



Оригинальная статья

Адаптация лиственницы и сосны к засухе в Центральной Якутии

Чжан Сяохун[✉], А. Н. Николаев

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

[✉]z461306425@gmail.com

Аннотация

Современное потепление Арктики оказывает заметное влияние на состояние бореальных лесов. Изучение адаптации древесных растений важно для прогноза экосистемных изменений. Цель исследования – сравнить интенсивность отражения синего света (Blue Intensity, BI) на цифровых изображениях годовичных колец лиственницы Каяндера и сосны обыкновенной, а также установить чувствительность этих видов к засухе (SPEI) в зависимости от температуры и атмосферных осадков. В работе определены параметры интенсивности отражения синего света годовичных колец (BI): BI-EW (ранняя древесина), BI-LW (поздняя древесина) и BI-D (разница между ними), полученные для 13 пробных площадок в Центральной Якутии. С помощью корреляционного анализа изучены реакция рассматриваемых параметров на сезонные температуры, осадки и многомасштабный стандартизированный индекс осадков и испарения (SPEI-3, -6, -12). Исследование выявило два различных подхода к выживанию в условиях засухи. Лиственница Каяндера, относящаяся к хвойным листопадным деревьям, показала более высокую уязвимость к повышению летних температур и сильную зависимость от запасов влаги в зимнем снежном покрове. Ксилогенез лиственницы оказался особенно чувствителен к засухе как в среднесрочной, так и в краткосрочной перспективе. В отличие от лиственницы, рост сосны обыкновенной в большей степени зависел от осадков текущего вегетационного периода. Основным механизмом адаптации сосны заключается в регулировании контрастности структуры годовичных колец (BI-D), что обеспечивает физиологическую устойчивость и способность противостоять засухе на всех уровнях – от сезонного до межгодового. Стратегии водопользования и адаптации к засухе у лиственницы Каяндера и сосны обыкновенной различаются в зависимости от их жизненной формы и глубины проникновения корневых систем в почву. Лиственница более чувствительна к повышению температуры и снижению количества зимних осадков, в то время как сосна демонстрирует большую устойчивость. Полученные данные важны для прогнозирования изменений в бореальных лесах при изменении климата.

Ключевые слова: интенсивность отражения синего цвета (BI), стандартизированный индекс осадков и испарения (SPEI), лиственница Каяндера, сосна обыкновенная

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова (№ FSRG-2023-0027).

Благодарности. Авторы выражают признательность д.г.н. Л.А. Пестряковой за ценные рекомендации при подготовке рукописи, а также анонимным рецензентам за внимательное рассмотрение работы. Отдельная благодарность к.б.н. А. Арсаку (Сибирский федеральный университет) и его аспирантам К.В. Акулининой и В.В. Агаповой (лаборатория комплексных исследований динамики лесов Евразии, Сибирский федеральный университет, Красноярск) за помощь в организации лабораторных анализов.

Для цитирования: Чжан С., Николаев А.Н. Адаптация лиственницы и сосны к засухе в Центральной Якутии. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2026;31(1):116–127. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2026-31-1-116-127> EDN: QKMLXO

Adaptation of larch and pine to drought in Central Yakutia

Zhang Xiaohong✉, Anatoly N. Nikolaev

Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation

✉z461306425@gmail.com

Abstract

Rapid warming in the Arctic is profoundly affecting boreal forests, making the study of tree adaptation essential for predicting ecosystem responses to climate change. This study aims to compare the Blue Intensity (BI) of digital tree-ring images from *Larix cajanderi* and *Pinus sylvestris* and to evaluate the drought response of both species using the Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI) in relation to temperature and precipitation. Specifically, three BI parameters were derived from tree-ring samples collected at 13 sites in Central Yakutia: earlywood BI (BI-EW), latewood BI (BI-LW), and their difference (BI-D). Using correlation analysis, we examined the responses of these parameters to seasonal temperature, precipitation, and multi-scalar SPEI (at 3, 6, and 12 month intervals). The study revealed two distinct drought survival strategies. Cajander larch, a deciduous conifer, exhibited higher vulnerability to elevated summer temperatures and a strong dependence on moisture stored in the winter snowpack. Furthermore, its xylogenesis was particularly sensitive to drought at both medium and short timescales. In contrast, Scots pine growth depended more on precipitation during the current growing season. Notably, the key adaptive mechanism for pine involved modulating the contrast in annual ring structure (BI-D), which conferred physiological resilience and drought resistance across seasonal to interannual timescales. Water-use strategies and drought adaptation in *Larix cajanderi* and *Pinus sylvestris* differ according to their life form and water uptake depth. Specifically, larch is more sensitive to rising temperatures and reduced winter precipitation, whereas pine demonstrates greater resilience. In conclusion, these findings are critical for predicting future changes in boreal forests under ongoing climatic shifts.

Keywords: Blue Intensity (BI), Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI), Cajander larch (*Larix cajanderi*), Scots pine (*Pinus sylvestris*)

Funding. This work was supported by the state assignment to the Ammosov North-Eastern Federal University (No. FSRG-2023-0027).

Acknowledgements. The authors express their gratitude to Lyudmila A. Pestryakova, Dr. Sci. (Geogr.), for her valuable recommendations during the preparation of the manuscript, as well as to the anonymous reviewers for their careful evaluation of the work. Special thanks are due to Arseniy Arsak, Cand. Sci. (Biol.), Siberian Federal University, and his postgraduate students, K.V. Akulinina and V.V. Agapova (Laboratory for Comprehensive Studies of Eurasian Forest Dynamics, Siberian Federal University, Krasnoyarsk), for their assistance in organizing the laboratory analyses.

