

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ  
ИНСТИТУТ АРХЕОЛОГИИ И ЭТНОГРАФИИ

**ПРОБЛЕМЫ РЕКОНСТРУКЦИИ КЛИМАТА  
И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ ГОЛОЦЕНА И ПЛЕЙСТОЦЕНА СИБИРИ**

*Редколлегия*

академик РАН **Е.А. Ваганов**, чл.-корр. РАН **М.А. Грачев**,  
академик РАН **А.П. Деревянко**, канд. геол.-минерал. наук **В.С. Зыкин**

Ответственный за издание д-р ист. наук **С.В. Маркин**

Издательство Института археологии и этнографии  
Новосибирск, 1998

Е.А. Ваганов<sup>1</sup>, С.Г. Шиятов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Красноярск

<sup>2</sup>Институт экологии растений и животных УрО РАН, Екатеринбург

## ДЕНДРОХРОНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ИЗУЧЕНИИ ИСТОРИИ КЛИМАТА СИБИРИ

### Введение

Несколько важных особенностей территории Сибири определяют повышенный интерес к ней как объекту дендрохронологических и дендроклиматических исследований. Во-первых, наличие наиболее крупного массива бореальных лесов планеты с большой пространственно-временной изменчивостью климатических условий. Во-вторых, наличие старовозрастных деревьев практически во всех районах, а для ряда районов - возможность существенно удли-

нить древесно-кольцевые хронологии, используя древесину отмерших деревьев и полуископаемую древесину. В-третьих, именно в высокоширотных и континентальных районах Сибири ожидается наиболее сильное изменение климата вследствие увеличения тепличных газов в атмосфере. Наконец, лесные экосистемы в Сибири в меньшей степени подвержены антропогенному влиянию, поэтому здесь в первую очередь возможно зафиксировать и оценить реакцию их на ожидаемые региональные и глобальные изменения климата.

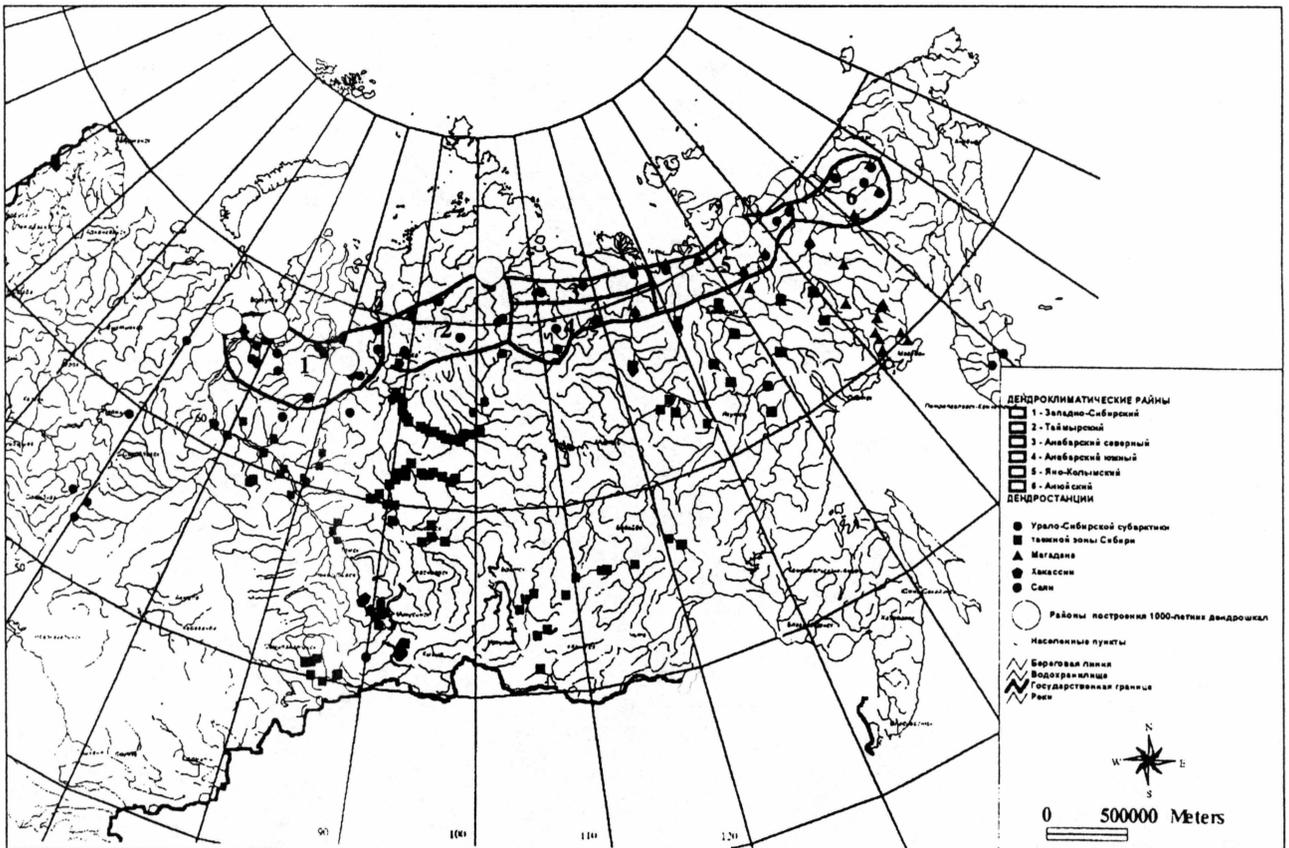


Рис. 1. Карта основных станций дендроклиматического мониторинга лесов Сибири.

