

УДК 630\*561.24:581.5(57:511)

**М.М. Наурзбаев, О.В. Сидорова, Е.А. Ваганов***Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН  
Красноярск, 660036, Академгородок, Россия  
E-mail: mukhlar@forest.akadem.ru*

## ИСТОРИЯ КЛИМАТА ПОЗДНЕГО ГОЛОЦЕНА НА ВОСТОКЕ ТАЙМЫРА ПО ДАННЫМ СВЕРХДЛИТЕЛЬНОЙ ДРЕВЕСНО-КОЛЬЦЕВОЙ ХРОНОЛОГИИ\*

### Введение

Интегрированные по международной сети метеорологических станций данные наблюдений за температурой показывают, что два последних десятилетия были рекордно теплыми в Северном полушарии [Mann, Bradley, Hughes, in press; Mann, Gille, Bradley, in press]. Наметившийся тренд на потепление находит отражение и в динамике растительности, например в большем аккумулировании фитомассы [Muneri et al., 1997]. Используя результаты климатических моделей некоторые авторы утверждают, что фиксируемое потепление непосредственно связано с увеличением концентрации тепличных газов в атмосфере за счет антропогенной деятельности. Количественные оценки показывают повышение среднегодовой температуры в Северном полушарии на 0,5 - 0,6 °С [Mann, Bradley, Hughes, 1998]. Согласно расчетам по климатическим моделям и моделям-аналогам, наибольшее потепление должно наблюдаться в высоких широтах Северного полушария и составить соответственно 3 - 4 °С [Будыко, Израэль, 1987]. Однако данные анализа радиального прироста деревьев из субарктической области Евразии, наиболее тесно связанного с изменениями температуры, не показы-

вают таких существенных изменений в климатических условиях [Naurzbaev, Vaganov, 2000]. Нерешенным остается и вопрос о пределах естественных колебаний климата - диапазоне изменений приземной температуры воздуха в высоких широтах Северного полушария в период голоцена. Реальным инструментом для реконструкции естественных колебаний температуры в высоких широтах в интервалах тысячелетий являются древесно-кольцевые хронологии, отличающиеся в сравнении с иными косвенными источниками климатической информации рядом важных преимуществ: во-первых, в годичных кольцах деревьев четко зафиксирована климатическая информация [Briffa et al., 1998b; Naurzbaev, Vaganov, 2000]; во-вторых, на северном пределе распространения лесной растительности в Евразии деревья достигают максимально возможного возраста (до 1100 лет), а сеть дендроклиматических станций, равномерно размещенная на обширной территории Сибири, позволяет проводить пространственно-временные реконструкции температуры; в-третьих, сохранившиеся в толще вечной мерзлоты остатки погибших деревьев позволяют получить сверхдлительные древесно-кольцевые хронологии для всего периода голоцена [Шиятов, 1986; Ваганов, Шиятов, Мазепа, 1996; Ваганов, Наурзбаев, 1999; Хантемиров, 1999; Наурзбаев, Ваганов, 1999а, б; Schweingruber, Briffa, 1996; Briffa et al., 1998а, б; Jacoby, D'Arrigo, 1989; Hughes et al., 1999].

\* Работа выполнена при финансовой поддержке программы "Интеграция" СО РАН, проект № 74; РФФИ, проект № 00-15-97980; фонда ИНТАС, проект INTAS-OPEN 97-1418.

Авторы благодарят проф. Г.Г. Лусли и М. Моел из Института физики Бернского университета (Берн, Швейцария), Л.А. Орлову из Института геологии, геофизики и минералогии СО РАН (Новосибирск, Россия) за обеспечение радиоуглеродных датировок древесины.

Цель настоящей работы - построить сверхдлительную древесно-кольцевую хронологию, дать количественную оценку длительных изменений климата (приземной температуры воздуха) на востоке Таймыра и сопоставить их с другими косвенными источниками

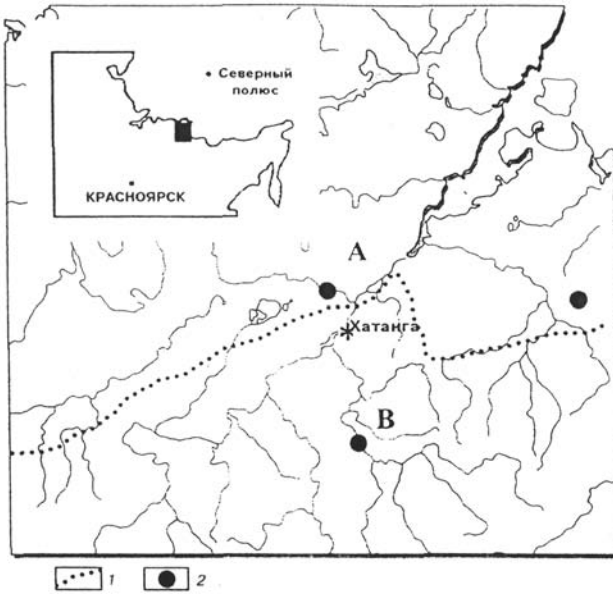


Рис. 1. Карта-схема Восточного Таймыра и плато Путорана и места сбора образцов древесины для построения сверхдлительной древесно-кольцевой хронологии.

1 - современная северная граница леса; 2 - места сбора образцов (керы и диски) с ныне живущих и отмерших деревьев.

А - Северо-Сибирская низменность; В - Котуйское и Анабарское плато.



Рис. 2. Панорама верхней границы леса с сохранившимися на дневной поверхности стволами деревьев.



Рис. 3. Аллювиальные отложения с выходом слоя древесных стволов голоценового возраста.

