

А. С. БАЛЫБИНА

**РЕКОНСТРУКЦИЯ КОЛЕБАНИЙ КЛИМАТА В ПРЕДБАЙКАЛЬЕ
ДЕНДРОХРОНОЛОГИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

*Для анализа связи динамики радиального прироста сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* Ledeb.) и лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) с климатическими параметрами рассмотрены их древесно-кольцевые хронологии из трех районов Предбайкалья. Определены ведущие климатические факторы прироста. Методом линейной регрессии проведена реконструкция выявленных лимитирующих факторов. Спектральный анализ восстановленных данных тем-*

© 2006 Балыбина А. С.

пературы воздуха и атмосферных осадков показал, что за период реконструкции структура циклических колебаний не претерпела существенных изменений.

*An analysis is made of the dynamics of radial growth of common pine (*Pinus sylvestris* Ledeb.) and Siberian larch (*Larix sibirica* Ledeb.) with climatic parameters by considering their annual growth ring chronologies from three areas of the Prebaikalia. The study determined leading climatic factors of growth. The linear regression method was used to reconstruct the resulting limiting factors. A spectral analysis of the reconstructed air temperature and precipitation data showed that for the period of reconstruction the structure of cyclic fluctuations did not undergo any substantial changes.*

В последнее десятилетие огромное внимание уделяется проблемам изменения климата как на региональном, так и на глобальном уровне. При этом остается актуальным изучение изменений климата на больших временных отрезках (100 и более лет). К сожалению, проследить климатические колебания в Сибири за период более чем сто лет возможно лишь по данным нескольких метеостанций, что совершенно не достаточно для такого огромного пространства. Поэтому дендрохронологическая реконструкция климатических параметров остается одним из наиболее удобных и доступных методов изучения динамики климата.

В состав территории, которую по исторически сложившейся традиции называют Предбайкальем, входит Иркутская область и часть Бурятии [1]. Природа здесь, несмотря на существенные различия, имеет и много общих черт: преобладает среднегорный рельеф, равнинные пространства невелики. Большая часть Предбайкалья расположена в пределах Среднесибирского плоскогорья.

Территория исследования включает: Среднее Приангарье — район, прилегающий к Братскому водохранилищу, Верхнее Приангарье — бассейн р. Куды и Приольхонье — устье р. Харги [2].

Наиболее информативными древесными породами для дендроклиматического анализа на изучаемой территории являются сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* Ledeb.) и лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb.), как наиболее распространенные здесь хвойные породы. Эти виды характеризуются относительно четкими годичными кольцами, долготлетием, экологической пластичностью и при этом высокой чувствительностью к воздействию внешних факторов на радиальный прирост. В силу эколого-биологических свойств сосна занимает самые теплые и наиболее засушливые местообитания.

Для древостоев лесной и лесостепной зон наиболее характерна практически повсеместная подверженность периодическим пожарам, вырубкам и нерегулируемому выпасу скота. В наших исследованиях предпочтение отдавалось редкостойным старым древостоям и отдельно растущим деревьям, где исключалось влияние такого фактора, как борьба между деревьями за свет и питательные вещества.

Для построения древесно-кольцевых хронологий в трех районах Предбайкалья отбирались образцы древесины (керы) с 5–15 деревьев одного вида, с одинаковыми условиями местообитания. Модельные деревья были разного возраста (старые, средневозрастные, молодые) для того, чтобы получить наиболее чувствительные хронологии, а также чтобы облегчить процесс перекрестной датировки. Оценка радиального прироста производилась по кернам, взятым на высоте 1,3 м с северной стороны ствола (с помощью возрастных буравов) как у здоровых деревьев — без признаков поражения и угнетения, с густой кроной, с неповрежденной хвоей, так и угнетенных деревьев — с редкой ажурной кроной или суховершинных.

Выбор участков для закладки пробных площадей предусматривал сопоставимость по основным таксационным и типологическим показателям лесных сообществ. Сходство учитывалось по следующим показателям: положение в рельефе, таксационные показатели древостоев, механический состав и морфология почв. Краткие характеристики участков сбора дендрохронологического материала приведены в таблице.