Кроме того, исследования истории климата Сибири является важной частью международного проекта PAGES, в рамках которого выделены три глобальных трансекта. Районы Сибири включаются в Азиатско-Австралийский трансект (PER-II). Реконструкция климатических изменений и истории лесных экосистем является важной задачей работ по другому проекту международной геосферно-биосферной программы - IGBP-NES (Исследования по евроазиатской северной трансекте).

### Создание сети станций для дендроклиматического мониторинга лесов Сибири

Систематические дендроклиматические исследования на территории Урала, Сибири и Дальнего Востока были начаты с конца 1980-х гг. после организации специализированных лабораторий в Екатеринбурге и Красноярске. С 1990 г. в рамках нескольких международных научно-исследовательских проектов, а также проектов, финансируемых РФФИ, развернулись работы по созданию на этой территории сети дендроклиматических станций [Шиятов, Ваганов, 1998]. Каждый год несколько экспедиций продолжает сборы дендрохронологического материала и построения длительных древесно-кольцевых хронологий. Рис. 1 дает представление о формируемой сети станций. Для ряда районов, где были найдены в большом количестве остатки отмерших деревьев хорошей сохранности и полуископаемая древесина из новейших голоценовых и плейстоценовых отложений (торфяных, аллювиальных, озерных), создаются хронологии длительностью в несколько тысячелетий. Так, абсолютная хронология для п-ва Ямал дове-

дена до 1248 г. до н.э., на Таймыре - до 38 г. н.э. Радиоуглеродные даты отдельных образцов собранной древесины позволяют надеяться на построение длительных древесно-кольцевых хронологий, покрывающих период голоцена. Таблица показывает пример распределения радиоуглеродных дат для нескольких образцов отмершей и полуископаемой древесины лиственницы, собранной на востоке Таймыра [Schweingruber, Naurzbaev, Briffa et al., in press].

Перспектива получения древесно-кольцевых хронологий в несколько тысячелетий для субарктических широт Сибири очевидна. Более проблематично получение древесно-кольцевых хронологий большой длительности для более континентальных районов Сибири. По деревьям старых возрастов практически для всех крупных районов Сибири возможно получить хронологии длительностью 400 - 600 лет [Шиятов, 1986; Глызин, 1994; Овчинников, Ваганов, 1998]. Алтай, Саяны и район Байкала - территории, наиболее важные с точки зрения изменений климата в континентальной части Сибири, богаты косвенными источниками информации об изменениях климата. Однако сведений о находках заметного количества сохранившейся отмершей или полуископаемой древесины в этих районах немного. Предстоит организация экспедиций по выявлению таких мест и сбору древесины. Наиболее перспективны озерные и болотные отложения, а также места периодического смещения горных ледников, особенно в тех участках, где лесные массивы или островки леса подходят вплотную к ледникам. Кроме того, достаточно длительные "плавающие" хронологии для отдельных интервалов голоцена, датированные по радиоуглероду,

### Примеры радиоуглеродных дат отмершей и полуископаемой древесины востока Таймыра [Schweingruber, Naurzbaev, Briffa et al., in press]

Лабораторный № образца	Радиоуглеродная дата, лет назад	Дендрохронол. дата, годы н.э.
KTU-004	230+/-65*	1750+/-20
KTU-030	400+/-35*	1500+/-50
KTU-009	665+/-50*	1300+/-50
МАУ-923	910+/-30	1154+/-7
МАУ-920	1100+/-30	-
МАУ-925	2440+/-20	-
NOV-069	2890+/-20	-
СНА-059	3400+/-30	-
МАУ-702	3930+/-30	-
NOV-001	4370+/-40	-
СНА-023	4750+/-30	-
СНА-036	5040+/-30	-
NOV-005	5400+/-30	-

Примечание.\* - датировка сделана в Объединенном институте геологии, геофизики и минералогии СО РАН. Остальные даты получены в Бернском университете, Швейцария.

