

## **Древесно-кольцевая реконструкция летних температур на севере Западной Сибири за последние 3248 лет**

Р. М. ХАНТЕМИРОВ

*Институт экологии растений и животных УрО РАН  
620144 Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202*

### **АННОТАЦИЯ**

Наличие большого количества полуископаемой древесины в голоценовых аллювиальных отложениях на юге п-ова Ямал позволило построить самую длинную древесно-кольцевую хронологию для субарктических районов. На основе этой хронологии проведена реконструкция летних температур за последние 3248 лет. При ее анализе выявлены распределение во времени кратковременных и длительных температурных аномалий, динамика изменчивости летних температур, частота экстремально холодных летних сезонов. Предложен подход для оценки длительных трендов летних температур. Сравнение климатических характеристик последних десятилетий с их предыдущими значениями показало относительно высокую амплитуду повышения температуры начиная с 1820-х гг., снижение изменчивости летних температур и сокращение лет с экстремально холодными летними сезонами.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Чтобы оценить масштабы современных глобальных изменений и выяснить причины изменчивости климата, нужно знать историю его развития за сотни и тысячи лет. Длительность рядов прямых метеорологических наблюдений, как правило, не превышает 50–100 лет. Она явно недостаточна для решения многих вопросов. Поэтому в рамках международных и национальных исследовательских программ большое внимание уделяется работам, посвященным реконструкции климатических условий прошлого на основе использования так называемых "косвенных" данных. Наиболее надежной является информация, которую можно получить при анализе годичных колец деревьев. Дендроклиматические данные кроме того, что они абсолютно точно датированы, имеют высокую разрешающую способность – год, а иногда и сезон года.

Особую ценность имеют дендроклиматические исследования в субарктических районах,

потому что благодаря высокой изменчивости климата эти регионы в большей мере, чем сопоставимые по территории районы умеренных широт, определяют глобальные изменения климата. Кроме того, согласно моделям общей циркуляции атмосферы, ожидаемое глобальное потепление должно в первую очередь проявиться в арктических и субарктических регионах. Из высокоширотных районов большой интерес представляет север Западной Сибири, поскольку именно здесь отмечена самая высокая изменчивость температурных показателей [1, 2]. Может быть, поэтому изменения хода летних температур в этом районе за последние 600 лет хорошо совпадают с изменениями этого показателя для Северного полушария в целом [3, 4].

Деревья, растущие в Субарктике на северном пределе своих обитаний, очень чувствительны к изменениям летнего тепла, т. е. их рост, а значит, и ширина годичных колец довольно точно следуют изменениям температуры летних сезонов. Поэтому хронологии по ширине годичных колец содержат очень сильный

климатический сигнал, что позволяет производить надежные количественные реконструкции летних температур.

Хотя деревья и считаются долгожителями растительного царства, в большинстве случаев возраст самых старых деревьев не превышает 200–500 лет. Однако дендрохронологические ряды небольшой длительности недостаточны для решения многих климатологических проблем (выяснения причин изменчивости климата, проверки надежности моделей общей циркуляции атмосферы и др.). Предпринимаются попытки построения древесно-кольцевых хронологий длительностью в несколько тысяч лет на основе данных, полученных с остатков полуископаемых деревьев, хорошо сохранившихся как на поверхности, так и в голоценовых отложениях. Самые длительные (до 10 тыс. лет) хронологии построены в умеренных и субтропических зонах, но они мало пригодны для климатических реконструкций, поскольку в них слабо выражен климатический сигнал.

Для субарктических регионов к настоящему времени известны лишь единичные дендроклиматические ряды длительностью более тысячи лет. Первый из них длиной 1250 лет получен для Полярного Урала [5, 6], второй 1400 лет – для севера Скандинавии [7]. Кроме того, на севере Финляндии построен предварительный вариант хронологии длительностью 2160 лет [8], интенсивно ведутся работы по построению сверхдлинной хронологии для Таймыра [9]. В данной работе представлены результаты оценки климатических изменений на основе самой длинной на сегодняшний день субарктической древесно-кольцевой хронологии в 3248 лет.

