

Дендрохронологические характеристики лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ldb.) на верхней границе леса в Горном Алтае

Д. В. ОВЧИННИКОВ, Е. А. ВАГАНОВ

Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН
630036 Красноярск, Академгородок

АННОТАЦИЯ

Для пяти участков, расположенных в верхнем поясе горных лесов Горного Алтая (выше 2000 м над ур. м.), получены длительные (до 437 лет) древесно-кольцевые хронологии по лиственнице сибирской. Анализ статистических характеристик обобщенных и генерализованных хронологий показал, что изменчивость прироста содержит сильный климатический сигнал. В стандартных хронологиях после фильтрации возрастных изменений сохраняется региональная компонента длительных колебаний условий роста, "остаточные" хронологии содержат значительную короткопериодическую составляющую климатических изменений. Для усиления региональной составляющей необходимо заложить в верхнем поясе гор Горного Алтая более густую сеть дендроклиматических станций.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важнейших направлений в исследовании изменений климата прошлого является получение данных с высоким временным разрешением (год, сезон) за последние 2000 лет с целью выделить и оценить колебания разной длительности (от десятков лет до вековых) [1–3]. Древесно-кольцевые хронологии среди прочих косвенных источников изменений климата обеспечивают требуемое разрешение. Для выявления прошлых колебаний температуры преимущественно используются древесные растения, произрастающие на полярном или верхнем пределе лесной растительности [4–8]. Если для полярного предела лесной растительности к настоящему времени проведены обширные пространственно-временные реконструкции летней температуры в Субарктике Северного полушария и для ряда районов получены сверхдлительные древесно-кольцевые хронологии [4, 9–11], то длительных реконструкций климатических изменений, полученных по древесно-кольцевым

хронологиям с верхней границы леса в горных областях и особенно в средних широтах, явно недостаточно [12–14]. В азиатской части России систематических работ вообще не проводилось, хотя территория обладает крупными горными системами (Горный Алтай, Саяны, Становое нагорье и др.), лесная растительность в верхнем поясе которых пока слабо подвержена антропогенным влияниям и может служить источником информации о прошлых изменениях климата, в первую очередь – о колебаниях температуры.

В данной работе предпринята попытка восполнить этот пробел анализом длительных древесно-кольцевых хронологий, полученных для верхнего предела лесной растительности в Горном Алтае.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Верхняя граница леса в Горном Алтае достигает высот 2200–2400 м над ур. м. [15, 16].

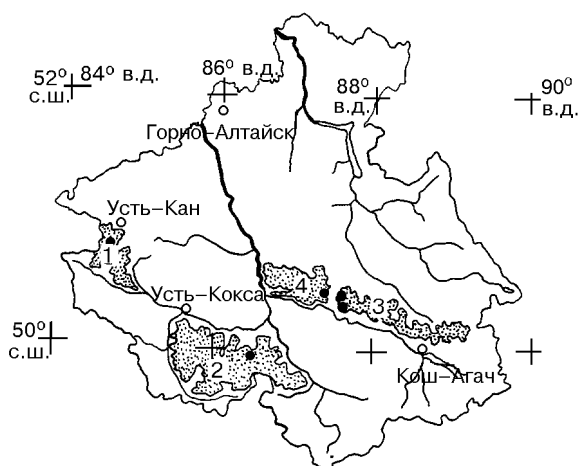


Рис. 1. Местоположение участков сбора дендрохронологических образцов на верхней границе леса в Горном Алтае, хребты: 1 – Каргонский, 2 – Катунский, 3 – Курайский, 4 – Айгулакский (более подробное описание в табл. 1).

Это в основном кедровые и лиственничные леса. Летом 1996 г. в трех районах Горного Алтая (рис. 1) в лиственничниках, образующих верхнюю границу леса или примыкающих к ней, были взяты керны древесины для построения древесно-кольцевых хронологий. Описание мест сбора образцов приведено в табл. 1. Как видно из данных табл. 1, все местообита-

ния имеют похожие экологические характеристики. Экспозиция склонов преимущественно северная или северо-западная. Преобладание мхов в напочвенном покрове свидетельствует о достаточном увлажнении и о том, что температура является возможным лимитирующим фактором. На каждом участке отобраны керны с не менее чем 10 деревьев по двум радиусам.

