

УДК 911.2

М. В. МУХАНОВА, М. В. СЫРОМЯТИНА, К. В. ЧИСТЯКОВ

Санкт-Петербургский государственный университет

**ДИНАМИКА ПРИРОСТА ЛИСТВЕННИЦЫ СИБИРСКОЙ
В ГОРАХ ТУВЫ И МОНГОЛЬСКОГО АЛТАЯ**

*Проведен дендрохронологический анализ древесных образцов лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) с 33 участков, расположенных в горах Юго-Западной Тувы и Северо-Западной Монголии. Получены три региональные хронологии, выявлены пространственно-временные особенности динамики прироста, в частности выделены периоды повышенного и пониженного прироста и циклы различной продолжительности. Статистический анализ древесно-кольцевых хронологий позволяет судить о наличии сильного внешнего (климатического) воздействия на прирост.*

Ключевые слова: дендрохронологический анализ, динамика радиального прироста, Юго-Западная Тува, Северо-Западная Монголия, климатический сигнал, цикличность.

*A dendrochronological analysis is made of wood samples of Siberian larch (*Larix sibirica* Ledeb.) from 33 areas situated in the mountains of Southwestern Tuva and Northwestern Mongolia. The analysis provided three regional chronologies, revealed spatiotemporal characteristics of the growth dynamics, specifically periods of increased and decreased increment, and cycles of a different duration. Statistical analysis of tree-ring chronologies gives evidence for a strong external (climatic) effect on the growth.*

Keywords: dendrochronological analysis, dynamics of radial growth, Southwestern Tuva, Northwestern Mongolia, climatic signal, cyclicity.

ВВЕДЕНИЕ

Район исследования включает в себя горный массив Монгун-Тайга и хр. Западный Танну-Ола (Юго-Западная Тува), а также территории, прилегающие к горному массиву Табын-Богдо-Ола в Монголии. Климат района резко континентальный, с большими годовыми амплитудами температур воздуха, малым количеством осадков (100–400 мм) и неравномерным их распределением в течение года (около 70 % годового количества осадков приходится на летние месяцы), что обусловлено значительной удаленностью от океанов. Вместе с тем здесь развиты центры современного оледенения. Лиственничные древостои не образуют сплошного пояса, разница высот между верхней (2300–2400 м) и нижней (1900–2000 м) границами лесных массивов составляет в среднем 250 м.

В Алтае-Саянском регионе и в Северной и Центральной Монголии проведено много дендрохронологических исследований [1–15]. Для местности массива Монгун-Тайга к настоящему времени построена длительная древесно-кольцевая хронология и выполнена реконструкция раннелетних температур воздуха за период около 2000 лет [16], для Монгольского Алтая — реконструкция индекса сухости за последние 440 лет [17].

В задачи исследования входило расширение дендрохронологической сети в районах с фрагментарным распространением горных лесов для выявления пространственно-временных закономерностей изменений радиальных приростов деревьев, а также статистическая оценка наличия внешних сигналов и циклических составляющих в древесно-кольцевых хронологиях. Под внешним сигналом понимается прежде всего воздействие изменений климата [18, 19] и связанных с ним факторов (гидрологических, гидрогеологических, геокриологических, эдафических и др.).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В ходе экспедиций 2012–2013 гг. произведен сбор образцов (кернов) древесины лиственницы (*Larix sibirica* Ledeb.) по общепринятым методикам [20–22]. Отбор образцов выполнялся возрастными бурами с живых разновозрастных деревьев по двум (реже по одному) радиусам на высоте 0,3–1,3 м как на верхней, так и на нижней границах леса. Большая часть пробных площадок была заложена на склонах северной экспозиции. С каждой площадки взяты образцы с 5–15 деревьев, иногда больше.

