

УДК [630*561:582.475]:57.045:630*181.33(574.2)

РАДИАЛЬНЫЙ ПРИРОСТ *PINUS SYLVESTRIS* L. В ОСТРОВНЫХ БОРАХ СЕВЕРНОГО КАЗАХСТАНА В КОНТЕКСТЕ КЛИМАТА И ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

© 2024 г. М. А. Гурская^{а, *}, Л. И. Агафонов^{а, **}, В. В. Кукарских^а, А. Ю. Сурков^а,
Фенг Чен^б

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

^бИнститут трансграничных речных бассейнов и экологической безопасности, Юньнаньский университет,
КНР 650500 Юньнань Куньминг

*e-mail: marina_gurskaya@mail.ru

**e-mail: lagafonovc@ipae.uran.ru

Поступила в редакцию 06.02.2024 г.

После доработки 24.04.2024 г.

Принята к публикации 02.06.2024 г.

Исследованы древесно-кольцевые хронологии по ширине годичного кольца сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на 8 тест-полигонах в островных борах на севере Республики Казахстан от Тургайского прогиба до восточной части Казахского мелкосопочника. Анализ связей радиального прироста сосны с климатом показал, что климатический сигнал в хронологиях может изменяться в зависимости от геоморфологических условий, обусловленных эдафическим фактором, рельефом и абсолютными высотными отметками. Эти особенности необходимо учитывать при использовании древесно-кольцевых хронологий для пространственно-временных реконструкций климата.

Ключевые слова: радиальный прирост, древесно-кольцевые хронологии, сосна обыкновенная, климат, геоморфологические условия, Казахстан

DOI: 10.31857/S0367059724050056 **EDN:** WCAKWW

Древесно-кольцевые хронологии (ДКХ) из Центральной Азии показывают высокую чувствительность радиального прироста сосны к аридному климату и достоверность дендроклиматических реконструкций [1–4]. Дендроклиматические исследования в аридном климате России выполняются на Алтае и Южном Урале [5–10], на юге Красноярского края и в Забайкалье [11–14]. В работе [15] анализировали изменчивость отклика радиального прироста сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на климат в лесостепи Южной Сибири по мере усиления его континентальности с запада на восток на 4900-километровой трансекте. Однако такие южные территории, как северная часть Республики Казахстан, еще недостаточно изучены дендрохронологами.

В Казахстане, как и на всей территории Евразии, отмечают современное изменение климата. Здесь за последние 100 лет температура повысилась на 0.8–1.3°C с темпами роста с 1950-х годов на 0.3°C за десятилетие, в северной части стра-

ны наблюдается увеличение количества осадков, включая зимний период [16, 17]. Повышение температуры воздуха в Казахстане влияет на засушливость климата, которая, как ожидается, будет усиливаться [18]. Более высокая температура поверхности приводит к повышенному испарению и снижению влажности почвы, особенно в засушливые летние месяцы, что увеличивает риск засухи [19, 20].

Обзор дендроклиматических исследований для Казахстана приведен в работе [21]. Однако отметим, что наибольшее число работ выполнено в горах на юге и юго-востоке страны, а также в горах Казахского Алтая [21–23], где основными объектами изучения были ель Шренка (*Picea shrenkiana* Fisch.) и лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb.). На севере Казахстана ДКХ сосны исследовали в национальном парке “Бурабай” [24, 25, 26], на северо-востоке и юго-западной оконечности Алтайских ленточных боров [26]. Для северных территорий в работе [4] отмечено

увеличение радиального прироста сосны при повышении температуры воздуха и росте количества атмосферных осадков в регионе. Авторы указывают на пространственные различия в реакции прироста сосны на климатические факторы между субрегионами, отмечая, что для радиального прироста сосны в восточной части летние осадки имеют большее значение по сравнению с западным и центральным регионами.

Островные массивы сосновых лесов на севере Казахстана протянулись более чем на 1500 км с запада на восток от южной оконечности Уральских гор до Алтая, и сосна произрастает здесь в различных климатических подзонах и геоморфологических условиях [27, 28]. Различия отмечаются в ландшафтах и высотных отметках над уровнем моря, подстилающих породах и почвенных условиях. Однако в основном исследовали связи прироста с климатическими факторами (температурой воздуха, атмосферными осадками, засухами) без учета других природно-экологических факторов, в частности геоморфологических особенностей территорий, на которых выполнялись работы.

В 2010–2018 гг. нами были собраны керны сосны обыкновенной на долготной трансекте протяженностью от Наурзумского государственного природного заповедника (51°29'с.ш., 64°18'в.д.) на западе до Каркаралинского государственного национального природного парка на востоке (49°25'с.ш., 75°25'в.д.). Поскольку эта территория в дендроклиматическом аспекте остается малоизученной, наше исследование на начальном этапе имело две основные задачи: 1) изучить отклик радиального прироста сосны в различных геоморфологических и климатических условиях на территории Костанайской, Северо-Казахстанской, Акмолинской, Павлодарской и Карагандинской областей Республики Казахстан; 2) оценить дендроклиматический потенциал ДКХ сосны обыкновенной на этой протяженной территории.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Район исследований представлен тремя геоморфологическими регионами — Тургайским прогибом, Северо-Казахстанской равниной и Казахским мелкосопочником, и расположен между крупными равнинами — Западно-Сибирской на севере и Туранской низменностью на западе, а на востоке примыкает к долине р. Обь. Внутриконтинентальное положение района обуславливает резко континентальный засушли-

вый климат, где ~75% территории чувствительны к аридизации и подвержены периодическим засухам [19, 29, 30].

Леса Казахстана характеризуются очень неравномерным распространением и занимают лишь 4.7% его территории [31]. В структуре лесов на хвойные виды приходится ~14%, при этом ~80% площади хвойных лесов расположены на севере и северо-востоке Казахстана [17]. Важно, что лесорастительные условия обусловлены здесь не только климатом, но и комплексом геоморфологических структур и литологическими особенностями ландшафта [32]. Предполагается [33–35], что леса Северного Казахстана — это реликтовые леса, сохранившиеся со времени позднего плейстоцена, когда они могли быть распространены полосой от Южного Урала до Алтая.

Исследования проводили на 8 тест-полигонах (ТП), где с живых деревьев сосны обыкновенной были собраны керны. Расстояние между крайними ТП по прямой >800 км (рис. 1). Сведения о природных условиях районов исследования приведены в табл. 1. Для характеристики климата ТП использовали агроклиматическое районирование, предложенное С.С. Байшолановым с соавт. [27].

ТП 1 (Аман-Карагай) и ТП 2 (Наурзум) располагаются в зоне Тургайского прогиба, рассекающего Туранскую низменность с севера на юг. Это эрозионно-тектоническая форма рельефа протяженностью более 600 км с высотами 100–120 м над ур.м., что значительно ниже поверхности Туранской низменности на 100–200 м. По геоботанической классификации это Южно-Притобольская умеренно сухая степь Тобол-Убаганской провинции равнинной степи с песчаными почвами, которые подвержены интенсивной дефляции [28]. ТП 1 — лесной массив, который частично используется в хозяйственной деятельности [36], а ТП 2 — Наурзумский государственный заповедник, который входит в состав объекта Всемирного наследия ЮНЕСКО «Сары-Арка—степи и озера Северного Казахстана» (<https://whc.unesco.org/en/list/>). Оба ТП — небольшие массивы сосновых лесов среди степи на песчаных возвышенностях и дюнах.

На Северо-Казахстанской равнине в умеренно засушливой степи Ишимо-Иртышской провинции с высотами до 120 м над ур. м. [28] на супесчаных почвах располагается ТП 3 (Рошинское) — это самый северный ТП (см. табл. 1).

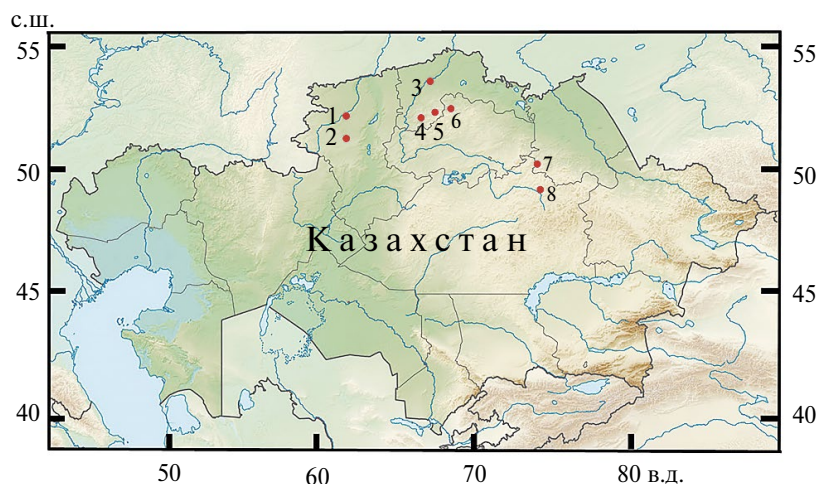


Рис. 1. Географическое расположение дендрохронологических тест-полигонов (1–8) в Северном Казахстане.

