

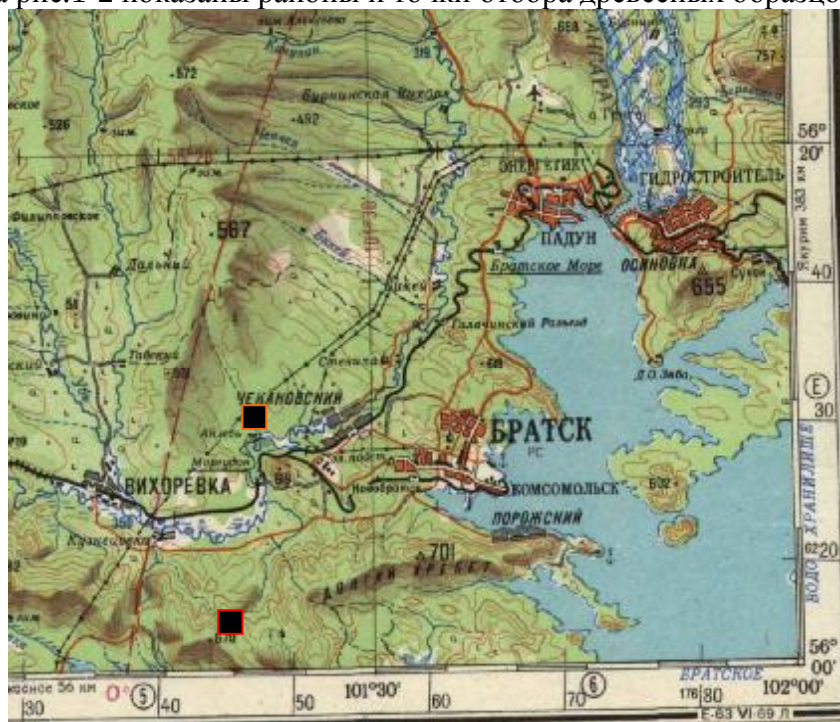
КЛИМАТИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ДИНАМИКИ РАДИАЛЬНОГО ПРИРОСТА ХВОЙНЫХ В ПРИАНГАРЬЕ

Балыбина А.С.

Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 664033, Иркутск,
Улан-Баторская,1, nadya@irigs.irk.ru

Для анализа связи динамики радиального прироста сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* Ledeb.) и лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) с климатическими параметрами рассмотрены древесно-кольцевые хронологии в двух районах Приангарья. Определены ведущие климатические факторы прироста – в Среднем Приангарье температура воздуха начала вегетационного периода, в Верхнем Приангарье – атмосферные осадки за гидрологический год. Методом линейной регрессии проведена реконструкция выявленных лимитирующих прирост климатических факторов.

Для выявления климатических факторов, влияющих на радиальный прирост хвойных пород деревьев в Приангарье исследования в двух районах – Среднее Приангарье и Верхнее Приангарье. На рис.1-2 показаны районы и точки отбора древесных образцов.

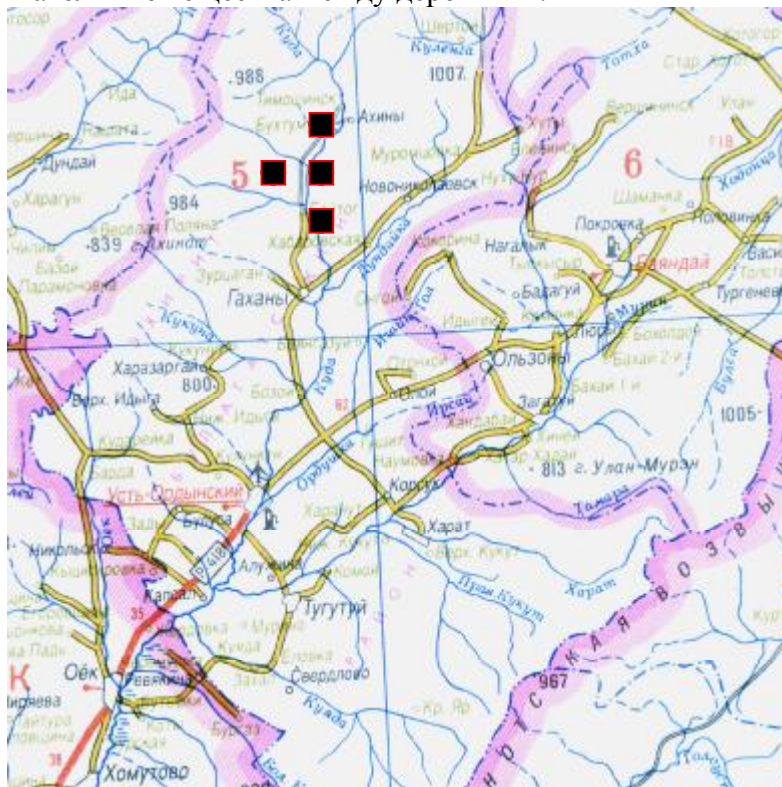


■ пробные площадки (места взятия образцов древесины)