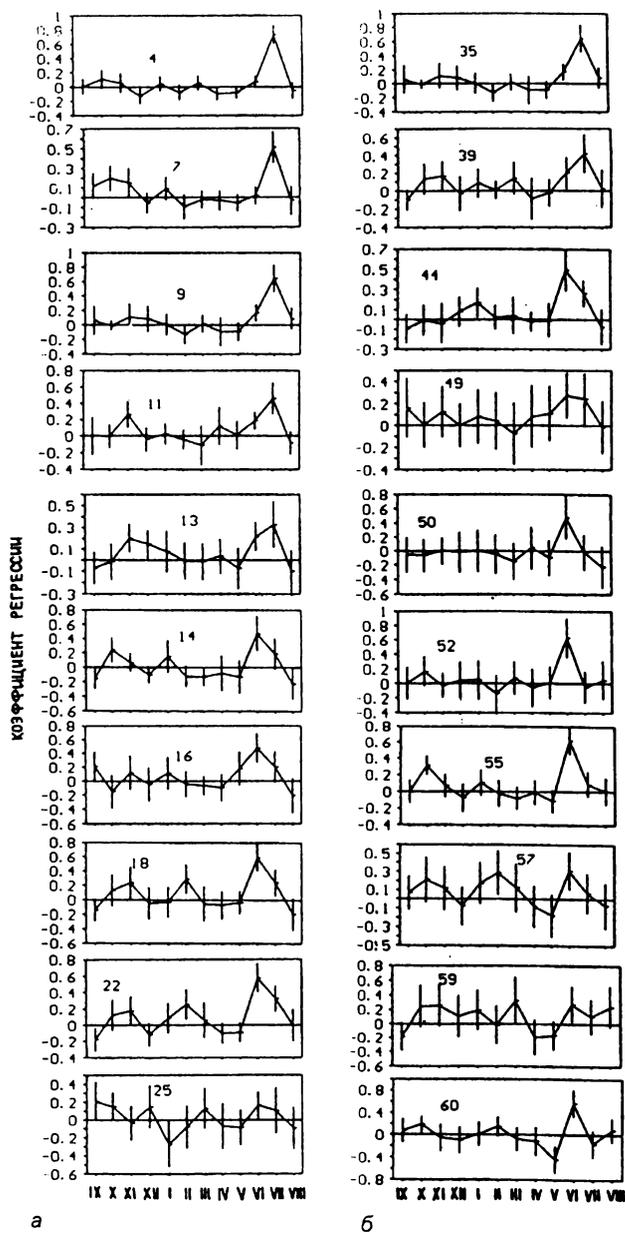


Рис. 2. Климатические функции отклика для обобщенных древесно-кольцевых хронологий по лиственнице субарктического профиля.

а - полярная граница леса; б - более южные.

Цифры на рис. - номера хронологий в соответствии с [Ваганов, Шиятов, Мазепа, 1996].

можно получить, используя древесину из археологических раскопок. Прекрасный пример - хронология по лиственнице сибирской из Саяно-Алтайских курганов длительностью в 634 г. (I тыс. до н.э.) [Marsadolov, 1996].

### Климатический сигнал в древесно-кольцевых хронологиях (анализ и интерпретация климатических функций отклика)

Выявление и анализ влияния климатических изменений на изменчивость прироста деревьев -

в настоящее время достаточно рутинная процедура. Наиболее традиционно она выполняется как расчет корреляции между стандартизированной величиной прироста (индексом ширины годовых колец) и месячными величинами температуры воздуха и количества осадков для всего ряда доступных климатических данных. Поскольку расчет осуществляется для осенне-зимних (сентябрь - декабрь) месяцев предшествующего года и января - августа текущего года, то климатическая функция отклика позволяет установить те месяцы, климатические факторы которых оказывают наиболее существенное влияние на изменчивость роста деревьев. Так, для субарктических районов Сибири таким фактором является температура двух летних месяцев: июня и июля (рис. 2). В условиях средней тайги изменчивость прироста существенно зависит от температуры июня - июля и зимних осадков. В лесостепной зоне основными факторами являются температура апреля - июня и осадки июня - июля.

Лимитирующие рост факторы меняются в зависимости от локальных условий местообитания. Для одного и того же района деревья, растущие на южном склоне, показывают чувствительность к изменениям осадков больше, чем температуры, деревья на северном склоне - наоборот. Особенно резко климатическая реакция деревьев может меняться в горных районах с изменением высоты над уровнем моря [Schweingruber, 1998].

Локальные (обобщенные) древесно-кольцевые хронологии для одного местообитания содержат в изменчивости индексов прироста климатический сигнал локального уровня. Если обобщенные древесно-кольцевые хронологии получены для определенной территории, для однотипных местообитаний (например, с верхней границы леса в горах) и при этом показывают высокую корреляцию между собой, то это свидетельствует о том, что в изменчивости прироста этих хронологий имеется значительный мезоклиматический (региональный) сигнал. В таком случае обобщенные хронологии могут быть объединены в одну генерализованную (региональную) изменчивость индексов прироста, в которой будет отражаться динамика этого мезоклиматического сигнала. Хороший пример - районирование территории северной тайги Средней Сибири по взаимной корреляции обобщенных хронологий и особенностям климатических функций отклика генерализованных хронологий (рис. 3) [Panuyshkina, Vaganov, Shishov, 1996].

Следующий уровень - выявление и анализ в генерализованных хронологиях макроклиматического сигнала. Сеть субарктических дендроклиматических станций на Севере Урала и Сибири позволила провести дендроклиматическое районирование территории, построить карты ано-

