

## Климатический отклик радиального прироста видов лиственницы (*Larix* sp.) в географических культурах на территории Красноярской лесостепи

А. П. БАРЧЕНКОВ<sup>1, 2</sup>, И. А. ПЕТРОВ<sup>1, 2, 4</sup>, А. С. ШУШПАНОВ<sup>1, 3, 4</sup>, А. С. ГОЛЮКОВ<sup>1, 2, 4</sup>

<sup>1</sup>Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН  
обособленное подразделение ФИЦ “Красноярский научный центр СО РАН”  
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28  
E-mail: alexbarchenkov@mail.ru

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет  
660041, Красноярск, просп. Свободный, 79

<sup>3</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий им. М. Ф. Решетнева  
660037, Красноярск, просп. Красноярский рабочий, 31

<sup>4</sup>Томский государственный университет  
634050, Томск, просп. Ленина, 36

Статья поступила 22.03.2023

После доработки 11.04.2023

Принята к печати 20.04.2023

### АННОТАЦИЯ

В статье представлены результаты сравнительного анализа хода радиального роста различных видов и климатипов лиственниц, произрастающих на едином экологическом фоне в географических культурах, заложенных в 1965–1967 гг. в пригороде Красноярска сотрудниками Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН. Исследовались климатипы лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) из различных высотных поясов гор Южной Сибири, лиственницы Гмелина (*L. gmelinii* Rupr.) из Забайкальских и Зейских провинций Восточной Сибири, а также лиственницы японской (*L. leptolepis* Gord.), интродуцированной с о. Сахалин. На основании кластерного анализа рядов радиального прироста выделены четыре группы климатипов, имеющие различные стратегии роста в зависимости от нормы реакции на факторы окружающей среды: горно-лесостепные и горно-таежные климатипы лиственницы сибирской; климатипы лиственницы Гмелина из Забайкалья. Климатип лиственницы японской с о. Сахалин сформировал отдельный кластер. Наибольшие значения радиального прироста выявлены у групп горно-лесостепных климатипов лиственницы сибирской и лиственницы Гмелина, интродуцированных из восточносибирских провинций. Низкие значения радиального прироста отмечены у климатипов горно-таежной зоны Южной Сибири и лиственницы японской с о. Сахалин. Дендроклиматический анализ позволил выявить связи между экологическими условиями места интродукции и ходом роста исследуемых климатипов. В условиях Красноярской лесостепи основным лимитирующим радиальный прирост фактором является влагосодержание корнеобитаемого слоя во второй половине вегетационного сезона (июль – август). Деревья лиственницы, происходящие из более влажных местообитаний, сильнее реагируют на возрастание водного стресса, в то время как радиальный прирост деревьев, взятых из более сухих мест, положительно откликается на увеличение продолжительности вегетационного периода.

**Ключевые слова:** лиственница, радиальный прирост, географические культуры, изменения климата.

## ВВЕДЕНИЕ

Лиственница является одной из основных лесобразующих пород Азиатской России. Широкая экологическая пластичность и повсеместное распространение на территории Сибири способствовали появлению эколого-географической изменчивости лиственниц [Коропачинский, Встовская, 2012]. Одним из основных методов изучения эколого-географической изменчивости древесных растений является создание географических культур – выращивание и сравнительная оценка семенного потомства деревьев разного географического происхождения на едином экологическом фоне [Макаров и др., 2002].

Особый интерес представляет исследование географических культур в контексте изменений климата. К началу третьего десятилетия XXI в. климатические изменения существенно повлияли на облик лесов бореальной зоны [Aitken et al., 2008; Anderegg et al., 2013; Millar, Stephenson, 2015; IPCC, 2021]. В Сибири катастрофические масштабы приобретает явление усыхания темнохвойных лесов, вызванное синергизмом абиотических (возрастание температуры воздуха и аридизация климата) и биотических (вспышки массового размножения насекомых, бактериальные и грибные инфекции) факторов [Павлов и др., 2008; Raffa et al., 2008; Kolb et al., 2016; Kharuk et al., 2021]. Результаты ряда исследований предполагают возможную замену темнохвойных лесных формаций (*Pinus sibirica* Du Tour, *Abies sibirica* Ledeb., *Picea obovata* Ledeb.) в части их ареала на светлохвойные (*Pinus sylvestris* L., *Larix sibirica* Ledeb.) [Kharuk et al., 2017].

Географические культуры, в которых произрастают различные виды и климатипы древесных растений, являются модельным объектом для изучения сравнительной реакции древесных растений на наблюдаемые изменения климата. Полученные результаты могут использоваться в построении моделей изменения лесных экосистем при реализации различных климатических сценариев, самые “жесткие” из которых предполагают дальнейшее возрастание температуры и засухливости климата [IPCC, 2021].

В целях ведения устойчивого лесопользования необходим подбор климатипов, обладающих максимальной продуктивностью и устойчивостью к изменениям окружающей

среды с учетом предполагаемых климатических сценариев. В XX и начале XXI в. в результате исследований географических культур лиственницы, проведенных в разных регионах нашей страны и за рубежом [Тимофеев, 1961; Ирошников, 1977; Макаров и др., 2002], отобраны климатипы, пригодные для разведения в различных районах ее ареала, и разработано лесосеменное районирование, структура которого должна постоянно корректироваться в связи с глобальными изменениями климатических условий произрастания [Макаров, 2002; Abaimov et al., 2002; Eysteinson et al., 2009]. Чаще всего возраст географических культур не позволяет провести комплексный дендроклиматический анализ, а рекомендации по использованию тех или иных климатипов строятся на таксационных характеристиках, сохранности и семенной продуктивности древостоев [Макаров и др., 2002; Кузьмина, 2004]. В то же время выявление основных лимитирующих радиальный прирост эколого-климатических факторов позволит дать более точный прогноз развития различных климатипов в условиях происходящих климатических изменений.

Несмотря на длительные исследования географической изменчивости в культурах лиственницы в Красноярском крае [Ирошников, 1977; Барченков, 2011], в приведенном контексте данные насаждения не были изучены.

Целью данной работы является сравнительный анализ отклика радиального прироста различных климатипов лиственницы, выращенных в условиях Красноярской лесостепи, на климатические изменения. В работе впервые проведен анализ радиального роста контрастных по происхождению климатипов в географических культурах с момента закладки до текущей стадии их развития.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

### Характеристика объектов исследования

Объектами исследования послужили климатипы лиственницы в географических культурах, заложенных сотрудниками лаборатории лесной генетики и селекции Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН в 1964–1966 гг. на экспериментальной базе