For citation: Zhang X., Nikolaev A.N. Adaptation of larch and pine to drought in Central Yakutia. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2026;31(1):116–127. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2026-31-1-116-127> EDN: QKMLXO

Введение

В настоящее время арктические и субарктические районы являются одними из самых быстро нагреваемых мест на планете. Для ученых, изучающих глобальные процессы, понимание того, как лесные экосистемы этих регионов реагируют на изменения климата, имеет важное значение [1]. Центральнo-Якутский регион, расположенный в Восточной Сибири, представляет собой уникальную площадку для исследований климатической адаптации древесных растений в условиях холодного климата. Резко-континентальный климат и обширные территории с многолетней мерзлотой создают благоприятные условия для

таких исследований [2]. Леса этого региона характеризуются преобладанием лиственницы Каяндера (*Larix cajanderi* Mayr.) и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Их длительное сосуществование в суровых условиях свидетельствует о продолжительном процессе адаптации, который отразился в структуре и динамике древостоев [3, 4]. Годичные кольца деревьев, словно точные архивы, хранят в себе историю изменений в окружающей среде на протяжении многих лет. Обычно для изучения этих изменений используются показатели ширины годичного кольца. Однако этот параметр отражает лишь непосредственный эффект роста дерева и не дает полного представле-

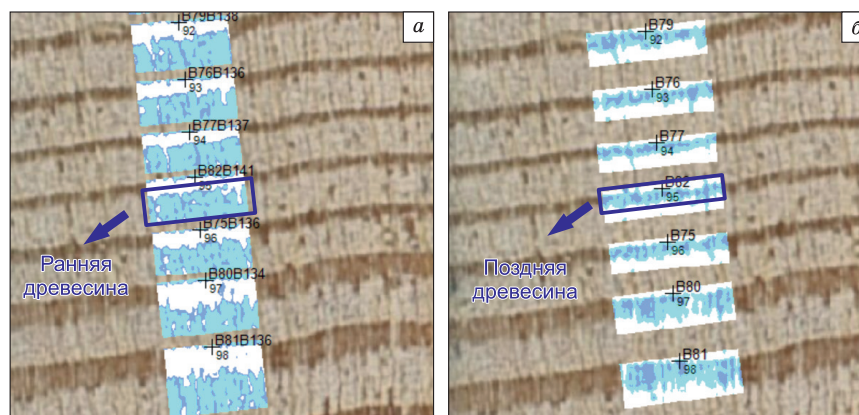


Рис. 1. Два вида синей интенсивности (BI): BI-EW (а – для ранней древесины) и BI-LW (б – для поздней древесины) (фото автора)

Fig. 1. Two types of blue intensity (BI): BI-EW (a – early wood) and BI-LW (b – late wood). (Photo by the author)

ния о внутренних физиологических процессах, происходящих в его организме [5, 6].

В последнее время методы анализа плотности годичных колец, особенно метод интенсивности отражения синего света (Blue Intensity, BI), стали незаменимыми инструментами для изучения клеточной реакции ксилогенеза на различные стрессовые факторы окружающей среды [7, 8]. BI-EW (Earlywood Blue Intensity) в основном отражает процесс растяжения клеток на начальном этапе активности камбия и чрезвычайно чувствительна к условиям увлажнения (рис. 1). BI-LW (Latewood Blue Intensity), связанная с утолщением клеточных стенок и лигнификацией, в большей степени подвержена влиянию температуры и доступности продуктов углеродной ассимиляции. BI-D (Delta Blue Intensity) характеризует контрастность внутренней структуры годичного кольца и отражает скоординированность формирования ранней и поздней древесины [8].

Для более глубокого понимания того, как деревья справляются с водным стрессом, был разработан стандартизованный индекс осадков и испарения (Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index, SPEI) [9]. Этот многомасштабный климатический индекс измеряет засуху, учитывая как осадки, так и потребность растений в воде (потенциальное испарение). В отличие от традиционного индекса стандартизованных осадков (SPI), который учитывает только осадки, метод SPEI является более полным и точным индикатором засушливых условий. Используя различные временные масштабы, такие как SPEI-3, SPEI-6 и SPEI-12, можно определить, как деревья реагируют на

краткосрочную, сезонную и долгосрочную засуху. Это позволяет выявить так называемые эффекты памяти, которые могут существенно повлиять на состояние деревьев в будущем.

Хотя связь между радиальным приростом деревьев в Центральной Якутии и климатом в этом регионе уже достаточно хорошо изучена [10–12], до сих пор не было систематических исследований, которые бы сравнивали на основе параметров BI и SPEI в различных временных масштабах физиологические стратегии двух основных пород.

Метод BI успешно применяется для оценки реакции хвойных деревьев на температурный стресс в бореальных регионах [7, 8, 13–20]. Параметры BI-EW и BI-D могут отражать адаптацию к водному режиму [15, 21]. Многие исследования оценивали реакцию лиственницы и сосны на засуху, используя ширину колец и индекс SPEI [11, 13, 22]. Они обнаружили различия в чувствительности этих двух пород к засухе. Однако до сих пор не проводилось комплексных исследований, которые бы напрямую анализировали реакцию всего набора параметров BI (BI-EW, BI-LW и особенно BI-D) у обеих пород на засуху, измеряемую индексом SPEI. Параметр BI-D, который отражает внутренний контраст структуры кольца, может быть особенно важен для понимания различных физиологических стратегий адаптации к водному стрессу у листопадных и вечнозеленых деревьев, как это было показано ранее [15, 21]. Проведение такого анализа в условиях Центральной Якутии, где прогнозируется усиление засушливости, является крайне

важным для восполнения существенного научно-го пробела.

Мы предполагаем, что лиственница и сосна выработали различные механизмы использования влаги и противодействия стрессу, что отразится на моделях реакции их параметров ВІ на климатические факторы и индекс SPEI [13].

Таким образом, цель данного исследования заключается в следующем:

1. Количественно оценить и сравнить, как параметры ВІ лиственницы Каяндера и сосны обыкновенной реагируют на изменения температуры и количества осадков в пространстве и времени.

2. Определить различия в чувствительности этих двух древесных пород к засухе на разных временных масштабах (SPEI) и выделить ключевые периоды, в которые они реагируют наиболее остро.

Материалы и методы

Исследуемая территория находится в Лено-Амгинском междуречье, в Центральной Якутии. Уникальный рельеф этой местности сформировался под воздействием семиаридного климата и термокарстовых процессов. Он представляет собой сложный террасовый комплекс долины Лены, где на высоких террасах находятся аласные формы, достигающие глубины 15–20 м [23]. Климат здесь резко-континентальный, со средней годовой температурой $-8...-10^{\circ}\text{C}$, годовым количеством осадков 200–300 мм, экстремальными сезонными контрастами (средние температуры января $-38...-46^{\circ}\text{C}$, июля $+16...+19^{\circ}\text{C}$) и летним максимумом осадков (60–65 % годовой суммы) [24]. В таких условиях мощная многолетняя мерзлота играет ключевую роль. Она определяет гидротермический режим, инициирует криогенные процессы, такие как пучение и термокарст, и, таким образом, влияет на особенности почвообразования и современной геоморфодинамики [25]. Растительный покров в основном представлен среднетаежными лиственничными лесами, в которых преобладает лиственница Каяндера (*Larix cajanderi* Mayr). Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) встречается реже, в основном на хорошо дренированных песчаных террасах [26].

