

Реконструкции температуры воздуха за последние 2000 лет по данным годовых колец лиственницы востока Таймыра и северо-востока Якутии

О. В. СИДОРОВА, М. М. НАУРЗБАЕВ

*Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН
660036 Красноярск, Академгородок*

АННОТАЦИЯ

Для двух Субарктических районов Сибири, северо-востока Якутии и восточной части полуострова Таймыр проведена реконструкция летней (июнь-июль) и среднегодовой температуры воздуха за последние 2000 лет. По реконструированным данным выявлены син- и асинхронные экстремальные периоды потеплений и похолоданий за исследуемый период. Проведенный анализ длительных изменений климатических условий показал, что на протяжении 2000 лет в древесно-кольцевых хронологиях Субарктики Сибири четко прослеживаются климатические колебания глобального характера (средневековое потепление, малый ледниковый период, современное потепление). Выявлено, что для востока Таймыра и северо-востока Якутии летняя (июнь-июль) температура воздуха в XX в. по сравнению с XIX увеличилась в среднем на 0,5-0,6 °С, а среднегодовая температура воздуха - на 0,3-0,4 °С. Полученные реконструированные данные за последние 2000 лет свидетельствуют о том, что средневековое потепление климата является ближайшим аналогом современного в Северном полушарии. Показано, что высокочастотные колебания температуры на Таймыре и Индигирке асинхронны, низкочастотные колебания имеют высокую синхронность. Это означает, что общий для севера Азии климатический сигнал проявляется в области длительных изменений среднегодовой температуры.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время проблеме глобального потепления климата уделяется много внимания. Согласно расчетам по климатическим моделям и моделям-аналогам, наибольшее потепление вследствие повышения концентрации парниковых газов в атмосфере должно наблюдаться в высоких широтах Северного полушария и составлять соответственно 3-4 °С [1, 2]. Прогнозируется, что в зоне вечной мерзлоты усилятся процессы разложения почвенной органики, что приведет к повышению эмиссии углекислоты и метана в атмосферу [3]. По оценкам, при росте летней температуры в высокоширотных районах на 4 °С в атмосферу дополнительно выделится до 50 % углерода, несмотря на более интенсивный рост растений. В этом по-

ясе сама притундровая растительность - важный климатообразующий фактор, поэтому при потеплении будет иметь серьезные последствия сдвиг границы леса на север. Следовательно, изменится структура растительности: на смену лишайникам и мхам, тяготеющим к низким температурам, придет кустарниковая растительность. Кроме того, прогнозируемое увеличение высоты снежного покрова неблагоприятным образом скажется на выживаемости молодых семян древесных пород [4].

Однако данные анализа радиального прироста деревьев из Субарктической области Евразии, наиболее тесно связанного с изменениями температуры, не показывают таких существенных изменений в климатических условиях [5-7]. 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 на 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 [8-10]; во-вторых, на северном пределе распространения лесной растительности в Евразии деревья достигают максимально возможного возраста (до 1100 лет) [11, 12], а сеть дендроклиматических станций, равномерно размещенных 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 [8-15].

С целью выявления длительных климатических изменений на региональном и глобальном уровнях реконструированы летняя и среднегодовая температуры воздуха двух высокоширотных районов Сибири и проведен сравнительный анализ погодичных и длительных составляющих.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Дендрохронологический материал собран на северном пределе произрастания лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii* Rupr.) в лесотундровой зоне в восточной части Таймыра (70° 40' - 72° 28' с.ш.; 101° 40' - 103° 05' в.д.) и лиственницы Каяндера (*Larix cajanderi* Mayr.) на верхней границе леса в низовьях р. Индигирки (69° 24' с.ш. и 148° 25' в.д.).

Собранный материал в лабораторных условиях подвергнут стандартной камеральной обработке и измерениям [16-18]. Перед процедурой стандартизации все измеренные и перекрестно датированные кривые прироста разделены на два кластера по характеру возрастных изменений (модификация Esper et al., 2002) - линейный и нелинейный [19].

Полученные после осреднения возрастные кривые (линейная и экспоненциальная) использованы для стандартизации (индексирования) индивидуальных серий годичных колец отдельно для каждого района. Общее число образцов, отобранных с линейной зависимостью для Индигирки, составило 56, для Таймыра - 73, с нелинейной - 57 и 70 соответственно. Затем все индексированные кривые отдельно для каждого района объединили в длительные хронологии. Равное количество линейных и нелинейных зависимостей обусловлено, по всей видимости, большим вкладом в изменчивость абсолютного прироста внешнего фактора, чем фактора возраста. Все расчеты выполнены в стандартном дендрохронологическом пакете программ DENDRO и в статистическом пакете программ *Statistica* for Windows.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате усреднения индивидуальных серий прироста для каждого календарного года по востоку Таймыра получена обобщенная длительная хронология протяженностью 2431 год (от 431 г. до н.э. по 1999 г. н.э.). Данная хронология включает 105 образцов отмершей древесины (до 840 лет) и 38 образцов, взятых с живых деревьев, достигающих 592 лет. Средний возраст деревьев, включенных в хронологию, составляет 254 года. Для района низовьев р. Индигирки при помощи 113 перекрестно датированных образцов получена древесно-кольцевая хронология длительностью 2358 лет (с 359 г. до н.э. по 1998 г. н.э.). Данная хронология включает образцы, взятые с 23 живых (достигающих 883 лет) и с 90 отмерших стволов деревьев (достигающих 1104-летнего возрастного рубежа).

