

ОРИГИНАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ



УДК 581.54

Климатический отклик радиального прироста *Larix sibirica* в Северной и Центральной Якутии

К.И. Хоцинская¹, О.В. Сергеева¹, А.В. Кирдянов^{1, 2}, А.Н. Николаев³,
* К.В. Акулинина¹, Н.Н. Кошурникова¹, А.И. Колмогоров^{1, 3}, А. Арсак¹

¹Сибирский федеральный университет, Россия, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, д. Свободный, д. Свободный. 79;

²Институт леса имени В.Н. Сукачева, Сибирское отделение Российской академии наук,
Россия, 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, д. 2. 50/28;

³Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, Россия, 677000, г. Якутск, ул. Белинского, д. 58

*электронная почта: kkhotsinkova@sfu-kras.ru

Повышение температуры в высоких широтах приводит к нарушению водного баланса и термического режима многолетних немерзлых почв, что влияет на структуру и функционирование растительных сообществ северных биогеоценозов. Обучение получило ради-
Прирост потоков текущего изменения окружающей среды и климата является одним из методов для понимания состояния отдельных компонентов растительных сообществ в будущем. В результатах представлены дендроклиматического анализа деревьев лиственницы Каяндера (*Larix sibirica* Mayr), произрастающих в сплошном распространении многолетних мерзлоты на четырех участках с подобными проявлениями в Северной и Центральной Якутии (Республика Саха). Был проведен корреляционный

Анализ между индексами по годам колец и климатическими показателями для период с 1966 по 2021 гг. Результатом явления, что основным фактором, ограничивающе-шимальный прирост деревьев на всех ограниченных местах обитания, является температура воздуха (преимущественно июня месяца; $r = 0,38$ до $0,41$; $p < 0,01$). При этом происходит смещение дат максимальных температурных сигналов и увеличение их интенсивности с широтой. Наиболее высокой чувствительностью обладают древесные рас-
тения, произрастающие на севере изучаемого региона в условиях короткого вегетационного периода. Скользящие изменения, направленные на общее снижение температуры
Температурный отклик в хронологическом радиальном приросте со временем, что, вероятно, связано с ростом летней температуры в последних частотах. Это обеспечивает экологическую пластичность изучаемого вида лиственницы. Полученные результаты могут помочь в изменении продуктивности древесно-пологовых лесных экосистем отдельных регионов бореальной зоны.

Ключевые слова: дендрэкология, 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 на протяжении большей части года деятельный слой Земли находится в состоянии мерзлом [1]. Из всех лесообразующих пород, наиболее приспособленных к условиям криолитозоны, являются де-ревя
отдельных видов лиственницы, во многом благодаря их особой пластичности, кото-рая определила, в том числе, способность формировать поверхностную корневую систему [2]. Рост древесных растений и продуктивность лесных экосистем в многолетнем распространении

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

Ожидается, что температура в более высоких широтах будет и дальше продолжать повышаться быстрее, чем в среднем по миру [7]. Это может приве-сти к изменениям в экосистеме данного региона [8, 9], более эффективному деятельному слою [10] и продвижению границ леса на планете.

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 приводит к увеличению продолжительности вегетационного периода [13] и возрастанию сезонного слоя почвы [10]. По мере постепенного увеличения активного горизонта земли он может стать производителем влаги и питательных веществ для растений, что, в свою очередь, будет способствовать повышению продуктивности деревьев [6, 14]. С другой стороны, в условиях умеренного количества примесей, выпадающих в странах, существуют гарантии истощения запасов «дополнительной» почвенной влаги [15]. Потенциально это может привести к тому, что лимитирующим фактором роста деревьев станет влагообеспеченность [16].

В связи с наблюдением дальнейшее повышение температуры на территории восточной части Сибири крайне актуально. В данном исследовании был проведен анализ радиального прироста лиственницы Каяндера (*Larix kajanensis*)

Майр) для четырех поражений в Северной и Цен-

тральной Якутии за период с 1966 по 2021 гг. Целью работ было установлено общее температура и количество изменений на последующих годичных колец деревьев в зависимости от условий произрастания лиственницы в северо-восточной зоне boreальных лесов Евразии.

