

Дендроклиматические исследования лиственницы Каяндера на территории бассейна реки Омолой

А. И. Колмогоров^{✉,1,2}, Ш. Крузе⁴, А. Н. Николаев¹,
А. В. Кирдянов^{2,3}, Л. А. Пестрякова¹

¹Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация

²Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация

³Институт леса СО РАН В.Н. Сукачева, г. Красноярск, Российская Федерация

⁴Институт Альфреда Вегенера, Центр полярных и морских исследований им. Гельмгольца, г. Потсдам, Германия

✉ ai.kolmogorov@s-vfu.ru

Аннотация

В работе представлены результаты исследований климатического сигнала радиального прироста лиственницы Каяндера (*Larix cajanderi* Mayr.), произрастающей на территории бассейна реки Омолой (северо-восток Якутии). На трех участках, располагающихся в долинных комплексах субарктической тундры и притундровом редколесье, получены хронологии ширины древесных колец живых деревьев длительностью до 498 лет. Сравнительный анализ динамики радиального прироста и его статистических параметров указал на схожесть изменчивости ширины колец в пределах рассматриваемого региона. Результаты дендроклиматического анализа показали, что основным лимитирующим фактором, определяющим величину радиального прироста лиственницы, является температура воздуха первой половины сезона роста. Рост температуры приводит к возрастанию роли осадков и изменению силы корреляционных связей прироста с температурой, прежде всего, для северных участков. Исследование указывает на перспективность проведения дендроклиматических и дендро-экологических исследований на севере Якутии.

Ключевые слова: тундра, лесотундра, радиальный прирост, температура, дендроклиматология, Якутия

Финансирование. Работа выполнена в рамках проектной части государственных заданий Минобрнауки РФ «Биота и абиотические компоненты экосистем Северо-Востока России и рациональное освоение природных ресурсов криолитозоны в условиях изменения климата и техногенного воздействия» (№ FSRG-2023-0027) и «Разработка новых методов анализа цифровой анатомии древесных растений для изучения процессов изменения климата Евразии» (№ FSRG-2020-0014).

Благодарности. Авторы выражают глубокую благодарность к.б.н. Е.И. Троевой, к.б.н. А. Арзак и к.б.н. Р.М. Городничеву за участие в исследованиях.

Для цитирования: Колмогоров А.И., Крузе Ш., Николаев А.Н., Кирдянов А.В., Пестрякова Л.А. Дендроклиматические исследования лиственницы Каяндера на территории бассейна реки Омолой. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(4):584–594. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-4-584-594>

Original article

Dendroclimatic studies of *Larix cajanderi* Mayr. in the Omoloy River Basin

A. I. Kolmogorov^{✉,1,2}, St. Kruse⁴, A. N. Nikolaev¹, A. V. Kirilyanov^{2,3}, L. A. Pestryakova¹

¹Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation

²Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

³Suckachev Institute of Forest, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russian Federation

⁴Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine Research, Potsdam, Germany

✉ ai.kolmogorov@s-vfu.ru

Abstract

This study presents the results of research on the climatic signal of radial growth of Siberian larch (*Larix cajanderi* Mayr.) in the Omoloy River Basin, (north-east Yakutia). Tree-ring width chronologies were obtained from three sites

located in the valley complexes of subarctic tundra and forest-tundra ecotone, with chronologies spanning up to 498 years. Comparative analysis of radial growth dynamics and its statistical parameters indicated similar variability patterns within the study region. Dendroclimatic analysis revealed that the primary limiting factor determining the magnitude of radial growth in Siberian larch is the air temperature during the first half of the growing season. Increasing temperatures have led to an increased role of precipitation and changes in the strength of growth-temperature correlations, especially in northern sites. This study highlights the potential for dendroclimatic and dendroecological research in northern Yakutia.

Keywords: tundra, forest-tundra, radial growth, temperature, dendroclimatology, Yakutia

Funding. This study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of the state assignment in the field of scientific activities “Biota and abiotic components of ecosystems in the Northeast of Russia and rational development of natural resources in the cryolithozone under climate change and anthropogenic impact” (number FSRG-2023-0027) and “Development of new methods for analyzing digital wood anatomy of plants to study Eurasian climate change processes” (number FSRG-2020-0014).

Acknowledgements. The authors express their deep gratitude to Elena I. Troeva, Cand. Sci. (Biol.), A. Arzak, PhD, and Ruslan M. Gorodnichev, Cand. Sci. (Biol.) for their participation in the research.

For citation: Kolmogorov A.I., Kruse S., Nikolaev A.N., Kirdeyanov A.V., Pestryakova L.A. Dendroclimatic studies of *Larix cajanderi* Mayr. in the Omoloy River Basin. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(4):584–594. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-4-584-594>

Введение

В последние десятилетия Арктические регионы России характеризуются существенным повышением температуры воздуха, темпы которого в разы превышают средние значения для планеты [1]. Изучение отклика различных компонентов экосистем региона на эти климатические изменения, включая исследования динамики роста древесных пород в условиях сплошного распространения многолетней мерзлоты, является актуальной задачей, требующей усилий специалистов различного профиля [1, 2].

Основным лесообразующим видом в Арктических лесах северо-востока Сибири является лиственница, способная произрастать в наиболее суровых условиях. Согласно последней ревизии российских ученых, на территории водосборного бассейна р. Омлой произрастает лиственница Каяндера (*Larix cajanderi* Mayr.) [3, 4]. Существуют несколько крупномасштабных дендрохронологических исследований, включающих, в том числе, территорию северной Якутии и посвященных изучению влияния температуры воздуха и количества выпадающих осадков на радиальный прирост лиственницы [5–8; и др.]. Кроме того, в данном регионе можно встретить местообитания, позволяющие построить длительные древесно-кольцевые хронологии, которые могут быть использованы для реконструкции летней температуры по годичным кольцам деревьев за последние несколько столетий и даже тысячелетий [9–11; и др.]. Несмотря на изученность отдельных регионов северной Якутии, территория бассейна р. Омлой до настоящего вре-

мени остается малоизученной в контексте дендроклиматических исследований.