ТП 4 (Сандыктау), 5 (Малые Тюкты), 6 (Бурабай), 7 (Баянаул) и 8 (Каркаралы) располагаются в гористой части Казахского мелкосопочника (см. рис. 1 и табл. 1), одного из самых больших геоморфологических регионов Казахстана (700 тыс. км²) — с запада на восток его протяженность почти 1500 км (61–85° в.д.). Диапазон высот над уровнем моря изменяется от 200 м на западе до 1500 м на востоке. Горные породы представлены сильно метаморфизированными докембрийскими и палеозойскими толщами с гранитными интрузиями разного возраста [28]. Атмосферные осадки в этот регион поступают преимущественно с атлантическим и арктическим переносом воздушных масс. ТП 4, 5 и 6 располагаются в северо-западной части Казахского мелкосопочника. Резкая континентальность климата смягчается здесь орографическими поднятиями и сильной расчлененностью рельефа: чем более расчлененный рельеф, тем больше выпадает осадков [28]. Леса произрастают преимущественно на выходах гранитов. ТП 7 и 8 (см. рис. 1 и табл. 1) располагаются в восточной, более высокогорной части Казахского мелкосопочника — это Ерементау-Каркаралы горно-мелкосопочная умеренно сухая степь с высотами до 1350 м над ур.м. Горные массивы сложены преимущественно гранитами, на которых произрастает сосна [28]. Обе территории имеют статус национальных парков.

Древесно-кольцевые хронологии. Керны сосны обыкновенной отбирали на высоте ствола 0.3–0.4 м от поверхности почвы. Такой подход был использован, чтобы получить наиболее однородные по возрасту и максимальные по длительности ряды индивидуальных ДКХ, поскольку сосна на гранитах растет медленнее, чем на песчаных и

супесчаных почвах, и достигает возраста на высоте 1.3 м в более позднем возрасте. В исследовании использовали керны с 208 деревьев.

При подготовке и анализе образцов руководствовались методикой [37]. Общую ширину годовичных колец измеряли на LINTAB 5 в программном пакете TSAP Measuring System (Rinntech, Germany). Перекрестное датирование и проверку качества измерений проводили в программах TSAP [38] и COFESHA [39]. Программу ARSTAN [40] использовали для построения обобщенных ДКХ и стандартизации с целью устранения возрастного тренда в радиальном приросте, а также влияния на прирост местных факторов неклиматического характера. Для этих целей применялся кубический сглаживающий сплайн 67% от длины индивидуальных ДКХ.

Все полученные ДКХ имели высокий коэффициент автокорреляции. Повышенная автокорреляция предполагает более частое появление относительно высокой, но ложной статистики при выполнении климатических реконструкций, в связи с этим в последующем анализе связи радиального прироста с климатическими факторами мы использовали хронологии остатков (residuals), в которых автокорреляция устранена [40].

Для определения дендроклиматически однородных географических областей были использованы факторный анализ хронологий методом главных компонент и кластерный анализ. В программе Statistica 8.0 выполнена иерархическая классификация с объединением по методу единственной связи, выбранная мера близости — Евклидово расстояние.

Таблица 1. Природные условия дендроклиматических тест-полигонов

№ тест- полигона	Название	Территория ¹	Широта	Долгота	Высота над ур.м., м	Природная зона	Климат ²	$\Sigma T > 10^{\circ}C^3$	ВС, дни ⁴	Годовые осадки, мм	Эдафические условия
1	Аман- Карагай	ТПр	52° 48'	64° 06'	140	Степь	III-б	2600	145–150	309	Песчаные почвы
2	Наурызум	ТПр	51° 53'	64° 47'	125	Степь	III-б	2600	145–150	309	Песчаные почвы
3	Рошнское	СКр	54° 04'	69° 14'	120	Степь	I	2300	135–140	352	Супесь
4	Сандыктау	КМц	52° 57'	68° 88'	425	Лесостепь	I	2200	135–140	308	Выходы гранитов
5	Малые Тюкты	КМц	52° 83'	69° 49'	480	Лесостепь	I	2200	135–140	308	Выходы гранитов
6	Бурабай	КМц	53° 00'	70° 16'	450	Лесостепь	I	2200	135–140	308	Выходы гранитов
7	Баянаул	КМюв	50° 74'	75° 63'	600	Лесостепь	III-б	2500	150–155	323	Выходы гранитов
8	Каркаралы	КМюв	49° 45'	75° 35'	880	Лесостепь	III-б	2500	150–155	323	Выходы гранитов

Примечание. 1 – территория: ТПр – Тургайский прогиб, СКр – Северо-Казахстанская равнина, КМц – Казахский мелкосопочник, центральная часть, КМюв – Казахский мелкосопочник, юго-восточная часть; 2 – климат по [27]; 1 – умеренно влажный умеренно теплый, III-б – слабо засушливый теплый; 3 – сумма эффективных температур по [27]; 4 – продолжительность вегетационного сезона по [27].

Климатические данные. Все климатические данные взяты с сайта Королевского метеорологического института Нидерландов (KNMI) Climate Explorer (<http://climexp.knmi.nl/>). Для анализа климата использовали среднемесячные значения осадков и температуры воздуха CRU TS 4.04 [41] в координатной сетке $0.5 \times 0.5^\circ$ ($49\text{--}54^\circ$ с.ш., $64\text{--}76^\circ$ в.д.) за период 1901–2019 гг. Сравнимые в работе 30-летние подпериоды 1901–1930 и 1990–2019 гг. выбраны как наиболее удаленные во времени. Оценку значимости различий между подпериодами рассчитывали методом дисперсионного анализа в пакете ANOVA. С помощью стандартной самокалибрующей процедуры CRU PDSI 1901–2017 0.5° Global 3.26 были рассчитаны индексы суровости засух Палмера (scPDSI) для периода с мая по июль.

Согласно литературным данным [42, 43], на формирование годичных колец влияют не только климатические условия текущего, но и условия предшествующего года. В связи с этим мы использовали различные комбинации ежемесячных климатических данных от предыдущего до текущего года для выявления связи между шириной годичных колец и климатом.

Связи радиальный прирост – климат. Корреляционный (парные коэффициенты корреляции Пирсона) и регрессионный анализы были проведены для оценки климатического отклика хронологий. Постоянство/стабильность климатического сигнала (температура, осадки, индекс суровости засух Палмера scPDSI) в ДКХ во времени [44] оценивали бутстрап анализом в программе Dendroclim2002 [45] для всех ТП за 1901–2011 гг., в «окне» 40 лет с шагом 1 год. Корреляция между хронологиями и климатическими переменными (температура воздуха, осадки) была рассчитана для сезонов: апрель–июль, май–июль, май–июнь, июнь–июль, октябрь–апрель. Сравнение полученных коэффициентов регрессии выполняли в пакете ANOVA.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Особенности климата. Средняя годовая температура на ТП варьирует от $+1.3^\circ\text{C}$ (ТП 3 и ТП 6) до $+3.7^\circ\text{C}$ (ТП 2), средняя температура января от -16.0°C (ТП 7 и 8; рис. 2а) до -17.5°C (ТП 4 и 5), а в июле от $+19^\circ\text{C}$ (ТП 8; рис. 2б) до $+22.7^\circ\text{C}$ (ТП 2). Наибольшая амплитуда годовых температур характерна для западной части территории (ТП 2), а наименьшая – на юго-востоке (ТП 7 и 8). Наибольшие различия температуры харак-

терны для летнего периода (см. рис. 2б). Различия в холодный период года (октябрь – март) наименее выражены. Максимальная разница летних температур наблюдается в июле (3.7°C) между западным ТП 2 и восточным ТП 8 (см. рис. 2б).

В районе исследования осадки варьируют в достаточно широком диапазоне и $\sim 50\%$ из них приходится на период с мая по август (рис. 2в и 2г). В мае–июле наблюдается выраженный тренд увеличения количества осадков с запада на восток (см. рис. 2в). Однако при сохраняющемся тренде увеличения количества осадков на всех ТП в июле–августе на ТП 7 и 8 их меньше, чем на соседних ТП 5 и 6. Наибольшее количество осадков летнего периода характерно для ТП 3 и 6, а минимальное – для ТП 2 (см. рис. 2г).

Сравнение отклонений температуры и осадков в течение года и за май–июль в период 1990–2019 гг. относительно 1901–1930 гг. показало, что годовой ход температуры хорошо согласовывается между ТП, при этом в 1990–2019 гг. произошло увеличение температуры всех месяцев, кроме июля (рис. 3а). Наибольший рост отмечается в феврале, марте и апреле. В марте температура повысилась на $\sim 4^\circ\text{C}$ на всех ТП. В первой половине сезона вегетации температура выросла в среднем на 1.2°C в мае и 0.8°C в июне, а в июле за период 1990–2019 гг. почти не изменилась по сравнению с 1901–1930 гг. В августе–декабре температура также повысилась, особенно в западной части – на территории ТП 1 и 2.

Изменение количества осадков не имеет явной синхронности на всех ТП, за исключением июня и июля (рис. 3в). В целом на большинстве ТП в 1990–2019 гг. они уменьшились по сравнению с 1901–1930 гг. Особенно резкое и синхронное уменьшение осадков произошло в июне 1990–2019 гг. на всех ТП, а наибольшее снижение наблюдалось на ТП 3, 4, 5 и 6. Напротив, в июле произошло резкое и синхронное увеличение осадков на всех ТП, за исключением ТП 1 и 2, где их количество было сопоставимо с периодом 1901–1930 гг. (рис. 3в, г).

