

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Экология

УДК 581.54

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-1-85-96>



Оригинальная статья

Климатический отклик радиального роста лиственницы Каяндера и сосны обыкновенной в Центральной Якутии

Чжан Сяохун^{✉,1}, А. Н. Николаев¹, А. Арсак², А. И. Колмогоров^{1,2},
М. С. Васильев³, Л. А. Пестрякова¹

¹Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация

²Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация

³Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

✉z461306425@gmail.com

Аннотация

Изменение климата, выражающееся в росте температурных колебаний, динамике в условиях выпадения осадков и увлажнения почв, может существенно повлиять на экосистемы, которые испытывают как недостаток, так и избыток влаги. Даже небольшие изменения сумм осадков и температуры воздуха способны значительно сказаться на росте деревьев. В данной работе рассматриваются статистические параметры ширины годовых колец и результаты дендроклиматического анализа лиственницы (*Larix cajanderi* Mayr.) и сосны (*Pinus sylvestris* L.), произрастающих в зоне распространения сплошной многолетней мерзлоты. Лесные участки, на которых собраны образцы лиственницы и сосны, находятся вблизи села Маган и поселка городского типа Нижний Бестях в центральной части Республики Саха (Якутия). Древесные растения отличаются продолжительным жизненным циклом, годовые кольца способны сохранять информацию об их росте. Этот важный ресурс позволяет получать ценные сведения о климате и экологических изменениях в данной местности. Чтобы понять, как деревья реагируют на изменения климата, были рассчитаны коэффициенты корреляции Пирсона между шириной годовых колец деревьев и среднемесячными значениями температуры воздуха, суммой осадков за год, а также индексом засушливости SPEI при использовании данных метеостанции Якутск. Для выявления реакции различных древесных пород на изменения климата за последние 30 лет каждый год рассматривался как отдельный период. Предполагаем, что температура воздуха, которая имеет тенденцию к повышению, является одним из ограничивающих факторов, влияя на осадки и засушливые периоды. Из-за недостатка влаги в виде дождей древесные породы испытывают трудности. В основном они получают влагу из активного слоя многолетнемерзлых пород, который аккумулирует осенние осадки предыдущего года. В целом наблюдается отрицательный отклик на повышение температуры воздуха в приземном слое атмосферы. С одной стороны, это свидетельствует о том, что радиальный рост лиственницы и сосны снижается, с другой – древесные виды адаптируются к изменяющимся климатическим условиям в центральной части Якутии.

Ключевые слова: лиственница Каяндера, сосна обыкновенная, хронология ширины годовых колец, климатический отклик, Восточная Сибирь, Якутия

Финансирование. Работа выполнена в рамках научного проекта государственного задания Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова (№ FSRG-2023-0027) и базового бюджетного проекта Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН (№ FUFU-2021-0003).

Благодарности. Авторы выражают глубокую благодарность аспирантам К.В. Акулининой и В.В. Агаповой из лаборатории комплексных исследований динамики лесов Евразии Сибирского федерального университета (г. Красноярск; FSRZ-2020-0014) за научную и экспериментальную помощь, а также китайскому коллеге Сунь Юнлуну за помощь в полевых работах.

Для цитирования: Чжан С., Николаев А.Н., Арсак А., Колмогоров А.И., Васильев М.С., Пестрякова Л.А. Климатический отклик радиального роста лиственницы Каяндера и сосны обыкновенной в Центральной Якутии. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(1):85–96. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-1-85-96>

Original article

Climate response in radial growth of *Larix cajanderi* and *Pinus sylvestris* in Central Yakutia

Zhang Xiaohong^{✉1}, Anatoly N. Nikolaev¹, Alberto Arzac², Alexey I. Kolmogorov^{1,2},
Mikhail S. Vasiliev³, Ludmila A. Pestryakova¹

¹Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation

²Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

³Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

[✉]z461306425@gmail.com

Abstract

Climate change, characterized by increased temperature fluctuations and alterations in precipitation and soil moisture conditions, can significantly impact ecosystems that experience both moisture deficits and excesses. Even small changes in precipitation and air temperature can significantly affect tree growth. This paper examines the statistical parameters of the width of annual rings and the results of dendroclimatic analysis of larch (*Larix cajanderi* Mayr.) and pine (*Pinus sylvestris* L.) growing in the zone of continuous permafrost. The forest areas where larch and pine samples were collected are located near the village of Magan and the urban-type settlement of Nizhny Bestyakh in the central part of the Republic of Sakha (Yakutia). Woody plants are characterized by a long-life cycle, the annual rings of which are able to store information about their growth. This important resource allows obtaining valuable information about the climate and environmental changes in a given area. To understand how trees respond to climate change, Pearson correlation coefficients were calculated between the width of tree rings and average monthly air temperature, annual precipitation, and the SPEI aridity index using data from the Yakutsk weather station. To identify the response of different tree species to climate change over the past 30 years, each year was considered as a separate period. We assume that air temperature, which tends to increase, is one of the limiting factors that affects precipitation and dry periods. Due to the lack of moisture in the form of rain, tree species experience difficulties. They mainly receive moisture from the active layer of permafrost, which accumulates autumn precipitation of the previous year. Overall, we observe a negative response to the increase in air temperature in the surface layer of the atmosphere. On one hand, this suggests a decline in the radial growth of larch and pine; on the other hand, tree species are adapting to the changing climatic conditions in the central region of Yakutia.

Keywords: *Larix cajanderi*, *Pinus sylvestris*, tree-ring width chronology, climate response, East Siberia, Yakutia

Funding. This study was conducted within the framework of the scientific project associated with the state assignment of Ammosov North-Eastern Federal University (No. FSRG-2023-0027) and the basic budgeted project of the Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (No. FUFU-2021-0003).