При проведении исследования были использованы данные о месячной температуре воздуха и сумме осадков, полученные с метеостанций, расположенных в исследуемом районе и имеющих продолжительные непрерывные наблюдения: Тюнгюлю ($62^{\circ}12'$ с.ш., $130^{\circ}38'$ в.д.) и Чурапча ($62^{\circ}01'$ с.ш., $132^{\circ}36'$ в.д.). Период наблюдений

охватывает временной интервал с 1966 по 2018 г. (52 года). Для комплексной оценки уровня влажности и степени водного стресса в рамках исследования был рассчитан стандартизованный индекс SPEI. Потенциальная эвапотранспирация оценивалась с использованием метода Торнтвейта. Затем были сформированы ряды SPEI для трех временных периодов: 3 месяца (SPEI-3), 6 месяцев (SPEI-6) и 12 месяцев (SPEI-12). Это позволило изучить различные аспекты динамики засухи – от сезонной до межгодовой [9].

В период с 2023 по 2024 г. на территории Лено-Амгинского междуречья, расположенного в двух районах, которые мы условно обозначили как центральный (Ц) и восточный (В), был собран дендро-хронологический материал (рис. 2).

В общей сложности было исследовано 13 пробных площадок, представляющих различные типы леса. В течение полевых сезонов на каждой пробной точке по стандартной методике были собраны образцы древесины – керны – с 22 деревьев на высоте ствола 1,3 м. После фиксации и шлифовки в лабораторных условиях образцы кернов были оцифрованы с помощью высокоточного планшетного сканера с разрешением 3200 dpi. Полученные цветные цифровые изображения были проанализированы с помощью программы CooRecorder 9.3.1. С ее помощью были определены границы между ранней и поздней древесиной для каждого годичного кольца. Затем были рассчитаны средние значения интенсивности отражения синего света для каждой зоны, которые были обозначены BI-EW и BI-LW. Все ряды данных ВІ были перепроверены для точности их временной привязки и стандартизированы с помощью отрицательной экспоненциальной функции или сглаживающего сплайна, охватывающего две трети длины ряда. Это исключило ошибку возрастных изменений роста и сохранило межгодовую вариативность, связанную с климатом. Индекс контрастности структуры годичного кольца (BI-D) получали как разницу между стандартизированными BI-EW и BI-LW. В итоге создано 127 рядов для лиственницы Каяндера и 98 для сосны обыкновенной.

Для сравнения климатических стратегий двух видов деревьев – лиственницы и сосны были сформированы региональные усредненные ряды параметров ВІ для каждой породы. Эти ряды были получены путем объединения данных со всех пробных площадок в каждом районе. Анализ включал два основных этапа:

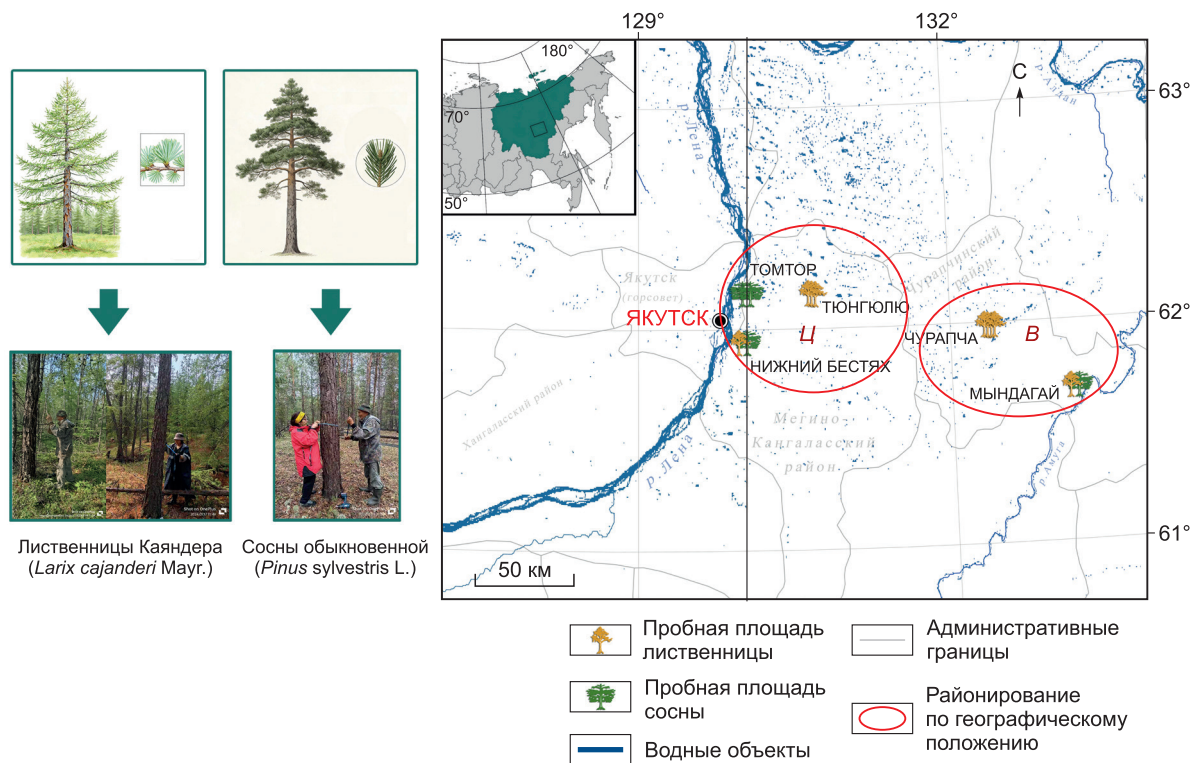


Рис. 2. Карта района исследований и расположения пробных площадок

Fig. 2. Map of the research area illustrating the locations of the sampling sites

1. Анализ климатического отклика: рассчитаны коэффициенты корреляции Пирсона между регионально-усредненными рядами параметров ВІ (ВІ-ЕW, ВІ-ЛW, ВІ-D) и сезонными климатическими факторами, такими как температура и осадки.

2. Анализ отклика на засуху: затем были определены помесечные коэффициенты корреляции между регионально-усредненными рядами параметров ВІ и многомасштабными индексами SPEI (SPEI-3, SPEI-6, SPEI-12). Анализируемый период охватывал промежуток с января предыдущего года по декабрь текущего. Вся обработка и анализ данных проводились с помощью программы R с использованием пакетов dplR, treeclim и SPEI.