Материалы и методы

Исследования проводятся 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) Чокурдах на северо-востоке региона (около 71 с.ш. 147 в.д.) ; таблица). Климат Якутии – субарктический континентальный [17]. Среднее количество выбросов за год колеблется между участками в пределах 211–289 мм, из них большая половина выпадает в период с мая по сентябрь (за период 1966–2021 гг.; рис. 1Б, Г). Среднегодовая температура воздуха в пределах региона исследования попадает с юга на север от –8,8С до –13,3С (рис. 1Б, Г). Климатические данные получены с использованием онлайн-ресурса www.meteo.ru; Точка доступа к данным: <http://aisori-m.meteo.ru> [18]. Построение климатограммы осуществлялось с помощью пакета «Слиматол» [19] в программной среде R [20].

Для удобства описания участков приложения кодовые названия в соответствии с названиями

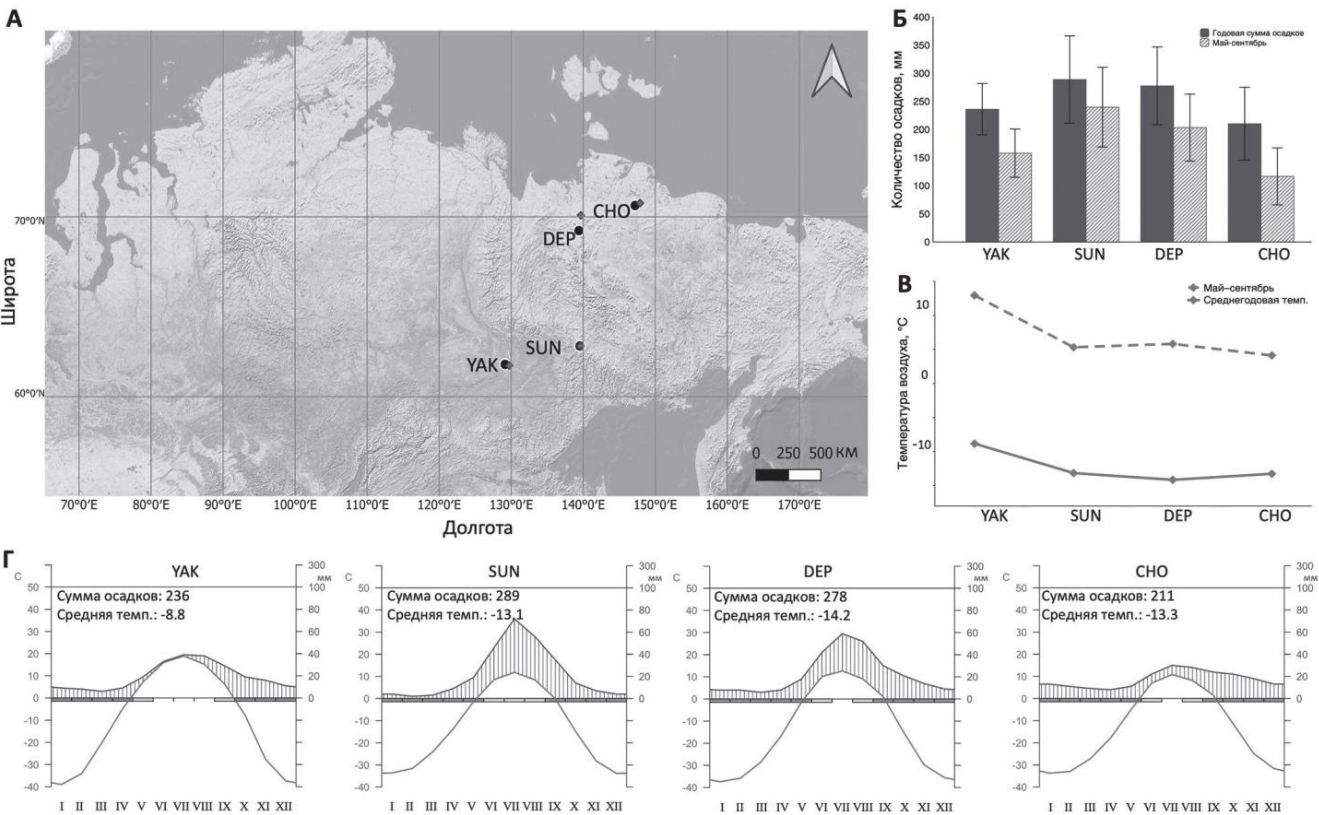


Рис. 1. (А) Расположение участков (черных точек) и наличие метеостанций (красных точек) на территории Республики Саха, Россия: ЯК, САН, ДЕП, ЧО. (Б) Средняя годовая нагрузка (столбцы со сплошной заливкой) и средняя годовая нагрузка с мая по сентябрь (заштрихованные столбцы). Планки погрешностей отражают среднее стандартное отклонение. (В) Среднегодовая температура воздуха (сплошная линия) и температура воздуха за период с мая по сентябрь (пунктирная линия). (Г) Климатодиаграммы для сокращенных участков на период 1966–2021 гг.

включать населенные пункты либо географических объектов: ЧО (пгт Чокурдах), САН (хре-бет Сунтар-Хаята), ДЭП (пгт Депутатский), ЯК (г. Якутск). При расчетах использованы климатические данные с учетом метеостанций, приближающихся на расстояние менее 20 км от дендрохронологического участка (таблицы): для самого северного участка, ЧО, – метеостанция «Чокурдах», для САН – «Восточная», для ДЭП – «Депутатский», для самого южного участка, ЯК, – «Якутск». Сбор древесных образцов (кernов) живых де-ревьев *L. sajanteri* осуществляется с помощью 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 плоскости, клеены в деревянную подложку и отполированы на шлифо-вальном станке наждачной бумагой зернистостью до Р800 для увеличения контрастности колец. Да-лее фрагменты сканировались с разрешением 3200 dpi с помощью Epson Perfection V800 (Epson, Япония). Измерение диапазона годичных колец проводом произошло в программе Coorecorder версии 9.3 (Cybis Elektronik & Data AB, Швеция). Точность перекрестного датирования проверялась при помощи программы COFESNA (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 диапазона колец. Также была проведена процедура удаления автокорреляционной помехи, которая дает так называемые остаточные хронологии, в изменчивости которых минимизировано влияние неклиматических факторов и сохраняется высокочастотный климатический отклик [23]. Для оценки