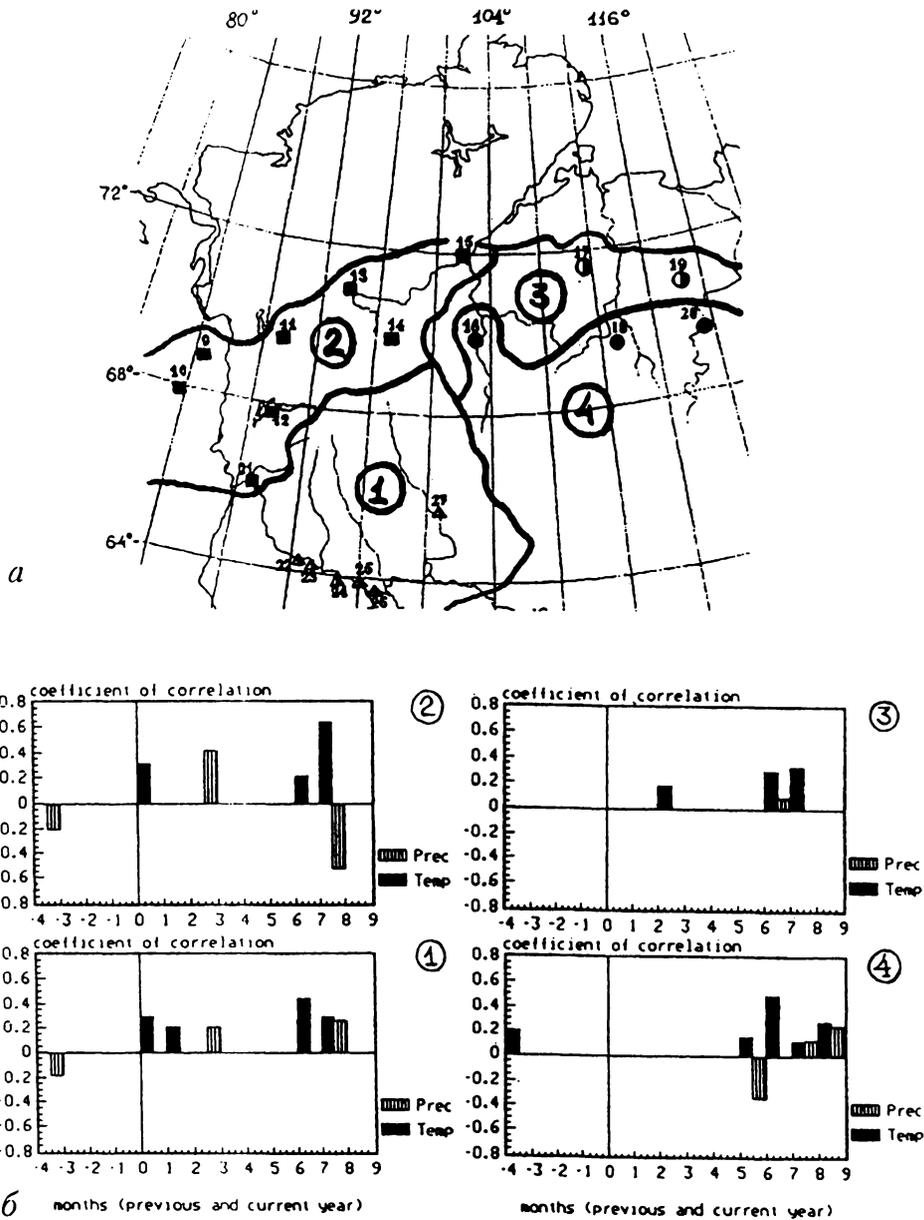


Рис. 3. Пример дендроклиматического районирования севера Средней Сибири по корреляции и синхронности обобщенных хронологий (а) и соответствующие климатические функции отклика для каждой из четырех генерализованных (региональных) хронологий [Vaganov, Panyushkina, Shishov, 1995] (б).

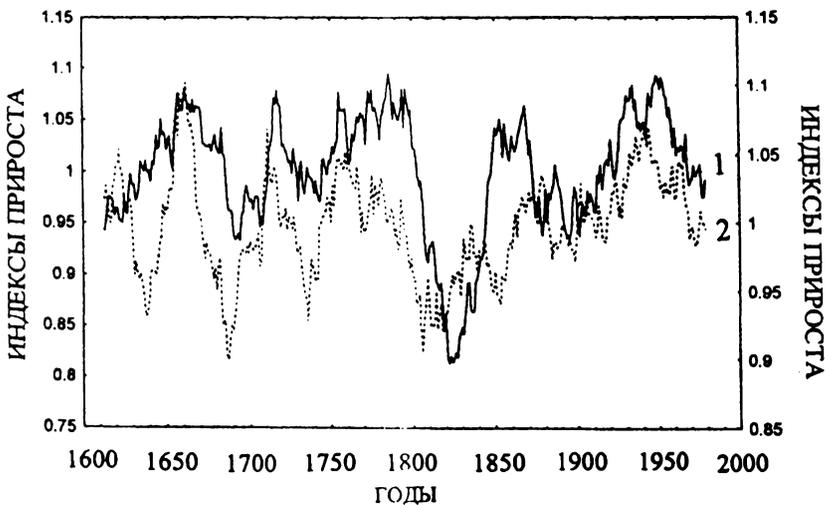


Рис. 4. Сравнение двух генерализованных хронологий по северной границе леса в Сибири. 1 - средняя по обобщенным хронологиям от Урала до Лены; 2 - средняя по обобщенным хронологиям от Лены до Чукотки.

