

## ОРИГИНАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ



УДК 581.54

**Климатический отклик радиального прироста *Larix cajanderi* в Северной и Центральной Якутии****К.И. Хоцинская<sup>1,\*</sup> , О.В. Сергеева<sup>1</sup> , А.В. Кирдянов<sup>1,2</sup> , А.Н. Николаев<sup>3</sup> ,  
К.В. Акулинина<sup>1</sup> , Н.Н. Кошурникова<sup>1</sup> , А.И. Колмогоров<sup>1,3</sup> , А. Арсак<sup>1</sup>** <sup>1</sup>Сибирский федеральный университет, Россия, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, д. 79;<sup>2</sup>Институт леса имени В.Н. Сукачева, Сибирское отделение Российской академии наук, Россия, 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, д. 50/28;<sup>3</sup>Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, Россия, 677000, г. Якутск, ул. Белинского, д. 58

\*e-mail: kkhotsinskaya@sfu-kras.ru

Повышение температуры в высоких широтах приведет к изменению водного баланса и термического режима многолетнемерзлых почв, что повлияет на структуру и функционирование растительных сообществ северных биогеоценозов. Изучение отклика радиального прироста деревьев на текущие изменения среды и климата является одним из методов для понимания реакции отдельных компонентов растительных сообществ в будущем. В работе представлены результаты дендроклиматического анализа деревьев лиственницы Каяндера (*Larix cajanderi* Mayr), произрастающих в зоне сплошного распространения многолетней мерзлоты на четырех участках с различными условиями в Северной и Центральной Якутии (Республика Саха). Был проведен корреляционный анализ между индексами ширины годичных колец и климатическими показателями для периода с 1966 по 2021 гг. Результаты показали, что основным фактором, лимитирующим радиальный прирост деревьев на всех исследуемых местообитаниях, является температура воздуха (преимущественно июня месяца;  $r = \text{от } 0,38 \text{ до } 0,41$ ;  $p < 0,01$ ). При этом происходит смещение даты максимальных температурных сигналов и увеличение их интенсивности с широтой. Наиболее высокой чувствительностью обладают древесные растения, произрастающие на севере изучаемого региона в условиях короткого вегетационного периода. Скользящие корреляции показали общее снижение интенсивности температурного отклика в хронологиях радиального прироста со временем, что, вероятно, связано с ростом летней температуры в последние десятилетия. Это подчеркивает экологическую пластичность изучаемого вида лиственницы. Полученные результаты могут помочь в оценке изменений продуктивности древесного полога лесных экосистем отдельных регионов бореальной зоны.

**Ключевые слова:** дендрозкология, прирост древесины, древесно-кольцевая хронология, изменение климата, многолетняя мерзлота, лиственница

DOI: 10.55959/MSU0137-0952-16-79-2-6

**Введение**

Республика Саха (Якутия) расположена в зоне сплошного распространения многолетней мерзлоты, где в течение большей части года деятельный слой почвы находится в мерзлом состоянии [1]. Из всех лесообразующих пород наиболее приспособленными к условиям криолитозоны являются деревья отдельных видов лиственницы, во многом благодаря их экологической пластичности, которая определяется, в том числе, способностью формировать поверхностную корневую систему [2]. Рост древесных растений и продуктивность лесных экосистем в зоне распространения многолетней

мерзлоты во многом зависят от раннелетней температуры и тесно связаны с датой схода снежного покрова [3–4]. Еще одним фактором, влияющим на рост деревьев, является глубина оттаивания верхнего слоя почвы в течение вегетационного периода, а также связанная с этим совокупность гидротермических свойств почвы [1, 5–6].

Ожидается, что температура в высоких широтах будет и дальше продолжать повышаться быстрее, чем в среднем по миру [7]. Это может привести к изменениям в структуре экосистем данного региона [8, 9], большей глубине деятельного слоя почвы [10] и продвижению границы леса на се-

вер [11]. Скорость сезонного оттаивания верхнего слоя мерзлых почв зависит как непосредственно от количества поступающей солнечной радиации, так и от мощности напочвенного (мохово-лишайникового) покрова, который регулирует теплообмен между почвой и атмосферой [12]. С одной стороны, повышение температуры в северных экосистемах ведет к увеличению продолжительности вегетационного периода [13] и возрастанию мощности сезонно-талого слоя почвы [10]. По мере постепенного увеличения деятельного горизонта почвы он может стать дополнительным источником влаги и питательных веществ для растений, что, в свою очередь, будет способствовать большей продуктивности деревьев [6, 14]. С другой стороны, в условиях сравнительно небольшого количества осадков, выпадающих в регионе, существует вероятность истощения запасов «дополнительной» почвенной влаги [15]. Потенциально это может привести к тому, что лимитирующим фактором роста деревьев станет влагообеспеченность [16].