Результаты и обсуждение

Основные характеристики пробных площадей и рядов ВІ. В рамках данного исследования были проанализированы данные дендрохронологических исследований, полученные с 13 пробных площадок, расположенных в центральном и восточном районах Центральной Якутии (см. рис. 2, табл. 1). Центральный район включает

семь пробных площадей (участков): Тюнгилю (TUKL1, TUKL2, TUKL3), Томтор (TOMP1, TOMP2) и Нижний Бестях (NBL, NBP). К восточному району относятся шесть пробных площадей: Чурапча (CHAL1, CHAL2, CHAL3, CHAL4) и Мындагай (AML, AMP).

Реакция параметров ВІ на климатические факторы. Корреляционный анализ позволил выявить различия в реакции параметров ВІ лиственницы Каяндера и сосны обыкновенной на различные климатические факторы.

Все построенные ряды ВІ успешно прошли тест на общий временной интервал, известный как COFECNA (Common Period Analysis). Значения выражаемого популяционного сигнала EPS (Expressed Population Signal) превысили пороговый уровень 0,85 для обоих видов: лиственница Каяндера – $0,965 \pm 0,034$, сосна обыкновенная – $0,958 \pm 0,042$. Это свидетельствует о наличии сильного общего климатического сигнала в рядах, который можно использовать для дальнейшего анализа.

Доля дисперсии, объясняемая первой главной компонентой (ПК1), составила в среднем 65,74 % для лиственницы и 76,24 % для сосны.

Таблица 1

Основные характеристики пробных площадей в центральном и восточном районах

Table 1

Main characteristics of sample plots in the central and eastern subregions

Характеристика	Центральный (Ц) район			Восточный (В) район	
	Тюнгюлю	Томтор	Нижний Бестях	Чурапча	Мындагай
Код пробных площадок	TUKL1-3	TOMP1-2	NBL, NBP	CHAL1-4	AML, AMP
Координаты	62°09'37,3" с.ш. 130°40'20,2" в.д.	62°09'39,2" с.ш. 130°02'33,2" в.д.	61°55'17,1" с.ш. 129°58'31,5" в.д.	61°56'06,8" с.ш. 132°29'34,0" в.д.	61°39'52,8" с.ш. 133°14'00,7" в.д.
Вид дерева	<i>Larix cajanderi</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Larix cajanderi</i> / <i>Pinus sylvestris</i>	<i>Larix cajanderi</i>	<i>Larix cajanderi</i> / <i>Pinus sylvestris</i>
Высота над уровнем моря, м	139–155	151–153	151	160–206	159
Расстояние до р. Лена, км	39,85–43,02	6,96–7,01	5,22	135,67–137,44	190,33
Средний обхват ствола, см	86,0–97,5	91,7–92,3	75,4 / 94,3	80,0–101,9	134,7 / 109,0
Высота дерева, м	10,8–11,7	9,0–10,4	9,2 / 9,8	8,9–11,8	11,3 / 9,9
Длина возрастного ряда BI, лет	132–163	131–228	156 / 215	116–253	264 / 163

Это свидетельствует о том, что вариабельность роста обоих видов деревьев в значительной степени контролируется единым доминирующим климатическим фактором.

Лиственница Каяндера в центральном и восточном районах: климатические факторы роста. В центральном районе рост лиственницы (параметры BI-EW, BI-LW) отрицательно коррелирует с весенней температурой текущего года (–0,41 до –0,56, $p < 0,001$) и летней температурой предыдущего года (–0,44 до –0,56). Отмечена положительная корреляция с зимними осадками (до 0,49, $p < 0,01$). Параметр BI-D также положительно связан с зимними осадками (0,28–0,38, $p < 0,05$), но слабо реагирует на температуру и осадки в другие сезоны.

В восточном районе параметры BI-EW и BI-LW также отрицательно коррелируют с весенней температурой текущего года и летней температурой предыдущего года (до –0,56, $p < 0,001$), а также положительно – с зимними осадками (до 0,42). Реакция BI-D на климат варьирует: на одной площади (AML) наблюдается отрицательная связь с температурой (до –0,51), на других (CHAL3) – слабая или незначительная положительная (рис. 3).

Ксилогенез сосны обыкновенной в центральном и восточном районах различается. В центральном районе формирование древесины сосны в значительной степени определяется климатическими условиями (рис. 4).

На пробной площадке NBP параметры BI-EW и BI-LW положительно коррелируют с температурой весны и зимы текущего года ($r = 0,37$ –0,53,

$p < 0,01$). На TOMP1 и TOMP2 эти параметры отрицательно связаны с зимними осадками (r = от –0,34 до –0,49, $p < 0,01$). Параметр BI-D на NBP положительно коррелирует с зимней температурой текущего года ($r = 0,40$, $p < 0,01$), на TOMP1 – отрицательно ($r = -0,31$), а на TOMP2 связь слабая.

В восточном районе (AMP) параметры BI-EW и BI-LW положительно коррелируют с весенней и зимней температурами текущего года (0,61 и 0,60), а также отрицательно – с зимними осадками ($r \approx -0,30$). Параметр BI-D положительно коррелирует с весенней температурой текущего года ($r = 0,58$) и летними осадками ($r = 0,31$), отрицательно – с зимними осадками ($r = -0,28$).

Реакция параметров BI на многомасштабную засуху (SPEI). Анализ, проведенный с помощью индекса SPEI, который учитывает разные временные периоды, позволил обнаружить уникальные физиологические и экологические стратегии, используемые лиственницей Каяндера (*Larix cajanderi*) и сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris*) в условиях водного стресса.

Лиственница Каяндера демонстрирует мгновенный и ярко выраженный отклик на засуху. Параметры BI-EW и BI-LW наиболее тесно коррелируют со среднесрочными и краткосрочными индексами засухи (SPEI-3 и SPEI-6) в середине и конце текущего вегетационного сезона, например, в июле, а также в конце вегетационного периода предыдущего года (август–октябрь). Однако корреляция с индексом долгосрочного водного баланса (SPEI-12) оказалась менее выраженной.

