

А. Н. НИКОЛАЕВ, В. В. САМСОНОВА

**ДЕНДРОКЛИМАТИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ ЮЖНОЙ ЯКУТИИ
В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ОБЪЕКТОВ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА**

На основании древесно-кольцевых хронологий анализируется различная реакция сосны и лиственницы на сходные климатические параметры исследуемого региона (температуру воздуха и почвы, количество осадков и др.). С помощью дендроиндикационного метода определяется воздействие объектов топливно-энергетического комплекса Южной Якутии на лесные экосистемы, особенно сильно проявляющееся в период раннего схода снежного покрова, когда значительные площади загрязняются пылью. Пыль, аккумулируясь на поверхности снега, ускоряет процесс снеготаяния, влияя на гидротермический режим почвогрунтов, что отражается на сезонной динамике роста древесных растений.

Tree-ring chronologies were used to analyze the different response of pine and larch to similar climatic parameters of the study region (air and soil temperature, amount of precipitation, etc.). The dendroindication method was employed to determine the influence of the facilities of the fuel and energy complex in Southern Yakutia on forest ecosystems which is most pronounced during the early melting away of snow cover when significant surface areas are becoming polluted with dust. Accumulating on the snow surface, dust speeds up the snow melting process thus influencing the hydrothermal regime of soils, which affects the seasonal dynamics of woody plant growth.

Природные экосистемы Южной Якутии в последние десятилетия подвергаются интенсивному антропогенному влиянию. В частности, на динамику развития лесных фитоценозов воздействует топливно-энергетический комплекс (ТЭК). Хотя видимые изменения в росте и развитии лесов трудно выявить в короткие сроки исследований, однако определить интенсивность влияния ТЭК на радиальный прирост древесных растений можно методами дендроклиматического анализа.

Дендроиндикационные методы, основанные на анализе ежегодного прироста, имеют ряд преимуществ. Во-первых, древесно-кольцевые хронологии позволяют на достаточно высоком уровне выявить и количественно оценить реакцию древесных пород на изменения климатических факторов — температуру воздуха и почвы, количество осадков и др. Во-вторых, при помощи таких хронологий можно производить непрерывные, точно датированные, длительные и с высоким разрешением (год, месяц, декада) количественные реконструкции многих климатических параметров. В-третьих, деревья имеют значительный срок жизни, что позволяет строить длительные хронологии. (Установлено, что лиственницы на севере живут свыше 1000 лет [1], а в Центральной Якутии — до 600 лет [2, 3].) В-четвертых, к настоящему времени уже опубликован ряд работ по мониторингу антропогенного воздействия на лесные экосистемы при помощи методов дендрохронологии [4–6].

В Южной Якутии значительные по площади участки природных технических комплексов (ПТК) подвергаются промышленному загрязнению, особенно пылью, источниками которой являются: с конца 1940-х гг. — Чульманская ТЭС (пос. Чульман); с середины 1970-х — Нерюнгринский разрез (окрестности г. Нерюнгри); с конца 1970-х — железная дорога (Тында–Беркаит); с 1980-х гг. — «пиковая» котельная (г. Нерюнгри) и Нерюнгринская ГРЭС (пос. Серебряный Бор).

С середины 1970-х гг. леса в районе исследований подвергаются наиболее интенсивному антропогенному влиянию. Основной фактор промышленного воздействия на динамику температуры и влажности деятельного слоя — запыление в зимний период (около 50 % годового объема пыли), когда происходит загрязнение атмосферного воздуха, а затем снежного покрова. Этому способствует разработка Нерюнгринского угольного разреза, и особенно запыляются участки, расположенные к юго-востоку от него, вследствие северо-западных ветров. Пыль, аккумулируясь на протяжении всей зимы на поверхности снежного покрова и понижая его альбедо, ускоряет процесс снеготаяния, что влияет на гидротермический режим почвогрунтов в весенний период. В результате изменяется микроклимат почв. Это сказывается на ходе сезонного роста деревьев, т. е. на их радиальном приросте.

Цель данной работы — изучение влияния источников запыления на радиальный прирост лиственницы и сосны.

Леса района исследований относятся к алданскому горному среднетаежному округу, расположенному в северной части предгорий Станового хребта [7]. В зоне влияния Нерюнгринского ПТК выделено семь дендроклиматических участков (рис. 1), где исследовался радиальный прирост сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и лиственницы каяндера (*Larix cajanderi* Mayr) (рис. 2).

