

ОРИГИНАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ



УДК 581.54

Влияние гидротермических условий увлажнения на радиальный прирост лиственницы в Центральной Якутии**С. Чжан^{1, *} , А.Н. Николаев¹ , А.И. Колмогоров¹ ,
М.С. Васильев² , Л.А. Пестрякова¹ **¹Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, Россия, 677000, г. Якутск, ул. Беллинского, д. 58;²Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова, Сибирское отделение Российской академии наук, Россия, 677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, д. 36

*e-mail: z461306425@gmail.com

Проведены дендрохронологические исследования лиственницы Каяндера (*Larix cajanderi* Mayr) на трех участках в районе села Табага (центральная часть Якутии, Россия), и созданы хронологии по ширине годовых колец. Участки охарактеризованы как лиственнично-березовый бруснично-разнотравный тип леса. Собрано более 20 образцов из каждого участка — 73 керны. Применена следующая методика: выбор так называемых «реперных годов», т.е. годов, когда большинство деревьев имеют самые узкие или широкие годовые кольца. Выявлена связь ширины годовых колец лиственниц с гидротермическим коэффициентом Селянинова. С помощью дендроклиматического анализа установлена связь между гидротермическими условиями Центральной Якутии в августе месяце за период 1920–2018 гг. и радиальным приростом лиственниц. Мы полагаем, что в Сибири наблюдается проявление широтной зависимости между гидротермическими условиями и радиальным приростом лиственниц на фоне климатических изменений и иных геофизических факторов.

Ключевые слова: лиственница Каяндера, хронология ширины годовых колец, реперные годы, климат, температура воздуха, осадки, гидротермические условия

DOI: 10.55959/MSU0137-0952-16-79-2-7

Введение

Дендрохронология является наукой, основанной на экологии растений, изучающей влияние окружающей среды на рост годовых колец деревьев с целью получения данных и реконструкции исторической изменчивости экологических факторов. Данные о годовых кольцах деревьев обладают широким географическим охватом, точностью датирования, непрерывностью и широко используются научным сообществом. Исследования климатических откликов с использованием годовых колец деревьев наиболее эффективно в засушливых, полусушливых или холодных регионах. Район Табага, расположенный на юге от г. Якутска (Центральная Якутия), характеризуется засушливым и/или полусушливым климатом, что приводит к чувствительности роста деревьев к климатическим изменениям [1–6]. Исследования годовых колец деревьев в этом районе и его окрестностях проводились ранее [7–11], однако специальных дендрохронологических исследований в районе Табага проведено не было.

На фоне многолетней тенденции изменения климата к потеплению в Якутии и ее центральной

части можно предположить, что существует отрицательный отклик (снижение) радиального прироста лиственницы на повышение температуры приземного слоя атмосферы [12, 13]. Данный факт, с одной стороны, может свидетельствовать об адаптации лиственницы в районе исследования к изменяющемуся климату (повышение температуры воздуха), с другой — указывает на снижение лимитирующих факторов, что приводит к уменьшению чувствительности деревьев.

Целью работы стало выявление особенностей хронологии стандартизированной ширины годовых колец лиственницы Каяндера (*Larix cajanderi* Mayr) трех участков района села Табага (центральная часть Якутии) и реакции древостоев на изменения параметров климата (температура воздуха, осадки, гидротермические условия).

Материалы и методы

Материал для дендрохронологического исследования был собран на территории Табагинского мыса, южнее г. Якутска (рис. 1А). В качестве модельного объекта использованы древесные образцы лиственницы Каяндера (*L. cajanderi*). Образцы

собраны в июне 2023 г. с помощью возрастного бура (Пресслера) диаметром 5 мм на высоте 1,3 м (рис. 1Б) с трех близкорасположенных участков: Т1 – Табага-1, Т2 – Табага-2 и Т3 – Табага-3. Участки расположены на левом берегу реки Лены на высоте от 199 до 235 м над уровнем моря. Расстояние участков от метеостанции «Якутск» (62°1' с.ш.; 129°43' в.д.) ~24 км, от реки Лены – 0,47–1,83 км. Все три участка были охарактеризованы как лиственнично-березовый бруснично-разнотравный тип леса. Участки Т1 (вблизи реки Лены с густой растительностью из молодых деревьев) и Т3 (дальний участок от реки Лены на северном склоне) находятся на склонах, за исключением Т2 – равнина на вершине Табагинского мыса

между заброшенными сельскохозяйственными угодьями. На всех участках присутствуют следы пожаров и рубок леса.

С каждого участка собрано более 20 образцов (табл. 1) – 73 керны. Древесные керны были высушены в камеральных условиях, вклеены в деревянную подложку, поверхность очищена скальпелем. Измерения ширины колец проводились на устройстве LINTAB-6 (Rinntech, Германия) с использованием программы TSAPWin (точность до 0,01 мм) [14]. Качество датировки образцов проверялось при помощи специализированной программы COFECNA (компьютерная программа, написанная на языке ANSI Fortran-77 Ричардом Л. Холмсом из Университета Аризоны, США) [15].

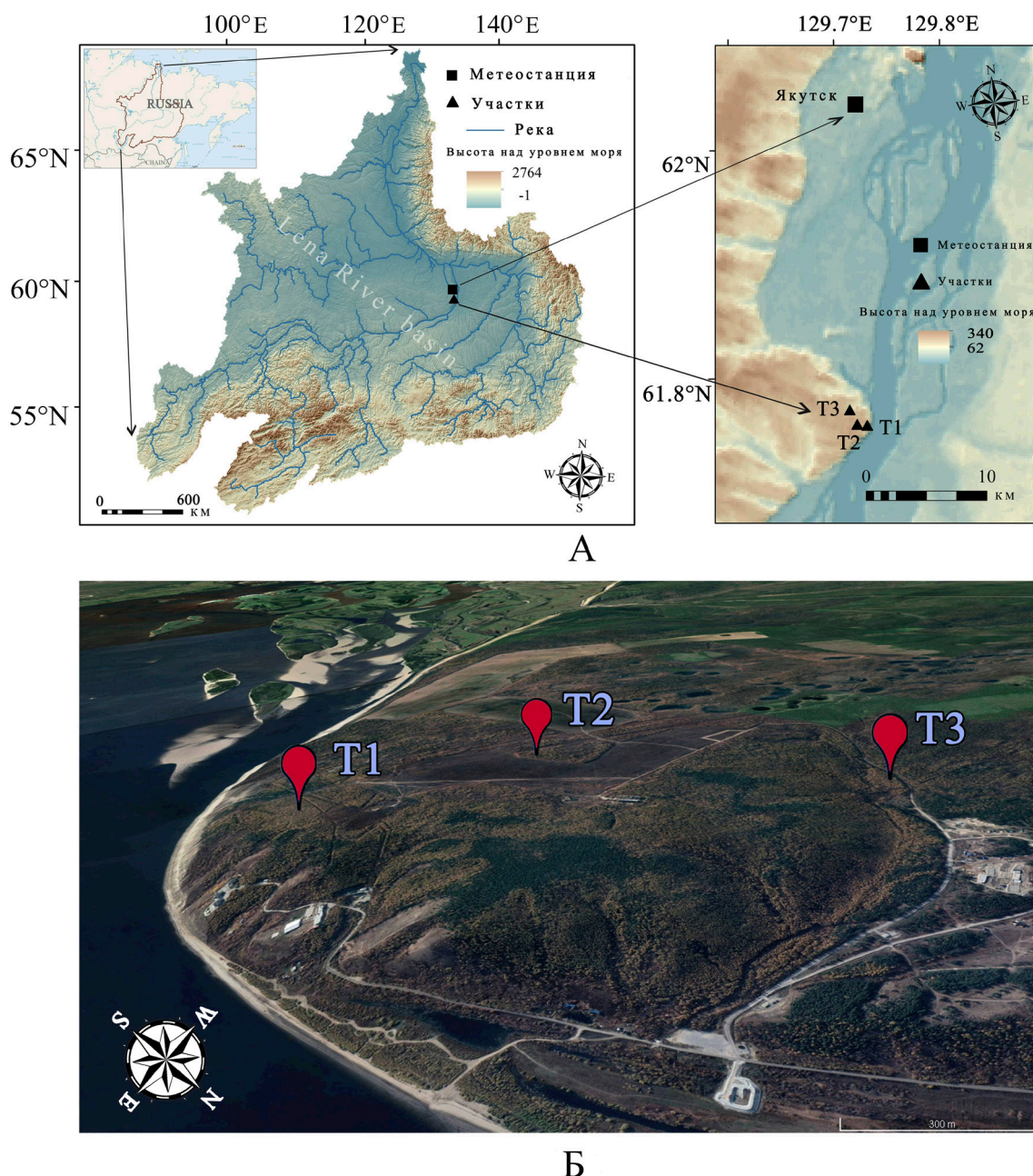


Рис. 1. (А) Местоположение участков исследования (черные треугольники) и метеорологической станции (черный квадрат). (Б) Расположения участков исследования на территории Табагинского мыса.

Для извлечения климатического сигнала, влияющего на ширину годовых колец, была выполнена стандартизация (индексирование) с использованием метода отрицательной экспоненциальной функции. Стандартизация и анализ статистических параметров характеристик древостоя выполнены в программном обеспечении R (версия 4.2.2) [16] с использованием специализированных пакетов *dplR* [17] и *treeclim* [18].

Для анализа связи радиального прироста деревьев с абиотическими факторами привлечены данные метеостанции «Якутск» – температура воздуха, осадки. Так как прямой статистический анализ связи (расчет коэффициента корреляции) может быть неудовлетворительным или свидетельствующим о сдвиге по времени, привлечен гидротермический коэффициент (ГТК) – характеристика уровня влагообеспеченности территории:

$$ГТК = \frac{\sum R}{\sum T} \cdot 10,$$

где $\sum R$ – сумма осадков (мм) за вегетационный период, $\sum T$ – сумма активных температур (показатель количества тепла – сумма средних суточных температур воздуха или почвы, превышающая порог 0, 5, 10°C или биологический минимум, необходимый для развития определенного растения) за тот же период. Величины ГТК: 1 – указывает на сбалансированность прихода и расхода влаги; $0,5 \leq ГТК \leq 1$ – засушливо, недостаточно влажно; $ГТК < 0,5$ – очень засушливо.

Результаты и обсуждение

Климат данного региона резко континентальный, с большой амплитудой температуры воздуха для холодного и теплого периода. По данным метеостанции «Якутск» среднегодовая температура

за период 1920–2022 гг. составила $-9,7^\circ\text{C}$, средняя летняя (июнь–август) $+16,6^\circ\text{C}$, а среднегодовое количество осадков 234 мм.

Сезонные колебания температур воздуха на всех участках велики (рис. 2А) и варьируют от экстремально низких зимних средних значений ($-41,2^\circ\text{C}$ в январе) до относительно теплых летних ($+19,0^\circ\text{C}$ в июле), с разницей в средней температуре января и июля более 60°C . Температура в зимний период с октября по апрель следующего года остается ниже точки замерзания. Температура поддерживается на положительном уровне в период с мая по август.

Распределение температур в данном регионе имеет выраженные сезонные особенности: зимой крайне холодно, летом – тепло. Зимние температуры подвержены значительным колебаниям, летние – относительно стабильны. Следовательно, длинная зима и короткое лето указывают на недолгий период накопления тепла в этом районе.

Данные об осадках указывают на вариабельность годовых сумм (рис. 2Б). С июня по август наблюдается значительное увеличение количества суммарных осадков, достигающего пика за год. Максимальное количество осадков приходится на август, что значительно превышает другие месяцы. Минимальное количество осадков наблюдается в марте. «Сухой сезон» длится с конца зимы до начала весны.

Количество индивидуальных хронологий варьирует от 21 (Т1) до 29 (Т3), а длительность (годы) анализируемых по ширине годовых колец от 101 (Т1) до 164 (Т3). Информация о статистических параметрах дендрохронологии лиственниц приведена в табл. 1. Возраст особей лиственницы на участках Т1 и Т2 в целом ниже (самое молодое дерево – 61 г.), чем на Т3 (возраст от 80 до 163 лет).

Таблица 1

Характеристики древостоя и статистические параметры хронологий ширины годовых колец

	Т1 1917–2018 гг.	Т2 1916–2021 гг.	Т3 1858–2022 гг.
Общие сведения			
Высота над уровнем моря, м	216	235	199
Расстояние до метеостанции Якутска, км	25,63	25,41	24,50
Расстояние до реки Лены, км	0,47	1,4	1,83
Характеристики древостоя и статистические параметры			
Количество индивидуальных серий, шт.	21	23	29
Длительность хронологий, годы	101	105	164
Средняя окружность ствола лиственницы, см (высота древостоя, м)	47 (8,4)	60,7 (8,8)	64,2 (10)
Средняя ширина годовых колец лиственницы, мм (\pm стандартное отклонение)	$0,592 \pm 0,490$	$0,789 \pm 0,403$	$0,707 \pm 0,409$
Коэффициент автокорреляции 1-го порядка	0,754	0,753	0,773
Межсерийный коэффициент корреляции	0,754	0,547	0,761
Коэффициент чувствительности	0,311	0,307	0,345
Выраженный популяционный сигнал	0,985	0,965	0,989
Отношение сигнала к шуму	64,525	27,811	92,46

На участке Т2 выявлена наибольшая средняя ширина годичных колец (0,789 мм). На участке Т1 наименьшая средняя ширина годичных колец (0,592 мм), что, возможно, свидетельствует о неблагоприятных условиях, ограничивающих рост деревьев. Показатели стандартных отклонений средней ширины годичных колец на всех участках близки – степень изменчивости данной величины не сильно отличается.

Радиальный прирост лиственницы на исследуемых участках текущего года связан с шириной годичных колец предыдущего, о чем свидетельствует средний коэффициент (от 0,753 – Т2 до 0,773 – Т3) автокорреляции первого порядка для неиндексированных индивидуальных хронологий.

Вычисление среднего межсерийного коэффициента корреляции показало высокую согласованность между образцами Т1 и Т3 свыше 0,7.

Выраженный популяционный сигнал на всех участках выше общепринятого порога – 0,850. Данный факт позволяет охарактеризовать анализируемые хронологии образцов как достоверные для проведения дендроклиматического исследования. Отношение сигнала к шуму на участке Т3 равно 92,46 указывает на то, что эта группа данных наиболее надежно отражает отклик на климатические изменения.

Высокие значения коэффициента чувствительности (показатель, отражающий индекс ширины годичных колец и отклик лиственниц на климатические изменения) указывают на влияние климатических параметров. Например, на участке Т3 средний показатель коэффициента чувствительности равен 0,345, что свидетельствует о выраженной реакции лиственниц на климатические изменения.

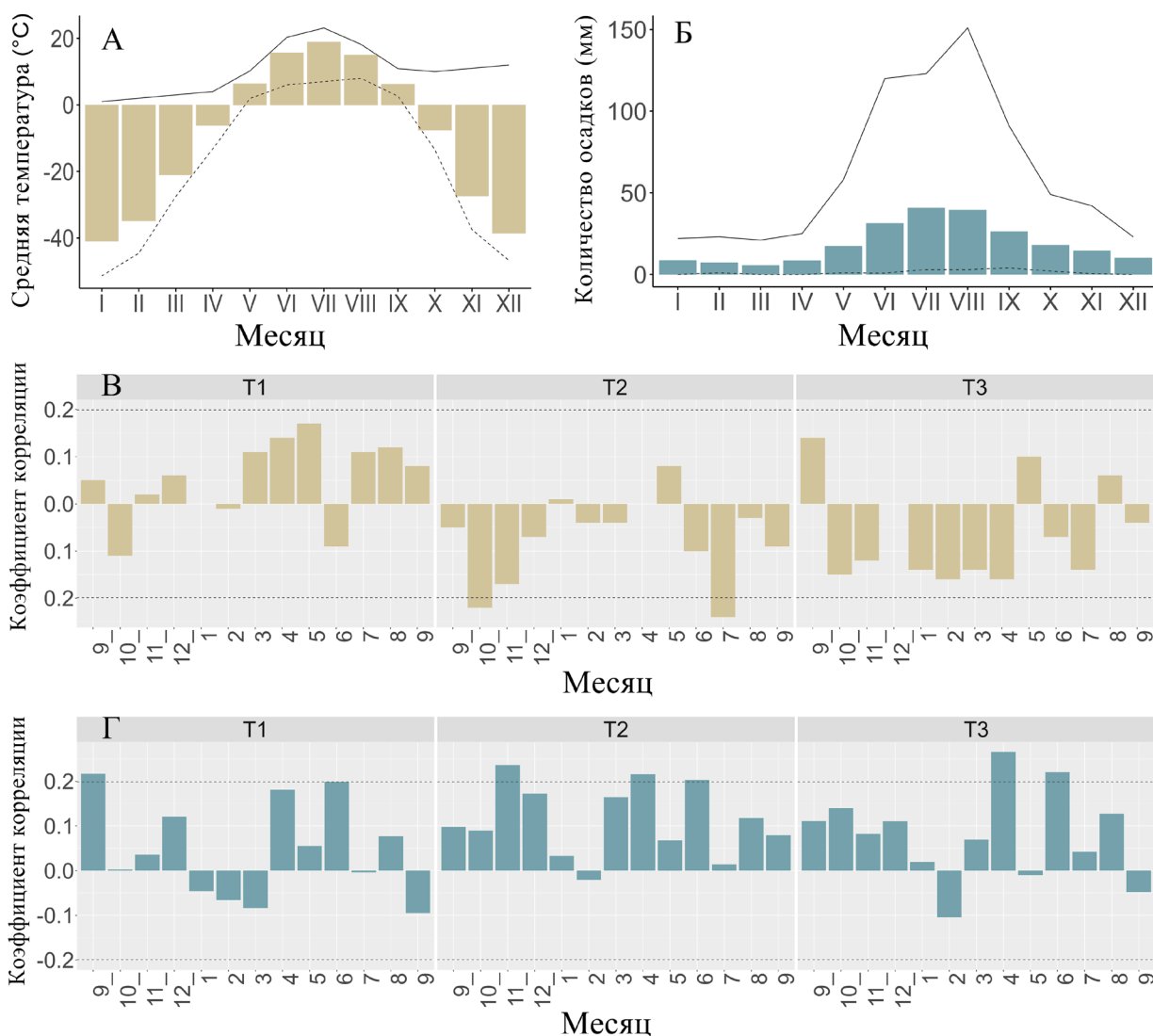


Рис. 2. (А) Среднемесячная температура воздуха и (Б) среднемесячное количество осадков за период с 1883 по 2022 гг. На графике сплошной линией отображены изменения максимальной температуры и максимального количества осадка, пунктирной линией – изменения минимальной температуры. (В) Корреляционный анализ радиального прироста деревьев с температурой воздуха и (Г) с количеством атмосферных осадков за общий период с 1920 по 2018 гг. По оси абсцисс обозначены месяцы предыдущего (–1) и текущего года. Линией указан значимый предел при $p < 0,05$.

Таблица 2

Количество «реперных годов» на исследуемых участках

1920–2018 гг.	T1	T2	T3
Общее количество положительных «реперных годов»	65	65	64
Общее количество отрицательных «реперных годов»	68	66	71
Количество положительных «реперных годов» свыше 50% выборки данных	12	20	20
Количество отрицательных «реперных годов» свыше 50% выборки данных	16	17	20

Результат дендроклиматического анализа (рис. 2Г) на всех участках связи между радиальным приростом деревьев с абиотическими факторами показал следующие коэффициенты корреляции с осадками в июне (от $r = 0,199$ для T1 до $r = 0,221$ для T3 при $p < 0,05$), с осадками в апреле для T2 ($r = 0,201$) и для T3 ($r = 0,265$). Проведенный анализ указывает на влияние прошлогодних осенних осадков на рост лиственницы на участке T1 ($r = 0,215$ при $p < 0,05$) и зимних осадков (в ноябре) на участке T2 ($r = 0,236$). Влияние температуры воздуха (рис. 2В) отмечено на участке T2 в июле ($r = -0,24$ при $p < 0,05$) и октябре прошлого года ($r = -0,22$).

В целом при прямом корреляционном анализе среднемесячных значений между радиальным приростом деревьев с абиотическими факторами (температура воздуха, осадки) мы наблюдаем значения не более 0,3 ($p < 0,05$). В связи с этим применен иной подход анализа связи ширины годичных колец с величинами ГТК. За период 1920–2018 гг. были выбраны так называемые «реперные годы», т.е. годы, когда большинство деревьев имели самые узкие или, наоборот, широкие годичные кольца [19]. Положительные и отрицательные «реперные годы» указывают на широкие (благоприятные условия роста древостоя) и узкие кольца лиственницы соответственно. Для выявления положительных и отрицательных «реперных годов» был использован пакет «pointRes» [20] для языка R (версия 4.2.2) с применением метода «скользящего окна» – оптимизация выделения «реперных годов». За исследуемый период выделены две группы, в которых процент положительных и отрицательных «реперных годов» (событий) превышает 50% выборки данных (для выявления наиболее узких и широких годичных колец) от анализируемого материала (табл. 2). Далее проведен расчет корреляции между среднемесячными значениями ГТК и шириной годичных колец по «реперным годам». Отличие средней окружности ствола и ширины годичных колец (табл. 1) на участке T1 от этих показателей для T2 и T3 может быть объяснено более молодым возрастом древостоя, а также наличием склона со смытой неглубокой почвой в условиях неустойчивого увлажнения в начале (май) и середине (июнь-июль) вегетационного периода.

В целом за вегетационный период (июнь-сентябрь) наблюдается связь между гидротермическим

условием в центральной части Якутии (район села Табага) с шириной годичных колец лиственницы на исследуемых участках. Например, в июне коэффициент корреляции ГТК с шириной годичных колец при отрицательных «реперных годах» для T3 составляет $r = 0,26$ ($p < 0,05$), а доля лет с ГТК $< 0,5$ (очень засушливо) – 50% выборки данных. В августе коэффициент корреляции при отрицательных «реперных годах», превышающих 50% выборки данных для T3, составляет 0,5 ($p < 0,05$), а доля лет с ГТК $< 0,5$ – 40%. Коэффициент корреляции в августе для T1 при отрицательных «реперных годах», превышающих 50% выборки данных, составляет 0,57 ($p < 0,05$), а доля лет с ГТК $< 0,5$ – 40%.

Ранее было показано [19], что на юге Сибири (Республика Хакасия и юг Красноярского края) гидротермические условия в мае месяце проявляются в большей степени на радиальном приросте лиственниц. Таким образом, мы предполагаем, что в Сибири проявляется широтная зависимость между гидротермическими условиями и радиальным приростом лиственниц на фоне климатических изменений и иных геофизических факторов.

Закключение

Дендрохронологические исследования в районе села Табага указывают на высокий уровень стабильности и надежности лиственницы как модельного объекта для изучения характеристик древостоя под влиянием изменяющегося климата. Установлена наибольшая средняя ширина годичных колец на участке T2 (равнина на вершине Табагинского мыса) – 0,789 мм, что в целом может указывать на наилучшие условия роста для лиственниц.

В августе месяце за период 1920–2018 гг. выявлено, что коэффициент корреляции при отрицательных «реперных годах», превышающих 50% выборки данных для T3, составляет 0,5 ($p < 0,05$), а доля лет с ГТК $< 0,5$ (очень засушливо) – 40%. Коэффициент корреляции для T1 при отрицательных «реперных годах», превышающих 50% выборки данных, составляет 0,57 ($p < 0,05$), а доля лет с ГТК $< 0,5$ – 40%.

Авторы планируют проведение дополнительных научных изысканий на модельном объекте (район села Табага) с привлечением иных абиотических факторов неживой природы и анализа лиственницы Каяндера (*L. cajanderi*) в Северной и Южной Якутии.

Работа выполнена в рамках научного проекта государственного задания Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова № FSRG-2023-0027 и базового бюджетного проекта Института мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН №FUFU-2021-0003. Исследования проводили без использования животных и привлечения людей в качестве испытуемых. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhang Z. Tree-rings, a key ecological indicator of environment and climate change. *Ecol. Indic.* 2015;51:107–116.
2. Camarero J.J., Valeriano C., Gazol A., Colangelo M., Sanchez-Salguero R. Climate differently impacts the growth of coexisting trees and shrubs under semi-arid mediterranean conditions. *Forests.* 2021;12(3):381.
3. He M., Yang B., Rossi S., Brauning A., Shishov V., Kang S. Simulated and predicted responses of tree stem radial growth to climate change – A case study in semi-arid north central China. *Dendrochronologia.* 2019;58:125632.
4. Szejner P., Belmecheri S., Ehleringer J.R., Monson R.K. 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.
5. Gavrilov M.B., An W., Xu C., Radakovic M.G., Hao Q., Yang F., Guo Z., Peric Z., Gavrilov G., Marcovic S.B. Independent aridity and drought pieces of evidence based on meteorological data and tree ring data in Southeast Banat, Vojvodina, Serbia. *J. Atmos.* 2019;10(10):586.
6. Opala-Owczarek M., Niedzwiedz T. Last 1100 yr of precipitation variability in western central Asia as revealed by tree-ring data from the Pamir-Alay. *Quat. Res.* 2019;91(1):81–95.
7. 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;18(2):189–201.
8. 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.
9. Федоров П.П., Десяткин А.Р. Связь температурного режима мерзлотных почв и радиального прироста лиственницы в Центральной Якутии. *Усп. совр. естест.* 2016;(7):185–189.
10. 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.
11. 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. *Scand. J. For. Res.* 2009;24(3):217–226.
12. Горохов А.Н., Федоров А.Н. Современные тенденции изменения климата в Якутии. *Геогр. природ. рес.* 2018;(2):111–119.
13. Desyatkin A., Fedorov P., Filippov N., Desyatkin R. Climate change and Its influence on the active layer depth in Central Yakutia. *Land.* 2020;10(1):3.
14. Rinn F. TSAP-Win: Time series analysis and presentation for dendrochronology and 409 related applications. User reference, Heidelberg, 2003. URL: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1572543024876591616> (дата обращения: 30.07.2024).
15. Grissino-Mayer H.D. Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECOA. *Tree-ring Res.* 2001;57(2):205–221.
16. R Core Team (2022) R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. URL: <https://www.R-project.org> (дата обращения: 30.07.2024).
17. Bunn A.G. A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia.* 2008;26(2):115–124.
18. Zang C., Blouin F. Treeclim: An R package for the numerical calibration of proxy-climate relationships. *Ecography.* 2015;38(4):431–436.
19. Бабушкина Е.А., Белокопытова Л.В. Климатический сигнал в радиальном приросте хвойных в лесостепи юга Сибири и его зависимость от локальных условий местопроизрастания. *Экология.* 2014;(5):323–323.
20. Van der Maaten-Theunissen, Van der Maaten E, Bouriaud O. PointRes: An R package to analyze pointer years and components of resilience. *Dendrochronologia.* 2015;35:34–38.

Поступила в редакцию 16.03.2024

После доработки 13.05.2024

Принята в печать 25.07.2024

RESEARCH ARTICLE

The influence of hydrothermal moistening on the radial growth of larch in Central Yakutia

X. Zhang^{1,*} , A.N. Nikolaev¹ , A.I. Kolmogorov¹ , M.S. Vasiliev² , L.A. Pestryakova¹ 

¹North-Eastern Federal University, Belinsky St., 58, Yakutsk, 677000, Russia;

²Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Merzlotnaya St., 36, Yakutsk, 677010, Russia

*e-mail: z461306425@gmail.com

Dendrochronological assessments were conducted on larch samples across three sites within the Tabaga region (central part of Yakutia, Russia), resulting in the creation of a tree-ring width database. The plots are characterized by larch-birch lingonberry-forb forest type. More than 20 samples were collected from each plot – 73 cores. The methodology involved the selection of “reference years” – years in which the majority of trees demonstrated the narrowest or widest growth rings. A correlation between the width of larch tree rings and the Selyaninov

hydrothermal coefficient was identified. Analysis of the comprehensive statistical data set from site T3 established a relationship between the hydrothermal conditions in Central Yakutia during August and the radial growth of larch trees over the period of 1920–2018. It is hypothesized that there is a latitudinal dependency of radial growth on hydrothermal conditions among larch trees in the Northern Hemisphere, in light of climate change and other geophysical factors.

Keywords: *larch Cajanderi, tree-ring width chronology, reference years, climate, air temperature, precipitation, hydrothermal moistening*

Funding: The research was carried out as part of the scientific project of the state task of M.K. Ammosov North-Eastern Federal University № FSRG-2023-0027 and the basic budget project P.I. Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Science No. FUFU-2021-0003.

Сведения об авторах

Чжан Сяохун – ведущий инженер Института естественных наук Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова. Тел.: 8-4112-36-15-18; e-mail: z461306425@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9957-0002>

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

Колмогоров Алексей Иванович – науч. сотр. Института естественных наук Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова. Тел.: 8-4112-36-15-18; e-mail: ai.kolmogorov@s-vfu.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3688-7753>

Васильев Михаил Семенович – канд. геогр. наук, доц. Института естественных наук Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова; ст. науч. сотр. Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН. Тел.: 8-4112-39-08-87; e-mail: vms_1984@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0542-9813>

Пестрякова Людмила Агафьевна – докт. геогр. наук, гл. науч. сотр. Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова. Тел.: 8-4112-36-15-18; e-mail: lapest@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5347-4478>