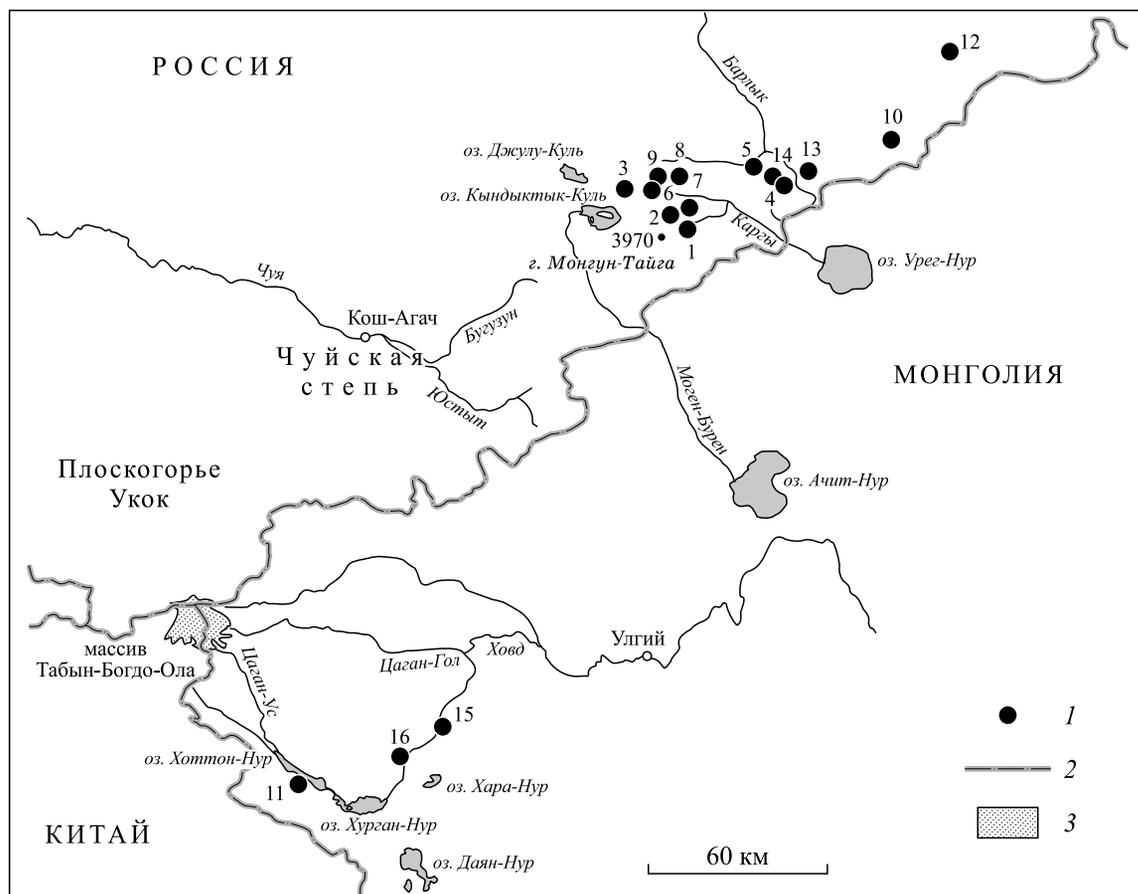


Рис. 1. Схема участков сбора дендрохронологических образцов.

1 — место сбора образцов; 2 — государственная граница; 3 — ледники. Остальные пояснения см. в табл. 1.

Всего керны отобраны с 400 деревьев на 33 площадках, 18 из которых расположены в районе горного массива Монгун-Тайга, 10 — в районе хр. Западный Танну-Ола и пять — в Монгольском Алтае и на прилегающих территориях (рис. 1, табл. 1).