При построении обобщенных рядов древесно-кольцевых хронологий в первую очередь проводилось индексирование рядов ширины годичных колец (ШГК) каждого образца. По отобранным образцам после измерения ШГК строились индивидуальные древесно-кольцевые хронологии, которые перекрестно датировались методом cross-dating с применением автоматизированной системы LINTAB в программном пакете TSAP [3]. Затем датировка проверялась тестированием программами ARSTAN и COFESHA из программного пакета DPL-99 [4].

Так как у каждого ряда максимально исключены индивидуальные характеристики роста деревьев по диаметру, то, следовательно, эти ряды отражают в большей степени общую изменчивость показателя, характерную для данной пробной площади, а не индивидуальную. Количественно это свойство оценивают величиной отношения сигнал–шум [5], характеризующего взаимокорреляцию индивидуальных хронологий, составляющих обобщенные хронологии. Значимое отношение сигнала к шуму свидетельствует о том, что обобщенные хронологии содержат преобладающую составляющую изменчивости, объясняемую внешними (климатическими) условиями, а не возрастными или физиологическими компонентами. Доля объясненной дисперсии первой главной компонентой достигает 79 % у лиственницы и 76 % у сосны. Эти характеристики показывают, что деревья в данных условиях произрастания очень чутко реагируют на изменения климата.

Таксационная и типологическая характеристики пробных площадей

Номер пробной площади	Формула древостоя	Орографическое положение	Тип леса	Почвы	Бонитет	Средний возраст деревьев, лет	Средний диаметр ствола, см
<i>Верхнее Приангарье</i>							
1	4С4Л1Ос1Б	Плакор	Бруснично-разнотравный	Дерново-карбонатные подзолистые	II	100	30
2	5С3Л2Б	»	Кустарничково-осочково-зеленомошный	Те же	II	105	30–40
3	4С4Л1Ос1Б	Склон	Разнотравный	Дерново-лесные оподзоленные	II	100	30
4	6Е3Л1Б+К	Долина	Ерниково-гипновый	Дерново-лесные	III	Л–100 Е–60	Л–40 Е–30
<i>Приольхонье</i>							
1	7С3Л	Склон	Сосняк разнотравный с примесью лиственницы	Дерново-подзолистые	III	125	30
2	9С1Л	»	Сосняк разнотравный	»	III	105	25
<i>Среднее Приангарье</i>							
1	5С5Л+Е	Плакор	Бруснично-разнотравный	Дерново-подзолистые	III	128	30
4	6С3Л1Е	»	»	Подзолистые	II	136	38

Благодаря физиологическим предпосылкам для роста ряды индексов ширины годичного кольца обладают некоторой инерционностью [6]. В дендроклиматологии такую структуру рядов индексов годичного прироста вполне удовлетворительно моделируют авторегрессионным процессом (AR) [7] или процессом авторегрессии скользящего среднего (ARMA) [8]. Ряд индексов прироста может быть выражен в форме линейного разностного уравнения определенного порядка. Порядок авторегрессии отражает статистически значимую зависимость прироста данного года от соответствующего количества лет роста. Процент дисперсии в авторегрессии оценивает инерционность деревьев в реакции на климатическое воздействие [9].

Для качественной оценки изменчивости величины годичного прироста под влиянием внешних условий важнейшими показателями являются коэффициенты чувствительности и среднеквадратичного отклонения. Первый отвечает за относительную величину изменчивости межгодового прироста, а второй — за амплитуду ее изменчивости. Не все хронологии характеризуются высоким коэффициентом чувствительности — в среднем он равен 0,5 (от 0,31 до 0,73), однако и это свидетельствует о значительном влиянии на межгодовую изменчивость прироста деревьев внешних условий (в первую очередь климатических). Не менее значимы и величины среднеквадратичного отклонения — в среднем 0,38 (от 0,3 до 0,5).

Высокие межсерийные коэффициенты корреляции (до 0,7–0,9) показывают синхронность в реакции отдельных деревьев на изменения климатических условий, что и стало обоснованием для объединения индивидуальных древесно-кольцевых хронологий в обобщенные (рис. 1).