Рис. 1. Карта-схема площади отбора древесных образцов в Среднем Приангарье

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, долголетием, экологической пластичностью и при этом высокой чувствительностью к воздействию внешних факторов на радиальный прирост. В силу эколого-биологических свойств сосна занимает самые теплые и вместе с тем наиболее засушливые местообитания, испытывая сильное влияние степей, что отражается на распространении степных видов в травяном покрове и подлеске. Предпочтение отдавалось редкостойным старым древостоям и

отдельно растущим деревьям, где по возможности исключается влияние такого фактора, как борьба за свет и питательные вещества между деревьями.



■ пробные площадки (места взятия образцов древесины)

Рис. 2. Карта-схема площади отбора образцов древесины в Верхнем Приангарье

Выбор участков для закладки пробных площадей предусматривал сопоставимость по основным таксационным и типологическим показателям лесных сообществ. Для получения сопоставимых данных пробные площади подбирались в близких между собой типах леса. Сходство учитывалось по следующим показателям: положение в рельефе, таксационные показатели древостоев сосны, механический состав и морфология почв. В таблице приведены краткие характеристики участков сбора дендрохронологического материала.

При построении обобщенных рядов в первую очередь произведено индексирование рядов ширины годовых 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 [1]. После этого датировка проверялась тестированием программами ARSTAN и COFECNA из программного пакета DPL-99 [2].

Высокие межсерийные коэффициенты корреляции (до 0,7-0,9) показывают синхронность в ответе отдельных деревьев на изменение климатических условий, что и явилось основанием для объединения индивидуальных древесно-кольцевых хронологий в обобщенные хронологии (рис.3).

Оценка степени влияния климатических факторов на древесный прирост осуществлялась с помощью функции отклика. Статистический анализ основан на оценке и интерпретации функций отклика [3]. 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).

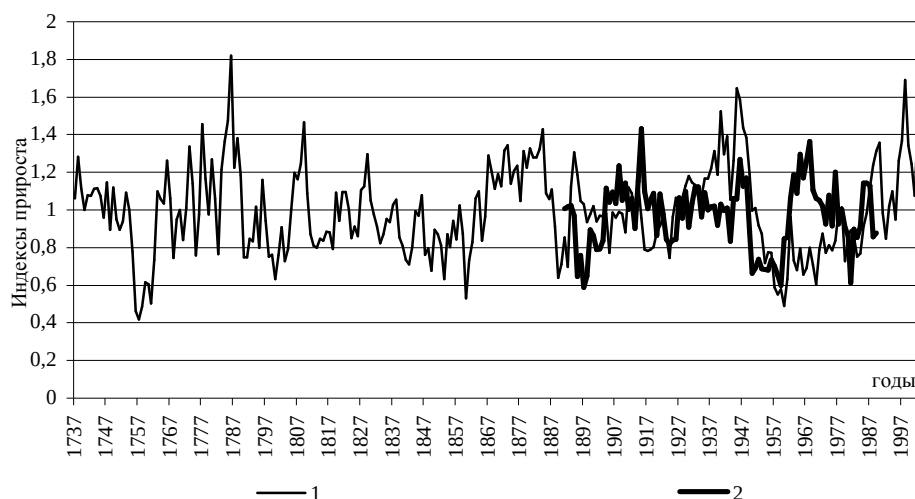


Рис. 3. Обобщенные стандартизированные хронологии сосны обыкновенной
1 – Среднее Приангарье; 3 – Верхнее Приангарье

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 оценивается по значению d-статистики (критерий Дарбина-Ватсона).

Для выделения из общей дисперсии прироста деревьев наиболее значимой части объясненной изменчивости под влиянием климатических факторов использовали метод главных компонент, дающий возможность 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 позволяет 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 [4]. В табл.1 показаны статистические характеристики древесно-кольцевых хронологий.

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.

Таблица 1.