Полученные качества хронологий были рассчитаны по следующим статистическим параметрам: Msx (средняя чувствительность) – коэффициент чувстви-тельности; Rbar (скользящая средняя межсерийная корреляция) – коэффициент межсерийной корреляции; EPS (expressed Population Signal) – выраженный популяционный сигнал [24].

Для определения климатического отклика ра-диального прироста деревьев был проведен парный корреляционный анализ (коэффициенты корреляции Пирсона) между остаточными хронологиями и среднемесячными климатическими данными: суммарным значением атмосферных осадков и средней темпе-ратурой воздуха. В расчете принят временной интервал от сентября смены года по сентябрь текущего года, для общего периода 1966–2021 гг. Для расчета более точного временного отрезка (DOY – день года) с максимальным климатическим сигналом (максимальными значениями коэффициентов корреляции Пирсона) были рассчитаны скользящие зависимости с временным окном в 21 сут и шагом в 3 сут между хронологиями ШГК (ширину годичных колец) и среднесуточной темпе-ратурой воздуха, дневным количеством осадков. Определение стабильности температурного откли-ка ШГК во времени было выполнено с помощью скользящей зависимости 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, крестно-датиро-ванных и использованных для построения хро-нологий, составило 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 участка исследования и характеристики ШГК

	ЯК	СОЛНЦЕ	ДЕП	ЧО
Координаты участка	6205 с. ш. 12908 в. д. 6313	с. ш. 13931 в. д. 6921	с. ш. 13923 в. д. 7030	с. ш. 14711 в. д.
Высота участка (м над ур. м.)	308	1402	414	71
Метеостанция	Якутск	Восточная	Deputatskiy	Чокурдах
Координаты метеостанции	621 с. ш. 12943 в. д. 6313	с. ш. 13935 в. д. 6920	с. ш. 13940 в. д. 7037	с. ш. 14753 в. д.
Расстояние между участком исследования и метеостанцией (км)	20	2	12	2
действующего слоя земли (см)	> 41	42	40	14
Количество деревьев	18	20	14	20
Длительность хронологии (лет)* ШГК (мм)*	148 ± 7	180 ± 15	205 ± 85	332 ± 118
	0,44 ± 0,15	0,16 ± 0,07	0,53 ± 0,34	0,20 ± 0,07
Msx	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 годового колец; Msx – коэффициент чувствительности; Rbar – коэффициент межсерийной корреляции; EPS – выраженный популяционный сигнал; * – приведены средние значения вместе со средней стандартной величиной отклонения (±).