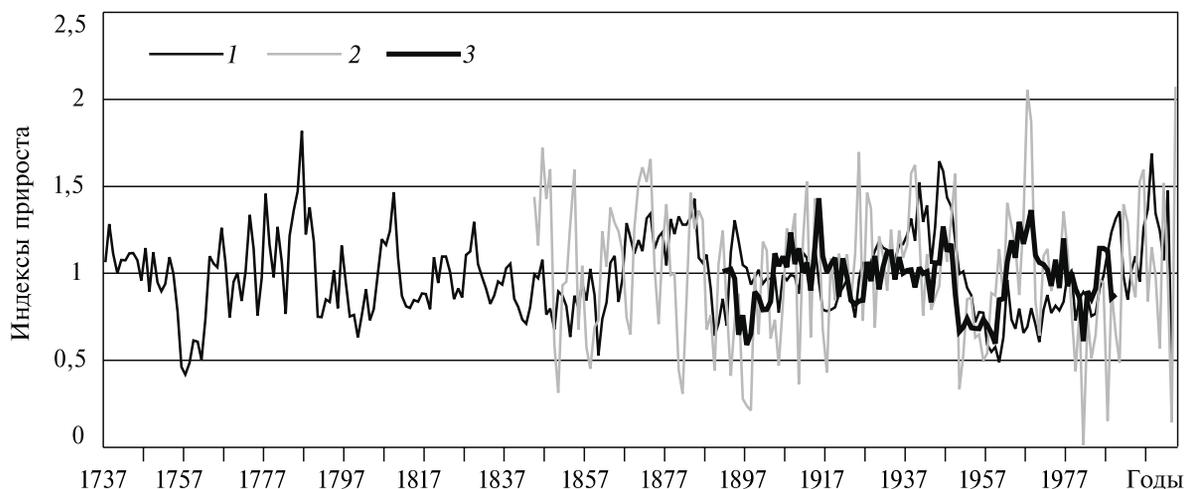


Рис. 1. Обобщенные стандартизированные хронологии сосны обыкновенной.

1 — Среднее Приангарье, 2 — Приольхонье, 3 — Верхнее Приангарье.

Оценка степени влияния климатических факторов на древесный прирост осуществлялась с помощью функции отклика. Статистический анализ основан на оценке и интерпретации функций отклика [6]. Искомые коэффициенты уравнения вычисляются на базе ортогональной множественной регрессии, где в качестве зависимой переменной выступают значения индексов прироста, а независимых переменных — компоненты климата (температура воздуха и атмосферные осадки). Количественная реконструкция основана на решении регрессионного уравнения, в котором прямые или косвенные климатические данные являются зависимой переменной, а индексы прироста — независимой.

Оценка и подбор коэффициентов уравнения осуществлялись процедурой калибровки и верификации. Адекватность статистической модели для каждого калибровочного периода оценивалась по критериям значимости показателей: коэффициенту корреляции (при критическом значении $<0,05$), коэффициенту детерминации (квадрат корреляции), критерию Фишера с уровнем вероятности 95 % (для анализа дисперсии); автокорреляция остатков в модели — по значению d -статистики (критерий Дарбина–Ватсона).

Для выделения из общей дисперсии прироста деревьев наиболее значимой части объясненной изменчивости под влиянием климатических факторов использовался метод главных компонент, позволяющий путем привлечения всех факторных признаков разложить корреляционную матрицу на такое же число ортогональных компонент и определить небольшое число главных из них, объясняющих большую часть изменчивости. Метод дает возможность описать большие наборы признаков n небольшим числом главных компонент; различия между объектами зависят от доли изменчивости, связанной с данной главной компонентой; каждому признаку свойственна факторная структура; связи между признаками и факторами (главными компонентами) — линейны: для данного признака эффект воздействия факторов суммируется.

Факторный анализ позволяет синтезировать матрицу, составленную парными коэффициентами корреляции между изменчивостью прироста деревьев, в виде разложения по собственным ортогональным функциям корреляционной матрицы. Разложение по собственным функциям (собственным частотам как аналог разложения Фурье по заданной системе функций) достаточно четко реагирует на возможные составляющие изменчивости прироста при условии их фазовой однородности. При помощи первых трех главных компонент можно объяснить основную часть суммарной дисперсии в многолетней изменчивости прироста деревьев [6].