#### **МАТЕРИАЛ И ОСОБЕННОСТИ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ**

Материал для создания этой сверхдлинной древесно-кольцевой хронологии собран в южной части п-ова Ямал в долинах нескольких рек, текущих с севера на юг. Современная полярная граница лиственничных редколесий поднимается вдоль этих рек примерно до среднего течения.

Обилие хорошо сохранившейся древесины в этом районе обусловлено, с одной стороны, суровыми северными условиями, особенно многолетней мерзлотой, и, с другой стороны, особенностями

покрывающих полуостров пород. Из-за рыхлости грунтов берега рек интенсивно разрушаются и их русла все время сдвигаются. Деревья, растущие по берегам, рано или поздно падают в реку, и многие из них очень скоро оказываются замытыми песком и илом. Когда русло сдвигается от этого места, речные наносы, в которых оказались упавшие деревья, скываются многолетней мерзлотой. Такой "холодильник" прекрасно предохраняет древесину от гниения в течение многих тысячелетий. Через столетия река может вновь вернуться на то же место, но уже на более низком уровне, и обнажить погребенные деревья.

Встречается древняя древесина и в торфяниках, размываемых чаще всего крупными озерами. Иногда на поверхности попадаются пни деревьев, погибших, как правило, не более 200 лет назад. Хорошо сохраняются стволы деревьев, упавших на дно озер.

На сегодняшний день в южных районах п-ова Ямал собрано уже около 1800 спилов ископаемой древесины. В основном это остатки древних лиственниц *Larix sibirica* Ledeb. (около 95 %). В небольшом количестве (около 5 %) встречается ель (*Picea obovata* Ledeb.) и единично береза (*Betula tortuosa* Ledeb.). Примерно 100 буровых образцов взято с живых деревьев. Выборочный анализ захороненных деревьев Ямала радиоуглеродным методом показал, что они более или менее равномерно распределены во временном интервале с 7500 г. до н. э. до современности.

Более полную характеристику полуископаемых остатков и подробное описание типов захоронений древних деревьев на Ямале можно найти в работах [10, 11].

Материалом для данного исследования послужила древесина лиственницы сибирской. Использовались остатки полуископаемых деревьев из аллювиальных отложений голоценового возраста, образцы с живых деревьев и давно погибших лиственниц, сохранившихся на поверхности. Несмотря на то что район сбора образцов охватывает площадь примерно 100 × 100 км (от 67° до 68° с. ш. и от 69° до 71° в. д.), индивидуальные хронологии по ширине годовых колец имеют очень высокую синхронность, что позволило объединить их в один обобщенный ряд.

## ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА ПЕРВИЧНЫХ ДАННЫХ

Для построения хронологии использовали измерения ширины годичных колец с точностью 0,01 мм. Современный отрезок (последние 400 лет) обеспечен в основном измерениями образцов с самых старых живых деревьев. Продолжение этой хронологии в глубь веков осуществлено с помощью данных по приросту давно отмерших деревьев. Для определения точного календарного времени появления каждого кольца у таких деревьев применен метод перекрестной датировки. В его основу положен экспериментально установленный факт, что у деревьев, растущих в одном климатическом районе, последовательность изменений ширины годичных колец за достаточно длинные отрезки (50–100 лет) неповторима во времени. Кроме того, при помощи перекрестной датировки выявляли выпадающие и ложные кольца. У исследованных деревьев доля выпавших колец, особенно в периферийных частях спилов, иногда достигает 20 %, в то время как феномен ложного кольца проявляется лишь 2–3 раза за тысячелетие.

