

Влияние климатических факторов на ширину годичных колец лиственницы сибирской в верховьях Иртыша*

М. В. Андреева¹, Д. Жанг²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Российская Федерация, 190334, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

² Синьцзянский институт географии и экологии китайской академии наук, Китайская Народная Республика, 830011, Урумчи, Бейджинг Саут Род, 818

Для цитирования: Андреева, М. В., Жанг, Д. (2019). Влияние климатических факторов на ширину годичных колец лиственницы сибирской в верховьях Иртыша. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 64 (4), 530–544. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.402>

В работе представлены результаты оценки влияния основных климатических факторов на ширину годичных колец лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.), произрастающей в верховьях р. Иртыша. Отбор древесных кернов проводился на северных макросклонах хребтов Сарымсақты, Тарбағатай и Южный Алтай в Казахстане, а также на южном макросклоне хребта Южный Алтай в Казахстане и Китае с трех участков на верхней границе леса и с четырех — на нижней. По результатам дендрохронологического анализа получены две обобщенные древесно-кольцевые хронологии IRT_v и IRT_n, отражающие изменчивость радиального прироста лиственницы сибирской в регионе исследования на верхней и нижней границах леса соответственно. На верхней границе леса радиальный прирост лиственницы сибирской зависит от термического режима начала периода вегетации (июнь — июль). Анализ динамики радиального прироста показал, что в периоды 1850–1873, 1881–1900, 1906–1939, 1957–1965, 1982–1990 гг. прирост древесины на верхней границе леса характеризовался пониженными значениями. С 1850 г. наблюдается положительный тренд в изменении прироста древесины, что говорит об улучшении термических условий с конца Малой ледниковой эпохи. Наличие достаточно сильного климатического сигнала ($r=0,7$) позволяет использовать хронологию IRT_v для реконструкции температурно-го ряда. На нижней границе леса изменчивость радиального прироста определяется динамикой осадков зимне-весенне-летнего периода (декабрь — июль). Наибольшее значение при этом имеет увлажнение во время завершения снеготаяния и начала вегетации (май — июль). Анализ динамики радиального прироста показал, что за последние 150 лет режим увлажнения не претерпел существенных изменений. Пониженные значения прироста приходятся на периоды 1850–1859, 1877–1907, 1916–1936, 1944–1951, 1962–1968, 1973–1992 гг.

Ключевые слова: радиальный прирост, дендроклиматический анализ, лиственница сибирская, температура июня — июля, осадки декабря — июля, Восточный Казахстан, верховье бассейна р. Иртыша.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-77-10041).

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2019

1. Введение

Значение косвенных источников информации в оценке современных и прошлых изменений климата хорошо известно. Особенно важный вклад вносит информация, полученная по древесным кольцам. В некоторых регионах, ключевых в теоретическом отношении, таких как верховья бассейнов крупных рек Азии, и в то же время климатически уникальных, проведено недостаточное количество дендроклиматических исследований. Таким регионом является верховье бассейна р. Иртыша. Если в верховьях бассейнов Оби, Енисея и Ховда проведено достаточно много дендроклиматических работ (D'Arrigo et al., 2000; Ойдупаа и др., 2004; Mygland et al., 2012; Mukhanova et al., 2016; Andreeva et al., 2019), то в верховьях Иртыша существенно меньше (Chen et al., 2012; Zhang et al., 2015; 2018). Для восточной части Казахстана построена древесно-кольцевая хронология по березе бородавчатой (Zhantlessova and Zhumadina, 2015), но влияние климатических факторов на радиальный прирост не рассмотрено. Влияние климата на прирост древесины в юго-западных районах Алтая, где берет начало р. Иртыш и ее притоки, может быть отличным от соседних северо-восточных районов Алтая, поскольку климат характеризуется более оптимальными условиями, что обусловлено его расположением в более низких широтах и открытостью воздушным массам Атлантики. По данным метеостанции Катон-Карагай, средние значения температуры воздуха за самый холодный месяц (январь) составляют $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$, за самый теплый (июль) — $+17\text{ }^{\circ}\text{C}$. Среднее годовое количество осадков достигает 400 мм. В направлении с запада на восток наблюдается усиление континентальности климата: по данным метеостанции Алтай, среднегодовое количество осадков составляет около 200 мм, температура самого холодного месяца соответствует $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$, самого теплого — $+22\text{ }^{\circ}\text{C}$. Локальные условия произрастания древесной растительности могут в данном случае иметь большее значение, нежели региональные.

Цель настоящей работы: оценить влияние основных климатических факторов на ширину годичных колец лиственницы сибирской, произрастающей в верховьях р. Иртыша. Основные задачи: 1) отобрать древесные керны по лиственнице сибирской в верховье бассейна Иртыша; 2) построить региональные древесно-кольцевые хронологии на основании исследования изменчивости прироста годичных колец лиственницы сибирской на современном этапе¹; 3) выявить основные климатические факторы (температура воздуха, атмосферные осадки), лимитирующие прирост древесины лиственницы сибирской, и косвенные связи между приростом годичных колец и расходами воды; 4) рассмотреть возможность получения климатических реконструкций на основе древесно-кольцевой информации в регионе.

2. Материалы и методы

2.1. Построение древесно-кольцевых хронологий

В 2018 г. проводились работы по отбору древесных кернов лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) на северных макросклонах хребтов Сарымсақты,

¹ Под современным этапом в работе понимается период с конца Малой ледниковой эпохи по настоящее время (1850–2018 гг.).