Древесно-кольцевые хронологии и их группировка. Полученные результаты свидетельствуют о том, что максимальный возраст деревьев не зависит от природно-климатической зоны, скорее, статус территории влияет на их возраст. На территории природных парков старые деревья встречаются чаще, чем в лесах без охранного статуса. Наиболее длительная хронология составила 273 года на ТП 8 (табл. 2).

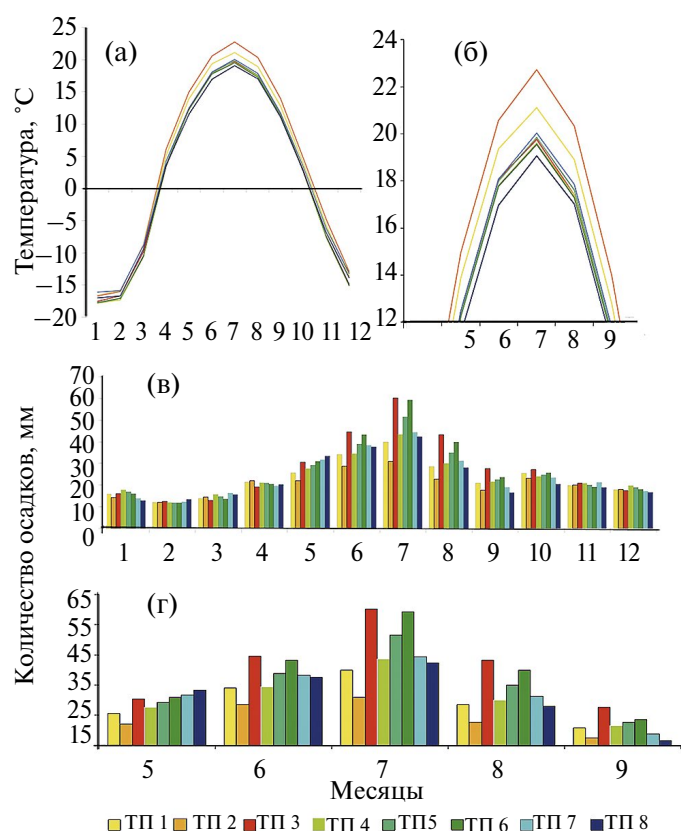


Рис. 2. Климатические данные для исследованных тест-полигонов. Средние значения для 1901–2019 гг. (по CRU TS 4.04): среднегодовая температура (а); средняя температура сезона вегетации (б); годовые осадки (в); осадки сезона вегетации (г).

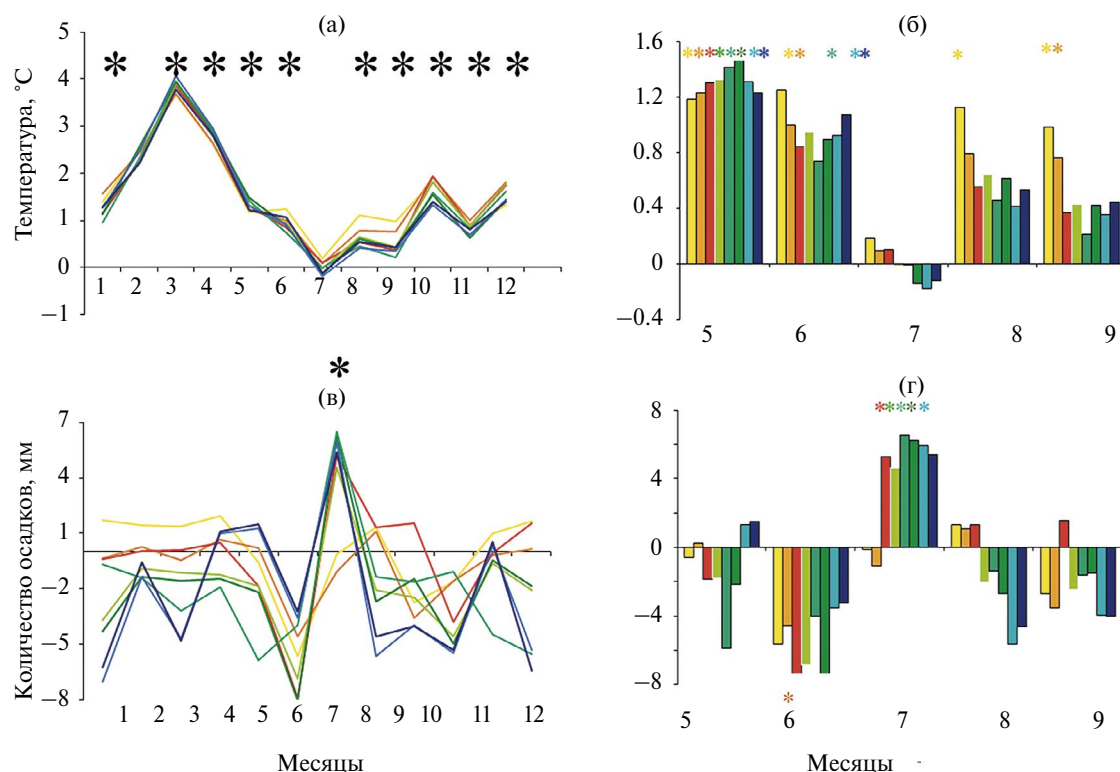


Рис. 3. Отклонения температуры воздуха в течение года (а) и в мае–сентябре (б) и атмосферных осадков (в, г) на тест-полигонах в период 1990–2019 гг. относительно 1901–1930 гг. Значимые изменения ($p < 0.05$) отмечены знаком *. Цветовое обозначение тест-полигонов см. на рис. 2.

Количество выпадающих колец в хронологиях варьирует от 0.02 до 0.62% и не зависит от природно-климатических условий, хотя деревья на ТП 1 и 2 имеют наименьшее количество выпадающих колец, а на ТП 3 и 5 — наибольшее (см. табл. 2). На общем для всех деревьев интервале 1866–2010 гг. часто выпадающие кольца отмечены в 1878, 1900, 1911, 1931, 1955, 1963, 1977, 1991, 1998 и 2004 гг. Для всех хронологий характерны высокие межсерийные коэффициенты корреляции, которые варьируют от 0.61 до 0.81. Более высокие коэффициенты отмечаются у ДКХ Казахского мелкосопочника (ТП 4–8), где деревья произрастают на гранитах. За исключением ТП 2, все хронологии имеют высокий коэффициент чувствительности (см. табл. 2), что указывает на выраженное влия-

ние климатических условий. Средняя ширина годичных колец на ТП 1–3 несколько выше, чем на остальных ТП (табл. 2, рис. 4).

Все стандартные индексированные хронологии имеют высокий коэффициент автокорреляции первого порядка (АК1), что означает зависимость величины радиального прироста от погодно-климатических условий предшествующего года [42, 43]. По величине АК1 можно заметить, что наиболее высокие значения характерны для ТП 1, 2 и 3, где АК1 варьирует от 0.79 до 0.81, и эти ТП расположены на равнинах с песчаными почвами (см. табл. 2). На остальных ТП величина АК1 варьирует от 0.61 до 0.7 — это ТП Казахского мелкосопочника, подстилаемые гранитами.