Затем данные первичных измерений преобразовывали в индексы (стандартизировали) методом коридора [12]. Процедура стандартизации необходима для минимизации в хронологии влияния неклиматических факторов, главным образом возрастных изменений и различий в почвенно-грунтовых условиях произрастания деревьев. В полученных индивидуальных хронологиях сохранялась значительная составляющая автокорреляции, т. е. зависимость прироста текущего года от величины прироста предшествующих, как правило, 2–3 лет. Поэтому для каждого ряда рассчитывали авторегрессионную модель и последующей стандартизацией получали так называемую "остаточную" хронологию, где исключена автокорреляция. И уже эти индивидуальные хронологии усредняли для получения обобщенного ряда. Всего обработано 15 индивидуальных хронологий по живым деревьям и 104 – для полуископаемых деревьев, содержащих наибольшее количество колец. На сегодняшний день длительность обобщенной хронологии 3248 лет, она охватывает период с 1253 г. до н. э. по 1994 г. н. э.

Еще одно преобразование пришлось выполнить теперь уже с обобщенной хронологией. Поскольку число образцов, которыми обеспечен ряд, в некоторые периоды невелико, ввели поправку на увеличение дисперсии. В ходе этих преобразований выявлено, что, начиная с пяти образцов, увеличение повторности практически не влияет на дисперсию.

Для оценки связи прироста деревьев с климатическими параметрами использовали данные длительных инструментальных наблюдений с 1882 по 1995 г. на ближайшей к району исследований (150 км к юго-западу) метеостанции г. Салехард. Как и предполагалось, наиболее значимое влияние на прирост оказывают температуры летних месяцев. Коэффициент корреляции между обобщенной хронологией и средними температурами июня–июля имеет довольно высокое значение (0,58, а после сглаживания 11-летней скользящей средней – 0,82). Построено соответствующее регрессионное уравнение, на основе которого проведена реконструкция средних температур воздуха июня–июля.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 приведена древесно-кольцевая климатическая реконструкция отклонений средней температуры июня–июля от средней для всего периода реконструкции, сглаженная в разной степени для выявления кратковременных (10–30 лет) и более длительных (50–150 лет) колебаний летнего тепла. Необходимо отметить, что при использовании традиционной последовательности стандартизации первичных данных, которая была реализована в данном случае, климатические колебания с периодом большим, чем срок жизни отдельных деревьев, в значительной степени нивелируются. Хотя для построения обобщенной хронологии использовались только самые длительные индивидуальные хронологии, средняя длина отдельных рядов составляла лишь немногим более 200 лет. Это значит, что нельзя утверждать, что среднее значение на рис. 1 (равное 0) на самом деле есть прямая линия.