**Статистические показатели стандартной (Std) и "остаточной" (Res)
древесно-кольцевых хронологий сосны**

Место обитание	Период, годы	K _s	SNR	σ,%	AC		R	Доли дисперсии, объясненные главными компонентами, %			ΣPC ₁₋₃ , %
					Or1	Or2		PC1	PC2	PC3	
Верхнее Приангарье											
Куда1 Std-хронол.	1891-1989	0,12	0,8	0,18	0,65	0,19	0,58	50	34	15	99
Куда1 Res-хронол.	1892-1989	0,14	0,6	0,13	0,07	0,16	0,56	46	34	19	99
Куда2 Std-хронол.	1891-1989	0,12	3	0,2	0,68	0,17	0,6	50	16	15	81
Куда2 Res-хронол.	1893-1989	0,14	1,4	0,13	0,02	0,16	0,55	38	23	14	75
Куда3 Std-хронол.	1895-1989	0,18	0,55	0,22	0,46	0,18	0,5	45	32	21	98
Куда3 Res-хронол.	1896-1989	0,19	0,2	0,17	-0,21	0,03	0,43	41	33	24	98
Куда4 Std-хронол.	1893-1989	0,19	0,7	0,42	0,84	-0,07	0,6	48	36	14	98
Куда4 Res-хронол.	1894-1989	0,23	0,2	0,2	-0,06	0,17	0,5	37	33	28	98
Среднее Приангарье											
Братск сосна генерал. Std-хронол.	1737-2003	0,14	4,4	0,23	0,68	0,1	0,6	41	22	10	73
Братск сосна генерал. Res-хронол.	1739-2003	0,17	2	0,16	0,01	-0,06	0,49	28	19	12	59

K_s – коэфф. чувствительности, SNR – сигнал-шум, σ – среднее квадратичное отклонение, AC – автокорреляция (OR_{1,2} – первого и второго порядка), R – межсерийный коэфф. корреляции, PC – главная компонента, ΣPC_{1-3} – сумма трех главных компонент

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". Процедуру оценки функции отклика проводили по расчетам корреляции между индексами прироста и ежемесячными значениями температуры воздуха и атмосферных осадков за период с июня предыдущего года по август текущего года (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 было сделано при использовании метеорологических рядов наблюдений по метеостанциям Братск и Вихоревка – для Среднего Приангарья и Усть-Ордынский, Бохан, Баяндай – для Верхнего Приангарья. Погодичные изменения температуры воздуха и атмосферных осадков за отдельные месяцы по метеостанциям для каждого района хорошо коррелированы (для температуры от 0,91 до 0,95, для осадков – от 0,55 до 0,72). Также в качестве климатических и гелиофизических факторов использовались данные по солнечной активности (числа Вольфа с 1700 по 2000 гг.) и повторяемости форм циркуляции атмосферы (1891-2002 гг.).

Мерой влияния климатических факторов на рост являются коэффициенты регрессии, отражающие функцию отклика. Для дендроклиматического анализа образцов древесины Среднего Приангарья использовались данные по температуре воздуха и осадкам на станциях Братск и Вихоревка. На рис. 4 (а,б) и 5 (а,б) представлен отклик прироста сосны и лиственницы на изменение средней месячной температуры воздуха и атмосферных осадков за отдельные месяцы текущего и предыдущего года на метеорологических станциях Братск и Вихоревка соответственно.

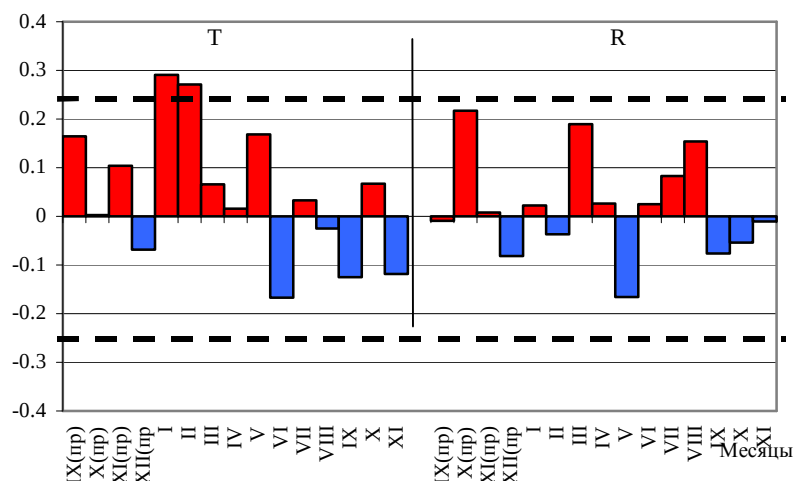


Рис.4а. Отклик прироста лиственницы на температуру воздуха (Т) и суммы атмосферных осадков (R) на территории Среднего Приангарья (м/с Братск)