Две длительные древесно-кольцевые хронологии получены для районов с пессимальными условиями произрастания, где все процессы жизнедеятельности лимитируются термическим режимом [8, 10, 11]. Следовательно, данные хронологии могут быть рассмотрены как аналоги длительных климатических изменений. Для оценки тесноты связи между приростом годичных колец деревьев (Таймыр, Индигирка) и климатическими параметрами использовали ежемесячные дан-

ные метеорологических наблюдений ближайшей метеорологической станции "Хатанга" Диксонского ГМУ и метеорологической станции "Чокурдах" Тиксинского ГМУ. Доступными для работы были инструментальные суточные наблюдения за температурой воздуха для Индигирки с 1945 по 1998 г., для Таймыра - с 1933 по 1999 г. Проведенный регрессионный анализ для двух исследуемых районов Сибири показал значимую связь с температурами летних месяцев: для Таймыра - с температурой июня ($R = 0,45$) и июля ($R = 0,41$), $p < 0,02$; для Индигирки - июня ($R = 0,69$) и июля ($R = 0,31$), $p < 0,02$ соответственно.

Так как статистически значимыми и определяющими для двух длительных древесно-кольцевых хронологий оказываются только два летних месяца - июнь-июль, то реконструкция проведена по средней июнь-июльской температуре воздуха. Для реконструкции климатического сигнала в прошлых изменениях прироста деревьев рассчитаны регрессионные модели реконструкции, калиброванные и верифицированные по данным за период инструментальных наблюдений за климатом для Индигирки и Таймыра (табл. 1).

Для выявления экстремально теплых и холодных столетий и сопоставления этих данных между собой два длительных реконструированных ряда разбиты по столетиям. В табл. 2 для различных столетий приведены данные средних значений температуры воз-

духа июня-июля и оценки среднеквадратического отклонения отдельно для каждого столетия. Из табличных данных видно, что наиболее теплые периоды для района северо-востока Якутии наблюдаются со II по IV в. н.э. Теплые периоды также приходятся на XI, XII вв. - периоды средневекового потепления. Средние значения июнь-июльской температуры воздуха средневекового и текущего потеплений различаются на 1,6 °С. Холодные летние периоды по реконструированным данным проявляются в XV в., но наиболее холодными периодами оказываются XVII, XVIII и начало XIX в., когда средняя июнь-июльская температура воздуха составляла 7,3 °С. Эти периоды имеют самые низкие значения июнь-июльской температуры воздуха за последние 2000 лет и классифицируются как малый ледниковый период [20].

Разбив 2000-летнюю реконструированную шкалу на два временных отрезка с 1-1000 и 1001 по 1998 г., выявили, что в первое тысячелетие средняя температура воздуха июня-июля составляла 9,2 °С, а во второе - 8,2 °С. Вероятно, во втором тысячелетии наряду со средневековым потеплением зафиксирован малый ледниковый период, в то время как в первом тысячелетии не отмечалось резких похолоданий.

XX в., или так называемый индустриальный период, по данным полученной реконструкции оказывается теплее XIX на 0,6 °С. Однако текущее потепление не столь

Т а б л и ц а 1

Статистические характеристики регрессионных моделей реконструкции для температуры воздуха июня-июля по инструментальным и расчетным данным для востока Таймыра и северо-востока Якутии

Хронология	Калибровка				Верификация			
	Период, годы	R	R^2	F -критерий	DW-статистика	Период, годы	R	K_c
Таймыр	1945-1998	0,56	0,31	24,0 _{1,52} $p < 0,001$;	1,6			
Индигирка		0,60	0,36	25,56 _{1,46} $p < 0,001$	1,6			
Таймыр	1945-1971	0,56	0,31	11,38 _{1,25} $p < 0,001$;	1,7	1971-1998	0,60	63
Индигирка		0,46	0,21	6,82 _{1,25} $p < 0,001$	1,3		0,36	78
Таймыр	1971-1998	0,60	0,36	15,01 _{1,26} $p < 0,001$;	1,6	1945-1971	0,57	69
Индигирка		0,70	0,49	19,6 _{1,20} $p < 0,001$	1,5		0,46	57
							$p < 0,001$	