информации о климатических изменениях в высоких широтах Северного полушария.

### Материал и методы

Сбор дендрохронологического материала выполнен в Хетско-Хатангском равнинном и Мойеро-Котуйс-

ком плоскогорном районах восточной части Таймырского полуострова (рис. 1). Дендрохронологический материал - образцы древесины лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.) (керы ныне живущих и диски стволов отмерших деревьев) - отобран в условиях трех типов: 1) с современного северного предела произрастания лиственницы в урочище Ары-Мас

Таймырского биосферного заповедника (72° 28' с.ш.); 2) с современной верхней границы леса (рис. 2) с абсолютными отметками 200 - 300 м над уровнем моря в долине р. Котуй (70° 30' - 71° 00' с.ш.); 3) из аллювиальных отложений пойменных и надпойменных террас (рис. 3) крупных притоков р. Хатанги (70° 30' - 73° 00' с.ш.). Общее количество древесных образцов составило более 400 шт., биологический возраст деревьев, произраставших на Таймыре в течение последних 7 500 лет голоцена, достигает 740 лет, средний возраст - 270 лет.

Ширина годовых колец измерялась автоматизированными приборами с точностью до 0,01 мм, затем индивидуальные древесно-кольцевые хронологии обрабатывались посредством стандартного пакета программ для дендрохронологического и дендроклиматического анализа [Методы дендрохронологии, 2000]. Продление в глубь веков и тысячелетий древесно-кольцевой хронологии (ДКХ) осуществлялось методом перекрестного датирования погодичного прироста деревьев, произраставших в одних и тех же календарных интервалах [Douglass, 1919].

Выделение внешнего климатического сигнала, определяющего ответную реакцию прироста деревьев, реализуется процедурой стандартизации. Это один из основных методических приемов дендроклиматологии для выявления климатически обусловленной изменчивости радиального прироста [Fritts, 1976]. Следует отметить, что стандартизация абсолютных значений годовичного прироста деревьев, основанная на подавлении эффекта возрастной (биологической) кривой роста, по сути, представляет собой процедуру фильтрации низкочастотной составляющей в многолетних колебаниях прироста. Ретроспективная оценка длительных изменений климата по дендроклиматическим данным потребовала разрешения проблемы сохранения долговременных, климатически обусловленных колебаний прироста в дендрохронологических рядах [Шиятов, 1986; Briffa et al., 1992, 1996]. Для стандартизации применяются два подхода: 1) аппроксимирующая кривая возрастных изменений прироста подбирается индивидуально для каждого дерева [Methods of Dendrochronology..., 1990]; 2) используется обобщенная возрастная кривая, построенная по всей совокупности анализируемых индивидуальных кривых прироста (т.н. обобщенная возрастная кривая). Как показали специальные исследования, при втором способе стандартизации фиксируются длительные климатические изменения, превышающие биологический возраст деревьев [Briffa et al., 1996; Наурзбаев, Ваганов, 1999а, б; Naurzbaev, Vaganov, 2000].

Статистический анализ изменчивости прироста деревьев (временных рядов) традиционно предусматривает вычисление оценочных показателей сгруппи-

рованных в блок анализа вариаций [Fritts, 1976; Methods of Dendrochronology..., 1990]. Индивидуальная изменчивость абсолютных и индексированных значений радиального прироста вследствие физиологических причин может содержать значительную автокорреляционную составляющую [Fritts, 1976]. Обычно ее достаточно адекватно моделируют авторегрессионным (AR) процессом [Methods of Dendrochronology..., 1990] или процессом авторегрессионного скользящего среднего (ARMA-моделирование) [Guiot, 1986]. Для оценки сходства сравниваемых временных рядов и уточнения перекрестной датировки серий годовичных колец использовался коэффициент синхронности [Huber, 1943], показывающий степень воздействия общих факторов на радиальный прирост индивидуальных деревьев. Для определения тесноты связи между рядами прироста деревьев (хронологиями) вычислялся коэффициент корреляции (коэффициент Пирсона). Кросс-корреляционный анализ служил средством оценки тесноты связи (с переменным шагом запаздывания) при тестировании "плавающих" хронологий, перекрестном датировании, выявлении ложных и выпавших колец [Holmes, 1983].

Для реконструкции климатического сигнала в прошлых изменениях прироста деревьев были рассчитаны одномерные и многомерные линейные регрессионные модели, калиброванные и верифицированные по данным за период инструментальных наблюдений за климатом [Fritts, 1976]. Следует отметить, что синхронность погодичного прироста деревьев, произрастающих в однородном природно-климатическом районе, обусловлена как региональными особенностями климатического режима, так и глобальной составляющей в длительных изменениях климата региона [Ваганов, Шиятов, Мазепа, 1996; Ваганов и др., 1998; Наурзбаев, Ваганов, 1999б]. Адекватность моделей реконструкции климатических переменных оценивалась для разных календарных интервалов калибровки и верификации по критериям значимости: коэффициенту корреляции и детерминации (квадрат корреляции) - при критическом значении  $< 0,05$  доверительного уровня вероятности, критерию Фишера с доверительным уровнем вероятности  $> 95\%$  - для оценки различия фактической и остаточной дисперсии. Автокорреляция регрессионных остатков оценивалась по значению DW-статистики (критерий Дарбина - Ватсона) [Химмельблау, 1973].