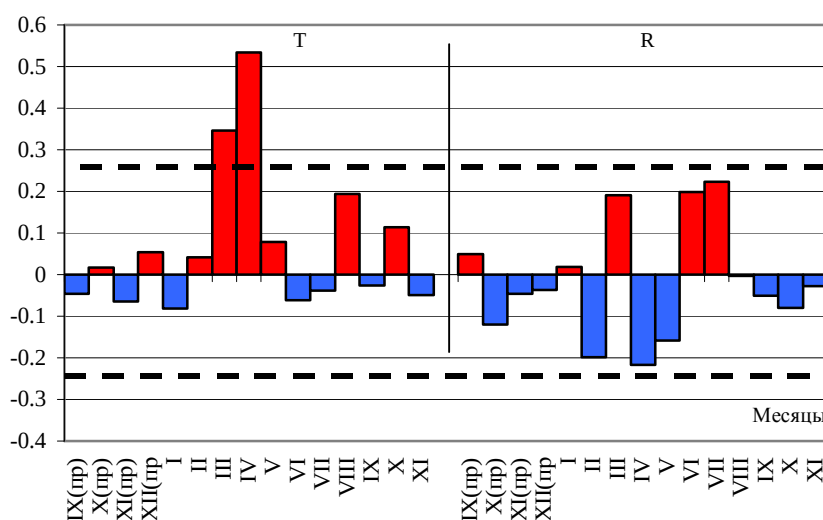


Рис.4б. Отклик прироста сосны на температуру воздуха (Т) и суммы атмосферных осадков (R) на территории Среднего Приангарья (м/с Братск).

В Братском районе 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 [5], и большие суммы осадков в мае могут оказывать негативное влияние на рост лиственницы, т.к. в мае почва еще достаточно увлажнена зимними осадками.

Предварительные результаты анализа функций отклика роста лиственницы на температуру воздуха представляют значительный интерес. Однако неясен экофизиологический механизм положительного влияния повышенных зимних температур на прирост лиственницы, хотя то же время, подобная связь неоднократно фиксировалась в пределах таежной зоны Европы [6,7].

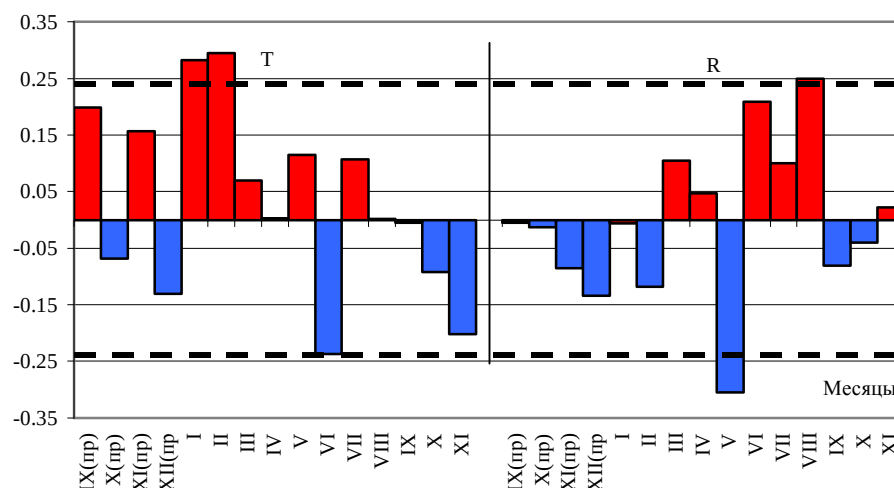


Рис.5а. Отклик прироста лиственницы на температуру воздуха (Т) и суммы атмосферных осадков (R) на территории Среднего Приангарья (м/с Вихоревка).

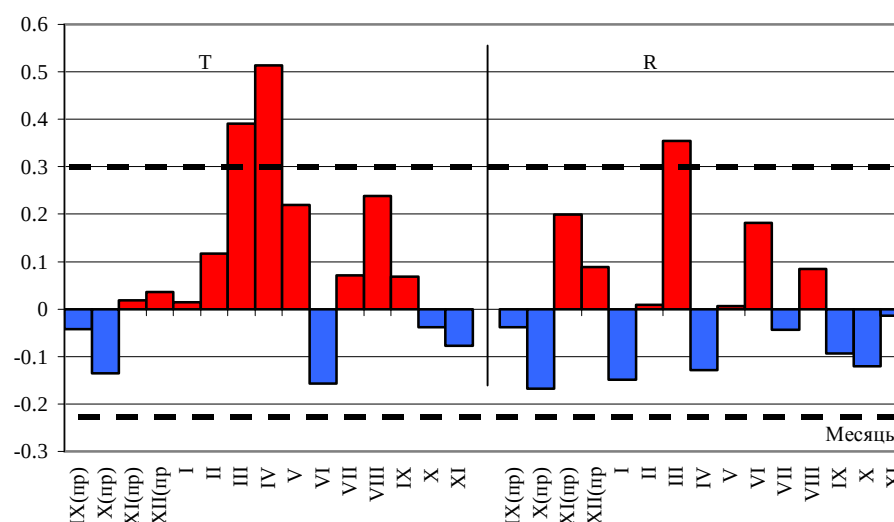


Рис. 5б. Отклик прироста сосны на температуру воздуха (Т) и суммы атмосферных осадков (R) на территории Среднего Приангарья (м/с Вихоревка).

Неблагоприятные условия для роста сосны и лиственницы создаются при повышении сумм атмосферных осадков в мае и высоких температурах июня, в результате чего происходит повышение относительной влажности воздуха, что в свою очередь приводит к снижению интенсивности транспирации [8].