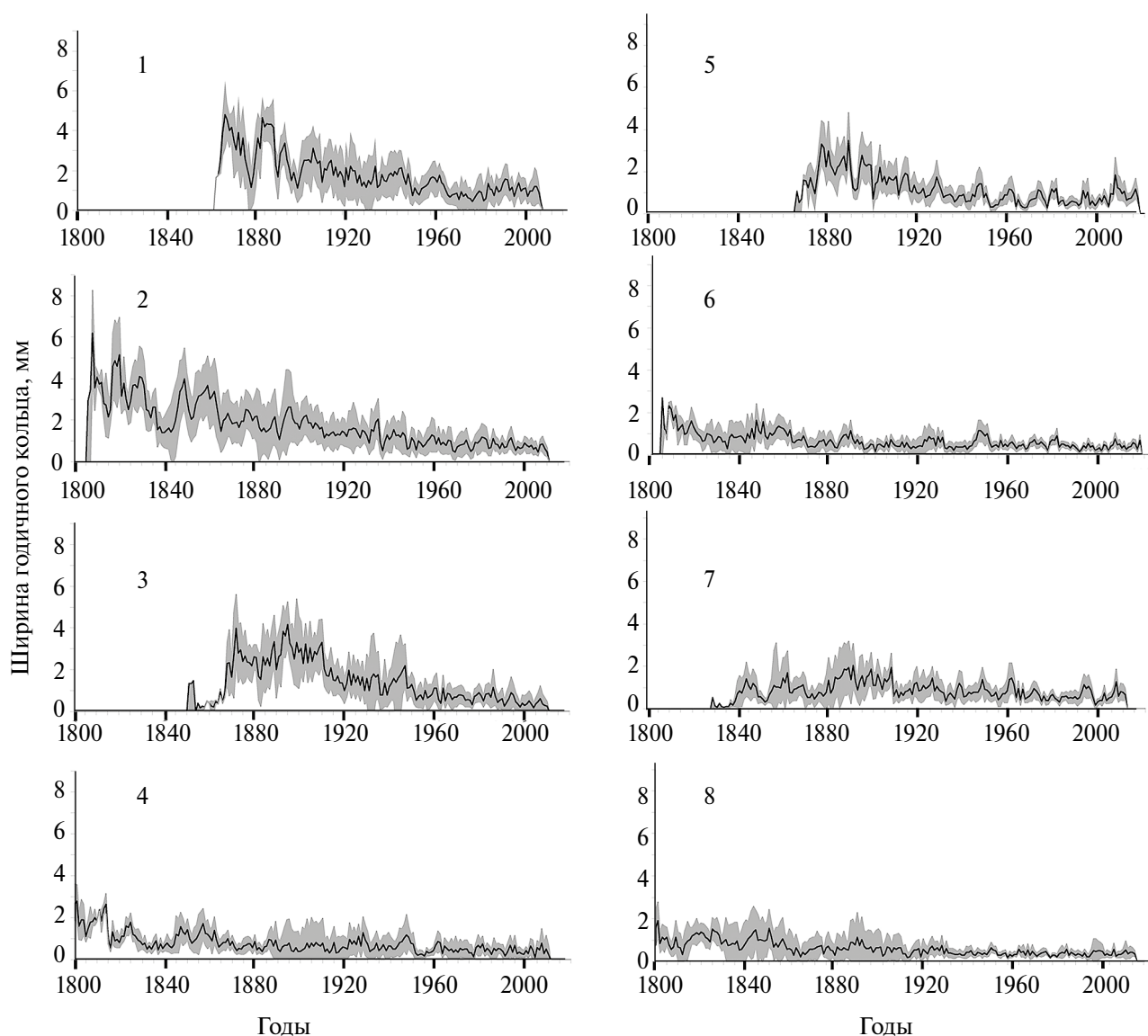


Рис. 4. Измеренные обобщенные хронологии ТП 1–8: черная линия соответствует средним значениям радиального прироста в мм, серым цветом показаны стандартные отклонения.

Таблица 2. Характеристики индексированных стандартных древесно-кольцевых хронологий

Тест-полигон	Статус территории ¹	Число деревьев	Период ДКХ, годы	Длительность хронологии, лет	Число годовичных колец	Выпадающие кольца, %	МКК ²	КЧ ³	СШГК ± СО ⁴ , мм	МШ ⁵ , мм	АКГ ⁶
1	БС	29	1863–2010	148	3709	0.08	0.69	0.27	1.77 ± 1.13	8.75	0.79
2	ГЗ	26	1806–2010	205	4450	0.02	0.61	0.18	1.64 ± 1.11	10.24	0.80
3	БС	23	1851–2010	160	2928	0.54	0.69	0.35	1.41 ± 1.16	10.26	0.81
4	БС	26	1764–2010	247	4657	0.17	0.74	0.32	0.79 ± 0.55	6.43	0.74
5	БС	19	1866–2018	152	2586	0.62	0.72	0.32	1.11 ± 0.78	6.36	0.66
6	НП	31	1805–2018	214	5492	0.22	0.81	0.35	0.62 ± 0.41	3.61	0.61
7	НП	25	1829–2011	183	3574	0.26	0.71	0.32	0.93 ± 0.6	6.77	0.54
8	НП	29	1739–2011	273	5788	0.16	0.75	0.29	0.68 ± 0.60	5.78	0.73

Примечание. 1: БС – без статуса, ГЗ – государственный заповедник, НП – национальный парк; 2 – межсерийный коэффициент корреляции; 3 – коэффициент чувствительности; 4 – средняя ширина годовичного кольца и стандартное отклонение; 5 – максимальная ширина годовичного кольца; 6 – автокорреляция первого порядка.

Таблица 3. Матрица коэффициентов корреляций Пирсона ($p < 0.05$) для индексированных хронологий между тест-полигонами (ТП) на общем интервале времени 1866–2010 гг.

ТП	1	2	3	4	5	6	7
2	0.57						
3	0.42	0.45					
4	0.44	0.35	0.48				
5	0.32	0.37	0.41	0.71			
6	0.38	0.27	0.41	0.73	0.63		
7	0.22	0.10*	0.30	0.49	0.45	0.42	
8	0.26	0.17*	0.37	0.50	0.45	0.44	0.71

* Незначимые коэффициенты корреляции. Заливкой выделены группы, объединяемые по сходным геоморфологическим условиям и наиболее высоким коэффициентам корреляции.

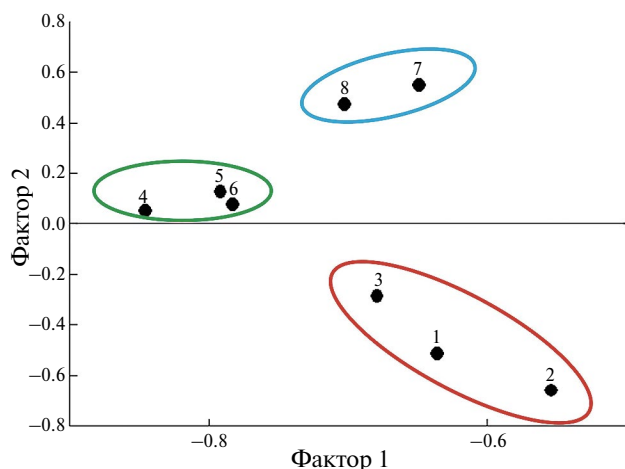


Рис. 5. Факторный анализ древесно-кольцевых хронологий с тест-полигонов 1–8 по методу главных компонент.

Географически близкие ТП показывают более высокие значения коэффициентов корреляции между ДКХ и разделяются на 3 группы (табл. 3). Самые низкие коэффициенты — между крайними группами ТП (1–3 против 7–8). Сравнение по критерию коэффициентов корреляций указывает на разделение ТП на группы со сходными геоморфологическими условиями.

Факторный анализ хронологий методом главных компонент выявил два основных фактора, объясняющих до 68% изменчивости прироста в ДКХ: первый фактор определяет 51% изменчивости, второй — 17%. Выделяются две группы ТП благодаря различию знаков факторов 1 и 2 (рис. 5): первая группа — ТП 1, 2 и 3, во вторую группу вошли ТП 4–8. Однако вторую группу ТП можно представить двумя подгруппами — ТП 4–6 и ТП 7–8.

Кластерный анализ хронологий также показал разделение всех ТП на группы. Восточные ТП 7 и 8 образуют отдельный кластер (рис. 6), аналогич-

но обособляются центральные ТП 4–6 и западные ТП 1 и 2, к которым тяготеет ТП 3. Заметим, что при этом ТП также группируются в соответствии с геоморфологическими условиями.

Связи радиальный прирост — климат. На всех ТП связь радиального прироста сосны с температурой и осадками имеет классический вид, характерный для внутриконтинентальных областей Евразии с аридным и семиаридным климатом: отрицательная — с температурой и положительная — с осадками в сезон вегетации (рис. 7). Такой характер связи отмечается для Южного Урала [5, 10, 46], Северного Казахстана [2, 4, 25], Алтая [6–8], Хакасии и Тувы [10–13]. Поскольку значимых связей прироста ранее сентября предшествующего года не выявлено, на рис. 7 анализируемый интервал времени представлен с сентября предшествующего года.

В мае–июле хронологии на всех ТП различаются в отклике на температуру. Наибольшие различия наблюдаются в мае и июле (рис. 7а). У хронологий с ТП 1, 2 и 5 нет значимой связи с температурой мая, тогда как на ТП 3, 4, 6, 7 и 8 отмечается значимая (особенно на ТП 6, 7 и 8) отрицательная связь с температурой этого месяца, при этом на ТП 7 и 8 влияние температуры максимально значимо в сезон. Температура июня оказывает значимое отрицательное влияние на ширину годичных колец сосны на всех ТП, причем на ТП 1–4 и ТП 6 это максимальные коэффициенты за сезон. В июле значимая связь ДКХ с температурой проявляется только на ТП 1–3 и ТП 7, а на ТП 4–6 и 8 влияние температуры незначимо.

Отметим некоторые выявленные особенности связи ДКХ с температурой. Для ТП 1–4 и ТП 6 наблюдается тенденция усиления связи от мая к

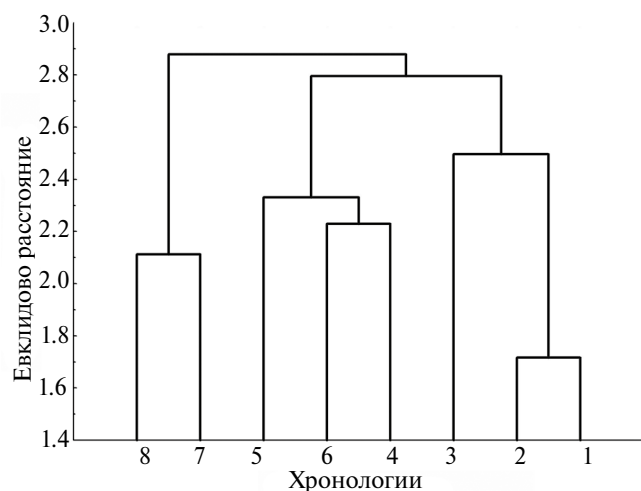


Рис. 6. Результаты кластерного анализа хронологий исследованных тест-полигонов — диаграмма Евклидовых расстояний.