Анализ частотной структуры дендрохронологических рядов проведен методами прямого преобразования Фурье (метод Блекмана - Тьюки) и "быстрого или обратного преобразования Фурье" (метод Кули - Тьюки). Введение взаимоспектральных оценок (кросс-спектральный анализ) расширяет границы применения спектрального анализа, поэтому для

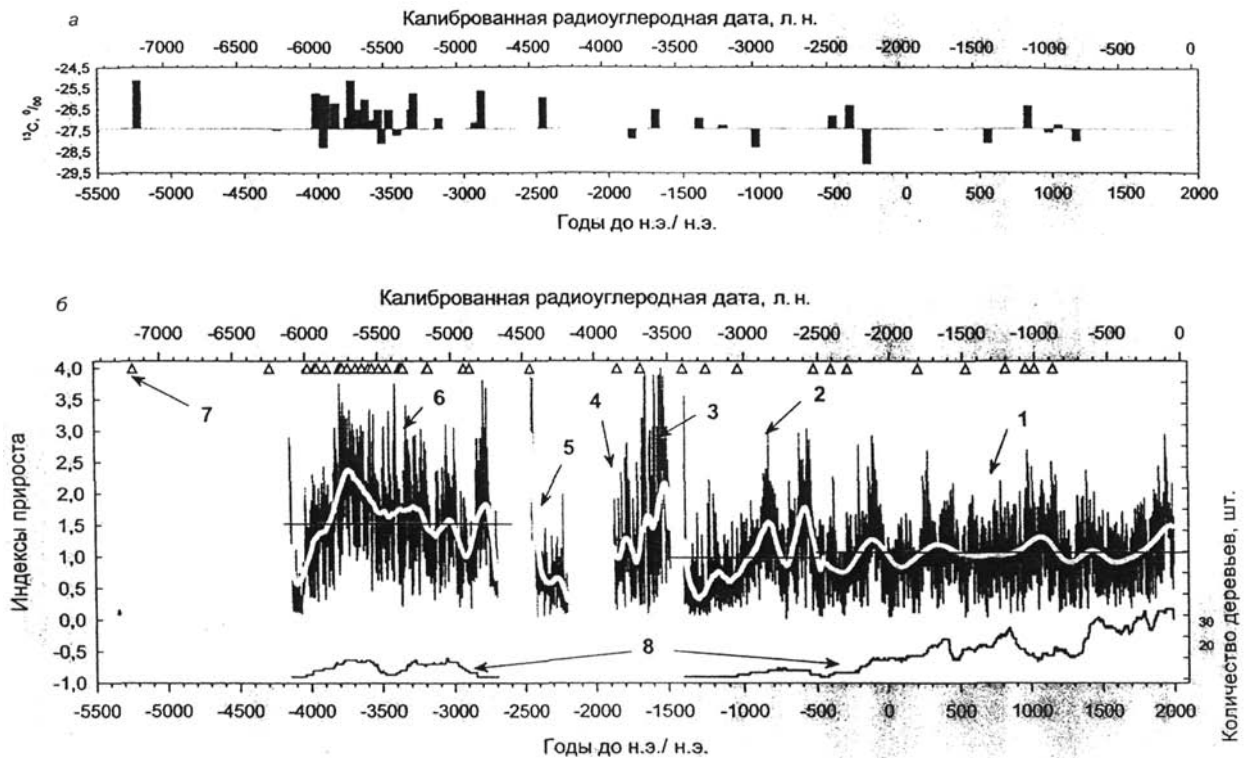


Рис. 4. Результаты перекрестного и радиоуглеродного датирования таймырского дендрохронологического материала.

*a* - вариабельность содержания стабильного изотопа  $^{13}C$  в образцах древесины; *b* - изменчивость прироста годичных колец в абсолютной (1) и ряде "плавающих" (2, 3, 4, 5, 6) древесно-кольцевых хронологиях, калиброванные радиоуглеродные даты древесного материала (7) и количество датированных деревьев (8).

выявления характера частотно-временной структуры была выполнена оценка взаимных спектров временных рядов радиального прироста деревьев [Дженкинс, Ватс, 1971, 1972].

### Результаты и обсуждение

В результате перекрестного датирования 137 древесных образцов получена абсолютная хронология длительностью 2 428 лет (с 431 до н.э. по 1996 г. н.э.), а также ряд "плавающих" хронологий длительностью до 1500 лет, которые равномерно расположены в семитысячелетнем периоде голоцена. Относительная календарная привязка "плавающих" хронологий проведена по калиброванному радиоуглеродному возрасту образцов [Stuiver, Reimer, 1993]. На рис. 4, б показаны кривые индексированных значений прироста: 1) абсолютная 2 428-летняя хронология (с 431 г. до н.э. по 1996 г. н.э.); 2) 951-летняя, полученная по девяти перекрестно датированным образцам (с 1400 по 450 г. до н.э.); 3) 192-летняя, полученная по образцу СНА059 (с 1683 по 1492 г. до н.э.); 4) 392-летняя - по образцу МАУ736 (с 1867 по 1474 г. до н.э.); 5) 270-летняя - по образцу МАУ702 (с 2456 по 2187 г.

до н.э.); 6) 1 443-летняя, полученная по 27 перекрестно датированным образцам (с 4140 по 2700 г. до н.э.).

Основные радиоуглеродные даты представлены Объединенным институтом геологии, геофизики и минералогии СО РАН (г. Новосибирск) и Институтом физики Бернского университета (Швейцария) (табл. 1). Лабораторная коллекция образцов полуйскопаемой древесины из аллювиальных отложений Восточного Таймыра насчитывает более 400 дисков древесины; из них 48 - с радиоуглеродными датами, чем подтверждается высокий потенциал дендрохронологического материала для построения календарно непрерывных хронологий для последнего 7 500-летнего периода голоцена. Сравнение данных радиоуглеродного и календарного датирования образцов древесины показало, что ошибка в календарной привязке радиоуглеродного датирования укладывается в интервал достоверности полученных радиоуглеродных дат.