В Верхнем Приангарье функции отклика (рис. 6а, 6б) имеют небольшую устойчивую отрицательную связь динамики прироста с суммами осадков за март текущего года и средней месячной температурой сентября текущего года, а также положительную - на температуры июля. Присутствует, однако, и положительная связь с суммами осадков за гидрологический год, и с суммами осадков за июль. Отрицательный отклик имеет прирост сосны на высокие температуры июня, т.к. в условиях недостаточного увлажнения большие температуры воздуха в июне способствуют потере влаги из почвы в середине вегетационного периода.

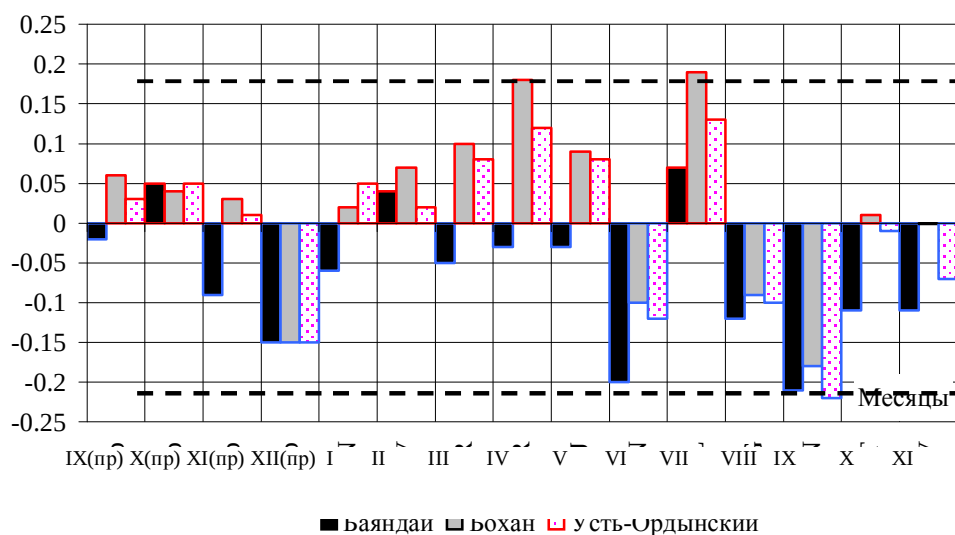


Рис. 6а. Отклик прироста сосны на температуру воздуха на различных станциях Верхнего Приангарья

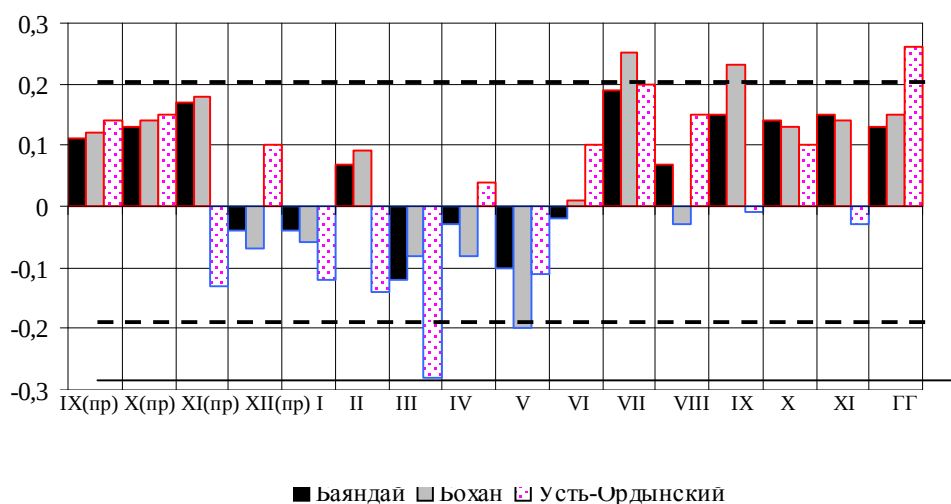


Рис. 6б. Отклик прироста сосны на суммы атмосферных осадков на различных метеостанциях Верхнего Приангарья.

Представлялось также интересным проанализировать связь температуры почвы на различных глубинах с приростом годовичных колец. Для этого были рассчитаны коэффициенты корреляции между индексами годовичных колец обобщенных хронологий сосны и лиственницы и средней годовой температурой почвы на глубинах 20, 40, 60, 160, 320 см на станциях Братск и Баяндай. Однако все коэффициенты оказались малозначимыми. Лишь для одной из четырех площадок, находящихся в бассейне р.Куда коэффициенты корреляции прироста годовичных колец и температуры почвы на глубине 60 см в Баяндае превышали уровень значимости. Возможно, это объясняется тем, что данная пробная площадка находится в пойменном участке, где отмечаются наименьшие глубины промерзания в данном районе [9].