Изменение температуры воздуха июня-июля за 2000 лет для двух Субарктических районов Сибири

Столетия, н.э.	Таймыр		Индиگیرка	
	Температура воздуха июня-июля, °С	Среднеквадратическое отклонение	Температура воздуха июня-июля, °С	Среднеквадратическое отклонение
I	8,54	1,03	9,57	1,76
II	8,47	0,94	10,32	1,91
III	9,10	1,24	10,00	1,70
IV	9,17	1,01	9,30	1,78
V	8,75	1,02	8,92	1,49
VI	8,56	1,41	9,34	1,96
VII	8,41	0,97	8,94	1,51
VIII	8,47	1,07	8,75	1,46
IX	8,98	1,22	8,44	1,20
X	8,84	1,48	8,37	1,39
XI	8,63	1,06	9,57	1,96
XII	8,67	1,07	9,25	1,47
XIII	8,53	1,15	8,30	1,73
XIV	8,76	1,32	8,25	1,54
XV	8,71	0,94	7,83	1,33
XVI	8,12	0,86	8,01	1,44
XVII	8,10	0,86	7,95	1,46
XVIII	8,50	0,91	7,47	1,10
XIX	8,40	1,02	7,29	1,01
XX	8,90	1,09	7,93	1,04

значимо по сравнению с XIX в., средневековым потеплением и потеплением, происходившим во II в. н.э.

Количественная характеристика аномальных изменений раннелетней температуры воздуха прошлых столетий, реконструированных по данным годовых колец деревьев, произрастающих на востоке Таймыра, для последних 2000 лет голоцена показала, что экстремально холодные периоды в основном зафиксированы в XVI-XIX вв. н.э. Экстремально теплые периоды отмечены в III, IV, IX-X и на рубеже XIV-XV вв. н.э. Амплитуда раннелетней температуры в эти столетия сопоставима, а иногда превышает современную. По сравнению с температурой XX в. средняя температура в III и IV вв. была выше на 0,3 °С. В XX в. по сравнению с XIX температура повысилась на 0,5 °С. Наиболее близким аналогом текущего потепления является средневековое. Выявлено, что среднелетняя температура для всего периода не превышает 8,6 °С при среднеквадратическом отклонении 1,1. Наблюдается очень высокая межгодовая изменчивость в колебаниях летних температур (от 6 до 13 °С). По-

тепление в III и IV вв. н.э. было выше современного на 0,2 °С, а по сравнению с малым ледниковым периодом - на 0,8 °С.

За период с 1 по 1000 г. н.э. раннелетняя температура воздуха на востоке Таймыра составила 8,7 °С, а с 1001 по 1999 она изменилась на 0,2 °С и составила 8,5 °С. Полученные результаты свидетельствуют о том, что современное потепление по амплитуде не выходит за пределы прошлых изменений температуры, а по сравнению с III-IV вв. н.э. даже ниже на 0,5°.

В отклике деревьев, произрастающих на Таймыре и северо-востоке Якутии, потепление в III, IV вв. носит повсеместный характер. Средневековое потепление на Таймыре по реконструированным кривым зафиксировано в IX-X вв. н.э., а на Индиگیرке этот период отмечен с некоторым запаздыванием в XI-XII вв. н.э. Отмечается синхронность похолоданий в XVIII в. (малый ледниковый период) для обеих территорий.

Следует отметить, что по реконструированному данным июнь-июльская температура на Таймыре за весь исследуемый период была несколько выше, чем на Индиگیرке. Этот факт

подтверждает и некоторые различия в начале и конце сезона роста. Некоторые столетия вполне различимы по температуре. Например, для экстремально холодных периодов максимальное среднее значение температуры для Таймыра (XVII в. н.э.) составляло $+8,1$ °С, для Индигирки (начало XIX в. н.э.) - $+7,3$ °С.