Целью работы является получение репрезентативных хронологий по ширине древесных колец лиственницы для северных регионов бассейна р. Омлой, анализ климатического отклика радиального прироста деревьев и оценка потенциала полученных древесно-кольцевых хронологий для реконструкции климата.

Материалы исследования

Район исследования – бассейн р. Омлой, которая берет начало на восточном склоне Орулгунского хребта, входящего в состав системы Верхоянских гор и отделяющего бассейн р. Омлой от бассейна р. Лена. Река протекает по территории Эвено-Бытантайского, Булунского и Усть-Янского улусов Якутии.

Климат района исследований резко континентальный с большими перепадами температуры в холодный и теплый период. В соответствии с данными метеорологической станции «Юбилейный» (70°46'N, 136°13'E), среднегодовая температура за период с 1960 по 2014 г. составила –13,4 °С, средняя летняя температура 8,9 °С, общее количество осадков за год около 237 мм, существенная часть которых (112 мм, т. е. 47 %) выпадает в летний период.

Полевые работы проводились в рамках совместной российско-германской экспедиции Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова (г. Якутск) и Центра полярных и морских исследований им. Гельмгольца (г. Потсдам) в июле 2014 г. Дендрохронологи-

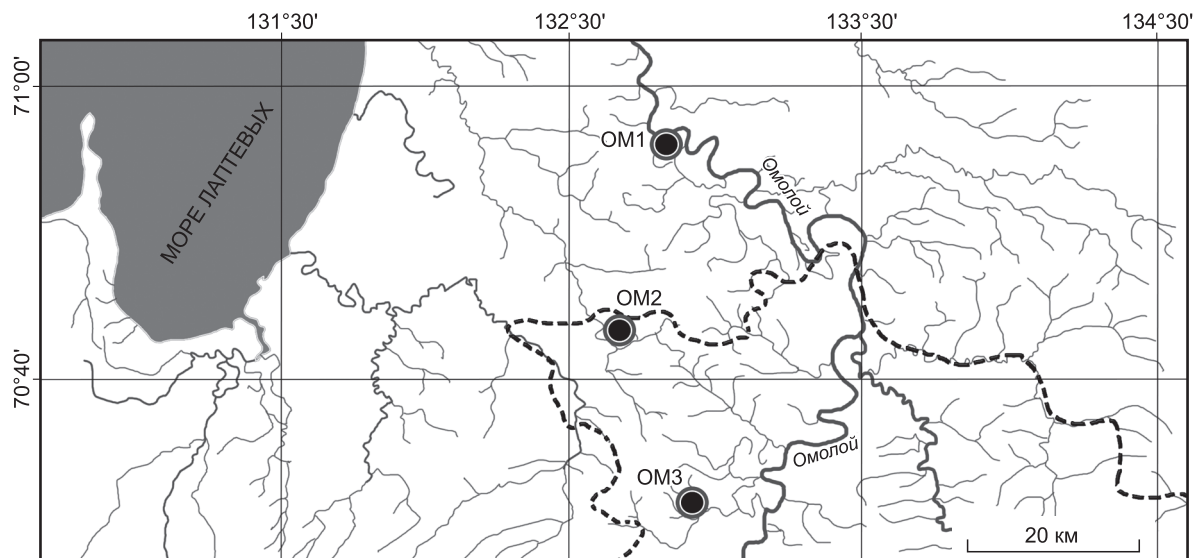


Рис. 1. Карта-схема района исследования на территории бассейна р. Омолой, Усть-Янский улус. Штриховой линией указана северная граница леса. OM1, OM2, OM3 – участки исследования

Fig. 1. Schematic map of the study area on the territory of the Omoloy River Basin, Ust-Yansky ulus. The dotted line indicates the northern border of the forest. Research sites: OM1, OM2, OM3

ческий материал живых деревьев лиственницы Каяндера (керны) был собран на трех участках, расстояние между которыми составило около 35 км. Пробные площади были заложены для типичных участков в диапазоне природных условий, охватывающих территории от лесотундры до редколесья в зоне тундры (рис. 1).

Подготовка кернов, измерения ширины годовичных колец и перекрестная датировка проведены по методике, общепринятой в дендрохронологии [12]. Статистическая проверка качества датировки выполнена при помощи программы COFESHA [13, 14]. Для удаления возрастного тренда индивидуальные хронологии индексировались с использованием кривых, описываемых отрицательной экспонентой. В дальнейшем стандартизированные серии усреднялись для получения обобщенных хронологий.

С помощью пакета `dpl` в среде статистического программирования R [15] были рассчитаны статистические параметры для оценки величины и изменчивости радиального прироста [16]: средняя ширина годовичных колец (ШГК), стандартное отклонение, автокорреляция первого порядка, чувствительность, среднее значение межсерийной корреляции, популяционный сигнал (EPS) [17–19].

Для анализа влияния климатических факторов был применен расчет коэффициентов корреляции между древесно-кольцевыми хронологиями, средней температурой воздуха и суммарным

количеством осадков за отдельные месяцы, начиная с июля предыдущего года по сентябрь текущего. Анализ проводился для общего периода, для которого имеются качественные древесно-кольцевые хронологии и метеорологические данные (с 1960 по 2013 г.) с метеостанции «Юбилейный». Помимо этого, были рассчитаны скользящие коэффициенты корреляции для промежутков 25 лет со сдвигом в один год. Расчет проводился в пакете `treeclim` для статистического программирования R [20].