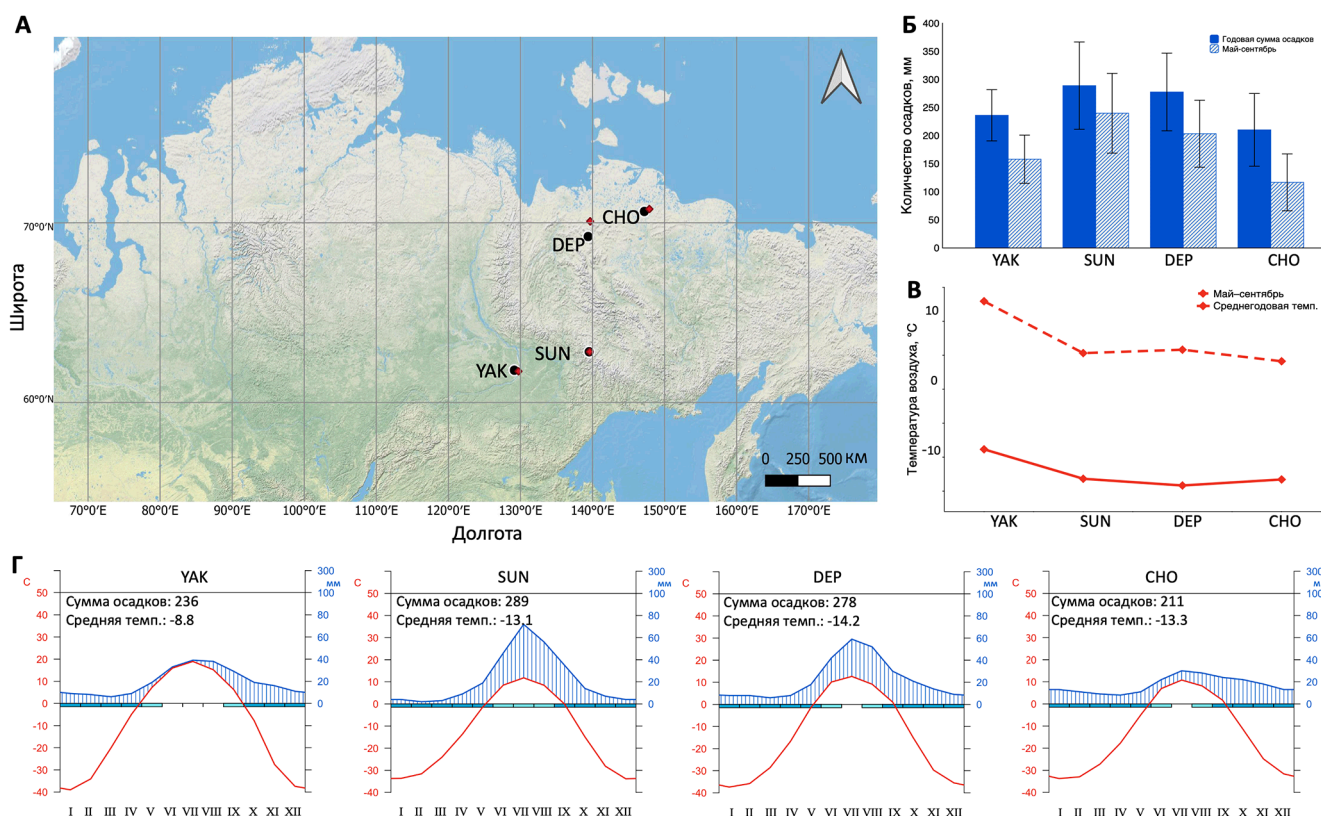
В связи с наблюдаемым значительным повышением температуры на территории Восточной Сибири изучение влияния потепления на рост деревьев является крайне актуальным. В данном исследовании был проведен анализ радиального прироста лиственницы Каяндера (*Larix cajanderi* Mayr) для четырех участков в Северной и Цен-

тральной Якутии за период с 1966 по 2021 гг. Целью работы стало установление влияния температуры и количества осадков на ширину годичных колец деревьев в зависимости от условий произрастания лиственницы на северо-востоке зоны бореальных лесов Евразии.

### Материалы и методы

Исследования проводились в Республике Саха (рис. 1А), на территории от г. Якутск на юго-западе (около 62° с.ш., 129° в.д.) до поселка городского типа (далее – пгт) Чоккурдах на северо-востоке региона (около 71° с.ш. 147° в.д.; таблица). Климат Якутии – субарктический континентальный [17]. Среднее количество осадков за год варьирует между участками в пределах 211–289 мм, из них больше половины выпадает в период с мая по сентябрь (за период 1966–2021 гг.; рис. 1Б, Г). Среднегодовая температура воздуха в пределах региона исследований уменьшается с юга на север от –8,8°С до –13,3°С (рис. 1В, Г). Климатические данные были получены с использованием онлайн-ресурса [www.meteo.ru](http://www.meteo.ru); точка доступа к данным: <http://aisori-m.meteo.ru> [18]. Построение климатограмм осуществлялось при помощи пакета «Climatol» [19] в программной среде R [20].