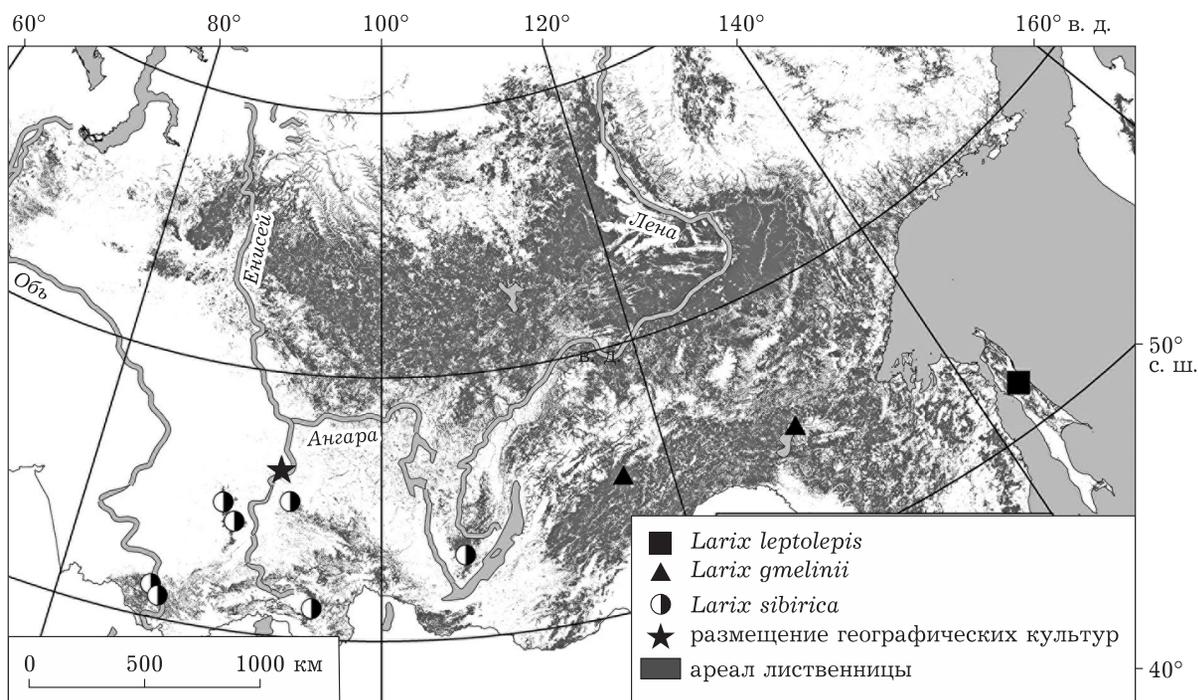


Рис. 1. Расположение географических культур и материнских древостоев

“Погорельский бор” (табл. 1). [Ирошников, 1977]. Исследовались климатипы лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) из различных высотных поясов гор Южной Сибири, лиственницы Гмелина (*L. gmelinii* Rupr.) из Забайкалья и Приамурья, а также лиственницы японской (*L. leptolepis* Gord.), интродуцированной с о. Сахалин (рис. 1), их видовая принадлежность определялась в соответствии с выделенными ареалами видов [Круклис, Милютин, 1977].

Экспериментальная база “Погорельский бор” находится на территории Красноярской лесостепи в бассейне р. Бузим (38 км севернее г. Красноярска), на водоразделе двух ее притоков. Почвы супесчаные серые и сильно оподзоленные, реже суглинистые, серые лесные. Грунтовые воды залегают на большой глубине, в связи с чем насаждения в основном используют влагу атмосферных осадков, 60 % которых выпадает в период вегетации (с мая по сентябрь) [Барченков, 2011].

Климат района резко-континентальный со значительными колебаниями температуры по годам. Для анализа температур и осадков использовались данные проекта CHELSA (набор модельных климатических данных с высоким разрешением (30 угловых секунд, ~1 км)) [<https://chelsa-climate.org/>; Karger et al., 2017].

Среднегодовая температура воздуха составляет 1 °С, среднелетняя 16,9 °С, среднезимняя –15,4 °С. Сумма годовых осадков в среднем 560 мм, из них летом выпадает 230 мм, зимой – 70 мм. Средняя продолжительность вегетационного периода 149 дней.

С начала 1990-х до начала 2000-х годов возрастает средняя температура воздуха за вегетационный период, снижается уровень осадков, SPEI. После 2000 г. рост температуры замедляется, а уровень увлажнения восстанавливается, исключая экстремальную засуху 2012 г.

#### Дендрохронологический и дендроклиматический анализ

Для исследования выбраны 10 климатипов, общая выборка составила 190 образцов (от 13 до 21 образца с климатипа). Образцы собирали с помощью таксационного бурава как можно ближе к корневой шейке для получения максимального по продолжительности временного ряда радиального прироста. Измерения радиального прироста проводились на платформе LINTAB 6 (точность 0,01 мм).

Для проверки качества перекрестной датировки использовались программы TSAP и COFCHA [Holmes, 1983; Rinn, 1996]. Коэффициенты межсерияльной корреляции составляют

Т а б л и ц а 1  
**Географические, климатические и лесоводственные характеристики магеринских древостоев [Ирошников, 1977] и экспериментального участка**

Административная единица, лесничество	Координаты		Высота над уровнем моря, м	Физико-географическая провинция	Тип леса	Состав древостоя	Сумма температур выше 5 °С	Годовая сумма осадков, мм
	с. ш.	в. д.						
Лиственница сибирская ( <i>Larix sibirica</i> )								
Красноярский край: 639 Манское	55°10'	93°45'	600–1000	Восточно-Саянская	Разнотравный	5Л5Б	1880	625
Республика Хакасия: 705 Саралинское	54°50'	89°15'	500–1100	Кузнецко-Алтайская	Разнотравный	8Л2Б	–	590
681 Сонское	54°10'	90°10'	500–1000		Разнотравный	8Л2Б	1643	450
Республика Алтай: 525 Чемальское	51°15'	85°35'	900–1500	Алтайская	Широкотравный	10Л	2330	570
480 Чемальское								
Республика Тыва: 778 Каа-Хемское	51°10'	95°40'	900–1200	Верхне-Енисейская	Злаково-разнотравный	10Л	1998	375
Иркутская область: 997 Усть-Ордынское	53°10'	105°30'	700–1000	Ангаро-Ленская	Разнотравный	9Л1Б	1710	400
Лиственница Гмелина ( <i>Larix gmelinii</i> )								
Читинская область: 1261 Тунгооченское	55°10'	116°45'	800–1100	Витимская	Рододендроновый	5С5Л	1664	400
Амурская область: 1381 Зейское	54°45'	128°55'	300–700	Верхнезейско-Удская	Брусничный	10Л	1782	670
Лиственница японская ( <i>Larix leptolepis</i> )								
Сахалин: 1501 Томаринское	51°45'	142°50'	100–200	–	Зеленомошный	10Л	–	785
Характеристики экспериментального участка								
Красноярский край: Емельяновское "Погорельский бор"	56°22'	92°57'	240–280	Пред-Саянская			1900	430

от 0,5 до 0,64, популяционный сигнал  $EPS = 0,95-0,97$ . Обобщенная хронология строилась путем исключения возрастных трендов временных рядов радиального прироста с последующим усреднением в пределах выборки для каждого климатипа. Для устранения возрастного тренда применялась процедура индексирования (методом линейной регрессии или отрицательной экспоненциальной кривой; программа ARSTAN), которая преобразует временные ряды ширины годичных колец во временные ряды безразмерных индексов со средним 1,0 и относительно постоянной дисперсией. Для усиления климатического сигнала из хронологий была удалена автокорреляционная составляющая с использованием авторегрессионной модели, и получены “остаточные” (residual) хронологии [Cook, Holmes, 1986; Speer, 2010].

Кластерный анализ выполнялся в программе STATISTICA методом полной связи с коэффициентом корреляции ( $1 - \text{Pearson } r$ ) в качестве меры расстояния.

Для проведения дендроклиматического анализа использовались модельные данные проектов CHELSA (температура приземного воздуха и осадки), MERRA-2 (влажность корнеобитаемого слоя, сумма активных температур ( $t \geq +5 \text{ }^\circ\text{C}$ ), продолжительность периода вегетации (число дней с  $t \geq +5 \text{ }^\circ\text{C}$ )) и SPEI (индекс сухости).

Параметры температуры и осадков получены из базы данных CHELSA V1.2 (пространственное разрешение  $0,01^\circ \times 0,01^\circ$ , период 1979–2013 гг. [https://chelsa-climate.org/; Karger et al., 2017]) и с метеостанции “Опытное поле” (индекс ВМО 29570, расстояние 40 км до пробных площадей). Данные метеостанции и базы данных CHELSA имеют высокую степень корреляции между собой ( $r = 0,98$  для температуры;  $r = 0,91$  для осадков; рис. 2, а, б). В дальнейшем дендроклиматическом анализе использовались временные ряды температуры и суммы осадков, полученные из базы данных CHELSA.

Влажность корнеобитаемого слоя (0–100 см) получено из базы данных MERRA-2 (пространственное разрешение  $0,5^\circ \times 0,625^\circ$ , период 1980–2017 гг. [https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2; Gelaro et al., 2017]).