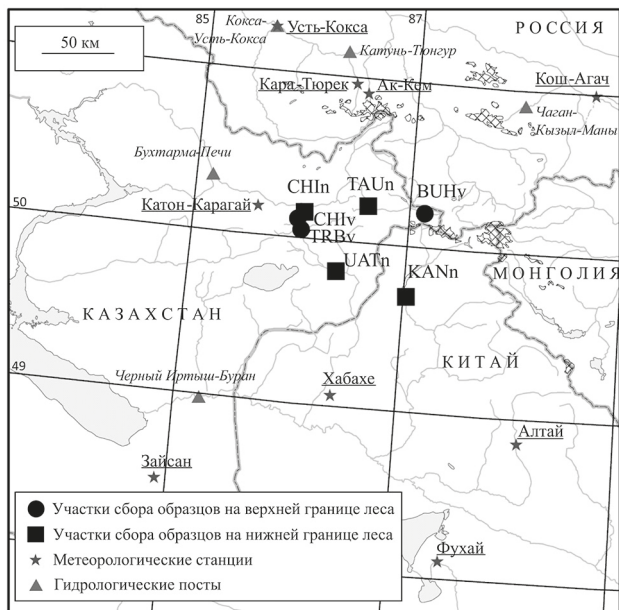


Рис. 1. Участки сбора образцов древесины. Фото: А — долина р. Бухтарма, Б — долина р. Таутекели

Тарбагатай и Южный Алтай в Казахстане, а также на южном макросклоне хребта Южный Алтай в Казахстане и Китае (рис. 1).

Сбор материала проводился согласно базовым дендрохронологическим принципам (Fritts, 1976; Cook and Kairiukstis, 1990; Шиятов и др., 2000). На склонах северных экспозиций были выбраны семь участков для отбора образцов: три на верхнем пределе произрастания растительности (2300 м) и четыре на нижнем (1200 м). Керны отбирались возрастными бурами с живых разновозрастных деревьев по двум, реже одному, радиусам на высоте 0,3–1,3 м. На каждом участке образцы отбирались в среднем у 15 деревьев. На участке древесно-кольцевой хронологии ВУНv (см. рис. 1) образцы были отобраны у 30 деревьев. В лабораторных условиях древесные образцы закреплялись на деревянной основе и шлифовались для лучшей визуализации границ между кольцами.

Ширина годичных колец измерялась с точностью 0,01 мм на полуавтоматической установке LINTAB-6. Перекрестная датировка индивидуальных древесно-кольцевых хронологий проводилась с использованием программ TsapWin Professional (Rinn, 2003) и Cofecha (Holmes, 1983; Grissino-Mayer, 2001). Качество перекрестного датирования подтверждалось значениями индекса перекрестного датирования ($CDI > 10$) и коэффициента межсерийной корреляции ($r_s > 0,5$).

Индексирование и объединение индивидуальных древесно-кольцевых хронологий в локальные проводилось в программе ARSTAN (Cook and Holmes, 1999). При стандартизации использовались негативная экспонента, линейная регрессия или горизонтальная линия. Качество полученных локальных хронологий подтверждалось величиной стандартного отклонения ($SD > 0,2$), коэффициента чувствительности ($MS > 0,2$) и выраженного сигнала популяции

($EPS > 0,80^2$). В исследовании использовались как стандартные (std), так и «остаточные» (res) хронологии³.

Возможность объединения локальных хронологий проверялась методом главных компонент (Peters et al., 1981; Айвазян и др., 1989). Для соблюдения принципа актуализма связь между рядами рассматривалась не только за весь имеющийся период времени, но и на отдельных 50-летних периодах (со сдвигом 25 лет). Хронологии признавались возможными к объединению в том случае, когда на каждом отдельном 50-летнем периоде большая часть изменчивости прироста годичных колец описывалась одной компонентой (при собственном значении более 1) с факторными нагрузками более 0,5.

Неоднородность обобщенных дендрохронологических рядов, вызванная наличием в их составе разновозрастных деревьев, устранялась с помощью эмпирико-статистического метода Шиятова (1986).

2.2. Дендроклиматический анализ

Для оценки влияния основных климатических параметров (средне-месячная температура воздуха, месячные суммы осадков) в программе DendroClim2002 (Biondi and Waikul, 2004) рассчитывались функции отклика с мая предыдущего года по сентябрь текущего за сезоны года (осень, зима, весна, лето) и за различные периоды в несколько месяцев за текущий и за предшествующий годы по данным метеостанций, представленных в табл. 1.

Таблица 1. Основные характеристики метеорологических станций

Название метеостанции	Период наблюдений за температурой воздуха (гг.)	Период наблюдений за атмосферными осадками (гг.)	Координаты	Высота над у. м. (м)
Россия				
Ак-Кем	1949–2004	1966–2004	49°55' с. ш., 86°32' в. д.	2056
Кара-Тюрек	1940–2017	1940–2017	50°02' с. ш., 86°27' в. д.	2601
Кош-Агач	1934–2017	1936–2017	50°00' с. ш., 88°40' в. д.	1692
Кызыл-Озек	1934–2017	1934–2017	51°53' с. ш., 86°00' в. д.	324
Мугур-Аксы	1963–2017	1966–2017	50°23' с. ш., 90°26' в. д.	1850
Тээли	1961–2004	1961–2004	50°95' с. ш., 90°03' в. д.	981

² Согласно (Wigley et al., 1984), при значении EPS менее 0,85 локальная хронология в большей степени отражает индивидуальные особенности прироста древесных колец, нежели характеризует прирост всего лесного массива. В настоящей работе в качестве удовлетворительного принято значение $EPS > 0,80$, что позволяет не отказываться от анализа локальных хронологий, у которых качество снижено в незначительной степени.