Выделенные главные компоненты путем расчета значений собственных векторов в общей изменчивости радиального прироста показывают, что основная дисперсия рядов (Std-хронологий) приходится на первые три компоненты и в среднем составляет более 70 % (от 60 до 99 % суммарной дисперсии рядов). При этом на первую главную компоненту приходится в среднем 40 % (от 30 до 79 %), что еще раз подчеркивает ведущее значение одного климатического фактора в изменчивости радиального прироста деревьев на всей исследуемой территории.

Расчет и анализ функции отклика радиального прироста на действие основных климатических факторов выполнены в программных пакетах DPL-99 (программа RESPO) и STATISTICA V.5.5. Процедура оценки функции отклика проводилась по расчетам корреляции между индексами прироста и ежемесячными значениями температуры воздуха и атмосферных осадков за период с июня предыдущего года по август текущего (всего 30 переменных). Для оценки зависимости изменчивости прироста деревьев от разных факторов использован метод главных компонент посредством разложения корреляционной матрицы по ортогональным функциям.

Оценивание функции отклика древесно-кольцевых хронологий на климат сделано при использовании метеорологических рядов наблюдений по метеостанциям Братск и Вихоревка — для Среднего Приангарья, Усть-Ордынский, Бохан и Баяндай — для Верхнего Приангарья, Сарма и Еланцы — для Приольхонья. Погодичные показатели изменения температуры воздуха и атмосферных осадков за отдельные месяцы по метеостанциям для каждого района хорошо коррелируют (для температуры от 0,91 до 0,95, для осадков от 0,55 до 0,72). Также использовались данные по солнечной активности (числа Вольфа с 1700 по 2000 г.) и повторяемости форм циркуляции атмосферы (1891–2002 гг.).

Функции отклика прироста годовых колец сосны на атмосферные осадки и температуру воздуха в Приольхонье и Среднем Приангарье представлены на рис. 2. Высоких связей между среднемесячными температурами и индексами прироста в Приольхонье не наблюдается, однако значимо более высокие связи фиксируются с суммой осадков за сентябрь прошлого ($IX_{пр}$) и за июль текущего года.

Приольхонье входит в зону недостаточного увлажнения, поэтому атмосферные осадки играют роль доминирующего лимитирующего фактора для прироста ширины годовых колец сосны и лиственницы. Сосна более требовательна к количеству осадков на протяжении вегетационного периода, чем лиственница, поэтому имеет более высокий отклик на атмосферные осадки июня–июля, что подтверждается и данными других исследователей [10]. В Приольхонье обе породы имеют более выраженную реакцию на колебание количества осадков, чем на изменение температуры воздуха. Мож-