Стандартизированный индекс осадков и испаряемости – SPEI (Standardized Precipita-

tion Evapotranspiration Index) представляет разность ( $D_i$ ) между величинами осадков ( $P_i$ ) и потенциальной эвапотранспирации ( $PET_i$ ):

$$D_i = P_i - PET_i, \quad (1)$$

где  $i$  – месяцы (пространственное разрешение –  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ , период 1951–2017 гг. [http://sac.csic.es/spei; Vicente-Serrano et al., 2010]).

В дендроклиматическом анализе использованы коэффициенты корреляции Пирсона. Анализировался период с апреля по сентябрь.

Для проведения множественного регрессионного анализа данные радиального прироста и эколого-климатических переменных путем нормализации в программе STATISTICA приведены к временным рядам со средними значениями около 0 и стандартным отклонением, равным 1. Анализируемый период соответствует максимальному окну перекрытия хронологий и метеоданных и составляет 34 года (1980–2013).

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### Кластерный анализ древесно-кольцевых хронологий

Для исследуемых климатипов были составлены стандартизированные древесно-кольцевые хронологии ( $N = 10$ ). На основе динамики радиального прироста с помощью кластерного анализа удалось выделить четыре группы деревьев (рис. 3).

Первые две группы представлены сибирской лиственницей (*L. sibirica*). В горно-лесостепную группу попали деревья из Усть-Ордынского лесничества Иркутской области, Сонского, Саралинского лесничеств Республики Хакасия и Манского лесничества Красноярского края. Горно-таежную группу формируют деревья Чемальского и Каа-Хемского лесничеств Республик Алтай и Тыва. Деревья лиственницы Гмелина (*L. gmelinii*) образуют третью группу (Тунгокоченское и Зейское лесничества Забайкальского края), деревья лиственницы японской (*L. leptolepis*) выделены в отдельный кластер.

### Анализ динамики радиального прироста

Максимальные значения суммарного радиального прироста наблюдаются у *L. gmelinii*

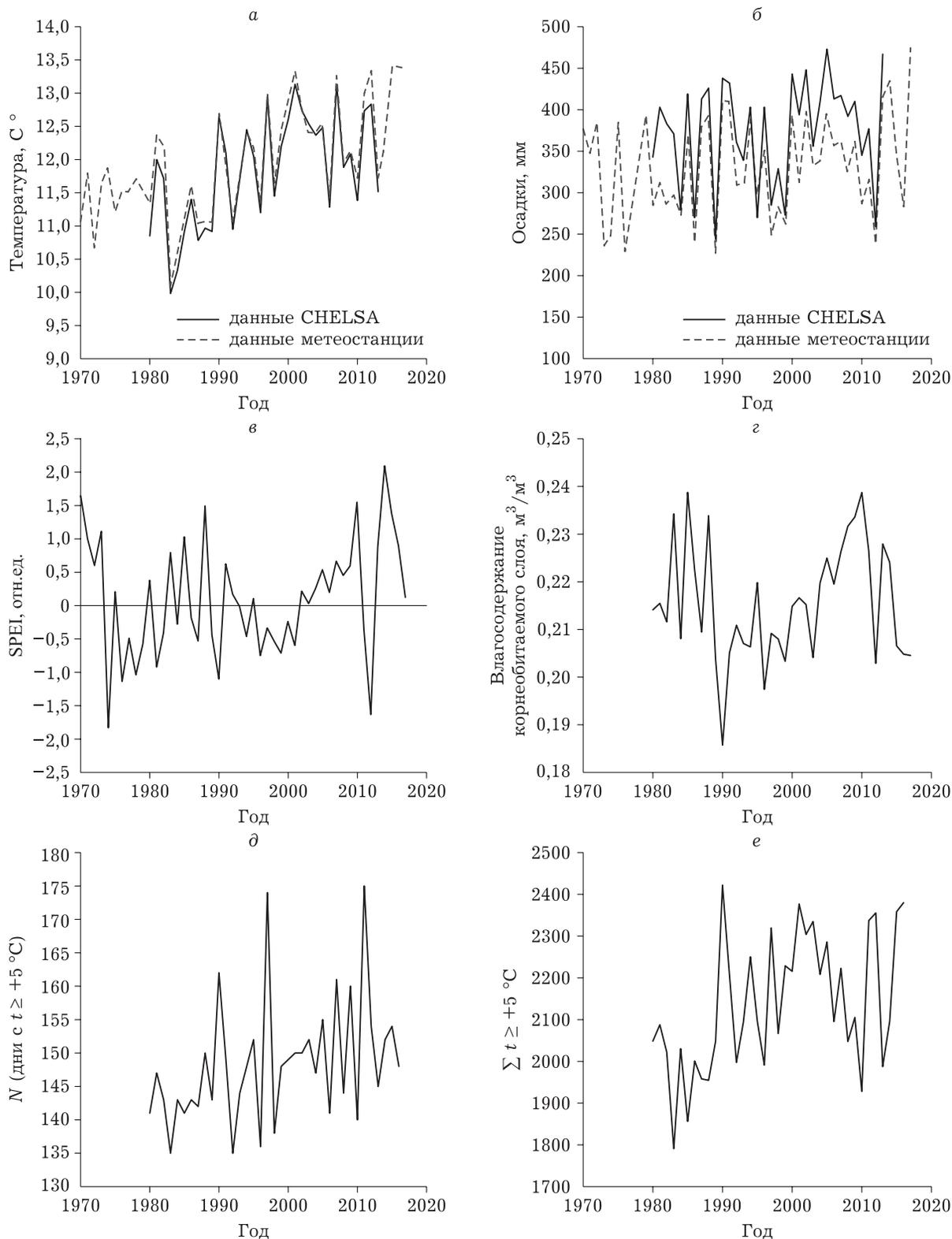


Рис. 2. Ряды эколого-климатических переменных района исследований (апрель–сентябрь): а – температура; б – сумма осадков (приведены данные метеостанции “Опытное поле”, индекс ВМО 29570, и проекта CHELSA); в – индекс сухости SPEI (<http://sac.csic.es/spei>); з – влагосодержание корнеобитаемого слоя; д – длительность периода вегетации (количество дней,  $N$ , с  $t \geq +5^\circ\text{C}$ ); е – сумма активных температур ( $t \geq +5^\circ\text{C}$ ); з, д, е – данные проекта MERRA-2

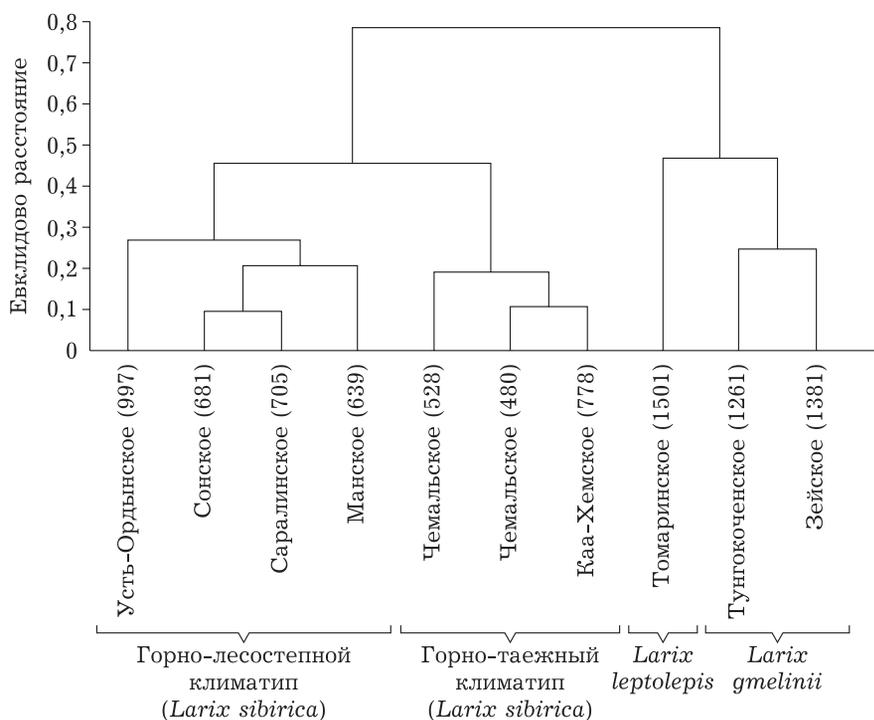


Рис. 3. Результаты кластерного анализа древесно-кольцевых хронологий (названия климатипов соответствуют названиям лесничеств, в которых произрастают материнские насаждения)

и горно-лесостепных климатипов *L. sibirica*. В первые 10 лет жизни существенных различий между рассматриваемыми группами не выявлено, далее *L. leptolepis* начинает существенно отставать в темпах прироста. У деревьев *L. sibirica* горно-таежных климатипов после 20-летнего возраста отмечено отставание в радиальном приросте. Наименьшими значениями суммарного радиально-

го прироста обладают деревья *L. leptolepis* (рис. 4).