Для удобства описания участкам присвоены кодовые названия в соответствии с названиями



**Рис. 1.** (А) Расположение участков (черные точки) и ближайших метеостанций (красные точки) на территории Республики Саха, Россия: YAK, SUN, DEP, CHO. (Б) Средняя годовая сумма осадков (столбцы со сплошной заливкой) и сумма осадков с мая по сентябрь (заштрихованные столбцы). Планки погрешностей отражают величину стандартного отклонения. (В) Среднегодовая температура воздуха (сплошная линия) и температура воздуха за период с мая по сентябрь (пунктирная линия). (Г) Климатограммы для исследуемых участков за период 1966–2021 гг.

ближайших населенных пунктов либо географических объектов: СНО (пгт Чокурдах), SUN (хребет Сунтар-Хаята), DEP (пгт Депутатский), YAK (г. Якутск). При расчетах использовались климатические данные ближайших метеостанций, находящихся на расстоянии менее 20 км от дендрохронологических участков (таблица): для самого северного участка, СНО, – метеостанции «Чокурдах», для SUN – «Восточная», для DEP – «Депутатский», для самого южного участка, YAK, – «Якутск».

Сбор древесных образцов (кernов) живых деревьев *L. cajanderi* проводился при помощи возрастного бура (бурава Пресслера) диаметром 5 мм на высоте около 1,3 м. С каждого дерева было отобрано по одному керну для дальнейшего анализа. Керны были высушены на воздухе, вклеены в деревянную подложку и отполированы на шлифовальном станке наждачной бумагой зернистостью до P800 для увеличения контрастности колец. Далее образцы сканировались с разрешением 3200 dpi с помощью Epson Perfection V800 (Epson, Япония). Измерение ширины годичных колец проводилось в программе CooRecorder версии 9.3 (Cybis Elektronik & Data AB, Швеция). Точность перекрестного датирования проверялась при помощи программы COFECNA (Аризонский университет, США) [21]. Исходные временные ряды были стандартизированы (индексированы) в программе ARSTAN (Аризонский университет, США) [22] с применением отрицательной экспоненты или линейной функции для исключения возрастных изменений ширины колец. Также была проведена процедура удаления автокорреляционной составляющей, что позволило получить так называемые остаточные хронологии, в изменчивости которых минимизировано влияние неклиматических факторов и сохранен высокочастотный климатический отклик [23]. Для оценки

качества полученных хронологий были рассчитаны следующие статистические параметры:  $Ms_x$  (mean sensitivity) – коэффициент чувствительности;  $Rbar$  (running mean inter-series correlation) – коэффициент межсерийной корреляции; EPS (expressed population signal) – выраженный популяционный сигнал [24].

Для определения климатического отклика радиального прироста деревьев был проведен парный корреляционный анализ (коэффициенты корреляции Пирсона) между остаточными хронологиями и среднемесячными климатическими данными: суммарным количеством осадков и средней температурой воздуха. В расчет принимался временной промежуток от сентября предыдущего года по сентябрь текущего, для общего периода 1966–2021 гг. Для установления более точного временного отрезка (DOY – day of the year) с максимальным климатическим сигналом (максимальными значениями коэффициента корреляции Пирсона) были рассчитаны скользящие корреляции с временным окном в 21 сут и шагом в 3 сут между хронологиями ШГК (ширина годичных колец) и среднесуточной температурой воздуха, суточным количеством осадков. Определение стабильности температурного отклика ШГК во времени было выполнено с помощью скользящих корреляций с окном в 25 лет и шагом в 1 год, с использованием пакета «Treeclim» [25] в программной среде R [20].

Результаты и обсуждение

Количество образцов, перекрестно-датированных и использованных для построения хронологий, варьировало от 14 до 20 для разных участков. Хронология наибольшей длительности получена для участка СНО, наименьшей – для участка YAK (таблица). Максимальная длительность индивидуальной серии (дерево с наибольшим возрастом в пределах участка) для СНО