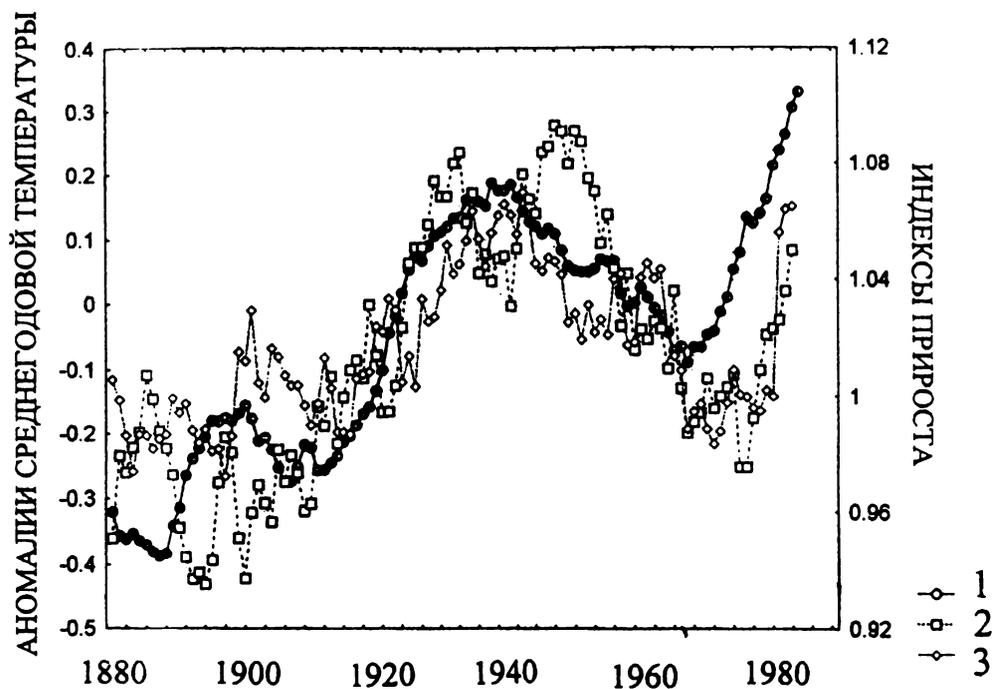


Рис. 5. Длительные изменения среднегодовой температуры (1) [Trends'93..., 1994] и соответствующие фрагменты генерализованных хронологий с полярной границы леса. 1 – температура; 2 – западная часть Сибири; 3 – восточная часть Сибири.

малий летней температуры и оценить соотношение локальных, региональных и глобальных (т.е. общих для всей Субарктики Сибири) составляющих изменений летней температуры [Ваганов, Шиятов, Мазепа, 1996]. Оказалось, что высокочастотные (погодичные) компоненты изменчивости древесно-кольцевых хронологий содержат локальный климатический сигнал, более длительные (внутривековые и сверхвековые) - макроклиматический сигнал, общий для всей субарктической зоны Сибири (рис. 4).

#### Древесно-кольцевые хронологии Сибири как источник информации о глобальных изменениях климата

Полученная по Сибири сеть станций дендроклиматического мониторинга позволяет на всех вышеперечисленных уровнях (локальном, региональном и глобальном) проводить реконструкцию изменений тех климатических переменных, которые оказывают наиболее существенное влияние на изменчивость роста деревьев. Сопоставление за последние 400 лет длительных изменений прироста деревьев в западной, центральной (до Лены) и восточной (до Чукотки) частях Субарктики Сибири по генерализованным древесно-кольцевым хронологиям с полярной границы леса показывает их достаточно хорошее согласие, особенно выделяя глубокую депрессию в росте в начале XIX в. и высокую скорость роста в 30 - 50-х гг. текущего столетия (рис. 4). Эти длитель-

ные изменения в росте деревьев на полярной границе леса хорошо согласуются и с изменениями среднегодовой температуры северного полушария (рис. 5). Это свидетельствует о том, что создание сети станций позволило надежно выделять региональную и глобальную климатические составляющие изменчивости прироста деревьев. Во-вторых, на севере Сибири, севере наибольшего материка планеты, древесная растительность отражает климатические изменения, общие для всего северного полушария. В-третьих, поскольку составляющую потепления климата вследствие человеческой деятельности предпочтительнее выявлять в субарктических районах, то создание сети дендроклиматических станций оградит от ошибки принятия локального сигнала или тренда за общий.

Климатические изменения в континентальной части материка могут отличаться от таковых в субарктических широтах. Поэтому сейчас расширяется сеть станций дендроклиматического мониторинга в горных районах Сибири: Алтае, Саянах, Прибайкалье. Первые генерализованные хронологии с верхней границы леса показывают, что изменчивость прироста деревьев здесь определяется динамикой летней температуры (рис. 6), сами хронологии содержат значительную погодичную и длительную составляющие изменчивости [Овчинников, Ваганов, 1998]. Однако значимое влияние на скорость роста оказывает увлажнение (в первую очередь, весенне-летние осадки). Пространственно-временное распределение осадков гораздо более изменчиво, чем температуры