³ Стандартные древесно-кольцевые хронологии (std), как правило, показывают значительную автокорреляцию, поскольку на прирост годичных колец текущего года влияют условия предыдущих лет. В «остаточных» древесно-кольцевых хронологиях (res) автокорреляционная составляющая устранена моделью авторегрессии, но вместе с тем устранены также и все низкочастотные колебания.

Название метеостанции	Период наблюдений за температурой воздуха (гг.)	Период наблюдений за атмосферными осадками (гг.)	Координаты	Высота над у. м. (м)
Усть-Кокса	1940–2017	1936–2017	50°16' с. ш., 85°37' в. д.	978
Яйлю	1939–2017	1936–2017	51°47' с. ш., 87°36' в. д.	697
Казахстан				
Зайсан	1937–2017	1937–2017	47°28' с. ш., 84°52' в. д.	603
Катон-Карагай	1932–2018	1936–2018	49°18' с. ш., 85°62' в. д.	1081
Китай				
Алтай	1954–2017	1954–2017	47°50' с. ш., 88°08' в. д.	737
Фухай	1958–2017	1958–2017	47°12' с. ш., 87°30' в. д.	496
Фуюнь	1962–2017	1962–2017	47°00' с. ш., 89°30' в. д.	827
Хабахе	1958–2017	1958–2017	48°04' с. ш., 86°25' в. д.	534
Цинхэ	1958–2017	1958–2017	46°40' с. ш., 90°25' в. д.	1220
Монголия				
Цэнгэл	1965–2014	1965–2014	48°56' с. ш., 89°10' в. д.	1905
Улгий	1961–2016	1961–2016	48°58' с. ш., 89°59' в. д.	1715
Ялалт	1970–2014	1970–2014	48°48' с. ш., 89°30' в. д.	2148

Также проводился поиск связей между приростом годичных колец и гидротермическим коэффициентом (ГТК) Селянинова. Расчет ГТК Селянинова для периодов май — июль и июнь — август производился по формуле:

$$\text{ГТК} = \sum P / 0,1(t_1 \cdot n_1 + \dots + t_n \cdot n_n), \quad (1)$$

где P — сумма осадков за используемый период, t — средняя месячная температура воздуха, n — количество дней в месяце.

Для выявления косвенных связей между приростом годичных колец и гидрологическими параметрами рассчитывались функции отклика между приростом и среднемесечными значениями расходов воды, измеренными на гидрологических постах (табл. 2), за те же периоды, которые были использованы при оценке влияния основных климатических параметров.

2.3. Инструментальные данные

Данные метеорологических станций по температуре воздуха и осадкам взяты с серверов Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации — Мирового центра данных (<http://meteo.ru/data.html>),

Таблица 2. Основные характеристики гидрологических постов

Название реки и гидропоста	Период наблюдений (гг.)	Координаты	Высота над у. м. (м)
Бассейн р. Оби			
Катунь — Сростки	1937–2000	52°25' с. ш., 85°42' в. д.	218
Катунь — Тюнгур	1938–2000	50°13' с. ш., 86°32' в. д.	846
Кокса — Усть-Кокса	1937–2000	50°16' с. ш., 85°37' в. д.	971
Чаган — Кызыл-Маны	1951–1995	49°55' с. ш., 88°00' в. д.	372
Чулышман-Балыкча	1930–2000	51°28' с. ш., 87°72' в. д.	435
Бассейн р. Иртыша			
Бухтарма — Печи	1937–1988	49°20' с. ш., 85°10' в. д.	645
Черный Иртыш — Буран	1938–1987	48°00' с. ш., 85°22' в. д.	630

архива «rp5» (<http://rp5.ru.html>), агентства NOAA (<https://www.ncdc.noaa.gov.html>). Данные метеорологических станций Китая были любезно предоставлены сотрудниками Синьцзянского института географии и экологии Китайской академии наук. Среднемесячные значения расходов воды, по данным гидрологических постов, получены в библиотеке Государственного гидрологического института (ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши), а также из гидрологической базы данных R-ArcticNET (<http://www.r-arcticnet.sr.unh.edu/v4.0/main.html>) и NOAA (<https://www.ncdc.noaa.gov.html>).

3. Результаты

3.1. Характеристика древесно-кольцевых хронологий

Согласно результатам дендрохронологического анализа, все семь локальных древесно-кольцевых хронологий (BUHv, CHlv, CHln, TAUu, KANn, UATn и TRBv) соответствуют статистическим критериям качества. Исследование закономерностей динамики радиальных приростов показало, что объединение локальных рядов в региональные возможно провести согласно высотным поясам произрастания растительности в регионе. Так, локальные хронологии BUHv и CHlv демонстрируют устойчивую во времени связь и могут быть объединены в одну древесно-кольцевую хронологию IRTv, отражающую изменчивость радиального прироста лиственницы сибирской в регионе исследования на верхней границе леса (рис. 2, табл. 3). Изменчивость прироста древесины на нижней границе леса отражают локальные хронологии CHln, TAUu, KANn. Они хорошо согласуются между собой, в результате чего были объединены в древесно-кольцевую хронологию IRTn. Включение локальных хронологий UATn и TRBv в обобщенные хронологии IRTv и IRTn невозможно, поскольку их связь с другими локальными хронологиями не устойчива во времени, что свидетельствует о их ненадежности в качестве косвенного источника информации о климате региона.