Результаты исследования

Основные параметры хронологий по ширине годовичных колец приведены в табл. 1. Средняя величина радиального прироста деревьев и его стандартное отклонение на участках OM2 и OM3 примерно в два раза меньше, чем на самом северном участке OM1. Высокое значение среднеквадратичного отклонения и ширины годовичных колец на участке OM1 связано с наличием значительного количества (52 %) молодых деревьев, не достигших возраста 100 лет на уровне отбора дендрохронологических кернов.

Для всех трех участков характерны высокие значения среднего коэффициента автокорреляции первого порядка, что свидетельствует о связи радиального прироста текущего года с шириной колец предыдущего года. Причем наибольшее значение автокорреляции наблюдается для юж-

Статистические параметры хронологий ширины годичных колец, неиндексированных и индексированных за 1960–2013 гг.

Statistical parameters of the tree-ring width chronologies (1960–2013)

Параметр	Участок		
	ОМ1	ОМ2	ОМ3
Количество индивидуальных серий, шт.	21	18	16
Длительность хронологий	278	274	498
Среднее ШГК ± среднееквадратичное отклонение, мм	0,555±0,301	0,270±0,199	0,214±0,151
Автокорреляция первого порядка	0,610	0,663	0,726
Средний коэффициент чувствительности, 1960–2013 гг.	0,456	0,562	0,578
Rbar, 1960–2013 гг.	0,324	0,425	0,335
EPS, 1960–2013 гг.	0,905	0,926	0,883

Примечание. Rbar – средний межсерийный коэффициент корреляции, EPS – выраженный популяционный сигнал.

Note. Rbar – mean correlation coefficients, EPS – expressed population signal.

ного участка ОМ3, а наименьшее – для северного участка ОМ1. Таким образом, величина этой дендрохронологической характеристики уменьшается с севера на юг.

Все исследуемые временные серии радиального прироста характеризуются как сильно чувствительные, поскольку средний коэффициент чувствительности индексированных хронологий для всех участков за период с 1960 по 2013 г. превышает 0,300. Наибольшее значение данного параметра отмечено на южном участке (ОМ3), а наименьшее значение – на северном (ОМ1).

Такой статистический параметр, как средний межсерийный коэффициент корреляции (Rbar), для индексированных хронологий свидетельствует о том, что радиальный прирост для всех деревьев в пределах исследуемого региона синхронизирован под воздействием внешнего фактора, общего в пределах, как минимум, отдельных участков.

Популяционный сигнал (EPS) позволяет охарактеризовать анализируемые хронологии как репрезентативные для каждого из участков, поскольку высокая синхронность изменений прироста и количество использованного материала оказывается достаточной, чтобы EPS был выше общепринятого порога 0,850.

Стандартизированные хронологии радиального прироста деревьев характеризуются высокой синхронностью погодичных изменений в пределах исследуемого региона (рис. 2). Например,

для всех участков наблюдается длительный период понижения значений индексов прироста начиная с 1780-х до середины первого десятилетия XIX в. с последующей стабилизацией индексов до 1830-х гг. В период с 1835 по 1870-е гг. наблюдается несколько различных трендов в ходе хронологий: увеличение индексов ширины древесных колец на северном участке (ОМ1) происходит параллельно уменьшению прироста на других участках, после чего в 1880–1890-е годы происходит синхронное снижение. Относительно высокий пик прироста приходится на 1940-е гг., после чего отмечено постепенное понижение индексов ШГК, которое наблюдается до 1970-х гг.

Сравнительный корреляционный анализ хронологий указывает на высокую согласованность динамики индексов прироста на всех участках ($p < 0,01$). Наиболее высокие значения коэффициентов корреляции обобщенных хронологий отмечены для соседних участков (табл. 2).

Анализ климатических данных м/с «Юбилейный» [21] за вегетационный период 1960–2013 гг. показал выраженный положительный тренд температуры воздуха за июнь–август, который составил 0,5 °C (0,09 °C/десятилетие) (рис. 3).

Результаты дендроклиматического анализа (рис. 4) показали, что радиальный прирост на всех трех участках значимо коррелирует с температурой воздуха в июне (от $r = 0,390$ (ОМ1) до $r = 0,618$ (ОМ3) при $p < 0,05$). Положительная связь с температурой воздуха в июле наблюдается только на северном участке ОМ1 ($r = 0,391$