возраст 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 (Солнце, 1402 м над ур. м.), а также на самом северном участке СНО в лесотундре – 0,16 мм и 0,2 мм. есть (таблица). Статистический анализ древесных хронологий показал, что рост деревьев на севере Якутии (СНО) характеризуется наибольшей чувствительностью ($M_{sx} = 0,42$; таблица), в то время как хронология на южном участке YAK проявляется крайней чувствительной ($M_{sx} < 0,2$). Величины статистических показателей хронологии ШГК, наблюдаемые на СНО, обусловлены как географическим положением участка, так и продолжительностью хронологии (и, соответственно, возрастом) отдельных деревьев, которые более чем на 100 лет рассчитывают длительность хронологии на других участках. Также на радиальные приросты дерева влияют на глубину сезонного оттаивания почвы, которая составляет около 14 см для участка СНО и 40 см на других участках (таблица). Низкие показатели ШГК на участке SUN могут быть обусловлены строгими требованиями произрастания вблизи верхних границ леса. Тем не менее, высокие коэффициенты межсерийной корреляции ($R_{bar} > 0,42$) и значения выраженного популяционного сигнала ($EPS > 0,85$) указывают на то, что хронология на всех участках исследования соответствует ден-дроклиматическому анализу.

Влияние воздействия показало, что лишь осадка точно влияет на радиальный прирост древесины, без привычки для рассматриваемых участков. Так, положительное воздействие суммарного воздействия снега января на участке YAK ($r = 0,26$; $p < 0,05$; рис. 2А) получено, что выпавший в зимний период предотвращает сильное промерзание почвы. Наиболее значимое отрицательное влияние отмечено на участке SUN в период с конца октября по начало ноября предыдущего года ($r = -0,33$; $p < 0,05$; рис. 2Б). Однако в целом ни на одном из участков продолжения не выявлено выраженного продолжительности экологических факторов на радиальном приросте. Предположительно, это связано с тем, что в рассматриваемых местах обитания лиственница произведена в условиях достаточного обеспечения влагой [1].

Парный корреляционный анализ выявил статистически значимые положительные зависимости индексов ШГК от средней температуры июня на всех участках (r варьируется 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 предыдущего года ($r = 0,24, 0,26$ и $0,27$ соответственно, $p < 0,05$; рис. 2В). Скользящие измерения, рассчитанные по

Среднесуточные данные, также выявили положительное влияние температуры последней весны и начала лета на росте деревьев на всех участках (рис. 2Г). Однако по направлению с юга на север наблюдается увеличение максимальных коэффициентов корреляции и их перемещение на более

Корреляционный анализ между остаточными древесно-кольцевыми хронологиями и количе-