Acknowledgements. The authors express their sincere gratitude to student K.V. Akuliniina and V.V. Agapova from the Laboratory of Complex Studies of Eurasian Forest Dynamics at the Siberian Federal University (Krasnoyarsk; FSRZ-2020-0014) for their invaluable scientific and experimental contributions. Additionally, they acknowledge the support of their Chinese colleague, Sun Yunlong, for his assistance in fieldwork.

For citation: Zhang X., Nikolaev A.N., Arzac A., Kolmogorov A.I., Vasiliev M.S., Pestryakova L.A. Climate response in radial growth of *Larix cajanderi* and *Pinus sylvestris* in Central Yakutia. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(1):85–96. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-4-85-96>

Введение

В Арктической зоне Российской Федерации и Республики Саха (Якутия) в целом наблюдается потепление климата с высокими темпами роста приземной температуры воздуха [1–3]. Представляют интерес научные исследования, в которых используется индикатор ширины годичных колец деревьев в качестве «накопленной» информации о климате и его воздействии на экосистемы в средних и высоких широтах Северного полушария [4–9].

Годичные кольца деревьев могут быть источником ценной информации о климате за определенный период времени [10–18]. Древесные кольца играют ключевую роль в понимании климатических сдвигов и эволюции экосистемы в целом. Анализ радиального роста древесных видов позволяет выявить их тесную связь с изменениями климата и их влиянием на окружающую среду [19, 20]. Исследования в этой области могут внести значительный вклад в прогнозирование климата, стать основой для разработки обоснованных стратегий экологической безопасности и т. п.

В настоящее время накоплен обширный научный материал, посвященный влиянию погодных условий и климата на радиальный рост деревьев. Эти исследования проводились в субарктических и высоких широтах с целью реконструкции климата и составления долгосрочных хронологий. Различные древесные виды, обладают высокой чувствительностью и используются как тест-объекты. Радиальный рост деревьев в летние месяцы ограничивается температурой воздуха [21–23]. Кроме того, были выявлены зависимости от особенностей рельефа и связанного с ним перераспределения почвенной влаги в экосистемах.

Цель данной работы – изучить влияние климатических факторов (температура воздуха, осадки) на радиальный рост лиственницы (*Larix cajanderi* Mayr.) и сосны (*Pinus sylvestris* L.) в окрестностях села Маган и поселка городского типа Нижний Бестях, расположенных в центральной части Республики Саха (Якутия).

Материалы и методы

Для исследования были выбраны два участка с лесной растительностью, расположенные вблизи населенных пунктов (рис. 1): село Маган, находящееся на левом берегу р. Лена (62°09' с.ш.; 129°34' в.д.) [24], поселок городского типа Ниж-

ний Бестях, расположенный на правом берегу р. Лена (61°55' с.ш.; 129°58' в.д.) (в дальнейшем по тексту населенные пункты будут упоминаться без указания их статуса). Расстояние от Магана и Нижнего Бестяха до метеостанции Якутск составляет примерно 17 и 18 км, а до р. Лена – около 16 и 5 км соответственно. Расстояние между двумя исследовательскими участками с древесной растительностью составляет примерно 35 км. Высота над уровнем моря на обоих участках примерно одинаковая – около 145 м.

Климат в районе исследования резко-континентальный. Наблюдаются значительные температурные колебания в течение года и небольшое количество осадков, выпадающих преимущественно в теплое время года. Летний сезон теплый и засушливый (см. рис. 1). Согласно данным метеорологической станции Якутск, среднегодовая температура воздуха за период 1929–2018 гг. составила –9,4 °С. Общее количество осадков за год достигает ~250 мм с максимумом в летний сезон.

На лесных участках нами классифицированы толокнянково-лишайниковые леса, сочетающиеся с лиственничными брусничными. В районе Нижнего Бестяха на деревьях присутствуют следы лесных пожаров. В целом преобладают палевые карбонатные и палевые осолоделые суглинистые почвы.

В течение летнего сезона 2023 г. были собраны образцы лиственницы (*Larix cajanderi* Mayr.) и сосны (*Pinus sylvestris* L.), которые представлены в табл. 1. Для анализа температурных условий и количества осадков за период 1929–2018 гг. использованы данные метеорологической станции Якутск (62°1' с.ш.; 129°43' в.д.). Проведен дендрохронологический анализ более 20 кернов древесины с каждого лесного участка (всего 94 керна), которые были собраны на высоте 1,3 м.

Древесные керны, собранные на участке Маган, высушены при комнатной температуре, закреплены на специальной деревянной подложке и аккуратно очищены с помощью скальпеля. Для измерения ширины годичных колец использовалось устройство LINTAB-6 (Rinntech, Германия) и программное обеспечение TSAPWin, обеспечивающее высокую точность – до 0,01 мм [25]. В лабораторных условиях образцы с участка Нижний Бестях прошли процесс полировки с использованием наждачной бумаги (№ 400–1000). Затем они были отсканированы с помощью планшетного сканера, который работал под управлением программного обеспечения SilverFast



Рис. 1. Карта-схема расположения метеорологической станции Якутск (а) и лесных участков вблизи населенных пунктов Маган и Нижний Бестях (б), а также график среднемесячных значений осадков и температуры воздуха за период 1929–2018 гг. (в)

Fig. 1. Location of the “Yakutsk” meteorological station (a) and forest areas in the vicinity of the settlements of Magan and Nizhny Bestyakh (b), as well as a graph of average monthly precipitation and air temperature for the period 1929–2018 (c)

с разрешением 64bit и 3200 DPI. Полученные цифровые изображения каждого образца были импортированы в программу CooRecorder (вер-

сия 9.3.1), где границы кольцевых меток были размещены вручную и/или автоматически [26]. Качество датирования образцов двух участков было проверено с использованием профессионального программного обеспечения COFESHA (компьютерная программа, написанная на языке ANSI Fortran-77 Ричардом Л. Холмсом – Университет штата Аризона, США) [27].