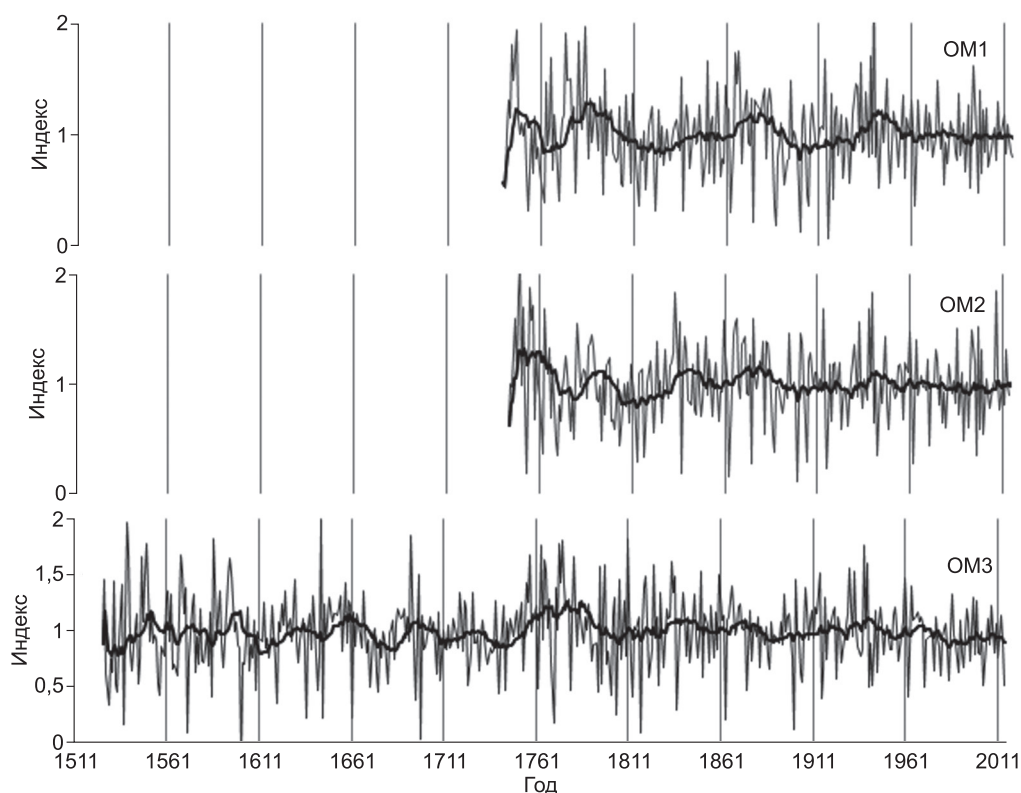


Рис. 2. Стандартизированные обобщенные хронологии по участкам. Линией указано скользящее среднее с шагом 15 лет
 Fig. 2. Standardized generalized chronologies by sites. The line indicates a moving average in 15-year increments

при $p < 0,05$). Для радиального прироста лиственницы участка ОМ1 выявлено негативное влияние температуры воздуха июля ($r = -0,280$ при $p < 0,05$) и декабря ($r = -0,289$ при $p < 0,05$) предыдущего года. Важно отметить, что значимого воздействия осадков на радиальный прирост лиственницы не отмечено ни на одном из изученных участков.

Таблица 2
**Коэффициент корреляции
 между древесно-кольцевыми хронологиями
 с 1960 по 2013 г.**

Table 2
**Coefficient of correlation
 between tree-ring chronologies (1960–2013)**

	OM1	OM2	OM3
OM1		0,72*	0,50*
OM2			0,67*
OM3			

* Значим при $p < 0,001$.

* Significant when $p < 0,001$.

Скользящий коэффициент корреляции (рис. 5) показал, что климатический отклик радиального прироста на температуру воздуха за вегетационный период меняется во времени. Для северного участка (ОМ1) наблюдается постепенное уменьшение связи с температурой воздуха июня вплоть до незначимой после периода 1977–2000 гг. Влияние температуры июля в промежутке 1967–1990 гг. становится более значимым и усиливается к концу изучаемого периода (коэффициент корреляции изменяется от $r = 0,393$ до $r = 0,45$ при $p < 0,05$). На втором участке ОМ2 влияние температуры июня в начале изучаемого периода уменьшается с $r = 0,438$ для 1961–1985 гг. до $r = 0,268$ ($p < 0,05$) для 1964–1987 гг. Возрастание роли температуры июня для прироста лиственницы происходит с промежутка 1968–1991 гг. до 1989–2013 гг. (с $r = 0,261$ до $r = 0,479$ при $p < 0,05$ соответственно). На третьем участке (ОМ3) наблюдается незначительное уменьшение влияния температуры июня с $r = 0,714$ до $r = 0,635$ ($p < 0,05$). Для северного участка ОМ1 зафиксировано значимое ($p < 0,05$) негативное влияние атмосферных осадков июня начиная с периода

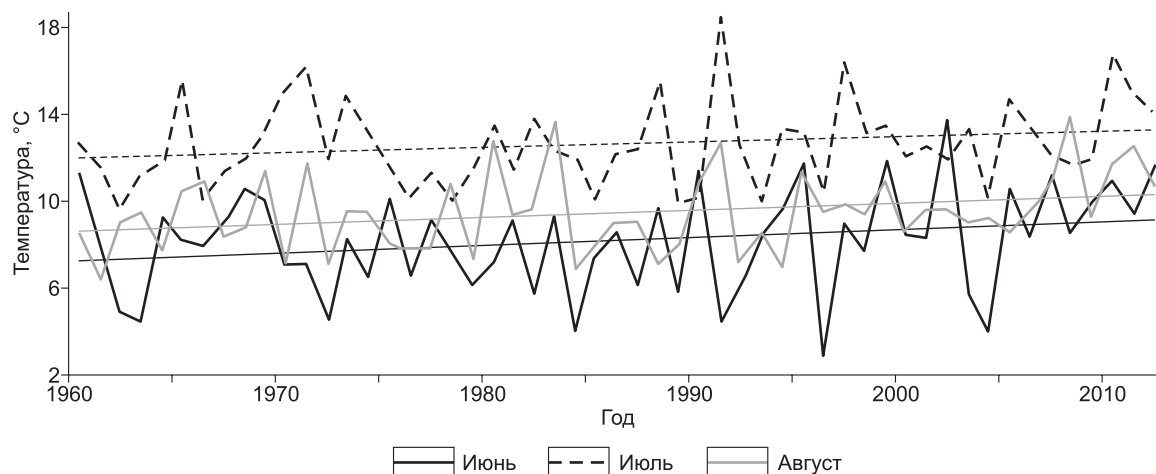


Рис. 3. График температуры воздуха вегетационного периода (июнь, июль, август) с линиями тренда, 1960–2013 гг.

Fig. 3. Air temperature graph for the growing season (June, July, August) with trend lines (1960–2013)

1987–2010 гг. Такая же, но более сильная реакция на количество осадков в июне установлена для деревьев, произрастающих на участке ОМ2. Для южного участка ОМ3 значительных и устойчивых изменений в степени влияния осадков на радиальный прирост деревьев не обнаружено, хотя и наблюдаются статистически значимые отрицательные коэффициенты корреляции для отдельных периодов.