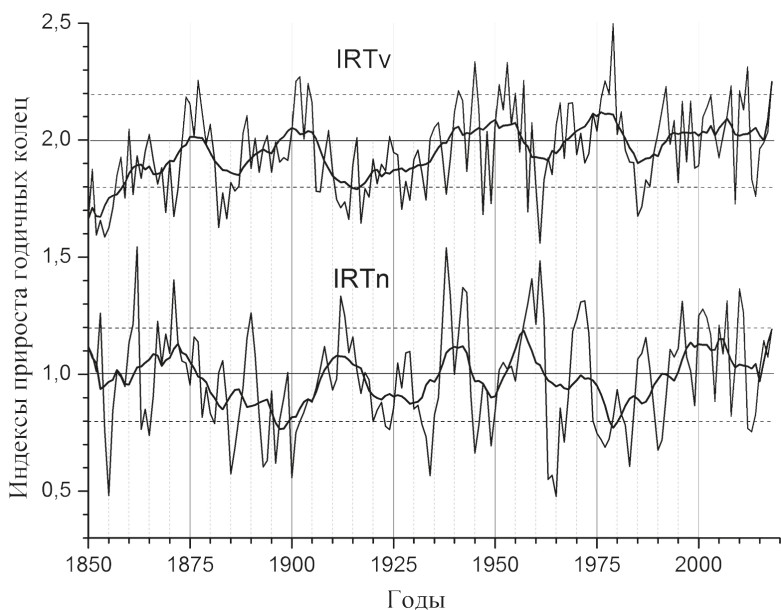


Рис. 2. Стандартные древесно-кольцевые хронологии IRTv и IRTn

Хронологии IRTv и IRTn характеризуются отсутствием корреляционной связи между собой. Оценка характера и величины тренда индексов прироста с использованием регрессионного анализа показала, что с 1850 г. на верхней границе леса коэффициент линейной аппроксимации составил 0,013 за каждые 10 лет, тогда как за период «климатической нормы» (1960–1990 гг.) и за последние 28 лет тренды статистически незначимы. Для нижней границы леса тренды не выявлены.

Таблица 3. Характеристики обобщенных древесно-кольцевых хронологий за период 1850–2018 гг.

Параметр	Обобщенные хронологии	
	IRTv	IRTn
Включенные локальные серии	BUHv, CHlv	CHIn, TAU _n , KAN _n
SD (Std/Res)	0,2/0,2	0,3/0,2
MS (Std/Res)	0,2/0,2	0,2/0,2
EPS (Std/Res)	0,94/0,95	0,91/0,92
Автокорреляция 1-го порядка (Std/Res)	0,453/0,001	0,559/0,065
PC1 (Std/Res), %	58/70	42/62
Годы максимальных приростов	1877, 1901–1902, 1904, 1941, 1945, 1951, 1953, 1957, 1977, 1979, 1992, 2008, 2010, 2012	1853, 1862, 1867, 1871, 1890, 1912, 1938, 1942–1943, 1959, 1961, 1971–1972, 1996, 2001, 2005, 2007, 2010
Годы минимальных приростов	1851, 1854, 1859, 1861, 1869, 1871, 1882, 1884, 1907, 1912, 1914, 1917, 1919, 1927, 1929, 1933, 1938, 1947, 1949, 1958, 1961, 1985, 2009, 2014	1855, 1863, 1865, 1881, 1885, 1893–1894, 1896, 1900, 1923–1924, 1934, 1945, 1949, 1963, 1965, 1967, 1977, 1983, 1990–1991, 2012–2013

В периоды 1850–1873, 1881–1900, 1906–1939, 1957–1965, 1982–1990 гг. прирост древесины на верхней границе леса характеризовался пониженными значениями. Годы минимальных и максимальных приростов годовых колец приведены в табл. 1. На нижней границе леса пониженные значения прироста приходятся на периоды 1850–1859, 1877–1907, 1916–1936, 1944–1951, 1962–1968, 1973–1992 гг.

3.2. Результаты дендроклиматического анализа

Прирост древесины на верхней границе леса определяется изменчивостью температуры воздуха июня — июля. Коэффициент корреляции⁴ между значениями температуры воздуха июня — июля (по данным метеостанций Яйлю, Усть-Кокса, Зайсан, Катон-Карагай, Кош-Агач, Кара-Тюрек, Кызыл-Озек, Фухай, Цинхэ, Хабахе, Алтай, Улгий, Ялалт, Цэнгэл, Тээли) и индексами прироста хронологии IRTv составляет 0,4...0,6/0,4...0,7 (рис. 3Б, 3В). Между приростом годовых колец и температурой воздуха, по данным метеостанций Фуюнь и Мугур-Аксы, коэффициент корреляции составляет 0,2...0,3/0,2...0,3. Вклад июньских температур существенно больше ($r=0,5...0,6/0,5...0,7$), чем июльских ($r=0,0...0,3/0,2...0,3$), и определяет около 50 % изменчивости прироста древесины на верхней границе леса. В отличие от влияния на прирост древесины температуры воздуха июня, влияние температуры июля проявляется во времени менее устойчиво.

На рис. 3А показано пространственное распределение коэффициентов корреляции между температурой воздуха июня — июля, по данным метеостанций региона исследования, и индексами радиального прироста хронологии IRTv. Видно, что по мере удаления от участков сбора образцов климатический сигнал постепенно ослабевает. В то же время достаточно тесная связь индексов прироста древесины прослеживается даже с данными достаточно удаленных метеостанций, расположенных в 250–300 км от участков сбора образцов.

Корреляционная связь древесно-кольцевой хронологии IRTv с осадками меньше, чем с температурой воздуха, или статистически незначима. Коэффициент корреляции между индексами прироста древесины и осадками мая — августа, по данным метеостанций Яйлю, Усть-Кокса, Зайсан, Катон-Карагай, Кара-Тюрек, Кызыл-Озек, составляет $-0,2...-0,4/-0,3...-0,4$. С данными остальных метеостанций статистически значимых связей не обнаружено. Очевидно, что влияние осадков на изменчивость прироста в данном случае косвенное. Между осадками и температурой воздуха мая — августа существует тесная статистически значимая корреляционная связь ($r=-0,5...-0,7$). Формирование плотной облачности при осадках приводит к снижению количества солнечной радиации и понижению температуры воздуха. Отрицательное влияние увлажнения на прирост годовых колец на верхней границе леса проявляется также при расчете коэффициентов корреляции между индексами и ГТК Сеянинова мая — июля ($r=-0,3...-0,4/-0,3...-0,5$) по тем же метеостанциям, а также по данным метеостанции Ак-Кем.