В динамике радиального прироста изучаемых климатипов не выявлено значимых трендов, но на всех хронологиях отмечается схожая тенденция – снижение радиального прироста в 90-х годах XX столетия (рис. 5). Исключением является группа горно-таежных климатипов *L. sibirica* с резким скачком ради-

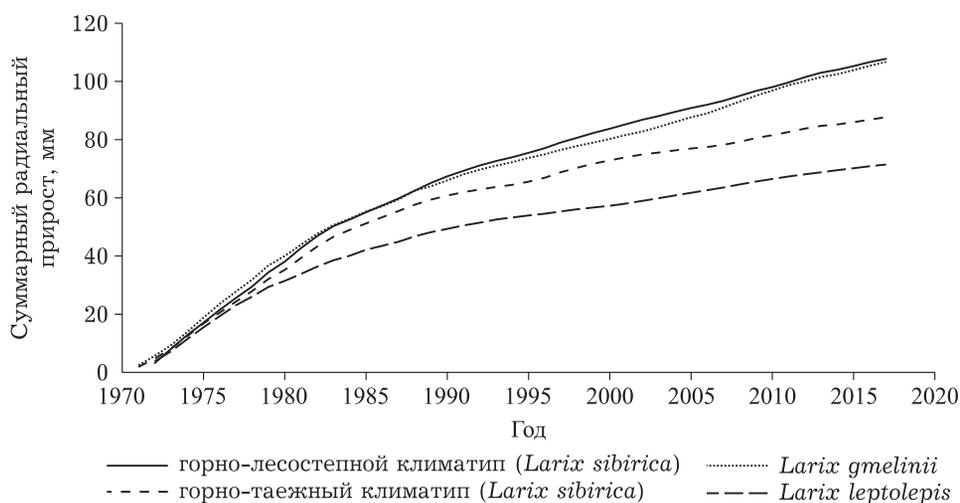


Рис. 4. Интегральные кривые роста исследуемых климатипов лиственницы

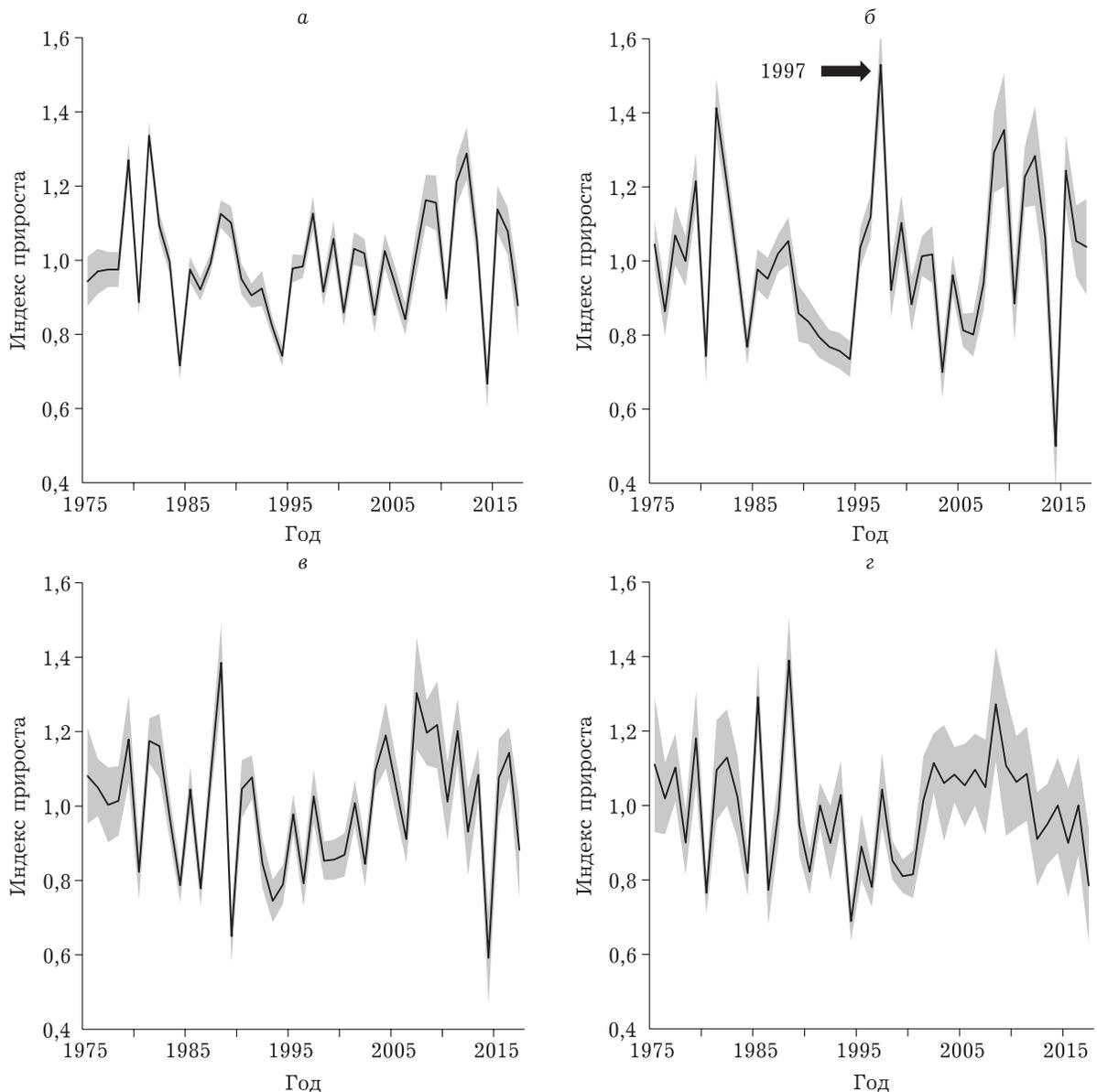


Рис. 5. Остаточные древесно-кольцевые хронологии исследуемых климатипов лиственницы: а – горнолесостепные климатипы *L. sibirica*; б – горно-таежные климатипы *L. sibirica* (стрелкой отмечен пик радиального прироста 1997 г.); в – *L. gmelinii*; г – *L. leptolepis*. Серый фон – доверительный интервал при  $p < 0,05$

ального прироста в 1997 г. (рис. 5, б). У всех исследованных климатипов *L. sibirica* отмечается возрастание радиального прироста к концу 2000-х – началу 2010-х годов (рис. 5, а, б). Радиальный прирост *L. gmelinii* и *L. leptolepis* возрастает уже с начала 2000-х, после которых прирост снижается (рис. 5, в, г).