Кривые изменчивости прироста деревьев свидетельствуют о наилучших условиях их роста в период около 6 000 л.н. (рис. 4, б). Этот период потепления классифицируется как "климатический оптимум голоцена" [Lamb, 1977]. Прирост деревьев лиственницы,

Таблица 1. Радиоуглеродные и абсолютные (календарные) даты таймырского дендрохронологического материала

Лаб. номер ИЛ СО РАН	Некалиброванный радиоуглеродный возраст (от 1950 г.) и лаб. номер радиоуглеродного датирования образца в международной классификации	Калиброванная радиоуглеродная дата***	$\delta^{13}\text{C}$ , ‰	Абсолютная (календарная) дата сегмента древесины	Собственный возраст дерева
КТU004	230±65 СО АН-3391**	-	-	1750 г. н.э.	592
КТU030	400±35 СО АН-3392**	-	-	1500 г. н.э.	372
КТU009	665±50 СО АН-3390**	-	-	1300 г. н.э.	470
MAY923	910±30 В-6089*	1161 г. н.э.	-28,0	1168 г. н.э.	201
MAY918	960±30 В-6087*	1037 г. н.э.	-27,2	1108 г. н.э.	169
MAY920	1100±30 В-6088*	974 г. н.э.	-27,6	-	49
СНАНЗ	1210±30 В-7056*	827, 833, 856 гг. н.э.	-26,3	-	286
СНА072	1520±В-7062*	554 г. н.э.	-28,1	-	315
КТU106	1840±30 В-7058*	218 г. н.э.	-27,5	145 г. н.э.	354
NOVA20	2250±30 В-7057*	366, 273, 266 гг. до н.э.	-29,1	-	285
КТU222	2320±30 В-7059*	392 г. до н.э.	-26,3	350 г. до н.э.	203
MAY925	2440±20 В-6785*	514 г. до н.э.	-26,8	-	155
NOV069	2890±20 В-6788*	1030 г. до н.э.	-28,3	-	142
СНАН2	2990±30 В-7055*	1254, 1243, 1213 гг. до н.э.	-27,2	-	230
СНАН1	3110±30 В-6083*	1398 г. до н.э.	-26,9	-	306
СНА059	3400±30 В-6427*	1683 г. до н.э.	-26,5	-	192
MAY736	3500±30 В-7060*	1865, 1844, 1775 гг. до н.э.	-27,9	-	393
MAY702	3930±30 В-6784*	2456 г. до н.э.	-25,9	-	270
NOV077	4240±30 В-6789*	2881 г. до н.э.	-25,6	-	216
NOV001	4370±40 В-6419*	2923 г. до н.э.	-27,1	-	182
ЛУK005	4500±30 В-7054*	3298, 3236, 3173, 3168, 3107 гг. до н.э.	-27,0	-	225
СНАН6	4510±40 В-6086*	3302, 3234, 3178, 3164, 3110 гг. до н.э.	-26,9	-	348
NOV030	4570±40 В-6082*	3345 г. до н.э.	-25,7	-	221
NOV078	4600±40 В-6420*	3358 г. до н.э.	-26,5	-	291
NOV080	4640±30 В-6421*	3370 г. до н.э.	-27,3	-	520
NOVA02	4680±40 В-6081*	3497, 3457, 3378 гг. до н.э.	-27,7	-	286
СНА005	4730±30 В-6780*	3611, 3608, 3513, 3391, 3390 гг. до н.э.	-26,5	-	197
СНА023	4750±30 В-6781*	3617, 3588, 3528 г. до н.э.	-26,5	-	89
ЛУK001	4790±40 В-7053*	3628, 3563, 3543 г. до н.э.	-28,1	-	384
NOV029	4810±40 В-6080*	3634 г. до н.э.	-27,0	-	310
СНА043	4900±30 В-6783*	3690, 3666 г. до н.э.	-26,0	-	134
СНА060	4970±40 В-6418*	3761, 3735, 3726 г. до н.э.	-26,5	-	329
СНА060	4910±40 СО АН-3390**	-	-	-	329
СНА012	4980±30 В-6423*	3772 г. до н.э.	-27,1	-	345
СНА012	4855±45 СО АН-3388**	-	-	-	345
СНА009	4990±30 В-6424*	3776 г. до н.э.	-25,1	-	215
СНА017	5010±40 В-6425*	3785 г. до н.э.	-27,3	-	452
СНАН4	5020±40 В-6084*	3792 г. до н.э.	-26,9	-	176
СНА036	5040±30 В-6782*	3899, 3884, 3801 г. до н.э.	-26,2	-	180
СНА032	5110±30 В-6426*	3950 г. до н.э.	-25,8	-	-
СНА001	5150±40 В-6085*	3964 г. до н.э.	-28,3	-	546
СНА001	4865±45 СО АН-3387**	-	-	-	546
СНА011	5250±30 В-6422*	4038, 4014, 4007 г. до н.э.	-25,7	-	256
NOV005	5400±30 В-6787*	4310, 4248 г. до н.э.	-27,5	-	-
MAY743	6260±30 В-7061*	5227 г. до н.э.	-25,1	-	-

\* Институт физики Бернского университета (Швейцария).

\*\* Объединенный институт геологии, геофизики и минералогии СО РАН, Новосибирск.

\*\*\* [Stuiver, Reimer, 1993. p. 215 - 230].