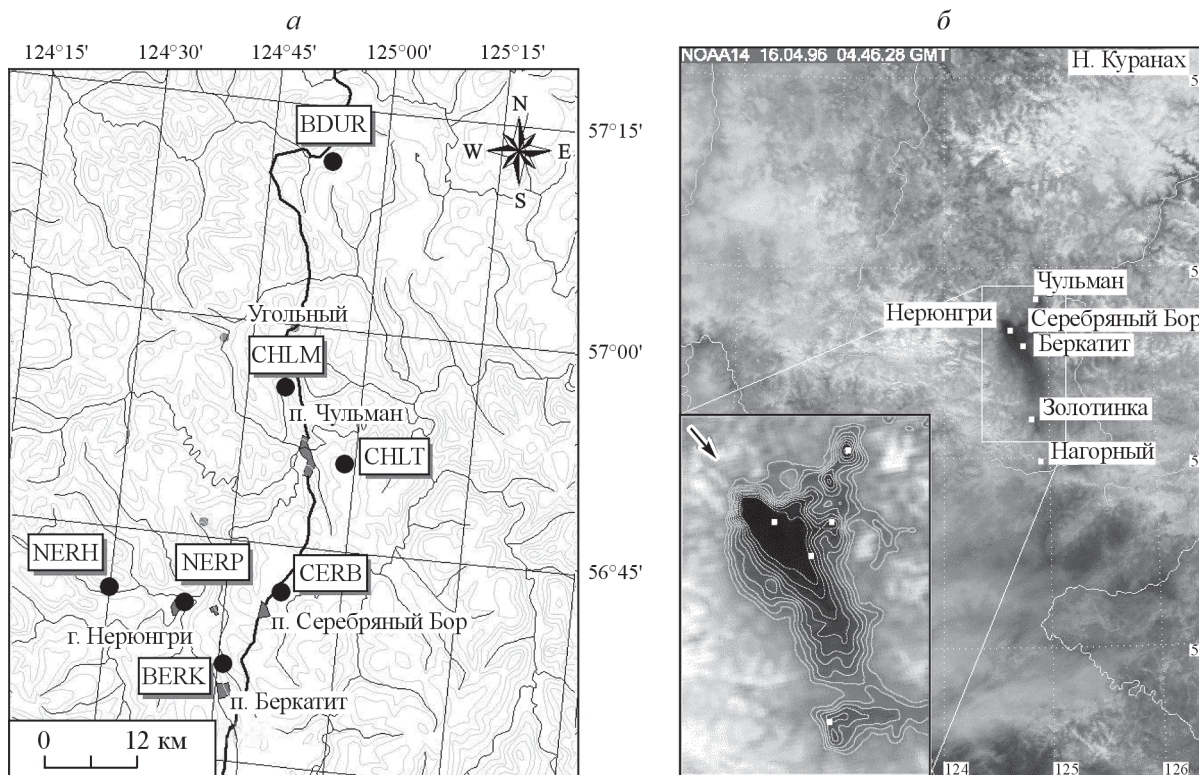


Рис. 1. Район исследований.

a — участки отбора древесных кернов (кружки) и их коды (буквенные обозначения);
б — снимок со спутника (запыленность района).

Методика построения древесно-кольцевых хронологий хорошо разработана [8–11]. Собранные материалы полностью соответствуют общепринятым при дендроклиматическом анализе требованиям [10]. На каждом участке для построения хронологий отбирались старые и средневозрастные деревья (в среднем 24 дерева). Измерения ширины годичных колец производились на полуавтоматической установке LINTAB V-3.0 с точностью до 0,01 мм [12]. Путем сочетания кросс-корреляционного анализа [13] (специальный пакет дендрохронологических исследований DPL-98 [14]) и графической перекрестной датировки [15, 16] (программный пакет TSAP-V3.5 [12]) определялись относительная или абсолютная даты индивидуальных серий, выявлялись ложные и выпавшие кольца. Для оценки правильности датировки использовалась программа COFESHA [13].

Реакция древесных растений на климатические факторы оценивалась функцией отклика. Анализ функций и их широкое использование как статистического метода в дендроклиматологии обоснованы в работах Г. Фриттса [8, 17] и широко применяются многими исследователями в России. Функция отклика может быть представлена как частными коэффициентами корреляции между приростом и значениями климатических факторов, так и множественной регрессионной моделью, объясняющей изменчивость индексов радиального прироста деревьев на основании климатических факторов (температура и осадки) и прироста дерева в предшествующие годы:

$$y_t = a_0 + \sum_{i=1}^N a_i x_i + a_{N+1} y_{t-1} + a_{N+2} y_{t-2} + \varepsilon,$$

где y_t — индекс прироста в год t ; x_i — температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$) и количество осадков (мм) в год t или $t - 1$ год; ε — необъясненная ошибка; a_i — коэффициент регрессии ($i = 1, \dots, N + 2$).