#### Дендроклиматический анализ

Радиальный прирост деревьев лиственницы сибирской коррелирует преимуще-

ственно с показателями температуры ( $r = 0,44-0,54$ ; рис. 6, а) и влажностью корнеобитаемого слоя (ВКС) апреля ( $r = 0,32-0,39$ ; рис. 6, г). Положительные корреляции зафиксированы между радиальным приростом и суммой осадков августа, но значимый коэффициент наблюдается только для горнолесостепных насаждений ( $r = 0,37$ ; рис. 6, б). Радиальный прирост горно-таежных насаждений отрицательно коррелирует с SPEI начала сезона вегетации (рис. 6, в).

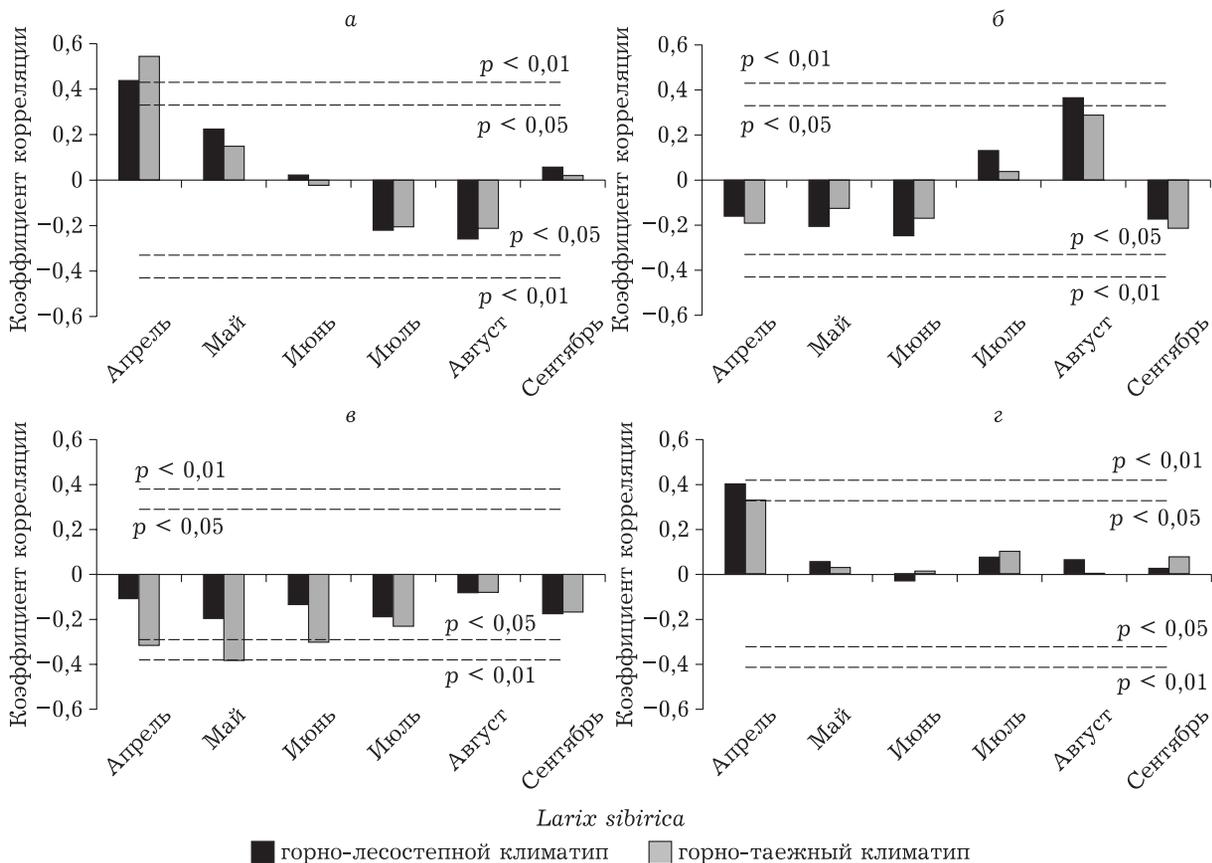


Рис. 6. Коэффициенты корреляции между остаточными древесно-кольцевыми хронологиями *L. sibirica* и эколого-климатическими параметрами: а – температура; б – сумма осадков; в – индекс сухости SPEI; г – влажность корнеобитаемого слоя

Насаждения *L. gmelinii* и *L. leptolepis* более чувствительны к параметрам увлажнения: положительная связь радиального прироста зафиксирована с суммой осадков (рис. 7, б), SPEI (рис. 7, в) и ВКС (рис. 7, г). Наиболее высокие коэффициенты корреляции получены с эколого-климатическими параметрами июля: сумма осадков ( $r = 0,37-0,44$ ; см. рис. 7, б); ВКС ( $r = 0,46-0,65$ ; см. рис. 7, г); SPEI ( $r = 0,41$  для *L. leptolepis*; см. рис. 7, в). Достоверная отрицательная связь с температурой также проявилась в июле для обоих видов (коэффициент корреляции изменяется от  $-0,32$  до  $-0,38$ ; рис. 7, а). Радиальный прирост *L. gmelinii* (как и *L. sibirica*) положительно коррелирует с температурой апреля ( $r = 0,5$ ; см. рис. 7, а).

Для климатипов *L. sibirica* и *L. gmelinii* зафиксирована положительная значимая корреляция с продолжительностью вегетационного периода (количество дней с температурой выше  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $r = 0,37-0,43$ ).

Как следует из уравнений множественной регрессии, радиальный прирост лиственницы сибирской определяется преимущественно температурой и влажностью корнеобитаемой зоны апреля, в то время как повышение температуры во второй половине лета ингибирует радиальный прирост:

$$GI = 0,45 \cdot T_{(\text{апрель})} - 0,24 \cdot T_{(\text{июль-август})} + 0,49 \cdot \text{ВКС}_{(\text{апрель})} - 0,4 \cdot \text{SPEI}_{(\text{май-июнь})};$$

$$R^2 = 0,65, \quad (2)$$

где  $GI$  – нормализованный радиальный прирост (горно-лесостепной климатип *L. sibirica*);  $T$  – нормализованная среднемесячная температура; ВКС – нормализованная влажность корнеобитаемого слоя; SPEI – нормализованный индекс SPEI;

$$GI = 0,64 \cdot T_{(\text{апрель})} - 0,23 \cdot T_{(\text{август})} - 0,32 \cdot \sum_{t > 5\text{ }^{\circ}\text{C}} + 0,46 \cdot \text{ВКС}_{(\text{апрель})} - 0,58 \cdot \text{SPEI}_{(\text{май})};$$