Анализ погодичных (высокочастотных) изменений радиального прироста деревьев, произрастающих на северо-востоке Якутии и востоке Таймыра, позволил также выявить частоты холодных и теплых лет, определенных граничным условием $\pm 1\sigma$ (рис. 1, а, б). При таком критерии для Индигирки весьма теплой считалась температура с $10,4$ °С и выше, холодной - с $6,9$ °С и ниже, для Таймыра теплой - с $9,7$ °С и выше, экстремально холодной соответственно с $7,5$ °С и ниже. Для северо-востока Якутии за 1998-летний период выявлен 301 теплый год (см. рис. 1, а). Максимальное значение температуры зафиксировано в 167 году ($14,8$ °С или более 3σ). Наибольшее количество теплых лет приходится на период I-III вв. Устойчивое потепление отмечается в V, VII, VIII вв., в начале IX в. Высокая частота теплых лет приходится на начало VI в., за исключением четко выраженного похолодания, происходящего на 536 год и ряд последующих лет. Большое число теплых лет приходится на период с конца IX до начала XIII в. Особенно отличается кратковременное потепление в середине XX в. Из графика видно, что потепление в XX в. не превышает таковое в XII и тем более во II в. На нижнем графике (см. рис. 1, а) показана частота холодных лет. Всего за 1998 лет в данной хронологии зафиксировано 316 холодных лет. Наибольшее их количество на протяжении всей почти 2000-летней шкалы зафиксировано в малый ледниковый период (конец XVI - начало XIX в.) и немного меньше в XIII, XV вв. До XIII в. распределение холодных лет на временной шкале практически равномерно, за исключением резкого минимума, происходящего на VI в. Такого минимального значения температуры со среднеквадратическим отклонением $\sigma = -2,6$ больше не наблюдалось на протяжении всего исследуемого периода.

Таким же образом рассмотрим погодичные изменения, зафиксированные в Таймырской древесно-кольцевой хронологии за последние 1999 лет (см. рис. 1, б). Выявлено, что максимальное значение июнь-июльской температуры воздуха (до $13,3$ °С) приходилось на III в., а именно на 282 год. По сравнению с Индигиркой на Таймыр за 2000-летний период приходится несколько больше теплых лет - 322. Равномерное распределение теплых лет приходится на период средневекового потепления IX-XIII вв. и часть XV в. На Индигирке отмечается длительная волна потепления с I почти по VI в. (см. рис. 1, а), на Таймыре частота теплых лет в этот период также высока (см. рис. 1, б).

Однако начало и середина VI в. в Таймырской хронологии характеризуются повышенной частотой холодных лет, и только к концу VI в. наблюдается значительное потепление (см. рис. 1, б). В середине 90-х гг. XX в. наблюдается экстремально теплый период на Таймыре. На Индигирке современное потепление достигает максимума в середине 1900-х гг., с экстремально теплым летом 1940 г. с температурой $11,5$ °С. Наиболее теплым годом в современном потеплении для Таймыра, по реконструированным данным, оказался 1941. В этот год среднелетняя температура была $12,2$ °С. Холодных лет на Таймыре со значением $\geq 1\sigma$ зафиксировано 337. На нижнем графике (см. рис. 1, б) показано распределение холодных лет. Наибольшее количество холодных лет, как и для хронологии по Индигирке, приходится на малый ледниковый период. Экстремально холодными являются периоды конца V и VI в. Остальные холодные периоды равномерно распределены по всей календарной шкале.

Рассмотрим синхронность экстремально теплых и холодных лет для двух Субарктических районов Сибири. За исследуемый период совпало 52 теплых года, для которых июнь-июльская температура воздуха для Таймыра варьировала от 12 до $9,7$ °С, для Индигирки - от 14 до 10 °С. Среди теплых лет различие в температуре на северо-востоке Якутии и востоке Таймыра составляет $1,5$ °С.

Совпадающих для обоих районов холодных лет за исследуемый период было 66, когда июнь-июльская температура воздуха