произрастающих тогда, в 1,5 - 1,6 раза превышает средний прирост деревьев в I и II тыс. н.э. Несколько образцов полуископаемой древесины, собранных ранее в пойме р. Балахня, были надежно датированы по "плавающей" хронологии для периода с 4140 по 2700 г. до н.э. В связи с особенностями русла реки эти об-

разцы не могли происходить из более южных районов, а значит, в климатический оптимум голоцена северная граница лесной растительности располагалась как минимум на 130 - 150 км дальше современной.

Климатический оптимум голоцена четко выделяется и по содержанию в годичных кольцах деревьев

Таблица 2. Аномальные 100-летние периоды похолоданий и потеплений в последние 2,5 тыс. лет на примере реконструкции раннелетней температуры воздуха по таймырской древесно-кольцевой хронологии

Холодные			Теплые		
Период	Температура, °С	$\delta$	Период	Температура, °С	$\delta$
1208 - 1307 г. н.э.	8,6	-1,9	144 - 43 г. до н.э.	10,0	3,3
366 - 265 г. до н.э.	8,6	-1,7	1870 - 1979 г. н.э.	9,7	2,1
33 г. до н.э. - 65 г. н.э.	8,7	-1,6	228 - 327 г. н.э.	9,6	1,8
1599 - 1698 г. н.э.	8,7	-1,5	1058 - 1157 г. н.э.	9,6	1,7
			950 - 1049 г. н.э.	9,5	1,5

стабильного изотопа  $^{13}\text{C}$  (рис. 4, а), повышение концентрации которого подтверждает значительное потепление климата в этот период.

В предыдущих работах показано, что в данных условиях ведущим климатическим фактором, определяющим до 70% погодичной изменчивости ширины колец деревьев, является сезонная динамика раннелетних температур воздуха [Ваганов и др., 1998; Ваганов, Наурзбаев, 1999; Наурзбаев, Ваганов, 1999а, б]. Была рассчитана модель изменений раннелетней температуры и выполнена дендроклиматическая реконструкция с годичной разрешающей способностью. Проанализированы экстремумы погодичной и вековой изменчивости в динамике раннелетних температур воздуха за последние 2 500 лет голоцена. На примере реконструкции раннелетней температуры для востока Таймыра выявлены столетия с большой амплитудой ее колебаний, когда значительная часть погодичных изменений температур соответствующего знака выходит за пределы среднеквадратического (до 25%) и удвоенного среднеквадратического (до 7%) отклонения, и периоды с относительно устойчивой раннелетней температурой. Показательно, что холодные периоды I, II, XIII и XVII вв. отличаются гораздо меньшей амплитудой погодичных колебаний температуры. Наибольшая амплитуда приходится на периоды потеплений II и I вв. до н.э., III, X, XI, XII, XIV вв. н.э. Количественная характеристика аномальных лет и столетий прошлых изменений раннелетней температуры воздуха, реконструированных по годичным кольцам деревьев для последних 2 500 лет голоцена, показала, что экстремально холодные периоды ( $\Delta t \geq 1,5\delta$ ) были в XII, на рубеже IV и III вв. до н.э., в I и XVII вв. н.э. Многолетняя средняя раннелетней температуры в эти столетия снижалась до 8,6 °С. Экстремально теплые периоды зафиксированы на рубеже II и I вв. до н.э., в III, на рубеже X и XI, а также XI и XII вв. н.э., амплитуда раннелетней температуры в эти столетия сопоставима с современным потеплением климата (табл. 2).

Анализ частотно-временной структуры древесно-кольцевых хронологий позволил выявить устойчивые вековые и сверхвековые циклические колебания. Дли-

тельные циклы (сверхвековые и тысячелетние) кратны вековому 80-летнему циклу, спектральная мощность которого сосредоточена в полосе частот 60 - 120 лет. Спектральная оценка 2 500-летней хронологии и кросс-спектральный анализ отрезков хронологии для разных 500-летних календарных периодов свидетельствуют, что:

- 1) на протяжении последних 2 500 лет голоцена в приросте деревьев четко проявляются вековые и сверхвековые колебания длительностью 80 и 180 лет;
- 2) сверхвековые и тысячелетние колебания в приросте деревьев объяснимы суперпозицией (наложением) гармоник вековых циклов. Тысячелетние циклы кратны вековому и двойному вековому циклам, также значимо проявляются длительные колебания прироста в полосе частот 360 - 430 лет.

Устойчивость выявленных циклических компонент в разных 500-летних календарных интервалах свидетельствует, что в течение последних 2 500 лет изменчивость прироста деревьев отражает изменчивость одного и того же лимитирующего фактора.

Средневековое и современное потепление климата Субарктики может быть объяснимо суперпозицией положительных фаз векового, двойного векового и тысячелетнего природных циклов. Средневековое потепление является ближайшим аналогом современного потепления климата Северного полушария. Тенденции последнего четко прослеживаются (со второй половины XIX в.) в приросте деревьев субарктических и континентального районов Сибири.