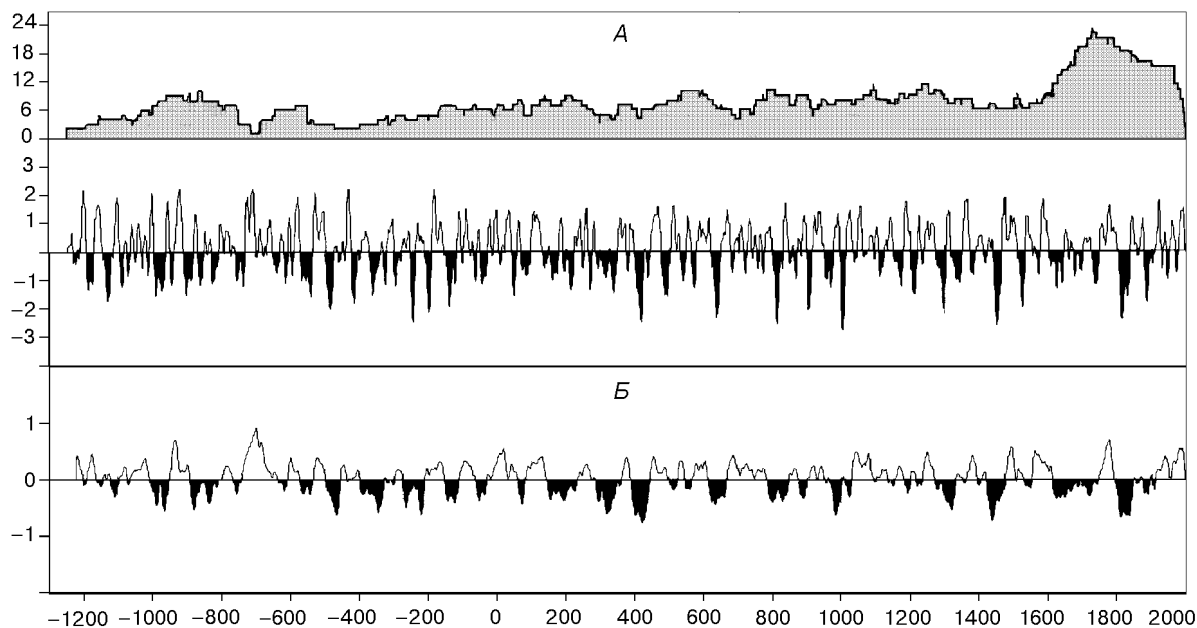


Рис. 1. Отклонения сглаженных в разной степени температур июня–июля от средней нормы для всего рассматриваемого периода (в °С).

По оси абсцисс – календарные годы (отрицательные значения соответствуют годам до н. э.).  
На верхнем графике показана обеспеченность хронологии образцами.

#### РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВО ВРЕМЕНИ НАИБОЛЕЕ ЗНАЧИТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ АНОМАЛИЙ

**Кратковременные фазы.** Как видно из рис. 1, А, почти все наиболее существенные похолодания, когда средняя температура за десятилетие опускалась ниже  $2^{\circ}$  от средней, происходили во второй половине периода реконструкции, а именно в начале V в., в середине VII в., в начале VIII и X вв., в середине XV и в начале XIX вв. (все н. э.). За первые 1600 лет реконструкции подобные снижения летней температуры отмечены лишь в середине и в конце III в. до н. э.

Самые теплые фазы, наоборот, зафиксированы лишь до начала новой эры – в конце X и VIII вв., в середине V и в начале II вв. до н. э.

**Длительные фазы.** Из более длительных похолоданий (рис. 1, Б) трудно выделить особенно выдающиеся. Можно отметить первую половину V и XIX вв. и середину XV в. н. э. Долго держалась ниже нормы средняя температура IV–III вв. до н. э. и XVII–начала XVIII вв. н. э.

Среди длительных потеплений самым заметным предстает повышение летних температур VIII–VII вв. до н. э. Очень долго средние

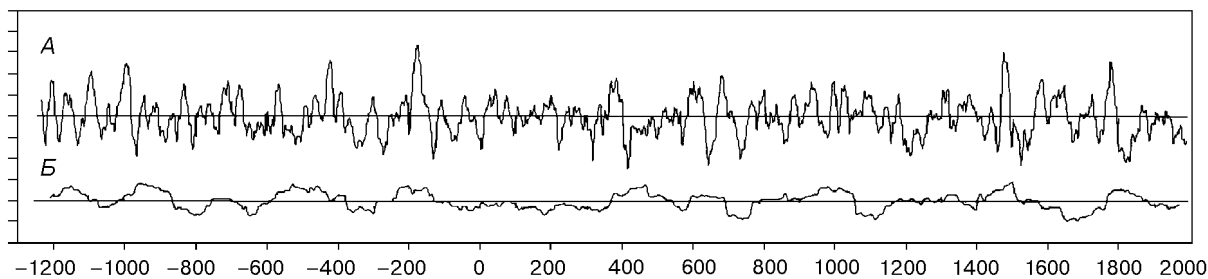


Рис. 2. Изменения стандартного отклонения относительного среднего для всего рассматриваемого периода.

А – для 21-летних отрезков исходного ряда, Б – для 100-летних отрезков ряда, сглаженного 11-летней скользящей средней.

температуры держались выше среднего в период раннего средневековья, в XI–XIII вв. н. э.