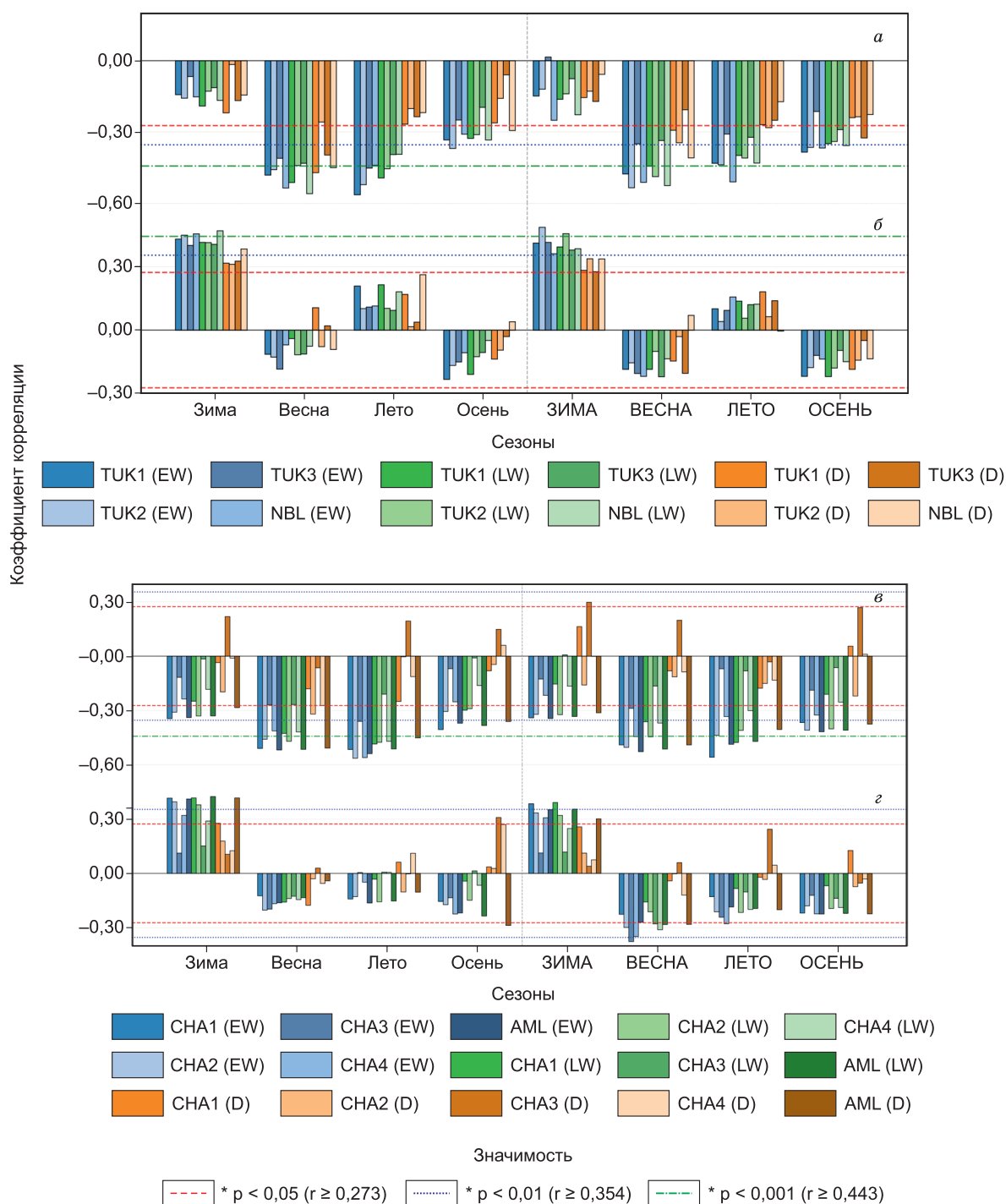


Рис. 3. Связь интенсивности отражения синего света (BI-EW, BI-LW, BI-D) лиственницы с температурой воздуха (а, е) и количеством осадков (б, з) в центральном (а, б) и восточном (е, з) районах

Fig. 3. Relationship between blue intensity (BI-EW, BI-LW, BI-D) of *Larix cajanderi* and air temperature (а, е) and precipitation (б, з) in the central (а, б) and eastern (е, з) subregions

Сосна обыкновенная, в отличие от лиственницы Каяндера, проявляет способность реагировать на засуху в разные периоды времени. Ключевой параметр сосны обыкновенной BI-D не только кор-

релирует со значениями индексов SPEI-3 и SPEI-6, но и демонстрирует устойчивую положительную корреляцию с SPEI-12. Это свидетельствует о том, что рост сосны находится под комбинированным