Сверхдлительная древесно-кольцевая хронология по востоку Таймыра показывает значительное уменьшение интенсивности радиального прироста (и, соответственно, температуры) от климатического оптимума голоцена до наших дней (рис. 4, б). Количественная оценка средних отклонений раннелетней и среднегодовой температуры воздуха дает величину превышения в климатический оптимум по сравнению с инструментальным периодом метеонаблюдений в XX в. н.э., равную 3,5 °С. Это хорошо согласуется как с имеющимися в литературе данными [Ваганов, Панюшкина, Наурзбаев, 1997], так и с находками полускопаемой древесины в русле р. Балахня на 130 -

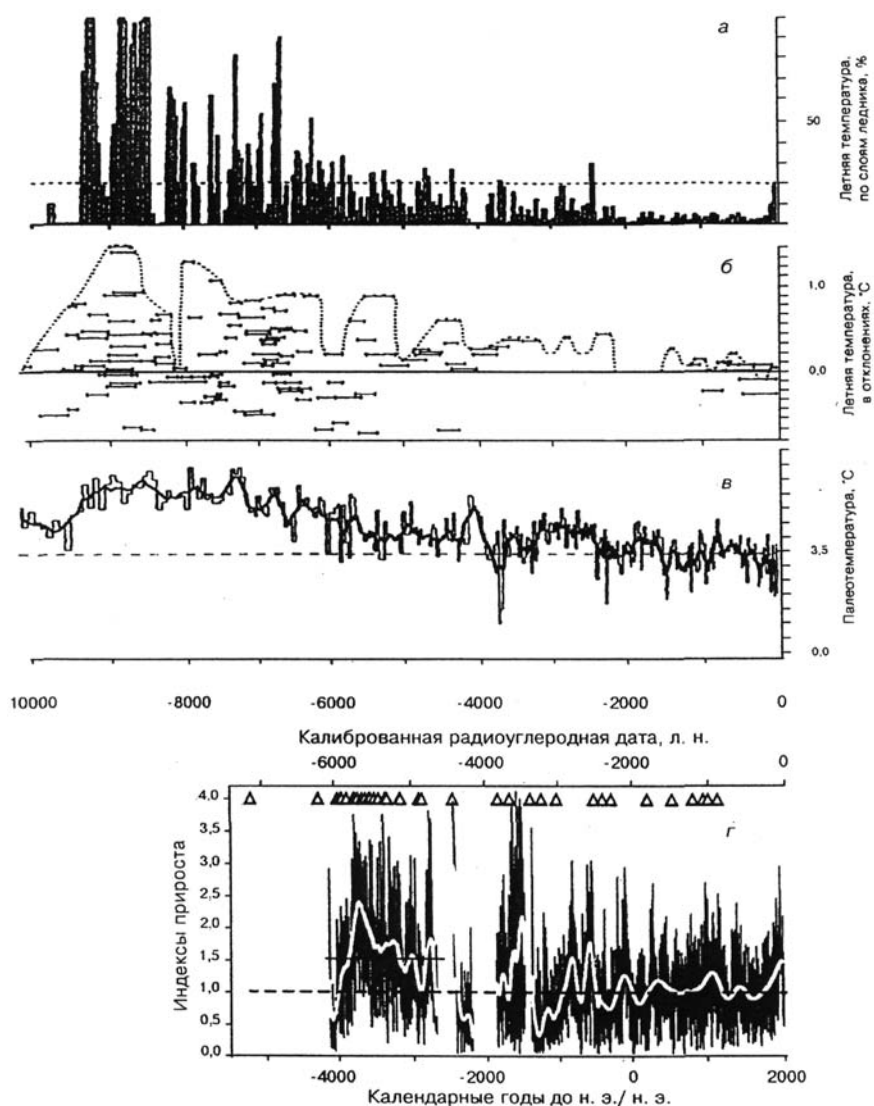


Рис. 5. Сравнение кривых погодичной и длительной изменчивости прироста деревьев лиственницы по таймырской древесно-кольцевой хронологии (з) с иными косвенными источникам палеоклиматической информации [Bradley, 2000].

*a* - реконструкция летней температуры воздуха по слоям ледового ядра, извлеченного из ледника Agassiz Ice Cap (Канада); *б* - аномалии в изменении летней температуры, реконструированные по концентрации стабильного изотопа  $^{13}\text{C}$  в годичных слоях полускопаемой древесины деревьев рода *Pinus*, произраставших в голоцене на севере Швеции; *в* - реконструкция изменчивости палеотемпературы в голоцене по концентрации  $^{18}\text{O}$  в слоях сталагмитов р. Мойрана, Норвегия.

150 км севернее современной границы распространения лесной растительности. Их датирование по "плавающей" хронологии для климатического оптимума свидетельствует, что лиственничные редколесья простирались в этот период как минимум на 1,0 - 1,5° с.ш. дальше самого северного лесного массива Ары-Мас.

Рассмотрим, как соотносятся данные, полученные по Таймыру, с другими индикаторами длительных изменений приземной температуры воздуха в высоких широтах Северного полушария в голоцене (рис. 5). Обращает на себя внимание устойчивое снижение темпе-

ратуры в основной период голоцена (начиная с 9 000 - 8 000 л.н.) с более короткими, но значительными по амплитуде ее флуктуациями. Такой выраженный тренд понижения температуры (в пределах 0,7 - 1,2 °C) в общем совпадает с данными таймырской хронологии. Можно отметить также совпадение характерных флуктуаций температуры, например, заметное ее снижение 4 000 и 3 000 л.н., в конце I тыс. до н.э. и повышение в начале I тыс. до н.э., средневековое потепление и др. Такое совпадение свидетельствует об общности длительных изменений температуры в полярной области Северного полушария, реконструируемых по разным

косвенным источникам. Рассмотренные данные подкрепляются, например, результатами радиоуглеродного и дендрохронологического датирования остатков древесных растений, произраставших на Полярном Урале в период средневекового потепления, которые были собраны выше современной границы лесной растительности [Shiyatov, 1993]. Диапазон естественных отклонений в значениях усредненных по столетиям изменений раннелетней температуры воздуха в позднем голоцене (последние 2 500 лет) по данным таймырской абсолютной древесно-кольцевой хронологии достигает 1,5 °C (см. табл. 2), а для более чем 6 000-летнего периода голоцена - 3,5 °C [Naurzbaev, Vaganov, 2000].