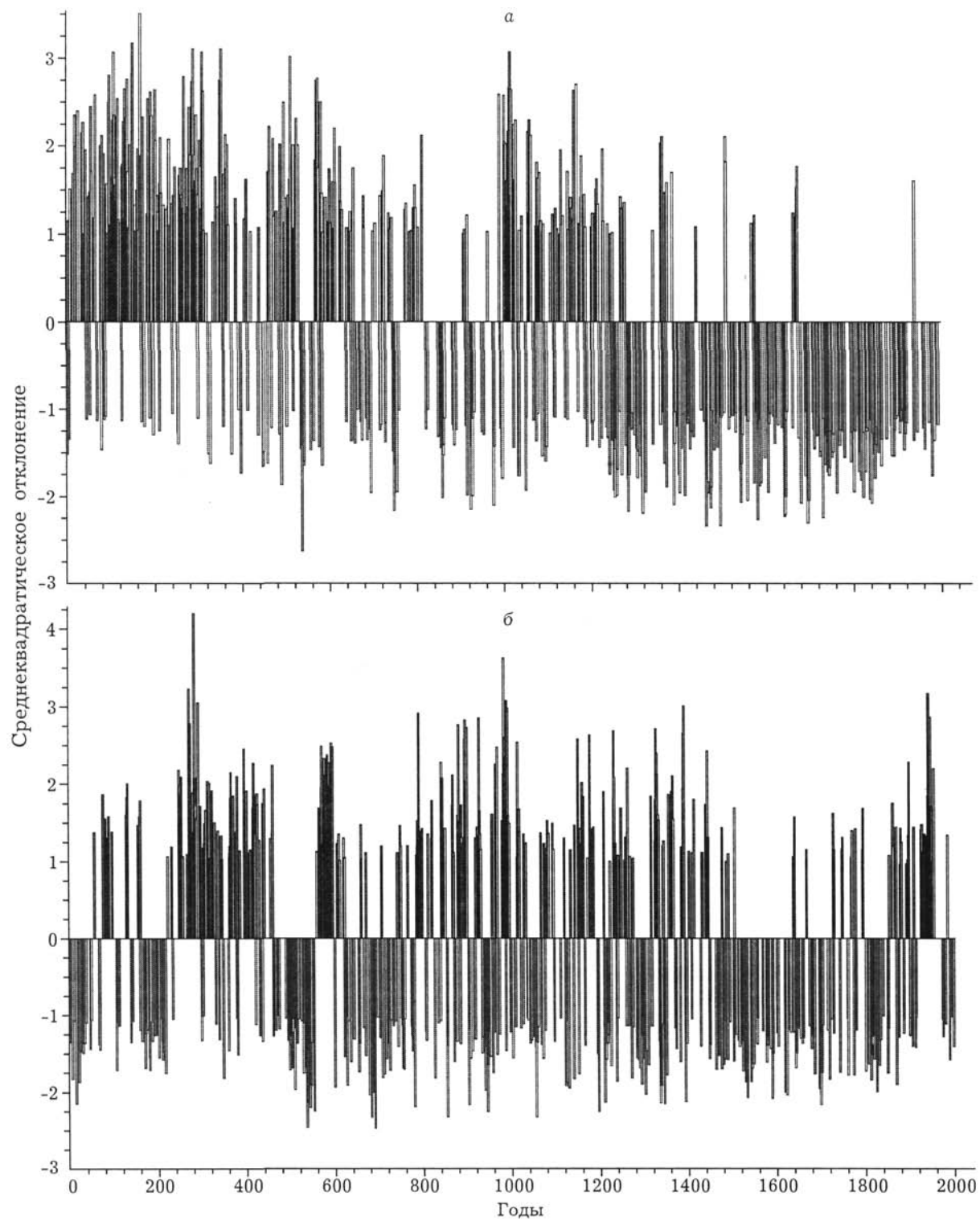


Рис. 1. Теплые и холодные годы, зафиксированные в длительных древесно-кольцевых хронологиях: а - по Индигирке, б - по Таймыру.

для Таймыра варьировала от 7,5 до 5,9 °С, для Индигирки - от 6,9 до 4,1 °С. При сопоставлении полученных данных оказалось, что для обеих хронологий экстремально холодными были 536 г. и ряд последующих лет. Средние значения температуры воздуха июня-июля в этот год оказались самыми низкими за исследуемый период (для Таймыра +5,9 °С, а для Индигирки +4,1 °С).

В целом, в процентном отношении совпадающие для двух удаленных районов Субарктики Сибири теплые годы составляют 16,7 % от общего числа теплых лет, а совпадающие холодные - 20,2 % от общего числа холодных лет. Эти величины весьма близки к таковым, полученным Вагановым с соавторами [8] для всего севера Субарктики Сибири по картам аномалий летних температур для последних 400 лет. Из их оценки - 38 % лет с положительными и отрицательными аномалиями, наши оценки - 36,9 %. Отсюда следует, что частота совпадающих лет с положительными и отрицательными аномалиями температуры на севере Сибири сохраняется приблизительно постоянной на про-

тяжении последних двух тысячелетии голоцена. Основным отличием наших данных является то, что доли лет с положительными и отрицательными аномалиями близки (16,7 и 20,2 %), тогда как данные вышеупомянутых авторов показывают значительное преобладание лет с положительными аномалиями температуры. Учитывая, что в их анализе большинство лет с положительными аномалиями температуры приходится на конец XVIII и XX в., можно отметить, что этот период в среднем более теплый, чем весь 2000-летний анализируемый период.

Дополнительно проведенный статистический анализ между погодичными (высокочастотными) и длительными (низкочастотными) реконструированными кривыми позволил выявить, что наиболее значимой оказывается статистическая связь не в высоко-, а в низкочастотных колебаниях как за весь период, так и для отдельных 100-летних календарных интервалов (табл. 3). При этом с начала XIX в. (конец малого ледникового периода и начало индустриального периода) связь в длительных изменениях температуры на Таймыре и

Т а б л и ц а 3

Корреляционная связь низко- и высокочастотных компонент хронологий

Столетия, н.э.	Коэффициент корреляции между колебаниями	
	низкочастотными	высокочастотными
1-100	0,04	0,04
101-200	0,54*	0,00
201-300	0,24*	-0,02
301-400	-0,23*	-0,03
401-500	-0,76*	0,01
501-600	0,46*	0,06
601-700	0,69*	-0,08
701-800	0,10	0,08
801-900	-0,11	0,12
901-1000	0,11	0,06
1001-1100	0,40*	0,07
1101-1200	0,18	0,01
1201-1300	0,28*	0,04
1301-1400	0,17	-0,11
1401-1500	0,50*	-0,11
1501-1600	0,02	0,10
1601-1700	0,41*	0,07
1701-1800	0,16	0,03
1801-1900	0,71*	0,10
1901-1998	0,82*	-0,16
1-1998	0,25*	0,02

*Уровень значимости ($p < 0,05$).