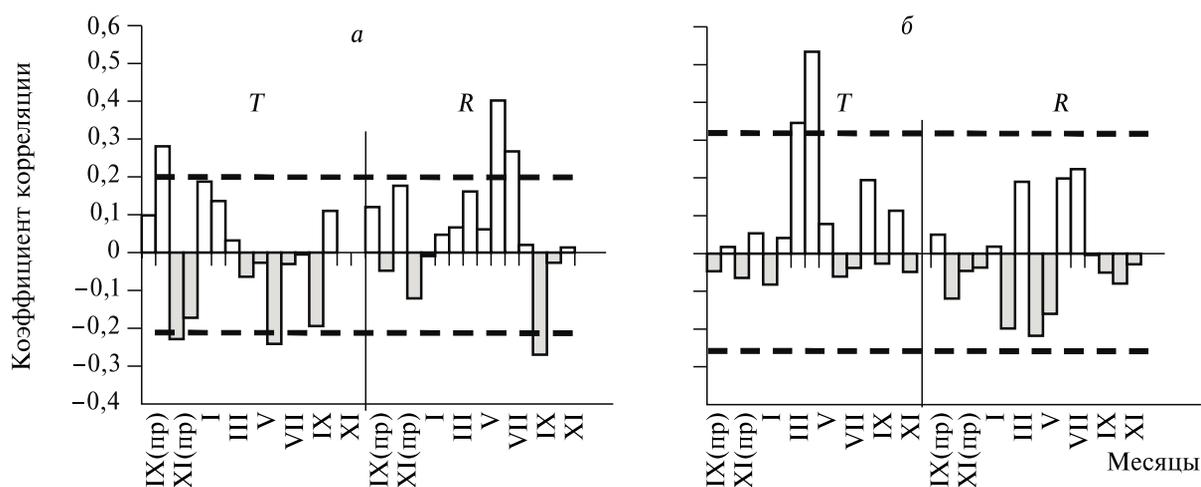


Рис. 2. Отклик прироста сосны на температуру воздуха (T) и атмосферные осадки (R) в Приольхонье (a) и Среднем Приангарье (b). Штриховая линия — уровень достоверности.

но также говорить о том, что лимитирующее влияние осадков на прирост годовых колец проявляется через увлажненность почвенной толщи. Содержание влаги в почве резко уменьшается с конца июня и до середины августа, продукция и радиальный рост клеток лимитируются недостатком влаги.

В Среднем Приангарье функции отклика показали высокую положительную связь прироста сосны со среднемесячными температурами воздуха за март и апрель и небольшую положительную связь с суммами атмосферных осадков за июнь. Лиственница в большей степени реагирует на зимние температуры (январь, февраль) и имеет отрицательный отклик на суммы атмосферных осадков апреля–мая. Это можно объяснить тем, что территория, прилегающая к Братскому водохранилищу, входит в зону достаточного и избыточного увлажнения, и большие суммы осадков в мае могут оказывать негативное влияние на рост лиственницы, так как в мае почва еще достаточно увлажнена зимними осадками.

Предварительные результаты анализа функций отклика роста лиственницы на температуру воздуха представляют значительный интерес. Неясен экофизиологический механизм положительного влияния повышенных зимних температур на прирост лиственницы, хотя в то же время подобная связь неоднократно фиксировалась в пределах таежной зоны Европы [11]. Неблагоприятные условия для роста сосны и лиственницы создаются также при повышении сумм атмосферных осадков в мае и при высоких температурах июня, в результате чего происходит повышение относительной влажности воздуха, что в свою очередь приводит к снижению интенсивности транспирации [12].

В Верхнем Приангарье функции отклика показали небольшую устойчивую отрицательную связь динамики прироста с суммами осадков за март текущего года и со среднемесячными температурами сентября текущего года, а также небольшой положительный отклик — на температуры июля. Отрицательный отклик имеет прирост сосны на высокие температуры июня. Это может быть объяснено тем, что в условиях недостаточного увлажнения высокие температуры в июне способствуют потере влаги из почвы в середине вегетационного периода. Существует положительная связь с суммами осадков за гидрологический год. В этом наблюдается сходство в отклике прироста на режим увлажнения между древесно-кольцевыми сериями Верхнего Приангарья и Приольхонья. Здесь атмосферные осадки играют важную роль именно вследствие того, что эти районы входят в зону недостаточного увлажнения.

Одним из наиболее надежных методов восстановления климатических условий прошлого являются дендроклиматические реконструкции. По обобщенным древесно-кольцевым хронологиям трех районов предпринята попытка реконструкции климатических элементов методом линейной регрессии, что позволило установить достаточно высокие и значимые связи между интенсивностью прироста и характеристиками климата. Реконструкции среднемесячной температуры апреля за 270 лет и атмосферных осадков июня за 150 лет в Предбайкалье представлены на рис. 3.

Статистические параметры множественных регрессионных моделей реконструкции показывают, что наиболее качественная модель получена для реконструкции температуры апреля зоны тайги (коэффициент регрессии 0,44). Анализ хода реконструированной весенней температуры для рассматриваемого района за период с 1737 по 2003 г. показывает, что оба ряда имеют сходную динамику высокочастотных изменений. При сопоставлении трехлетних скользящих средних наблюдаются совпадения