Однако вопрос о величине превышения температуры в климатический оптимум голоцена относительно наблюдаемого современного потепления климата остается открытым. Расхождения данных разных источников значительные: от 0,6 °C (слои ледников, сталагмитов и донные отложения) до 3,5 °C (таймырская древесно-кольцевая хронология). Они могут быть обусловлены как локальными условиями мест, где собран материал для реконструкции, так и неадекватностью моделей калибровки данных косвенных источников. К сожалению, выявить такую причину расхождений в настоящее время не представляется возможным. Единственным подходом является калибровка данных разных косвенных источников по материалам современных климатических наблюдений. Однако это возможно лишь для дендрохронологического материала.

### Заключение

Среди различных косвенных источников информации об изменениях климата длительные древесно-кольцевые хронологии обладают рядом особенностей. Во-первых, это надежная временная "привязка", которая обеспечивается перекрестным датированием. К сожалению, не все из имеющихся косвенных источников такого же разрешения могут обеспечить перекрестное датирование. Во-вторых, высокое разрешение во времени - год, а с использованием структур годичных колец - сезон, месяц, что приближает эти данные к инструментальным. В-третьих, возможность количественных реконструкций климатических переменных по годичным кольцам; возможность построить надежные статистические модели, откалибровать их по инструментальным климатическим данным и затем верифицировать. Наконец, сохранившаяся древесина отмерших деревьев позволяет существенно продлить хронологии на несколько тысячелетий, в принципе на весь период голоцена. Ряд сверхдлительных хронологий уже получен, например по сосне остистой и секвойе в США, дубу в Германии и Англии,

но вследствие слабого климатического сигнала они преимущественно используются для датировки, а не для точных климатических реконструкций.

На Таймыре сверхдлительная древесно-кольцевая хронология построена для условий, где все процессы жизнедеятельности древесных растений жестко лимитируются температурой. Поэтому данная хронология может рассматриваться как близкий аналог длительного температурного ряда. И именно поэтому в ней четко отражена история длительных изменений климата позднего голоцена: средневековое потепление (малый климатический оптимум), малый ледниковый период голоцена, климатический оптимум голоцена 6 000 - 5 000 л.н. и др. Как видно из результатов, современное потепление по амплитуде не выходит за пределы прошлых изменений температуры, а по сравнению с климатическим оптимумом голоцена является не столь значительным. Тем не менее, используя данные годичных колец, важно ответить на следующие вопросы:

1. Каков вклад антропогенной составляющей в современных изменениях климата (потепление, обусловленное выбросом тепличных газов в атмосферу), и существенен ли он на фоне естественных факторов изменения климата?

2. Может ли скорость увеличения температуры в современный период рассматриваться как беспрецедентная, не имеющая аналогов в прошлом?

Ряд обобщающих работ, равно как и результаты применения глобальных климатических моделей свидетельствуют о значимом влиянии антропогенных выбросов на величину "скорости роста температуры" в Северном полушарии [Mann, Bradley, Hughes, in press; Mann, Gille, Bradley et al., in press]. Однако по данным длительных древесно-кольцевых хронологий повышение температуры в высоких широтах оказывается ниже прогнозируемого. Чтобы уверенно ответить на второй вопрос необходимо иметь хорошие количественные данные для голоцена, по которым можно выделить периоды резких естественных увеличений температуры в прошлом и оценить амплитуду таких повышений. Поэтому построение сверхдлительных древесно-кольцевых хронологий для субарктических районов с достаточным количеством полуископаемой древесины является одной из насущных задач текущего времени. Эта работа интенсивно проводится на Ямале, Полярном Урале, Таймыре, в низовье р. Индигирки, что в ближайшее время обеспечит Субарктику Евразии сверхдлительными древесно-кольцевыми хронологиями, которые могут быть использованы как для количественной реконструкции температуры, так и для калибровки данных других косвенных источников информации об изменениях климата с меньшим временным разрешением.



### Список литературы

**Будько М.И., Израэль Ю.А.** Антропогенные изменения климата. - Л.: Гидрометеиздат, 1987. - 406 с.

**Ваганов Е.А., Наурзбаев М.М.** Предельный возраст деревьев лиственницы в Сибири // Лесоведение. - 1999. - № 6. - С. 65 - 75.

**Ваганов Е.А., Панюшкина И.П., Наурзбаев М.М.** Реконструкция летней температуры воздуха в восточной части Таймыра за последние 840 лет // Экология. - 1997. - Т. 6. - С. 403 - 407.

**Ваганов Е.А., Шиятов С.Г., Мазепа В.С.** Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской Субарктике. - Новосибирск: Наука, 1996. - 246 с.

**Ваганов Е.А., Шиятов С.Г., Хантемиров Р.Н., Наурзбаев М.М.** Изменчивость летней температуры воздуха в высоких широтах Северного полушария за последние 1,5 тыс. лет: Сравнительный анализ данных годовичных колец деревьев и ледовых колонок // Докл. Академии наук. - 1998. - Т. 358, № 5. - С. 681 - 684.

**Дженкинс Г., Ватте Д.** Спектральный анализ и его приложения. - М.: Мир, 1971. - Вып. 1. - 316 с; 1972. - Вып. 2. - 287 с.

**Методы дендрохронологии.** - Красноярск: Изд-во КГУ, 2000. - Ч. 1: Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации: Методическое пособие / Под ред. С.Г. Шиятова, Е.А. Ваганова. - 80 с.

**Наурзбаев М.М., Ваганов Е.А.** 1 957-летняя древесно-кольцевая хронология по востоку Таймыра // Сибирский экологический журнал. - 1999а. - № 2. - С. 159 - 165.