$$R^2 = 0,79, \quad (3)$$

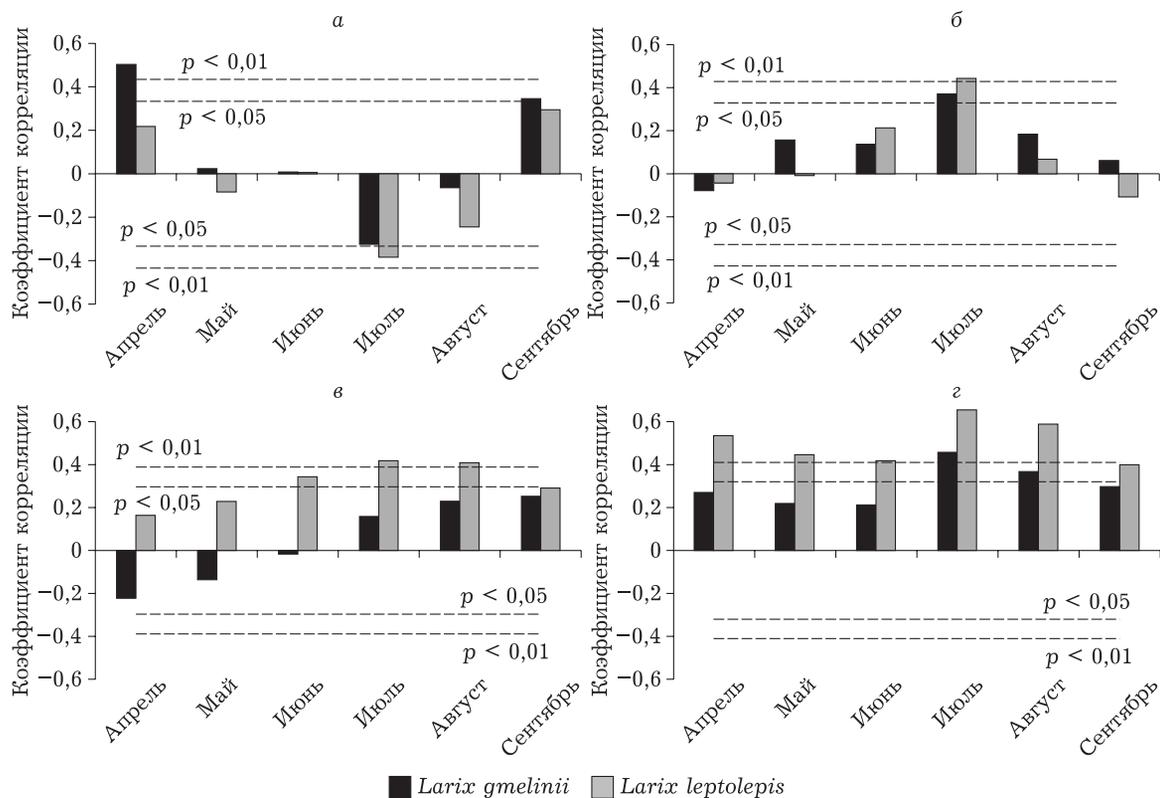


Рис. 7. Коэффициенты корреляции между остаточными древесно-кольцевыми хронологиями *L. gmelinii* и *L. leptolepis* и эколого-климатическими параметрами. а – температура; б – сумма осадков; в – SPEI; г – влажность корнеобитаемого слоя

где  $GI$  – нормализованный радиальный прирост (горно-таежный климатип *L. sibirica*);  $\Sigma_{t > 5} \text{ } ^\circ\text{C}$  – нормализованная сумма температур выше  $5 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Радиальный прирост лиственницы Гмелина стимулируется температурой начала вегетационного сезона и ингибируется температурой второй половины лета, также влияние оказывают сумма осадков и уровень атмосферной влажности конца вегетационного периода:

$$GI = 0,65 \cdot T_{\text{(апрель)}} - 0,37 \cdot T_{\text{(июль-август)}} + 0,27 \cdot OC_{\text{(сентябрь)}} + 0,44 \cdot SPEI_{\text{(сентябрь)}}; \quad R^2 = 0,70, \quad (4)$$

где  $GI$  – нормализованный радиальный прирост (*L. gmelinii*);  $OC$  – нормализованная сумма осадков.

Радиальный прирост *L. leptolepis* зависит от влажности корнеобитаемого слоя второй половины вегетационного периода (5):

$$GI = 0,67 \cdot ВКС_{\text{(июль-август)}}; \quad R^2 = 0,45, \quad (5)$$

где  $GI$  – нормализованный радиальный прирост (*L. leptolepis*).

### Обсуждение результатов

В результате кластерного анализа хронологий изучаемые климатипы были разделены на четыре группы. Группы соответствуют представленным видам (*L. sibirica*, *L. gmelinii*, *L. leptolepis*). Климатипы *L. sibirica* делятся на две группы в зависимости от высоты произрастания и географической приуроченности материнского древостоя: 500–1000 м над уровнем моря (горно-лесостепные насаждения) и 900–1500 м над уровнем моря (горно-таежные насаждения).

Основные массивы лиственничных лесов, формируемых лиственницами сибирской, приурочены к горным районам Южной Сибири с антициклоническим режимом, характеризующимся пониженным увлажнением, повышенной инсоляцией, длительным периодом с очень низкими отрицательными температурами, значительной континентальностью. В пределах отдельных горных систем лиственничные леса занимают различные высотные пояса. Низкогорные лиственничники

характерны для Кузнецкого Алатау, бассейнов рек Кан и Мана на Восточном Саяне (600–800 м). По данным А. И. Ирошникова [1984], на этих территориях произрастают наиболее продуктивные насаждения лиственницы сибирской. Данную группу лиственничников в нашем исследовании представляют насаждения из Саралинского и Сонского лесничеств Республики Хакасия, Манского лесничества Красноярского края и Усть-Ордынского лесничества Иркутской области. Данная группа климатипов характеризуется зависимостью радиального прироста от гидротермических условий начала вегетационного сезона. Повышение апрельских температур, наблюдаемое на протяжении последних десятилетий, способствовало более раннему сходу снега, раннему началу и увеличению продолжительности сезона вегетации (рис. 8). Существенное влияние на годичный радиальный прирост оказывает запас почвенной влаги на момент начала вегетационного сезона. И хотя ранее не было найдено зависимости между показателями сокодвижения деревьев лиственницы и влагосодержанием почвы на исследуемой пробной площади [Бенькова и др., 2019], ряд исследований, проведенных в лесостепях Южной Сибири, показывает связь между радиальным приростом и почвенным увлажнением в течение периода вегетации [Knorre et al., 2010; Babushkina et al., 2015; Харук и др., 2018].

Возрастание температуры во второй половине вегетационного сезона (июль–август) ингибирует радиальный прирост. Исследования, ранее проведенные в экотоне лесостепей Кузнецкого Алатау, в местах произрастания ряда материнских древостоев горно-лесостепной группы климатипов также показали негативное влияние повышения температуры воздуха и аридизации климата на радиальный прирост лиственницы с начала 1990-х [Харук и др., 2018].

На северо-западном макросклоне Центрального Алтая и в горах Республики Тыва нижний пояс лиственничников начинается с 800–1600 м. [Ирошников, 1977]. В условия Красноярской лесостепи интродуцированы климатипы из Чемальского лесничества Республики Алтай и Каа-Хемского лесничества Республики Тыва. По данным ряда исследований адаптации горных климатипов в условиях географических культур [Авров, 1977,

1996; Ирошников, 1977; Макаров и др., 2002] установлено, что в результате действия естественного отбора в отдельных горных поясах формируются высотные экотипы со специфическими экологическими и биологическими свойствами растений. Перемещение лиственницы (создание географических культур) из горных популяций в условия равнины – слабо пересеченной лесостепи с иным режимом радиации, тепло- и влагообеспеченности, показывает, что на рост и сохранность культур в первую очередь влияет высота произрастания материнских насаждений над уровнем моря. Изменение условий произрастания в географических культурах вызывает значительную вариацию сроков прохождения фенологических фаз у потомства горных популяций.

Как и для группы горно-лесостепных климатипов, на радиальный прирост деревьев группы горно-таежных климатипов оказывают влияние гидротермические характеристики начала вегетационного периода. При этом температура апреля является ведущим фактором. Отдельно стоит отметить скачок радиального прироста в 1997 г. (см. рис. 8), совпавший как с резким возрастанием температуры апреля, так и с пролонгированным вегетационным периодом. Повышение температуры в середине вегетационного периода оказывает ингибирующее влияние на радиальный прирост.

Территория заготовки семян лиственницы Гмелина (Тунгокоченское и Зейское лесни-

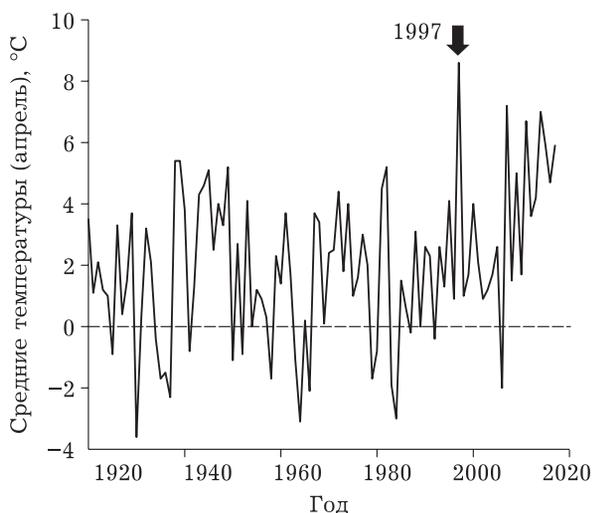


Рис. 8. Динамика среднемесячных температур апреля (по данным метеостанции “Опытное поле”, индекс ВМО 29570; стрелкой отмечен пик температуры 1997 г.)