При анализе функции отклика использовались данные метеостанции Чульман. Территория Чульманского плато в целом характеризуется резко континентальным климатом. Радиационный баланс с ноября по февраль отрицательный. Показатели основных метеорологических характеристик зависят от ландшафтных условий и варьируют в широких пределах: среднегодовые температуры воздуха — от $-7,5$ до -12 $^{\circ}\text{C}$, среднемноголетние суммы осадков — от 430 до 665 мм. Более 50 % осадков выпадает в летний период года, а около 10 % — в зимний. Средняя годовая температура воздуха $-9,5$ $^{\circ}\text{C}$. По данным многолетних наблюдений [18] на площадке «аэропорт» средняя месячная температура января $-36,7$ $^{\circ}\text{C}$, июля $15,8$ $^{\circ}\text{C}$.

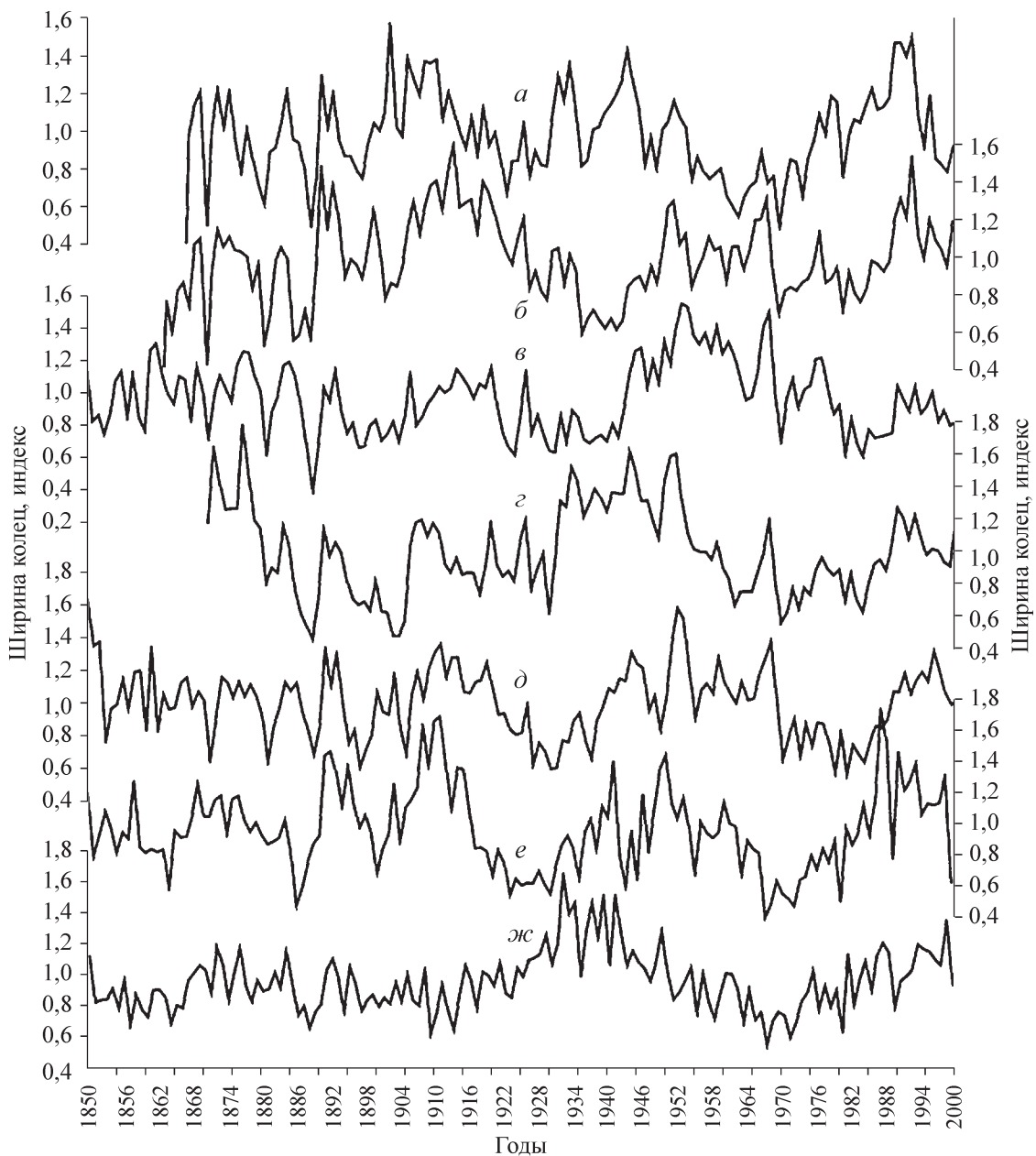


Рис. 2. Обобщенные древесно-кольцевые хронологии по сосне (а — NERH, б — NERP, в — CHLM, г — CHLT, д — BERK) и по лиственнице (е — CERB, ж — BDUR).

Преобладающее направление ветра практически во все месяцы (кроме июля) северо-западное. Штилевая погода (около 50 % и более) характерна для декабря и января, в суточном ходе она преобладает в вечернее время. Продолжительность периода со снежным покровом 217 дней. Самая ранняя дата появления снега — 31 августа, а образования устойчивого снежного покрова — 24 сентября, средняя, соответственно, 23 сентября и 8 октября, поздняя — 20 и 27 октября. Самая ранняя дата разрушения устойчивого снежного покрова — 19 апреля, его схода — 24 апреля, средняя, соответственно, 4 и 10 мая, поздняя — 25 мая и 4 июня. Среднее значение наибольшей за зиму декадной высоты снежного покрова по постоянной рейке — 54 см, максимальной — 115 см (начало апреля), минимальной — 27 см (середина марта), при этом в лесу соответственно 56, 90 и 31 см.

