

Научная статья

УДК 551.583.4

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-4-35-49

Радialный прирост лиственницы даурской (*Lárix dahúrica* Turcz.) в условиях Станового нагорья

И.Л. Вахнина¹✉, канд. биол. наук; ResearcherID: [P-3412-2018](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5111-6255>

Е.В. Носкова¹, канд. геогр. наук; ResearcherID: [J-3245-2018](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9782-1996>

В.С. Мыглан², д-р ист. наук; ResearcherID: [S-7088-2018](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5268-653X>

¹Институт природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения РАН, а/я 1032, г. Чита, Россия, 672002; vahnina_il@mail.ru✉, elena-noskova-2011@mail.ru

²Сибирский федеральный университет, просп. Свободный, д. 79, г. Красноярск, Россия, 660041; v.mygлан@gmail.com

Поступила в редакцию 21.11.23 / Одобрена после рецензирования 19.02.24 / Принята к печати 20.02.24

Аннотация. Актуальность работы обусловлена важностью оценки устойчивости и продуктивности древостоев на верхней границе леса с учетом текущих климатических изменений. Такие оценки позволяют более точно определить ресурсный потенциал лесных экосистем с одной стороны и потенциал поглощения углерода для учета в климатической политике с другой. Целью работы является установление динамики линейных параметров годичного кольца лиственницы даурской в условиях верхней границы леса хребта Удокан (Становое нагорье). Для исследования параметров годичного кольца (ширины годичного кольца, ранней и поздней древесины) были использованы керны, отобранные с 41 дерева лиственницы даурской, произрастающей на 3 участках в лиственничном редколесье на высотах около 1500 м. Выполненный за период 1938–2021 гг. анализ метеорологических характеристик по данным ближайшей к отбору образцов метеостанции Чара выявил рост температуры воздуха во все сезоны года, продолжительности безморозного периода и количества периодов с температурами выше 0, 5, 10, 15 °С, сумм температур больше 5, 8, 10 и 15 °С на исследуемой территории. В результате проведенной работы впервые для верхней границы леса Станового нагорья построена обобщенная древесно-кольцевая хронология Char по параметрам годичных колец продолжительностью 513 лет, статистические показатели которой свидетельствуют о том, что динамика прироста характеризуется чувствительностью к внешним факторам среды. Дендроклиматический анализ, базирующийся на расчете коэффициентов корреляции Пирсона между индексами приростов рассматриваемых параметров годичных колец и климатическими факторами за 1938–2019 гг., выявил, что прирост лиственницы на территории Станового нагорья лимитируется преимущественно температурным режимом приземного воздуха. Наибольшие коэффициенты корреляции составили 0,49–0,50 (со среднеиюньской температурой воздуха); 0,41–0,49 (со средней температурой за июнь–июль, июнь–август, июнь–сентябрь); 0,52–0,53 (с максимальной температурой в июне); 0,45–0,52 (с максимальной температурой за июнь–июль, июнь–август, июнь–сентябрь). Между суммами температур воздуха выше 5, 8, 10, 15 °С и индексами прироста также были обнаружены досто-



верные (при $p < 0,001$) корреляционные связи, наибольшие для сумм выше 15 °C и параметров годичного кольца (0,43–0,45).

Ключевые слова: радиальный прирост, дендрохронология, годичное кольцо, верхняя граница леса, климат, температура воздуха, атмосферные осадки, Сибирь

Благодарности: Статья подготовлена в рамках исследований, финансируемых из средств бюджета учреждений, указанных в аффилиациях авторов.

Для цитирования: Вахнина И.Л., Носкова Е.В., Мыглан В.С. Радиальный прирост лиственницы даурской (*Lárix dahúrica* Turcz.) в условиях Станового нагорья // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 4. С. 35–49. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-4-35-49>

Original article

Radial Increment of Dahurian Larch (*Lárix dahúrica* Turcz.) in the Conditions of the Stanovoy Highlands

Irina L. Vakhnina¹✉, Candidate of Biology; ResearcherID: [P-3412-2018](https://orcid.org/0000-0001-5111-6255),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5111-6255>

Elena V. Noskova¹, Candidate of Geography; ResearcherID: [J-3245-2018](https://orcid.org/0000-0001-9782-1996),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9782-1996>

Vladimir S. Myglan², Doctor of History; ResearcherID: [S-7088-2018](https://orcid.org/0000-0002-5268-653X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5268-653X>

¹Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Post Office Box 1032, Chita, 672002, Russian Federation; vahnina_il@mail.ru✉, elena-noskova-2011@mail.ru

²Siberian Federal University, prosp. Svobodnyj, 79, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation; v.myglan@gmail.com

Received on November 21, 2023 / Approved after reviewing on February 19, 2024 / Accepted on February 20, 2024

Abstract. The relevance of the work is due to the importance of assessing the sustainability and productivity of forest stands at the upper forest line, taking into account current climate changes. Such assessments allow for a more accurate determination of the resource potential of forest ecosystems, on the one hand, and the carbon sequestration potential for consideration in climate policy, on the other. The aim of this research has been to establish the dynamics of the linear parameters of the annual ring of Dahurian larch in the conditions of the upper forest line of the Udokan Range (the Stanovoy Highlands). To study the parameters of the annual ring (annual ring width in the early and late wood), core samples have been taken from 41 Dahurian larch trees growing in 3 sites in larch sparse forests at altitudes of about 1500 m. An analysis of meteorological characteristics carried out for the period since 1938 till 2021 based on data from the Chara weather station closest to the sampling site has revealed an increase in air temperature in all seasons of the year, the duration of the frost-free period and the number of periods with temperatures above 0, 5, 10 and 15 °C, and the sum of temperatures greater than 5, 8, 10 and 15 °C in the study area. As a result of the work carried out, for the first time for the upper forest line of the Stanovoy Highlands, a generalized Char tree-ring chronology has been constructed based on the parameters of annual rings lasting for 513 years, the statistical indicators of which indicate that the dynamics of increment is characterized by sensitivity to external environmental factors. Dendroclimatic analysis, based on the calculation of the Pearson correlation coefficients between the increment indices of the considered

parameters of annual rings and climatic factors for 1938–2019, has revealed that the growth of larch in the territory of the Stanovoy Highlands is mainly limited by the temperature regime of the surface air. The highest correlation coefficient values have been 0.49–0.50 (with the average June air temperature); 0.41–0.49 (with the average temperature for June–July, June–August, and June–September); 0.52–0.53 (with the maximum temperature in June); 0.45–0.52 (with the maximum temperature for June–July, June–August and June–September). Significant (at $p < 0.001$) correlations have also been found between the sums of air temperatures above 5, 8, 10 and 15 °C and the growth indices, the largest for sums above 15 °C and annual ring parameters (0.43–0.45).

