УДК 574.24

**Влияние летних температур на радиальный прирост хвойных в условиях арктического потепления**

**К. В. Акулинина1**Научный руководитель А. Арсак1, канд. биол. наук   
*1Сибирский федеральный университет*

© Акулинина К. В., Арсак А., 2025

Арктические экосистемы испытывают беспрецедентное потепление, скорость которого почти в четыре раза превышает глобальные темпы. Этот процесс оказывает глубокое влияние на водный баланс, термическую динамику мерзлых почв и, как следствие, на структуру и функционирование растительных сообществ. В последние десятилетия в северных широтах наблюдаются такие изменения, как таяние мерзлоты, сокращение продолжительности снежного покрова и сдвиги в углеродных и гидрологических циклах. Особенно уязвимым является лесотундровый экотон - переходная зона между тундрой и бореальными лесами, где даже небольшие повышения температуры могут вызывать значительные изменения в распределении и росте древесной растительности. Понимание того, как деревья реагируют на эти климатические сдвиги, имеет ключевое значение для прогнозирования будущих изменений экосистем и их роли в глобальном климатическом балансе.

Целью данного исследования было изучение влияния климатических факторов, в первую очередь температуры, на радиальный прирост хвойных видов в условиях зоны сплошной мерзлоты за Полярным кругом. Мы стремились выявить основные климатические драйверы роста, оценить их пространственную и временную динамику, а также определить, как эти факторы могут способствовать адаптации деревьев к продолжающемуся потеплению. Исследование охватило период с 1966 по 2021 годы, что позволило проследить долговременные тренды и изменения в климатической чувствительности.

Объектами исследования стали четыре вида хвойных: *Pinus sylvestris* (сосна обыкновенная), *Larix sibirica* (лиственница сибирская), *Larix gmelinii* (лиственница Гмелина) и *Larix* *cajander*i (лиственница Каяндера). Пробы собирались на пяти участках вдоль широтного градиента от 27°E до 166°E: Apatity (**APA**, Кольский полуостров) для *P. sylvestris*; Polar Urals (**PUR**) для *L. sibirica*; Khatanga (**KHA**) для *L. gmelinii*; Chokurdakh (**CHO**) и Bilibino (**BIL**) для *L. cajanderi*. Всего было отобрано 137 деревьев (от 18 до 35 на участок) с использованием 5 - мм бура на высоте 1,3 м. Для анализа применялся дендроклиматический подход: измерялись ширины годичных колец (TRW), строились стандартизированные хронологии с помощью программ CooRecorder и ARSTAN, а затем проводился корреляционный анализ с месячными данными температуры и осадков от ближайших метеостанций (Kandalaksha, Salekhard, Khatanga, Chokurdakh, Ostrovnoye). Дополнительно использовались скользящие корреляции с шагом 25 лет для оценки временной стабильности климатических сигналов. Климатические данные охватывали период с сентября предыдущего года по сентябрь текущего, чтобы учесть влияние условий как текущего, так и предшествующего сезонов.

Результаты показали, что летняя температура является основным фактором, ограничивающим радиальный прирост деревьев на всех пяти участках. Наиболее значимыми оказались температуры июня и июля, причём их влияние варьировало в зависимости от региона и вида. На западном участке **APA** *P. sylvestris* демонстрировала сильную положительную корреляцию с июльскими температурами (r = 0,41, *p <* 0,01), что связано с более мягкими климатическими условиями и глубоким активным слоем почвы (1 - 2 м). В центральных и восточных районах (**PUR**, **KHA**, **CHO**, **BIL**) виды Larix показали выраженную чувствительность к июньскому теплу, с максимальными корреляциями на **PUR** (r = 0,54) и **KHA** (r = 0,43, *p <* 0,01). На восточных участках (**CHO**, **BIL**) влияние июня оставалось значимым, но несколько ослабленным (r = 0,24 - 0,41), что может быть обусловлено экстремальной континентальностью и коротким вегетационным периодом (70 - 100 дней). Осадки, напротив, играли второстепенную роль: их влияние было слабым или отрицательным, за исключением редких положительных сигналов (например, на **APA** и **BIL**), что указывает на достаточность влаги от снеготаяния в большинстве случаев.