В исследовании был использован метод стандартизации (экспонирования), который основывается на отрицательной экспоненциальной функции для выявления климатических сигналов, влияющих на ширину годовых колец. Образцы древесных колец были обработаны и проанализированы с помощью специализированных пакетов программ «dplR» и «treeclim», входящих в состав программного обеспечения R (версия 4.2.2) [28–30]. Чтобы оценить реакцию лиственницы и сосны на изменения климата, был применен метод корреляции Пирсона (r). Он позволяет рассчитать взаимосвязь между хронологическими рядами ширины годовых колец и среднемесячными значениями температуры воздуха, общим количеством осадков, а также индексом SPEI (Standardised Precipitation Evapotranspiration Index) [31]. SPEI – это индекс засушливости, который позволяет выявить периоды засухи и увлажнения. Он включает в себя не только осадки, но и температуру воздуха, что позволяет оценить влияние температуры на развитие засухи на основе базовых расчетов водного баланса. Корреляционный анализ проводился с учетом различных периодов предыдущего и текущего года, а также их комбинаций по месяцам и сезонам. Для анализа различий и реакций древесных пород на климат был рассчитан скользящий коэффициент корреляции с временным окном в 30 лет с шагом в один год.

Результаты и обсуждение

Общие сведения и статистические параметры хронологий ширины годовых колец. В табл. 1 представлены общие сведения и статистические параметры, характеризующие ширину годовых колец деревьев на исследуемых участках в различные периоды времени, где МА-Л – Маган-лиственница, МА-С – Маган-сосна, НБ-Л – Нижний Бестях-лиственница и НБ-С – Нижний Бестях-сосна.

Средняя ширина годовых колец МА-Л составляет $1,01 \pm 0,55$ мм за период 1907–2022 гг., НБ-Л – $0,91 \pm 0,54$ мм за период 1867–2022 гг.,

Общие сведения и статистические параметры хронологий ширины годичных колец

Table 1

General information and statistical parameters of tree-ring width chronologies

Общие сведения и статистические параметры	МА-Л 1907–2022 гг.	МА-С 1929–2022 гг.	НБ-Л 1867–2022 гг.	НБ-С 1808–2022 гг.
Общие сведения				
Расстояние до метеостанции Якутск, км	~17		~18	
Расстояние до р. Лена, км	~16		~5	
Статистические параметры				
Количество индивидуальных серий, шт.	27	21	20	26
Длительность хронологий, годы	115	93	155	214
Средняя ширина годичных колец ± стандартное отклонение, мм	1,01 ± 0,55	1,7 ± 0,83	0,91 ± 0,54	0,8 ± 0,39
Коэффициент автокорреляции 1-го порядка	0,63	0,68	0,75	0,78
Межсерийный коэффициент корреляции	0,51	0,68	0,24	0,33
Коэффициент чувствительности	0,37	0,28	0,35	0,35
Выраженный сигнал популяции	0,97	0,98	0,87	0,87
Отношение сигнала к шуму	32,95	60,44	6,49	6,95

МА-С – $1,7 \pm 0,83$ мм за период 1929–2022 гг., НБ-С – $0,8 \pm 0,39$ мм за период 1808–2022 гг.

Коэффициенты автокорреляции 1-го порядка для НБ-Л и НБ-С оказались выше, чем для МА-Л и МА-С. Это может свидетельствовать о том, что на участке вблизи Нижнего Бестяха рост деревьев, таких как лиственница и сосна, происходит более плавно, чем МА-Л и МА-С.

Коэффициент чувствительности исследуемых лесных участков в диапазоне 0,35–0,37, за исключением МА-С, где этот коэффициент оказался равным 0,28. В целом это может указывать на то, что различные виды деревьев реагируют на изменения климата схожим образом с учетом иных процессов.

Межсерийный коэффициент корреляции для МА-С – 0,68 и НБ-С – 0,33 выше, чем для МА-Л – 0,51 и НБ-Л – 0,24. Возможно, для сосны на исследуемых участках проявляются межсерийная коррелятивная связь между индивидуальными сериями и схожая реакция на изменения климата.

На исследуемых участках уровень сигнала (выраженный сигнал популяции), который характеризует популяцию древесных видов, превышает общепринятый порог – 0,85. Это свидетельствует о достоверности хронологии образцов и возможности дальнейшего проведения дендроклиматического анализа.

Значения отношений сигнала к шуму на участках вблизи Магана выше, чем Нижнего

Бестяха. Это указывает на то, что климатический отклик лиственницы и сосны в районе Магана более согласован.

Сравнительный анализ статистических параметров (см. табл. 1) различных видов древостоя на исследуемых участках подтверждает достоверность хронологии образцов и согласованность статистических показателей.

Проведены расчеты стандартизированного индекса ширины годичных колец, в результате получены следующие значения: МА-Л – среднее значение – 0,99, максимальное – 1,69; МА-С – среднее значение – 0,98; НБ-Л – среднее значение – 0,95, максимальное – 1,55 и НБ-С – среднее значение – 1,007. Максимальные значения данного индекса для сосны на обоих участках относительно близки. В целом средние и максимальные значения стандартизированного индекса ширины годичных колец для МА-Л оказались выше, чем НБ-Л. Это может свидетельствовать о более благоприятных условиях роста для лиственницы вблизи Магана. Разница между средними значениями МА-С (0,98) и НБ-С (1,007) невелика и может указывать на схожую адаптацию сосны на исследуемых участках к условиям окружающей среды. Однако данный факт требует подтверждения или опровержения при проведении статистического анализа данных с абиотическими факторами неживой природы.