Таблица

Характеристика участков исследования и статистические параметры ШГК

	YAK	SUN	DEP	СНО
Координаты участка	62°05' с. ш. 129°08' в. д.	63°13' с. ш. 139°31' в. д.	69°21' с. ш. 139°23' в. д.	70°30' с. ш. 147°11' в. д.
Высота участка (м над ур. м.)	308	1402	414	71
Метеостанция	Якутск	Восточная	Депутатский	Чокурдах
Координаты метеостанции	62°1' с. ш. 129°43' в. д.	63°13' с. ш. 139°35' в. д.	69°20' с. ш. 139°40' в. д.	70°37' с. ш. 147°53' в. д.
Расстояние между участком исследования и метеостанцией (км)	20	2	12	2
Мощность деятельного слоя почвы (см)	> 41	42	40	14
Количество деревьев	18	20	14	20
Длительность хронологии (лет)*	148 ± 7	180 ± 15	205 ± 85	332 ± 118
ШГК (мм)*	0,44 ± 0,15	0,16 ± 0,07	0,53 ± 0,34	0,20 ± 0,07
$Ms_x$	0,19	0,36	0,35	0,42
EPS	0,93	0,965	0,94	0,975
Rbar	0,42	0,58	0,52	0,64

ШГК – ширина годичных колец;  $Ms_x$  – коэффициент чувствительности; Rbar – коэффициент межсерийной корреляции; EPS – выраженный популяционный сигнал; \* – приведены средние значения вместе с величиной стандартного отклонения (±).

составила 513 лет, для DEP, SUN и YAK — 365, 212 и 156 лет соответственно.

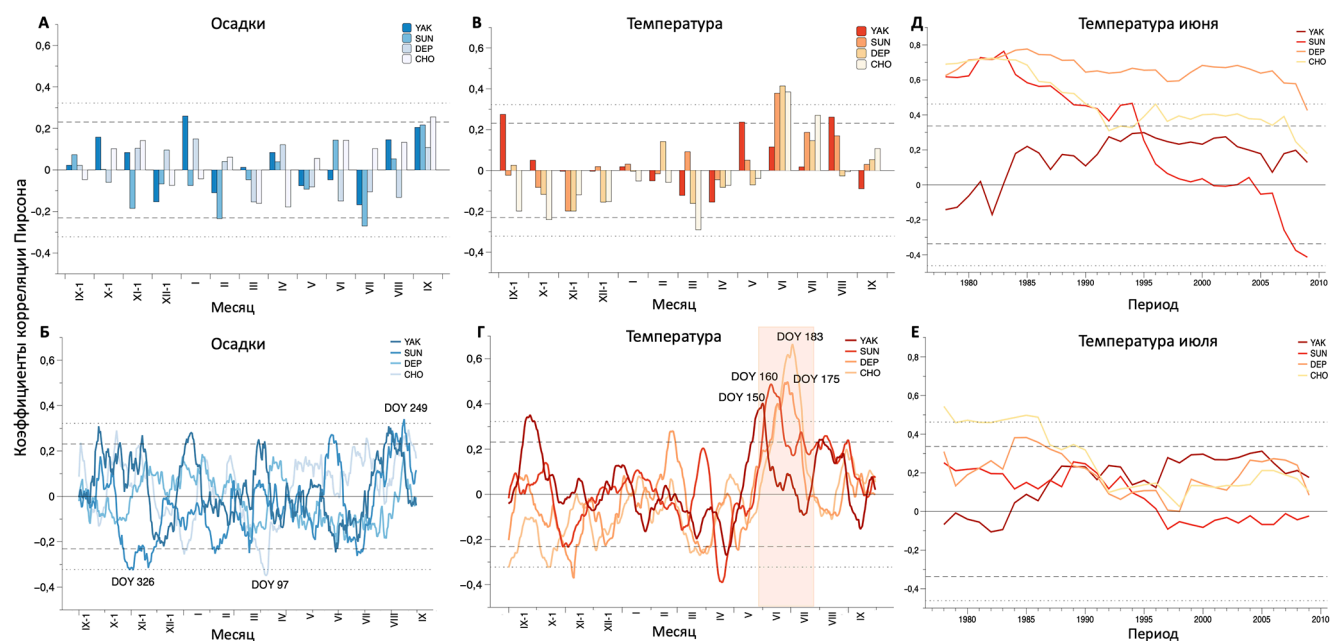
Минимальный радиальный прирост лиственницы Каяндера наблюдается на участке вблизи верхней границы леса в Центральной Якутии (SUN, 1402 м над ур. м.), а также на самом северном участке ЧНО в лесотундре — 0,16 мм и 0,2 мм соответственно (таблица). Статистический анализ древесных хронологий выявил, что рост деревьев на севере Якутии (ЧНО) характеризуется наибольшей чувствительностью ( $Ms_x = 0,42$ ; таблица), в то время как хронология на южном участке YAK является наименее чувствительной ( $Ms_x < 0,2$ ). Величины статистических показателей хронологии ШГК, наблюдаемые на ЧНО, обусловлены как географическим положением участка, так и длительностью хронологий (и, соответственно, возрастом) отдельных деревьев, которая более чем на 100 лет превышает длительность хронологий на других участках. Также на радиальный прирост деревьев оказывает влияние глубина сезонного оттаивания почвы, которая составляет около 14 см для участка ЧНО и  $\geq 40$  см на других участках (таблица). Низкие показатели ШГК на участке SUN могут быть обусловлены неблагоприятными условиями произрастания вблизи верхней границы леса. Тем не менее, высокие коэффициенты межсерийной корреляции ( $Rbar > 0,42$ ) и значения выраженного популяционного сигнала ( $EPS > 0,85$ ) указывают на то, что хронологии на всех участках исследования подходят для дендроклиматического анализа.