В лабораторных условиях каждый керн был закреплен в деревянном держателе, поверхность керна зачищена острым лезвием и контрастирована зубным порошком [17]. Такая обработка позволяет на поперечном срезе проявить клеточную структуру каждого годичного кольца и во многом снимает методические ошибки, связанные с выявлением очень узких (1–2 ряда клеток) годичных колец. Образцы каждого местообитания были перекрестно датированы с помощью кернов, измерения ширины годичных колец, графического пакета для визуальной датировки с помощью РС и программы COFESHA [18, 19]. Измерения ширины годичных колец на каждом керне сделаны с точностью 0,001 мм на измерительном микроскопе. Окончательно правильность датировки проверялась с помощью программы COFESHA. Стандартизацию [20, 21] индивидуальных се-

Т а б л и ц а 1

Краткое описание мест сбора образцов на верхней границе леса в районе Горного Алтая

№	Лабораторный индекс	Координаты: с. ш., в. д. высоты над ур. м.	Число модельных деревьев	Тип леса, состав	Покровы, %		Условия местообитания	Склон, экспозиция
					кустарничковое	моховое и лишайниковое		
1	ALTA	50 29 54 87 39 35 2180 м	17	Лиственничник зеленомошный 9Л1К разновозрастной	80–90	90 20	Влажные	Северо-западный склон, 5° экспозиция
2	ALTB	50 30 48 87 41 59 2050 м	16	Лиственничник чернично-зеленомошный 10 Лед. К	80	90 5	Переувлажненные	Северный склон, экспозиция 3°
3	ALTC	50 25 53 87 35 30 2000 м	15	Лиственничник ельничково-зеленомошный 6Л4К	70	90 5	Влажные	Северный склон, экспозиция 20°
4	ALTP	49 56 30 86 29 2200 м	11	Кедрово-лиственничное редколесье 6К4Л	50	60 –	Умеренно-влажные	Северо-западный склон, 5° экспозиция
5	ALTS	50 46 84 36 2200 м	12	Елово-лиственничное редколесье 6Е4Л	60	40 –	То же	Юго-восточный склон до 10° экспозиция

рий ширины годичных колец производили с помощью отрицательной экспоненты или линейной функции, которые преимущественно убирают возрастной тренд. Осреднением индивидуальных серий индексов прироста получали обобщенные (локальные) для местообитания древесно-кольцевые хронологии [5, 21]. Кроме того, рассчитывали для каждой индивидуальной серии модель авторегрессии [8, 21] и получали так называемую остаточную (residual) серию, из которой исключена изменчивость, зависящая от автокорреляции измерений прироста соседних лет и имеющая неклиматическую природу [20]. Осреднением остаточных серий получали обобщенную остаточную серию, которая предполагается содержащей максимальный климатический сигнал [21]. Таким образом, для каждого местообитания были получены две обобщенные хронологии – стандартная (STD) и "остаточная" (RES), которые и были объектом дальнейшего анализа.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 и 2 приведены основные статистические характеристики полученных обобщенных хронологий. Длительность хронологий различна – от 297 до 437 лет. Среднеквадратическое отклонение как индивидуальных, так и обобщенных серий изменяется от 0,271 до 0,469. Наибольшие значения дисперсии отмечаются для ряда ALTS, полученного для Каргонского хребта (около 2200 м над ур. м.). Высокие значения имеют и коэффициенты чувствительности, все значения превышают 0,2. Хорошую синхронность показывают индивидуальные серии в сопоставлении с обобщенной, средний коэффициент корреляции не ниже 0,656. Рассматривая статистические характеристики стандартных хронологий в целом, можно утверждать, что в обобщенных хронологиях содержится сильный климатический сигнал. Об этом же свидетельствуют и высокие значения отношения сигнал/шум (SNR) [21]. Стандартные обобщенные хронологии показывают значительную автокорреляцию в изменчивости ширины годичных колец (см. табл. 2). Предполагается, что источником этой составляющей являются физиологические процессы, связанные с запасанием и дальнейшим использовани-

ем фотоассимилятов [20]. Изменения в приросте, обусловленные длительными изменениями природных факторов (почвенных, климатических), также увеличивают автокорреляцию во временных рядах годичных колец [22]. Поэтому без детального анализа как длинно-, так и короткопериодических составляющих прироста нельзя делать заключения об их информационной ценности.