Скользящие корреляции выявили усиление влияния температурных аномалий в последние десятилетия, особенно заметное на фоне роста среднесуточных температур. Например, на **PUR** и **KHA** корреляции с июньско - июльскими температурами оставались высокими до 1990 - х годов (r = 0,60 - 0,65), но затем слегка снизились (r = 0,40 - 0,45), что может указывать на адаптацию к потеплению или появление других лимитирующих факторов, таких как деградация мерзлоты. На **BIL** наблюдался противоположный тренд: рост корреляции с июня - июля с r = 0,40 до r = 0,55 за последние 30 лет. Эти изменения подтверждают, что повышение температур стимулирует радиальный прирост, вероятно, за счёт увеличения фотосинтетической активности и доступности воды при таянии мерзлоты [1]. Однако на **CHO** температурный сигнал ослаб после 1980 - х (r < 0,20), что может быть связано с локальными гидрологическими сдвигами или экстремальными условиями.

Обсуждение результатов подчёркивает, что физиологические особенности видов играют ключевую роль в их реакции на климат. *P. sylvestris*, как вечнозелёный вид, использует более длинный сезон для фотосинтеза, что объясняет её зависимость от июльского тепла на западе. Лиственницы, напротив, полагаются на быстрое развертывание листвы в июне, что критично в условиях короткого лета и сплошной мерзлоты [2]. Вторичная роль осадков согласуется с исследованиями, показывающими, что в высоких широтах влага от снеготаяния часто перекрывает потребности деревьев [3]. Тем не менее, локальные положительные эффекты осадков на **APA** и **BIL** намекают на возможное усиление их значения в будущем, если таяние мерзлоты изменит гидрологический режим. Эти данные свидетельствуют о сложной взаимосвязи климатических факторов и физиологии деревьев, которая может привести к изменениям в структуре лесотундровых экосистем.

В заключение, данное исследование подтверждает доминирующую роль летних температур в формировании радиального прироста хвойных в зоне сплошной мерзлоты. *P. sylvestris* на западе реагирует на июльское тепло, тогда как Larix spp. на востоке зависят от июньских температур, что отражает их адаптацию к региональным условиям. Усиление влияния температурных аномалий в последние десятилетия указывает на продолжающуюся адаптацию к потеплению, хотя осадки остаются второстепенным фактором. Эти результаты имеют важное значение для прогнозирования динамики лесотундры и её вклада в углеродный цикл в условиях изменения климата.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и образования Российской Федерации [ФСРЗ - 2020 - 0014].

**Список литературы**

1. Vaganov E. A., Hughes M. K., Kirdyanov A. V. et al. Influence of snowfall and melt timing on tree growth in subarctic Eurasia // Nature. 1999. № 400. С. 149 - 151.
2. Kirdyanov A. V., Treydte K. S., Nikolaev A. et al. Climate signals in tree - ring width, density and δ13C from larches in Eastern Siberia (Russia) // Chemical Geology 252. 2008. С. 31 - 41.
3. Walsh J. E., Overland J. E., Groisman P. Y. et al. Ongoing Climate Change in the Arctic //Springer. 2011. № 46. С. 6 - 16.
4. МГЭИК, 2007: Отчет Межправительственной группы экспертов по изменениям климата, 2007 [Электронный ресурс]. URL: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment - report/ar4/syr/ar4\_syr\_ru.pdf [дата обращения 23.04.2025].

УДК 574.24

**INFLUENCE OF SUMMER TEMPERATURES ON THE RADIAL GROWTH OF CONIFERS IN CONDITIONS OF ARCTIC WARMING**

**K. V. Akulinina1**

Scientific supervisor A. Arzaс,1 Ph.D. in Biology

*1Siberian Federal University*

Arctic ecosystems are experiencing unprecedented warming, at a rate nearly four times greater than the global rate. This process is profoundly effecting the water balance, the thermal dynamics of frozen soils, and, consequently, the structure and functioning of plant communities. In recent decades, northern latitudes have experienced significant changes, including permafrost thawing, reduced snow cover duration, and shifts in carbon and hydrological cycles. Particularly vulnerable is the forest-tundra ecotone-the transition zone between tundra and boreal forests-where even small temperature increases can significantly alter the distribution and growth of woody vegetation. Understanding how trees respond to these climatic shifts is crucial for predicting future ecosystem changes and their role in the global climate balance.

The aims to investigate the influence of climatic factors, primarily temperature, on the radial growth of coniferous species in the permafrost zone above the Arctic Circle. Focusing on identifying the main climatic growth drivers, assessing their spatial and temporal dynamics, and determining how these factors may facilitate tree adaptation to ongoing warming.