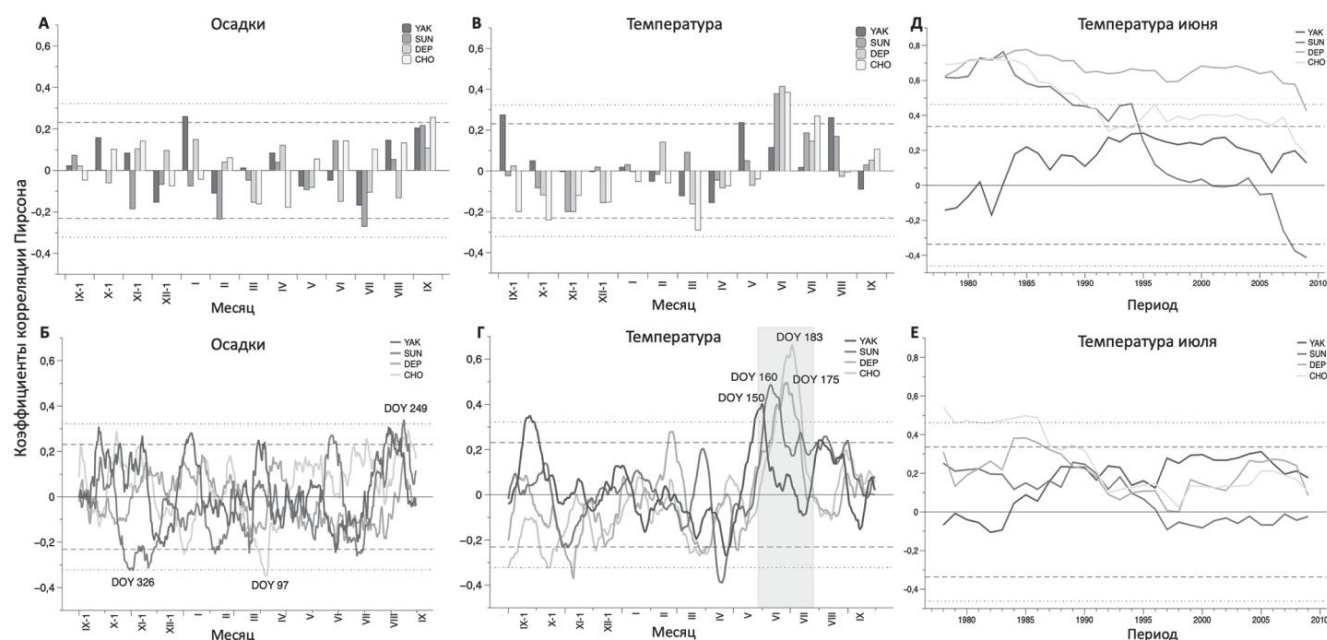


Рис. 2. Коэффициенты парных (А и В) и скользящих (Б и Г) зависимости между остаточными индексами ШГК и климатическими данными (количеством изменений и температурой воздуха). Скользящие зависимости (окно 25 лет с шагом 1 год) ШГК с температурами июня (Д) и июля (Е) для общего периода 1966–2021 гг. Пунктирные обозначения доверительных интервалов при $p < 0,05$ и $p < 0,01$.

поздние даты. Так, на участке ЯК, где продолжительность вегетационного периода больше (начинается в мае), мощность деятельного горизонта – большая по сравнению с другими участками, отмечается наиболее ранний климатический отклик, который был обнаружен уже в конце весны (DOY). 150; $p = 0,40$; $p < 0,01$ рис. Деревья на участках SUN и DEP продемонстрировали близкие по интенсивности климатические сигналы ($r = 0,49$ и $0,50$ соответственно; $p < 0,01$), что обеспечивает схожесть условий произрастания деревьев в верхней границе леса (SUN) и на границах с лесотундрой (ДЕП). При этом максимальные значения коэффициентов наблюдались сначала на ВС (DOY 160), а через 2 нед. – на ДЭП (DOY 174–178, рис. 2Г). Самый интенсивный и поздний климатический отклик отмечен в начале июля на северном участке СНО (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 активного 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 временных промежутков весны 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 различные годы камбий может быть активирован благоприятными условиями уже в последующем, последующее снижение температуры приводит к его повреждению [3]. В последних показателях наблюдается тенденция к снижению быстрого срабатывания на летние температуры на всех участках за исключением

ЯК (рис. 2Д–Е). Наблюдаемый эффект может заключаться в улучшении условий роста деревьев в регионах в результате общего потепления [30], увеличении количества доступной почвенной влаги [6, 31] и росте климата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

CO₂ в атмосфере [32, 33]. В условиях потепления снижается влияние температуры как основного лимитирующего фактора, что отражается на уменьшении чувствительности радиального прироста температуры к изменениям температуры в молодые месяцы. Полученные результаты объединяют

экологическая пластичность изучаемого вида лиственницы и его способность существовать в меняющихся условиях окружающей 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 территории исследования оказывают раннелетние температуры воздуха, при этом начало срабатывания, а также его интенсивность и продолжительность различны между участками. Рост лиственницы, произрастающей в распространении мерзлоты, тесно связан как с климатическими, так и с почвенно-грунтовыми условиями – в частности, с температурой деятельного слоя почвы. Указанная выше предельная концентрация факторов оказывает более выраженное климатическое воздействие в деревьях на севере Якутии по сравнению с деревьями в центральной части региона. Однако с течением времени этот эффект постепенного снижения. Вероятно, это обусловлено понижением температуры как лимитирующим фактором на рост лиственницы из-за общего повышения температуры и увеличения продолжительности вегетационного периода. Изучение климатических изменений на росте деревьев на территории Республики Саха – в зоне сплошного распространения многолетних мерзлоты – имеет

главное значение для оценки экологических и экономических последствий повышения температуры как в атмосфере, так и в глобальном масштабе.