Статистическая связь между параметрами прироста годовых колец и речного стока косвенно подтверждает ведущее влияние температуры воздуха на прирост на

⁴ Все значения коэффициентов корреляции, приведенные в работе, рассчитаны с достоверностью 95 %. В тексте сначала приводятся значения коэффициентов корреляции, рассчитанные для стандартных (std) хронологий, через черту — для «остаточных» (res).

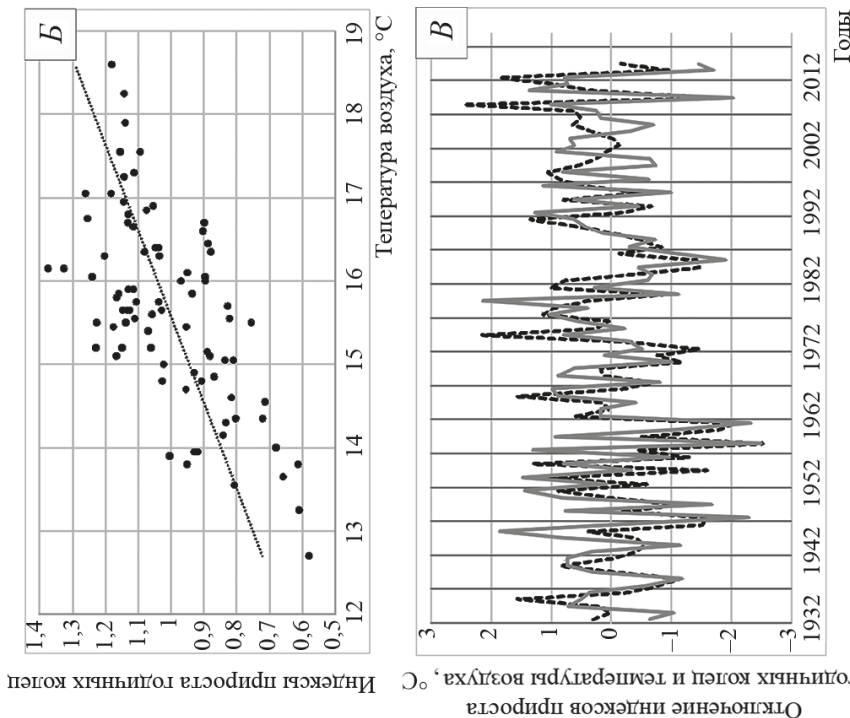


Рис. 3. Статистическая зависимость радиального прироста хронологии IRTV от температуры воздуха июля — июля: А — пространственное распределение коэффициентов корреляции между температурой воздуха июля — июля, по данным метеостанций региона исследования, и индексами радиального прироста хронологии IRTV (res); Б — линейная зависимость между температурой воздуха июля — июля, по данным метеостанции Катон-Карагай, и индексами радиального прироста по данным хронологии IRTV; В — отклонения температур воздуха июля — июля, по данным метеостанции Катон-Карагай (пунктирная линия), отклонения индексов прироста хронологии IRTV (сплошная линия)

Рис. 3. Статистическая зависимость радиального прироста хронологии IRTV от температуры воздуха июля — июля:

А — пространственное распределение коэффициентов корреляции между температурой воздуха июля — июля, по данным метеостанций региона исследования, и индексами радиального прироста хронологии IRTV (res); Б — линейная зависимость между температурой воздуха июля — июля, по данным метеостанции Катон-Карагай, и индексами радиального прироста по данным хронологии IRTV; В — отклонения температур воздуха июля — июля, по данным метеостанции Катон-Карагай (пунктирная линия), отклонения индексов прироста хронологии IRTV (сплошная линия)

верхней границе леса. Между расходами воды июля — августа по данным гидрологических постов р. Катунь — с. Сростки, р. Чулышман — с. Балыкча, р. Кокса — с. Усть-Кокса, р. Катунь — с. Тюнгур, р. Бухтарма — с. Печи, когда сток на реках с преимущественно снежно-дождевым питанием достигает наибольших значений, и индексами прироста хронологии IRTv коэффициент корреляции составляет $-0,3 \dots 0,4 / -0,4 \dots -0,5$. Связь радиального прироста с расходами воды р. Чаган (гидропост Кызыл-Мань) июня — июля, питание которой преимущественно ледниковое, положительная: $r = 0,4 / 0,3$. Связь прироста годичных колец, по данным хронологии IRTv, с расходами воды в другие периоды года проявляется менее устойчиво или статистически незначима.

Определяющее влияние на прирост древесины на нижней границе леса оказывают осадки, выпадающие в период с декабря предыдущего года по июль текущего. Коэффициент корреляции между индексами прироста хронологии IRTv и значениями сумм осадков с декабря предыдущего года по июль текущего составляет $0,2 \dots 0,6 / 0,3 \dots 0,6$ (рис. 4Б, 4В). При этом наибольший вклад в изменчивость древесного прироста вносят осадки весенне-летних месяцев, особенно мая — июня: $r = 0,2 \dots 0,3 / 0,2 \dots 0,4$.

