхронность многолетней динамики прироста генерализованных ДКХ (см. рис. 4), то различия, вероятно, обусловлены особенностями сезонных атмосферных циркуляций над террито-

рией Южного Урала и Алтая. Об этом свидетельствует невысокая в холодный сезон года или незначимая в сезон вегетации связь между многолетними (1936–2019 гг.) рядами осадков на Южном Урале и Алтае. Коэффициенты корреляции между ними с января по декабрь следующие: **0.31, 0.32, 0.38**, 0.16, 0.08, 0.24, –0.02, 0.22, 0.08, **0.31**, 0.18, **0.34** (жирным шрифтом выделены значимые коэффициенты корреляции, $p \leq 0.05$).

Корреляция между уральскими и алтайскими температурами воздуха за тот же период в течение года значимо высокая (**0.83, 0.86, 0.81, 0.69, 0.44**, 0.28, **0.46, 0.50, 0.47, 0.69, 0.79, 0.80** с января по декабрь, исключение — июнь), особенно в холодный период (октябрь–апрель), что может быть обусловлено влиянием Сибирского антициклона. Поскольку радиальный прирост сосны в условиях сухого климата юга Урала и Сибири, как правило, обусловлен влиянием осадков [38, 39], это и объясняет отсутствие связи между генерализованными хронологиями.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что хронологии южно-уральских островных и алтайских ленточных боров содержат стабильный климатический сигнал текущего сезона роста (май–июль). Выявлены различия в отклике радиального прироста сосны южно-уральских островных и алтайских ленточных боров на климатические переменные (температуру воздуха и атмосферные осадки) текущего сезона роста, обусловленные эдафическими особенностями регионов, вероятнее всего, слагающими почвенный профиль горизонтами, а также аккумуляцией и накоплением в них влаги. Пространственная несинхронность между генерализованными хронологиями Южного Урала и Алтая может быть объяснена различиями в атмосферных циркуляциях над этими регионами, и в этом авторы публикации видят следующую цель своих исследований.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ (проект № 19-05-00591). Авторы благодарят двух неизвестных рецензентов, замечания которых способствовали более полному представлению результатов исследования. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Pisarcic M.F.J., Carey S.K., Kokelj S.V., Youngblut D.* Anomalous 20th century tree growth, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada // *Geophys. Res. Lett.*, 2007. V. 34. L05714. <https://doi.org/10.1029/2006GL029139>
2. *Hellmann L., Agafonov L., Ljungqvist F.C. et al.* Diverse growth trends and climate responses across Eurasia's boreal forest // *Environmental Research Letters*. 2016. V. 11. № 7. Art. 074021.

- <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/11/7/074021/meta>
3. *Wilmking M., van der Maaten-Theunissen M., van der Maaten E.* et al. Global assessment of relationships between climate and tree growth // *Glob. Change Biol.* 2020. V. 26. P. 3212–3220. <https://doi.org/10.1111/gcb.15057>
 4. *Leonelli G., Pelfini M., Battipaglia G., Cherubini P.* Site-aspect influence on climate sensitivity over time of a high-altitude *Pinus cembra* tree-ring network // *Climatic Change.* 2009. V. 96. P. 185–201. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-009-9574-6>
 5. *Adams H.R., Barnard H.R., Loomis A.K.* Topography alters tree growth–climate relationships in a semi-arid forested catchment // *Ecosphere.* 2014. V. 5. № 11. P. 1–16. <https://doi.org/10.1890/ES14-00296.1>
 6. *Duthorn E., Schneider L., Konter O.* et al. On the hidden significance of differing micro-sites on tree-ring based climate reconstructions // *Silva Fennica.* 2015. V. 49. № 1. Art. 1220. <https://doi.org/10.14214/sf.1220>