Корреляционный анализ между остаточными древесно-кольцевыми хронологиями и количе-

ством осадков показал, что осадки лишь точечно влияют на радиальный прирост древесины, без определенной закономерности для рассматриваемых участков. Так, положительное воздействие суммарным количеством осадков января на участке YAK ( $r = 0,26$ ;  $p < 0,05$ ; рис. 2А) подчеркивает, что выпавший в зимний период снег предотвращает сильное промерзание почвы. Самое значительное отрицательное влияние осадков отмечено на участке SUN в период с конца октября по начало ноября предшествующего года ( $r = -0,33$ ;  $p < 0,05$ ; рис. 2Б). Однако в целом ни на одном из исследуемых участков не обнаружено выраженного продолжительного влияния осадков на радиальный прирост. Предположительно, это связано с тем, что в рассматриваемых местообитаниях лиственница произрастает в условиях достаточного обеспечения влагой [1].

Парный корреляционный анализ выявил статистически значимые положительные зависимости индексов ШГК от средней температуры июня на всех участках ( $r$  варьирует от 0,38 до 0,41;  $p < 0,01$ ; рис. 2В), кроме наиболее южного, YAK. На рост деревьев в YAK благоприятно влияла температура мая и августа текущего года роста, а также сентября предшествующего года ( $r = 0,24, 0,26$  и  $0,27$  соответственно,  $p < 0,05$ ; рис. 2В).

Скользкие корреляции, рассчитанные по среднесуточным данным, также выявили положительное влияние температур поздней весны и начала лета на рост деревьев на всех участках (рис. 2Г). Однако в направлении с юга на север наблюдается увеличение максимальных коэффициентов корреляции и их смещение на более



**Рис. 2.** Коэффициенты парных (А и В) и скользящих (Б и Г) корреляций между остаточными индексами ШГК и климатическими данными (количеством осадков и температурой воздуха). Скользящие корреляции (окно 25 лет с шагом 1 год) ШГК с температурами июня (Д) и июля (Е) за общий период 1966–2021 гг. Пунктирной линией обозначены доверительные интервалы при  $p < 0,05$  и  $p < 0,01$ .



поздние даты. Так, на участке YAK, где вегетационный период продолжительнее (начинается в мае), а мощность деятельного горизонта — больше по сравнению с другими участками, отмечается наиболее ранний климатический отклик, который проявляется уже в конце весны (DOY 150;  $r = 0,40$ ;  $p < 0,01$ ; рис. 2Г). Деревья на участках SUN и DEP демонстрировали близкие по интенсивности климатические сигналы ( $r = 0,49$  и  $0,50$  соответственно;  $p < 0,01$ ), что подчеркивает схожесть условий произрастания деревьев у верхней границы леса (SUN) и на границе с лесотундрой (DEP). При этом максимальные значения коэффициентов корреляции наблюдались сначала на SUN (DOY 160), а через 2 нед. — на DEP (DOY 174–178, рис. 2Г). Самый интенсивный и поздний климатический отклик отмечен в начале июля на самом северном участке CHO (DOY 183;  $r = 0,67$ ;  $p < 0,01$ ; рис. 2Г). Работы других авторов [3, 4, 26–28] также подтверждают влияние температурных условий начала лета на прирост древесины в рассматриваемых условиях. Рост среднесуточной температуры воздуха в конце весны — начале лета приводит к оттаиванию деятельного слоя почвы [3] и высвобождению доступной для растений влаги [1, 29]. Прямое воздействие температуры на радиальный прирост достигает своего максимума в июне-июле, после чего снижается.

Интересно, что на всех участках наблюдаются отрицательные корреляции между температурой относительно коротких временных промежутков весной и ШГК, которые не отобразились на корреляциях со среднемесячными данными. Эта зависимость наиболее выражена на участке SUN ( $r = -0,39$ ,  $p < 0,01$ , DOY 108; рис. 2Г). Отрицательный отклик радиального прироста лиственницы на температуру в середине весны может быть связан с тем, что в отдельные годы камбий может быть активирован благоприятными условиями уже в апреле, а последующее понижение температуры вызывает его повреждение [3].