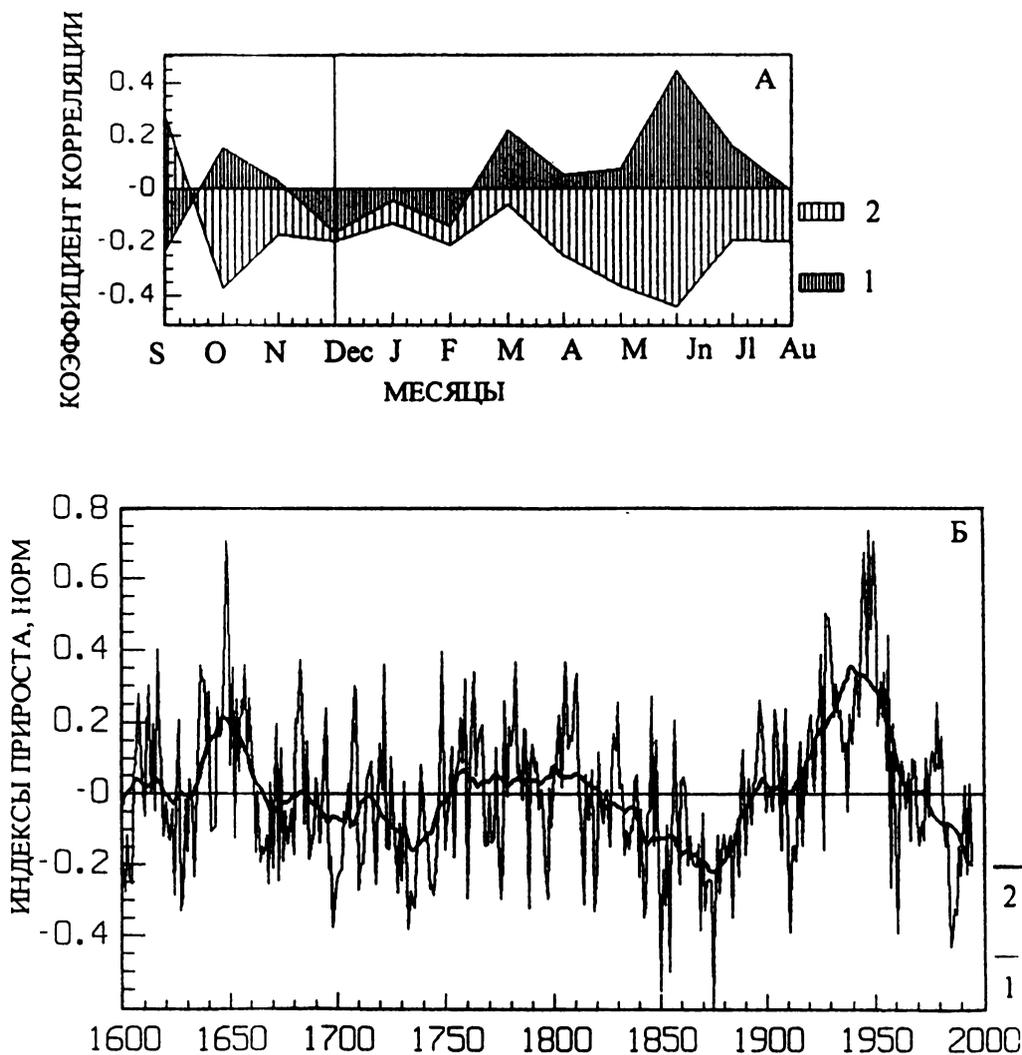


Рис. 6. Климатическая функция отклика (А) и генерализированная древесно-кольцевая хронология (Б) с верхней границы леса на Алтае (средняя по 5-ти обобщенным).  
А: 1- отклик на температуру, 2 - на осадки; Б: 1 - хронология, 2- сглаженная 25-летней скользящей средней.

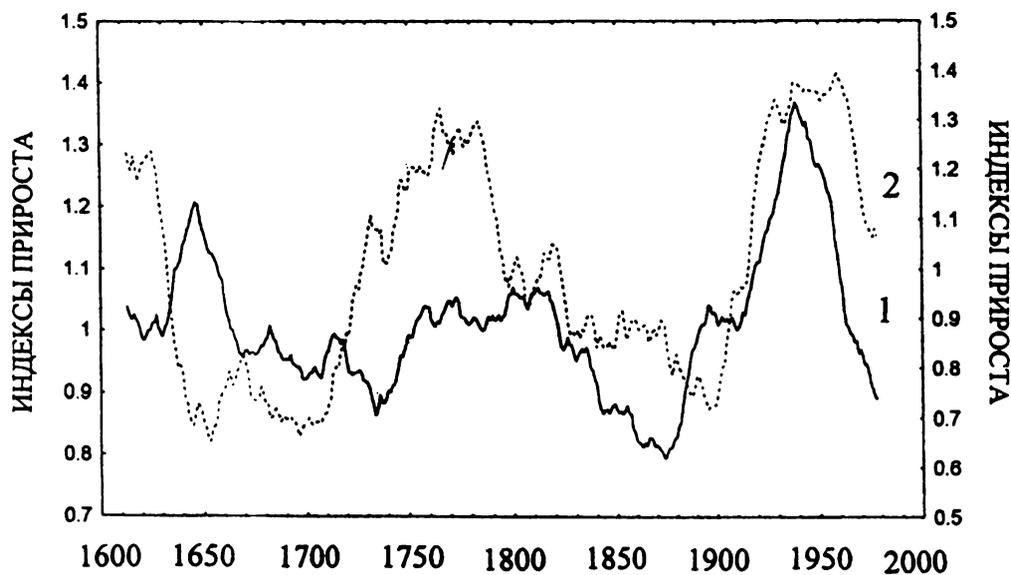


Рис. 7. Сопоставление длительных изменений прироста в верхнем поясе гор на Алтае (1) и Прибайкалье (2) (по данным [Глызин, 1994; Овчинников, Ваганов, 1998]).