### ДИНАМИКА ИЗМЕНЧИВОСТИ ЛЕТНИХ ТЕМПЕРАТУР

Существование лесотундровых экосистем определяется не только средними многолетними температурами летних сезонов, но и их изменчивостью. Особенно актуально это для района исследований, где за последние 100 лет отмечена наивысшая в мире изменчивость температурных показателей. На рис. 2, А показана динамика этой изменчивости для летних сезонов за последние 3250 лет. Хорошо видно, что амплитуда изменений этого показателя значительна. Имеется довольно высокая положительная корреляция (0,36) между средней температурой и ее дисперсией за тот же отрезок времени (в данном случае 21 год). Тем не менее в некоторые периоды похолоданий повышенная изменчивость могла внести существенный вклад в общий неблагоприятный для растительности климатический фон. Это касается, например, начала X, середины IX, начала V, середины III вв. до н. э., начала XI и XIV и XVII вв. н. э. И наоборот, сравнительно низкая изменчивость в некоторые относительно теплые времена могла способствовать процветанию северных экосистем. Это могло быть в конце VI и в начале I вв. до н. э., на рубеже эр, в середине V, в начале VIII, в середине XI и XIII, на рубеже XV–XVI и в XX вв. н. э.

На рис. 2, Б показана изменчивость многолетних колебаний температур, т. е. изменчивость сглаженной кривой, показанной на рис. 1, А. Этот показатель, по всей вероятности, не оказывает существенного влияния на изменения характеристик северных экосистем, но тем не

менее интересен с точки зрения исследования особенностей динамики климатических показателей. Не обнаружено связи между дисперсией многолетних изменений температуры и ее абсолютными значениями за тот же период (в данном случае столетие). Высокая дисперсия, означающая частые смены теплых и холодных периодов, отмечена для XII, X, VI–V, III–II вв. до н. э. и V, X–XI, XV, XVII–XIX вв. н. э. Самые "спокойные" века – VIII, XI–XII и XVII н. э.

### ЧАСТОТА ЭКСТРЕМАЛЬНО ХОЛОДНЫХ ЛЕТНИХ СЕЗОНОВ

Иногда год с экстремально низкими температурами лета может даже при высоких многолетних средних существенно повлиять на состояние лесотундровых экосистем – например, вызвав массовую гибель деревьев, отбросить далеко на юг полярную границу леса. Поэтому повторяемость лет с экстремально низкой температурой лета (рис. 3) является существенным показателем, характеризующим климатические условия.

В среднем летние сезоны, которые можно назвать экстремально холодными, повторяются раз в 15 лет. Но их распределение по векам не очень равномерно. Чаще всего они наблюдались в IV в. до н. э. и в X в. н. э. (каждый 9–10-й год), реже всего в V и XII вв. н. э. (каждые 25 лет), а в XX в. было всего два таких сезона.

### ОЦЕНКА ДЛИТЕЛЬНЫХ ТРЕНДОВ

К сожалению, как указывалось выше, полученная древесно-кольцевая реконструкция не содержит информации о низкочастотных, с периодом более 200 лет, колебаниях летних тем-

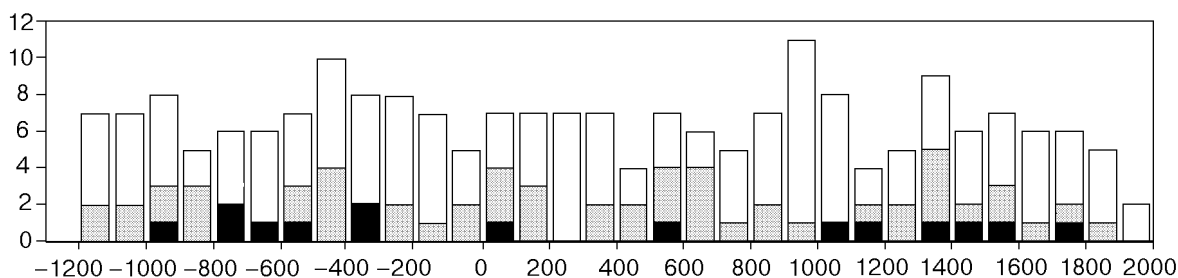


Рис. 3. Распределение количества летних сезонов с экстремально низкими температурами за столетие. Черным цветом отмечено число лет с отклонением более 2,5 сигм, серым – от 2 до 2,5 сигм, белым – от 1,5 до 2 сигм.