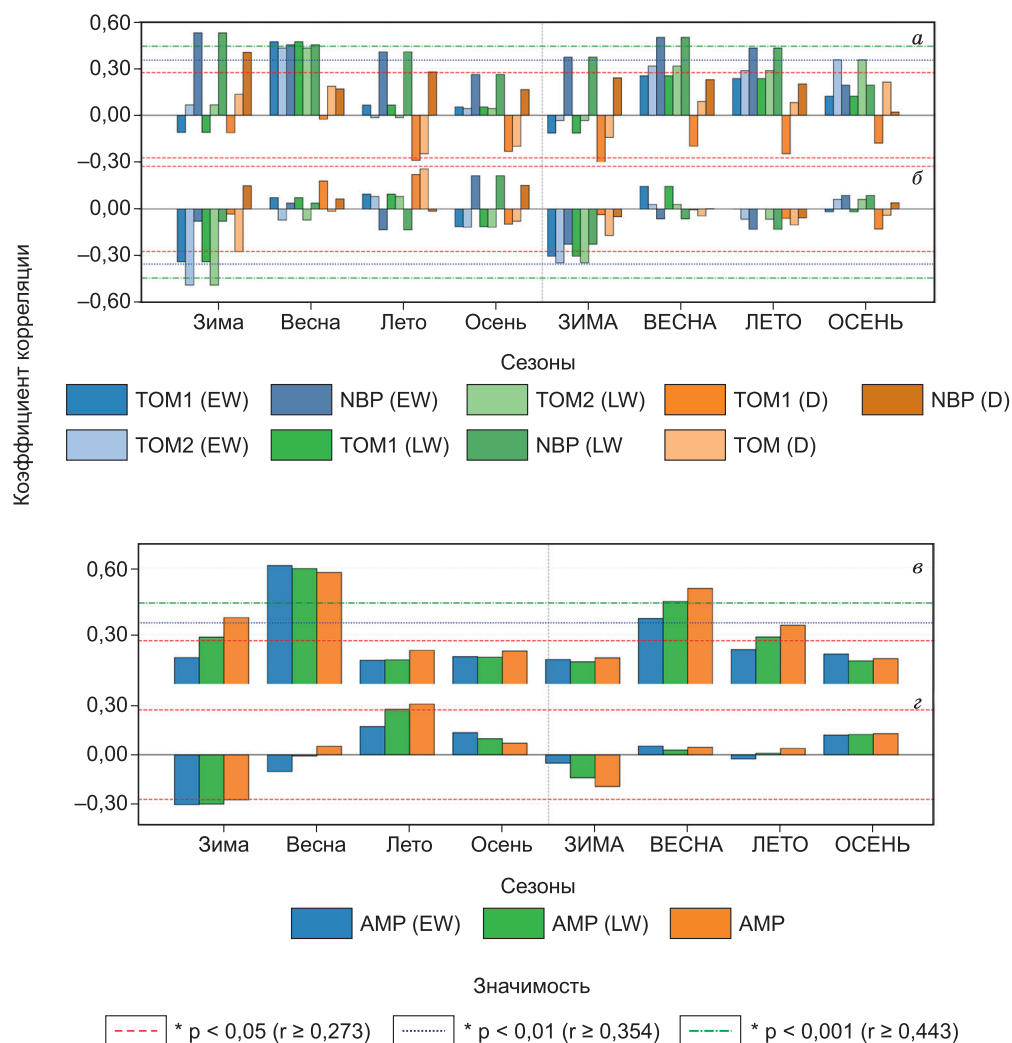


Рис. 4. Связь интенсивности отражения синего света (BI-EW, BI-LW, BI-D) у сосны обыкновенной с температурой воздуха (а, в) и осадками (б, з) в этих же районах

Fig. 4. Relationship between blue intensity (BI-EW, BI-LW, BI-D) of *Pinus sylvestris* and air temperature (а, в) and precipitation (б, з) in the corresponding regions

воздействием колебаний влажности на разных временных масштабах: от квартального до межгодового. У этого вида есть определенная буферная способность или «память» о засухе.

Сравнение двух районов показало, что в более суровых климатических условиях восточного района реакция древесных пород на засуху в целом более выражена (табл. 2).

Физиолого-экологические основы различных адаптационных стратегий. В ходе нашего исследования мы отчетливо выделили два различных подхода к выживанию. Как хвоепадное дерево лиственница Каяндера ежегодно расходует значительные ресурсы на формирование новой кроны. В начале вегетационного сезона она силь-

но зависит от запасов углеводов, накопленных за предыдущий год, а также от почвенной влаги, образующейся в результате таяния снега [17]. Высокие летние температуры способствуют увеличению транспирации, что быстро истощает ограниченные ресурсы почвенной влаги. Это, в свою очередь, ограничивает как растяжение клеток (снижение BI-EW), так и утолщение их стенок (снижение BI-LW). Данный факт согласуется с ранее полученными выводами о том, что рост лиственницы в этом регионе может подвергаться стрессу, вызванному высокими летними температурами [11, 18].

Сосна обыкновенная, в отличие от других деревьев, демонстрирует высокую физиологическую

Сравнение физиолого-экологических стратегий лиственницы Каяндера и сосны обыкновенной на основе параметров BI

Table 2

Comparison of physiological and ecological strategies of *Larix cajanderi* and *Pinus sylvestris* based on BI parameters

Характеристика	Лиственница Каяндера (<i>Larix cajanderi</i>)	Сосна обыкновенная (<i>Pinus sylvestris</i>)
Основной лимитирующий фактор	Высокие температуры в вегетационный период вызывают водный стресс у растений, усиливая испарение влаги с листьев	Водообеспеченность в течение вегетационного периода (текущие осадки)
Ключевой источник влаги	Запасы влаги зимнего периода (таяние снежного покрова)	Количество осадков, выпавших в текущем вегетационном периоде
Чувствительность к засухе	Очень чувствительна к засухе в средней и краткосрочной (сезонной) перспективе	Реагирует на засуху в различных временных масштабах, обладает буферной способностью
Реакция ксилогенеза	Одновременное подавление образования ранней и поздней древесины (совместное уменьшение BI-EW и BI-LW)	В основном, контраст между ранней и поздней древесиной регулируется за счет изменения соотношения между BI-D

устойчивость. Благодаря своей вечнозеленой природе, сосна может осуществлять фотосинтез уже в самом начале вегетационного сезона [4]. Положительная корреляция между индексом BI-D (структурными различиями между ранней и поздней древесиной) и осадками в течение этого периода указывает на то, что при достаточном увлажнении сосна способна формировать раннюю древесину с более крупными проводящими элементами, что обеспечивает высокую гидравлическую эффективность. В условиях засухи сосна регулирует строение ксилемы, снижая индекс BI-D (уменьшая структурные различия между ранней и поздней древесиной), что, вероятно, является стратегией балансировки между эффективностью проведения воды и риском эмболии [13]. Реакция на межгодовой индекс SPEI (степень влияния засухи на древесину) позволяет предположить, что сосна обладает более глубокой корневой системой, которая позволяет ей использовать влагу из глубже расположенных почвенных горизонтов. Это обеспечивает ей большую устойчивость к краткосрочным засухам [17].

Роль эффектов памяти в адаптации к засухе на разных временных периодах. Исследования показали, что у сосны обыкновенной есть способность сохранять информацию о долгосрочном водном балансе. Это может происходить благодаря перераспределению неструктурных углеводов или гормональной регуляции дифференциации камбиальных клеток [5, 6].

Однако у лиственницы Каяндера не наблюдается подобного долгосрочного мнемонического эффекта. Вероятно, это связано с ее листопадностью и большей зависимостью от текущих условий роста. Это различие в физиологических стратегиях между двумя видами подчеркивает уникальность каждого из них [11, 17].

Экологические последствия будущих климатических изменений. Согласно прогнозам, в Центральной Якутии ожидается дальнейшее потепление, особенно в зимний период. Однако режим осадков остается неопределенным [1]. На основе наших выводов можно сделать следующие предположения:

Для лиственницы Каяндера изменения в количестве зимних осадков, такие как уменьшение толщины снежного покрова или более раннее таяние снега весной, могут привести к снижению ключевого запаса влаги. Более частые летние периоды жары и засухи будут непосредственно и существенно влиять на процесс ксилогенеза, что может привести к замедлению роста и снижению конкурентоспособности в засухоуязвимых экосистемах [11, 18].

Сосна обыкновенная отличается уникальной способностью напрямую использовать текущие осадки в период вегетации, что делает ее менее зависимой от зимних запасов влаги. Ее физиологическая устойчивость обеспечивается способностью регулировать биологический индекс сухости (BI-D) в ответ на засуху [13]. Однако

длительные многолетние засухи могут превышать пределы ее буферной способности, что приводит к снижению роста [9].