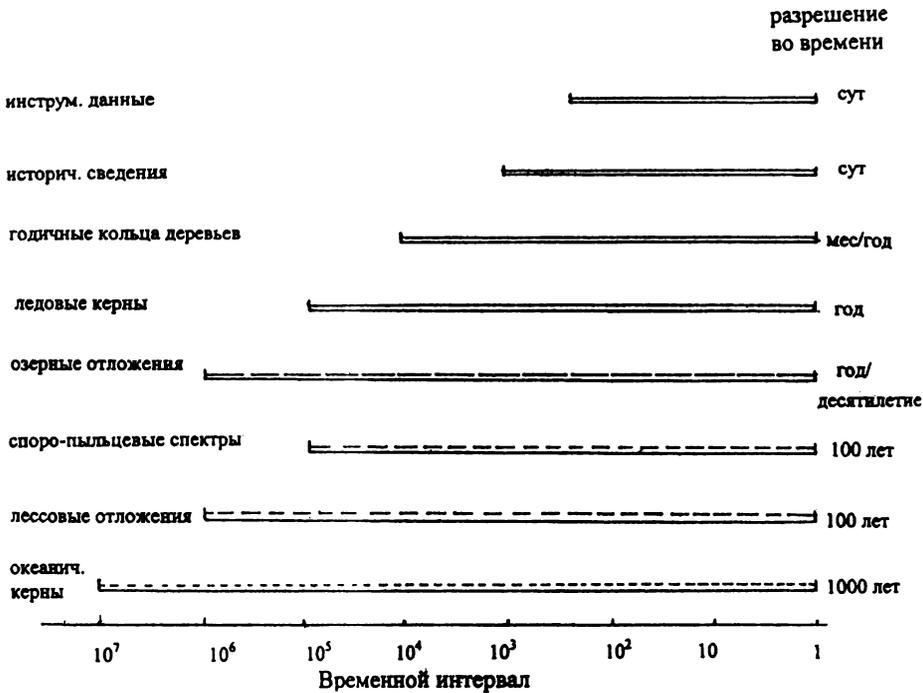


Рис. 8. Временной интервал и разрешение во времени разных косвенных источников изменения климата [Bradley, Eddy, 1989].

даже на региональном уровне, поэтому динамика длительных изменений прироста деревьев из разных горных районов различается существенно (рис. 7). Основная задача на данном этапе - получение надежных реконструкций температуры и осадков на локальном и региональном уровнях с использованием более густой сети станций (в верхнем и среднем поясах гор, в долинах) и данных по структуре годовых колец, которые существенно улучшают качество реконструкций. Получение денсито-метрических данных (по изменению плотности внутри годовых колец) увеличивает число предикторов для реконструкции климатических переменных.

### Древесно-кольцевые хронологии в общей системе косвенных источников изменения климата

Каждый из известных и используемых ныне косвенных источников изменения климата может быть охарактеризован двумя важнейшими параметрами: 1) временным интервалом, на протяжении которого этот источник дает надежную информацию; 2) наилучшим разрешением во времени (рис. 8) [Bradley, Eddy, 1989; Ваганов, Шиятов, Мазепа, 1996]. Условно косвенные источники можно разделить на две группы с высоким и малым разрешением во времени. К первой группе относятся исторические сведения, годовые кольца деревьев, озерные отложения, ледовые керны. Ко второй - спорово-пыльцевые спектры, палеопочвы, лессовые отложения, океанические керны. В изучении истории климата Сибири имеется реальная возможность использовать информацию подавляющего большинства вышеперечисленных

косвенных источников изменения климата. И это дает уникальную возможность осуществить два важных методических подхода:

1. Сопоставление реконструкций изменений температуры или увлажнения для одних и тех же календарных интервалов времени по разным косвенным источникам.

2. Использование косвенных источников с высоким временным разрешением (например, исторические данные или годовые кольца деревьев) как калибровочные кривые для данных, полученных по косвенным источникам с малым временным разрешением.

Хорошим примером реализации первого подхода является сопоставление данных тысячелетних древесно-кольцевых хронологий с данными ледовых кернов. По данным четырех сверхдлительных древесно-кольцевых хронологий, полученных по отмершей и полуископаемой древесине в районах п-ова Ямал, Полярного Урала, низовьях р. Таз и восточной части Таймыра была получена генерализованная хронология, длительные изменения которой (осредненные по двадцатилетиям) сопоставлены с длительными изменениями температуры, восстановленными по данным соотношения изотопов кислорода в ледовых кернах Гренландии (рис. 9) [Ваганов, Шиятов, Хантемиров и др., в печати]. Результаты выявили хорошее соответствие кривых изменения температуры по данным разных косвенных источников, которое подкреплено и анализом основных циклических компонент изменчивости температуры. Так, оба источника четко фиксируют значительные понижения температуры в конце XIII в., в начале XVII в., начале XIX в., равно как и длительные теплые периоды: середина XIII в., середина XV в., вторая