"Остаточные" хронологии, полученные после фильтрации стандартных с помощью модели авторегрессии (табл. 3), имеют несколько меньшие значения дисперсии, но выше значения коэффициента чувствительности (на 19–22 %). Естественно, автокорреляция в рядах отсутствует. Абсолютные значения коэффициентов чувствительности свидетельствуют, что полученные хронологии относятся по классификации [5] к высокочувствительным, а значит, содержат значительный климатический сигнал.

Рассмотрим данные взаимного корреляционного анализа обобщенных древесно-кольцевых хронологий по лиственнице Горного Алтая (табл. 4). Как стандартные, так и "остаточные" хронологии показывают уменьшение связи между изменчивостью прироста с увеличением расстояния между хронологиями. Так, корреляция для стандартных хронологий уменьшается от 0,738 для хронологий, разделенных 5–7 км, до 0,270 для хронологий, расстояние между которыми достигает 200 км. Для "остаточных" хронологий значения коэффициента корреляции выше. По оценкам коэффициента синхронности можно заключить, что: а) перекрестная датировка возможна для группы хронологий Айгулакского и Курайского хребтов (ALTA, ALTB, ALTC) с хронологией Катунского хребта (ALTP), но затруднительна или невозможна с хронологией Каргонского хребта (ALTS); б) хронологии Катунского и Каргонского хребтов показывают достаточно значимую корреляцию и синхронность между собой, поэтому легко перекрестно датируются; в) все полученные хронологии могут быть объединены в две группы (ALTA, ALTB, ALTC) и (ALTP, ALTS), внутри которых и корреляция, и синхронность между хронологиями достаточно высоки для перекрестной датировки и общий сигнал значителен.

Анализ наиболее узких и выпадающих колец подтверждает это заключение. Процент выпадающих колец в древесных образцах лиственни-

Т а б л и ц а 3

Основные статистические характеристики "остаточных" хронологий

№	Серия	Интервал	Среднее квадратичное отклонение		Средняя чувствительность		Автокорреляция обобщенной серии
			индивидуальных серий	обобщенной серии	индивидуальных серий	обобщенной серии	
1	ALTA	1562–1995 (434)	0,297 (0,250–0,374)	0,239	0,354 (0,292–0,600)	0,283	–0,053
2	ALTB	1700–1995 (296)	0,303 (0,254–0,348)	0,224	0,366 (0,302–0,721)	0,252	–0,030
3	ALTC	1607–1995 (389)	0,280 (0,179–0,361)	0,207	0,414 (0,209–0,806)	0,247	–0,070
4	ALTP	1613–1996 (384)	0,274 (0,231–0,319)	0,217	0,326 (0,241–0,493)	0,258	–0,073
5	ALTS	1562–1996 (435)	0,356 (0,273–0,467)	0,268	0,422 (0,305–0,566)	0,321	–0,028

цы из разных участках невелик (0,17 % – ALTA, 0,11 – ALTB, 0,20 – ALTC, 0 – ALTP, 0,43 – ALTS). Только в трех годах для всего периода с 1600 г. (1760, 1875, 1961) наблюдается выпадение колец в отдельных деревьях на разных участках одновременно.

На рис. 2 приведены сглаженные 25-летней скользящей средней значения индексов прироста стандартных, генерализированных для двух выделенных субгрупп древесно-кольцевых хронологий. Нетрудно заметить, что в длительных изменениях ширины годичных колец имеются общие тенденции: ускорение роста в середине XVII в., в конце XVIII–начале XIX в. и в середине XX в. Общие депрессии прироста наблюдаются в начале XVIII в. и в середине XIX в. По амплитуде длительных колебаний

депрессия в середине XIX в., равно как и улучшение условий роста в середине XX в., были наиболее значительными. Приведенные данные показывают, что в длительных изменениях прироста лиственницы на верхнем пределе леса в Горном Алтае содержится общая для всего региона составляющая, и эта составляющая должна быть проанализирована с помощью полученных стандартных древесно-кольцевых хронологий. О том, что полученные для двух выделенных групп участков хронологии содержат общий для региона климатический сигнал, свидетельствуют и данные корреляций между генерализированными хронологиями. Корреляция между стандартными хронологиями равна 0,278 (при $p < 0,01$), между "остаточными" – 0,526 (при $p < 0,001$). При этом синхронность

Т а б л и ц а 4

Корреляция между обобщенными древесно-кольцевыми хронологиями

Хронологии	ALTA	ALTB	ALTC	ALTP	ALTS
<i>Стандартные</i>					
ALTA	1,0				
ALTB	0,738	1,0			
ALTC	0,449	0,465	1,0		
ALTP	0,311	0,218	0,342	1,0	
ALTS	0,270	0,158	0,440	0,418	1,0
<i>"Остаточные"</i>					
ALTA	1,0				
ALTB	0,752	1,0			
ALTC	0,743	0,717	1,0		
ALTP	0,479	0,398	0,552	1,0	

между "остаточными" хронологиями составляет 82 %. Сходство погодичной изменчивости прироста в генерализованных по группам "остаточным" хронологиям видно на рис. 3.

Как было показано, стандартные хронологии при увеличении расстояния коррелированы слабее друг с другом, и тем не менее в длительных изменениях прироста отмечается общая тенденция. Важными внешними факторами, влияющими на прирост и резко нарушающими связность и синхронность между временными рядами ширины годичных колец, являются вспышки массового размножения лесных насекомых, повреждающих ассимиляционный аппарат деревьев, и лесные пожары. По имеющимся данным [23–25], в горно-таежных лиственничниках в Горном Алтае основные фитофаги – лиственничная листовертка и сибирский шелкопряд – формируют первичные очаги в нижнем поясе гор до 1500 м над ур. м., а вторичные поднимаются до 1800 м над ур. м. Мощные зарегистрированные вспышки сибирского шелкопряда относятся к 1919–1923 и 1953–1957 гг. [24]. Как видим, в местах сбора нашего материала условия для формирования очагов сибирского шелкопряда и листовертки отсутствуют. Анализ обобщенных хронологий показывает, что в годы зарегистрированных вспышек депрессии прироста лиственницы не отмечается, т. е. фитофаги не могут являться фактором, существенно влияющим на изменчивость прироста лиственницы в данных условиях и десинхронизирующим региональные изменения прироста.

Второй возможный мощный фактор изменчивости прироста, который может маскировать климатический сигнал в древесно-кольцевых хронологиях, – лесные пожары. Как показывают исследования [22, 26], лесные пожары вызывают особую реакцию дерева и древостоя в росте, тем самым маскируя влияние климатических изменений. Эта реакция не столь продолжительна и элиминируется при получении длительных изменений прироста, но существенна при расчетах как автокорреляции, так и корреляции между отдельными обобщенными хронологиями [22]. Большинство из участков, где был проведен сбор образцов, имело следы прошлых пожаров. О повышенной степени горимости лесов в верхнем поясе Горного Алтая свидетельствуют и данные литературы [27]. Поэтому можно полагать, что периодическое

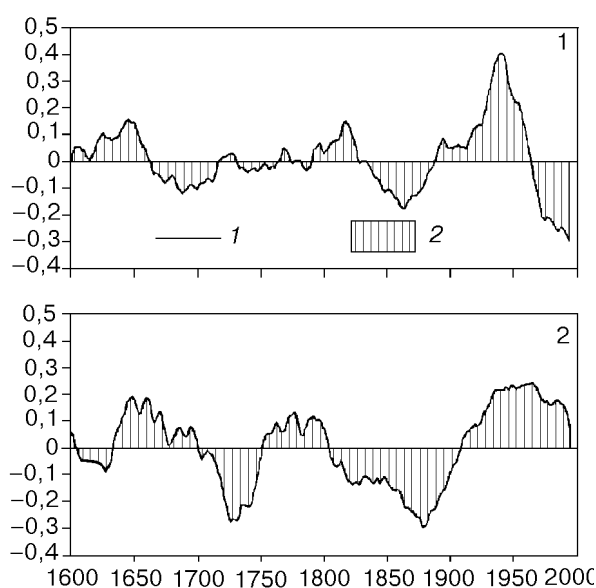


Рис. 2. Сглаженные стандартные хронологии для двух выделенных групп участков:

1 – в районе перевала между Курайским и Айгулакским хребтами; 2 – средняя хронология для Каргонского и Катунского хребтов.

влияние лесных пожаров является тем фактором, который уменьшает влияние региональной составляющей климата на изменчивость прироста лиственницы и уменьшает степень синхронности этой изменчивости у пространственно распределенных хронологий. В подтверждение сказанному приведем рис. 4, на котором сопоставлены древесно-кольцевая серия, генерализованная по всем пяти хронологиям Горного Алтая, и генерализованная древесно-кольцевая хронология по лиственнице альпийской (*Larix lyallii* Parl.), полученная для шести участков на верхнем пределе леса в Канадских Скалистых горах на границе штатов Алберты и Британской Колумбии М. Colenutt и В. Luckman [12]. Параллельный ход длительных изменений прироста не вызывает сомнений: периоды усиления роста и депрессий хорошо совпадают. Особенно четко проявляются глубокая депрессия прироста лиственницы в середине XIX в. и ускорение роста на верхнем пределе леса в середине XX в. Близкие значения имеют и величины дисперсии, чувствительности сопоставляемых серий, а также амплитуды длительных колебаний. Имеются и другие литературные данные о депрессии роста деревьев на верхнем пределе леса в горных массивах (Альпы, Монгольский Алтай) [7, 28] в середи-

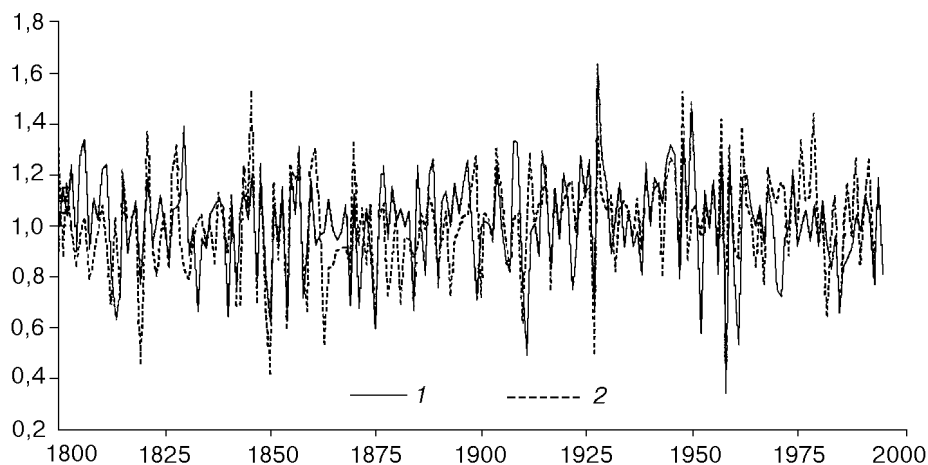


Рис. 3. Сопоставление фрагментов генерализованных "остаточных" хронологий для выделенных групп:
1 – ALTA-C, 2 – ALTP,S.

не XIX в. и ускорении в середине XX в. Депрессии и ускорения в росте связывают с длительными колебаниями летней температуры и наступлением или отступлением ледников.

Таким образом, несмотря на влияние факторов неклиматического происхождения, в первую очередь пожаров, древесно-кольцевые хронологии по лиственнице с верхней границы леса в Горном Алтае содержат значительную региональную (а может быть, и глобальную) составляющую изменчивости прироста. Детальный анализ климатических и неклиматических компонент изменчивости будет проведен в следующей работе.

ВЫВОДЫ

1. На верхней границе леса в Горном Алтае имеется достаточно долгоживущих деревьев для построения длительных (400–500 лет) хронологий.

2. Статистические характеристики обобщенных и генерализованных древесно-кольцевых хронологий показывают, что в изменчивости прироста лиственницы содержится сильный климатический сигнал.

3. Генерализованные хронологии содержат значительную региональную составляющую прироста, которая отражает длительные изменения условий роста деревьев для всего региона и, возможно, определенные глобальные изменения.

4. Для проведения дендроклиматического анализа с использованием климатических функций отклика необходима более густая сеть дендрохронологических станций, получение генерализованных для отдельных субрегионов Горного Алтая хронологий с тем, чтобы минимизировать влияние на изменчивость прироста такого мощного фактора, как лесные пожары.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, гранты 96-04-48258 и 96-07-89101.

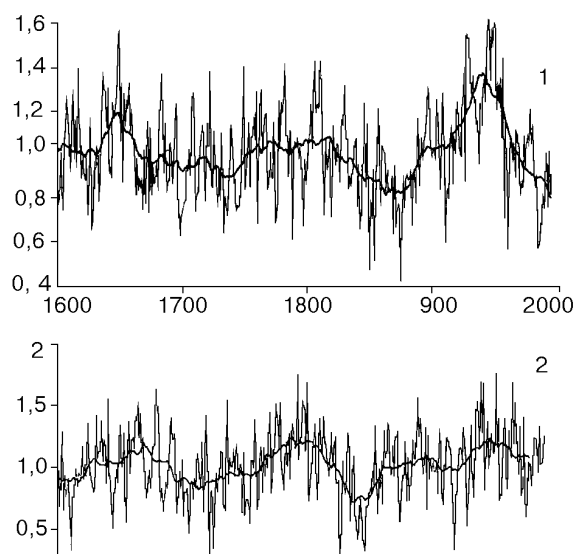


Рис. 4. Сопоставление генерализованных древесно-кольцевых хронологий для Горного Алтая (1) и верхнего пояса Канадских Скалистых гор (2) (по данным [12]).

ЛИТЕРАТУРА

1. R. S. Bradley, P. D. Jones, *Climate Since A. D. 1500*, London, Routledge, 1992.
2. M. K. Hughes, *Global Changes of the Past* (R. Bradley, ed.), UCAR, Boulder, Colorado, 1989, 117–138.
3. M. K. Hughes, H. F. Diaz (eds.), *The Medieval Warm Period*, Dordrecht, Boston, London, Kluwer Acad. Publ., 1994.
4. Е. А. Ваганов, С. Г. Шиятов, В. С. Мазепа, Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской Субарктике, Новосибирск, Наука, Сиб. отд-ние, 1996.
5. С. Г. Шиятов, Дендрохронология верхней границы леса на Урале, М., Наука, 1986.
6. G. C. Jacoby, R. D'Arrigo, *Climatic Change*, 1989, 14, 39–59.
7. F. H. Schweingruber, K. R. Briffa, *Climatic Variations and Forcing Mechanisms of the Last 2000 Years* (Jones P.D., Bradley R.S., Jouzel J., eds.), NATO ASI Series, 1996, 141, 43–66.
8. S. G. Shiytov, V. S. Mazepa, E. A. Vaganov, F. H. Schweingruber, *Radiocarbon*, 1996, 1–4, 37–48.
9. K. R. Briffa, T. S. Bartholin, D. Eckstein *et al.*, *Nature*, 1990, **346**: 6283, 434–439.
10. K. R. Briffa, P. D. Jones, F. H. Schweingruber *et al.*, *Ibid.*, 1995, 376, 156–159.
11. F. H. Schweingruber, K. R. Briffa, P. D. Jones, *Vegetatio*, 1991, 92, 5–71.
12. M. E. Colenutt, B. H. Luckman, *Can. J. For. Res.*, 1995, 25, 777–789.
13. B. H. Luckman, M. E. Colenutt, *LUNQUA Rep.*, 1992, 34, 207–211.
14. R. R. Yadav, A. Bhattacharyya, *Dendrochronologia*, 1992, 10, 53–61.
15. В. Н. Воробьев, Биологические основы комплексного использования кедровых лесов, Новосибирск, Наука, Сиб. отд-ние, 1983.
16. Г. В. Крылов, Леса Западной Сибири, М., Наука, 1961.
17. Е. М. Фильрозе, Г. М. Гладушко, Дендрохронология и дендроклиматология, Новосибирск, Наука, Сиб. отд-ние, 1986, 68–71.
18. R.L.Holmes, *Tree-Ring Bull.*, 1983, 44, 69–75.
19. R. L. Holmes, *Dendrochronology Program Library. Installation and Program Manual* (Jan. 1992 update), Lab. Tree-Ring Res., Univ. of Arizona, 1992.
20. H. C. Fritts, *Tree-rings and Climate*, N. Y., London, San Francisco, Acad. Press, 1976.
21. *Methods of Dendrochronology. Application in the Environmental Sciences* (E.Cook, L.Kairiukstis, eds.), Dordrecht, Boston, London, Kluwer Acad. Publ., 1990.
22. М. К. Арбатская, Е. А. Ваганов, *Экология*, 1997, 5.
23. А. С. Плешанов, Насекомые-дефолианты лиственных лесов Восточной Сибири, Новосибирск, Наука, Сиб. отд-ние, 1982.
24. А. С. Рожков, Массовые размножения сибирского шелкопряда и меры борьбы с ним, М., Наука, 1965.
25. А. И. Черепанов, Фауна, систематика и экология насекомых и клещей, Новосибирск, Наука, Сиб. отд-ние, 1963, 51–56.
26. М. К. Арбатская, Е. А. Ваганов, *Лесоведение*, 1996, 6, 53–57.
27. М. А. Софронов, Лесные пожары в горах Южной Сибири, М., Наука, 1967.
28. G. C. Jacoby, R. D'Arrigo, T. Davaajamts, *Science*, 1996, **273**: 9, 771–773.