 7. *Lange J., Buras A., Cruz-García R.* et al. Climate regimes override micro-site effects on the summer temperature signal of Scots pine at its northern distribution limits // *Front. Plant Sci.* 2018. V. 9. Art. 1597. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01597>
 8. *Montpellier E.E., Soulé P.T., Knapp P.A., Shelly J.S.* Divergent growth rates of alpine larch trees (*Larix lyallii* Parl.) in response to microenvironmental variability // *Arctic, Antarctic, and Alpine Research.* 2018. V. 50. № 1. Art. e1415626. <https://doi.org/10.1080/15230430.2017.1415626>
 9. *Wilson R., D'Arrigo R., Buckley B.* et al. A matter of divergence: Tracking recent warming at hemispheric scales using tree ring data // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. Art. D17103. <https://doi.org/10.1029/2006JD008318>
 10. *Allen K.J., Cook E.R., Buckley B.M.* et al. Continuing upward trend in Mt Read Huon pine ring widths Temperature or divergence? // *Quaternary Sci. Rev.* 2014. V. 102. P. 39–53. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.08.003>
 11. *St. George S., Esper J.* Concord and discord among Northern Hemisphere paleotemperature reconstructions from tree rings // *Quaternary Sci. Rev.* 2019. V. 203. № 1. P. 278–281. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.11.013>
 12. *Ljungqvist F.C., Piermattei A., Seim A.* et al. Ranking of tree-ring based hydroclimate reconstructions of the past millennium // *Quaternary Sci. Rev.* 2020. V. 230. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2019.106074>
 13. *Coulthard B.L., St. George S., Meko D.M.* The limits of freely-available tree-ring chronologies // *Quaternary Sci. Rev.* 2020. V. 234. Art. 106264. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106264>
 14. *Рыгалова Н.В.* Сравнительный анализ древесно-кольцевых хронологий ленточных и островных боров на южной границе ареала сосны обыкновенной в Западной Сибири // *География и природопользование Сибири.* 2017. № 24. С. 118–128. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32541914>
 15. *Колесников Б.П.* Очерк растительности Челябинской области в связи с ее геоботаническим районированием // *Флора и лесная растительность Ильменского государственного заповедника имени В. И. Ленина.* Свердловск: УНЦ АН СССР, 1961. С. 105–129.
 16. *Алтайский край: Атлас / Главное упр. геодезии и картографии при Совете министров СССР.* М.: Барнаул, 1978. Т. 1. 235 с.
 17. *Шиятов С.Г., Ваганов Е.А., Кирдянов А.В.* и др. Методы дендрохронологии. Красноярск: Изд-во КрасГУ, 2000. Ч. 1. 80 с.
 18. *Rinn F.* TSAP. Reference Manual. Version 3.0. Heidelberg, 1996. 263 p.
 19. *Holmes R.L.* Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement // *Tree-Ring Bull.* 1983. V. 43. № 3. P. 69–78.
 20. *Cook E.R., Krusic P.J.* Program ARSTAN: a tree-ring standardization program based on detrending and autoregressive time series modeling, with interactive graphics. . Lamont-Doherty Earth Observatory, Columbia University, Palisades, N.Y., 2005.
 21. *Шиятов С.Г.* Дендрохронология верхней границы леса на Урале. М.: Наука, 1986. 136 с.
 22. *Harris I., Osborn T.J., Jones P., Lister D.* Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset // *Sci. Data.* 2020. № 7. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-323>
 23. *Biondi F., Waikul K.* DENDROCLIM2002: AC++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies // *Computers & Geosciences.* 2004. V. 30. P. 303–311.
 24. *Methods of dendrochronology: Applications in the environmental sciences / Cook E.R., Kairukstis L.A.* Eds. Dordrecht; Boston; London: Kluwer Acad. Publ., 1990. 394 p.