Атмосферная циркуляция является комплексным гидрометеорологическим показателем. Для анализа связи прироста древесных колец с атмосферной циркуляцией были выбраны формы атмосферной циркуляции, классифицированные А.А.Гирсом – западная (W), восточная (E), меридиональная (C). Система Вангенгейма-Гирса ориентирована на выделение длинных термобарических волн в свободной атмосфере. Развитие эпохи западной формы циркуляции наблюдалось в 1900-1928 гг., затем была эпоха восточной циркуляции 1929-1939 гг., эпоха меридиональной – с 1943 по 1947, эпоха восточной – 1952-1958 гг, и далее до 1963 гг. чередование эпох [10]. Многими исследователями отмечалась зависимость

прироста древесных колец от повторяемости типов циркуляции атмосферы [11]. На рис. 7 представлен многолетний ход повторяемости процессов западной формы циркуляции совместно с динамикой прироста лиственницы. Как видим, тренды западной формы циркуляции и динамика приростов имеют практически одинаковое направление и угол наклона; тренды восточной формы и динамики приростов имеют противоположное направление. Выявленная связь приростов с западной формой циркуляции свидетельствует о подчинении роста деревьев глобальным природным процессам.

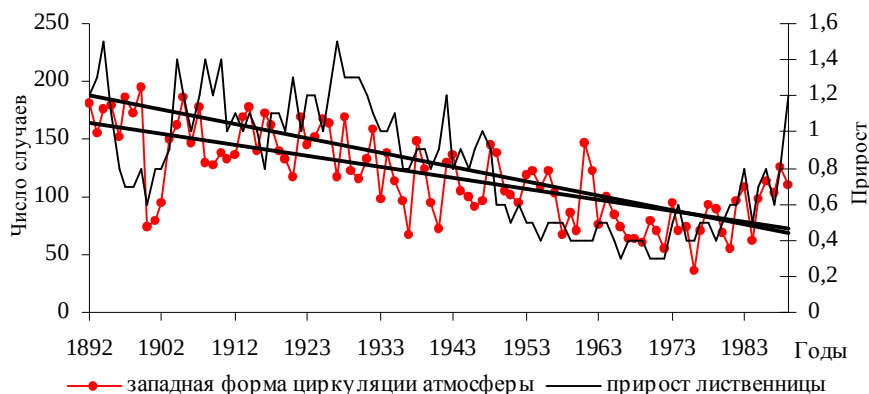


Рис. 7. Западная форма циркуляции атмосферы и динамика годового радиального прироста лиственницы

Одной из характерных черт изменчивости прироста древесных пород является наличие регулярных и устойчивых циклов в многолетних колебаниях прироста. Выявление устойчивых циклических колебаний по дендрохронологическим данным способствует определению достоверных связей между приростом и циклическими изменениями внешних условий (климат, солнечно-земные связи и др.), при анализе которых можно выявить причины появления таких циклов. Установление циклических закономерностей открывает возможность статистически достоверного прогноза климатически обусловленной динамики прироста деревьев и практического применения результатов дендроклиматических исследований. Современные теоретические и методические основы случайных стационарных процессов открывают возможность практического применения спектральной теории в исследованиях частотной структуры временных рядов, построенных по дендрохронологическим данным. Проведенные расчеты по выявлению содержащихся в древесно-кольцевых хронологиях циклов показали, что прирост имеет устойчивую цикличность, отражающую цикличность солнечной активности, и повторяемости форм циркуляции атмосферы. Внутривековые циклы в приросте совпадают с общеизвестными циклами: брикнеровским (около 31 года) и солнечным (около 11 лет). Брикнеровский цикл увязывают с периодами увлажнения и цикличностью уровня озер в Сибири (35 лет). В хронологиях Среднего Приангарья и Приольхонья присутствуют более мелкие циклы (6-5-4-2 года). В хронологиях Верхнего Приангарья отсутствуют мелкие циклы, продолжительностью менее 10 лет. Это можно объяснить тем, что 2-3-летние циклы часто являются следствием физиологических причин роста деревьев, возможно на территории бассейна р. Куда присутствуют особые условия биологического роста хвойных. В то же время здесь на всех пробных площадях проявляется 32-летний цикл, который близок к Брикнеровскому циклу колебаний увлажнения и уровня озер в Сибири.

Дендроклиматические реконструкции являются одним из наиболее надежных методов восстановления климатических условий в прошлом. В последнее время им уделяется особое внимание в связи с глобальным потеплением климата и необходимостью оценки роли естественной и антропогенной составляющих, ответственных за это потепление. По обобщенным древесно-кольцевым хронологиям двух местоположений, была предпринята попытка реконструкции климатических элементов методом линейной регрессии, что позволяет получить достаточно высокие и значимые связи между изменчивостью прироста и характеристиками климата. На рис. 8 представлен реконструированный за 260 лет ряд

температуры воздуха и реально измеренные значения температуры воздуха, сглаженные по 3-летиям.