чества, Восточная Сибирь) отличается более суровым резко-континентальным климатом. Средняя температура летнего периода +14 – +20 °С. Зима холодная и продолжительная, средняя температура января –28 ... –34 °С. Количество осадков колеблется от 350 (в котловинах) до 800 мм/год. Высота снежного покрова 10–20 см. В районах произрастания материнских древостоев распространена сплошная многолетняя мерзлота [Круклис, Милютин, 1977]. На радиальный прирост деревьев данной группы повышение температуры воздуха в апреле оказывает стимулирующий эффект (хотя резкого возрастания радиального прироста на фоне скачка апрельской температуры в 1997 г. не обнаружено, что может говорить о более сложной связи показателей начала сезона вегетации и радиального прироста), в то время как потепление второй половины вегетационного сезона ингибирует радиальный прирост. Отличительной особенностью является влияние атмосферной засушливости и уровня осадков в сентябре, что, вероятно, может являться следствием происходящих климатических изменений, в частности, возрастания продолжительности вегетационного периода, но требует дальнейшего изучения.

Материнские древостои лиственницы японской произрастают в районах со значительно большим уровнем увлажнения относительно условий зоны интродукции (среднегодовое значение влагосодержания почвы для зоны интродукции 0,2 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> против 0,4 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> в зоне материнских древостоев). В условиях Красноярской лесостепи основным лимитирующим радиальный прирост фактором является влагосодержание корнеобитаемого слоя во второй половине вегетационного сезона (июль–август).

Прогнозы изменений климата указывают на вероятное увеличение средней температуры воздуха и аридизацию климата. В этих условиях древесные растения Красноярской лесостепи столкнутся с водным стрессом, вызванным дефицитом доступной влаги. Проведенный анализ показывает, что деревья горно-лесостепной группы климатипов могут оказаться наиболее устойчивыми к изменениям климата. Возрастание апрельских температур и увеличение продолжительности вегетационного периода могут положительно сказаться на показателях радиального при-

роста. Деревья горно-таежных климатипов более чувствительны к температурам начала сезона вегетации, но суммарный радиальный прирост и высокая изменчивость годичного прироста могут сигнализировать о меньшей устойчивости данной группы климатипов к условиям зоны выращивания на территории Красноярской лесостепи. Это также выражается в низкой сохранности деревьев данной группы в более раннем возрасте [Ирошников, 1977]. Деревья лиственницы Гмелина обладают сопоставимыми с группой горно-лесостепных климатипов лиственницы сибирской параметрами суммарного радиального прироста, однако они более чувствительны к параметрам увлажнения, что может вызвать снижение их устойчивости в условиях аридизации климата. Деревья японской лиственницы обладают наименьшим суммарным радиальным приростом и наибольшей чувствительностью к условиям почвенного увлажнения. Данный климатип может оказаться наименее устойчивым к возрастанию частоты и силы засух.

## ВЫВОДЫ

1. Динамика радиального прироста деревьев географических популяций видов лиственницы, интродуцированных на территории Красноярской лесостепи, различается не только между видами, но и между климатипами одного вида.

2. В условиях Красноярской лесостепи основным лимитирующим радиальный прирост фактором является влагосодержание корнеобитаемого слоя во второй половине вегетационного сезона (июль–август). Деревья лиственницы Гмелина и японской, интродуцированные из более влажных местообитаний, сильнее реагируют на возрастание водного стресса, в то время как радиальный прирост деревьев, взятых из более сухих мест, положительно откликается на увеличение продолжительности вегетационного периода, что делает эти климатипы наиболее предпочтительными источниками лесопосадочного материала для выращивания на территории Красноярской лесостепи.

3. Наибольшей устойчивостью к изменениям климата (повышение температуры и усиление аридности) обладают деревья горно-лесостепных климатипов лиственницы сибирской.

Исследование выполнено в рамках базовых проектов ИЛ СО РАН № 0287-2021-0009 “Функционально-динамическая индикация биоразнообразия лесов Сибири” (сбор и обработка материала) и № 0287-2021-0008 “Природная и антропогенная динамика таежных лесов Средней Сибири в условиях меняющегося климата” (дендроклиматический анализ).

#### ЛИТЕРАТУРА

- Авров Ф. Д. Рост привоев лиственницы различного географического происхождения // Географические культуры и плантации хвойных Сибири. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1977. С. 124–154.
- Авров Ф. Д. Экология и селекция лиственницы // Проблемы региональной экологии. Томск: Изд-во “Спектр” ИОА СО РАН, 1996. Вып. 7. 213 с.
- Барченков А. П. Морфологическая изменчивость и качество семян лиственницы Гмелина // Сиб. экол. журн. 2011. Т. 18, № 3. С. 439–446 [Barchenkov A. P. Morphological variability and quality of seeds of *Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr. // Contemporary Problems of Ecology. 2011. Т. 4, N 3. P. 327–333].
- Бенькова А. В., Рубцов А. В., Бенькова В. Е., Шашкин А. В. Сезонная динамика сокодвижения у деревьев *Larix sibirica* в Красноярской лесостепи // Журн. Сиб. федер. ун-та. Биология. 2019. Т. 12, № 1. С. 32–47. [https://doi: 10.17516/1997-1389-0071](https://doi.org/10.17516/1997-1389-0071)
- Ирошников А. И. Географические культуры хвойных в Южной Сибири // Географические культуры и плантации хвойных в Сибири. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1977. С. 64–110.
- Ирошников А. И. Интродукция лиственницы в Южной Сибири // Изменчивость и интродукция древесных растений Сибири. Красноярск: ИЛиД СО РАН СССР, 1984. С. 19–31.
- Коропачинский И. Ю., Ветовская Т. Н. Древесные растения Азиатской России. Новосибирск: Акад. изд-во “Гео”, 2012. 707 с.
- Кружлик М. В., Милютин Л. И. Лиственница Чекановского. М.: Наука, 1977. 210 с.
- Кузьмина Н. А. Изменчивость лиственницы сибирской в разных типах леса в бассейне реки Ангара // Экология. 2004. № 5. С. 343–348.
- Макаров В. П., Бобринев В. П., Милютин Л. И. Географические культуры лиственницы в Восточном Забайкалье. Улан-Удэ, 2002. 380 с.
- Павлов И. Н., Корхонен К., Губарев П. В., Черепнин В. Л., Барабанова О. А., Миронов А. Г., Агеев А. А. Закономерности образования очагов *Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref. s. str. в географических культурах сосны обыкновенной (Минусинская котловина) // Хвойные бореальной зоны. 2008. Т. 25, № 1-2. С. 28–36.
- Тимофеев В. П. Роль лиственницы в поднятии продуктивности лесов. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 159 с.
- Харук В. И., Петров И. А., Двинская М. Л., Им С. Т., Шушпанов А. С. Сравнительная реакция прироста лиственницы (*Larix sibirica* Ledeb.) на изменения климата в лесостепи и высокогорьях Южной Сибири // Сиб. экол. журн. 2018. Т. 25, № 4. С. 438–448 [Kharuk V. I., Petrov I. A., Dvinskaya M. L., Im S. T., Shushpanov A. S. Comparative reaction of larch (*Larix sibirica* Ledeb.) radial increment on climate change in the forest steppe and highlands of Southern Siberia // Contemporary Problems of Ecology. 2018. Т. 11, N 4. P. 388–395. <https://doi.org/10.1134/S1995425518040042>].
- Abaimov A. P., Barzut V. M., Berkutenko A. N., Buitink J., Martinsson O., Milyutin L. I., Polezhaev A., Putenikhin V. P., Takata K. Seed Collection and Seed Quality of *Larix* spp. from Russia: Initial Phase on the Russia-Scandinavian Larch Project // Eur. J. Forest Res. 2002. N 4. P. 39–49.
- Aitken S. N., Yeaman S., Holliday J. A., Wang T., Curtis-McLane S. Adaptation, migration or extirpation: climate change outcomes for tree populations // Evol. Appl. 2008. Vol. 1, Iss. 1. P. 95–111. <https://doi.org/10.1111/j.1752-4571.2007.00013.x>
- Andregg L. D. L., Andregg W. R. L., Berry J. A. Tree Physiology review: Not all droughts are created equal: translating meteorological drought into woody plant mortality // Tree Physiol. 2013. Vol. 33, N 7. P. 701–712.
- Babushkina E. A., Vaganov E. A., Belokopytova L. V., Shishov V. V., Grachev A. M. Competitive Strength Effect in the Climate Response of Scots Pine Radial Growth in South-Central Siberia Forest-Steppe // Tree-Ring Res. 2015. Vol. 71, N 2. P. 106–117. <https://doi.org/10.3959/1536-1098-71.2.106>
- Cook E. R., Holmes R. L. User's manual for program ARSTAN // Holmes R. L., Adams R. K., Fritts H. C. (ed). Tree-ring chronologies of Western North America: California, Eastern Oregon and Northern Great Basin, Chronology Series 6. Laboratory of Tree-Ring Research. Tucson, 1986. P. 50–65
- Eysteinson T., Karlman L., Fries A., Martinsson O., Skulason B. Variation in spring and autumn frost tolerance among provenances of Russian larches (*Larix Mill.*) // Scandinavian Journal of Forest Research: 2009. Vol. 24, N 2. P. 100–110. <https://doi.org/10.1080/02827580902773470>
- Gelaro R., McCarty W., Suárez M. J., Todling R., Molod A., Takacs L., Randles C., Darmenov A., Bosilovich M. G., Reichle R., Wargan K., Coy L., Cullather R., Draper C., Akella S., Buchard V., Conaty A., da Silva A., Gu W., Kim G. K., Koster R., Lucchesi R., Merkova D., Nielsen J. E., Partyka G., Pawson S., Putman W., Riener M., Schubert S. D., Sienkiewicz M., Zhao B. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2) // J. Clim. 2017. Vol. 30, N 13. P. 5419–5454. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1>
- Holmes R. L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement // Tree-Ring Bull. 1983. Vol. 44. P. 69–75.
- IPCC, 2021: Summary for Policymakers // Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekci, R. Yu, and B. Zhou eds.].
- Karger D., Conrad O., Böhrner J. et al. Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas // Sci. Data. 2017. Vol. 4 (170122). <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.122>
- Kharuk V. I., Im S. T., Petrov I. A., Dvinskaya M. L., Shushpanov A. S., Golyukov A. S. Climate-driven conifer