июню и последующее ее ослабление в июле. На ТП 7 и 8 максимальное влияние температуры на прирост отмечается в мае и ослабевает в последующие месяцы.

Связь ДКХ с осадками имеет положительный знак практически для всех ТП в течение года (см. рис. 7б). Значимое влияние осадков на прирост наблюдается уже с апреля на ТП 6–8 и становится максимальным в июне, сохраняя свою значимость в июле на ТП 7. В мае, июне и июле связь ДКХ с осадками значима на ТП 1–3, а на ТП 4–5 только в мае и июне. Отметим тенденцию усиления значимой связи ДКХ с осадками от апреля к июлю для ТП 6–8 и для ТП 1 от мая к июлю. На остальных ТП видимые тенденции связи хронологий с осадками не проявляются.

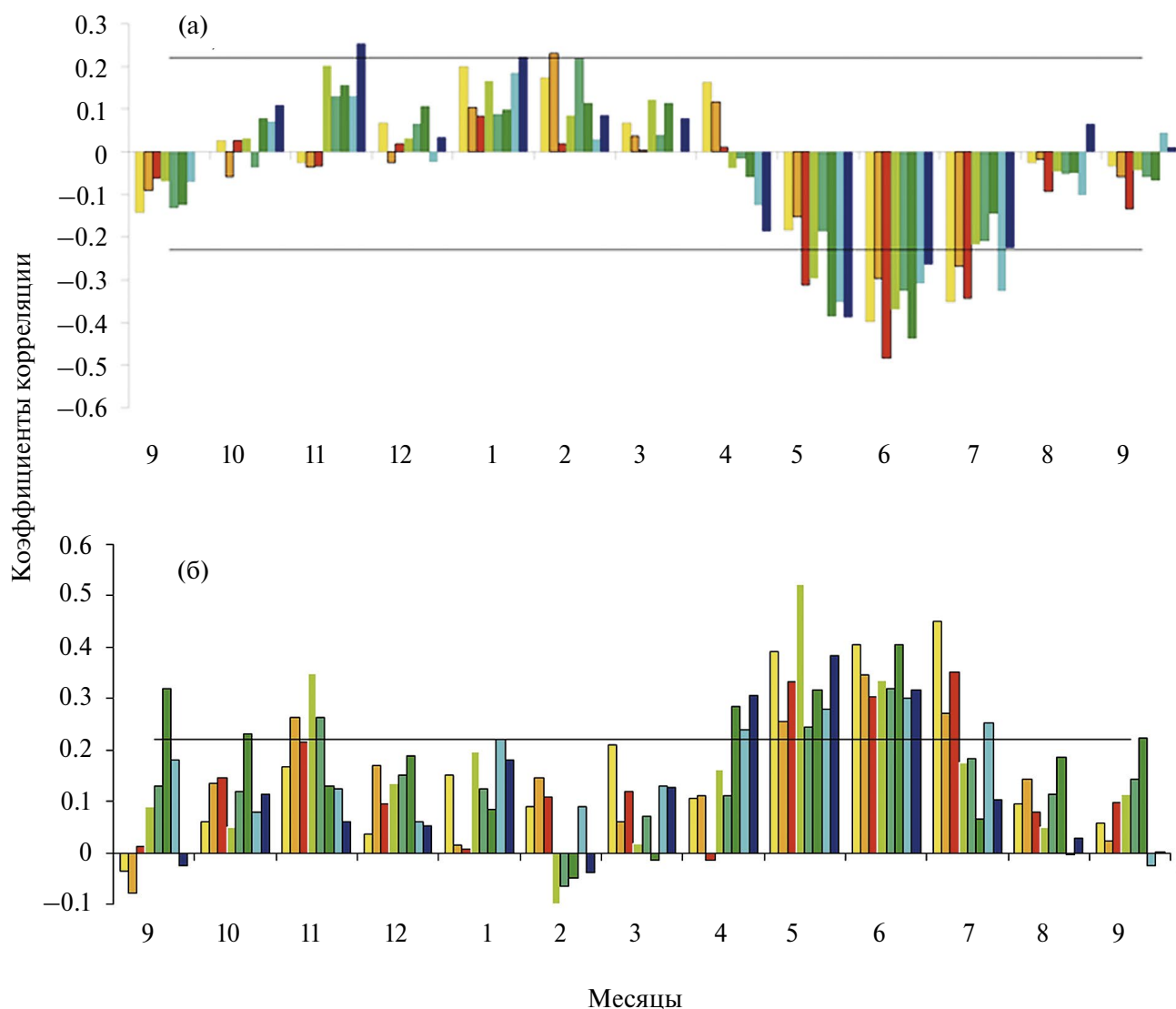


Рис. 7. Коэффициенты корреляции между обобщенными индексированными хронологиями тест-полигонов и температурой воздуха (а) и осадками (б). Горизонтальная линия — уровень значимости ($p < 0.05$). Цветовое обозначение тест-полигонов см. на рис. 2.

Множественный линейный регрессионный анализ показал, что на калибровочном интервале 1911–2015 гг. в текущий сезон вегетации осадки объясняют изменчивость ДКХ на всех ТП в большей степени, чем температура (табл. 4). Вклад температуры в изменчивость прироста варьирует от 30% (ТП 2) до 57% (ТП 3), медиана для всех ТП равна 45%. Вклад осадков в изменчивость прироста варьирует от 42% (ТП 7) до 64% (ТП 1), медиана — 51,5%. Данные табл. 4 показывают, что изменчивость прироста, обусловленная температурой, на ТП 3, 4, 6–8 начинает проявляться с начала мая, а на ТП 1, 2 и 5 позднее — с июня. Изменчивость прироста, обусловленная осадками, начинает проявляться еще раньше — с апреля на восточных ТП 6–8 и с мая — на более западных ТП 1–5. При этом модель, основанная только на осадках, описывает меньшую изменчивость прироста на восточных ТП 5–8 по сравнению с западными ТП 1, 3, 4. Совместное влияние температуры и осадков еще более усиливает изменчивость прироста на всех ТП (см. табл. 4). Следует отметить, что влияние осадков за период с мая предшествующего года по июль текущего имеет низкую значимость, а связь с температурой воздуха за этот же период отсутствует.

Постоянство связи прироста с климатом во времени. Результаты анализа показали, что связь прироста с температурой вегетационного сезона не всегда постоянно значима во времени (рис. 8а). С 1960-х гг. прослеживается общая для всех ТП тенденция усиления постоянства значимости связи прироста с температурой мая. Однако только на ТП 8 эта связь значима на всем интервале 1901–2018 гг. В июне связь прироста с температурой значимо постоянна только на ТП 3–6, при этом общая тенденция изменений не выражена. Постоянство значимой связи прироста

с температурой июля 1901–2018 гг. выявлено только на ТП 1 и 3, остальные ТП не проходят этот тест.

Кривые постоянства значимой связи прироста на всех ТП с осадками мая–июля не показывают каких-либо общих тенденций (рис. 8б). Тест показал значимую связь прироста с осадками мая на ТП 1, 4, 6, 8. В июне значимо постоянная связь прироста с осадками выявлена на ТП 1–3, 5, 8. Все ДКХ (исключение ТП 1) не показали значимо постоянной связи прироста с осадками июля.

Тест на постоянство значимой связи прироста с индексом scPDSI для периода май–июль проходят все ТП, за исключением ТП 6, для которого нет значимой связи в мае и июле (рис. 8в).

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты показывают, что климатические условия между западными (ТП 1 и 2) и восточными (ТП 8) районами исследования различаются. Для ТП 1 и 2 характерны наиболее высокие температуры воздуха в сезон активного формирования годичных колец сосны (май–июль), что обусловлено частым вторжением сухих воздушных масс из Средней Азии [47], тогда как для восточных ТП 7 и 8 температура ниже из-за высоты над уровнем моря более 600 м. Остальные ТП имеют схожие поля температуры мая–августа. Таким образом, температурные различия между ТП обусловлены географическим положением и высотой над уровнем моря.