 25. *Tabakova M.A., Arzac A., Martinez E., Kirilyanov A.V.* Climatic factors controlling *Pinus sylvestris* radial growth along a transect of increasing continentality in southern Siberia // *Dendrochronologia.* 2020. V. 62. Art. 125709. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125709>
 26. *Fonti P., Babushkina E.A.* Tracheid anatomical responses to climate in a forest-steppe in Southern Siberia // *Dendrochronologia.* 2016. V. 39. P. 32–41. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2015.09.002>
 27. *Khansaritoreh E., Choimaa D., Klinge M.* et al. Higher climate warming sensitivity of Siberian larch in small than large forest islands in the fragmented Mongolian forest steppe // *Glob. Change Biol.* 2017. V. 23. P. 3675–3689. <https://doi.org/10.1111/gcb.13750>
 28. *Wang X., Yang B., Ljungqvist F.C.* The Vulnerability of Qilian Juniper to Extreme Drought Events // *Front. Plant Sci.* 2019. V. 10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01191>
 29. *Страшная А.И., Максименкова Т.А., Чуб О.В.* Агрометеорологические особенности засухи 2010 года в России по сравнению с засухами прошлых лет // *Труды Гидрометеорол. науч.-исслед. центра РФ.* 2011. № 345. С. 171–188. <https://elibrary.ru/item.asp?id=16555543>

30. *Рапопорт М.С.* Геологическое строение и развитие Южного Урала (в пределах Челябинской области) // Урал. геол. журн. 2006. № 3. С. 3–20.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9510159>
31. *Барышников Г.Я., Малолетко А.М.* Боровые лощины степного Приобья // Современные проблемы географии и геологии. Томск: ТГУ, 2017. С. 138–142.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=30582442>
32. *Суворова Г.Г., Янькова Л.С., Копытова Л.Д., Филиппова А.К.* Оптимальные факторы среды и интенсивность фотосинтеза сосны обыкновенной и лиственницы сибирской в Предбайкалье // Сибирский эколог. журн. 2005. № 1. С. 85–95.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=9130798>
33. *Суворова Г.Г., Янькова Л.С., Копытова Л.Д., Филиппова А.К.* Максимальная интенсивность фотосинтеза сосны обыкновенной и ели сибирской в Предбайкалье // Сибирский экологич. журн. 2005. № 1. С. 97–108.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=9130799>
34. *Suvorova G., Ivanova M., Korzukhin M.* Influence of environmental factors on photosynthesis of three coniferous species // Annual Research and Review in Biology. 2017. V. 12. № 3.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=31065675>
35. *Суворова Г.Г., Осолков В.А., Стасова В.В., Антонова Г.Ф.* Соотношение ростовой активности, дыхательных затрат ствола и фотосинтетической продуктивности кроны сосны обыкновенной // Изв. Иркут. гос. ун-та. 2015. Т. 11. Серия “Биология. Экология”. С. 2–12.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=23438304>
36. *Суворова Г.Г., Оскорбина М.В., Копытова Л.Д.* и др. Сезонные изменения фотосинтетической активности и зеленых пигментов у сосны обыкновенной и ели сибирской в оптимуме и экстремальных условиях увлажнения // Сибирский экологич. журн. 2011. Т. 18. № 6. С. 851–859.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=17110126>
37. *Суворова Г.Г., Максютова Е.В., Тимофеева С.С.* и др. Оценка влияния экстремальных условий на фотосинтетическую продуктивность хвойных с использованием гидротермических коэффициентов // Проблемы регион. экологии. 2012. № 6. С. 144–149.
38. *Агафонов Л.И., Кукарских В.В.* Изменения климата прошлого столетия и радиальный прирост сосны в степи Южного Урала // Экология. 2008. № 3. С. 173–180.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=9976741>
39. *Белокопытова Л.В., Бабушкина Е.А., Жирнова Д.Ф.* и др. Климатический отклик радиального прироста хвойных лесостепи юга Сибири: сравнение трех подходов // Сибирский экологич. журн. 2018. Т. 25. № 4. С. 411–424.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=35192093>