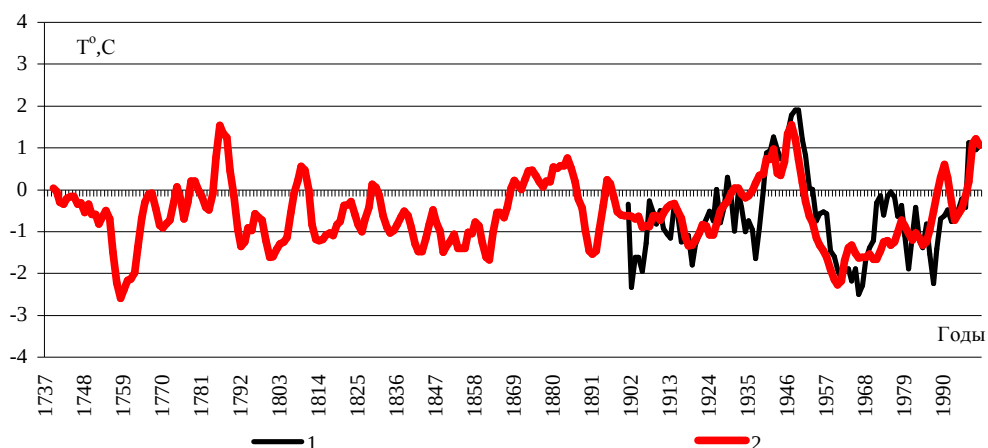


Рис.8. Фактические (1) и реконструированные (2) средние температуры воздуха апреля, сглаженные по 3-летиям (Среднее Приангарье, м/с Братск).

Для таежных местоположений Среднего Приангарья реконструируемым климатическим параметром выбрана средняя месячная температура апреля, как параметр, на который прирост годовых колец показал наиболее значимый отклик. 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 тайги за период с 1737 по 2003 гг. показывает, что оба ряда имеют сходную динамику высокочастотных изменений. При сопоставлении 3-летних скользящих средних наблюдаются совпадения в многолетних изменениях температуры. Судя по реконструированным данным средней месячной температуры воздуха минимальные температуры наблюдались в середине 20-го века, и в конце 18-го, когда средняя температура апреля была близка к $-2,5^{\circ}\text{C}$, что ниже климатической нормы более чем на $1,5^{\circ}\text{C}$.

Для зоны подтайги качество моделей при реконструкции сумм атмосферных осадков за июнь и гидрологический год несколько ниже (коэффициент регрессии 0,35 и 0,33 соответственно). Однако и это свидетельствует о том, что реконструированные значения довольно хорошо описывают колебания температуры воздуха за период верификации. По древесно-кольцевым хронологиям бассейна р. Куды были восстановлены ряды атмосферных осадков за гидрологический год в Верхнем Приангарье (рис. 9).

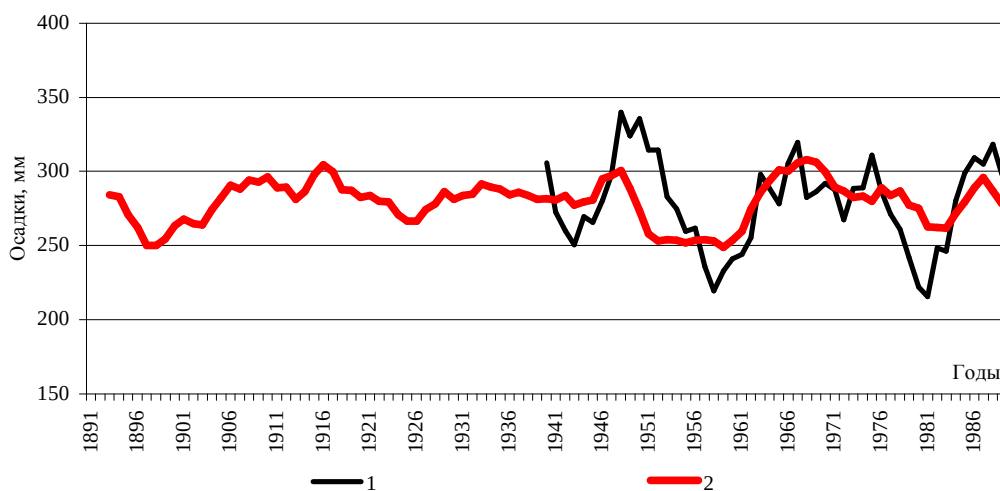


Рис.9. Фактические (1) и реконструированные (2) суммы атмосферных осадков за гидрологический год, сглаженные по 3-летиям (Верхнее Приангарье, м/с Усть-Ордынский).