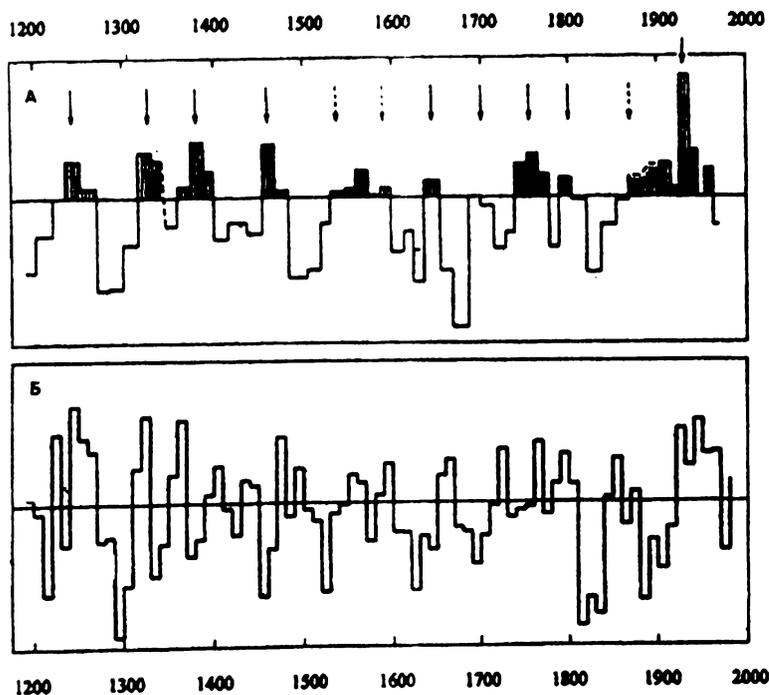


Рис. 9. Сопоставление двух косвенных источников изменения температуры: соотношения изотопов кислорода в ледовых ядрах Гренландии (А) [Dansgaard, Johnsen, Clausen et al., 1973] и изменений прироста деревьев на полярном пределе распространения леса (Б).

половина XVIII в., середина XX в. Обе реконструкции четко показали наличие в изменчивости температуры циклов в 180 и 76 - 78 лет. Кроме того, в древесно-кольцевой хронологии значимыми оказались циклы в 22, 11 и 6,7 лет.

Таким образом, одними из наиболее эффективных методов реконструкции прошлых изменений климата на всех уровнях пространственного разрешения: от локального до глобального, являются дендрохронологические. В мультидисциплинарном проекте по изучению истории климата Сибири дендроклиматические методы и создаваемая сеть станций дендроклиматического мониторинга будет выполнять роль важного связующего звена в системе других косвенных источников климата. Кроме

того, проводимые в Сибири работы по истории климата (в том числе и на базе дендрохронологической информации) значительно пополняют базу первичных данных, поэтому необходима ее системная организация, адекватная общей задаче крупного проекта. Пополняемая информация будет как временной, так и пространственной. Она будет иметь и другие важные компоненты, такие как многомерность и необходимость применения соответствующих математических моделей для калибровки, сопоставления, интерпретации данных. Систематизацию такой многомерной пространственно-временной информации и оперирование ею целесообразно производить с использованием ГИС-технологий.

## Литература

- Ваганов Е.А., Шиятов С.Г., Мазепа В.С. Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской Субарктике. - Новосибирск, 1996. - 246 с.
- Ваганов Е.А., Шиятов С.Г., Хантемиров М.Н. // ДАН. - В печати.
- Глызин А.В. Динамика радиального прироста деревьев в высокогорьях Забайкалья: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. - Иркутск, 1994. - 16 с.
- Овчинников Д.В., Ваганов Е.А. // Сибирский экологический журнал. - 1998. - N 4.
- Шиятов С.Г. Дендрохронология верхней границы леса на Урале. - М., 1986. - 136 с.
- Шиятов С.Г., Ваганов Е.А. // Сибирский экологический журнал. - 1998. - N 4.
- Bradley R.S., Eddy J.A. // Global Changes of the Past. - Boulder, Colorado, UCAR/OIES, 1989. - 5 - 9.
- Dansgaard W., Johnsen S.J., Clausen H.B. et al. // Medd. Gronland. - 1973. - 197(2). - 34 - 76.
- Marsadolov L.S. // Radiocarbon. - 1996. - 557 - 566.
- Panuyshkina I.P., Vaganov E.A., Shishov V.V. // Dendrochronologia. - 1996. - N 14. - 137 - 151.
- Schweingruber F.H., Naurzbaev M.M. et al. // IAWA Journ. - In press.
- Schweingruber F.H. Tree-rings: basics and applications of dendrochronology // Reidel Publ., Dordrecht. - 1988. - 276 p.
- Trends'93. A Compendium Data on Global Change. - Boulder, 1994.
- Vaganov E.A., Panuyshkina I.P., Shishov V.V. // Tree-rings from the Past to the Future (Proc.Int.Conf.Asian-Pacific Dendrochronology). - Tsukuba, 1995. - P. 52 - 58.