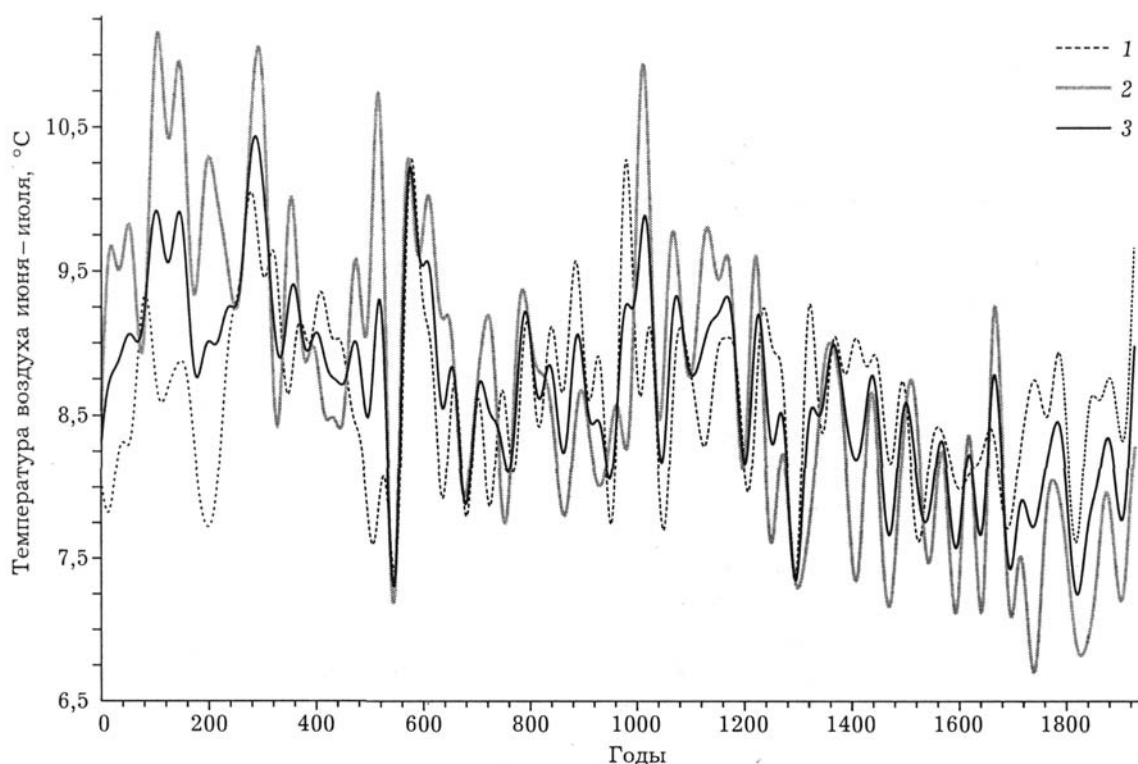


Рис. 2. Реконструкция температуры воздуха июня-июля для Таймыра (1), Индигирки (2) и средняя по Таймыру и Индигирке (3).

Индигирке наибольшая ($R = 0,71, 0,82$ соответственно).

С целью выявления длительных (от декадных до столетних) изменений прироста реконструированные кривые, полученные по востоку Таймыра и северо-востоку Якутии, были сглажены 50-летним фильтром низких частот (рис. 2). Из рисунка видно, что для хронологии по Индигирке амплитуда изменчивости температуры воздуха июня-июля в первые шесть столетий несколько выше по сравнению с хронологией по Таймыру. До периода средневекового потепления данные хронологии близки по амплитуде, что свидетельствует об общих климатических условиях в этот период. Для Индигирки в период средневекового потепления температура оказалась значительно выше по амплитуде по сравнению с Таймырской хронологией. В малый ледниковый период и в период современного потепления по данным длительных колебаний ход кривых практически не различается, что также свидетельствует об общности изменений климатических условий в эти периоды.