Обсуждение

Для деревьев, произрастающих на границе леса, обычно характерны более низкий радиальный прирост и более высокие значения коэффициента чувствительности [22]. При этом возраст таких деревьев в среднем выше, чем в более оптимальных условиях [23]. В представленном исследовании возраст деревьев увеличивается с севера на юг, достигая практически 500 лет на южном участке ОМ3. Средняя ширина годичных колец и ее среднее стандартное отклонение также имеют обратную тенденцию по сравнению с ожидаемой, поскольку величина радиального прироста уменьшается с севера на юг. Кроме того, хронологии северного участка (ОМ1) показали более низкий коэффициент чувствительности по сравнению с данными для более южных участков. Полученные результаты для пространственных тенденций прироста и его изменчивости, возможно, определяются тем, что на северном участке присутствует значительное количество молодых деревьев, не достигших 100 лет. У таких деревьев обычно выражен возрастной

тренд в рядах ШГК, когда для первых десятилетий роста характерны более высокие величины прироста древесных колец. Наличие же большего количества молодых деревьев на северном участке может быть объяснено увеличением плотности древостоев в связи с потеплением климата, что характерно для различных регионов северной Евразии [24–26]. Еще одним фактором, объясняющим полученные тенденции прироста, могут быть особенности самого северного местобитания, заложенного в довольно специфических условиях долины р. Омолуй, поскольку динамика радиального прироста в подобных условиях в пределах мерзлотной зоны может иметь определенные особенности, вызванные спецификой гидротермического режима почв [27].

Результаты дендроклиматического анализа для рассмотренных участков указывают на существенное влияние температуры июня и июля на радиальный прирост лиственницы на северном участке и только июня на местопроизрастаниях, расположенных южнее. Подобное смещение корреляционных связей на более ранние сроки при продвижении на юг находится в полном соответствии с ранее полученными результатами для других регионов Сибири [28–30] и связано с более благоприятным термическим режимом на юге рассматриваемого региона, который определяется более ранним сходом снежного покрова и инициацией камбиальной активности [31–34].

Выявленное непостоянство отклика радиального прироста лиственницы на температуру июня

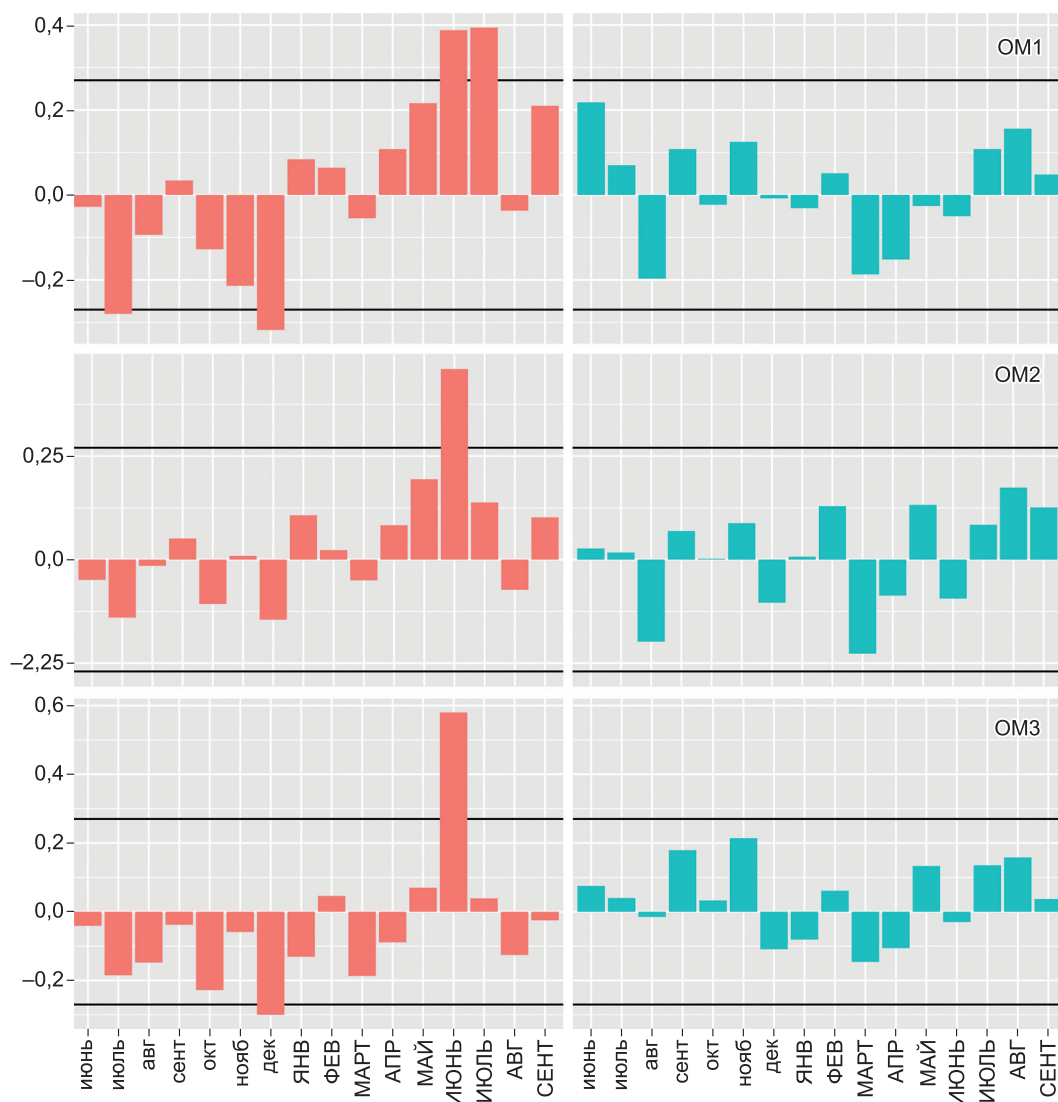


Рис. 4. Корреляционный анализ радиального прироста с температурой воздуха (красный) и количеством атмосферных осадков (синий). По оси абсцисс обозначены месяцы предыдущего (–1) и текущего года. Линией указан значимый предел при $p < 0,05$