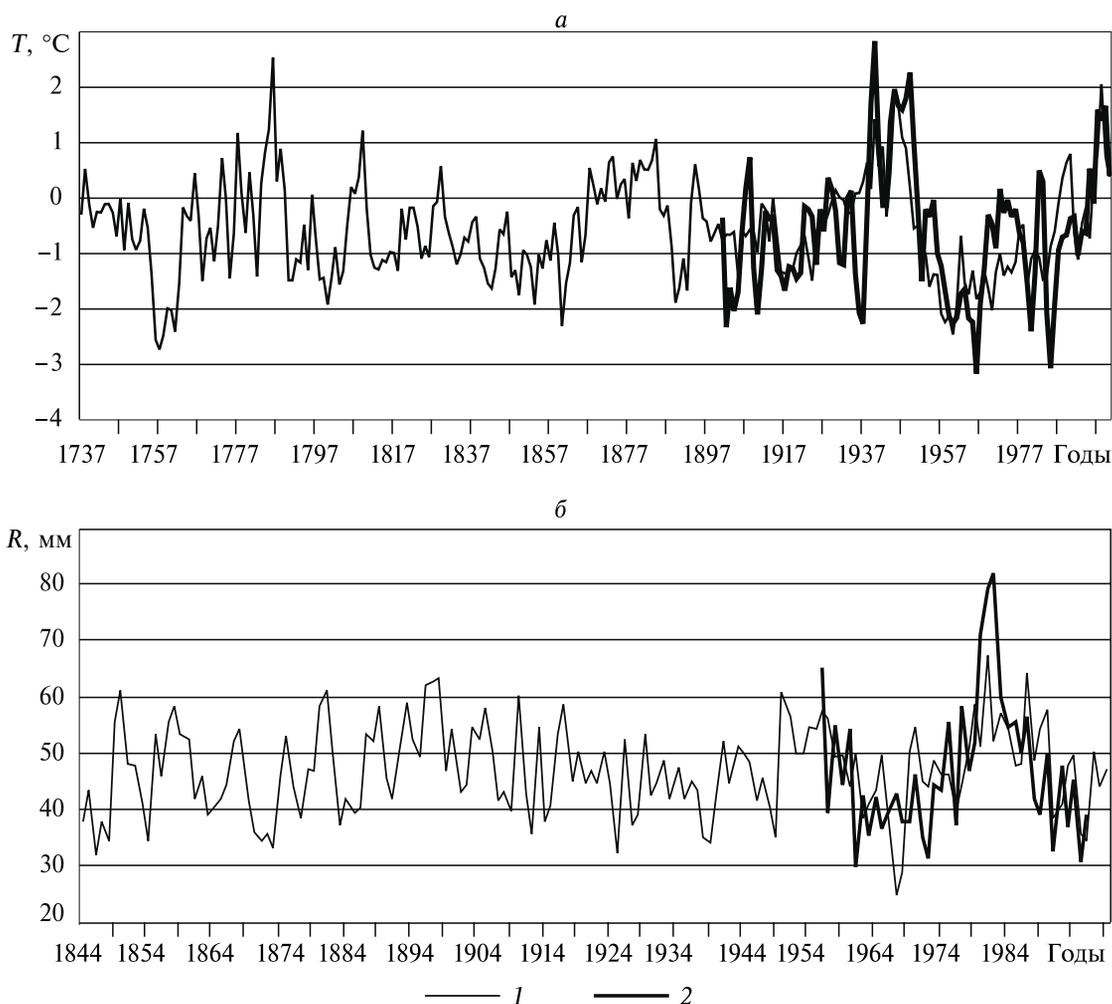


Рис. 3. Реконструкция среднемесячной температуры воздуха (T , °C) апреля (Среднее Приангарье) (а) и сумм атмосферных осадков (R , мм) июня (Приольхонье) (б).

1 — реконструированный ряд, 2 — фактический.

в многолетних изменениях температуры. Судя по реконструированной средней месячной температуре воздуха, наименьшие температуры наблюдались в середине XX в. и в конце XVIII в., когда средняя температура апреля была близка к $-2,5$ °C, что ниже климатической нормы более чем на $1,5$ °C.