Проведенный регрессионный анализ между погодичными значениями и инструменталь-

ными данными среднегодовой температуры воздуха для периода 1944-1989 гг. для двух исследуемых районов не выявил значимых статистических связей. Однако сглаженные значения индексов прироста двух древесно-кольцевых хронологий позволяют выявить такую значимую связь. Так, по востоку Таймыра получены следующие статистические характеристики: для всего инструментального периода 1944-1989 гг. - $R = 0,50; R^2 = 0,25; F_{1,42} = 14$; для периода 1944-1968 гг. - $R = 0,84; R^2 = 0,71; F_{1,21} = 51$; для 1968-1989 гг. - $R = 0,46; R^2 = 0,21; F_{1,20} = 5,3$. По северо-востоку Якутии: 1944-1989 гг. - $R = 0,57; R^2 = 0,33; F_{1,42} = 20,4$; для периода 1944-1968 гг. статистические характеристики оказались самыми высокими - $R = 0,64; R^2 = 0,41; F_{1,21} = 14,9$, а для периода с 1968-1989 гг. - $R = 0,49; R^2 = 0,24; F_{1,20} = 6,4$. Эти результаты позволили получить добротные регрессионные уравнения реконструкции среднегодовой температуры воздуха по древесно-кольцевым хронологиям за весь 2000-летний период для двух районов исследования.

По реконструированным данным среднегодовой температуры воздуха для востока

Таймыра можно отметить, что на протяжении двух тысяч лет среднегодовая температура не имела резких скачков. Амплитуда среднегодовой температуры воздуха была в пределах 0,5 °С. Более теплыми по данным среднегодовой температуры воздуха были III, IV, IX, XX вв. н.э. Многолетняя средняя за 2000-летний период составила -13,3 °С, пределы изменчивости от -14 до -12 °С (около 2 °С). По сравнению с XIX в. увеличение среднегодовой температуры воздуха на Таймыре произошло на 0,3 °С.

На северо-востоке Якутии среднегодовая температура воздуха увеличилась на 0,4 °С по сравнению с XIX в. Амплитуда среднегодовой температуры за 2000 лет составила 1,9 °С. Среднее значение среднегодовой температуры воздуха за 2000-летний период составило - 13,1 °С, что на 0,2 °С выше по сравнению с реконструированной среднегодовой температурой по Таймыру.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный в работе корреляционный анализ, равно как и результаты имитационного моделирования [21], доказывают ведущее значение летней (июнь-июльской) температуры в погодичной изменчивости прироста деревьев на севере Евразии. Эти изменения в разных секторах Субарктики в большем числе лет разнонаправлены. Однако уже декадные и особенно более долгопериодные колебания прироста значительно синхронизированы в разных секторах и показывают устойчивые значимые связи с изменениями среднегодовой температуры. Если учесть, что корреляция между летней и среднегодовой температурой не превышает для данных районов 0,35, то для объяснения синхронности длительных изменений прироста необходимо найти соответствующие механизмы. По нашим данным, изменчивость летней температуры объясняет до 65-70 % от общей изменчивости прироста. Это приблизительно соответствует доли изменчивости, приходящейся на высокочастотные (1-4 года) колебания прироста. Длительные изменения, в основном связанные с изменениями среднегодовой температуры, могут синхронизироваться разными механизмами. Один из меха-

низмов может реализоваться через взаимодействие длительных изменений температуры с вечномерзлотной зоной. Известно, что колебания температуры на поверхности криолитозоны распространяются вглубь и глубина распространения тем больше, чем длиннее период колебаний температуры [22]. Например, колебания температуры с периодом в 10 лет затухают на глубине 40-47 м, а с периодом в 100 лет - на глубине уже 125-145 м. То есть изменение температуры в верхней части криолитозоны оказывает влияние на процессы промерзания-оттаивания в течение нескольких лет, тем самым активно воздействуя на процессы роста древесных растений (ускоряя или замедляя рост корневой системы, процессы фотосинтеза и др.).

Полученные результаты показывают, что анализ сверхдлительных древесно-кольцевых хронологий открывает новые возможности в исследовании длительных изменений климата. Например, приведенные в монографии [23], а затем в пространственных реконструкциях температуры Северного полушария [24] сведения ставят под сомнение глобальное проявление средневекового потепления в климате планеты. Однако анализ обобщенной древесно-кольцевой хронологии для севера Евразии не оставляет сомнений, что такой теплый период (с температурой на 1 - 1,3 °С выше современной) существовал и именно в том секторе Субарктики, для которого имеются подтверждающие это потепление исторические сведения. Проведенный анализ длительных изменений климатических условий показал, что на протяжении двух тысяч лет в древесно-кольцевых хронологиях четко прослеживаются колебания глобального климата (средневековое потепление, малый ледниковый период, современное потепление). Для двух длительных древесно-кольцевых хронологий выявлены син- и асинхронность экстремально теплых и холодных лет, а также столетий. Для Таймыра период средневекового потепления зафиксирован в IX-X вв. н.э., а для Индигирки - в XI-XII вв. н.э. Экстремально холодные столетия сопряжены с малым ледниковым периодом и находят синхронный отклик для двух хронологий. Вся климатическая информация, зафиксированная в погодичных изменениях, сохраняется и в длительных.