Keywords: radial increment, dendrochronology, annual ring, upper forest line, climate, air temperature, atmospheric precipitation, Siberia

Acknowledgements: The article was prepared as part of research funded from the budget of the institutions indicated in the authors' affiliations.

For citation: Vakhnina I.L., Noskova E.V., Myglan V.S. Radial Increment of Dahurian Larch (*Lárix dahúrica* Turcz.) in the Conditions of the Stanovoy Highlands. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 4, pp. 35–49. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-4-35-49>

Введение

Лиственница даурская является основной лесообразующей породой, которая формирует современную верхнюю границу леса в условиях горно-таежной зоны Станового нагорья (Восточная Сибирь). Деревья здесь произрастают на пределе существования, в связи с этим их радиальный прирост весьма чувствителен к изменению факторов внешней среды. Ведущим лимитирующим фактором продуктивности древостоев в данных условиях, как правило, является температура приземного воздуха [3, 9, 19, 20, 22, 27].

Текущие климатические тенденции, обусловленные ростом температуры воздуха [21], свойственные и для исследуемого региона [12, 13], приводят к изменению лесорастительных условий, что сказывается на продуктивности древостоев, и смещению верхней границы леса вдоль высотного градиента [4, 8, 16, 26].

Радиальный прирост – это объективный показатель динамики факторов внешней среды. В качестве базовой характеристики радиального прироста в большинстве случаев рассматривается ширина годичных колец [3], производными от которой являются другие линейные параметры годичных колец – ширина ранней и поздней древесины [24]. Если такой параметр, как ширина годичных колец, позволяет оценить погодные условия в целом за период вегетации, то использование ширины ранней и поздней древесины дает возможность дифференцировать информацию о влиянии погодных условий на прирост древесины в разные периоды сезона вегетации [2, 18, 29].

На территории Станового нагорья дендрохронологические исследования ранее не проводились. Однако существует несколько работ, посвященных изучению изменчивости морфологических признаков лиственницы [1] и анализу химического состава ее хвои [10].

Цель исследования – оценить динамику линейных параметров годичного кольца лиственницы даурской в условиях верхней границы леса хребта Удокан (Становое нагорье).

Объекты и методы исследования

Территория исследования – отроги хребта Удокан (абсолютная высота – более 2500 м). Хребет расположен в центральной части Станового нагорья, представляющего собой горную систему Восточной Сибири, протяженную с запада на восток. В целом району присущи основные черты резко континентального климата [14]. Растительность Станового нагорья – это в основном лиственничная тайга, которая выше 1200 м переходит в предгорьцовое редколесье и каменистые гольцы [17].

В качестве материала для исследования служили образцы древесины лиственницы даурской (*Lárix dahúrica* Turcz.), отобранные в виде кернов в августе 2019 г. с 3 участков (1Мр, 3Мр, Fab), расположенных на склонах северо-восточной и северо-западной экспозиции на отрогах хребта Удокан (56° 38' с. ш. 118° 23' в. д., центральная часть Станового нагорья). Почвы территории исследования – мерзлотно-таежные. Участки заложены на высотах около 1500 м над ур. м. в сходных условиях местообитаний в лиственничном предгорьцовом редколесье (10Л) с пологом из *Pinus pumila* и *Betula middendorffii*. Средний диаметр деревьев составляет 28 см, высота – 17 м. Подрост отсутствует. Полнота насаждений – около 0,3. Средний диаметр ствола исследуемых деревьев на высоте 1,3 м равняется от 26 (1Мр) до 30 (Fab) см, высота – от 16 (1Мр) до 18 (Fab) м. На наибольшем расстоянии по прямой (около 5 км) находятся участки 1Мр и Fab, на наименьшем – 3Мр и Fab (около 2 км). Между участками 1Мр и 3Мр примерно 3 км.

Отбор кернов древесины производился с помощью бурава Пресслера на высоте ствола 1,3 м, так, чтобы буров проходил через центр ствола и захватывал центральные годовичные кольца. На каждом участке взято не менее 15 образцов. В камеральных условиях керны, содержащие реактивную древесину и пожарные подсушины, были исключены из дальнейшей работы. Удаление смол и дубильных веществ из образцов проводилось с помощью их предварительного вымачивания в ацетоне, экстракции под спиртовым паром и варки в дистиллированной воде. Более подробно методика работы описана на сайте Сибирской дендрохронологической лаборатории [15]. Получение изображений поверхности кернов выполнялось с использованием сканера Epson Perfection V850 Pro или микроскопа AXIO zoom.V16. Измерение линейных параметров годовичных колец и графическое представление результатов осуществлялись в программах CooRecorder и CDendro [28]. Всего в рамках данной работы было измерено 3 параметра: ширина годовичного кольца (ШГК), ранней древесины (ШРД) и поздней (ШПД). Построение древесно-кольцевых хронологий, проверка их качества, устранение влияния возрастного тренда и других сигналов неклиматического характера на прирост (стандартизация) выполнялись в соответствии с общепринятыми дендрохронологическими методами, которые изложены в работе И.Л. Вахниной и др. [5]. Для создания древесно-кольцевых хронологий было использовано 41 модельное дерево (12 016 годовичных колец).

Анализ климатических показателей, характеризующих территорию исследования, был выполнен за 1938–2021 гг. по данным инструментальных наблюдений суточного и месячного разрешения ближайшей к отбору образцов (около 30 км по прямой) метеорологической станции Чара (координаты 56° 54' с. ш. 118° 16' в. д., высота над уровнем моря – 708 м). Гидротермический коэффи-

циент увлажнения Г.Т. Селянинова (ГТК) и индекс засушливости Д.А. Педя (SI) были рассчитаны по методикам, описанным ранее [6]. Для определения параметров линейных трендов многолетних изменений использован метод наименьших квадратов. Оценка значимости выявленных трендов выполнялась с применением t-статистики Стьюдента.

Полученные данные обработаны с использованием средств Microsoft Excel.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ данных метеостанции Чара показал, что среднегодовая температура приземного воздуха за 1938–2021 гг. составляла $-7,3^{\circ}\text{C}$, при этом самый низкий показатель отмечался в 1969 г. ($-9,8^{\circ}\text{C}$), самый высокий – в 2020 г. ($-4,9^{\circ}\text{C}$). В среднем за исследуемый период наиболее холодным месяцем стал январь ($-33,0^{\circ}\text{C}$), наиболее теплым – июль ($16,4^{\circ}\text{C}$), что показано на рис. 1. Продолжительность безморозного периода на территории исследования в среднем равна 74 дня. Последний заморозок приходится на 9 июня, первый – на 21 августа. Период с температурой воздуха выше 0°C в среднем выпадает на промежуток времени с 27 апреля по 2 октября (158 дней), выше 5°C – с 15 мая по 16 сентября (124 дня), выше 10°C – со 2 июня по 31 августа (90 дней), выше 15°C – с 25 июня по 4 августа (40 дней). Разница между среднемесячными максимальными температурами воздуха и средней за месяц варьировала от $5,9$ (в декабре) до $9,9$ (в феврале–марте) $^{\circ}\text{C}$. В среднем за 1938–2021 гг. максимальная среднегодовая температура составляла $0,1^{\circ}\text{C}$, в летние месяцы изменялась от $20,6$ – $20,7^{\circ}\text{C}$ в августе и июне до $23,6^{\circ}\text{C}$ в июле. Сумма температур воздуха выше 5°C в среднем за 84 года составляла 1593°C , выше 8°C – 1454°C , выше 10°C – 1318°C , выше 15°C – 772°C .