В последние десятилетия отмечается тенденция к снижению интенсивности отклика на летние температуры на всех участках за исключением YAK (рис. 2Д–Е). Наблюдаемый эффект может быть следствием улучшения условий роста деревьев в исследуемом регионе в результате общего потепления [30], увеличения количества доступной почвенной влаги [6, 31] и роста концентрации

CO<sub>2</sub> в атмосфере [32, 33]. В условиях потепления снижается влияние температуры как основного лимитирующего фактора, что отражается на уменьшении чувствительности радиального прироста деревьев к изменениям температуры летних месяцев. Полученные результаты подчеркивают экологическую пластичность изучаемого вида лиственницы и его способность существовать в меняющихся условиях среды и климата.

### Заключение

Результаты показывают, что температура является главным фактором, определяющим рост лиственницы Каяндера в Северной и Центральной Якутии. Основное влияние на радиальный прирост деревьев на всей территории исследования оказывают раннелетние температуры воздуха, при этом начало отклика, а также его интенсивность и продолжительность различаются между участками. Рост лиственницы, произрастающей в зоне распространения мерзлоты, тесно связан как с климатическими, так и с почвенно-грунтовыми условиями — в частности, с температурой деятельного слоя почвы. Совокупность указанных выше лимитирующих факторов способствует более выраженному климатическому сигналу у деревьев на севере Якутии по сравнению с деревьями в центральной части региона. Однако с течением времени интенсивность этого отклика постепенно уменьшается. Вероятно, это обусловлено снижением влияния температуры как лимитирующего фактора на рост лиственницы из-за общего повышения температуры и увеличения продолжительности вегетационного периода. Изучение влияния климатических изменений на рост деревьев на территории Республики Саха — в зоне сплошного распространения многолетней мерзлоты — имеет важное значение для оценки экологических и экономических последствий повышения температуры как в региональном, так и в глобальном масштабе.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект FSRZ-2020-0014) и Российского научного фонда (проект №22-14-00048). Исследования проводили без использования животных и без привлечения людей в качестве испытуемых. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Николаев А.Н., Федоров П.П., Десяткин А.Р. Влияние гидродинамического режима мерзлотных почв на радиальный прирост лиственницы и сосны в Центральной Якутии. *Сиб. экол. журн.* 2011;(2):189–201.
2. Поздняков Л.К. *Даурская Лиственница*. М.: Наука; 1975. 312 с.

3. Vaganov E.A., Hughes M.K., Kirdyanov A.V., Schweingruber F.H., Silkin P.P. Influence of snowfall and melt timing on tree growth in subarctic Eurasia. *Nature*. 1999;400(6740):149–151.

4. Kirdyanov A., Hughes M., Vaganov E., Schweingruber F., Silkin P. The importance of early summer tempera-

ture and date of snow melt for tree growth in the Siberian Subarctic. *Trees*. 2003;17:61–69.

5. Kirdyanov A.V., Saurer M., Siegwolf R., Knorre A.A., Prokushkin A.S., Churakova O.V., Fonti M.V., Büntgen U. Long-term ecological consequences of forest fires in the continuous permafrost zone of Siberia. *Environ. Res. Lett.* 2020;15(3):034061.

6. Kirdyanov A.V., Saurer M., Arzac A., Knorre A.A., Prokushkin A.S., Churakova O.V., Arosio T., Bebbchuk T., Siegwolf R., Büntgen U. Science of the total environment thawing permafrost can mitigate warming-induced drought stress in boreal forest trees. *Sci. Total Environ.* 2024;912:168858.

7. Rantanen M., Karpechko A.Y., Lipponen A., Nordling K., Hyvärinen O., Ruosteenoja K., Vihma T., Laaksonen A. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Commun. Earth Environ.* 2022;3(1):168.

8. Jorgenson M.T., Romanovsky V., Harden J., Shur Y., O'Donnell J., Schuur E.A.G., Kanevskiy M., Marchenko S. Resilience and vulnerability of permafrost to climate change. *Can. J. For. Res.* 2010;40(7):1219–1236.

9. Serreze M.C., Dyurgerov M., Romanovsky V., Oechel W.C., Zhang J.T., Barry R.G., Walsh J.E., Chapin III F.S., Osterkamp T. Observational evidence of recent change in the northern high-latitude environment. *Clim. Chang.* 2000;46(1–2):159–207.

10. Шерстюков А.Б., Шерстюков Б.Г. Пространственные особенности и новые тенденции в изменениях термического состояния почвогрунтов и глубины их сезонного протаивания в зоне многолетней мерзлоты. *Метеорол. гидрол.* 2015;(2):5–12.

11. Им С.Т., Харук В.И., Ли В.Г. Миграция северной границы вечнозелёных хвойных древостоев в Сибири в XXI столетии. *Совр. пробл. дист. зонд. Земли косм.* 2020;17(1):176–187.