Путем анализа основных статистических характеристик древесно-кольцевых хронологий участков (табл. 1) отмечен высокий межсерийный коэффициент корреляции: 0,57–0,77 в стандартных хронологиях и 0,57–0,67 в остаточных. Чувствительность для стандартной хронологии 0,15–0,18, для остаточной — 0,16–0,22. На всех участках автокорреляция четко выражена (от 0,57 до 0,71). Доля суммарной дисперсии первой главной компоненты (ГК1) находится в пределах от 37 до 61 % в стандартных хронологиях и от 35 до 47 % — в остаточных.

Таблица 1

Статистические характеристики древесно-кольцевых хронологий

Код участка	Порода	Чувствительность	Средне-квадратичное отклонение	Межсерийный коэффициент корреляции	Автокорреляция 1-го порядка	Доля дисперсии первой главной компоненты (ГК1), %
CHLM	P	0,17	0,26	0,64	0,71	45,23
		0,20	0,18	0,61	0,02	39,83
CHLT	P	0,15	0,29	0,77	0,71	60,77
		0,16	0,15	0,62	0,03	41,50
NERH	P	0,16	0,22	0,71	0,60	52,52
		0,19	0,17	0,57	0,03	34,55
NERP	P	0,15	0,22	0,69	0,64	50,06
		0,18	0,16	0,62	0,04	39,60
BERK	P	0,16	0,22	0,71	0,62	51,36
		0,17	0,16	0,63	0,02	41,71
CERB	L	0,18	0,24	0,65	0,57	46,98
		0,22	0,19	0,67	-0,06	47,28
BDUR	L	0,16	0,22	0,57	0,61	36,97
		0,19	0,17	0,61	0,03	39,43

Примечание. P – сосна, L – лиственница. Светлый шрифт – данные по стандартным хронологиям, полужирный – по остаточным.

Таблица 2

Коэффициенты корреляций между хронологиями сосны и лиственницы на участках в районе Нерюнгри по периодам