Ширина колец измерялась на полуавтоматической установке LINTAB с точностью 0,01 мм. Визуализация и сопоставление временных рядов радиального прироста каждого дерева, выявление выпавших и ложных колец, а также статистическая проверка перекрестного датирования проводились в программах TsarWin Professional [23], STATISTICA и Cofecha [24, 25]. Индексирование каждой индивидуальной древесно-кольцевой хронологии выполнялось в программе ARSTAN [26]. В качестве аппроксимирующей функции, описывающей возрастную тренд, использовалась негативная экспонента или линейная регрессия. Путем осреднения индивидуальных хронологий с помощью функции среднего значения (robust biweight mean) получены обобщенные хронологии.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

С использованием вышеперечисленных методов построены 33 локальные древесно-кольцевые хронологии длительностью от 55 до 351 года. Для каждой из них были получены стандартные (standard — STD) и «остаточные» (residual — RES) хронологии. Считается, что именно в последних содержится максимальный климатический сигнал, так как применение модели авторегрессии исключает в них инерционность в реакции прироста деревьев на климат. В то же время хронологии STD показывают значительную автокорреляцию, поскольку в них на прирост текущего года влияют условия предыдущих лет. Однако с учетом того, что в хронологиях RES низкочастотные колебания практи-

Таблица 1

Характеристика участков сбора образцов древесины

Номер на карте	Код станции	Координаты		Высота над ур. моря, м	Экспозиция	Кол-во деревьев, с которых отбирались образцы
		с. ш.	в. д.			
1	1 – PMU_v	50°18'	90°15'	2245	С	15
	2 – RVM_v			2380	СВ	13
	3 – RVM_n			2226	ССВ	14
	4 – RVR_n			2173	ССВ	5
2	5 – LKA_v	50°26'	90°05'	2165	–	7
3	6 – KAR_v	50°26'	89°57'	2282	СВ	15
	7 – KAR_n			2211	СВ	8
4	8 – KCH_v	50°27'	90°41'	2375	СВ	8
	9 – KCH_n			1971	СВ	14
5	10 – TAL_v	50°29'	90°35'	2429	С	15
	11 – TAL_n			1807	С	6
6	12 – PKA_v	50°21'	90°11'	2275	С	6
	13 – PKA_n			2154	С	22
	14 – NMK_v			2405	С	14
	15 – NMU_v			2395	С	12
	16 – NMK_n			2245	С	14
	17 – VMK_v			2385	СВ	13
7	18 – AKH_v	50°22'	90°16'	2220	С	12
	19 – AKH_n			2049	С	9
8	20 – WZS_v	50°28'	90°13'	2330	З	9
	21 – WZS_n			2229	СЗ	15
9	22 – SZS_v	50°28'	90°07'	2275	Ю	7
	23 – STO_v			2133	ЮВ	15
11	24 – HOT_v	48°37'	88°18'	2538	СВ	16
	25 – HOT_n			2090	СВ	11
12	26 – NTO_v	50°49'	91°37'	2224	С, СЗ	15
	27 – UTO_v			2068	Ю	13
13	28 – LAR_v	50°28'	90°51'	2205	СВ	9
	29 – LAR_n			2116	СВ	16
14	30 – LEH_v	50°25'	90°44'	2512	ССВ	8
15	31 – KOB_v	48°47'	88°59'	2517	С	16
16	32 – MOG_v	48°42'	88°46'	2425	В, СВ	14
	33 – MOG_n			2052	СВ	14

Примечание. Участки сбора образцов: v — на верхней границе леса, n — на нижней границе леса.

чески отсутствуют и это делает их непригодными для оценки длительных трендов [21], в последующем дендрохронологическом анализе использовались оба вида хронологий.

Для предварительной оценки наличия в построенных хронологиях внешнего сигнала были рассчитаны основные статистические характеристики: стандартное отклонение (standard deviation — SD) — для определения амплитуды изменчивости прироста; коэффициент чувствительности (mean sensitivity — MS) — для оценки степени воздействия внешних факторов на изменчивость прироста; «сигнал-шум» (signal-to-noise ratio — SNR) — показатель отношения степени общей изменчивости прироста к наличию индивидуальных особенностей прироста [18, 22, 27].