Различия в реакции на засуху могут стать определяющими факторами в эволюции состава лесных сообществ в будущем. В районах, где засушливость возрастает, относительное преимущество сосны обыкновенной может увеличиваться, что, в свою очередь, повлияет на региональный углеродный цикл, гидрологические процессы и биоразнообразие [3, 4].

Заключение

Для изучения адаптации лиственницы Каяндера и сосны обыкновенной к засухе в Центральной Якутии объединили данные о синем свете годовых колец (BI) и стандартизованном индексе засухи (SPEI). Основные выводы можно сформулировать следующим образом:

1. Рост лиственницы Каяндера значительно замедляется при высоких температурах вегетационного периода. Формирование ее ксилемы (параметры BI-EW и BI-LW) зависит от запасов влаги в предыдущей зиме и оказывается чрезвычайно чувствительным к сезонным засушливым явлениям. Это делает физиологическую стратегию лиственницы Каяндера более уязвимой.

2. Сосна обыкновенная, напротив, устойчива к высоким температурам и хорошо адаптируется к колебаниям влажности текущего вегетационного периода, регулируя структуру годового кольца. Она демонстрирует высокую устойчивость и гибкость к меняющемуся климату.

Различия стратегий деревьев обусловлены их жизненными формами (листопадные/вечнозеленые) и моделями водопользования (запасы влаги/текущие осадки).

Важнейшим фактором, определяющим различие стратегий лиственницы и сосны, является различие мерзлотных режимов почв занимаемых ими местообитаний. Лиственница, произрастающая на многолетнемерзлых породах, вынуждена адаптироваться к маломощному сезонно-талому слою и низким температурам почвы, формируя поверхностную корневую систему [27, 28]. Сосна же, приуроченная к хорошо дренированным песчаным почвам речных террас и эоловых образований, часто избегает прямого влияния многолетней мерзлоты, что позволяет ей развивать относительно глубокую корневую систему и демонстрировать иную реакцию на климатические факторы [27, 29, 30].

В условиях глобального потепления и участвовавших засух лиственница Каяндера может испытывать более значительное угнетение роста и большее конкурентное давление по сравнению с сосной обыкновенной. Это, в свою очередь, может оказать влияние на изменения, происходящие в бореальных лесах этого региона в процессе сукцессии.