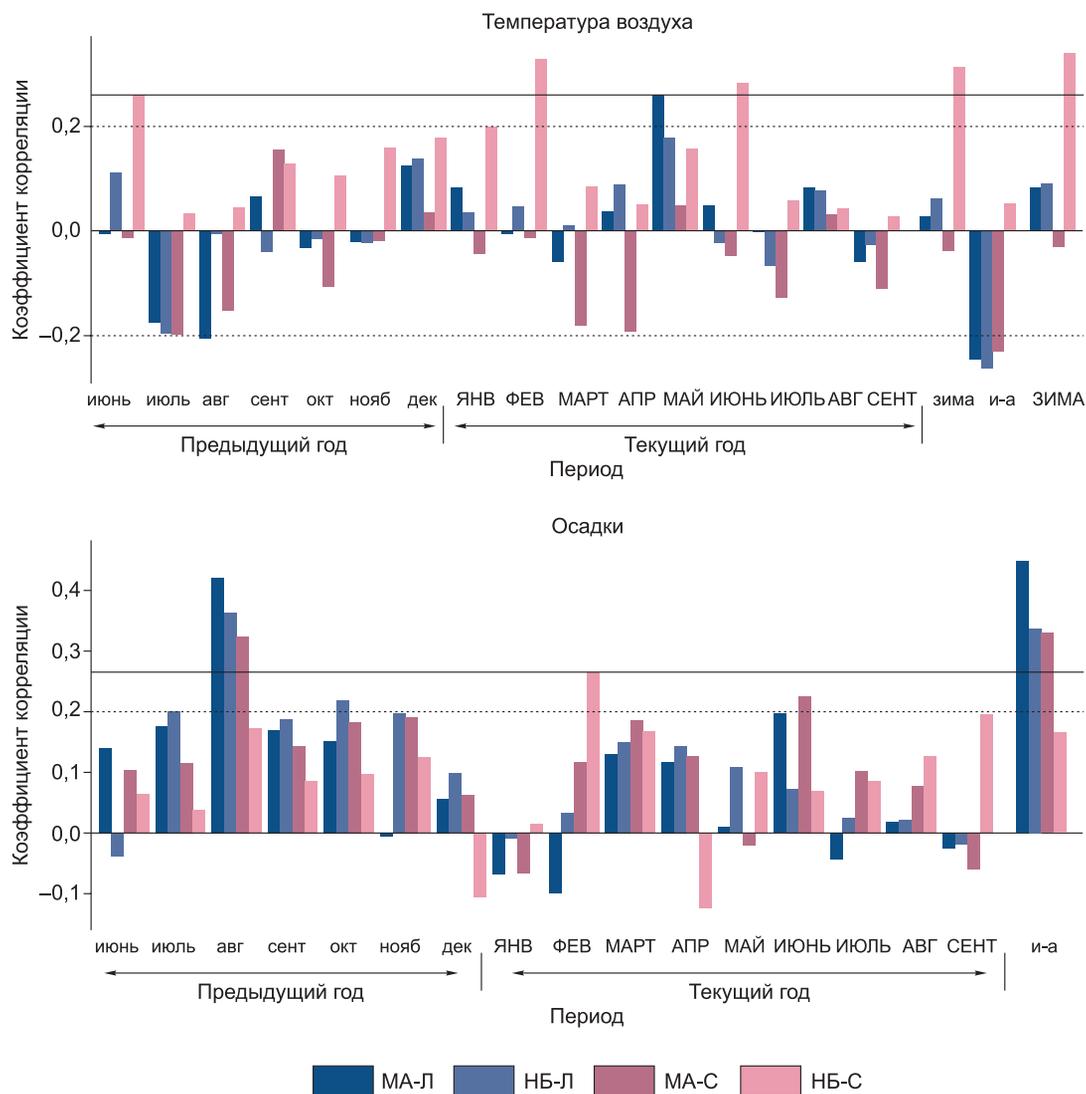


Рис. 2. Коэффициенты корреляции Пирсона между шириной годичных колец и температурой воздуха с осадками на исследуемых участках: МА-Л – Маган-лиственница, МА-С – Маган-сосна, НБ-Л – Нижний Бестях-лиственница, НБ-С – Нижний Бестях-сосна. Строчные буквы – предыдущий год, прописные – текущий, где и-а – июнь–август предыдущего года. Штриховой линией указан уровень достоверности при $p < 0,01$, сплошной линией – $p < 0,05$

Fig. 2. Pearson correlation coefficients between tree-ring width chronologies and air temperature and precipitation for the study areas: MA-L – Magan-larch, MA-C – Magan-pine, НБ-Л – Nizhniy Bestyakh-larch, НБ-С – Nizhniy Bestyakh-pine. Lowercase letters represent previous year, and uppercase letters the current year, with и-а is June-August of the previous year. The dashed line indicates the level of significance at $p < 0.01$, the solid line – $p < 0.05$

Корреляционный анализ Пирсона. На рис. 2 представлены графики корреляционного анализа за период 1929–2018 гг. связи между шириной годичных колец и температурой воздуха и осадками. С учетом различных периодов предыдущего и текущего годов, а также различных комбинаций по месяцам и сезонам при проведении прямого корреляционного анализа видно, что связь с температурой воздуха находится в диапазоне от $-0,2$ до $0,2$ при $p < 0,01$. Данный факт

указывает на практическое отсутствие прямого влияния температуры воздуха на рост древесных видов на исследуемых участках. Можно лишь выделить небольшие всплески откликов НБ-С на температуру воздуха в зимний период предыдущего и текущего годов на уровне $0,3$ при $p < 0,05$.