Fig. 4. Correlation analysis of the radial growth with air temperature (red) and precipitation (blue). The abscissa indicates the months of the previous (–1) and current year. The line indicates the significant limit at $p < 0,05$

и июля, скорее всего, связано с локальными изменениями климата. Вероятно, из-за существенного повышения температуры (см. рис. 3) при стабильно небольшом количестве выпадающих осадков в последние десятилетия может происходить иссушение верхнего слоя почвы в отдельные периоды сезона роста [35]. Поскольку корневая система у лиственницы на многолетне-мерзлых почвах имеет поверхностный характер [36], то это приводит к возрастанию роли осадков в начале сезона роста, наиболее активной и значимой его фазы для формирования годичного прироста [37].

Хронологии лиственницы Каяндера исследованных участков показывают высокую согласованность изменчивости индексов прироста и могут быть объединены в генерализованную хронологию региона. При условии продления этих хронологий и увеличения наполненности образцами они могут быть использованы для реконструкции отдельных климатических параметров, устойчиво определяющих изменчивость радиального прироста в регионе. Особенно перспективным мог бы быть подход, основанный на измерении различных параметров древесных колец [38, 39], что позволило бы выявить особен-

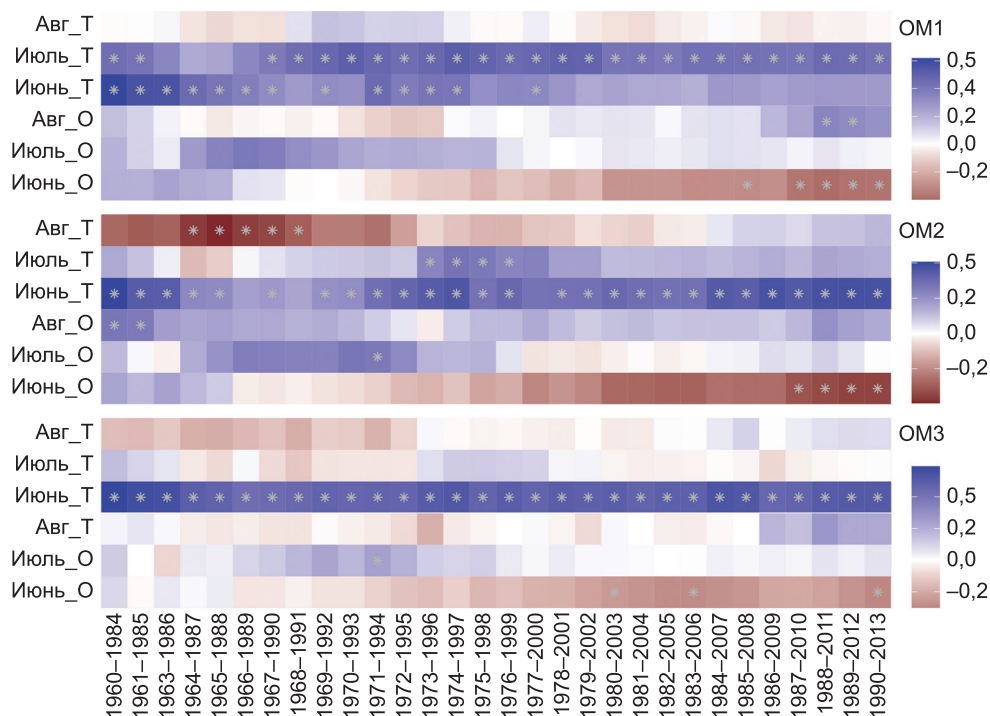


Рис. 5. Скользящий корреляционный анализ радиального прироста с температурой воздуха (Т) и количеством выпавших осадков (О). Звездочками обозначены коэффициенты, значимые при $p < 0,05$

Fig. 5. Moving correlation analysis of the radial growth with air temperature (Т) and amount of precipitation (О). The star indicates coefficients significant at $p < 0,05$

ности реакции величины прироста и структуры древесных колец на меняющиеся условия окружающей среды.

Заключение

Наше исследование указывает на перспективность проведения дендроклиматических и дендрэкологических исследований на севере Якутии, нацеленных на понимание особенностей динамики роста древесных растений для различных местообитаний в условиях меняющегося климата. Подобные исследования необходимо расширить с охватом территорий на границе леса, а также тех регионов, где отмечена деградация мерзлоты. Именно такой подход позволит оценить реакцию древесной растительности и динамику отдельных параметров углеродного цикла лесных экосистем при потеплении климата.

Список литературы / References

1. Field C.B., Barros V., Dokken D., et al. *Climate change 2014 – Impact, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional aspects*. Cambridge: Cambridge University Press; 2014. 696 p.

2. Lembrechts J.J., et al. Global maps of soil temperature. *Global change biology*. 2022;(28):3110–3144. <https://doi.org/10.1111/gcb.16060>

3. Isaev A.P., Timofeyev P.A. *General characteristics of Boreal forests. The far north: Plant biodiversity and Ecology of Yakutia*. Dordrecht: Springer; 2010; 164–168 p. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-3774-9>

4. Афанасьева К.С., Байков А.А. и др. *Определитель высших растений Якутии*. Товарищество научных изданий КМК. Новосибирск: Наука; 2020. 896 с.
Afanasyeva K.S., Baykov A.A., et al. *Key to the higher plants of Yakutia*. Novosibirsk: Nauka: KMK; 2020. 896 p. (In Russ.)