К востоку температура сезона май–июль понижается. Небольшие различия температуры между ТП 4–7 можно объяснить гористым

Таблица 4. Изменчивость радиального прироста сосны на тест-полигонах (ТП), обусловленная влиянием температуры воздуха и атмосферных осадков за период 1911–2015 гг. (жирный шрифт — значимые коэффициенты ($p \leq 0.05$), «п» — предшествующий год)

ТП	Температура		Осадки				Температура и осадки текущего сезона вегетации
	Месяцы	Изменчивость, %	Месяцы	Изменчивость, %	Месяцы	Изменчивость, %	Изменчивость, %
1	6–7	46	5–7	64	5п-7	22	66
2	6–7	30	5–7	49	5п-7	14	50
3	5–7	57	5–7	57	5п-7	30	66
4	5–6	48	5–6	58	5п-7	18	52
5	6	35	5–6	50	5п-7	17	57
6	5–6	44	4–6	53	5п-7	19	57
7	5–7	48	4–7	42	5п-7	19	53
8	5–6	39	4–6	46	5п-7	15	53

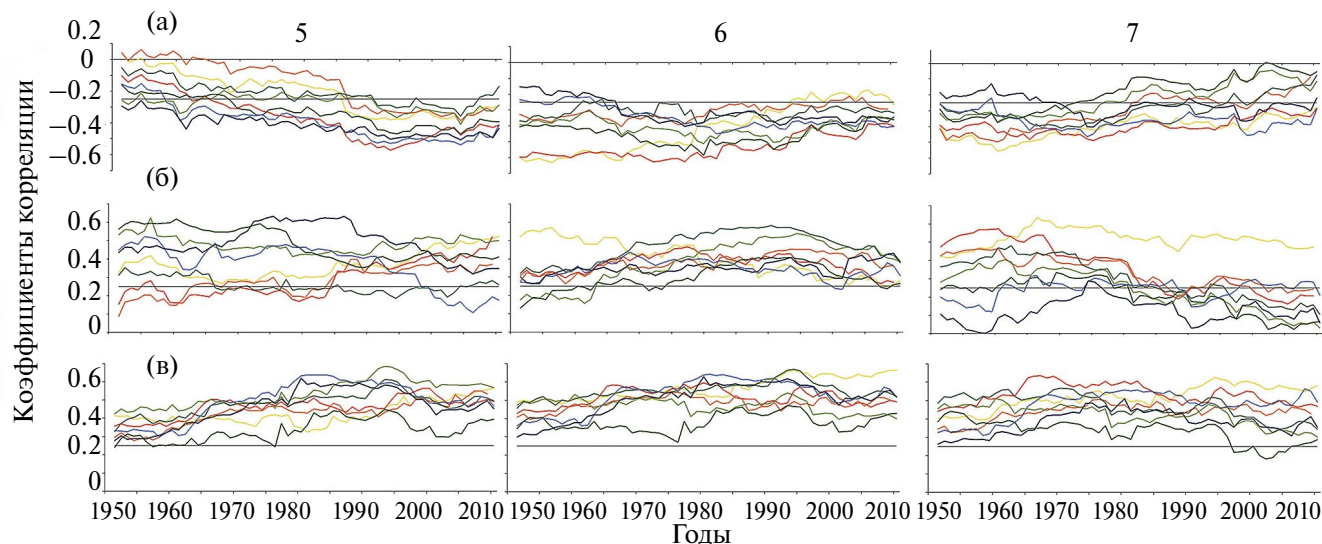


Рис. 8. Анализ стабильности связи прироста сосны на исследованных тест-полигонах за период май–июль (5, 6, 7 соответственно) с температурой воздуха (а), атмосферными осадками (б) и индексом суровости засух Палмера (в). Горизонтальные линии соответствуют уровню значимости $p < 0.05$. Цветовые обозначения тест-полигонов соответствуют рис. 2.

ландшафтом, который сглаживает градиент изменений. Возможно, в условиях равнинного ландшафта градиент температуры был бы более выраженным. Самый северный ТП 3, как и ТП 1–2, расположен в равнинной местности и на него влияют погодно-климатические условия Западной Сибири, к южной части которой этот ТП относится географически [48]. Климатические условия ТП 3 схожи с более южными, но гористыми ТП 4–6 Казахского мелкосопочника. Согласно [27], эти районы (ТП 3–6) входят в одну климатическую область, что объясняет отсутствие выраженного градиента температуры между ними.

Для осадков мая–августа характерен тренд увеличения с запада на восток (см. рис. 2). Эта особенность территории не соответствует представлению о континентальности климата Евразии, согласно которому количество осадков должно уменьшаться при движении с запада к центру континента. Вероятно, этот феномен объясняется рельефом: увеличение высоты с запада на восток от 120 до 880 м над ур. м. (см. табл. 1) вызывает рост количества осадков. Исключением из этой тенденции являются восточные ТП 7 и 8, где количество осадков уменьшается. Полагаем, что это снижение обусловлено расположением ТП в барьерной тени наиболее высоких хребтов (> 1000 м над ур.м.), которые задерживают осадки при движении воздушных масс с запада на восток.

Сравнение двух тридцатилетних периодов (1901–1930 и 1990–2019 гг.) показывает повыше-

ние температуры воздуха и снижение количества осадков во втором периоде для большинства ТП в течение года (см. рис. 3в), что можно интерпретировать как усиление аридизации климата в регионе, отмеченное ранее [19, 29, 30]. Однако для июля характерно резкое увеличение осадков (исключение – западная часть, ТП 1 и 2). На данный момент мы затрудняемся объяснить этот феномен.

Вслед за изменениями климата с запада на восток изменяется климатический сигнал в ДКХ между ТП. Разделение ТП на 3 группы мы объясняем геоморфологическими различиями и климатическими особенностями территории. Несмотря на некоторые климатические различия, в первую группу объединяются ТП 1–3, которые расположены на Тургайском прогибе и Западно-Сибирской равнине. Объединить эти ТП в одну группу позволяет эдафический фактор – песчаные и супесчаные почвы, для которых характерны глубокий вертикальный профиль и наличие горизонта грунтовых вод.

Корневая система сосны способна прорастать в глубинные горизонты таких почв на несколько метров и достигать уровня грунтовых вод. Это позволяет деревьям получать дополнительную влагу, помимо атмосферных осадков мая–июля. Дополнительной почвенной влагой можно объяснить более высокие годовые приросты деревьев на ТП 1–3 и низкие коэффициенты чувствительности на ТП 1 и 2 по сравнению с ТП 4–8 (см. рис. 4 и табл. 2), где почвенный профиль маломощный,

а проникновение корней сосны ограничено монолитными горными породами, без аккумуляции влаги в почвенном профиле. Корневая система сосны здесь имеет поверхностное распространение и использует преимущественно атмосферные осадки текущего месяца.

Высокие коэффициенты автокорреляции на ТП 1–3 по сравнению с другими ТП также могут быть обусловлены аккумуляцией и медленной динамикой изменений глубинной влаги в почве от года к году, тогда как на каменистом субстрате межгодовая аккумуляция почвенной влаги не выражена. Косвенно на это указывает значимая положительная связь ДКХ с осадками в течение сезона (май–июль) активного роста годовичных колец (см. рис. 76).

Вторая группа ТП (4–6) расположена в центральной части территории исследования, в гористых условиях Казахского мелкосопочника – на 300 км восточнее ТП 1 и 2 и на ~120 км южнее ТП 3. Расстояние с запада на восток между крайними ТП 4 и 6 около 250 км. Деревья здесь растут на маломощных почвах, подстилаемых гранитами. Эти ТП расположены по абсолютной высоте выше на 200–250 м, чем первая группа. Благодаря гористому рельефу поле температуры на территории в течение года достаточно однородное (см. рис. 2а). Негативная значимая связь ДКХ с температурой усиливается в данной группе ТП от мая к июню и становится незначимой в июле (см. рис. 7а).

Как отмечалось выше, характерная особенность территории второй группы – градиент увеличения количества осадков с запада на восток от ТП 4 к ТП 6 (см. рис. 2б). Соответственно повышается значимость связи между ДКХ и осадками с апреля по июнь (см. рис. 7б). При этом осадки апреля незначимы для хронологий ТП 4 и 5, а в мае связь хронологий ТП 4 с осадками достигает максимума. На ТП 5 и 6 максимально значимая связь ДКХ с осадками наблюдается в июне, а в июле связи становятся незначимыми на всех ТП группы. Возможно, это связано с тем, что в июле осадки достигают сезонного максимума, и их количество не оказывает значимого влияния на ДКХ. Полагаем, что своеобразие локальных условий роста деревьев в гористой местности сглаживает влияние региональных климатических условий, и это проявляется в особенностях связи ДКХ с климатом.

Третья группа ТП (7, 8) также расположена в гористой местности на маломощных почвах,

подстилаемых гранитами, но отличается еще большей абсолютной высотой, которая здесь достигает 880 м над ур.м. Связь ДКХ с температурой на этих ТП значима на протяжении мая–июля: максимально значимая связь наблюдается в мае и ослабевает к июлю (см. рис. 7а). Значимая связь ДКХ с осадками наблюдается с апреля по июнь, достигая в июне максимальных сезонных значений. При этом на ТП 7 значимое влияние осадков сохраняется и в июле. Отметим тренд усиления связи ДКХ с осадками от апреля к июню, который согласуется с сезонным трендом увеличения их количества. Поскольку это гористая местность, разнообразие условий роста деревьев здесь также может быть обусловлено локальными условиями. Известно, что выходы горных пород могут создавать благоприятный микроклимат за счет снижения средней температуры и повышения средней влажности воздуха. Здесь снижается амплитуда суточных изменений температуры и влажности воздуха, что способствует дополнительному снабжению деревьев влагой, образующейся на скалах в результате конденсации в ночное время [49, 50]. Названные особенности сближают условия на ТП 7 и 8.

Результаты сравнения двух климатических периодов (1901–1930 и 1990–2019 гг.) и теста на постоянство связи ДКХ с климатическими переменными согласуются с современным усилением аридизации климата Казахстана [19, 25, 29, 30]. Действительно, с конца 1980-х гг. наблюдается усиление негативного влияния температуры мая на радиальный прирост сосны на всех ТП (см. рис. 8а), которое сохраняется и в июне. Повышение температуры мая – июня происходило на фоне снижения количества осадков 1990–2019 гг., особенно в июне (см. рис. 3б), что приводило к увеличению влияния осадков на прирост: значимость связи прироста с осадками июня возросла в 1970–1990-х гг.