**Наурзбаев М.М., Ваганов Е.А.** Изменчивость радиального прироста лиственницы на востоке Таймыра и Пурторана за последние 2 000 лет // Лесоведение. - 1999б. - № 5. - С. 24 - 34.

**Хантемиров Р.М.** Древесно-кольцевая реконструкция летних температур на севере Западной Сибири за последние 3 248 лет // Сибирский экологический журнал. - 1999. - № 2. - С. 185 - 191.

**Химмельблау Д.** Анализ процессов статистическими методами. - М.: Мир, 1973. - 947 с.

**Шиятов С.Г.** Дендрохронология верхней границы леса на Урале. - М.: Наука, 1986. - С. 136.

**Bradley R.S.** Past global changes and their significance for the future // Quaternary Science Reviews. - 2000. - N 19. - P. 391 - 402.

**Briffa K.R., Jones P.D., Bartholini T.S., Eckstein D., Schweingruber F.H., Karlen W., Zetterberg P., Eronen M.** Fennoscandian summers from AD 500: temperature changes on short and long timescales // Climate Dynamics. - 1992. - N 7. - P. 111 - 119.

**Briffa K.R., Jones P.D., Schweingruber F.H., Karlen W., Shiyatov S.G.** Tree-ring variables as proxy-climate indicators: Problems with low-frequency signals, in Climate Change and Forcing Mechanisms of the last 2000 years // NATO ASI Ser. Ser. 1: Global change. - 1996. - Vol. 41. - P. 9 - 41.

**Briffa K.R., Jones P.D., Schweingruber F.H., Osborn T.J.** Influence of volcanic eruptions on northern hemisphere summer temperature over the past 600 years // Nature. - 1998а. - N 393. - P. 450 - 455.

**Briffa K.R., Jones P.D., Schweingruber F.H., Osborn T.J., Shiyatov S.G., Vaganov E.A.** Reduced sensitivity of recent tree-

growth to temperature at high northern latitudes // Nature. - 1998б. - N 391. - P. 672 - 682.

**Douglass A.E.** Climatic cycles and tree-growth: A study of the annual rings of trees in relation to climate and solar activity. - Wash.: Carnegie Inst., 1919. - Vol. 1. - 127 p.

**Fritts H.C.** Tree rings and climate. - L.; N. Y.; San Francisco: Academic Press, 1976. - 567 p.

**Guiot J.** ARMA techniques for modeling tree-ring response to climate and for reconstructing variations of paleoclimates // Ecological Modeling. - 1986. - N 33. - P. 149 - 171.

**Holmes R.L.** Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement // Tree-Ring Bulletin. - 1983. - Vol. 44. - P. 69 - 75.

**Huber B.** Über die Sicherheit Jahrring-chronologischer Datierung // Holz Roh und Werst. - 1943. - Jg. 6, N 10/12. - S. 263 - 268.

**Hughes M.K., Vaganov E.A., Shiyatov S., Touchan R., Funkhouser G.** Twentieth-century summer warmth in northern Yakutia in a 600-year context // The Holocene. - 1999. - N 9.5. - P. 603 - 608.

**Jacoby G.C., D'Arrigo R.** Reconstructed Northern Hemisphere annual temperature since 1671 based on high-latitude tree-ring data from North America // Climate Change. - 1989. - N 14. - P. 39 - 59.

**Lamb H.H.** Climate: present, past and future. Climatic history and future. - L.: Methuen, 1977. - Vol. 2. - 531 p.

**Mann M.E., Bradley R.S., Hughes M.K.** Global scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries // Nature. - 1998. - N 392/23. - P. 779 - 787.

**Mann M.E., Bradley R.S., Hughes M.K.** Northern Hemisphere temperatures during the past millennium: inferences, uncertainties, limitations // Geophysical Research Letters (in press).

**Mann M.E., Gille E., Bradley R.S., Hughes M.K., Overpeck J.T., Webb R.S., Keimig F.T.** Annual temperature patterns in past centuries: an interactive presentation // Earth Interactions (in press).

**Methods of Dendrochronology.** Applications in the Environmental Sciences / Eds. E.R. Cook, L.A. Kairiukstis. - Dordrecht; Boston; L.: Kluwer Academic Publishers, 1990. - 394 p.

**Myneni R.B., Keeling C.D., Tucker C.J., Asrar G., Nemani R.R.** Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 - 1991 // Nature. - 1997. - N 377. - P. 388 - 392.

**Naurezbaev M.M., Vaganov E.A.** Variation of summer and annual temperature in the East of Taymir and Putoran (Siberia) over the last two millennia inferred from tree-rings // Journal of Geophysical Research. - 2000. - Vol. 105, N 6. - P. 7317 - 7327.

**Schweingruber F.H., Briffa K.R.** Tree-ring density networks for climate reconstruction // Climate Variations and Forcing Mechanisms of the Last 2000 Years / Eds. P.D. Jones, R.S. Bradley, J. Jouzel. - Berlin: Springer, 1996. - P. 43 - 66.

**Shiyatov S.G.** The upper timberline dynamics during the last 1100 years in the Polar Ural Mountains // Oscillations of the Alpine and Polar Tree Limits in the Holocene. - Stuttgart; Jena: N.Y.: Gustav Fischer Verlag, 1993. - P. 195 - 203.

**Stuiver M., Reimer P.J.** Extended <sup>14</sup>C data base and revised Calib 3.0 <sup>14</sup>C age calibration program // Radiocarbon. - 1993. - N 35. - P. 215 - 230.