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. Arsak,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 having profound effects on 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 changes such as 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 increases in temperature can cause significant changes in the distribution and growth of woody vegetation. Understanding how trees respond to these climatic shifts is key to predicting future ecosystem changes and their role in the global climate balance.

The aim of this study was to investigate the influence of climatic factors, primarily temperature, on the radial growth of coniferous species in the permafrost zone above the Arctic Circle. We aimed to identify the main climatic growth drivers, assess their spatial and temporal dynamics, and determine how these factors may facilitate tree adaptation to ongoing warming.

The objects of the study were four conifer species: *Pinus sylvestris*, *Larix sibirica*, *L. gmelinii* and *L. cajanderi* . Samples were collected at five sites along the latitudinal gradient from 27°E to 166°E: 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 (18 to 35 per plot) were sampled using a 5 mm drill at a height of 1.3 m. A dendroclimatic approach was used for the analysis: tree ring widths (TRW) were measured, standardized chronologies were constructed using CooRecorder and ARSTAN programs, and then correlation analysis was carried out with monthly temperature and precipitation data from the nearest weather stations (Kandalaksha, Salekhard, Khatanga, Chokurdakh, Ostrovnoye). In addition, sliding correlations with a step of 25 years were used to assess the temporal stability of climate signals. Climate data covered the period from September of the previous year to September of the current one in order to take into account the influence of conditions of both the current and previous seasons.

The results showed that summer temperature was the main factor limiting tree radial growth at all five 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), which is associated with 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 heat, with the highest correlations at **PUR** (r = 0.54) and **KHA** (r = 0.43, *p <* 0.01). In the eastern areas (**CHO, BIL**), the influence of June remained significant but somewhat weakened (r = 0.24 - 0.41), which may be due to the extreme continentality and short vegetation period (70 - 100 days). Precipitation, on the contrary, played a secondary role: its influence was weak or negative, with the exception of rare positive signals (e.g., on **APA** and **BIL**), which indicates sufficient moisture from snowmelt in most cases.

Sliding correlations revealed an increase in the influence of temperature anomalies in recent decades, especially noticeable against the background of increasing mean daily temperatures. For example, at **PUR** and **KHA**, correlations with June - July temperatures remained high until the 1990s (r = 0.60 - 0.65), but then decreased slightly (r = 0.40 - 0.45), which may indicate adaptation to warming or the emergence of other limiting factors, such as permafrost degradation. At **BIL**, an opposite trend was observed: an increase in the correlation from June - July from r = 0.40 to r = 0.55 over the past 30 years. These changes confirm that increasing temperatures stimulate radial increment, probably due to an increase in photosynthetic activity and water availability from permafrost thawing [1]. However, in **CHO** the temperature signal has weakened since the 1980s (r < 0.20), which may be related to local hydrological shifts or extreme conditions.

The discussion of the results highlights that the physiological characteristics of the species play a key role in their response to climate. *P. sylvestris*, as an evergreen species, uses a longer season for photosynthesis, which explains its dependence on July warmth in the west. In contrast, larches rely on rapid leaf unfolding in June, which is critical in conditions of short summers and continuous permafrost [2]. The secondary role of precipitation is consistent with studies showing that at high latitudes, moisture from snowmelt often exceeds the needs of trees [3]. Nevertheless, the local positive effects of precipitation on **APA** and **BIL** hint at a possible increase in their importance in the future if permafrost thaw changes the hydrological regime. These data indicate a complex relationship between climatic factors and tree physiology, which can lead to changes in the structure of forest - tundra ecosystems.

In conclusion, this study confirms the dominant role of summer temperatures in the formation of radial increment of conifers in the continuous permafrost zone. *P. sylvestris* in the west responds to July warmth, while Larix spp. in the east depend on June temperatures, which reflects their adaptation to regional conditions. The increasing influence of temperature anomalies in recent decades indicates 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].