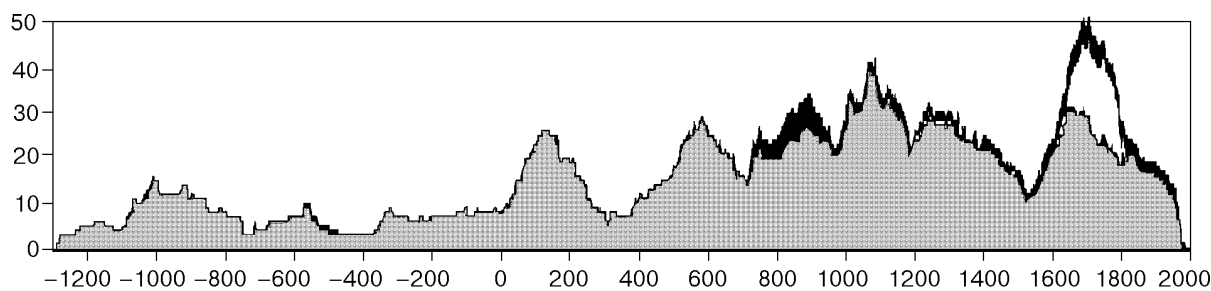


Рис. 4. Распределение количества деревьев, датированных для рассматриваемого периода.

Черным и серым цветом отмечены соответственно ель и лиственница из аллювиальных отложений, белым — количество остатков лиственницы, найденных на поверхности.

ператур. Но можно попытаться оценить их, например, по количеству найденных остатков деревьев, которые росли в тот или иной отрезок анализируемого периода времени.

Количество найденных деревьев, по всей вероятности, определяется тремя основными факторами: территорией, на которой произрастали деревья, плотностью древостоев и вероятностью быть захороненными в этот отрезок времени. Первые два показателя, очевидно, имеют прямую связь с благоприятностью климатических условий. Что касается третьего, то он зависит от эрозионной активности реки, т. е. при интенсивном подмывании берегов большее количество деревьев оказывается в речных захоронениях. С. Г. Шиятов показал (опубликовано в [13]), что периоды интенсивной русловой эрозии почти всегда совпадают с периодами высокого радиального прироста деревьев, т. е. высоких летних температур. Таким образом, можно считать, что количество деревьев, остатки которых собраны в ходе полевых работ, отражает основные тренды изменения летних температур. Хотя нужно иметь в виду, что, скорее всего, имеется также обратная зависимость вероятности обнаружить остатки дерева от времени, которое прошло после его гибели.

На рис. 4 приведено количество деревьев, датированных с помощью полученной хронологии. Время появления дерева на свет оценено по высоте ствола, на котором взят спил, и средней скорости роста деревьев в высоту в этом районе [14].

Можно отметить два основных периода — до и после начала нашей эры. В течение последних двух тысячелетий было два длительных похолодания — в III–IV и в XVI вв. Самым благо-

приятным был XI в. Говорить о том, что периоды, где обнаружены остатки ели, были более влажными, можно лишь с большой осторожностью, поскольку доля ели всегда была очень мала.

#### ОСОБЕННОСТИ ПОСЛЕДНИХ ДЕСЯТИЛЕТИЙ

Сопоставим современный отрезок реконструкции с прошлыми изменениями, имея в виду возможные последствия повышения концентрации в атмосфере газов, способных вызвать парниковый эффект.

Средние многолетние температуры летних сезонов в XX в. нельзя назвать необычно высокими. Даже за последнее тысячелетие можно отметить несколько потеплений такого уровня. Однако обращает на себя внимание длительный тренд повышения летних температур, начавшийся примерно в середине XIX в. (см. рис. 1, Б). Такое длительное и существенное (свыше 1°) увеличение температур действительно из разряда исключительных. Кроме того, в течение последних десятилетий температурная изменчивость оставалась ниже средней за предыдущие три тысячелетия (но при этом наивысшей из современных в мире), что тоже свидетельствует о смягчении климатических условий. И, наконец, в XX в. отмечено наименьшее количество лет с экстремально низкими температурами. Таким образом, современный период можно считать необыкновенно благоприятным для существования северных лесов. Но в рамках данной работы нельзя сказать однозначно, связано ли это с парниковым эффектом. Пожалуй, пока преобладают естественные колебания климата.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты, представленные в данной работе, можно назвать предварительными, поскольку работа над сверхдлинной хронологией для севера Западной Сибири продолжается. Основная задача на сегодняшний день – увеличение обеспеченности образцами (повторности), что повысит качество реконструкции и позволит апробировать методы, позволяющие выявлять длительные колебания прироста. Другая задача – продление хронологии далее в глубь веков с тем, чтобы в подробностях реконструировать климатические изменения в течение всей эпохи голоцена.