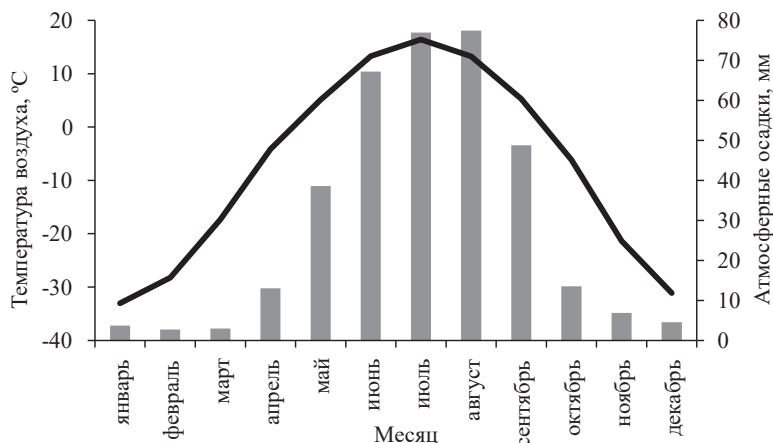


Рис. 1. Внутригодовой ход средней температуры воздуха и количества атмосферных осадков по данным метеорологической станции Чара в среднем за 1938–2021 гг.

Fig. 1. The intra-annual variation of average air temperature and precipitation according to the Chara weather station on average for 1938–2021

За исследуемый период среднегодовая температура воздуха достоверно повысилась на $0,24^{\circ}\text{C}/10$ лет. Линейные тренды для разных сезонов года за 10 лет составили зимой $0,36^{\circ}\text{C}$, весной – $0,29^{\circ}\text{C}$, летом – $0,16^{\circ}\text{C}$, осенью – $0,14^{\circ}\text{C}$. Тренды статистически достоверны при $p < 0,05$. Также наблюдается

увеличение продолжительности периодов с устойчивыми температурами воздуха выше 0, 5, 10 и 15 °С. Наибольший рост характерен для промежутка времени с температурой выше 15 °С. Безморозный период повысился на 4 дня за 10 лет. Суммы температур воздуха выше 5 °С за 10 лет выросли на 21 °С, выше 8 °С – на 22 °С, выше 10 °С – на 25 °С, выше 15 °С – на 29 °С. Тренды статистически достоверны при $p < 0,05$.

Количество атмосферных осадков за год в среднем составляет 356 мм. На теплое время года (май–сентябрь) приходится 86,7 % от их годовой суммы, а на июль–август – около 43,0 %. Наименьшее количество осадков за период исследования отмечалось в 1985 г. (178 мм), наибольшее – в 2012 г. (596 мм).

Анализ засушливости и увлажнения показал, что, в соответствии с классификацией гидротермического коэффициента увлажнения Г.Т. Селянинова, влагообеспеченность в Чаре оптимальна (ГТК = 1,33) и по классификации значений индекса Д.А. Педя условия увлажнения нормальные (SI = 0) [7]. Повышенная влагообеспеченность по ГТК ($> 2,00$) была свойственна 1981 и 2021 гг. По индексу засушливости Д.А. Педя лет с сильной и средней засухой ($> 2,00$) отмечено не было.

Условный (по количеству годовичных колец на высоте ствола 1,3 м) возраст лиственниц в среднем по участкам составляет 288 (1Мр), 238 (3Мр) и 350 (Fab) лет. Максимальный условный возраст деревьев – 513 (1Мр), 327 (3Мр) и 489 (Fab) лет. Измерение параметров годовичных колец показало, что их размеры связаны с возрастом (табл. 1). Средняя ширина годовичных колец исследуемых деревьев варьирует от 0,30 до 0,43 мм, ранней древесины – от 0,22 до 0,32 мм, поздней – от 0,08 до 0,12 мм.

Таблица 1

Статистические характеристики параметров годовичных колец лиственницы даурской, произрастающей на отрогах хребта Удокан
The statistical characteristics of the parameters of annual rings of Dahurian larch growing on the spurs of the Udokan Range

Участок	Период, гг.	ШГК		ШРД		ШПД	
		$\bar{X} \pm SE$	max	$\bar{X} \pm SE$	max	$\bar{X} \pm SE$	max
1Мр	1507–2019	0,33±0,05	1,50	0,24±0,04	1,32	0,09±0,02	0,57
3Мр	1693–2019	0,43±0,07	2,08	0,32±0,05	1,82	0,12±0,02	0,86
Fab	1531–2019	0,30±0,04	2,58	0,22±0,03	1,81	0,08±0,01	1,13

Примечание: $\bar{X}$ – среднее арифметическое; SE – стандартная ошибка среднего; max – максимальное значение.

В изменении ширины годовичных колец исследуемых лиственниц с помощью кластерного анализа были выделены группы деревьев, различающиеся по периодам интенсивного роста даже в пределах одного участка. Так, на участке 1Мр для одной группы деревьев период наибольшего прироста приходится на первые 50 лет, для другой выделяется 2 пика: 1-й – в начальные 20 лет, а 2-й – в 50–100-летний период. На участке 3Мр радиальный прирост большинства деревьев также характеризуется 2 периодами подъема: в первые 50 лет и в возрастном интервале 80–100 лет. Для 2 деревьев с участка 3Мр отмечается только 2-й период. На участке Fab также прослеживаются 2 группы деревьев с аналогичными для участка 3Мр временными отрезками интенсивного роста. Первое

увеличение прироста исследуемых лиственниц, вероятно, связано с «большим ростом», второе – с изменением локальных условий местопроизрастания. Несмотря на эти различия деревья в пределах одного участка характеризуются достаточно высокой межсериальной корреляцией для ширины годовичных колец – 0,76, 0,78 и 0,75 для 1Mr, 3Mr, Fab соответственно. При достижении возраста 120–150 лет и более размеры годовичных колец исследуемых деревьев имеют тенденцию к снижению.