Отклик лиственницы и сосны на осадки (участки МА-Л, НБ-Л и МА-С) с r от $0,3$ до $0,45$ при $p < 0,05$ проявляется в августе и июне–авгугу-

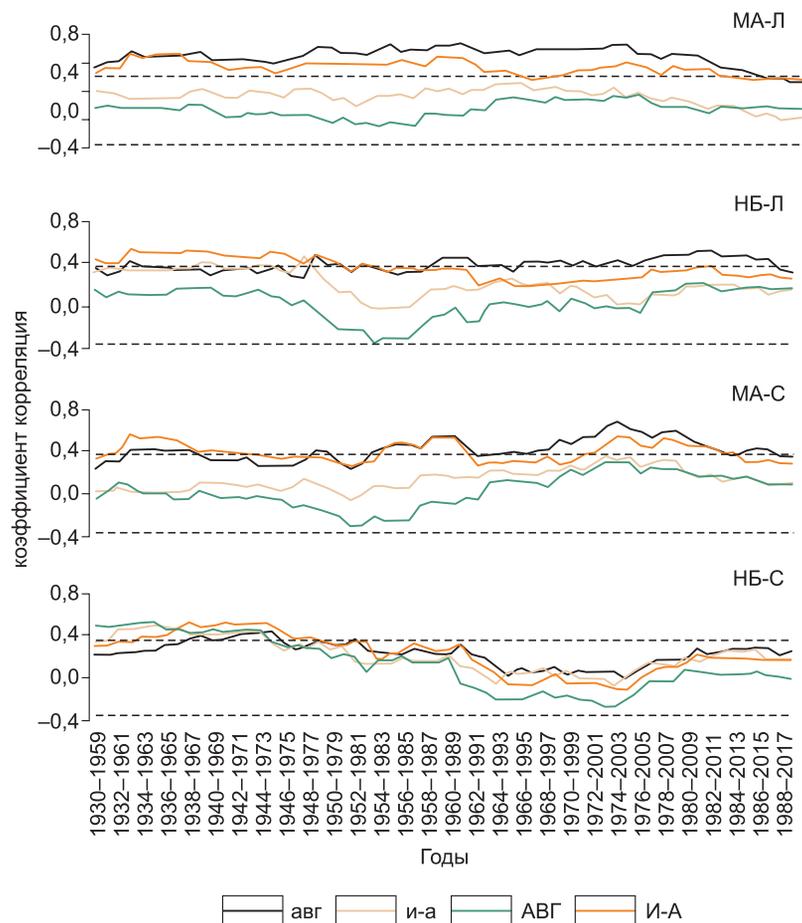


Рис. 3. Скользящий коэффициент корреляции (временное окно – 30 лет) между осадками и шириной годичных колец (лиственница, сосна). Усл. обозн. см. рис. 2. Штриховая линия – уровень достоверности при $p < 0,01$

Fig. 3. Moving correlation coefficient (30-year time window) between precipitation and tree-ring width chronologies for larch and pine at the study sites. Legend see fig. 2. Lowercase letters represent the previous year, and uppercase the current year. The dashed line indicates the level of significance at $p < 0.01$

сте предыдущего года (сезон максимума средне-месячных осадков – см. рис. 1).

Вышеописанные результаты в целом согласуются с исследованием, проведенным на левом берегу р. Лена вблизи села Табага [32]. В работе [32] также не была выявлена прямая корреляция между температурой воздуха и радиальным ростом лиственницы за период 1929–2018 гг. В этой работе были использованы иные методы статистического анализа данных с привлечением гидро-термического коэффициента Селянинова.

Расчет скользящих коэффициентов корреляции. На рис. 3 представлена общая динамика скользящих коэффициентов корреляции (временное окно – 30 лет) между осадками и шириной годичных колец на исследуемых участках. График скользящих коэффициентов корреляции между температурой воздуха и шириной годичных колец

не представлен, так как их значения не превышают 0,3 при $p < 0,01$ на всех исследуемых участках.

В данном случае (см. рис. 3) можно выделить отклик древесных видов на осадки (участки МА-Л, МА-С и НБ-Л) в августе и июне–августе предыдущего года со значениями скользящих коэффициентов корреляции на уровне 0,4 и выше (до 0,7) при $p < 0,01$. Практически на всем рассматриваемом периоде на участке МА-Л скользящие коэффициенты корреляции выше 0,4 при $p < 0,01$. В качестве исключения можно отметить участок НБ-С, когда отклик сосны на осадки (на уровне 0,4 и выше (до 0,6) при $p < 0,01$) наблюдался с 1930-х до середины 1970-х гг. в августе предыдущего, августе и июне–августе текущего годов.

Прослеживается полиномиальный ход скользящих коэффициентов корреляции с ложбинами

Таблица 2

Сухие и влажные годы по данным метеостанции Якутск за период 1929–2018 гг.

Table 2

Dry and wet years according to the “Yakutsk” weather station for the period 1929–2018

Классификация	Сухие года	Классификация	Влажные года
Легкая	1929, 1930, 1934, 1939, 1942, 1944, 1950, 1973, 1992, 1996, 2003, 2012, 2018	Легкая	1932, 1938, 1954, 1959, 1960, 1961, 1966, 1967, 1968, 1975, 1976, 1980, 1982, 1994, 2006
Умеренная	1945, 1948, 1986, 2009, 2010, 2011	Умеренная	1951, 1952, 1989, 2007
Сильная	1949, 2001, 2002	Сильная	1979
	Всего: 22		Всего: 20

и гребнями в различные временные отрезки за рассматриваемый период. Динамика может быть связана с эндогенными и экзогенными факторами (например, почвенная влага и снегонакопление), данные по которым на территории исследуемых участков отсутствуют, что требует дополнительного научного изыскания. В целом осадки в июне–августе предыдущего года играют важную роль в радиальном росте лиственницы и сосны исследуемых участков.

Расчет сухих и влажных годов – индекс SPEI: связь с шириной годовичных колец. Количество сухих годов (табл. 2) составило 22 (25 %) и влажных – 20 (22 %) за период 1929–2018 гг.

На рис. 4 представлены коэффициенты корреляции между шириной годовичных колец и индексом SPEI. С июля предыдущего по июль текущего года наблюдается корреляционная связь от 0,3 до 0,5 при $p < 0,05$ на участках МА-Л, НБ-Л

и МА-С, что может быть связано с инфильтрацией осенних осадков предыдущего года в почву.