12. Осокин Н.И., Сосновский А.В. Влияние метеорологических условий на теплоизоляционные свойства мохового покрова по данным измерений на Шпицбергене. *Криосф. Земли.* 2021;25(4):17–25.

13. Linderholm H.W. Growing season changes in the last century. *Agric. For. Meteorol.* 2006;137(1–2):1–14.

14. Prokushkin A.S., Hagedorn F., Pokrovsky O.S., Viers J., Kirdyanov A.V., Masyagina O.V., Prokushkina M.P., McDowell W.H. Permafrost regime affects the nutritional status and productivity of larches in Central Siberia. *Forests*. 2018;9(6):314.

15. Andresen C.G., Lawrence D.M., Wilson C.J., McGuire A.D., Koven C., Schaefer K., Jafarov E., Peng S., Chen X., Gouttevin I., Burke E., Chadburn S., Ji D., Chen G., Hayes D., Zhang W. Soil moisture and hydrology projections of the permafrost region – a model intercomparison. *Cryosphere*. 2020;14(2):445–459.

16. Kharuk V.I., Ranson K.J., Petrov I.Y.A., Dvinskaya M.L., Im S.T., Golyukov A.S. Larch (*Larix dahurica* Turcz) growth response to climate change in the Siberian permafrost zone. *Reg. Environ. Change*. 2019;19:233–243.

17. Peel M.C., Finlayson B.L., McMahon T.A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2007;11(5):1633–1644.

18. Булыгина О.Н., Коршунова Н.Н., Разуваев В.Н. Специализированные массивы данных для климатических исследований. *Труды Всерос. науч.-исслед. ин-та гидромет. информации — МЦД.* 2014;(177):136–148.

19. Guijarro J.A. *Homogenization of climatic series with Climatol*. Reporte Técnico State Meteorological Agency (AEMET), Balearic Islands Office, Spain. 2018. 20 pp.

20. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2023. URL <https://www.R-project.org/>.

21. Grissino-Mayer H.D. Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-Ring Res.* 2001;57(2):205–221.

22. Cook E.R., Holmes R. Guide for computer program ARSTAN. *The international tree-ring data bank program library version 2.0*. Esd. H.D. Grissino-Mayer, R.L. Holmes, and H.C. Fritts: University of Arizona; 1996:75–87.

23. Cook E.R., Peters K. The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. *Tree-Ring Bulletin*. 1981;41:45–53.

24. Wigley T.M.L., Briffa K.R., Jones P.D. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *J. Appl. Meteorol.* 1984;23(2):201–213.

25. Zang C., Biondi F., Treeclim: An R package for the numerical calibration of proxy climate relationships. *Ecography*. 2015;38(4):431–436.

26. Hughes M.K., Vaganov E.A., Shiyatov S.G., Touchan R., Funkhouser G. Twentieth-century summer warmth in northern Yakutia in a 600-year context. *Holocene*. 1999;9(5):629–634.

27. Kirdyanov A.V., Treydte K.S., Nikolaev A., Helle G., Schleser G.H. Climate signals in tree-ring width, wood density and  $\delta^{13}\text{C}$  from larches in Eastern Siberia (Russia). *Chem. Geol.* 2008;252(1–2):31–41.

28. Kirdyanov A.V., Piermattei A., Kolář T., Rybníček M., Krusic P.J., Nikolaev A.N., Reinig F., Büntgen U. Notes towards an optimal sampling strategy in dendroclimatology. *Dendrochronologia*. 2018;52:162–166.

29. Saurer M., Kirdyanov A.V., Prokushkin A.S., Rinne K.T., Siegwolf R.T.W. The impact of an inverse climate-isotope relationship in soil water on the oxygen-isotope composition of *Larix gmelinii* in Siberia. *New Phytol.* 2016;209(3):955–964.

30. Churakova (Sidorova) O.V., Porter T.J., Zharkov M.S., Fonti M.V., Barinov V.V., Taynik A.V., Kirdyanov A.V., Knorre A.A., Wegmann M., Trushkina T.V., Koshurnikova N.N., Vaganov E.A., Myglan V.S., Siegwolf R.T.W., Saurer M. Climate impacts on tree-ring stable isotopes across the Northern Hemispheric boreal zone. *Sci. Total Environ.* 2023;870: 161644.

31. Arzac A., Popkova M., Anarbekova A., Olano J.M., Gutiérrez E., Nikolaev A., Shishov V. Increasing radial and latewood growth rates of *Larix cajanderi* Mayr. and *Pinus sylvestris* L. in the continuous permafrost zone in Central Yakutia (Russia). *Ann. For. Sci.* 2019;76:96.