5. 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 studies in the Ural-Siberian Subarctic*. Novosibirsk: Nauka; 1996. 246 p. (In Russ.)

6. Shiyatov S.G. Rates of change in the upper treeline ecotone in the Polar Ural Mountains. *PAGES News*. 2003;11(1):8–10. <https://doi.org/10.22498/pages.11.1.8>

7. Esper J., Schweingruber F.H. Large-scale tree-line changes recorded in Siberia. *Geophysical Research Letters*. 2004;31(6):L06202 <https://doi.org/10.1029/2003GL019178>

8. Hellmann L., et al. Diverse growth trends and climate responses across Eurasia's boreal forest. *Environmental Research Letters*. 2016;(11):074021. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/7/074021>
9. Sidorova O.V., Siegwolf R.T., Saurer M., et al. Spatial patterns of climatic changes in the Eurasian north reflected in Siberian larch tree-ring parameters and stable isotopes. *Global Change Biology*. 2010;(16):1003–1018. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02008.x>
10. Наурзбаев М.М., Ваганов Е.А., Сидорова О.В. Изменчивость приземной температура воздуха на севере Евразии по данным тысячелетних древесно-кольцевых хронологий. *Криосфера Земли*. 2003; 7(2):84–91.
Naurzbaev M.M., Vaganov E.A., Sidorova O.V. Variability of surface air temperature in northern Eurasia according to millennial tree-ring chronologies. *Earth's cryosphere*. 2003;7(2):84091. (In Russ.)
11. Büntgen U., Arseneault D., Boucher É., et al. Recognising bias in Common Era temperature reconstructions. *Dendrochronologia*. 2022;(74):125982. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2022.125982>
12. Шиятов С.Г., Ваганов Е.А., Кирдянов А.В. и др. *Методы дендрохронологии. Часть 1. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации*. Красноярск: КрасГУ; 2000. 80 с.
Shiyatov S.G., Vaganov E.A., Kirilyanov A.V., et al. *Methods of dendrochronology. Part 1. Fundamentals of dendrochronology. Collection and receipt of tree-ring information*. Krasnoyarsk: KrasGU; 2000. 80 p. (In Russ.)
13. Cook E.R., Peters K. The smoothing spline: A new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. *Tree-ring Bulletin*. 1981; (41):45–53.
14. Holmes R.L. *Program COFECHA: Version 3*. Tucson: University of Arizona; 1992.
15. R Development Core Team. *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing; 2011. <https://R-project.org>
16. Bunn A.G. A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia*. 2008;26(2):115–124. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2008.01.002>
17. 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 Climate & Applied Meteorology*. 1984;(23):201–213. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1984\)023<0201:OTAVOC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1984)023<0201:OTAVOC>2.0.CO;2)
18. Шиятов С.Г. *Дендрохронология верхней границы леса на Урале*. М.: Наука; 1986. 136 с.
Shiyatov S.G. *Dendrochronology of the upper forest limit in the Urals*. Moscow: Nauka; 1986. 136 p. (In Russ.)
19. Cook E.R., Kairiukstis L.A., et al. *Methods of Dendrochronology. Application in Environmental Sciences*. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Acad. Publ.; 1996. 394 p.
20. Zang C., Biondi F. Treeclim: an R packages for the numerical calibration of proxy-climate relationship. *Ecography*. 2015;(38):431–436. <https://doi.org/10.1111/ecog.01335>
21. *Специализированные массивы для климатических исследований* [<http://aisori-m.meteo.ru>]; 2023. Доступно: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/select.xhtml>
Specialized arrays for climate research [<http://aisori-m.meteo.ru>]; 2023. URL: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/select.xhtml>
22. Fritts H.C. *Tree-Rings and Climate*. London, New York, San Francisco: Acad. Press; 1976. 576 p.
23. Büntgen U., Krusic P.J., Pierrat A., et al. Limited capacity of tree growth to mitigate the global greenhouse effect under predicted warming. *Nature Communications*. 2019;(10):2171. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10174-4>
24. Григорьев А.А., Моисеев П.А., Нагимов З.Я. Влияние изменения климата на динамику верхней границы древесной растительности в горах Приполярного Урала (на хребте Сабля). *Леса России и хозяйство в них*. 2010;2(36):10–19.
Grigoriev A.A., Moiseev P.A., Nagimov Z.Ya. The influence of climate change on the dynamics of the upper limit of tree vegetation in the mountains of the Subpolar Urals (on the Sablya ridge). *Forests of Russia and economy in them*. 2010;2(36):10–19. (In Russ.)
25. Тимофеев А.С., Вьюхин С.О., Григорьев А.А., Моисеев П.А. Структура и динамика древесной и кустарниковой растительности на верхнем пределе своего произрастания на плато Путоран. *Леса России и хозяйство в них*. 2021;1(76):23–28.
Timofeev A.S., Vyukhin S.O., Grigoriev A.A., Moiseev P.A. Structure and dynamics of tree and shrub vegetation at the upper limit of their growth on the Putoran plateau. *Forests of Russia and economy in them*. 2021; 1(76):23–28. (In Russ.)
26. Kirilyanov A.V., Hagedorn F., Knorre A.A., et al. 20th century treeline advance and vegetation changes along an altitudinal transect in the Putorana Mountains, northern Siberia. *Boreas*. 2012;41(1):56–67. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.2011.00214.x>
27. Kirilyanov 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.
28. Ваганов Е.А., Кирдянов А.В. Рост, структура годичных колец хвойных пород и реконструкция изменений климата. В кн.: *Лесные экосистемы Енисейского трансекта*. Пleshиков Ф.И. (ред.). Новосибирск: Изд-во Сибирского отделения РАН; 2002: 181–196.
Vaganov E.A., Kirilyanov A.V. Growth, tree-ring structure of conifers and reconstruction of climate change. In: *Forest ecosystems of the Yenisei transect*. Pleshikov F.I. (ed.). Novosibirsk; 2002; 181–196. (In Russ.)