The study evaluates four conifer species: *Pinus sylvestris L.*, *Larix sibirica Ledeb*, *Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen and *Larix cajanderi Mayr*., across five sites along a longitudinal transect from 27°E to 166°E. Sampling sites included Apatity (**APA**, Kola Peninsula) for *P. sylvestris*; Polar Urals (**PUR**) for *L. sibirica*; Khatanga (**KHA**) for *L. gmelinii*; Chokurdakh (**CHO**) and Bilibino (**BIL**) for *L. cajanderi*. A total of 137 trees were sampled using a 5-mm increment borer. A dendroclimatic approach was used, with tree-ring widths (TRW) measured using CooRecorder, and standardized chronologies in ARSTAN. Correlation analyses were carried out with monthly temperature and precipitation data from the nearest weather stations (Kandalaksha, Salekhard, Khatanga, Chokurdakh, Ostrovnoye). Correlations covered the period from September of the previous year to September of the current one. In addition, 25-year (one-year step) moving correlations, based on mean monthly temperatures, were used to assess the temporal stability of TRW climate signals.

The results showed that summer temperature was the main factor limiting tree radial growth at all sites. June and July temperatures were the most significant, with their influence varying depending on the region and species. At the western **APA** site, *P. sylvestris* showed a strong positive correlation with July temperatures (r = 0.41, *p <* 0.01), likely due to the milder climatic conditions and a deep active soil layer (1–2 m). In the central and eastern regions (**PUR**, **KHA**, **CHO**, **BIL**), Larix species showed a pronounced sensitivity to June temperatures, with the highest correlations occurring at **PUR** (r = 0.54, *p<* 0.01) and **KHA** (r = 0.43, *p <* 0.01). In the easternmost sites (**CHO, BIL**), June temperature influence remained significant but weaker (r = 0.24–0.41, *p<* 0.01), possibly due to the extreme continentality and the short vegetation period (70–100 days Precipitation played a secondary role, with correlations being mostly weak, but in rare cases significant negative or positive. Rare positive signals (e.g., on **APA** and **BIL**), suggested sufficient moisture from snowmelt in most cases.

Moving correlations revealed an increase in the influence of temperatures in recent decades, particularly in response to rising mean monthly temperatures. At **PUR** and **KHA**, correlations with June-July temperatures remained high until the 1990s (r = 0.60–0.65) but then declined slightly (r = 0.40–0.45). Similarly, at **CHO**, the temperature signal has weakened since the 1980s (r < 0.20), possibly relating to warming temperature and more favorable conditions for growth [1]. On the contrary, at **BIL** the correlations with June-July temperatures increased from r = 0.40 to r = 0.55 over the past 30 years, potentially suggesting divergence at this site.

The physiological characteristics of each species played a key role in their response to climate. *P. sylvestris*, as an evergreen species, benefits from a longer photosynthetic season, which may explain its dependence on July temperature at **APA**. In contrast, *Larix* species rely on rapid leaf unfolding in June, which is critical for growth in short-summer environments with continuous permafrost [2]. The weak influence of precipitation aligns with previous studies showing that at high latitudes, snowmelt typically provides sufficient moisture [3]. However, the local positive effects of precipitation on **APA** and **BIL** hint at a possible increase in their importance in the future if permafrost thaw alters the hydrological regime. These findings highlight the complex interactions between climatic factors and tree physiology, which could drive structural changes in the forest-tundra ecosystems as warming continues.

In conclusion, this study confirms the dominant role of summer temperatures in determining conifer radial growth in the continuous permafrost zone. *P. sylvestris* in the west is most responsive to July temperatures, while *Larix* sp. in the east depend on June temperatures, reflecting their adaptation to regional climatic conditions. The increasing influence of temperature anomalies in recent decades suggests ongoing adaptation to warming, although precipitation remains a secondary factor. These results have important implications for predicting forest-tundra dynamics and its contribution to the carbon cycle under climate change.

This work was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation [FSRZ-2020-0014].

**References**

1. Vaganov E. A., Hughes M. K., Kirdyanov A. V. et al. Influence of snowfall and melt timing on tree growth in subarctic Eurasia // Nature. 1999. № 400. С. 149 - 151.
2. Kirdyanov A. V., Treydte K. S., Nikolaev A. et al. Climate signals in tree - ring width, density and δ13C from larches in Eastern Siberia (Russia) // Chemical Geology 252. 2008. С. 31 - 41.
3. Walsh J. E., Overland J. E., Groisman P. Y. et al. Ongoing Climate Change in the Arctic //Springer. 2011. № 46. С. 6 - 16.
4. МГЭИК, 2007: Отчет Межправительственной группы экспертов по изменениям климата, 2007 [Электронный ресурс]. URL: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment - report/ar4/syr/ar4\_syr\_ru.pdf [дата обращения 23.04.2025].