32. Huang J.G., Bergeron Y., Denneler B., Berninger F., Tardif J. Response of Forest Trees to Increased Atmospheric CO<sub>2</sub>. *Crit. Rev. Plant Sci.* 2007;26(5–6):265–283.

33. Liu X., Zhao L., Voelker S., Xu G., Zeng X., Zhang X., Zhang L., Sun W., Zhang Q., Wu G., Li X. Warming and CO<sub>2</sub> enrichment modified the ecophysiological responses of Dahurian larch and Mongolia pine during the past century in the permafrost of northeastern China. *Tree Physiol.* 2019;39(1):88–103.

Поступила в редакцию 19.03.2024

После доработки 17.05.2024

Принята в печать 25.07.2024

## RESEARCH ARTICLE

## Climatic response of radial growth of *Larix cajanderi* in the Northern and Central Yakutia

K.I. Khotcinskaia<sup>1,\*</sup> , O.V. Sergeeva<sup>1</sup> , A.V. Kirdyanov<sup>1,2</sup> , A.N. Nikolaev<sup>3</sup> ,  
K.V. Akulinina<sup>1</sup> , N.N. Koshurnikova<sup>1</sup> , A.I. Kolmogorov<sup>1,3</sup> , A. Arzac<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Siberian Federal University, 79 Svobodnyy pr., Krasnoyarsk, 660041, Russia;

<sup>2</sup>V.N. Sukachev Institute of Forest, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
50/28 Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036;

<sup>3</sup>Ammosov North-Eastern Federal University, 58 Belinskogo str., Yakutsk, 677000, Russia

\*e-mail: kkhotsinskaya@sfu-kras.ru

Warming trends in high latitudes will lead to changes in the thermo-hydrological regime of permafrost soils, affecting the structure and functioning of northern ecosystems. The study of radial tree growth response to current environmental conditions is commonly used to understand the future reaction of trees. This study evaluates the response of four Cajander larch (*Larix cajanderi* Mayr) sites in the continuous permafrost region to different environmental conditions in Northern and Central Yakutia (Republic of Sakha). Correlation coefficients between tree-ring width indexes and climate parameters were calculated over the 1966–2021 period. The results showed that air temperature is the main factor limiting the radial tree growth in all the sites (mainly June temperature;  $r = 0,38–0,41$ ;  $p < 0,01$ ). However, the timing and intensity of the temperature sensitivity increases with the latitude. The most sensitive to climate woody plants grow in the northern part of the study region where growing season is rather short. Running correlations showed a general decreasing trend in intensity of the temperature response in radial growth chronologies. Probably it is linked to the increase in summer temperatures in recent decades, thus highlighting the ecological plasticity of the larch trees. These results can help to assess changes in the productivity of the forest ecosystems in particular regions of boreal zone.

**Keywords:** dendroecology, tree growth, tree-ring chronology, climate change, permafrost, larch

**Funding:** The research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project FSRZ-2020-0014) and the Russian Science Foundation (project No. 22-14-00048).

### Сведения об авторах

Хоцинская Ксения Игоревна — мл. науч. сотр. лаборатории комплексных исследований динамики лесов Евразии Сибирского федерального университета. Тел.: 8-391-206-21-34; e-mail: kkhotsinskaya@sfu-kras.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4344-714X>

Сергеева Оксана Валерьевна — мл. науч. сотр. лаборатории комплексных исследований динамики лесов Евразии Сибирского федерального университета. Тел.: 8-391-206-21-34; e-mail: osergeeva@sfu-kras.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7978-0737>

Кирдянов Александр Викторович — докт. биол. наук., ст. науч. сотр. лаборатории структуры древесных колец Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН. Тел.: 8-391-243-36-86; e-mail: kirdyanov@ksc.krasn.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6797-4964>

Николаев Анатолий Николаевич — докт. биол. наук, ректор Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Тел.: 8-4112-35-20-90; e-mail: rector@s-vfu.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2270-2049>

Акулинина Кристина Васильевна — мл. науч. сотр. лаборатории комплексных исследований динамики лесов Евразии Сибирского федерального университета. Тел.: 8-391-206-21-34; e-mail: kakulinina@sfu-kras.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6027-4930>

Кошурникова Наталья Николаевна — канд. биол. наук, ст. науч. сотр. лаборатории комплексных исследований динамики лесов Евразии Сибирского федерального университета. Тел.: 8-391-206-29-46; e-mail: nkoshurnikova@sfu-kras.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0175-873X>

Колмогоров Алексей Иванович — науч. сотр. Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Тел.: 8-4112-36-19-62; e-mail: ai.kolmogorov@s-vfu.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3688-7753>

Arzac Alberto — канд. биол. наук, доц. кафедры экологии и природопользования Сибирского федерального университета. Тел.: 8-391-206-21-34; e-mail: aarzac@sfu-kras.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3361-5349>