Для устранения возрастного тренда и не связанных с влиянием климата изменений в приросте индивидуальные древесно-кольцевые хронологии были приведены к единству с помощью кубического сплайна и для каждого участка построены хронологии по 3 линейным параметрам годовичных колец (рис. 2). Полученные индексы близки к 1. Их статистические характеристики свидетельствуют о наличии в динамике радиального прироста лиственницы даурской, произрастающей на отрогах хребта Удокан, сигнала к условиям внешней среды (табл. 2). Коэффициенты чувствительности у стандартизированных древесно-кольцевых хронологий колеблются в пределах от 0,27 (по ширине поздней древесины для Fab) до 0,37 (по ширине ранней древесины для 3Mr), при этом для всех хронологий максимальные коэффициенты чувствительности характерны ширине ранней древесины. Стандартное отклонение варьирует в пределах от 0,26 (по ширине поздней древесины для Fab) до 0,41 (по тому же показателю для 1Mr). Автокорреляция 1-го порядка, отражающая влияние на радиальный прирост условий предшествующего года, находится в пределах от 0,16 (ширина ранней древесины для Fab) до 0,47 (ширина поздней древесины для 1Mr). Более низкими статистическими показателями отличается хронология Fab, при этом все полученные значения лежат выше пороговых, что свидетельствует о пригодности хронологий для дендроклиматического анализа [25]. Коэффициент вариации составляет от 25,4 до 36,8 %, т. е. уровень изменчивости повышен [11].

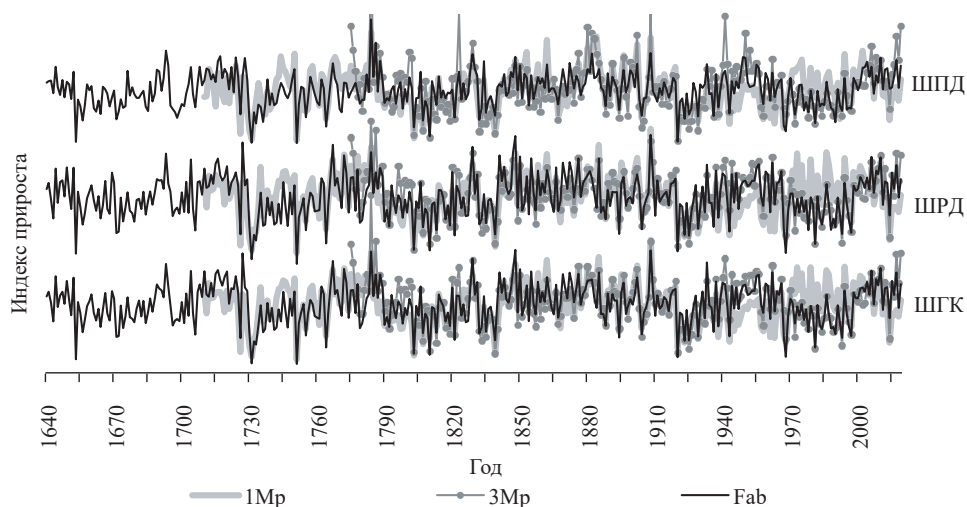


Рис. 2. Стандартизированные древесно-кольцевые хронологии по линейным параметрам годовичных колец лиственницы даурской, произрастающей на отрогах хребта Удокан, за периоды с $EPS \geq 0,85$

Fig. 2. The standardized tree-ring chronologies based on the linear parameters of annual rings of Dahurian larch growing on the spurs of the Udokan Range for periods with $EPS \geq 0.85$

Таблица 2

Статистические показатели стандартизированных древесно-кольцевых хронологий по параметрам годовичных колец лиственницы даурской, произрастающей на отрогах хребта Удокан
The statistical indicators of standardized tree-ring chronologies based on the parameters of annual rings of Dahurian larch growing on the spurs of the Udokan Range

Уча- сток	MS ШГК/ ШРД/ШПД	SD ШГК/ШРД/ ШПД	AC(1) ШГК/ ШРД/ШПД	Период с EPS≥0,85	Средний RBAR за период с EPS≥0,85	Cv, % ШГК/ШРД/ ШПД
1Mr	0,30/0,34/0,30	0,35/0,35/0,41	0,35/0,25/0,47	1710–2019 гг., 310 лет	0,55	28,6/29,8/28,2
3Mr	0,34/0,37/0,34	0,35/0,36/0,37	0,33/0,28/0,36	1775–2019 гг., 245 лет	0,61	31,9/31,4/36,8
Fab	0,31/0,35/0,27	0,29/0,32/0,26	0,19/0,16/0,27	1640–2019 гг., 380 лет	0,51	28,8/31,3/25,4

Примечание: MS – коэффициент чувствительности; SD – стандартное отклонение; AC(1) – коэффициент автокорреляции 1-го порядка; EPS – популяционный сигнал; RBAR – средний межсерийный коэффициент корреляции; Cv – коэффициент вариации.

Период, пригодный для анализа условий произрастания деревьев, определяли с помощью критерия выраженного сигнала популяции, который показывает степень отражения хронологией гипотетической, представленной бесконечным количеством деревьев [23]. Наибольшая продолжительность периода с $EPS \geq 0,85$ – 380 лет (1640–2019 гг.) – получена для древесно-кольцевой хронологии Fab, наименьшая – 245 лет (1775–2019 гг.) – для хронологии 3Mr. Межсерийный коэффициент корреляции за период с $EPS \geq 0,85$ в среднем варьирует от 0,51 (Fab) до 0,61 (3Mr).

Корреляционный анализ между линейными параметрами годовичных колец древесно-кольцевых хронологий по каждому участку, выполненный за периоды с $EPS \geq 0,85$, свидетельствует, что наибольшая связь наблюдается между шириной годовичного кольца и ранней древесины ($r = 0,98–0,99$). Между шириной годовичного кольца и поздней древесины коэффициенты корреляции несколько ниже и составляют от 0,88 (Fab) до 0,91 (1Mr, 3Mr). Наименьшие, но достоверные корреляции получены для ширины ранней и поздней древесины – от 0,81 (3Mr) до 0,84 (Fab). Таким образом, наибольший вклад в формирование годовичного кольца вносит ранняя древесина.

Общий период с $EPS \geq 0,85$, для которого можно проводить сравнительный анализ между хронологиями по разным участкам, составляет 245 лет (1775–2019 гг.). За этот период коэффициенты корреляции между хронологиями изменяются в пределах достоверных значений: по ширине годовичных колец от 0,67 до 0,85, по ширине ранней древесины – от 0,68 до 0,86 и по ширине поздней древесины – от 0,64 до 0,77. При этом наименьшая корреляция между параметрами разных хронологий получена для 1Mr и 3Mr, наибольшая – для 3Mr и Fab. Такая закономерность характерна для всех 3 рассматриваемых показателей годовичного кольца.