- mortality in Siberia // *Global Ecol. Biogeogr.* 2021. 30. P. 543–556. <https://doi.org/10.1111/geb.13243>
- Kharuk V. I., Im S. T., Petrov I. A., Golyukov A. S., Ranson K. J., Yagunov M. N. Climate-induced mortality of Siberian pine and fir in the Lake Baikal Watershed Siberia // *Forest Ecol. and Management.* 2017. Vol. 384. P. 191–199. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.10.050>
- Knorre A. A., Siegwolf R. T. W., Saurer M., Sidorova O. V., Vaganov E. A., Kirilyanov A. V. Twentieth century trends in tree ring stable isotopes (d13C and d18O) of *Larix sibirica* under dry conditions in the forest steppe in Siberia // *J. Geophys. Res.* 2010. Vol. 115: <https://doi.org/10.1029/2009JG000930>.
- Kolb T. E., Fettig C. J., Ayres M. P., Bentz B. J., Hicke J. A., Mathiasen R., Stewart J. E., Weed A. S. Observed and anticipated impacts of drought on forest insects and diseases in the United States // *Forest Ecol. and Management.* 2016. Vol. 380. P. 321–334. [doi.org/10.1016/j.foreco.2016.04.051](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.04.051)
- Millar C. I., Stephenson N. L. Temperate forest health in an era of emerging megadisturbance // *Science.* 2015. Vol. 349 (6250). P. 823–826. <https://doi.org/10.1126/science.aaa9933>
- Raffa K. F., Aukema B. H., Bentz B. J., Carroll A. L., Hicke J. A., Turner M. G., Romme W. H. Cross-scale Drivers of Natural Disturbances Prone to Anthropogenic Amplification: The Dynamics of Bark Beetle Eruptions // *BioScience.* 2008. Vol. 58, Iss. 6. P. 501–517. <https://doi.org/10.1641/B580607>
- Rinn F. TSAP V 3.6. Reference manual: computer program for tree-ring analysis and presentation. Germany: Heidelberg, Frank Rinn Distrib, 1996. 293 p.
- Speer J. H. Fundamentals of tree-ring research. University of Arizona Press, 2010. 509 p.
- Vicente-Serrano S. M., Begueria S., Lopez-Moreno J. I. A multi-scalar drought index sensitive to global warming: the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index – SPEI // *J. Climate.* 2010. Vol. 23, N 7. P. 1696–1718. [https://doi: 10.1175/2009JCLI2909.1](https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1)

## Climatic response of larch (*Larix* sp.) radial increment in provenances on the Krasnoyarsk forest-steppe

A. P. BARCHENKOV<sup>1, 2</sup>, I. A. PETROV<sup>1, 2, 4</sup>, A. S. SHUSHPANOV<sup>1, 3, 4</sup>, A. S. GOLYUKOV<sup>1, 2, 4</sup>

<sup>1</sup>*V. N. Sukachev Institute of Forest SB RAS  
660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50/28  
E-mail: alexbarchenkov@mail.ru*

<sup>2</sup>*Siberian Federal University  
660041, Krasnoyarsk, Svobodny av., 79*

<sup>3</sup>*Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
660037, Krasnoyarsk, Krasnoyarsky Rabochy av., 31*

<sup>4</sup>*Tomsk State University  
634050, Tomsk, Lenina str., 36*

The article presents the results of a comparative analysis of the radial increment of various larch species and provenances growing on a common ecological background in experimental forestry established in 1965–1967 on the Krasnoyarsk forest-steppe territory by employees of the Sukachev Institute of Forest SB RAS. The provenances of Siberian larch (*Larix sibirica* Ledeb.) from different elevation belts of the Southern Siberian Mountains, Gmelin larch (*L. gmelinii* Rupr.) from the Trans-Baikal and Zeya provinces (Eastern Siberia), as well as Japanese larch (*L. leptolepis* Gord) introduced from Sakhalin Island were studied. Based on the cluster analysis of radial growth series, four groups of provenances were identified with different growth strategies depending on the response to environmental factors: mountain-forest-steppe and mountain-taiga provenances of Siberian larch; provenances of Gmelin larch from Transbaikalia. The provenance of Japanese larch from Sakhalin Island has formed a separate cluster. The highest values of radial growth were found in groups of mountain-forest-steppe provenances formed by Siberian larch and Gmelin larch trees introduced from East Siberian provinces. Low values of radial growth were noted in provenances of Siberian larch trees from Southern Siberia mountain-taiga zone and Japanese larch from the Sakhalin Island. Dendroclimatic analysis was used to identify the relationship between the environmental variables of the introduction zone and the radial increment of the studied provenances. In the Krasnoyarsk forest-steppe, the main factor limiting radial growth is the moisture content of the root layer in the middle of the growing season (July – August). Larch trees introduced from wetter habitats respond more strongly to an increase in water stress, while radial growth of trees taken from drier habitats responds positively to an increase in the length of the growing season.

**Key words:** larch, radial growth, provenances, climate change.