Можно отметить (см. рис. 4), что практически отсутствует корреляционная связь на участке НБ-С – отрицательный отклик на положительную тенденцию роста температуры воздуха, оказывающего влияние на засушливые периоды (см. табл. 2). Данный факт может указывать на большую устойчивость (адаптацию) сосны к климатическим изменениям в районе Нижнего Бестяха.

Предполагаем, что на исследуемых лесных участках температура воздуха с положительной тенденцией роста является лимитирующим ростовые процессы фактором, который может негативно влиять на осадки и вести к возникновению засушливых периодов. В результате древесные виды испытывают недостаток влаги. В основном деревья получают почвенную влагу за счет ее инфильтрации в результате осадков июня–августа предыдущего года (см. рис. 2) и аккумуляции в сезонно-талом слое мерзлоты. Полученные результаты подтверждают исследование в районе села Табага [32], что в целом указывает на отрицательный отклик (снижение) радиального роста лиственницы и сосны на повышение температуры приземного слоя атмосферы. С другой стороны, это свидетельствует об адаптации древесных видов к изменяющемуся климату в центральной части Якутии.

Заключение

В работе приведены статистические параметры хронологий ширины годовичных колец на участках вблизи населенных пунктов Маган и Нижний Бестях. Мы опровергаем, что небольшая разница между средними значениями стандартизированного индекса ширины годовичных колец МА-С – 0,98 и НБ-С – 1,007 может указывать на схожую адаптацию сосны к условиям окру-

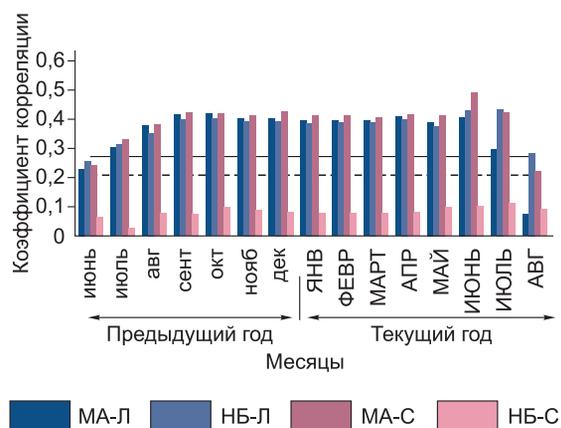


Рис. 4. Коэффициенты корреляции Пирсона между шириной годовичных колец и индексом SPEI. Поясн. см. рис. 2. Штриховой линией указан уровень достоверности при $p < 0,01$, сплошной – $p < 0,05$.

Fig. 4. Pearson correlation between tree-ring width chronologies and the index SPEI. Legend see fig. 2. The dashed line indicates the level of significance at $p < 0.01$, the solid – $p < 0.05$

жающей среды. Статистический анализ связей между шириной годичных колец и индексом SPEI указывает, что с июля предыдущего по июль текущего года наблюдается корреляционная связь от 0,3 до 0,5 при $p < 0,05$ на участках МА-Л, НБ-Л и МА-С. В то же время на участке НБ-С наблюдается отрицательный отклик радиального прироста деревьев на повышение температуры воздуха, оказывающее влияние на формирование засушливых периодов. Данный факт может указывать на большую устойчивость (адаптацию) сосны к климатическим изменениям в районе Нижнего Бестяха.

Показано, что за период 1929–2018 гг. при проведении прямого корреляционного анализа связь между шириной годичных колец и температурой воздуха находится в диапазоне от $-0,2$ до $0,2$ при $p < 0,01$. Можно лишь выделить небольшие всплески откликов НБ-С на температуру воздуха в зимний период предыдущего и текущего годов на уровне $0,3$ при $p < 0,05$. Отклик лиственницы и сосны на осадки (МА-Л, НБ-Л и МА-С) с r от $0,3$ до $0,45$ при $p < 0,05$ проявляется в августе и июне–августе предыдущего года (сезон максимума среднемесячных осадков). Количество сухих годов составило 22 (25 %) и влажных – 20 (22 %) за период 1929–2018 гг.

Предполагаем, что на исследуемых лесных территориях температура воздуха может стать ограничивающим фактором, способным влиять негативно влиять на сумму осадков, вызывая засушливые периоды. В результате древесные виды могут испытывать недостаток влаги. В основном деревья получают почвенную влагу за счет ее инфильтрации из осадков, которые выпадают в июне–августе предыдущего года, и аккумуляции в сезонно-талом слое мерзлоты. В целом наблюдается снижение радиального роста лиственницы и сосны в ответ на повышение температуры воздуха у поверхности земли. С одной стороны, это свидетельствует о том, что радиальный рост лиственницы и сосны снижается, с другой – древесные виды адаптируются к изменяющимся климатическим условиям в центральной части Якутии.

В будущем авторы планируют провести комплексное исследование, в котором сравнят влияние климата на радиальный рост различных видов деревьев, произрастающих на разных участках (в разных районах). В ходе исследования будут учитываться не только биотические, но и абиотические факторы под влиянием эндогенных и экзогенных процессов.