В связи с тем, что образцы были отобраны с деревьев, произрастающих в сходных местообитаниях, максимальное расстояние между участками не превышает 5 км, а корреляционные связи между ними статистически значи-

мы, это позволило объединить индивидуальные серии и создать обобщенную древесно-кольцевую хронологию Char для территории хребта Удокан (рис. 3), в которую вошла 41 индивидуальная серия прироста. Ее максимальная продолжительность составила 513 лет, охватывающих период с 1507 по 2019 гг. Статистические характеристики хронологии Char по разным параметрам годичного кольца несколько ниже, чем у хронологий по отдельным участкам, поскольку при обобщении в ней нивелировано влияние локальных (микrokлиматических) условий на радиальный прирост отдельных деревьев. Коэффициенты чувствительности для разных параметров годичного кольца находятся в пределах от 0,25 (ШПД) до 0,32 (ШРД), стандартное отклонение варьирует от 0,28 (ШПД) до 0,30 (ШРД), автокорреляция 1-го порядка изменяется от 0,20 (ШРД) до 0,35 (ШПД). За счет увеличения наполненности образцами обобщенной хронологии Char период с $EPS \geq 0,85$ был продлен до 385 лет (1635–2019 гг.), межсерийный коэффициент корреляции за данный промежуток времени в среднем составляет 0,50. Коэффициенты вариации для обобщенных по разным параметрам хронологий равняются от 29,1 (ШГК) до 30,3 (ШРД) %. Таким образом, динамика радиального прироста созданной обобщенной древесно-кольцевой хронологии Char содержит информацию об изменениях внешней среды, определяемых климатом, и может быть использована для его анализа за 385 лет.

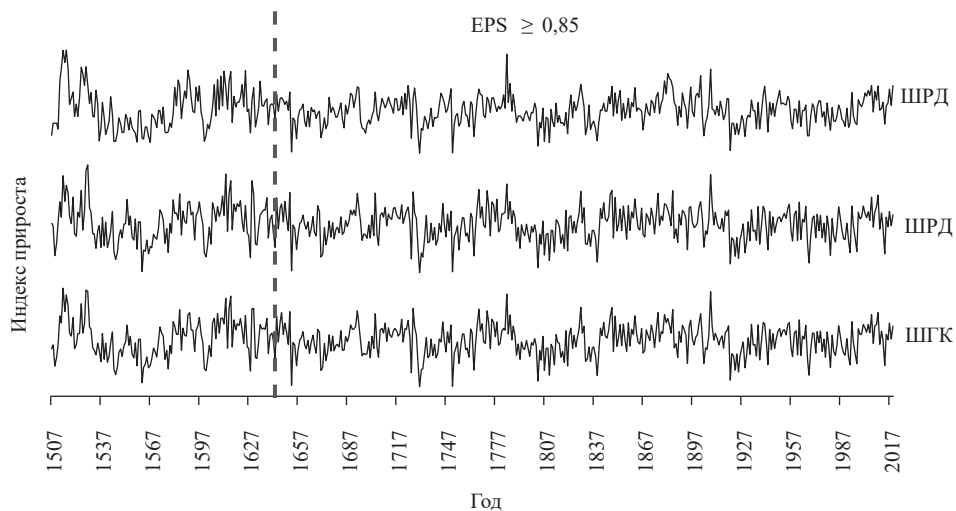


Рис. 3. Стандартизированная обобщенная древесно-кольцевая хронология Char по параметрам годичных колец лиственницы даурской, произрастающей на отрогах хребта Удокан. Вертикальной прерывистой линией отделен интервал с $EPS \geq 0,85$

Fig. 3. The standardized generalized Char tree-ring chronology based on the parameters of annual rings of Dahurian larch growing on the spurs of the Udokan Range.

The vertical dashed line separates the interval with $EPS \geq 0.85$

Анализ влияния климатических факторов на динамику рассматриваемых параметров годичного кольца хронологии Char за 1938–2019 гг. (82 года), выполненный с помощью расчета коэффициентов корреляции Пирсона, показал самые высокие значения (при $p < 0,001$) между индексами прироста по всем параметрам годичного кольца и характеристиками температурного режима приземного воздуха (среднегодовая и среднемесячная, максимальная среднемесячная температуры, суммы температур больше 5, 8, 10 и 15 °C).

Наибольшие коэффициенты корреляции получены между индексами всех параметров годичного кольца хронологии Char и среднеиюньской температурой воздуха ($r = 0,49\text{--}0,50$), а также со средней температурой за июнь–июль, июнь–август, июнь–сентябрь ($r = 0,41\text{--}0,49$) (рис. 4). Коэффициенты корреляции между всеми параметрами хронологии и максимальной температурой воздуха в июне достигают $0,52\text{--}0,53$, средними максимальными температурами за июнь–июль, июнь–август, июнь–сентябрь – $0,45\text{--}0,52$. Между суммами температур воздуха и индексами прироста также была выявлена достоверная (при $p < 0,001$) связь: между суммами температур больше $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и шириной поздней древесины ($r = 0,34$), а также шириной годичного кольца ($r = 0,28$); суммами больше $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ и всеми параметрами (от $0,32$ для ШРД до $0,37$ для ШПД); суммами больше $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ и всеми параметрами (от $0,34$ для ШГК, ШРД до $0,36$ для ШПД); суммами больше $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ и всеми параметрами (от $0,43$ для ШРД до $0,45$ для ШПД).

При сглаживании 11-летним скользящим средним древесно-кольцевой хронологии и показателей температурного режима коэффициенты корреляции между ними значительно возрастают и достигают значений: $0,76$; $0,76$ и $0,83$ между ШПД и температурой воздуха за июнь и июль и период июнь–июль соответственно; $0,89$ между ШПД и максимальными температурами воздуха за июнь и июнь–июль; $0,79$ между ШПД и суммами температур больше $15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

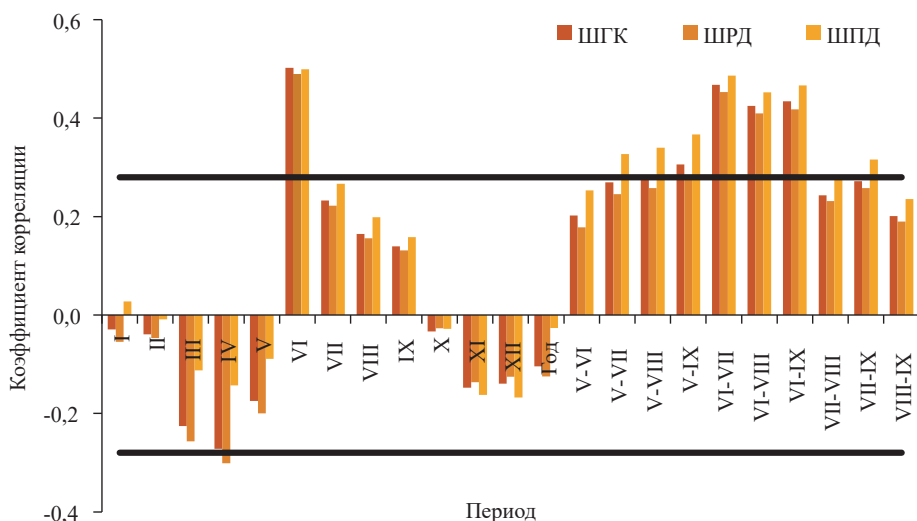


Рис. 4. Коэффициенты корреляции Пирсона между древесно-кольцевой хронологией Char и температурой приземного воздуха. Горизонтальными черными линиями показаны пороговые значения при $p < 0,001$