Участки	CHLM	CHLT	NERH	NERP	BERK	CERB	BDUR
1900–1924 гг.							
CHLM	1,00	0,56	0,32	0,45	0,37	0,19	0,02
CHLT	0,56	1,00	0,21	0,57	0,40	-0,01	-0,23
NERH	0,32	0,21	1,00	0,43	0,77	0,40	-0,10
NERP	0,45	0,57	0,43	1,00	0,72	0,01	-0,28
BERK	0,37	0,40	0,77	0,72	1,00	0,17	-0,27
CERB	0,19	-0,01	0,40	0,01	0,17	1,00	0,53
BDUR	0,02	-0,23	-0,10	-0,28	-0,27	0,53	1,00
1925–1949 гг.							
CHLM	1,00	0,60	0,59	0,75	0,74	0,08	0,06
CHLT	0,60	1,00	0,68	0,66	0,57	0,12	0,30
NERH	0,59	0,68	1,00	0,65	0,69	0,05	0,20
NERP	0,75	0,66	0,65	1,00	0,44	0,03	0,10
BERK	0,74	0,57	0,69	0,44	1,00	0,02	-0,11
CERB	0,08	0,12	0,05	0,03	0,02	1,00	0,60
BDUR	0,06	0,30	0,20	0,10	-0,11	0,60	1,00
1950–1974 гг.							
CHLM	1,00	0,62	0,52	0,58	0,70	-0,03	-0,08
CHLT	0,62	1,00	0,50	0,77	0,76	-0,09	-0,33
NERH	0,52	0,50	1,00	0,50	0,59	0,21	-0,09
NERP	0,58	0,77	0,50	1,00	0,79	-0,08	-0,29
BERK	0,70	0,76	0,59	0,79	1,00	0,01	-0,12
CERB	-0,03	-0,09	0,21	-0,08	0,01	1,00	0,65
BDUR	-0,08	-0,33	-0,09	-0,29	-0,12	0,65	1,00
1975–1999 гг.							
CHLM	1,00	0,77	0,61	0,75	0,55	0,05	-0,26
CHLT	0,77	1,00	0,59	0,79	0,64	-0,06	-0,39
NERH	0,61	0,59	1,00	0,77	0,36	0,19	-0,09
NERP	0,75	0,79	0,77	1,00	0,67	0,14	-0,05
BERK	0,55	0,64	0,36	0,67	1,00	-0,22	-0,34
CERB	0,05	-0,06	0,19	0,14	-0,22	1,00	0,75
BDUR	-0,26	-0,39	-0,09	-0,05	-0,34	0,75	1,00

Между древесно-кольцевыми хронологиями осуществлен корреляционный анализ для последних 100 лет радиального прироста. Временные ряды разделены на четыре равных периода по 25 лет (табл. 2): первый — 1900–1924 гг., второй — 1925–1949, третий — 1950–1974, четвертый — 1975–2000 гг. Хронологии выявляют высокую видовую и пространственную зависимость радиального прироста. Хронологии по лиственнице не коррелируют с радиальным приростом по сосне. В начале XX в. корреляция между двумя хронологиями по лиственнице составляла 0,53, однако за последние 25 лет она увеличилась до 0,75.

Анализ корреляций хронологий сосны выявил, что до 1925 г. участок BERK (сосна) имел значительную корреляционную связь с участками около г. Нерюнгри — NERN и NERP, ввиду относительно близкого их расположения. С чulyманскими участками (CHLM, CHLT) в начале века связь незначима, с 1950 по 1975 г. появляется значимая корреляционная связь, видимо, из-за воздействия единственного в этот период источника загрязнения — автомобильной дороги. Однако с 1975 по 2000 г. эта связь уменьшается до 0,55–0,64, очевидно, за счет усиления влияния г. Нерюнгри на участок BERK в последние десятилетия.

За последние 25 лет корреляция участка BERK с участком NERP, расположенным рядом с «пиковой» котельной Нерюнгри, достаточно высока, в то время как с участком NERN, который находится в четырех километрах западнее Нерюнгринского разреза, около руч. Холодникан, уменьшается.

Известно, что геохимические изменения на территории Южной Якутии, связанные с промышленным запылением, фиксируются в ландшафтных комплексах, расположенных на расстоянии около 15–20 км от объектов ТЭК [14]. С учетом преобладающего северо-западного направления ветра отмечено влияние антропогенного фактора на радиальный прирост сосны, особенно в последние годы. Нами рассмотрен радиальный прирост сосны и лиственницы в зависимости от температуры воздуха и осадков в течение последних 75 лет.

Для сравнения интенсивности влияния климатических факторов весь период метеорологических наблюдений с 1935 г. был разделен на три интервала. Первый (1935–1949 гг.) соответствует доиндустриальному периоду; второй (1950–1975 гг.) — период начала освоения данного района; третий (1975–1989 гг.) — период интенсивного антропогенного воздействия и развития ТЭК.