Влияние осадков на прирост годичных колец возможно проследить только по метеостанциям, расположенным в зоне наилучшего доступа воздушных масс Атлантики: Яйлю, Усть-Кокса, Зайсан, Катон-Карагай, Ак-Кем, Кызыл-Озек, Фухай, Цинхэ, Хабахе, Фуюнь, Алтай (рис. 4А). Исключением является высокогорная станция Кара-Тюрек (2601 м н. у. м.). Корреляционная связь радиального прироста с ГТК Селянинова мая — июля (по данным метеостанций Яйлю, Усть-Кокса, Зайсан, Катон-Карагай, Кызыл-Озек, Цинхэ, Хабахе, Фуюнь, Алтай) также положительная, коэффициент корреляции равен $0,2 \dots 0,3 / 0,3 \dots 0,4$.

Подтверждением того, что лимитирующим фактором прироста древесины на нижней границе леса служат осадки, является косвенная связь прироста с показателями стока рек, имеющих преимущественно снежно-дождевое питание (по данным гидропостов р. Катунь — с. Сростки, р. Чулышман — с. Балыкча, р. Кокса — с. Усть-Кокса, р. Катунь — с. Тюнгур, р. Бухтарма — с. Печи, р. Черный Иртыш — с. Буран) в мае — августе: $r = 0,3 \dots 0,5 / 0,4 \dots 0,6$. Наибольшее значение при этом имеет расход воды в июле: $r = 0,3 \dots 0,5 / 0,3 \dots 0,5$. Связь радиального прироста с данными по гидропосту р. Чаган — клх. Кызыл-Мань не найдена.

Влияние температуры воздуха на прирост годичных колец на нижней границе леса прослеживается слабо. Между индексами прироста хронологии IRTn и температурой воздуха мая — июля, по данным метеостанций Усть-Кокса, Зайсан, Катон-Карагай, Хабахе, Алтай, коэффициент корреляции равен $-0,3 / -0,3 \dots -0,4$.

4. Обсуждение

Оценка влияния основных климатических факторов на ширину годичных колец лиственницы сибирской, произрастающей в верховьях р. Иртыша, показала, что на верхней границе леса радиальный прирост лиственницы сибирской зависит от термического режима начала периода вегетации. Древесно-кольцевая хронология, полученная по верхней границе леса (IRTv), отражает изменения температу-

ры воздуха июня — июля в масштабе региона, демонстрируя потепление с конца Малой ледниковой эпохи. Данная хронология хорошо согласуется с работами по соседним районам Алтая (Ойдупаа и др., 2004; Chen et al., 2012; Mygland et al., 2012; Zhang et al., 2015; Mukhanova et al., 2016; Andreeva et al., 2019).

Наличие достаточно сильного климатического сигнала ($r=0,7$) позволяет использовать хронологию IRТv для реконструкции температурного ряда. В то же время климатический сигнал в хронологии содержит определенные локальные особенности: по сравнению с более северными районами Алтая температуры июля меньше влияют на изменчивость прироста древесины. Также характерно отсутствие положительного тренда за последние три десятилетия по сравнению с более восточными районами Монголии и Тувы, где тренды определены в 0,06 и в 0,11 за каждые 10 лет соответственно (Andreeva et al., 2019). Поэтому, несмотря на наличие общих тенденций, не рекомендуется объединять данную древесно-кольцевую хронологию с другими рядами, полученными для верхней границы леса на территории Алтае-Саян и Западной Монголии.

На нижней границе леса изменчивость радиального прироста определяется динамикой осадков зимне-весенне-летнего периода (декабрь — июль). Вероятно, твердые осадки влияют на увлажнение верхних почвенных горизонтов после снеготаяния. Наибольшее значение при этом имеет увлажнение в период завершения снеготаяния и до начала вегетации (май — июнь). Древесно-кольцевая хронология, полученная по нижней границе леса (IRТn), отражает изменения количества осадков только для территории региона исследования, находящейся под влиянием воздушных масс Атлантики. Анализ динамики радиального прироста показал, что за последние 150 лет режим увлажнения не претерпел существенных изменений. Выделенные годы минимальных и максимальных приростов, а также периоды повышенных и пониженных приростов по хронологии IRТn хорошо согласуются с результатами работы Zhang et al. (2018), в которой приводится реконструкция стока р. Каба (Китай, Синьцзян-Уйгурский автономный округ). Для того чтобы получить в будущем качественную реконструкцию осадков по древесным кольцам, рекомендуется расширять дендрохронологическую сеть и продолжать сбор образцов древесины по нижней границе леса в верховьях Иртыша. Увеличение фактического материала поможет усилить общий климатический сигнал в обобщенной хронологии.

Литература

- Айвазян, С. А., Бухштабер, В. М., Енюков, И. С., Мешалкин, Л. Д., 1989. Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности. Финансы и статистика, Москва.
- Ойдупаа, О. Ч., Ваганов, Е. А., Наурызбаев, М. М., 2004. Длительные изменения летней температуры и радиальный рост лиственницы на верхней границе леса в Алтае-Саянской горной стране. Лесоведение 6, 84–91.
- Шиятов, С. Г., 1986. Дендрохронология верхней границы леса на Урале. Наука, Москва.
- Шиятов, С. Г., Ваганов, Е. А., Кирдянов, А. В., Круглов, В. Б., Мазепа, В. С., Наурызбаев, М. М., Хантемиров, Р. М., 2000. Методы дендрохронологии. Часть 1. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации. КрасГУ, Красноярск.
- Andreeva, M. V., Kurochkin, Iu., N., Syromiatina, M. V., Chistiakov, K. V., 2019. Factors of Spatial and Temporal Variability of Siberian Larch Growth in the Mountain Regions of Altai, Tuva, and Mongolia. Russian Journal of Ecology 50 (5), 453–459.