Список литературы / References

1. Gorokhov A.N., Fedorov A.N. Current trends in climate change in Yakutia. *Geography and Natural Resources*. 2018;39(2): 153–161. <https://doi.org/10.1134/S1875372818020087> EDN: MAYOSL
2. Щербakov И.П. *Лесной покров Северо-Востока СССР*. Новосибирск: Наука; 1975. 344 с.
Shcherbakov I.P. *Forest cover of the Northeastern USSR*. Novosibirsk: Nauka; 1975. 344 p. (In Russ.)
3. Андреев В.Н. Растительность Якутии. В кн.: *Атлас сельского хозяйства Якутской АССР*. М.: ГУГК; 1989. 115 с. EDN: UYTEYN
4. Андреев В.Н. Растительность Якутии. В кн.: *Атлас сельского хозяйства Якутской АССР*. М.: ГУГК; 1989. 115 с. EDN: UYTEYN
5. Андреев В.Н. Растительность Якутии. В кн.: *Атлас сельского хозяйства Якутской АССР*. М.: ГУГК; 1989. 115 с. EDN: UYTEYN
6. Тимофеев П.А. *Леса Якутии: состав, ресурсы, использование и охрана*. Новосибирск: Изд-во СО РАН; 2003. 194 с. EDN: QKMFQP
7. Timofeev P.A. *Forests of Yakutia: composition, resources, utilization and protection*. Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2003. 194 p. (In Russ.) EDN: QKMFQP
8. Fritts H.C. *Tree rings and climate*. London: Academic Press; 1976. 567 p.
9. Hartig R. *Lehrbuch der anatomie und physiologie der pflanzen*. Berlin: J. Springer; 1888. 308 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-99416-6>
10. Björklund J.A., Gunnarson B.E., Seftigen K., et al. Blue intensity and density from northern Fennoscandian tree rings, exploring the potential to improve summer temperature reconstructions with earlywood information. *Climate of the Past*. 2014;10(2):877–885. <https://doi.org/10.5194/cp-10-877-2014> EDN: SOQFZB
11. Campbell R., McCarroll D., Loader N.J., et al. Blue reflectance in *Pinus sylvestris*: Application, validation and climatic sensitivity of a new palaeoclimate proxy for tree ring research. *The Holocene*. 2007;17(6):821–828. <https://doi.org/10.1177/0959683607080523> EDN: MFHWDP
12. Vicente-Serrano S.M., Beguería S., López-Moreno J.I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*. 2010;23(7):1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
13. 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. EDN: NXQNAJ
14. Nikolaev A. N., Isaev A. P., Fedorov P. P. Radial increment of larch in Central Yakutia as defendant on climate change over the past 120 years. *Russian Journal of Ecology*. 2011;42(4): 263–269. EDN: OHRPXX
15. 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; 76:29. 15 p.
12. Kirdyanov A.V., Prokushkin A.S., Tabakova M.A. Tree-ring growth of Gmelin larch under contrasting local conditions in the north of Central Siberia. *Dendrochronologia*. 2013;31(2): 114–119. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2012.10.003> EDN: RFBPXX
 13. Gindl W., Grabner M., Wimmer R. The influence of temperature on latewood lignin content in treeline Norway spruce compared with maximum density and ring width. *Trees*. 2000;14(7):409–414. <https://doi.org/10.1007/s004680000057> EDN: LQJZVH
 14. Bakhtiyorov Z., Chen F., Chen Y., et al. Tree-ring blue-intensity reconstruction of the April–September maximum temperature in the Greater Caucasus region of Georgia since 1780 CE. *International Journal of Biometeorology*. 2025;69(7): 1753–1768. <https://doi.org/10.1007/s00484-025-02930-7> EDN: PXAPEI
 15. Komarova A.V., Kukarskih V.V., Bubnov M.O., et al. Application potential of the blue intensity parameter for estimation of tree radial growth climatic response on the Crimean Peninsula. *Russian Journal of Ecology*. 2023;54(5):412–422. <https://doi.org/10.1134/s1067413623050065> EDN: VYGIVX
 16. Семеняк Н.С., Соломина О.Н., Долгова Е.А., Мацковский В.В. Климатический сигнал в различных параметрах годичных колец сосны обыкновенной на Соловецком архипелаге. *Геосферные исследования*. 2022;(4):149–164. <https://doi.org/10.17223/25421379/25/10> EDN: CQJWFY
 - Semenyak N.S., Solomina O.N., Dolgova E.A., Matskovsky V.V. Climatic signal in various parameters of Scots pine tree rings on the Solovetsky Archipelago. *Geosphere Research*. 2022;(4):149–164. (In Russ.) <https://doi.org/10.17223/25421379/25/10> EDN: CQJWFY
 17. Вьюхина А.А., Гурская М.А. Интенсивность отражения синего (blue intensity): дендроклиматический потенциал сосны, произрастающей на севере Фенноскандии. *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Биология*. 2022;15(2):244–263. <https://doi.org/10.17516/1997-1389-0385> EDN: XZZGDC
 - Vyukhina A.A., Gurskaya M.A. Dendroclimatic potential of blue intensity-based chronologies of northern Fennoscandia Scots pine. *Journal of Siberian Federal University. Biology*. 2022;15(2):244–263. (In Russ.) <https://doi.org/10.17516/1997-1389-0385> EDN: XZZGDC
 18. Агапова В.В., Кирдянов А.В., Арсак А. Применение метода Blue intensity для дендроклиматических исследований на Алтае. В кн.: *Интеграция науки и образования: современные проблемы, достижения и инновации в области экологии и устойчивого развития: Материалы научной конференции, г. Красноярск, 01–03 ноября 2022 года*. Красноярск: Сибирский федеральный университет; 2022. С. 10–12. EDN: KJGYQF
 - Agapova V.V., Kirdyanov A.V., Arzac A. Application of the Blue intensity method for dendroclimatic research in Altai. In: *Integration of science and education: modern problems, achievements and innovations in the field of ecology and sustainable development: Proceedings of a scientific conference, Krasnoyarsk, 01–03 November 2022*. Krasnoyarsk: Siberian Federal University; 2022, pp. 10–12. (In Russ.) EDN: KJGYQF
 19. Agapova V.V., Arzac A., Kukarskih V.V., et al. Tree-ring blue intensity measurements from treeline sites in the Ural Mountains exhibit a strong summer temperature signal. *Dendrochronologia*. 2024;88:126267.
 20. King K.E., Harley G.L., Maxwell J.T., et al. Reconstructed late summer maximum temperatures for the southeastern United States from tree-ring blue intensity. *Geophysical Research Letters*. 2024;51(13):e2024GL109099
 21. Arzac A., de Quijano D.D., Khotcinskaya 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> EDN: XOXUSW
 22. Десяткин Р.В. Палеогеографические условия почвообразования в Центральной Якутии. В кн.: Федоров А.Н., Иванова Р.Н. (ред.) *Вопросы географии Якутии*. Вып. 11. Якутск: СММК-Мастер; 2013. С. 5–22.
 - Desyatkin R.V. Paleogeographic conditions of soil formation in Central Yakutia. In: Fedorov A.N., Ivanova R.N. (eds.) *Geographical Studies of Yakutia. Issue 11*. Yakutsk: SMIK-Master Publ.; 2013, pp. 5–22. (In Russ.)
 23. Лобанов В.А., Кириллина К.С. *Современные и будущие изменения климата Республики Саха (Якутия)*. СПб.: РГГМУ; 2019. 158 с.
 - Lobanov V.A., Kirillina K.S. *The modern and future climate changes in the Republic of Sakha (Yakutia)*. St. Petersburg: RSHU; 2019. 158 p. (In Russ.)
 24. Десяткин Р.В. Почвенные исследования в Якутии на рубеже XX–XXI вв. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(4):568–573 <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-4-568-573>
 - Desyatkin R.V. Soil Research in Yakutia at the turn of the 20th–21st centuries. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(4):568–573. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-4-568-573>
 25. Уткин А.И. *Леса Центральной Якутии*. М.: Наука; 1965. 208 с.
 - Utkin A.I. *Forests of Central Yakutia*. Moscow: Nauka; 1965. 208 p. (In Russ.)
 26. Абаймов А.П., Милютин Л.И., Лесинский Я.А., et al. *Variability and ecology of Siberian larch species*. Umea: Swedish University of Agricultural Sciences, Dept. of silviculture. 1998. 123 p.
 27. Тимофеев П.А., Исаев А.П., Щербakov И.П. *Леса среднетаежной подзоны Якутии*. Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН; 1994. 140 с.
 - Timofeev P.A., Isaev A.P., Shcherbakov I.P. *Forests of the middle taiga subzone of Yakutia*. Yakutsk: Publishing House of YaSc SB RAS; 1994. 140 p. (In Russ.)
 28. Троева Е.И., Исаев А.П., Черосов М.М., Карпов Н.С. *The Far North: Plant biodiversity and ecology of Yakutia. Series Plant and Vegetation. Vol. 3*. 2010: Springer Dordrecht. P. 385 <https://doi.org/10.1007/978-90-481-3774-9>
 29. Бысыина М.Ф. Систематическая структура локальных флор Лено-Амгинского междуречья (Центральная Якутия). *Вестник Томского государственного университета*. 2009;(322):232–234. EDN LHQQJZ.
 - Bysyina M. F. Systematic structure of local floras of the Lena–Amga interfluvium (Central Yakutia). *Tomsk State University Journal*. 2009;(322):232–234. (In Russ.) EDN LHQQJZ.

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>, ResearcherID: PMQ-5169-2026, Scopus Author ID: 57210581764, SPIN: 7479-2722, e-mail: z461306425@gmail.com

НИКОЛАЕВ Анатолий Николаевич, доктор биологических наук, доцент, 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

Вклад авторов

Чжан Сяохун – разработка концепции, методология, проведение исследования, верификация данных, создание черновика, редактирование рукописи, визуализация; **Николаев А.Н.** – разработка концепции, методология, ресурсное обеспечение исследования, руководство исследованием, финансирование, администрирование проекта

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>, ResearcherID: PMQ-5169-2026, Scopus Author ID: 57210581764, SPIN: 7479-2722, e-mail: z461306425@gmail.com

NIKOLAEV, Anatoly Nikolaevich, Dr. Sci. (Biol.), Associate Professor, 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

Authors' contribution

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

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 20.11.2025

Поступила после рецензирования / Revised 12.02.2026

Принята к публикации / Accepted 26.02.2026