Стандартное отклонение стандартизированных хронологий варьирует от 0,188 до 0,449, остаточных — от 0,174 до 0,326. Как правило, стандартное отклонение хронологий STD больше, чем у хронологий RES. Большие значения коэффициента чувствительности, напротив, характерны для оста-

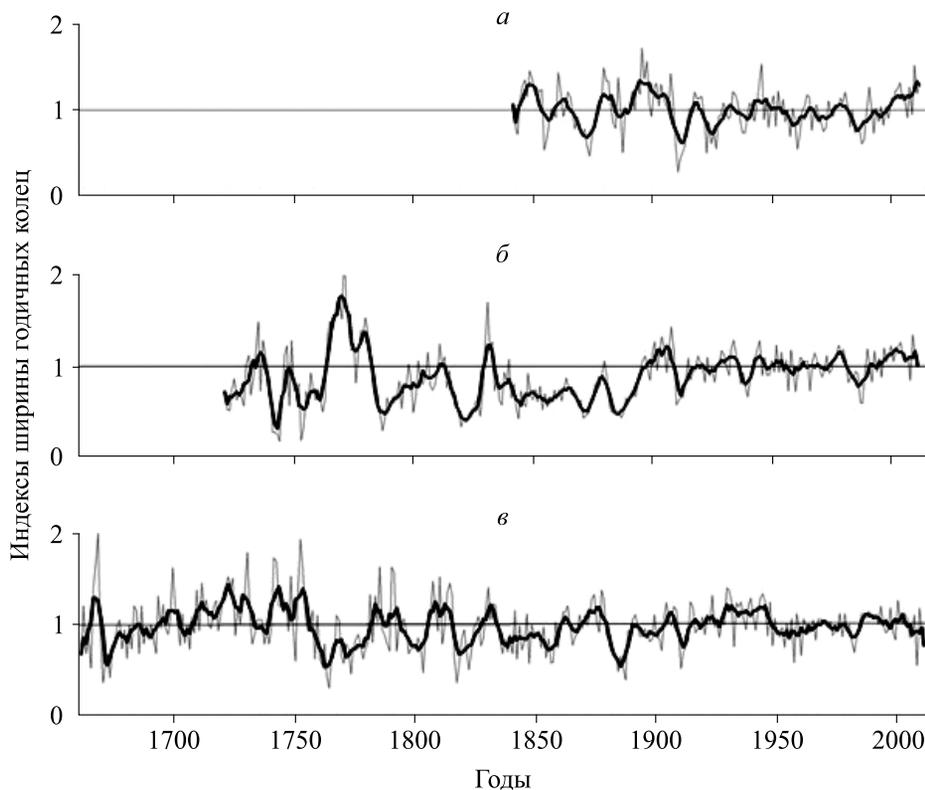


Рис. 2. Стандартные региональные древесно-кольцевые хронологии, сглаженные 7-летним скользящим средним.

Хронология: *a* — WTO; *б* — MON; *в* — КОВ.

точных хронологий. Они меняются от 0,201 до 0,404, тогда как у стандартных — от 0,188 до 0,371. Значения коэффициента «сигнал—шум» в среднем также выше у остаточных хронологий. В целом рассчитанные показатели свидетельствуют о том, что остаточные хронологии более чувствительны и лучше отражают климатический сигнал.

В локальных хронологиях, полученных по деревьям, испытывающим влияние сходного комплекса природных условий, изменчивость индексов прироста должна быть относительно синхронной. В связи с этим возникает возможность регионального обобщения сходных древесно-кольцевых рядов. Для построения региональных хронологий отбирались локальные хронологии, коэффициент корреляции (r) между которыми превышает 0,5. В итоге удалось построить три обобщенные хронологии (рис. 2): MON — древесно-кольцевая хронология из 10 локальных хронологий массива Монгун-Тайга; WTO — древесно-кольцевая хронология из шести локальных хронологий хр. Западный Танну-Ола; КОВ — древесно-кольцевая хронология из двух локальных хронологий долины р. Ховд в Монголии.

Таблица 2

Статистические характеристики региональных древесно-кольцевых хронологий

Древесно-кольцевая хронология	Длительность, годы	SD	MS	SNR	Автокорреляция 1-го порядка
MON	1722–2012	0,304/0,200	0,213/0,223	44/60	0,703/–0,002
WTO	1842–2012	0,250/0,200	0,206/0,231	32/38	0,524/0,012
КОВ	1662–2012	0,266/0,234	0,237/0,268	9/14	0,396/0,002

Примечание. Через косую указаны статистические характеристики стандартных и остаточных хронологий (STD/RES).