Данная работа осуществляется при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, гранты 96-05-64129 и 96-04-50038.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Е. С. Рубинштейн, Л. Г. Полозова, Современное изменение климата, Л., Гидрометеиздат, 1966.
2. Р. М. Kelly, P. D. Jones, C. В. Sear *et al.*, *Monthly Weather Review*, 1982, 110, 71–83.
3. Б. Л. Берри, А. А. Либерман, С. Г. Шиятов, *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География*, 1983, 4, 41–47.
4. K. R. Briffa, P. D. Jones, F. H. Schweingruber *et al.*, *Nature*, 1995, **376**: 6536, 156–159.
5. D. A. Graybill, S. G. Shiyatov, Air Pollution Effects on Vegetation, Including Forest Ecosystems, U. S. Dept. Agriculture, Forest Service, 1989, 37–42.
6. S. G. Shiyatov, Int. Conf. on Past, Present and Future Climate: Proc. of the SILMU conf., Publication of the Academy of Finland 6/95, Helsinki, 1995, 144–147.
7. K. R. Briffa, T. S. Bartolin, D. Eckstein *et al.*, *Nature*, 1990, **346**: 6283, 434–439.
8. P. Zetteberg, M. Eronen, K. R. Briffa, *Bulletin of the Geological Society of Finland*, 1994, **66**: 2, 107–124.
9. F. H. Schweingruber, M. N. Naurzbaev, K. R. Briffa, *Boreas*, (in press).
10. С. Г. Шиятов, А. Ю. Сурков, Проблемы дендрохронологии и дендроклиматологии. Тез. докл. V Всесоюзного совещания по вопросам дендрохронологии, Свердловск, 1990, 168–169.
11. S. G. Shiyatov, R. M. Hantemirov, F. H. Schweingruber *et al.*, *Dendrochronologia*, (in press).
12. С. Г. Шиятов, *Экология*, 1970, 3, 85–87.
13. В. В. Плотников, Динамика лесных экосистем Субарктики (на примере бассейна р. Хадытаяхи), Свердловск, УНЦ АН СССР, 1984.
14. С. Г. Шиятов, Физиология и экология древесных растений. Тр. Ин-та биологии УФ АН СССР, вып. 43, Свердловск, 1965.

## Tree-Ring Reconstruction of Summer Temperatures in the North of the West Siberia for the Last 3248 Years

R. M. HANTEMIROV

*Institute of Plant and Animal Ecology RAS,  
8 Marta St., 202, Ekaterinburg, 620144, Russia*

The large amount of well-preserved subfossil wood in the Holocene deposits of the Northwest Siberia provides a good opportunity for development of multi-millennial tree-ring chronologies. More than 1.800 samples of subfossil larch, spruce and birch have been collected in the southern part of the Yamal Peninsula. Considerable success has already been achieved in developing a 3248-year continuous larch (*Larix sibirica*) ring-width chronology. This is the longest continuous tree ring chronology for Subarctic zone yet developed. On the basis of this chronology, high-frequency (on annual, decadal and century timescales) summer temperature deviations have been reconstructed. More than millennium-scale changes of interannual temperature variability and frequency of extremes have been revealed. An approach to estimation of long-scale trends of summer temperatures has been offered. It was shown that since 1820 summer temperatures raised consistently. The last decades are marked by an unusually low number of extremely cold summers and a relatively low interannual summer temperature variability.