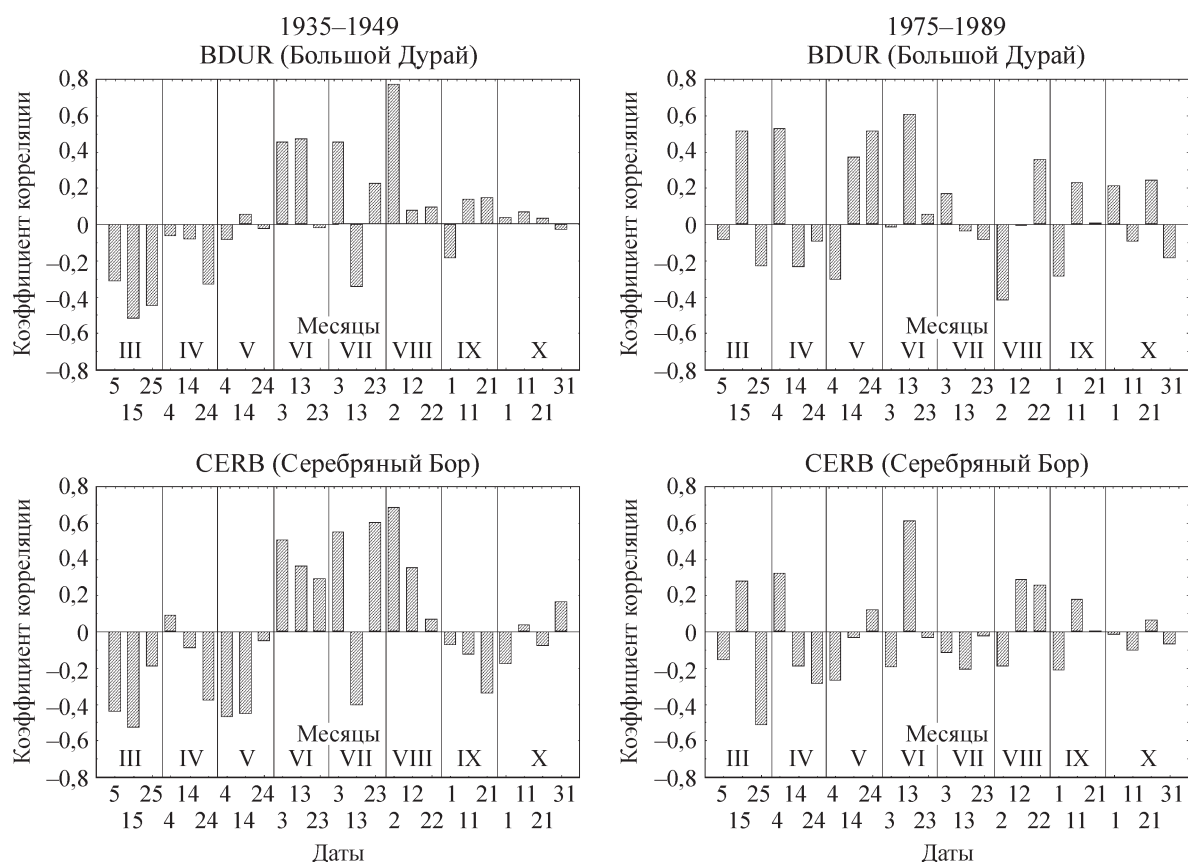


Рис. 3. Коэффициенты корреляций древесно-кольцевых хронологий по лиственнице BDUR и CERB с температурой воздуха по декадам.

Как показал анализ функции отклика, различные древесные виды по-разному реагируют на температуру воздуха и количество выпадающих осадков. Так, с участием лиственницы рассмотрены два пробных участка: 1) около Серебряного Бора (CERB), в районе влияния ТЭК; 2) контрольный, около руч. Бол. Дурай (BDUR). В период с 1935 по 1949 г. эти две хронологии отличаются наиболее сходной реакцией на внешние факторы (рис. 3), следовательно, в это время условия произрастания лиственницы на этих участках были достаточно сходными. Радиальный прирост деревьев (CERB и BDUR) в марте, апреле и мае имел отрицательные корреляции с температурой воздуха, а с начала июня до середины августа — положительные.

Осадки также более значимы для участка CERB со второй декады апреля до конца июня. На участке BDUR в марте и апреле осадки отрицательно влияют на радиальный прирост деревьев, а с начала мая до середины июля отмечается некоторое их положительное влияние.

С 1950 по 1974 г. реакция лиственниц на участке CERB на температуры воздуха в марте и апреле отрицательная, а в мае незначительная; на участке BDUR в марте и в первой декаде апреля отмечается положительная корреляция, затем до конца мая — отрицательная. В первой декаде июня на обоих участках корреляция положительная, затем на участке CERB до августа отрицательная, а на BDUR, напротив, до середины сентября положительная. Влияние осадков на лиственницы обоих участков незначительно, но в третьей декаде июня, в период активного радиального роста, оно положительно.