Для этих хронологий также были рассчитаны основные статистические характеристики (табл. 2).

Полученные региональные хронологии характеризуются довольно высокими показателями стандартного отклонения и средней чувствительности. Отношение «сигнал—шум» в хронологиях по Монгун-Тайге и Западному Танну-Ола выше, чем в хронологии Монгольского Алтая. Вероятнее всего, это связано с меньшим количеством включенных

Таблица 3

Годы минимального прироста годичных колец, периоды повышенного и пониженного прироста хронологий MON и WTO

Век	Прирост		
	минимальный	пониженный	повышенный
XVIII	1733, 1775, 1785, 1788	1734–1761	1762–1783
XIX	1855, 1884–1885	1812–1835, 1843–1895	1800–1811, 1890–1905
XX–XXI	1911, 1927, 1947, 1954, 1958, 1961, 1967, 1983, 1988, 1995, 1999, 2009	1911–1920, 1980–1988	1994–2008

в нее локальных хронологий, так как данный показатель зависит от среднего коэффициента корреляции между рядами индексов прироста и количества рядов, включенных в анализ.

В целом динамика прироста древесно-кольцевых хронологий массива Монгун-Тайга (MON) и хр. Западный Танну-Ола (WTO) схожа. Связь между рядами положительная и статистически значимая ($r = 0,42$). Выделены общие для них годы минимального прироста годичных колец, а также периоды повышенного и пониженного прироста (табл. 3).

Значимой связи между обобщенными хронологиями из Монгольского Алтая и Тувы выявить не удалось. Продолжительные периоды повышенного прироста в хронологии Монгольского Алтая (КОВ) отмечаются в 1694–1757, 1782–1794, 1918–1949, 1986–2005 гг., а периоды пониженного прироста — в 1666–1693, 1758–1782, 1834–1864, 1878–1916, 1949–1985 гг.

Различные оценки динамики прироста годичных колец показывают понижение в XIX в. уровня прироста с последующим его повышением, а также наличие положительного тренда за последние 100–150 лет [10, 12]. Можно предположить, что эти изменения связаны со специфической реакцией лесной растительности на завершение Малой ледниковой эпохи во Внутренней Азии. В нашем случае можно отметить положительный статистически значимый тренд прироста и в хронологии MON. Вместе с тем для двух других древесно-кольцевых хронологий (WTO и КОВ) не удалось выявить положительного статистически значимого тренда в изменении прироста. Визуальная оценка индивидуальных нестандартизированных хронологий позволяет утверждать, что примененная методика стандартизации не послужила причиной устранения низкочастотных колебаний.