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

3. Ваганов Е.А., Хьюз М.К., Кирдянов А.В., Швайнгрубер Ф.Х., Силкин П.П. Влияние сроков выпадения и таяния снега на рост деревьев в субарктической Евразии. Природа. 1999;400(6740):149–151.
4. Кирдянов А., Хьюз М., Ваганов Э., Швайнгрубер Ф., Силкин П. Значение раннелетних температур.

Природа и дата таяния снега для роста деревьев в Сибирской Субарктике. *Деревья*. 2003;17:61–69.

5. Кирдянов А.В., Заурер М., Зигвольф Р., Кнорре А.А., Прокушкин А.С., Чуракова О.В., Фонтн М.В., Бюнтген У. Долгосрочные экологические последствия лесных пожаров в зоне сплошной вечной мерзлоты Сибири. *Environ. Res. Lett.* 2020;15(3):034061.

6. Кирдянов А.В., Заурер М., Арзак А., Кнорре А.А., Прокушкин А.С., Чуракова О.В., Арозио Т., Бебчук Т., Зигвольф Р., Бюнтген У. Наука об общей окружающей среде: таяние вечной мерзлоты может смягчить вызванный потеплением стресс засухи у деревьев бореальных лесов. *Sci. Total Environ.* 2024;912:168858.

7. Рантанен М., Карпечко А.Ю., Липпонен А., Норд-линг К., Хиваринен О., Руостиноя К., Вихма Т., Лаак-сонен А. С 1979 года Арктика нагревается почти в четыре раза быстрее, чем на планете. *Окружающая среда Земли*. 2022;3(1):168.

8. Йоргенсон М.Т., Романовский В., Харден Дж., Шур Ю., О'Доннелл Дж., Шуур Е.А.Г., Каневский М., Марченко С. Устойчивость и уязвимость вечной мерзлоты к изменению климата. *Can. J. For. Res.* 2010;40(7):1219–1236.

9. Serreze MC, Dyurgerov M., Romanovsky V., Oechel WC, Zhang JT, Barry RG, Walsh JE, Chap-pin III FS, Osterkamp T. Данные наблюдений за недавними изменениями в среде северных высоких широт.

Чанг. 2000;46(1–2):159–207.

10. Шерстюков А.Б., Шерстюков Б.Г. Пространственные особенности и новые изменения происходят в изменении термического состояния почвогрунтов и выводят их сезонного протаивания в зону многолетних мерзлот. *Метеорол. гидрол.* 2015;(2):5–12.

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

12. Осокин Н.И., Сосновский А.В. Метео-рологические условия на теплоизоляционные свойства мохового покрова по данным измерений на Шпицбер-гене. *Криосф. Земли*. 2021;25(4):17–25.

13. Линдерхольм Х.В. Изменения вегетационного периода в прошлого века. *Сельскохозяйственный. Для. Метеорол.* 2006;137(1–2):1–14.

14. Прокушкин А.С., Хагедорн Ф., Покровский О.С., Вирс Дж., Кирдянов А.В., Масыгина О.В., Прокушкина М.П., Макдауэлл В.Х. Режим вечной мерзлоты влияет на пищевой статус и продуктивность лиственниц Центральной Сибири. *Леса*. 2018;9(6):314.

15. Андресен К.Г., Лоуренс Д.М., Уилсон К.Дж., Макгауйр А.Д., Ковен К., Шефер К., Джафаров Э., Пэн С., Чэнь Х., Гуттевен И., Берк Э., Чадберн С., Цзи Д., Чэнь Г., Хейс Д., Чжан В. Прогнозы влажности почвы и гидрологии региона вечной мерзлоты – сравнение моделей. *Криосфера*. 2020;14(2):445–459.