Для зоны подтайги проведена реконструкция сумм атмосферных осадков за июнь в Приольхонье и гидрологический год в бассейне р. Куды. Погодичные колебания атмосферных осадков значительны, поэтому их реконструкция довольно сложна. Однако 3–5-летние скользящие хорошо согласуются с восстановленными колебаниями данного климатического параметра. Наиболее сильная связь прироста с осадками за гидрологический год объясняется тем, что в этот период в основном осадки определяют начальное и текущее влагосодержание в почве [13]. В сумму осадков за гидрологический год большой вклад вносят суммарные атмосферные осадки мая–июня–июля. При малых осадках в данные месяцы на территории бассейна Куды наблюдаются засухи. Подобные явления отмечены здесь в 1956–1958 гг. [14], и реконструированные значения также свидетельствуют об этом. Судя по этим данным, подобные явления отмечались на территории бассейна р. Куды и в конце XIX в.

Попытка реконструкции месячных сумм осадков июня в Приольхонье показала некоторые различия в эмпирических и расчетных данных. Возможно, это объясняется тем, что на прирост в этом районе большое влияние оказывают не столько атмосферные осадки, сколько гидрологические показатели, а именно — уровень оз. Байкал, в котором интегрируются такие составляющие, как сами осадки, сток, испарение и т. д. [15].

Наблюдаемое соответствие в реконструированных и инструментально измеренных значениях климатических параметров подтверждается и данными спектрального анализа, в качестве которого были использованы такие математические процедуры, как Фурье-анализ и вейвлет-анализ. Функции спект-

ральной плотности выявили значимые пики около 10–14, 24–35 лет. Спектральный анализ реконструированных климатических параметров показал, что структура циклических колебаний температуры воздуха за последние 270 лет и атмосферных осадков за 150 лет не претерпела существенных изменений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Предбайкалье** и Забайкалье. Природные условия и естественные ресурсы СССР. — М.: Наука, 1965.
2. **Балыбина А. С.** Климатические факторы динамики радиального прироста хвойных пород деревьев в лесных фитоценозах Предбайкалья: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. — Иркутск, 2005.
3. **Rinn F.** TSAP. Version 3.0. Reference manual. Computer program for time series analysis and presentation: Copyright © 1989–1996, Frank Rinn Distribution. — Heidelberg, Germany.
4. **Holmes R. L.** Dendrochronology program library — users manual. — Laboratory of Tree-Ring Research, Univer. of Arizona, USA, 1998.
5. **Wigley T. M., Briffa K. R., Jones P. D.** Journ. of Climate and Applied Meteorol. — 1984. — № 23.
6. **Fritts H. C.** Tree-ring and climate. — London; New York; San Francisco: Acad. Press, 1976.
7. **Cook E. R.** A time series approach to tree-ring standardization: Ph. D. Dissertation. — Tucson: Arizona Univer. Press, 1985.
8. **Vox G. E. P., Jenkins G. M.** Time Series Analysis: Forecasting and Control. — San Francisco: Holden-Day, 1970.
9. **Мазепа В. С.** Погодичная реконструкция средней летней температуры воздуха на севере Западной Сибири с 1690 г. на основе данных о радиальном приросте деревьев // Сиб. экол. журн. — 1999. — № 2.
10. **Осколков В. А., Воронин В. И.** Экологические факторы, определяющие прирост сосны и лиственницы в Приольхонье // Сиб. экол. журн. — 2005. — № 4.
11. **Zielski A.** Wplyw temperatury i opadow na szerokosc slojow rocznych drewna u sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestric L.*) w Polsce // Sylwan. — 1996. — № 2.
12. **Поликарпов Н. П., Чебакова Н. М., Назимова Д. И.** Климат и горные леса Южной Сибири. — Новосибирск: Наука, 1986.
13. **Шашкин А. В., Ваганов Е. А.** Имитационная модель климатической изменчивости хвойных (на примере роста сосны в степной зоне) // Экология. — 1993. — № 5.
14. **Густокашина Н. Н., Максютова Е. В., Зайцева Ю. А.** Многолетние изменения гидротермических условий в бассейне реки Куда // Приречная и антропогенная динамика наземных экосистем. — Иркутск, 2005.
15. **Афанасьев А. Н.** Водные ресурсы и водный баланс бассейна оз. Байкал. — Новосибирск: Наука, 1976.