29. Knorre A.A., Kirilyanov A.V., Vaganov E.A. Climatically induced interannual variability in aboveground production in forest-tundra and northern taiga of central Siberia. *Oecologia*. 2006;147:86–95. <https://doi.org/10.1007/s00442-005-0248-4>
30. Vaganov E.A., Kirilyanov A.V. Denrochronology of larch trees growing on Siberian permafrost. *Permafrost Ecosystems*. 2010;209:347–363. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9693-8_18
31. Vaganov E.A., Hughes M.K., Kirilyanov A.V., et al. Influence of snowfall and melt timing on tree growth in subarctic Eurasia. *Nature*. 1999;400(6740):149–151.
32. Kirilyanov A., Hughes H., Vaganov E., et al. The importance of early summer temperature and date of snow melt for tree growth in Siberian Subarctic. *Trees*. 2003;17:61–69.
33. Rinne K.T., Saurer M., Kirilyanov A.V., et al. Examining the response of needle carbohydrates from Siberian larch trees to climate using compound-specific $\delta^{13}C$ and concentration analyses. *Plant, Cell & Environment*. 2015;38(11):2340–2352. <https://doi.org/10.1111/pce.12554>
34. Rinne K.T., Saurer M., Kirilyanov A.V., et al. The relationship between needle sugar carbon isotope ratios and tree rings of larch in Siberia. *Tree Physiology*. 2015;35(11):119201205. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpv096>
35. Andresen C.G., Lawrence D.M., Wilson C.J., et al. Soil moisture and hydrology projections of the permafrost region – a model intercomparison. *Cryosphere*. 2020;(14):445–459. <https://doi.org/10.5194/tc-14-445-2020>
36. Kajimoto T., Matsuura Y., Osawa A., et al. Root system development of Larix gmelinii trees affected by micro-scale conditions of permafrost soils in central Siberia. *Plant and Soil*. 2003;(255):281–292. <https://doi.org/10.1023/A:1026175718177>
37. Брюханова М.В., Кирдянов А.В., Прокушкин А.С., Силкин П.П. Особенности ксилогенеза Larix gmelinii (Rupr.) Rupr. в условиях криолитозоны Средней Сибири. *Экология*. 2013;(5):323–329. <https://doi.org/10.7868/S0367059713050041>
- Bryukhanova M.V., Kirilyanov A.V., Prokushkin A.S., Silkin P.P. Features of xylogenesis of Larix gmelinii (Rupr.) Rupr. in the conditions of the permafrost zone of Central Siberia. *Ecology*. 2013;(5):323–329. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0367059713050041>
38. Kirilyanov A.V., Vaganov E.A., Hughes M.K. Separating the climatic signal from tree-ring width and maximum latewood density records. *Trees*. 2007;21(1):37044. <https://doi.org/10.1007/s00468-006-0094-y>
39. Sidorova O.V., Saurer M., Mygland V.S., et al. A multi-proxy approach for revealing recent climatic changes in the Russian Altai. *Climate Dynamics*. 2012;(38):175–188. <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0989-6>

Об авторах

КОЛМОГОРОВ Алексей Иванович, научный сотрудник, Северо-Восточный федеральный университет; младший научный сотрудник, Сибирский федеральный университет, <https://orcid.org/0000-0002-3688-7753>, Scopus Author ID: 1032714, e-mail: ai.kolmogorov@s-vfu.ru

КРУЗЕ Штефан, доктор биологических наук, исследователь, <https://orcid.org/0000-0003-1107-1958>, e-mail: Stefan.Kruse@awi.de

НИКОЛАЕВ Анатолий Николаевич, доктор биологических наук, ректор, Scopus Author ID:155715, e-mail: rector@s-vfu.ru

КИРДЯНОВ Александр Викторович, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН; старший научный сотрудник, Сибирский федеральный университет, <https://orcid.org/0000-0002-6797-4964>, e-mail: kirilyanov@ksc.krasn.ru

ПЕСТРЯКОВА Людмила Агафьевна, доктор географических наук, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-5347-4478>, Scopus Author ID: 616182, e-mail: lapest@mail.ru

About the authors

KOLMOGOROV, Alexey Ivanovich, Researcher, Institute of Natural Sciences, Ammosov North-Eastern Federal University; Junior Researcher, Siberian Federal University, <https://orcid.org/0000-0002-3688-7753>, Scopus Author ID:1032714, e-mail: ai.kolmogorov@s-vfu.ru

KRUSE, Stefan, Dr. Sci (Biol.), Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-1107-1958>, e-mail: Stefan.Kruse@awi.de

NIKOLAEV, Anatoliy Nikolaevich, Dr. Sci (Biol.), Rector, Scopus Author ID: 155715, e-mail: rector@s-vfu.ru

А. И. Колмогоров и др. ♦ Дендроклиматические исследования лиственницы Каяндера...

KIRDYANOV, Alexandr Viktorovich, Dr. Sci (Biol.), Leading Researcher, Suckachev Institute of Forest SB RAS; Senior Researcher, Siberian Federal University, <https://orcid.org/0000-0002-6797-4964>, e-mail: kirdyanov@ksc.krasn.ru

PESTRYAKOVA, Ludmila Agafevna, Dr. Sci (Geogr.), Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-5347-4478>, Scopus Author ID: 616182, e-mail: lapest@mail.ru

Поступила в редакцию / Submitted 24.10.2023

Поступила после рецензирования / Revised 08.11.2023

Принята к публикации / Accepted 10.11.2023