16. Харук В.И., Рансон К.Дж., Петров И.Я., Двинская М.Л., Им С.Т., Голюков А.С. Лиственница (*Larix dahurica* Turcz) рост в ответ на изменение климата в зоне вечной мерзлоты Сибири. *Reg. Environ. Change*. 2019;19:233–243.

17. Peel MC, Finlayson BL, McMahon TA Обновленная карта мира по классификации климата Кеппен-Гейгера. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2007;11(5):1633–1644.

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

19. Guijarro JA Гомогенизация климатических рядов с помощью Climatol. *Reporte Técnico* Государственного метеорологического агентства (AEMET), Офис Балеарских островов, Испания. 2018. 20 стр.

20. R Core Team. R: Язык и среда для статистических вычислений. Фонд R статистических вычислений, Вена, Австрия. 2023. URL <https://www.R-project.org/>.

21. Грисино-Майер HD Оценка точности перекрестного датирования: руководство и учебник для компьютерной программы COFECHA. *Tree-Ring Res.* 2001;57(2):205–221.

22. Кук Э.П., Холмс Р. Руководство по компьютерной программе ARSTAN. Международная библиотека программ банка данных по годичным кольцам деревьев, версия 2.0. Esd. HD Grissino-Mayer, RL Holmes и HC Fritts: Университет Аризоны; 1996:75–87.

23. Кук Э.П., Питерс К. Сглаживающий сплайн: новый подход к стандартизации ряда ширины годичных колец внутри леса для дендроклиматических исследований. *Tree-Ring Bulletin*. 1981;41:45–53.

24. Wigley TML, Briffa KR, Jones PD О среднем значении коррелированных временных рядов с приложениями в дендроклиматологии и гидрометеорологии. *J. Appl. Meteorol.* 1984;23(2):201–213.

25. Занг К., Бионди Ф., Treeclim: Пакет R для численной калибровки косвенных климатических соотношений. *Экография*. 2015;38(4):431–436.

26. Хьюз М.К., Ваганов Е.А., Шиятов С.Г., Тоу-чан Р., Фунхуосер Г. Летнее тепло XX века на севере Якутии в 600-летнем контексте. *Голоцен*. 1999;9(5):629–634.

27. Кирдянов А.В., Трейдте К.С., Николаев А., Хелле Г., Шлезер Г.Х. Климатические сигналы в ширине годичных колец, плотности древесины и δ13C лиственниц Восточной Сибири (Россия). *Химия и геол.* 2008;252(1–2):31–41.

28. Кирдянов А.В., Пьерматтей А., Коларж Т., Рыбничек М., Крушич П.Я., Николаев А.Н., Рейниг Ф., Бюнтген У. Заметки об оптимальной стратегии отбора проб в дендроклиматологии. *Дендрохронология*. 2018;52:162–166.

29. Заурер М., Кирдянов А.В., Прокушкин А.С., Ринне К.Т., Зигвольф Р.Т. Влияние обратной климато-изотопной зависимости в почвенной воде на изотопно-кислородный состав лиственницы Гмелина в Сибири. *Новая фитол.* 2016;209(3):955–964.

30. Чуракова (Сидорова) О.В., Портер Т.Дж., Жарков М.С., Фонтн М.В., Баринов В.В., Тайник А.В., Кирдянов А.В., Кнорре А.А., Вегманн М., Трушкина Т.В., Кошурникова Н.Н., Ваганов Е.А., Мыглан В.С., Зигвольф Р.Т.В., Заурер М. Влияние климата на стабильные изотопы годичных колец в бореальном северном полушарии зона. *наук.*

Всего по окружающей среде. 2023;870: 161644.

31. Арзак А., Попкова М., Анарбекова А., Олано Ж.М., Гутьеррес Э., Николаев А., Шишов В. Повышение скорости радиального и позднего роста *Larix cajanderi* Mayr. и *Pinus sylvestris* L. в зоне сплошной мерзлоты Центральной Якутии (Россия). *Энн. Для. наук*. 2019;76:96.

32. Хуан Дж. Г., Бержерон Й., Деннелер Б., Бернингер Ф., Тардиф Дж. Реакция лесных деревьев на повышенное содержание CO2 в атмосфере. *Crit. Rev. Plant Sci.* 2007;26(5–6):265–283.