Температура июля в 1990–2019 гг. практически сохранилась на уровне 1901–1930 гг. (см. рис. 3а), а количество осадков заметно увеличилось (см. рис. 3в). Соответственно постоянство связи ДКХ с температурой на большинстве ТП сохранялось на всем исследуемом интервале времени (см. рис. 8а), а связь с осадками после 1980-х гг. перестала быть значимой на всех ТП, за исключением ТП 1 (см. рис. 8б).

Индекс scPDSI показывает, хотя и незначимые, тенденции аридизации климата в мае–июне на большинстве ТП (см. рис. 8в). Увеличение осадков

в июле не ослабляет связь этого индекса с ДКХ (за исключением ТП 6) и сохраняет свою значимость на всех ТП на протяжении сезона май–июль.

Связи ДКХ с климатическими переменными также можно рассматривать в контексте геоморфологических особенностей территорий. Связь с осадками апреля на ТП 6–8 можно объяснить ранним прогреванием склонов скальных пород, на которых растут деревья, и соответственно ранним началом сезонного роста, когда наличие влаги является необходимым условием данного процесса. При этом температура воздуха не достигает критических значений, чтобы негативно сказываться на формировании клеточных структур годовичного кольца (см. рис. 2а). Нагрев почвы в мае–июне и увеличение физического испарения влаги с поверхности обуславливают негативное влияние температуры на радиальный прирост сосны. Особенно это проявляется в мае, поскольку количество осадков меньше, чем в июне и июле (см. рис. 2г и 7а). Небольшое увеличение осадков в июне усиливает их положительную роль в формировании годовичного прироста на всех ТП (см. рис. 7б).

Для равнинных ТП на песках и супесях (ТП 1–3) связь прироста с температурой и осадками апреля отсутствует. Возможно, радиальный прирост деревьев здесь еще не начался из-за более позднего прогрева почвенного профиля по сравнению с горными склонами. Негативное влияние температуры в мае, связанное с эвапотранспирацией, также незначимо по той причине, что на песчаных почвах деревья формируют глубокую корневую систему, обеспечены глубинными запасами почвенной влаги, и в этом случае высокие температуры воздуха не вызывают водного стресса.

Влияние осадков и температуры остается значимым для ДКХ на ТП 1–3 и 7 в июле (см. рис. 7). На первых трех равнинных ТП с песчаными и супесчаными почвами, на которых при увеличении температуры (см. рис. 2б) и количества осадков июля (см. рис. 2г) сохраняется значимое влияние обоих факторов, осадки пополняют запас почвенной влаги (положительный эффект), а повышение температуры увеличивает эвапотранспирацию (негативное влияние). На ТП 4–6 и 8 отсутствие значимой связи ДКХ с температурой и осадками июля может быть объяснено благоприятным микроклиматом – снижением средней температуры и повышением средней влажности воздуха в гористой местности, а также

дополнительным обеспечением конденсационной влагой на скалах в ночное время [49]. Из этого контекста выпадает ТП 7, что, вероятно, связано с его особенностями орографии и/или почвенных условий. При этом модель линейной регрессии, основанная только на осадках, описывает меньшую изменчивость прироста на восточных ТП 6–8 (в среднем 47%, см. табл. 4) в сравнении с западными равнинными ТП 1–3 (56.7%). Вероятно, это обусловлено более высокими температурами и меньшим количеством осадков на западных ТП по сравнению с восточными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования показали, что в направлении от Тургайского прогиба на западе до восточной части Казахского мелкосопочника происходит увеличение количества осадков, обусловленное повышением высоты над уровнем моря в этом направлении.

При сравнении двух климатических периодов – 1901–1930 и 1990–2019 гг. – обнаружено, что во втором периоде произошло синхронное увеличение температуры воздуха на всех исследуемых ТП. Количество осадков в 1990–2019 гг. на большинстве ТП снизилось без выраженной синхронности, за исключением июня и июля: в июне количество осадков резко снизилось на всех ТП, тогда как в июле резко и синхронно увеличилось. Общее снижение количества осадков подтверждает отмеченную ранее тенденцию аридизации климата Республики Казахстан.

Тест на постоянство климатического сигнала в ДКХ выявил, что не все ТП и хронологии могут быть использованы для реконструкции температуры или осадков, поскольку климатический сигнал в них непостоянен. По результатам исследования только связь ДКХ с индексом суровости засух Палмера (PDSI) сохраняла значимую стабильность во времени на всех ТП.

Все исследованные ТП разделяются на три группы в соответствии с почвенными условиями и высотой над уровнем моря. Основное разделение – на равнинные ТП на песчаных почвах и ТП в гористых условиях на маломощных почвах, подстилаемых горными породами. Последние в свою очередь подразделяются на две группы в зависимости от высоты над уровнем моря. Полагаем, что геоморфологические и почвенные условия могут в большей степени обуславливать различия в отклике радиального прироста годовичных колец

сосны между ТП, чем климатические различия территорий. Эту особенность необходимо учитывать при выполнении пространственно-временных реконструкций климата на основе древесно-кольцевых хронологий. В целом островные боры северного Казахстана имеют достаточно высокий дендроклиматический потенциал и могут быть использованы для анализа климатических условий территории и выполнения климатических реконструкций.

ФИНАНСИРОВАНИЕ И БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена по государственному заданию № 122021000093-6 в лаборатории дендрохронологии Института экологии растений и животных УрО РАН. Авторы благодарят двух анонимных рецензентов за высказанные замечания, что позволило улучшить понимание и восприятие статьи.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Настоящая статья не содержит исследований с участием людей или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают отсутствие конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Davi N.K., D'Arrigo R., Jacoby G.C. et al. A long-term context (931–2005 C.E.) for rapid warming over Central Asia // *Quaternary Science Reviews*. 2015. V. 121. P. 89–97. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.05.020>
2. Akkemik U., Köse N., Kopabayeva A., Mazarzhanova K. October to July precipitation reconstruction for Burabai region (Kazakhstan) since 1744 // *Int. J. Biometeorol.* 2020. V. 64. P. 803–813. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01870-8>
3. Ljungqvist F.C., Piermattei A., Seim A. et al. Ranking of tree-ring based hydroclimate reconstructions of the past millennium // *Quaternary Science Reviews*. 2020. V. 230. Art. 106074. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2019.106074>
4. Zhao X., Chen F., Seim A. et al. Global warming leads to growth increase in *Pinus sylvestris* in the Kazakh steppe // *Forest Ecology and Management*. 2024. V. 553. Art. 121635. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121635>
5. Кучеров С.Е. Реконструкция летних осадков на Южном Урале за последние 375 лет на основе анализа радиального прироста лиственницы Сукачева // *Экология*. 2010. № 4. С. 248–256. [Kuchеров С.Е. Reconstruction of summer precipitation in the Southern Urals over the last 375 years based on analysis of radial increment in the Siberian larch // *Russ. J. of Ecology*. 2010. V. 41. № 4. С. 284–292. DOI: 10.1134/S1067413610040028]
6. Рыгалова Н.В., Быков Н.И. Пространственно-временная изменчивость климатического сигнала древесно-кольцевых хронологий ленточных и Приобских боров // *Журнал Сибирского федерального ун-та. Сер. биол.* 2015. Т. 8. № 4. С. 394–409. <https://doi.org/10.17516/1997-1389-2015-8-4-394-409>
7. Taynik A.V., Barinov V.V., Myglan V.S. et al. Growth coherency and climate sensitivity of *Larix sibirica* at the upper treeline in the Russian Altai-Sayan mountains // *Dendrochronologia*. 2016. V. 39. P. 10–16. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2015.12.003>
8. Баринов В.В., Мыглан В.С., Тайник А.В. Экстремальные климатические события в Центральном Алтае за последние 1500 лет по данным древесно-кольцевой хронологии JELO // *Изв. РАН. Сер. географическая*. 2017. № 1. С. 91–102. <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2017-1-91-102>
9. Баринов В.В., Мыглан В.С., Тайник А.В. и др. Экстремальные климатические события в Алтае-Саянском регионе как индикатор сильных вулканических извержений // *Геофизические процессы и биосфера*. 2018. Т. 17. № 3. С. 45–61. <https://doi.org/10.21455/GPB2018.3-3>
10. Агафонов Л.И., Гурская М.А., Кукарских В.В. и др. Островные боры Южного Урала и ленточные боры Алтая как объекты дендроклиматических исследований // *Экология*. 2021. № 5. С. 325–334. DOI: 10.31857/S0367059721050036 [Agafonov L.I., Gurskaya M.A., Kukarskih V.V. et al. Insular pine forests of the Southern Urals and ribbon pine forests of the Altai as objects of dendroclimatic research // *Russ. J. Ecol.* 2021. V. 52. P. 349–357.] <https://doi.org/10.1134/S1067413621050039>
11. Babushkina E.A., Zhirnova D.F., Belokopytova L.V. et al. Response of four tree species to changing climate in a moisture-limited area of South Siberia // *Forests*. 2019. V. 10. № 11. 999. <https://doi.org/10.3390/f10110999>
12. 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. DOI: 10.15372/SEJ20180403 [Belokopytova L.V., Babushkina E.A., Zhirnova D.F. et al. Climatic response of conifer radial growth in forest-steppe of South Siberia: comparison of three approaches // *Contemporary Problems of Ecology*. 2018. V. 11. № 4. P. 366–376.] <https://doi.org/10.1134/S1995425518040030>