Исследования поддержаны проектом РФФИ 99-05-64182 "Научная школа" и проектом РФФИ 02-04-49423.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. И. Будыко, Ю. А. Израэль, Антропогенные изменения климата, Л., Гидрометеиздат, 1987, 406.
2. P. M., Kelly, P. D. Jones, S. B. Sear et al., *Mon. Weather Rev*, 1982, 110, 71-83.
3. В. Н. Кудеяров, *Природа*, 1994, 7, 37-43.
4. В. В. Алексеев, С. В. Киселева, Н. И. Чернова, Там же, 1999, 9, 3-13.
5. K. R. Briffa, P. D. Jones, F. H. Schweingruber et al., *Nature*, 1998, 391, 672-682.
6. М. М. Наурзбаев, Е. А. Ваганов, *J. of Geophysical Research*, 2000, **105**: 6, 7317-7327.
7. М. М. Наурзбаев, О. В. Сидорова, Е. А. Ваганов, *Археология, этнография и антропология Евразии*, 2001, **3**: 7, 17-25.
8. Е. А. Ваганов, С. Г. Шиятов, В. С. Мазепа, Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской Субарктике, Новосибирск, Наука, Сиб. отд-ние, 1996, 324.
9. Е. А. Ваганов, С. Г. Шиятов, *Сиб. экол. журн.*, 1999, **6**: 2, 111-115.
10. С. Г. Шиятов, Дендрохронология верхней границы леса на Урале, М., Наука, 1986, 136.
11. О. В. Сидорова, М. М. Наурзбаев, *Лесоведение*, 2002, **2**, 73-75.
12. Е. А. Ваганов, М. М. Наурзбаев, М. К. Хьюс, *Природа*, 2000, 12, 54-57.
13. Р. М. Хантемиров, *Сиб. экол. журн*, 1999, 2, 185-191.
14. М. М. Наурзбаев, Е. А. Ваганов, *Лесоведение*, 1999, **5**, 24-34.
15. M. K. Hughes, E. A. Vaganov, S. G. Shiyatov et al., *Holocene*, 1999, **9**: 5, 603-608.
16. Е. М. Фильрозе, Г. М. Гладушко, Дендрохронология и дендроклиматология, Новосибирск, Наука, Сиб. отд-ние, 1986, 68-71.
17. R. L. Holmes, *Tree-ring Bulletin*, 1983; **44**, 69-75.
18. F. Rinn, Tsap V 3.6 Reference Manual: Computer Program for Tree-Ring Analysis and Presentation. Bierhelder weg 20, D-69126, Heidelberg, Germany, 1996, 263.
19. J. Esper, E. R. Cook, F. H. Schweingruber, *Science*, 2002, **295**, 2250-2253.
20. H. H. Lamb, *Climate: Present, Past and Future. Vol. 2. Climate History and Future*, London, Methuen, 1977, 603.
21. Е. А. Ваганов, А. В. Шашкин, Рост и структура годичных колец хвойных, Новосибирск, Наука, Сиб. отд-ние, 2000, 214.
22. Общее мерзлотоведение, Новосибирск, 1974, 291.
23. M. K. Hughes, H. F. Diaz, *Climatic Change*, 1994, **26**, 109-142.
24. M. E. Mann, R. S. Bradley, M. K. Hughes, *Nature*, 1998, **392**: 23, 779-787.

Reconstruction of the Air Temperature for the Last 2000 Years by the Data of Annual Rings of the East Taimyr and North Yakutia Larch

O. V. SIDOROVA, M. M. NAURZBAIEV

Reconstruction of the summer (June-July) and mean annual air temperature for the last 2000 years for two subarctic regions of Siberia - north-east Yakutia and the eastern part of the Taimyr peninsula - has been carried out. According to the reconstruction data, synchronous and asynchronous extreme warming and cooling-off periods within the period studied were found. The performed analysis of long-term measurements of climatic conditions has demonstrated that during 2000 years, there have been clear-cut climatic variations in the annual ring chronology of global character (middle age accumulation, short glacial period, modern warming). It has been shown that in the East Taimyr and North-East Yakutia the summer air temperature in the XX century, as compared to XIX century, increased on the average by 0.5-0.6 °C, and the average annual temperature by 0.3-0.4 °C. The obtained reconstructed data for the last 2000 years witness to the fact that the middle age climate warming is the nearest analog of the modern one in the north hemisphere. It is demonstrated that the high-frequency oscillations of the temperature in Taimyr and Indighirka are asynchronous, while the low-frequency oscillations are highly synchronous. This means that the climatic signal common for North Asia is manifested in the region of long-term changes of average annual temperature.