33. Лю С., Чжао Л., Фолькер С., Сюй Г., Цзэн С., Чжан С., Чжан Л., Сунь В., Чжан Ц., Ву Г., Ли С.

Потепление и обогащение CO2 изменили экофизиологические реакции даурской лиственницы и монгольской сосны за последнее столетие в условиях вечной мерзлоты северо-восточного Китая. *Физиология деревьев*. 2019;39(1):88–103.

Поступила в редакцию 19.03.2024

После доработки 17.05.2024

Принята в печать 25.07.2024

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Климатическая реакция радиального роста *Larix sibirica* в Северной и Центральной Якутии

К.И. Хотцинская¹, * , О.В. Сергеева¹, , А.В. Кирдянов¹, А.Н.² , Николаев³ Н.Н. ,
К.В. Акулинина¹ , Кошурникова¹ А.И. , Колмогоров¹, З.А. Арзак¹ ,

¹Сибирский федеральный университет, 660041, г. Красноярск, Свободный пр., 79;

²Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/28;

³Северо-Восточный федеральный университет имени Аммосова, ул. Белинского, 58, г. Якутск, 677000, Россия

*электронная почта: kkhotsinkova@sfu-kras.ru

Тенденции потепления в высоких широтах приведут к изменениям термогидрологического режима вечномерзлых почв, что повлияет на структуру и функционирование северных экосистем. Изучение реакции радиального роста деревьев на текущие условия окружающей среды обычно используется для понимания будущей реакции деревьев. В этом исследовании оценивается реакция четырех лиственниц Каяндера (*Larix sibirica* Mayr) в зоне сплошной мерзлоты к различным экологическим условиям в Северной и Центральной Якутии (Республика Саха). Коэффициенты корреляции между индексами ширины годичных колец и климатическими параметрами были рассчитаны за период 1966–2021 гг. Результаты показали, что температура воздуха является основным фактором, лимитирующим радиальный прирост деревьев на всех участках (в основном температура июня; $r = 0,38-0,41$; $p < 0,01$). Однако сроки и интенсивность температурной чувствительности увеличиваются с широтой. Наиболее чувствительные к климату древесные растения произрастают в северной части исследуемого региона, где вегетационный период довольно короткий. Бегущие корреляции показали общую тенденцию к снижению интенсивности температурной реакции в хронологиях радиального прироста. Вероятно, это связано с ростом летних температур в последние десятилетия, что подчеркивает экологическую пластичность лиственницы. Эти результаты могут помочь оценить изменения в продуктивности лесных экосистем в отдельных регионах бореальной зоны.

Ключевые слова: дендрология, рост деревьев, древесно-кольцевая хронология, изменение климата, вечная мерзлота, лиственница

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект ФСРЗ-2020-0014) и Российского научного фонда (проект № 22-14-00048).

Сведения об авторах

Хотцинская Ксения Игоревна – мл. науч. сотр. лаборатории комплексных исследований динамики лесов Евразии Сибирского федерального университета. Тел.: 8-391-206-21-34; электронная почта: kkhotsinkova@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; электронная почта: osergeeva@sfu-kras.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7978-0737>

Кирдянов Александр Викторович – докт. биол. наук., ст. науч. сотр. лабораторные конструкции древесных колец Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН. Тел.: 8-391-243-36-86; электронная почта: 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; электронная почта: rector@s-vfu.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2270-2049>

Акулинина Кристина Васильевна – мл. науч. сотр. лаборатория комплексных исследований динамики лесов Евразии Сибирского федерального университета. Тел.: 8-391-206-

21-34; электронная почта: kakulinina@sfu-kras.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6027-4930>

Кошурникова Наталья Николаевна – канд. биол. наук, ст. науч. сотр. лаборатория комплексных исследований динамики лесов Евразии Сибирского федерального университета. Тел.: 8-391-206-29-46; электронная почта: 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; электронная почта: ai.kolmogorov@s-vfu.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3688-7753>

Арзак Альберто – канд. биол. наук, доц. кафедры экологии и природопользования Сибирского федерального университета. Тел.: 8-391-206-21-34; электронная почта: aarzak@sfu-kras.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3361-5349>