13. Kostyakova T.V., Babushkina E.A., Belokopytova L.V., Touchan R. Precipitation reconstruction for the Khakassia region, Siberia, from tree rings // The Holocene. V. 28. P. 377–385.
<https://doi.org/10.1177/0959683617729450>
14. Zhirnova D.F., Belokopytova L.V., Meko D.M. et al. Climate change and tree growth in the Khakass-Minusinsk Depression (South Siberia) impacted by large water reservoirs // Scientific Reports. 2021. V. 11. 14266.
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-93745-0>
15. Tabakova M.A., Arzac A., Martinez E., Kirdyanov A.V. Climatic factors controlling *Pinus sylvestris* radial growth along a transect of increasing continentality in southern Siberia // Dendrochronologia. 2020. V. 62.
<https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125709>
16. Climate Change in Central Asia. A visual synthesis // Zoi Environment Network. 2009. 80 p.
17. Kazakhstan's Second National Communication to the Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change. Ministry of Environment Protection, Astana, 2009. 164 p.
18. Farooq I., Shah A.R., Salik K.M., Muftaba I. Annual, seasonal and monthly trend analysis of temperature in Kazakhstan during 1970-2017 using non-parametric statistical methods and GIS technologies // Earth Systems and Environment. 2021. V. 5. P. 575–595.
<https://doi.org/10.1007/s41748-021-00244-3>
19. Hu Y., Han Y., Zhang Y. Land desertification and its influencing factors in Kazakhstan // Journal of Arid Environments. 2020. V. 180. Art. 104203.
<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104203>
20. Zhang P., Jeong J.-H., Yoon J.-H. et al. Abrupt shift to hotter and drier climate over inner East Asia beyond the tipping point // Science. 2020. V. 370. P. 1095–1099.
<https://doi.org/10.1126/science.abb3368>
21. Zubairov B., Lentschke J., Schroder H. Dendroclimatology in Kazakhstan // Dendrochronologia. 2019. V. 56.
<https://doi.org/10.1016/j.dendro.2019.05.006>
22. Jiang S., Zhang T., Yuan Y. et al. Drought reconstruction based on tree-ring earlywood of *Picea obovata* Ledeb. for the southern Altay Mountains // Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography. 2020. V. 102. P. 267–286. DOI:10.1080/04353676.2020.1773060
23. Zhang R., Qin L., Shang H. et al. Climatic change in southern Kazakhstan since 1850 C.E. inferred from tree rings // Int. J. Biometeorol. 2020. V. 64. P. 841–851.
<https://doi.org/10.1007/s00484-020-01873-5>
24. Kopabayeva A., Mazarzhanova K., Kose N., Akkemik U. Tree-ring chronologies of *Pinus sylvestris* from Burabai Region (Kazakhstan) and their response to climate change // Dendrobiology. 2017. V. 78. P. 96–110.
<https://doi.org/10.12657/denbio.078.010>
25. Mazarzhanova K., Kopabaeva A., Kose N., Akkemik U. The first forest fire history of the Burabai Region (Kazakhstan) from tree rings of *Pinus sylvestris* // Turk. J. Agric. For. 2017. V. 41. P. 165–174.
<http://journals.tubitak.gov.tr/agriculture/>
26. Mapitov N.B., Belokopytova L.V., Zhirnova D.F. et al. Factors limiting radial growth of conifers on their semiarid borders across Kazakhstan // Biology. 2023. V. 12. Art. 604.
<https://doi.org/10.3390/biology12040604>
27. Байшолонов С.С., Павлова В.Н., Жакиева А.Р. и др. Агроклиматические ресурсы Северного Казахстана // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 1. С. 168–184.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=35138146>
28. Казахстан. Природные условия и естественные ресурсы СССР. Т. 7. / Ред. И.П. Герасимов. М.: Наука, 1969. 482 с.
29. Deng H., Yin Y., Xiang Han. Vulnerability of vegetation activities to drought in Central Asia // Environ. Res. Lett. 2020. V. 15. Art. 084005.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab93fa>
30. Lopez Fernandez M.L., Zhumabayev D., Garcia R.M. et al. Assessment of bioclimatic change in Kazakhstan, end 20th – middle 21st centuries, according to the PRECIS prediction // PloS One. 2020. V. 15. Art. e0239514.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0239514>
31. The Sixth National report on biological diversity in the Republic of Kazakhstan. Astana, 2018. 226 p.
32. Бирюков В.Н., Маланьин А.Н. Генетическая классификация лесов Северного, Центрального и Южного Казахстана // Эколого-географические и генетические принципы изучения лесов / Ред. Зубарева Р.С., Фильрозе Е.М. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1983. С. 69–74.
33. Гордягин А.Я. Материалы для познания почв и растительности Западной Сибири. Казань, 1900–1901. 382 с. (Тр. Об-ва естествоиспытателей при Казан. ун-те. Т. 34. Вып. 3).
34. Крашенинников И.М. Основные пути развития растительности Южного Урала в связи с палеогеографией Северной Евразии в плейстоцене и голоцене // Сов. ботаника. 1939. № 67. С. 67–99.
35. Грибанов Л.Н. К истории степных боров Западной Сибири и Северного Казахстана // Ботан. журн. 1957. Т. 42. № 4. С. 556–570.
36. Usoltsev V.A., Vanclay J.K. Stand biomass dynamics of pine plantations and natural forests on dry steppe in Kazakhstan // Scandinavian Journal of Forest Research. 1995. V. 10. № 1-4. P. 305–312.
<https://doi.org/10.1080/02827589509382897>
37. Stokes M.A., Smiley T.L. An introduction to tree-ring dating. Chicago: The University of Chicago Press, 1968. 73 p.
38. Rinn F. TSAP. Reference Manual. Version 3.0. Heidelberg, 1996. 263 p.
39. Holmes R.L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement // Tree-Ring Bull. 1983. V. 43. № 3. P. 69–78.

40. 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.
41. Harris I., Osborn T.J., Jones P., Lister D. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multi-variate climate dataset // Sci. Data. 2020. V. 7. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-323>.
42. Fritts H. Tree rings and climate. London; N.Y.; San Francisco: Academic Press, 1976. 567 p.
43. Esper J., Schneider L., Smerdon J.E. et al. Signals and memory in tree-ring width and density data // Dendrochronologia. 2015. V. 35. P. 62–70. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dendro.2015.07.001>
44. 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>
45. Biondi F., Waikul K. DENDROCLIM2002: A C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies // Computers & Geosciences. 2004. V. 30. № 3. P. 303–311. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2003.11.004>
46. 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> [Agafonov L.I., Kukarskih V.V. Climate changes in the past century and radial increment of pine in the Southern Ural Steppe // Russ. J. of Ecology. 2008. V. 39. №3. P. 160–167. DOI:10.1134/S1067413608030028]
47. Борисов А.А. Климаты СССР. М.: Просвещение, 1959. 280 с.
48. Гвоздецкий Н.А. Физико-географическое районирование СССР. М.: Изд-во МГУ, 1968. 578 с.
49. Locosselli G.M., Cardim R.H., Ceccantini G. Rock outcrops reduce temperature-induced stress for tropical conifer by decoupling regional climate in the semiarid environment // Int. J. Biometeorol. 2016. V. 60. P. 639–649. <https://doi.org/10.1007/s00484-015-1058-y>
50. Hartl C., Duthorn E., Tejedor E. et al. Micro-site conditions affect Fennoscandian forest growth // Dendrochronologia. 2021. V. 65. Art. 125787. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125787>

RADIAL GROWTH OF *PINUS SYLVESTRIS* L. IN ISLAND BORES OF NORTHERN KAZAKHSTAN IN THE CONTEXT OF CLIMATE AND GEOMORPHOLOGICAL CONDITIONS

M. A. Gurskaya^{a,*}, L. I. Agafonov^{a,}, V. V. Kukarskih^a, A. Y. Surkov^a, Feng Chen^b**

^a*Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch, Russian Academy of Sciences,
Russia 620144 Ekaterinburg*

^b*Institute of Transboundary River Basins and Ecological Security, Yunnan University,
China 650500 Kunming Yunnan*

^{*}*e-mail: marina_gurskaya@mail.ru*

^{**}*e-mail: lagafonovc@ipae.uran.ru*

Abstract — Tree-ring chronologies based on the width of the annual ring of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) were studied at 8 test sites in island forests in the north of the Republic of Kazakhstan from the Turgai trough to the eastern part of the Kazakh small hills. An analysis of the relationships between the radial growth of pine and climate showed that the climate signal in chronologies can change depending on geomorphological conditions determined by the edaphic factor, relief and absolute elevations. These features must be taken into account when using tree-ring chronologies for spatiotemporal climate reconstructions.

Keywords: radial growth, tree-ring chronologies, Scots pine, climate, geomorphological conditions, Kazakhstan