Fig. 4. Pearson correlation coefficients between the Char tree-ring chronology and surface air temperature. The horizontal black lines show the threshold values at $p < 0.001$

Связь радиального прироста хронологии Char с атмосферными осадками проявляется слабо (рис. 5). На все параметры годичного кольца оказывают отрицательное влияние осадки в июне (от $-0,23$ для ШПД до $-0,25$ для ШГК, ШРД; $p < 0,05$) и на ШГК и ШРД – сумма осадков за июнь–июль ($r = -0,24$ и $r = -0,25$; $p < 0,05$). Это, по всей вероятности, может быть связано с переувлажнением почв, вызванным сезонным оттаиванием мерзлоты.

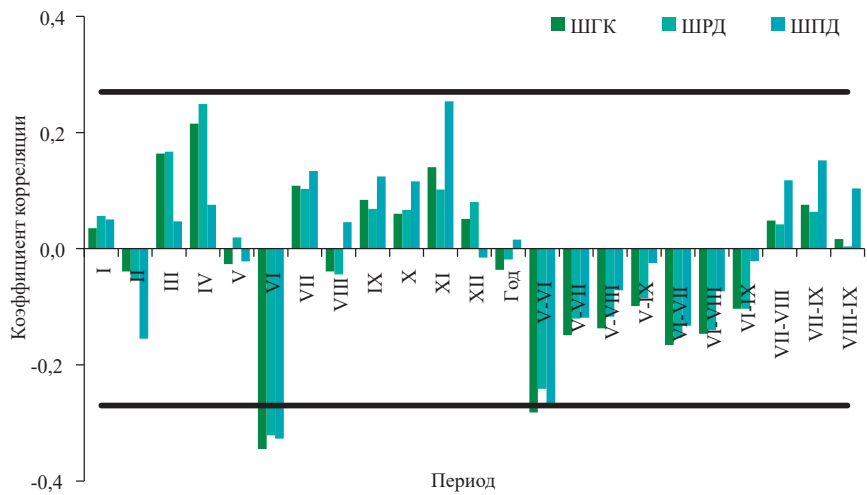


Рис. 5. Коэффициенты корреляции Пирсона между древесно-кольцевой хронологией Char и атмосферными осадками. Горизонтальными черными линиями показаны пороговые значения при $p < 0,05$

Fig. 5. Pearson correlation coefficients between the Char tree-ring chronology and atmospheric precipitation. The horizontal black lines show the threshold values at $p < 0.05$

Корреляционная связь между индексами параметров годичного кольца хронологии Char с индексами засухливости и увлажнения в большей степени (при $p < 0,001$) также проявляется с показателями за июнь и включающие его периоды. Между ГТК за июнь с индексами по всем параметрам годичного кольца коэффициенты корреляции составляют 0,45–0,46, между SI и приростом наибольшие значения (0,47–0,48, при $p < 0,001$) получены за июнь–июль (рис. 6).

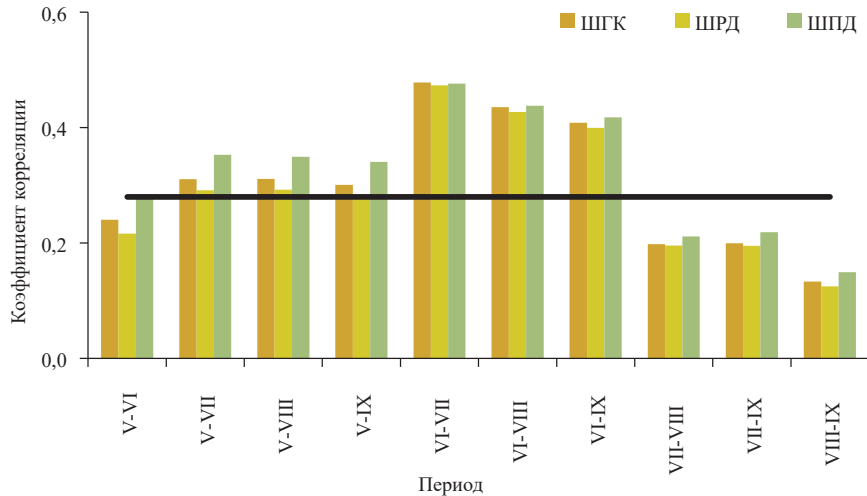


Рис. 6. Коэффициенты корреляции Пирсона между древесно-кольцевой хронологией Char и индексом засухливости Д.А. Педя. Горизонтальными черными линиями показаны пороговые значения при $p < 0,001$

Fig. 6. Pearson correlation coefficients between the Char tree-ring chronology and D.A. Ped' aridity index. The horizontal black lines show the threshold values at $p < 0.001$

Поскольку рассматриваемые индексы являются интегральными характеристиками температуры воздуха и атмосферных осадков, а территория исследования

характеризуется достаточным увлажнением, в выявленной связи радиального прироста с СИ и ГТК ведущую роль играют температуры.

Заключение

Впервые для верхней границы леса хребта Удокан (Становое нагорье) построена обобщенная древесно-кольцевая хронология Char по 3 линейным параметрам годичных колец лиственницы даурской (ширины годичного кольца, ранней и поздней древесины) продолжительностью 513 лет, пригодная для реконструкции условий произрастания за последние 385 лет (1635–2019 гг.).

Динамика радиального прироста лиственницы даурской в условиях верхней границы леса Станового нагорья лимитируется преимущественно температурой приземного воздуха. Достоверные коэффициенты корреляции получены между индексами прироста хронологии Char и характеристиками температурного режима: среднегодовой и среднемесячной температурами за отдельные месяцы и периоды сезона вегетации (июнь, июнь–июль, июль–август, июль–сентябрь), максимальной среднемесячной температурой, суммой температур больше 5, 8, 10 и 15 °С – с наибольшими их значениями, достигающими 0,53 между максимальной температурой воздуха в июне и шириной годичного кольца и поздней древесины. Проявляется, хотя и слабо, значимая отрицательная связь рассматриваемых параметров годичного кольца с суммой атмосферных осадков 1-й половины сезона вегетации (июнь, июль–август), вызванная, вероятно, переувлажнением почв, связанным с сезонным оттаиванием мерзлоты. Отклик параметров годичного кольца на индексы засушливости и увлажнения за июль и включающие его периоды обусловлен ведущим значением температуры, поскольку эти индексы являются интегральными характеристиками температуры воздуха и атмосферных осадков.