Список литературы / References

1. Doloisio N., Vanderlinden J.-P. The perception of permafrost thaw in the Sakha Republic (Russia): Narratives, culture and risk in the face of climate change. *Polar Science*. 2020;26:100589. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2020.100589>.
2. Ford J.D., Pearce T., Canosa I.V., et al. The rapidly changing Arctic and its societal implications. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*. 2021;12(6):e735. <https://doi.org/10.1002/wcc.735>.
3. Gustafson T. *Klimat: Russia in the Age of Climate Change*. Harvard University Press; 2021:336. <https://doi.org/10.1080/09644016.2022.2123968>.
4. Pearl J.K., Keck J.R., Tintor W., et al. New frontiers in tree-ring research. *Holocene*. 2020;30(6):923–941. <https://doi.org/10.1177/0959683620902230>.
5. Lehmann M.M., Vitali V., Schuler P., et al. More than climate: Hydrogen isotope ratios in tree rings as novel plant physiological indicator for stress conditions. *Dendrochronologia*. 2021;65:125788. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125788>.
6. Decuyper M., Chavez R.O., Cufar K., et al. Spatiotemporal assessment of beech growth in relation to climate extremes in Slovenia—An integrated approach using remote sensing and tree-ring data. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2020;287:107925. <https://doi.org/10.1016/j.agrfor.2020.107925>.
7. Szejner P., Belmecheri S., Ehleringer J.R., et al. Recent increases in drought frequency cause observed multi-year drought legacies in the tree rings of semi-arid forests. *Oecologia*. 2020;192(1):241–259. <https://doi.org/10.1007/s00442-019-04550-6>.
8. Buntgen U., Allen K., Anchukaitis K.J., et al. The influence of decision-making in tree ring-based climate reconstructions. *Nature communications*. 2021;12(1):3411. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23627-6>.
9. Devi N.M., Kukarskih V.V., Galimova A.A., et al. Climate change evidence in tree growth and stand productivity at the upper treeline ecotone in the Polar Ural Mountains. *Forest Ecosystems*. 2020;7(1):1–16. <https://doi.org/10.1186/s40663-020-0216-9>.
10. Федоров П.П., Десяткин А.Р. Связь температурного режима мерзлотных почв и радиального прироста лиственницы в Центральной Якутии. *Успехи современного естествознания*. 2016;(7):185–189.
11. Федоров П.П., Десяткин А.Р. Relationship Between Temperature Regime of Permafrost Soils and Radial Growth of Larch in Central Yakutia. *Advances in Current Natural Sciences*. 2016;(7):185–189. (In Russ.)
12. Kirdeyanov A.V., Saurer M., Siegwolf R., et al. Long-term ecological consequences of forest fires in the continuous permafrost zone of Siberia. *Environmental Research Letters*. 2020;15(3):034061. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab7469>.
12. Николаев А.Н., Федоров П.П. Влияние климатических факторов и термического режима мерзлотных

- почв Центральной Якутии на радиальный прирост лиственницы и сосны. *Лесоведение*. 2004;(6):3–13.
- Nikolaev A.N., Fedorov P.P. Influence of Climate Factors and Thermal Regime of Permafrost Soils in Central Yakutia on the Radial Growth of Larch and Pine. *Forestry Studies*. 2004;(6):3–13. (In Russ.)
13. Nikolaev A.N., Fedorov P.P., Desyatkin A.R. Influence of climate and soil hydrothermal regime on radial growth of *Larix cajanderi* and *Pinus sylvestris* in central Yakutia, Russia. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 2009;24(3):217–226. <https://doi.org/10.1080/02827580902971181>.
14. Nikolaev A.N., Fedorov P.P., Desyatkin A.R. Effect of Hydrothermal Conditions of Permafrost Soil on Radial Growth of Larch and Pine in Central Yakutia. *Contemporary Problems of Ecology*. 2011;4(2):140–149. <https://doi.org/10.1134/S1995425511020044>.
15. Колмогоров А.И., Крузе Ш., Николаев А.Н. и др. Дендроклиматические исследования лиственницы Каяндера на территории бассейна реки Омолой. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(4):584–594. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-4-584-594>.
- Kolmogorov A.I., Kruse S., Nikolaev A.N., et al. Dendroclimatic studies of *Larix cajanderi* Mayr. in the Omoloy River Basin. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(4):584–594. (In Russ.). <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-4-584-594>.
16. Arzac A., Tychkov I.I., Rubtsov A., et al. Phenological shifts compensate warming-induced drought stress in southern Siberian Scots pines. *European Journal of Forest Research*. 2021;140:1487–1498. <https://doi.org/10.1007/s10342-021-01412-w>.
17. Arzac A., de Quijano D.D., Khotcinskaia K.I., et al. The buffering effect of the Lake Baikal on climate impact on *Pinus sylvestris* L. radial growth. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2022;313:108764. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108764>.
18. Arzac A., Tabakova M.A., Khotcinskaia K., et al. Linking tree growth and intra-annual density fluctuations to climate in suppressed and dominant *Pinus sylvestris* L. trees in the forest-steppe of Southern Siberia. *Dendrochronologia*. 2021;67:125842. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2021.125842>.
19. Николаев А.Н., Исаев А.П., Федоров П.П. Радиальный прирост лиственницы в Центральной Якутии в связи с изменением климата за последние 120 лет. *Экология*. 2011;(4):243–250.
- Nikolaev A.N., Isaev A.P., Fedorov P.P. Radial Growth of Larch in Central Yakutia in Relation to Climate Change Over the Last 120 Years. *Ecology*. 2011;(4):243–250. (In Russ.)
20. Zhirmova D.F., Belokopytova L.V., Meko D.M., et al. Climate change and tree growth in the Khakass-Minusinsk Depression (South Siberia) impacted by large water reservoirs. *Scientific reports*. 2021;11(1):14266. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93745-0>.
21. Khotcinskaia K.I., Sergeeva O.V., Kirdeyanov A.V., et al. Climatic Response of Radial Growth of *Larix cajanderi* in Northern and Central Yakutia. *Moscow University Biological Sciences Bulletin*, 2024;79(2): 94–100.
22. Arzac A., Popkova M., Anarbekova A., et al. Increasing radial and latewood growth rates of *Larix cajanderi* Mayr. and *Pinus sylvestris* L. in the continuous permafrost zone in Central Yakutia (Russia). *Annals of Forest Science*. 2019;76: 1–15.
23. Esper J., Frank D.C., Buntgen U., et al. Trends and uncertainties in Siberian indicators of 20th century warming. *Global Change Biology*. 2010;16:386–398. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01913.x>.
24. Чжан С. Характеристики и реакция радиального прироста деревьев в Центральной Якутии на изменения климата. *Проблемы региональной экологии*. 2024;(3):16–21. <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2024-3-16-21>.
- Zhang X. Characteristics and response of radial growth of trees in Central Yakutia to climate change. *Regional Environmental Issues*. 2024;(3):16–21. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2024-3-16-21>.
25. Rinn F. TSAP-Win: Time series analysis and presentation for dendrochronology and 409 related applications. *User reference, Heidelberg*. 2003. Available at: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1572543024876591616> (accessed: 10.11.2024).
26. Heeter K.J., Harley G.L., Maxwell J.T., et al. Summer temperature variability since 1730 CE across the low-to-mid latitudes of western North America from a tree ring blue intensity network. *Quaternary Science Reviews*. 2021;267:107064. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.107064>.
27. Grissino-Mayer H.D. Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHEA. *Tree-ring Research*. 2001;57(2):205–221.
28. R Core Team (2022) R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. Available at: <https://www.R-project.org> (accessed 10.11.2024).
29. Bunn A.G. A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia*. 2008;26(2):115–124. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2008.01.002>.
30. Zang C., Blondi F. Treeclim: An R package for the numerical calibration of proxy-climate relationships. *Ecography*. 2015;38(4):431–436. <https://doi.org/10.1111/ecog.01335>.
31. Vicente-Serrano S.M., Begueria S., Lorez-Moreno J.I. A multi-scalar drought index sensitive to global warming: the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*. 2010;23:1696–1718.
32. Zhang X.H., Nikolaev A.N., Kolmogorov A.I., et al. The Influence of Hydrothermal Moistening on the Radial Growth of Larch in Central Yakutia. *Moscow University Biological Sciences Bulletin*. 2024;79(2):101–106. <https://doi.org/10.3103/S0096392524600911>.