- Biondi, F., Waikul, K., 2004. DENDROCLIM2002: A C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Computers & Geosciences* 30, 303–311. doi:10.1016/j.cageo.2003.11.004
- Chen, F., Yuan, Y., Wei, W., Fan, Z., Zhang, T., Shang, H., Zhang, R., Yu, S., Ji, C., Qin, L., 2012. Climatic response of ring width and maximum latewood density of *Larix sibirica* in the Altay Mountains, reveals recent warming trends. *Annals of Forest Science* 69 (6), 723–733. doi: 10.1007/s13595-012-0187-2
- Cook, E., Holmes, R., 1999. Program ARSTAN. Chronology development with statistical analysis. Users' manual for Program ARSTAN. University of Arizona, Tucson.
- Cook, E., Kairiukstis, L. 1990. *Methods of dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*. Kluwer Acad., Norwell.
- D'Arrigo, R., Jacoby, G., Pederson, N., Frank, D., Buckley, B., Baatarbileg, N., Mijjidorj, R., Dugarjav, C., 2000. Mongolian tree-rings, temperature sensitivity and reconstructions of Northern Hemisphere temperature. *Holocene* 10 (6), 669–672. doi: 10.1191/09596830094926
- Fritts, H., 1976. *Tree rings and climate*. Acad. Press, New York.
- Grissino-Mayer, H., 2001. Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program Cofecha. *Tree-Ring Research* 57 (2), 205–221.
- Holmes, R., 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin* 43, 69–78.
- Mukhanova, M. V. (Andreeva, M. V.), Syromyatina, M. V., Chistyakov, K. V., 2016. Reconstructing the hydrometeorological indicators in the mountains of Southwestern Tuva and Northwestern Mongolia from dendrochronological data. *Geography and Natural Resources* 37 (2), 144–150. doi:10.1134/S1875372816020086
- Myglan, V. S., Zharnikova, O. A., Malysheva, N. V., Gerasimova, O. V., Vaganov, E. A., Sidorov, O. V., 2012. Constructing the tree-ring chronology and reconstructing summertime air temperatures in Southern Altai for the last 1500 years. *Geography and natural resources* 33 (3), 200–207. doi: 10.1134/S1875372812030031
- Peters, K., Jacoby, G., Cook, E., 1981. Principal component analysis of tree-ring sites. *Tree-Ring Bulletin* 41, 1–19.
- Rinn, F., 2003. TSAP-Win time series analysis and presentation for dendrochronology and related applications: version 0.53 for Microsoft Windows. Rinn Tech., Heidelberg.
- Wigley, T. M. L., Briffa, K. R., Jones, P. D., 1984. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of climate and Applied Meteorology* 23, 201–213.
- Zhang, T., Yuan, Y., Chen, F., Yu, S., Zhang, R., Qin, L., Jiang, S., 2018. Reconstruction of hydrological changes based on tree-ring data of the Haba River, northwestern China. *Journal of Arid Land* 10 (1), 53–67. doi:10.1007/s40333-017-0034-2
- Zhang, T., Yuan, Y., Hu, Y., Wei, W., Shang, H., Huang, L., Zhang, R., Chen, F., Yu, S., Fan, Z., Qin, L., 2015. Early summer temperature changes in the southern Altai Mountains of Central Asia during the past 300 years. *Quaternary International* 358, 68–76. doi:10.1016/j.quaint.2014.12.005
- Zhantlessova, S., Zhumadina S., 2015. The use of Tree-ring Methods in the Study of Birch Forest Plantations in Kazakhstan. *Biosciences biotechnology research Asia* 12 (2), 1719–1725.

Статья поступила в редакцию 23 декабря 2018 г.

Статья рекомендована в печать 1 октября 2019 г.

Контактная информация:

Андреева Мария Владимировна — m.v.andreeva@spbu.ru

Жанг Донглианг — zhdl@ms.xjb.ac.cn

The Influence of Climatic Factors on Tree-Ring Width of Siberian Larch in the Upper Basin of the Irtysh River*

M. V. Andreeva¹, D. Zhang²

¹ St. Petersburg State University,

7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

² Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences,
818, Beijing South Road, Urumqi, 830011, People's Republic of China

For citation: Andreeva, M. V., Zhang D. (2019). The Influence of Climatic Factors on Tree-Ring Width of Siberian Larch in the Upper Basin of the Irtysh River. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 64 (4), 530–544. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.402> (In Russian)

This paper presents the results of assessing the influence of the main climatic factors on the tree-ring width of Siberian larch (*Larix sibirica* Ledeb.) growing in the upper basin of the Irtysh River. Tree core sampling was carried out on the northern macroslopes of the Sarymsakty, Tarbagatai and Southern Altai ranges in Kazakhstan, as well as on the southern macroslopes of the Southern Altai ranges in Kazakhstan and China, from three sites on the upper tree line and four on the lower tree line. According to the results of dendrochronological analysis, two generalized tree-ring chronologies, IRTv and IRTn, were obtained, reflecting the variability of the radial growth of Siberian larch in the region of study on the upper and lower tree lines, respectively. On the upper tree line, the radial growth of Siberian larch is dependent on the thermal regime of the beginning of the growing season (June–July). The analysis of tree-ring growth dynamics showed that during 1850–1873, 1881–1900, 1906–1939, 1957–1965 and 1982–1990, tree-ring growth at the upper tree line was characterized by lower values. Since 1850 there has been a positive trend in the tree-ring growth variability, which indicates better thermal conditions since the end of the Little Ice Age. The sufficiently strong climatic signal ($r=0.7$) makes it possible to use IRTv chronology for temperature reconstruction. On the lower tree line the variability of radial tree-ring growth is determined by the dynamics of precipitation in the winter-spring-summer period (December–July). The most important aspect of this is moisturization during the completion of snowmelt and the beginning of the growing season (May–June). Analysis of tree growth dynamics showed that over the past 150 years the moisture regime has not changed significantly. The reduced values of tree-ring growth correspond to 1850–1859, 1877–1907, 1916–1936, 1944–1951, 1962–1968 and 1973–1992.