Реконструкция сумм атмосферных осадков за гидрологический год довольно хорошо совпадает с экспериментально измеренными значениями, повторяя цикличность фактических сумм осадков. Связь прироста с осадками за гидрологический год, объясняется тем, что в этот период (с сентября по август) в основном осадки определяют начальное и текущее влагосодержание в почве [12]. Погодичные колебания осадков значительны, однако длительные (3-5-летние скользящие) хорошо согласуются с длительными изменениями приведенных климатических параметров.

В результате работы получены следующие выводы:

1. Высокие межсерийные коэффициенты корреляции индивидуальных кольцевых хронологий дали возможность их объединения в обобщенные хронологии, которые показали значительную чувствительность к действию климатических факторов.

2. Методами статистического анализа установлено доминирующее влияние на прирост хвойных пород в Верхнем Приангарье – атмосферного увлажнения, в Среднем Приангарье – температуры воздуха.

3. Выявлена связь радиального прироста сосны и лиственницы с формами атмосферной циркуляции. Западный перенос, являющийся преобладающим в Приангарье положительно влияет на рост древесных растений. При этом формируются оптимальные для жизни хвойных пород деревьев гидротермические условия.

4. В приросте хвойных в Приангарье выделен ряд циклов – 2- 4, 6-12, 22-35 лет, которые отражают динамику атмосферного увлажнения в регионе, и значительное влияние солнечной активности на прирост ширины годичных колец.

5. Выявлены лимитирующие климатические факторы радиального прироста. На территории Среднего Приангарья это среднемесячная температура апреля, в Верхнем Приангарье – суммы осадков за гидрологический год.

6. Статистические параметры множественных регрессионных моделей реконструкции ведущих климатических факторов прироста показали, что наиболее качественная модель получена для температуры апреля таежных районов Среднего Приангарья (коэффициент регрессии 0.44).

7. Наблюдаемое соответствие в реконструированных и инструментально измеренных значениях климатических параметров, подтверждается данными спектрального анализа, который показал, что за период реконструкции структура циклических колебаний не претерпела существенных изменений.

Литература

1. Rinn F. TSAP. Version 3.0. Reference manual. Computer program for time series analysis and presentation. Copyright © 1989-1996, Frank Rinn Distribution, Heidelberg, Germany
2. Holmes R.L. Dendrochronology program library – users manual. Laboratory of Tree-Ring Research, Univ. of Arizona USA. – 1998.
3. Fritts H.C. Tree-ring and climate. – London; New-York; San Francisco: Acad. Press. – 1976.
4. Wigley T.M., Briffa K.R., Jones P.D. Journal of Climate and Applied Meteorology. – 1984. – № 23.
5. Беркин Н.С. Районирование территории Предбайкалья по степени увлажнения и теплообеспеченности // Доклады Института географии Сибири и Дальнего Востока. – 1971. – Вып. 32. – С. 33-40.
6. Oleksyn J., Tjoelker M.G., Reich P.B. Adaptation to changing environment in Scots pine populations across latitudinal gradient. // Silva Fennica, Vol. 31, Num. 2, 1997 – P. 193-213.
7. Zielski A. Wplyw temperatury i opadow na szerokosc slojow rocznych drewna u sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) w Polsce. // Sylwan, Num. 2, 1996 – S. 71-80.
8. Поликарпов Н.П., Чебакова Н.М., Назимова Д.И. Климат и горные леса Южной Сибири. – Новосибирск: Изд. Наука, 1986. – 226 с.

9. Лещиков В.Ф. Мерзлые породы Приангарья и Прибайкалья. –Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1978. – 142 с.
10. Гирс А.А. Макроциркуляционный метод долгосрочных метеорологических прогнозов. – Л.: Гидрометеиздат, 1978. – 168 с.
11. Пушин А.В., Чернавская М.М., Черных Н.Б. Климатические экстремумы и аномалии прироста древесины (по историческим данным и материалам памятников XVI-XIX вв. севера Русской равнины). Российская археология. – 2000. – №4. – С. 86-108.
12. Шашкин А.В., Ваганов Е.А. Имитационная модель климатической изменчивости хвойных (на примере роста сосны в степной зоне) // Экология. –1993.– №5.

CLIMATIC FACTORS OF RADIAL GROWTH DYNAMICS OF CONIFEROUS SPECIES IN THE ANGARA REGION

Balybina A.S.

The relationship of the radial growth dynamics for Pinus sylvestris Ledeb. and Larix sibirica Ledeb. with climatic factors over the Angara region's territory was investigated from their wood-ring chronologies in two areas. Key climatic factors of growth were identified for different physical-geographical conditions of the Angara region: monthly mean temperature of April (Middle Angara), and amounts of precipitation for a hydrological year (Upper Angara). The method of linear regression was used to reconstruct the limiting factors that were identified.