Учитывая рост показателей температурного режима на исследуемой территории и их тесную связь с радиальным приростом, можно сделать вывод, что текущие климатические изменения положительно сказываются на продуктивности древостоев в условиях верхней границы леса Станового нагорья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Барченков А.П. Изменчивость лиственницы в Северном Забайкалье (Становое нагорье) // Вестн. Томск. гос. ун-та. Биология. 2008. № 3(4). С. 7–15.
Barchenkov A.P. Variability of Larch in Northern Transbaikalia (Stanovoe Plateau). *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Biologiya* = Tomsk State University Journal of Biology, 2008, no. 3(4), pp. 7–15. (In Russ.).
2. Ваганов Е.А., Терсков А.И. Анализ роста дерева по структуре годичных колец. Новосибирск: Наука, 1977. 94 с.
Vaganov E.A., Terskov A.I. *Analysis of Tree Growth by the Structure of Annual Rings*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1977. 94 p. (In Russ.).
3. Ваганов Е.А., Шиятов С.Г., Мазепа В.С. Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской Субарктике. Новосибирск: Наука, 1996. 246 с.
Vaganov E.A., Shiyatov S.G., Mazepa V.S. *Dendroclimatic Research in the Ural-Siberian Subarctic*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1996. 246 p. (In Russ.).
4. Воронин В.И., Осколков В.А., Буянтуев В.А., Сизых А.П. Тенденции динамики верхней границы леса в высокогорьях Северного Прибайкалья // Сиб. лесн. журн. 2016. № 4. С. 77–85.

Voronin V.I., Oskolkov V.A., Buyantuev V.A., Sizykh A.P. Trends in Dynamics of Forest Upper Boundary in High Mountains of Northern Baikal Area. *Sibirskij lesnoj zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2016, no. 4, pp. 77–85. (In Russ.).

5. Вахнина И.Л., Мыглан В.С., Носкова Е.В., Баринов В.В., Тайник А.В. Региональные особенности радиального прироста сосны обыкновенной в климатических условиях лесостепной и степной зон Восточного Забайкалья по многопараметрическим древесно-кольцевым хронологиям // Сиб. экол. журн. 2022. Т. 29, № 2. С. 147–161.

Vakhnina I.L., Myglan V.S., Noskova E.V., Barinov V.V., Tainik A.V. Regional Features of the Radial Growth of Scots Pine under Climatic Conditions of the Forest-Steppe and Steppe Zones of Eastern Transbaikalia According to Multiparameter Tree-Ring Chronologies. *Sibirskij ekologicheskij zhurnal* = Contemporary Problems of Ecology, 2022, vol. 15, pp. 118–128. <https://doi.org/10.1134/S199542552202010X>

6. Вахнина И.Л., Обязов В.А., Замана Л.В. Динамика увлажнения в степной зоне Юго-Восточного Забайкалья с начала XIX столетия по кернам сосны обыкновенной // Вестн. Московск. ун-та. Сер. 5: Геогр. 2018. № 2. С. 28–33.

Vakhnina I.L., Obyazov V.A., Zamana L.V. Dynamics of Humidification in the Steppe Zone of Southeastern Transbaikalia Since the Beginning of the 19th Century Evidenced by the Cores of Scots Pine. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya* = Lomonosov Geography Journal, 2018, no. 2, pp. 28–33. (In Russ.).

7. Галимова Р.Г., Переведенцев Ю.П., Яманаев Г.А. Агроклиматические ресурсы республики Башкортостан // Вестн. Воронежск. Гос. ун-та. Сер.: География. Геоэкология. 2019. № 3. С. 29–39.

Galimova R.G., Perevedentsev Yu.P., Yanaev G.A. Agro-Climatic Resources of the Republic of Bashkortostan. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya* = Proceedings of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology, 2019, no. 3, pp. 29–39. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/geo.2019.3/2321>

8. Григорьев А.А., Дэви Н.М., Кукарских В.В., Вьюхин С.О., Галимова А.А., Моисеев П.А., Фомин В.В. Структура и динамика древостоев верхней границы леса в западной части плато Путорана // Экология. 2019. № 4. С. 243–254.

Grigor'ev A.A., Devi N.M., Kukarskikh V.V., V'yukhin S.O., Galimova A.A., Moiseev P.A., Fomin V.V. Structure and Dynamics of Tree Stands at the Upper Timberline in the Western Part of the Putorana Plateau. *Ekologiya* = Russian Journal of Ecology, 2019, vol. 50, pp. 311–322. <https://doi.org/10.1134/S1067413619040076>

9. Гурская М.А. Хронологии светлых колец лиственницы на севере сибирской лесотундры: отражение степени континентальности климата // Изв. РАН. Сер.: Геогр. 2021. Т. 85, № 1. С. 84–96.

Gurskaya M.A. Chronology of Larch Light Rings in the North of Siberia: Reflection of the Climate Continentality Degree. *Izvestiya Rossiyskoj akademii nauk. Seriya: Geograficheskaya*, 2021, vol. 85, no. 1, pp. 84–96. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2587556621010064>

10. Макаров В.П., Борзенко С.В., Помазкова Н.В., Желибо Т.В. Особенности накопления химических элементов в хвое лиственницы Гмелина, произрастающей в районе Удоканского месторождения меди // Химия растит. сырья. 2021. № 2. С. 191–200.

Makarov V.P., Borzenko S.V., Pomazkova N.V., Zhelibo T.V. Features of the Content of Chemical Elements in the Coniferous Larch Gmelina in the Area of the Udokan Copper Deposit. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2021, no. 2, pp. 191–200. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.2021028832>

11. Мамаев С.А. Формы внутривидовой изменчивости древесных растений. М.: Наука, 1972. 283 с.

Mamaev S.A. *Forms of Intraspecific Variability of Woody Plants*. Moscow, Nauka Publ., 1972. 283 p. (In Russ.).

12. Носкова Е.В., Вахнина И.Л. Анализ современных пространственно-временных изменений температуры воздуха в Забайкальском крае // Геогр. вестн. 2023. № 1(64). С. 116–126.

Noskova E.V., Vakhnina I.L. Analysis of Modern Spatio-Temporal Changes in Air Temperature in the Trans-Baikal Territory. *Geograficheskij vestnik* = Geographical Bulletin, 2023, no. 1(64), pp. 116–126. (In Russ.). <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2023-1-116-126>

13. Носкова Е.В., Вахнина И.Л. Устойчивые переходы температуры воздуха в весенний и осенний периоды в Восточном Забайкалье // Геосферные исследования. 2022. № 3. С. 148–161.