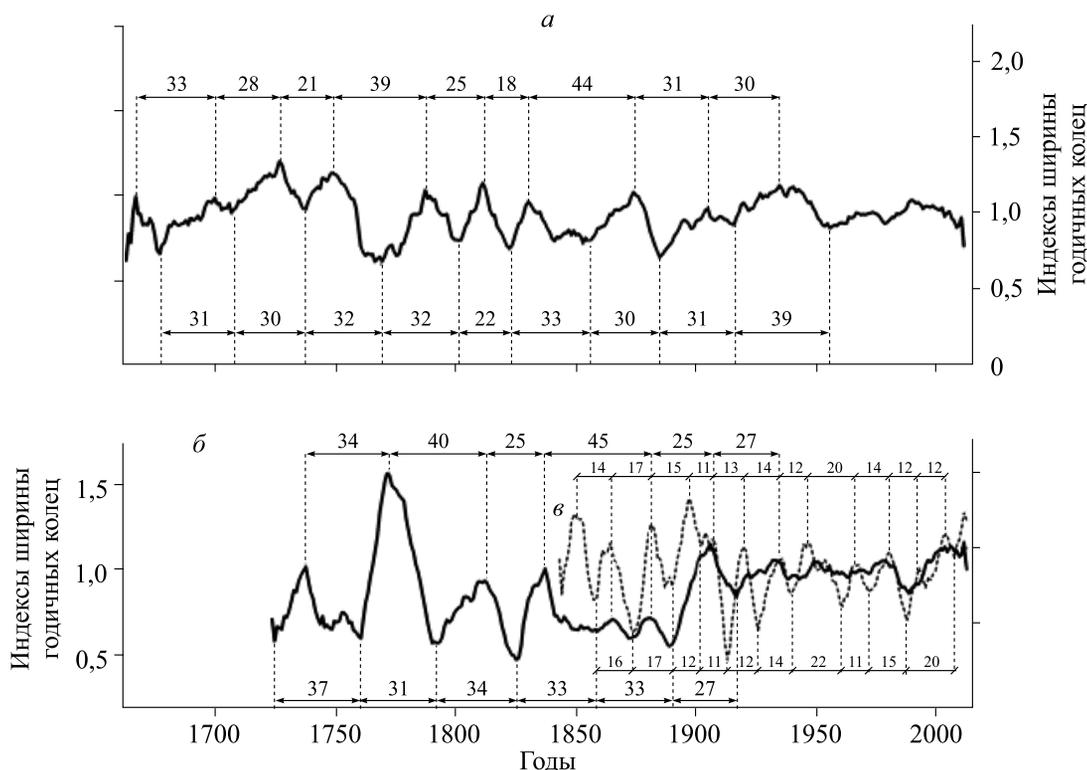


Рис. 3. Циклические составляющие в региональных древесно-кольцевых хронологиях, сглаженных 11-летним скользящим средним.

Хронология: а — КОВ; б — MON; в — WTO.

Еще одним свидетельством климатической обусловленности прироста годичных колец является наличие циклов в колебаниях прироста. Спектральный анализ временных рядов прироста для трех региональных хронологий выполнялся в программе STATISTICA. Его результаты позволяют говорить о наличии устойчивых циклических составляющих. Во всех хронологиях одинаково ярко проявляется цикл с периодом 2–2,6 года. Предположительно этот цикл является отражением квазидвухлетнего цикла атмосферной циркуляции, который выражается «в смене направлений зональных ветров в экваториальной нижней стратосфере, но заметен и в других метеорологических явлениях, в том числе и внетропических широт» [28, с. 15]. В хронологии КОВ выделяются 5- и 8-летние циклы.

Более продолжительные циклы были выявлены с помощью спектрального анализа и визуальной оценки временных рядов прироста. В хронологиях КОВ и MON отчетливо прослеживаются колебания брикнеровского типа средней продолжительностью 30 лет (рис. 3, а, б). Цикл Брикнера — 20–50-летний цикл, проявляющийся в различных геофизических процессах, в том числе в смене тепло-сухих лет на прохладно-влажные, в динамике ледников, колебаниях уровней озер [29, 30]. Подобная цикличность неоднократно обнаруживалась в древесно-кольцевых хронологиях [31, 32]. Наиболее отчетливо такая цикличность проявлялась в XVIII–XIX вв., в XX в. данные колебания выражены слабо.

В тувинских хронологиях выявлены циклы со средней продолжительностью 14–17 лет, при этом визуальная оценка позволяет выделить отдельные циклы продолжительностью от 11 до 23 лет, обусловленные изменениями в солнечной активности, которые наиболее устойчиво во времени проявляются в хронологии WTO (см. рис. 3, в).

Во всех хронологиях выделяются вековые циклы: в хронологии WTO — продолжительностью 57 лет, в хронологиях MON и КОВ — продолжительностью 70–72 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе оценки динамики прироста годичных колец лиственницы трех региональных хронологий Юго-Западной Тувы и Северо-Западной Монголии выявлено понижение уровня прироста в XIX в. и последующее его повышение, однако наличие статистически значимого положительного тренда прироста за последние 100–150 лет наблюдается только для массива Монгун-Тайга (Юго-Западная Тува). Существуют региональные различия в динамике прироста. Так, в тувинских хронологиях выделяются общие периоды повышенного и пониженного прироста, в отличие от хронологии по Монгольскому Алтаю, что подтверждается и корреляционным анализом. Статистически значимая корреляция наблюдается только между древесно-кольцевыми хронологиями по Туве ($r = 0,42$), с монгольской хронологией такой связи нет.