С 1975 по 1989 г. реакция лиственниц на влияние климатических параметров имеет наибольшие расхождения, поскольку в этот период в районе исследований введены основные объекты ТЭК. Особенно значительны эти различия с марта до конца мая, т. е. во время схода снегового покрова. На участке CERB влияние температур воздуха значительно меньше, чем на участке BDUR, по-видимому, в этот период проявляется влияние ТЭК на радиальный прирост деревьев. Влияние температуры воздуха в марте—апреле, непосредственно способствующее сходу снегового покрова, на участке CERB не столь существенно, так как для схода запыленного снега требуется меньше тепла. Напротив, в этот же период для участка BDUR необходимо больше тепла для снеготаяния. В этот период, как свидетельствует радиальный прирост деревьев, на этих двух участках произошло значительное изменение условий произрастания.

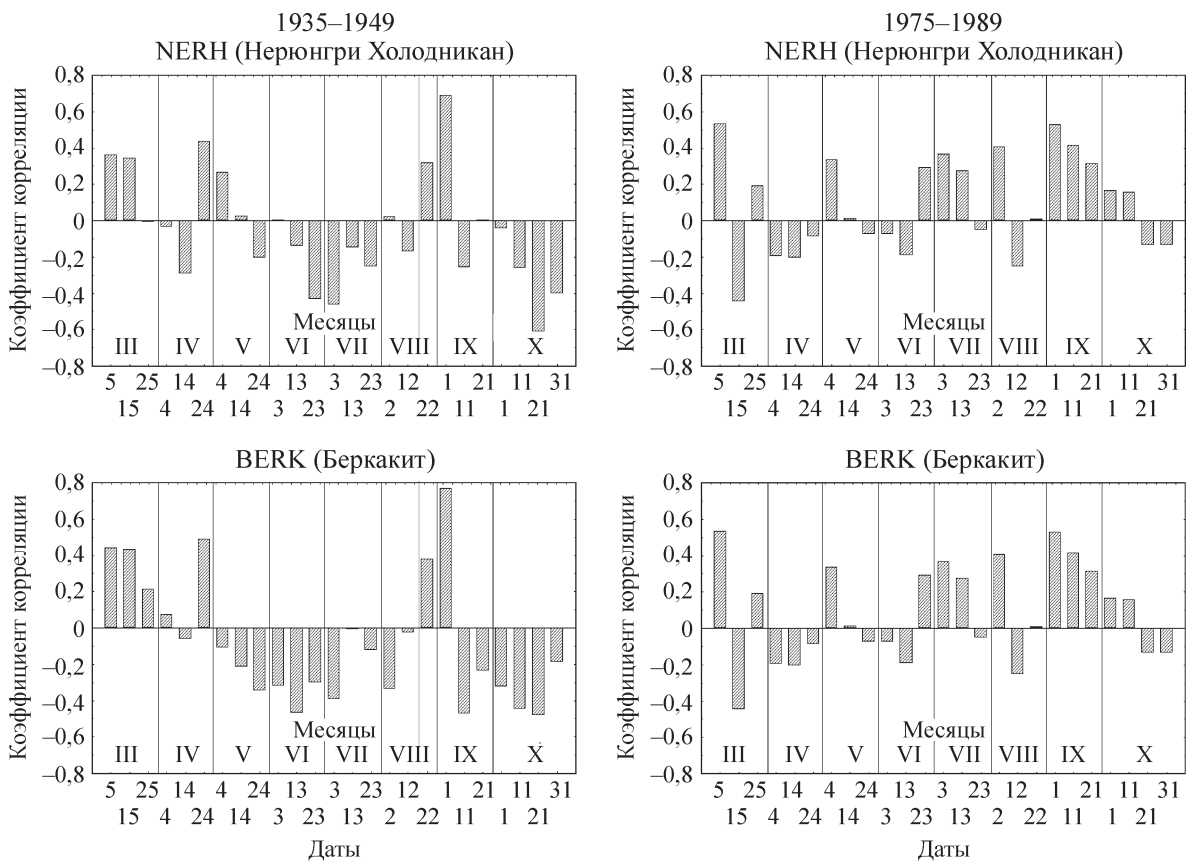


Рис. 4. Коэффициенты корреляций древесно-кольцевых хронологий по сосне NERH и BERK с температурой воздуха по декадам.