Noskova E.V., Vakhnina I.L. The Influence of Alluvial Gold Mining on the Natural Complexes of River Valleys of Amur River Basin in Eastern Transbaikalia. *Geosfernyye issledovaniya* = Geosphere Research, 2022, no. 3, pp. 148–161. (In Russ.). <https://doi.org/10.17223/25421379/24/10>

14. Носкова Е.В., Вахнина И.Л., Голятина М.А. Изменение климата читинского участка зоны БАМ // Аспирант. Приложение к журн. Вестн. Забайкальск. гос. ун-та. 2018. Т. 12, № 2. С. 61–65.

Noskova E.V., Vakhnina I.L., Golyatina M.A. Climate Change of the Chita Site of the BAM Zone. *Aspirant. Prilozhenie k zhurnalu "Vestnik Zabaykal'skogo gosudarstvennogo universiteta"*, 2018, vol. 12, no. 2, pp. 61–65. (In Russ.). <https://doi.org/10.21209/2074-9155-2018-12-2-61-65>

15. Обработка материалов. Режим доступа: <https://www.sibdendro.com/obrabotka-materiala> (дата обращения: 18.07.23).

Materials Processing. (In Russ.).

16. Петров И.А., Шушпанов А.С., Голюков А.С., Двинская М.Л., Харук В.И. Динамика древесно-кустарниковой растительности в горной лесотундре Восточного Саяна // Экология. 2021. № 5. С. 372–379.

Petrov I.A., Shushpanov A.S., Golyukov A.S., Dvinskaya M.L., Kharuk V.I. Dynamics of Tree and Shrub Vegetation in the Eastern Sayan Mountain Tundra. *Ekologiya* = Russian Journal of Ecology, 2021, vol. 52, pp. 399–405. <https://doi.org/10.1134/S1067413621050118>

17. Пешкова Г.А. Растительность Сибири. Предбайкалье и Забайкалье. Новосибирск: Наука, 1985. 145 с.

Peshkova G.A. *Vegetation of Siberia. Pre-Baikal and Transbaikalia*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1985. 145 p. (In Russ.).

18. Румянцев Д.Е., Епишков А.А. Биологические основы изменчивости годовичных колец // Фундамент. исслед. Биологические науки. 2015. № 2. С. 481–486.

Rumyantsev D.E., Epishkov A.A. Biological Basis of Variability of Annual Rings. *Fundamental'nyye issledovaniya. Biologicheskie nauki* = Fundamental Research. Biological Sciences, 2015, no. 2, pp. 481–486. (In Russ.).

19. Сидорова О.В., Ваганов Е.А., Наурзбаев М.М., Шишов В.В., Хьюс М.К. Региональные особенности радиального прироста лиственницы на севере средней Сибири по тысячелетним древесно-кольцевым хронологиям // Экология. 2007. № 2. С. 99–103.

Sidorova O.V., Vaganov E.A., Naurzbaev M.M., Shishov V.V., Hughes M.K. Regional Features of the Radial Growth of Larch in North Central Siberia according to Millennial Tree-Ring Chronologies. *Ekologiya* = Russian Journal of Ecology, 2007, vol. 38, pp. 90–93. <https://doi.org/10.1134/S106741360702004X>

20. Тайник А.В., Мыглан В.С., Баринов В.В., Ойдунаа О.Ч., Назаров А.Н. Прирост лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) на верхней границе леса в Республике Тыва // География и природные ресурсы. 2015. № 2. С. 91–99.

Tainik A.V., Myglan V.S., Barinov V.V., Oidupaa O.Ch., Nazarov A.N. Growth of Siberian Larch (*Larix sibirica* Ledeb.) at the Upper Forest Line in the Republic of Tyva. *Geografiya i prirodnnye resursy* = Geography and Natural Resources, 2015, no. 2, pp. 91–99. (In Russ.).

21. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб.: Научное издание, 2022. 124 с.

The Third Assessment Report on Climate Change and its Consequences on the Territory of the Russian Federation. General Summary. Saint Petersburg, Naukoemkie tekhnologii Publ., 2022. 124 p. (In Russ.).

22. Фонти М.В., Тычков И.И., Чуракова (Сидорова) О.В. Внутрисезонный климатический сигнал в годовых кольцах хвойных деревьев в криолитозоне Сибири // Экология. 2021. № 5. С. 380–387.

Fonti M.V., Tychkov I.I., Churakova (Sidorova) O.V. Intraseasonal Climatic Signal in Tree Rings of Conifers in the Permafrost Zone of Siberia. *Ekologiya* = Russian Journal of Ecology, 2021, vol. 52, pp. 412–418. <https://doi.org/10.1134/S1067413621050064>

23. Cook E., Briffa K., Shiyatov S., Mazepa V., Jones P.D. Data Analysis. *Methods of Dendrochronology*. Dordrecht, Springer, 1990, pp. 97–162. https://doi.org/10.1007/978-94-015-7879-0_3

24. Cook E.R., Kairiukstis L.A. *Methods of Dendrochronology. Applications in the Environmental Sciences*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1990. 394 p. <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-015-7879-0>

25. Ferguson C.W. A 7104-Year Annual Tree-Ring Chronology for Bristlecone Pine, *Pinus Aristata*, from the White Mountains, California. *Tree-Ring Bulletin*, 1969, vol. 29, no. 3-4, pp. 3–29.

26. Kirilyanov A.V., Hagedorn F., Knorre A.A., Fedotova E.V., Vaganov E.A., Naurzbaev M.M., Moiseev P.A., Rigling A. 20th Century Tree-Line Advance and Vegetation Changes along an Altitudinal Transect in the Putorana Mountains, Northern Siberia. *Boreas*, 2012, vol. 41, iss. 1, pp. 56–67. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.2011.00214.x>

27. Kirilyanov A.V., Treydte K.S., Nikolaev A., Helle G., Schleser G.H. Climate Signals in Tree-Ring Width, Density and $\delta^{13}\text{C}$ from Larches in Eastern Siberia (Russia). *Chemical Geology*, 2008, vol. 252, iss. 1–2, pp. 31–41. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.01.023>

28. Larsson L. CooRecorder and Cdendro Programs of the CooRecorder. *Cdendro Package Version 9.1*, 2018. Available at: <https://www.cybis.se/forfun/dendro/helpcoorecorder7/index.htm> (accessed 18.07.23).

29. Wigley T.M.L., Briffa K.R., Jones P.D. On the Average Value of Correlated Time Series, with Applications in Dendroclimatology and Hydrometeorology. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 1984, vol. 23, iss. 2, pp. 201–213. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1984\)023%3C0201:OTAVOC%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1984)023%3C0201:OTAVOC%3E2.0.CO;2)

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest