

УДК 630*561.24:630*11

РАЗДЕЛЕНИЕ КЛИМАТИЧЕСКОГО СИГНАЛА, СОДЕРЖАЩЕГОСЯ В ИЗМЕНЧИВОСТИ ШИРИНЫ И ПЛОТНОСТИ ГОДИЧНЫХ КОЛЕЦ ДРЕВЕСИНЫ**

© 2006 г. А. В. Кирдянов, Е. А. Ваганов

Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН

660036 Красноярск, Академгородок

Поступила в редакцию 18.04.2005 г.

Дендроклиматология, лиственница, северная граница леса, летняя температура воздуха, ширина годовых колец, максимальная плотность годовых колец деревьев.

В последние десятилетия в литературе по дендроклиматологии накапливаются данные о том, что максимальная плотность годовых колец деревьев является лучшим индикатором летней температуры в высоких широтах по сравнению с шириной древесных колец. Такие результаты характерны и для Северной Евразии, и для Аляски, и для Северной Канады [5, 6, 10]. Было высказано несколько гипотез о возможных причинах того, почему максимальная плотность интегрирует влияние летней температуры за более продолжительный промежуток времени, чем ширина годовых колец. Некоторые из них основаны на рассмотрении физиологических механизмов формирования годовых колец древесины [2]; другие связывают этот факт с особенностями анатомии колец, формирующихся в условиях жесткого лимитирования роста деревьев температурой [14]. Поскольку в данных условиях параметры годовых колец оказываются тесно связанными друг с другом [2], в изменчивости каждого параметра кольца помимо специфичной для него информации об изменениях внешней среды содержится сигнал, более характерный для других параметров структуры колец. В данной работе предпринята попытка разделить климатический сигнал, содержащийся в изменчи-

вости ширины и максимальной плотности годовых колец деревьев, и проанализировать отклик этих параметров на изменения летней температуры.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

В работе использованы данные по ширине и плотности годовых колец лиственницы с двух участков, расположенных на северной границе леса в Средней и Восточной Сибири. Участки с данными по структуре колец древесины были отобраны из Международной дендрохронологической базы данных (<http://www.ngdc.noaa.gov/paleo/treering-wsl.html>) в соответствии со следующими критериями: 1) данные по годовым кольцам должны быть получены для условий, где рост деревьев лимитируется прежде всего температурой; 2) выбранные участки должны быть расположены достаточно близко от метеорологических станций с длительными рядами ежедневных наблюдений за температурой воздуха. В соответствии с этим для анализа был отобран материал по лиственнице Гмелина (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.) с участка КОТ в нижнем течении р. Котуйкан на Таймыре (70°36' с.ш., 104°15' в.д.) и по лиственнице Каяндера (*Larix cajanderi* Maug.) с участка СНОК вблизи пос. Чокурдах на севере Якутии (70°17' с.ш., 148°03' в.д.). Всего в работе были использованы данные для 21 керна с 14 деревьев для участка КОТ и 27 кернов с 16 деревьев для СНОК.

** Исследование выполнено при поддержке РФФИ (02-04-49938), "Ведущие научные школы" (НШ-2108.2003.4) и "Фонда содействия отечественной науке".

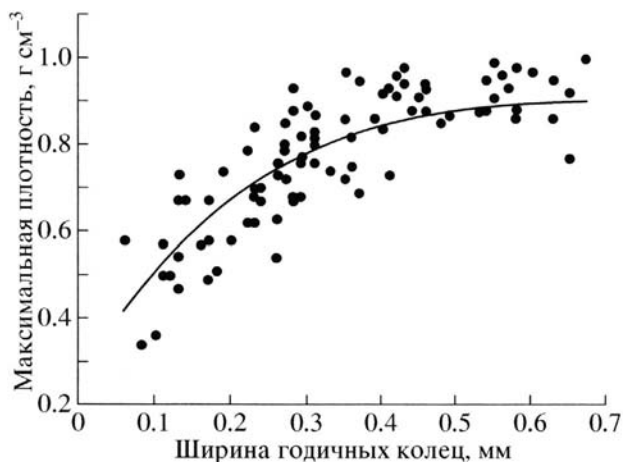


Рис. 1. Связь максимальной плотности и ширины годичных колец для одного керна (участок КОТ, дерево 8, керн 1) за 1900-1990 гг. и аппроксимирующая линия, рассчитанная по уравнению (1).

На первом этапе работы данные по ширине и максимальной плотности годичных колец деревьев были обработаны в соответствии со стандартной в дендрохронологии методикой [11]: хронологии по ширине годичных колец (ШГК) и максимальной плотности годичных колец (МАКС), полученные для отдельных кернов, были проиндексированы относительно кривых, описывающих возрастные тренды каждого из параметров. Затем индивидуальные индексные хронологии для каждого участка были объединены в обобщенные серии, характеризующие изменения параметров кольца для данного местопроизрастания в целом. При расчете обобщенных хронологий ШГК было использовано авторегрессионное моделирование, поскольку для серий ШГК характерна высокая автокорреляция. У хронологий МАКС автокорреляция значительно ниже. Поэтому в анализе использовались стандартные хронологии по МАКС, полученные без применения авторегрессионной модели.

Между индивидуальными хронологиями абсолютных значений ШГК и МАКС, полученными для экстремальных условий произрастания деревьев, наблюдается значимая положительная корреляция. Так, для обоих участков корреляция между сериями параметров кольца значима ($p < 0.05$) в 100% случаев. Коэффициент корреляции между обобщенными хронологиями также высок: 0.62 и 0.58 для КОТ и СНОК соответственно за период с 1900 по 1990 г. ($p < 0.000001$). Однако связь между двумя рассматриваемыми параметрами кольца не является строго линейной (рис. 1). Только при изменении ШГК в пределах от минимальных до 0.3 мм плотность увеличивается практически линейно. Затем в пределах ШГК от 0.3 до 0.7 мм увеличение МАКС замедляется, и для более широких колец (более 0.7 мм) значения МАКС практически не связаны с ШГК. Для того чтобы исключить взаимную зависимость параметров кольца друг от друга и разделить содержащийся в их изменчивости внешний сигнал, был предложен альтернативный метод индексирования индивидуальных хронологий.

Опытным путем было подобрано уравнение, которое наиболее оптимально описывает общую тенденцию изменения МАКС в связи с изменениями ШГК:

$$\text{МАКС} = \text{МАКС}_{\text{MIN}} + (\text{МАКС}_{\text{AS}} - \text{МАКС}_{\text{MIN}})(1 - \exp(-a \text{ШГК})), \quad (1)$$

где МАКС_{MIN} - теоретически достижимое минимальное значение плотности при отсутствии прироста, МАКС_{AS} - величина максимальной плотности при достижении ШГК величин более 1 мм, a - эмпирически подбираемый коэффициент. Подбор параметров уравнения (1) (МАКС_{MIN} , МАКС_{AS} , a) проводился для каждого дерева и керна в отдельности на основе метода наименьших квадратов. На рис. 1 показан пример того, как теоретическая кривая описывает общую тенденцию изменения МАКС при увеличении ШГК.

Полученные для отдельных серий кривые были использованы для расчета индексов максимальной плотности:

$$I_{\text{МАКС}} = \text{МАКС}_T / \text{МАКС}, \quad (2)$$

где МАКС - значение плотности согласно уравнению (1) для кольца с соответствующей шириной ШГК_T, МАКС_T - измеренное значение плотности данного кольца. Рассчитанные подобным образом индивидуальные хронологии усреднялись для получения еще одной обобщенной хронологии по МАКС.

Для сравнения хронологий, полученных в соответствии со стандартной и предложенной нами методикой, были рассчитаны стандартные дендрохронологические параметры. Большинство из них являются общепринятыми статистическими характеристиками. Стоит указать только, что такой параметр, как отношение сигнала к шуму, характеризует наличие и силу общего внешнего сигнала в индивидуальных хронологиях. Еще одним параметром, оценивающим силу воздействия внешнего фактора на рост деревьев и отражающим погодичную изменчивость в хронологиях, является коэффициент чувствительности, меняющийся от 0 до 1. Считается, что чем выше эти два параметра, тем сильнее и согласованнее деревья реагируют на изменения внешних условий.

Ранее проведенный анализ показал, что для изменений параметров годичных колец лиственницы в высоких широтах и в рассматриваемых районах наибольшее значение имеют изменения температуры вегетационного периода [1, 7, 12]. Для того чтобы определить, какой климатический сигнал определяет погодичную изменчивость индексов ширины годичных колец и максимальной плотности, были рассчитаны коэффициенты корреляции между хронологиями и температурой пятидневков (средняя приземная температура воздуха за 5 последующих дней) ближайших метеорологических станций за период, начиная с 5 мая по 30 сентября. Подобный анализ дает возможность более детально исследовать климатический отклик дендрохронологических параметров на изменения температуры в условиях короткого вегетационного периода в высоких широтах [8, 13]. Хронологии, полученные для участка КОТ, сравнивались с температурой метеорологической станции Хатанга (72°00' с.ш., 102°10' в.д.) за период инструментальных наблюдений с 1936 по 1989 г.; хронологии по СНОК - с данными Чокурдаха (70°40' с.ш., 147°52' в.д., 1948-1989 гг.). В первом слу-

Дендрохронологические параметры индексных хронологий по ширине и максимальной плотности годичных колец за 1900-1990 гг.

Параметры	Средний коэффициент корреляции индивидуальных серий со средней	Средний коэффициент синхронности	Стандартное отклонение	Коэффициент чувствительности	Коэффициент автокорреляции 1-го порядка	Отношение "сигнал-шум"
Средняя Сибирь (КОТ)						
ШГК	0.80	0.96	0.394	0.375	-0.11	22.20
МАКС	0.81	0.96	0.097	0.123	0.12	22.70
$I_{\text{МАКС}}$	0.66	0.92	0.075	0.086	-0.06	11.96
Восточная Сибирь (СНОК)						
ШГК	0.83	0.97	0.268	0.329	-0.12	27.55
МАКС	0.80	0.96	0.127	0.123	0.19	24.17
$I_{\text{МАКС}}$	0.71	0.94	0.101	0.094	0.15	15.64

Примечание. ШГК-ширина годичных колец, МАКС-максимальная плотность годичных колец, $I_{\text{МАКС}}$ - индекс максимальной плотности.

чае расстояние между метеорологической станцией и участком составляет около 180 км, во втором - менее 70 км. Правомерность сравнения древесно-кольцевых хронологий с данными достаточно удаленных станций показана в работе Е.А. Ваганова с соавт. [3, 12], где проведено дендроклиматическое районирование Урало-Сибирской Субарктики. В жестких условиях севера Евразии деревья, произрастающие на расстоянии до 600-800 км в пределах одного дендроклиматического района, показывают очень сходную динамику ШГК и МАКС. Это позволяет говорить о синхронном изменении климатических факторов, определяющих изменчивость ширины и структуры годичных колец деревьев в пределах каждого района.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Основные дендрохронологические параметры индексных хронологий по ширине и максимальной плотности годичных колец представлены в таблице. Изменчивость хронологий ШГК и их чувствительность к изменению внешних факторов выше, чем у хронологий МАКС. Временные серии максимальной плотности, рассчитанные с учетом связи этого параметра с шириной колец, показывают меньшую синхронность, чувствительность и меньшие значения отношения величины сигнала к шуму, чем у хронологий МАКС, полученных стандартным путем. Однако все приведенные статистические параметры у хронологий $I_{\text{МАКС}}$ достаточно высоки. Так, коэффициенты корреляции между индивидуальными хронологиями индексов максимальной плотности, полученными по предложенной нами методике, являются значимыми в 89% случаях для участка на севере Средней Сибири и 98% случаях для участка СНОК (Восточная Сибирь).

В результате индексирования МАКС относительно ШГК получены хронологии, корреляция которых с временными сериями ШГК незначима (коэффициент корреляции R для периода с 1900 по 1990 г. равен -0.01 и -0.20 соответственно для КОТ и СНОК). В то же время коэффициенты корреляции между хронологиями максимальной плотности, рассчитанными двумя спосо-

бами, являются значимыми при $p < 0.00001$ ($R = 0.62$ для обоих участков).

Результаты корреляционного анализа хронологий с температурой пятидневок представлены на рис. 2. Климатический отклик индексов и ширины и максимальной плотности годичных колец положителен. Для ШГК участка на Таймыре период со значимой для роста годичных колец температурой начинается 12 июня и длится 30 дней (шесть пятидневок) до 11 июля (рис. 2, а). Средняя за период наблюдений температура пятидневок возрастает за это время с 4.6 до 12.0°C. ШГК участка в Якутии значимо коррелирует с температурой восьми пятидневок (7 июня-16 июля), которая сначала возрастает от 4.4°C до максимума 10.7°C и затем уменьшается до 9.5°C (рис. 2, б). Средняя температура периода со значимой для ШГК температурой, рассчитанная как среднее значение за весь период наблюдений, практически одинакова для рассматриваемых участков и составляет $8.8 \pm 2.6^\circ\text{C}$ на Таймыре и $8.3 \pm 2.0^\circ\text{C}$ в Якутии.

Индексы максимальной плотности годичных колец, полученные для участка в Восточной Сибири в соответствии со стандартной методикой (рис. 2, г), значимо коррелируют с температурой большей части пятидневок с 2 июня и до конца сентября. Для участка на севере Средней Сибири период со значимой для МАКС температурой разбивается на 2 основных интервала: 12 июня-11 июля и 1-10 августа (рис. 2, в).

Характер корреляционных связей индексов плотности, скорректированных относительно зависимости МАКС от ШГК (рис. 2, д, е), с температурой летнего периода значительно отличается от корреляций, полученных для стандартных хронологий МАКС. На Таймыре $I_{\text{МАКС}}$ значимо коррелирует с температурой только одного периода в четыре пятидневки во второй половине лета (27 июля-15 августа), когда средняя температура уменьшается с 12.8 до 9.7°C. В Якутии также четко выделяется только один период со значимой корреляцией с 17 июля по 5 августа (четыре пятидневки) и изменениями температуры от 9.5 до 8.9°C. Важно отметить, что интервалы со значимым влиянием температуры на ШГК и $I_{\text{МАКС}}$ разделены во времени на Таймыре перио-

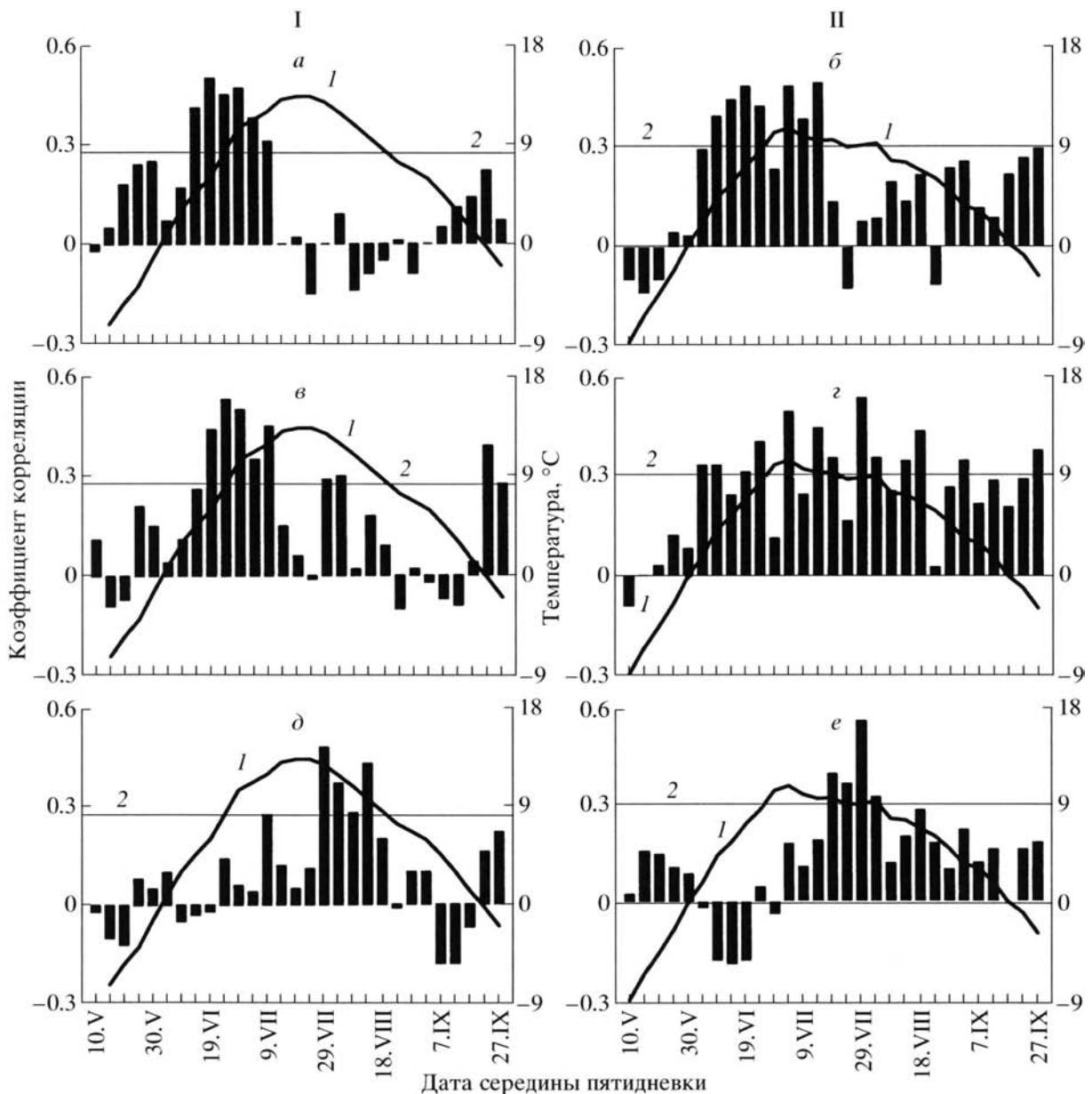


Рис. 2. Коэффициенты корреляции индексных хронологий параметров структуры годичных колец с температурой пятидневок для участка КОТ на Таймыре (I) и участка СНОК в Якутии (II): *a, б* - данные для ширины годичных колец; *в, г* - для хронологий максимальной плотности, рассчитанных стандартным путем; *д, е* - для хронологий максимальной плотности, полученных с учетом связи с шириной годичных колец; *1* - температура пятидневок; *2* - уровень, выше которого коэффициенты значимы при $p < 0.05$.

дом в 15 дней, а в Якутии соприкасаются. Однако никакого значимого влияния температуры всего вегетационного периода и особенно его завершающей части (конец августа-начало сентября) корреляционный анализ не выявляет. Более того в периоды значимого влияния температуры на изменчивость $I_{\text{МАКС}}$ средняя температура по данным инструментальных наблюдений достаточно высока ($12.0 \pm 2.1^\circ\text{C}$ для Таймыра и $9.2 \pm 2.3^\circ\text{C}$ в Якутии) и выше, чем для ширины годичных колец.

Результаты этого исследования показывают, что для изучения отклика прироста и структуры годичных колец деревьев на климатические изменения даже на северной границе леса, необходимо не только принимать во внимание различные факторы внешней среды,

как это сделано Е.А. Вагановым с соавт. [12] и А.В. Кирдяновым с соавт. [8], но и учитывать связи между различными параметрами годичных колец древесины. Последнее становится особенно важным при реконструкции изменений климатических факторов. Так, совместное использование индексов плотности и ширины колец, рассчитанных в соответствии со стандартными методиками, не является правомерным при множественном регрессионном анализе в случае, если наблюдается высокая корреляция между этими двумя параметрами. Но именно такая ситуация характерна для годичных колец деревьев, произрастающих в экстремальных условиях и поэтому наиболее подходящих для дендроклиматических реконструкций [3].

Наличие зависимости между различными параметрами годовых колец древесины показывает, что климатический сигнал, содержащийся в изменчивости этих параметров, смешан [2]. Он не может быть разделен стандартными методиками индексации, цель которых в дендроклиматологии избавиться от изменчивости, вызванной факторами неклиматического характера. В работе предложена новая методика стандартизации данных по максимальной плотности годовых колец относительно связи этого параметра с шириной колец. Результаты корреляционного анализа с температурой, полученные для данных по плотности, обработанных в соответствии с новой методикой, четко выделяют период, наиболее важный для формирования поздней древесины. Эти данные лучше соответствуют этапам формирования годовых колец лиственницы на северном пределе ее распространения, чем те, которые получены для плотности, обработанной стандартным способом. Так, условия начала вегетационного периода являются наиболее важными для формирования камбиальной зоны и влияют на продукцию клеток и соответственно ширину кольца, а максимальная плотность определяется условиями второй половины сезона, когда продуцируются и дифференцируются клетки поздней древесины [2, 4, 9].

Заключение. Предложена методика разделения температурного сигнала, содержащегося в изменчивости двух, широко используемых в дендроклиматологии параметров кольца. Результаты дендроклиматического анализа полученных по новой методике данных по плотности древесины хорошо соотносятся с динамикой сезонного роста годовых колец и известными физиологическими механизмами формирования годовых колец древесины. Применение этой методики, очевидно, позволит получить более адекватные результаты дендроклиматических реконструкций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ваганов Е.А., Кирдянов А.В., Силкин П.П. Значение раннелетней температуры и сроков схода снежного покрова для роста деревьев в субарктической зоне Сибири // Лесоведение. 1999. № 6. С. 3-13.
2. Ваганов Е.А., Шашкин А.В. Рост и структура годовых колец хвойных. Новосибирск: Наука, 2000. 232 с.

3. Ваганов Е.А., Шиятов С.Г., Мазена В.С. Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской Субарктике. Новосибирск: Наука, 1996. 246 с.
4. Antonova G.F., Stasova V.V. Effects of environmental factors on wood formation in larch (*Larix sibirica* Ldb.) stems // *Trees*. 1997. № 11. P. 462-468.
5. Briffa K.R., Osborn T.J., Schweingruber F.H. Large-scale temperature inferences from tree rings: a review // *Global Planet Change*. 2004. № 40. P. 11-26.
6. D'Arrigo R.D., Jacoby G.C., Free R.M. Tree-ring width and maximum latewood density at the North American tree line: parameters of climatic change // *Can. J. For. Res.* 1992. № 22. P. 1290-1296.
7. Hughes M.K., Vaganov E.A., Shiyatov S.G., Touchan R., Funkhouser G. Twentieth - century summer warmth in northern Yakutia in a 600-year context // *Holocene*. 1999. V. 9. P. 603-608.
8. Kirilyanov A., Hughes H., Vaganov E., Schweingruber F., Silkin P. The importance of early summer temperature and date of snow melt for tree growth in Siberian Subarctic // *Trees*, 2003. № 17. P. 61-69.
9. Larson P.R. The vascular cambium. Development and structure. Berlin: Springer-Verlag, 1994. 725 p.
10. Luckman B.H., Briffa K.R., Jones P.D., Schweingruber F.H. Tree-ring based reconstruction of summer temperatures at the Columbia Icefield, Alberta, Canada, AD 1073-1983 // *Holocene*. 1997. V. 7. P. 375-389.
11. Methods of Dendrochronology: applications in environmental sciences / Eds. Cook E., Kairiukstis L. et al. Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1990. 394 p.
12. Vaganov E.A., Hughes M.K., Kirilyanov A.V., Schweingruber F.H., Silkin P.P. Influence of snowfall and melt timing on tree growth in subarctic Eurasia // *Nature*. 1999. V. 400. № 6740. P. 149-151.
13. Wang L., Payette S., Begin Y. Relationships between anatomical and densitometric characteristics of black spruce and summer temperature at tree line in northern Quebec // *Can. J. For. Res.* 2002. № 32. P. 477-486.
14. Yamaguchi D., Fillion L., Savage M. Relationship of temperature and light ring formation at subarctic treeline and implications for climate reconstruction // *Quat. Res.* 1993. № 39. P. 256-262.

Separation of the Climatic Signal Reflected in Variable Width and Density of Annual Tree Rings

A. V. Kirilyanov and E. A. Vaganov

A technique for separation of the climatic signal from two tree ring parameters widely used in dendroclimatology is proposed. This technique is based on the elimination of the relationship between the tree ring width and the maximum late wood density. The results of the dendroclimatic analysis of the maximum density indices obtained for larch trees from the sites at the northern timberline were similar to those on the dynamics and mechanisms of annual ring growth in the north. At the beginning of growing period, temperature affects the ring width, but the variability of the maximum late wood density is determined by temperature of the second half of the vegetation period. The use of the new technique for standardization of data on tree rings may change to some extent the results on dendroclimatic reconstruction in high latitudes.