Об авторах

ЧЖАН Сяохун, ведущий инженер, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0003-9957-0002>, SPIN: 7479-2722, e-mail: z461306425@gmail.com

НИКОЛАЕВ Анатолий Николаевич, доктор биологических наук, ректор, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0003-2270-2049>, ResearcherID: ABI-1877-2020, Scopus Author ID: 24074502400, SPIN: 1395-4360, e-mail: rector@s-vfu.ru

АРСАК Альберто, кандидат биологических наук, доцент, руководитель лаборатории, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-3361-5349>, ResearcherID: F-1400-2016, Scopus Author ID: 55550541400, SPIN: 6023-6939, e-mail: aarzak@sfu-kras.ru

КОЛМОГОРОВ Алексей Иванович, научный сотрудник, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация; младший научный сотрудник, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-3688-7753>, Scopus Author ID: 1032714, e-mail: ai.kolmogorov@s-vfu.ru

ВАСИЛЬЕВ Михаил Семенович, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-0542-9813>, ResearcherID: AAY-5159-2020, Scopus Author ID: 56513537700, SPIN: 3954-6428, e-mail: vms_1984@mail.ru

ПЕСТРЯКОВА Людмила Агафьевна, доктор географических наук, главный научный сотрудник, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-5347-4478>, ResearcherID: Q-9900-2016, Scopus Author ID: 18434936500, SPIN: 8323-7283, e-mail: lapest@mail.ru

Вклад авторов

Чжан Сяохун – разработка концепции, методология, проведение исследования, верификация данных, создание черновика и редактирование рукописи; **Николаев А.Н.** – руководство исследованием, администрирование проекта, получение финансирования; **Арсак А.** – разработка концепции, редактирование рукописи; **Колмогоров А.И.** – проведение статистического анализа и редактирование рукописи; **Васильев М.С.** – редактирование рукописи, методология, визуализация; **Пестрякова Л.А.** – руководство исследованием, администрирование проекта, получение финансирования, разработка концепции, методология, проведение исследования, верификация данных, создание черновика и редактирование рукописи

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

ZHANG, Xiaohong, Leading Engineer, Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0003-9957-0002>, SPIN: 7479-2722, e-mail: z461306425@gmail.com

NIKOLAEV, Anatoly Nikolaevich, Dr. Sci. (Biol.), Rector, Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-2270-2049>, ResearcherID: ABI-1877-2020, Scopus Author ID: 24074502400, SPIN: 1395-4360, e-mail: rector@s-vfu.ru

ARZAC, Alberto, Cand. Sci. (Biol.), Associate Professor, Head of Laboratory, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-3361-5349>, ResearcherID: F-1400-2016, Scopus Author ID: 55550541400, SPIN: 6023-6939, e-mail: aarzak@sfu-kras.ru

KOLMOGOROV, Alexey Ivanovich, Researcher, Institute of Natural Sciences, Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation; Junior Researcher, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-3688-7753>, Scopus Author ID: 1032714, e-mail: ai.kolmogorov@s-vfu.ru

VASILIEV, Mikhail Semenovich, Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher, Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-0542-9813>, ResearcherID: AAY-5159-2020, Scopus Author ID: 56513537700, SPIN: 3954-6428, e-mail: vms_1984@mail.ru

PESTRYAKOVA, Lyudmila Agafyevna, Dr. Sci. (Geogr.), Chief Researcher, Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-5347-4478>, ResearcherID: Q-9900-2016, Scopus Author ID: 18434936500, SPIN: 8323-7283, e-mail: lapest@mail.ru

Authors' contribution

Zhang Xiaohong – conceptualization, methodology, investigation, validation, writing – original draft, writing – review & editing; **Nikolaev A.N.** – supervision, project administration, funding acquisition; **Arzac A.** – conceptualization, writing –

Чжан Сяохун и др. • Климатический отклик радиального роста лиственницы Каяндера и сосны обыкновенной...

review & editing; **Kolmogorov A.I.** – formal analysis, writing – review & editing; **Vasiliev M.S.** – writing – review & editing, methodology, visualization; **Pestryakova L.A.** – supervision, project administration, funding acquisition, conceptualization, methodology, investigation, validation, writing – original draft, writing – review & editing.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 04.01.2025

Поступила после рецензирования / Revised 27.01.2025

Принята к публикации / Accepted 04.02.2025