Выявлена также более или менее синхронная реакция сосны на климатические параметры. На всех участках с 1935 по 1989 г. прослеживается значительное изменение реакции радиального прироста на температуры воздуха (рис. 4).

С 1935 по 1949 г. и с 1950 по 1974 г. функции отклика роста деревьев на температуры воздуха с марта по конец апреля различаются незначительно, с 1975 по 1989 г. влияние температур воздуха снизилось на всех участках. В первой декаде мая на всех участках связь функции отклика с температурой воздуха положительна, в дальнейшем на участках около пос. Чульман (CHLM и CHLT) она незначима. В окрестностях г. Нерюнгри (NERP, NERN и BERK) до середины июня температура воздуха не имеет существенного влияния на радиальный прирост сосны; после этого срока до сентября данное влияние значимо.

Осадки для всех участков с сосной с 1935 по 1949 г. положительно влияли на радиальный прирост деревьев, реакция на их количество сходна у всех древесно-кольцевых хронологий. В последние десятилетия на участке NERN выпадающие осадки стали негативно влиять на радиальный прирост сосны, поскольку после открытия Нерюнгринского разреза изменился сток грунтовых вод около руч. Холодникан и их уровень повысился. Вследствие этого осадки, создавая избыточное увлажнение, отрицательно воздействуют на радиальный прирост деревьев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ваганов Е. А., Наурзбаев М. М., Егерь И. В. Предельный возраст деревьев лиственницы в Сибири // Лесоведение. — 1999. — № 6.
2. Николаев А. Н. Древесно-кольцевые хронологии как отражение изменений климата // Лес и вечная мерзлота: особенности состава и структуры лесов мерзлотного региона, проблемы рационального ведения хозяйства и охраны. — Якутск: Изд-во Якут. ун-та, 2000.
3. Николаев А. Н., Наурзбаев М. М., Егерь И. В., Силкин П. П. Возраст лиственницы в среднетаежной подзоне лесов Якутии // Флора и фауна особо охраняемых территорий республиканской системы Ытык Кэрэ Сирдэр / Сост. П. А. Тимофеев, Л. Е. Шматкова. — Якутск: Кудук, 2001.
4. Симачев И. В., Ваганов Е. А., Высоцкая Л. Г. Дендроклиматический анализ изменчивости прироста лиственницы в зоне выбросов Норильского горно-металлургического комбината // География и природ. ресурсы. — 1992. — № 3.
5. Васильева Н. П., Гитарский М. Л., Карабань Р. Т., Назаров И. М. Мониторинг повреждаемых загрязняющими веществами лесных экосистем России // Лесоведение. — 2000. — № 1.
6. Ворон В. П., Стельмахова Т. Ф., Коваль И. М. Воздействие загрязнения атмосферы на сосновые леса восточного Донбасса // Лесоведение. — 2000. — № 1.
7. Тимофеев П. А., Исаев А. П., Щербаков И. П. и др. Леса среднетаежной подзоны Якутии. — Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1994.
8. Fritts H. C. Tree rings and climate. — London; New York; San Francisco: Academic Press, 1976.
9. Шиятов С. Г. Дендрохронология верхней границы леса на Урале. — М.: Наука, 1986.
10. Cook E. R., Kairiukstis L. (eds.). Methods of Dendrochronology: applications in environmental sciences. — Dordrecht; Boston; London: Kluwer Acad. Publ., 1990.
11. Шиятов С. Г., Ваганов Е. А., Кирдянов А. В. и др. Методы дендрохронологии: Учеб.-метод. пособие. — Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 2000. — Ч. 1.
12. Rinn F. TSAP version 3.5. Reference Manual. Computer program for tree ring analysis and presentation. — Frank Rinn Heidelberg, 1996.
13. Holmes R. L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement // Tree-ring Bull. — 1983. — Vol. 44.
14. Holmes R. L. Dendrochronology program library-users manual. — Tucson, 1998.
15. Duglass A. E. Climatic cycles and tree-growth // A study of the annual rings of trees in relation to climate and solar activity. — Washington, 1936. — Vol. 3.
16. Schweingruber F. H. Tree rings: Basics and applications of dendrochronology. — Dordrecht: Reidel Publ., 1988.
17. Fritts H. C. Reconstructing large-scale climatic patterns from tree-ring data // A diagnostic analysis. — Tucson; London: Univer. of Arizona Press, 1991.
18. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3. Многолетние данные. — Л.: Гидрометеиздат, 1989. — Кн. 1, ч. 1–6. — Вып. 24.