Результаты статистического анализа временных рядов прироста позволяют говорить о наличии сильного внешнего (климатического) сигнала, косвенным подтверждением которого являются выявленные устойчивые циклические составляющие (2–2,6; 5; 8; 14–17; 30; 57; 70–72 года). Соотнесение выделенных циклов в древесно-кольцевых хронологиях с общеизвестными климатическими циклами остается пока предположением. Более точная интерпретация требует проведения дендроклиматического анализа, который является следующим этапом данного исследования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (12–05–00588_а, 13–05–10046_к, 14–05–00662_а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адаменко М. Ф. Реконструкция динамики термического режима летних месяцев на территории Горного Алтая в XIV–XX вв. // Дендрохронология и дендроклиматология. — Новосибирск: Наука, 1986. — С. 110–114.
2. Бочаров А. Ю. Климатически обусловленный радиальный рост хвойных в верхней части лесного пояса Семинского хребта (Центральный Алтай) // Journ. of Siberian Federal University. Biology. — 2009. — № 1. — С. 30–37.
3. Быков Н. И. Дендрохронология снежных лавин и циркуляционных процессов атмосферы зимнего и переходного периодов на Алтае // Проблемы реконструкции климата и природной среды голоцена и плейстоцена Сибири. — Новосибирск: Изд-во Ин-та археологии и этнографии СО РАН, 2000. — Вып. 2. — С. 56–60.
4. Глызин А. В., Дорганова М. Г. Дендроклиматические исследования в лесах Северной Монголии // Сиб. экол. журн. — 1999. — № 2. — С. 131–134.
5. Кузнецова Е. П., Козлов Д. Н. Внутриландшафтная изменчивость радиальных приростов лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) Терехольской котловины Тывы в 20 в. // Journ. of Siberian Federal University. Biology. — 2011. — № 4. — С. 325–337.