Dendrochronological Characteristics of *Larix sibirica* (*Larix sibirica* Ldb.) on the Upper Timberline of Wood in Mountain Altai

D. V. OVTCHINNIKOV, E. A. VAGANOV

Institute of Forest SB RAS, Krasnoyarsk

Tree-ring long-term chronologies of *Larix sibirica* (till 437 years) are obtained for five sites located in the timberline of the Mountain Altai (higher of 2000 m). An analysis of the statistical characteristics of local and regional chronologies has shown, that the variability of the increment contains a strong climatic signal. The correlation between regional tree-ring width chronologies decreases as the distance between them becomes larger. Evaluations of the correlation and the synchronism obtained from the chronology permit combining them in to two groups. Regional chronologies are obtained for two chosen groups. It is noted that wood fires reduce the influence of the regional climatic component on the variability of growth and reduce the degree of synchronism in spatially distributed chronology.

A comparison of regional tree-ring width chronology in the Mountain Altai with the regional chronology of *Larix alpine* in Canadian Rocky Mountains shows the general character of the growth variability: periods of peaks and depression of growth in the middle of the 20 and the 19 centuries; the standard deviation, sensitivity and amplitude of long-term oscillations are the same. Standard chronology contains a regional lower frequency component of long-term oscillations of growth conditions, the "residual" chronology contains a significant high frequency component of climatic changes. There is need to develop a better network of dendrochronological sample plots to fulfil a comprehensive dendroclimatic analysis.

Т а б л и ц а 2

Основные статистические характеристики стандартных древесно-кольцевых хронологий

N	Серия	Интервал	Среднее квадратичное отклонение		Средняя чувствительность		Средний коэффициент корреляции	Средняя автокорреляция индивидуальных серий	Автокорреляция обобщенной серии	Отношение сигнал/шум SNR
			индивидуальных серий	обобщенной серии	индивидуальных серий	обобщенной серии				
1	ALTA	1560–1995 (436)	0,317 (0,201–0,513)	0,302	0,290 (0,231–0,380)	0,233	0,737 (0,664–0,813)	0,799 (0,682–0,889)	0,584	47,6
2	ALTB	1699–1995 (297)	0,364 (0,178–0,525)	0,378	0,274 (0,241–0,303)	0,202	0,704 (0,563–0,772)	0,844 (0,674–0,930)	0,780	40,4
3	ALTC	1604–1995 (392)	0,271 (0,184–0,402)	0,278	0,271 (0,161–0,329)	0,201	0,726 (0,686–0,767)	0,774 (0,615–0,888)	0,613	39,7
4	ALTP	1612–1996 (385)	0,373 (0,221–0,787)	0,288	0,268 (0,195–0,330)	0,210	0,660 (0,519–0,775)	0,765 (0,586–0,911)	0,625	21,3
5	ALTS	1560–1996 (437)	0,469 (0,209–0,733)	0,345	0,356 (0,255–0,423)	0,249	0,656 (0,489–0,726)	0,771 (0,292–0,458)	0,624	22,9