Keywords: tree-ring growth, dendroclimatic analysis, Siberian larch, June–July air temperature, December–July precipitation, East Kazakhstan, upper basin of Irtysh River.

References

- Aivazian, S. A., Bukhshtaber, V. M., Eniukov, I. S., Meshalkin, L. D., 1989. Applied statistics. Classification and Dimension Reduction. Finansy i statistika Publ., Moscow. (In Russian)
- Andreeva, M. V., Kurochkin, Iu. N., Syromiatina, M. V., Chistiakov, K. V., 2019. Factors of Spatial and Temporal Variability of Siberian Larch Growth in the Mountain Regions of Altai, Tuva, and Mongolia. *Russian Journal of Ecology* 50 (5), 453–459.
- Biondi, F., Waikul K., 2004. DENDROCLIM2002: A C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Computers & Geosciences* 30, 303–311. doi:10.1016/j.cageo.2003.11.004
- Chen, F., Yuan, Y., Wei, W., Fan, Z., Zhang, T., Shang, H., Zhang, R., Yu, S., Ji, C., Qin, L., 2012. Climatic response of ring width and maximum latewood density of *Larix sibirica* in the Altay Mountains, reveals recent warming trends. *Annals of Forest Science* 69 (6), 723–733. doi: 10.1007/s13595-012-0187-2

* The research was supported by Russian Science Foundation (grant №17-77-10041).

- Cook, E., Holmes, R., 1999. Program ARSTAN. Chronology development with statistical analysis. Users' manual for Program ARSTAN. University of Arizona, Tucson.
- Cook, E., Kairiukstis, L., 1990. Methods of dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences. Kluwer Acad., Norwell.
- D'Arrigo, R., Jacoby, G., Pederson, N., Frank, D., Buckley, B., Baatarbileg, N., Mijidorj, R., Dugarjav, C., 2000. Mongolian tree-rings, temperature sensitivity and reconstructions of Northern Hemisphere temperature. *Holocene* 10 (6), 669–672. doi:10.1191/09596830094926
- Fritts, H., 1976. Tree rings and climate. Acad. Press, New York.
- Grissino-Mayer, H., 2001. Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program Cofecha. *Tree-Ring Research* 57 (2), 205–221.
- Holmes, R., 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin* 43, 69–78.
- Mukhanova, M. V. (Andreeva, M. V.), Syromyatina, M. V., Chistyakov, K. V., 2016. Reconstructing the hydrometeorological indicators in the mountains of Southwestern Tuva and Northwestern Mongolia from dendrochronological data. *Geography and Natural Resources* 37 (2), 144–150. doi:10.1134/S1875372816020086
- Mygland, V. S., Zharnikova, O. A., Malysheva, N. V., Gerasimova, O. V., Vaganov, E. A., Sidorov, O. V., 2012. Constructing the tree-ring chronology and reconstructing summertime air temperatures in Southern Altai for the last 1500 years. *Geography and natural resources* 33 (3), 200–207. doi: 10.1134/S1875372812030031
- Oidupaa, O. Ch., Vaganov, E. A., Naurzbaev, M. M., 2004. Prolonged Changes in Summer Temperature and Radial Increment of Larch Trees at the Upper Timberline in the Altai-Sayan Mountains. *Lesovedenie* 6, 84–91. (In Russian)
- Peters, K., Jacoby, G., Cook, E., 1981. Principal component analysis of tree-ring sites. *Tree-Ring Bulletin* 41, 1–19.
- Rinn, F., 2003. TSAP-Win time series analysis and presentation for dendrochronology and related applications: version 0.53 for Microsoft Windows. Rinn Tech., Heidelberg.
- Shiitov, S. G., 1986. Dendrochronology of the upper forest border in the Urals. Nauka Publ., Moscow. (In Russian)
- Shiitov, S. G., Vaganov, E. A., Kirdianov, A. V., Kruglov, V. B., Mazepa, V. S., Naurzbaev, M. M., Khantemirov, R. M., 2000. Methods of dendrochronology. Part 1. The basics of dendrochronology. The collection and receipt of tree-ring information: a training manual. KrasGU Publ., Krasnoyarsk. (In Russian)
- Wigley, T. M. L., Briffa, K. R., Jones, P. D., 1984. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of climate and Applied Meteorology* 23, 201–213.
- Zhang, T., Yuan, Y., Chen, F., Yu, S., Zhang, R., Qin, L., Jiang, S., 2018. Reconstruction of hydrological changes based on tree-ring data of the Haba River, northwestern China. *Journal of Arid Land* 10 (1), 53–67. doi: 10.1007/s40333-017-0034-2
- Zhang, T., Yuan, Y., Hu, Y., Wei, W., Shang, H., Huang, L., Zhang, R., Chen, F., Yu, S., Fan, Z., Qin, L., 2015. Early summer temperature changes in the southern Altai Mountains of Central Asia during the past 300 years. *Quaternary International* 358, 68–76. doi: 10.1016/j.quaint.2014.12.005
- Zhantlessova, S., Zhumadina S., 2015. The use of Tree-ring Methods in the Study of Birch Forest Plantations in Kazakhstan. *Biosciences biotechnology research Asia* 12 (2), 1719–1725.

Received: December 23, 2018

Accepted: October 1, 2019

Contact information:

Mariia V. Andreeva — m.v.andreeva@spbu.ru
 Dongliang Zhang — zhdl@ms.xjb.ac.cn