6. Ловелиус Н. В., Гунин П. Д., Дажавамц Ц. Внутривековые ритмы лесных и пустынных экосистем Монголии // Изв. РГО. — 1993. — Т. 125, вып. 2. — С. 74–80.
7. Магда В. Н., Блок Й., Ойдунаа О. Ч., Ваганов Е. А. Выделение климатического сигнала на увлажнение из древесно-кольцевых хронологий в горных лесостепях Алтае-Саянского региона // Лесоведение. — 2011. — № 1. — С. 28–37.
8. Мыглан В. С., Жарникова О. А., Мальшева Н. В. и др. Построение древесно-кольцевой хронологии и реконструкция летней температуры воздуха юга Алтая за последние 1500 лет // География и природ. ресурсы. — 2012. — № 3. — С. 22–30.
9. Овчинников Д. В., Панюшкина И. П., Адаменко М. Ф. Тысячелетняя древесно-кольцевая хронология лиственницы Горного Алтая и ее использование для реконструкции летней температуры // География и природ. ресурсы. — 2002. — № 1. — С. 102–108.
10. Ойдунаа О. Ч., Баринов В. В., Сердобов В. Н., Мыглан В. С. Построение и анализ 1104-летней древесно-кольцевой хронологии Targus для Алтае-Саянского региона (Юго-Восточная Тыва) // Journ. of Siberian Federal University. Biology. — 2011. — № 4. — С. 368–377.
11. Ойдунаа О. Ч., Ваганов Е. А., Наурызбаев М. М. Длительные изменения летней температуры и радиальный рост лиственницы на верхней границе леса в Алтае-Саянской горной стране // Лесоведение. — 2004. — № 6. — С. 84–91.
12. D'Arrigo R., Jacoby G., Pederson N. et al. Mongolian tree-rings, temperature sensitivity and reconstructions of Northern Hemisphere temperature // Holocene. — 2000. — Vol. 10, N 6. — P. 669–672.
13. D'Arrigo R., Jacoby G., Frank D. et al. 1738 years of Mongolian temperature variability inferred from a tree-ring width chronology of Siberian pine // Geophys. Res. Lett. — 2001. — Vol. 28, N 3. — P. 543–546.
14. Jacoby G., Vaatarbileg N. Results of dendrochronological studies in Mongolia // Mongol. Journ. Biol. Sci. — 2003. — Vol. 1, N 1. — P. 69–76.
15. Sidorova O. V., Saurer M., Myglan V. S. et al. A multi-proxy approach for revealing recent climatic changes in the Russian Altai // Climate Dynamics. — 2011. — Vol. 38, N 1–2. — P. 175–188.
16. Мыглан В. С., Ойдунаа О. Ч., Ваганов Е. А. Построение 2367-летней древесно-кольцевой хронологии для Алтае-Саянского региона (горный массив Монгун-Тайга) // Археология, этнография и антропология Евразии. — 2012. — № 3. — С. 76–83.
17. Davi N., Jacoby G., D'Arrigo R. et al. A tree-ring-based drought index reconstruction for far-western Mongolia: 1565–2004 // Intern. Journ. Climatol. — 2009. — N 29. — P. 1508–1514.
18. Ваганов Е. А., Шиятов С. Г., Мазепа В. С. Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской Субарктике. — Новосибирск: Наука, 1996. — 246 с.
19. Cook E. A time series analysis approach to tree-ring standardization (dendrochronology, forestry, dendroclimatology, autoregressive process): Ph. D. Dissertation. — Univ. of Arizona, Tree-Ring Laboratory, 1985. — 171 p.
20. Шиятов С. Г., Ваганов Е. А., Кирдянов А. В. и др. Методы дендрохронологии. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации: Учеб.-метод. пособие. — Красноярск: Изд. Краснояр. ун-та, 2000. — 80 с.
21. Fritts H. C. Tree rings and climate. — London; New York; San Francisco: Academ. Press, 1976. — 567 p.
22. Methods of dendrochronology: Applications in the environmental sciences / Eds. E. R. Cook, L. A. Kairiukstis. — Norwell, Mass.: Kluw. Acad., 1990. — 394 p.
23. Rinn F. TSAP-Win time series analysis and presentation for dendrochronology and related applications: Version 0.53 for Microsoft Windows. — Heidelberg: RinnTech., 2003. — 110 p.
24. Grissino-Mayer H. D. Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program Cofecha // Tree-Ring Research. — 2001. — Vol. 57, N 2. — P. 205–221.
25. Holmes R. L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement // Tree-Ring Bulletin. — 1983. — Vol. 43. — P. 69–78.
26. Cook E. R., Holmes R. L. Program ARSTAN. Chronology development with statistical analysis. Users manual for Program ARSTAN. — Tucson, Arizona USA: Laboratory of Tree-Ring Research, Univ. of Arizona, 1999. — 12 p.
27. Шиятов С. Г. Дендрохронология верхней границы леса на Урале. — М.: Наука, 1986. — 136 с.
28. Мониин А. С., Сонечкин Д. М. Колебания климата по данным наблюдений: тройной солнечный и другие циклы. — М.: Наука, 2005. — 191 с.
29. Шнитников А. В. Внутривековая изменчивость компонентов общей увлажненности. — Л.: Наука, 1969. — 245 с.
30. Brückner E. Klima-Schwankungen Seit 1700 nebst Bemerkungen über die Klimaschwankungen der Diluvialzeit. — WienOlmütz: E. Hölzel, 1890. — 324 p.
31. Колин Г. Е. Цикл Брикнера в динамике прироста деревьев // Лесоведение. — 1974. — № 2. — С. 21–27.
32. Balybina A. S. Climatic factors of radial growth dynamics of coniferous species in the Angara region // Вычислит. технологии. — 2006. — Т. 11, № S6. — С. 104–108.

Поступила в редакцию 25 мая 2014 г.