

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

УДК 630*469:630*561.24:630*173/174(7)

© 1991 г.

Д. А. ГРЕЙБИЛЛ

**ДЕНДРОХРОНОЛОГИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ
ЗАГРЯЗНЕНИЙ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ В ХВОЙНЫХ ЛЕСАХ
ЗАПАДНЫХ РАЙОНОВ США***

Излагаются теоретические и методические основы использования дендрохронологических методов для оценки воздействия атмосферных загрязнений на прирост хвойных древостоев, разработанные в Лаборатории изучения древесных колец Аризонского университета. На примере двух наиболее загрязненных районов США (штаты Аризона, Нью-Мексико, Колорадо) показано, что в течение последних 25—35 лет, когда происходило наиболее интенсивное увеличение промышленных выбросов в атмосферу, изменилась реакция прироста деревьев на климатические факторы.

Загрязнение атмосферы, радиальный прирост, хвойные породы, США.

В США выполняется большой проект под названием «Программа реакции лесов» (Forest Response Program), которая исследует возможные воздействия антропогенных загрязнений на прирост леса. Эта статья подводит итоги исследований в двух районах западной части США — в Южной Аризоне и Нью-Мексико и в Скалистых горах вблизи г. Денвера (штат Колорадо). Использовались дендрохронологические методы, позволяющие в короткие сроки давать оценку прироста у большого числа деревьев и в пределах больших территорий. Основными параметрами наблюдений являются изменчивость индексов ширины годичных колец деревьев и осадков в этих районах. Реакция некоторых древесно-кольцевых хронологий в виде индексов прироста на климатические воздействия изменилась в течение последних 25—35 лет. В этот интервал времени происходило наиболее интенсивное увеличение промышленных выбросов в атмосферу, и это могло привести к изменению прироста деревьев.

Исследование было выполнено под моим руководством в течение 1987—1989 гг. в Лаборатории изучения древесных колец Аризонского университета (г. Тусон).

Районы исследования

Первый из этих районов включал южные и центральные части штатов Аризона и Нью-Мексико. В южной части хвойные леса произрастают лишь на отдельных горных вершинах, а в центральной — в виде крупных массивов. Высотный диапазон распространения лесов в горах — 1850—2500 м над ур. м. Наиболее распространенными и важными с экономической точки зрения явля-

* Перевод с английского С. Г. Шиятова.

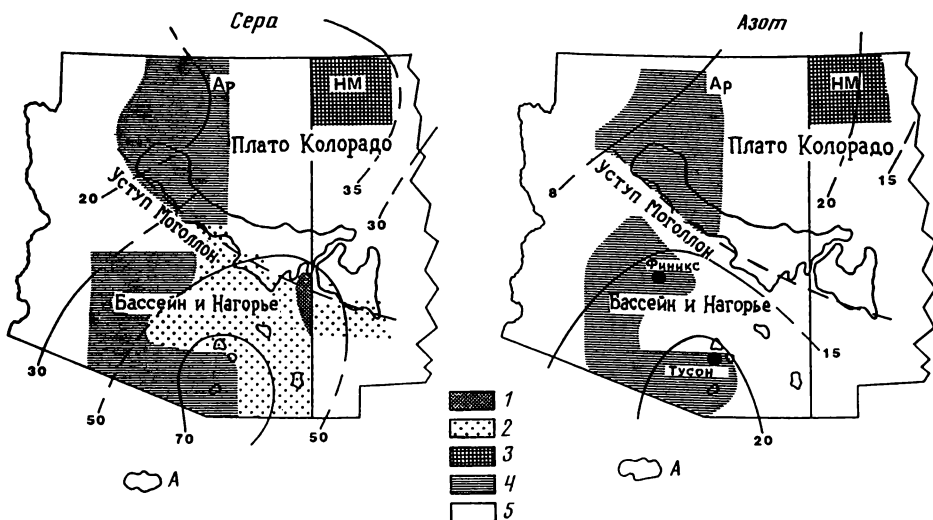


Рис. 1. Некоторые физико-географические характеристики штатов Аризона (Ар) и Нью-Мексико (НМ), выбросы химических элементов и их осаждение по территории в тоннах на квадратную милю (2,6 км²) в 1975 г.: 1 — ≥ 100 ; 2 — 30—100; 3 — 10—30; 4 — 1—10; 5 — < 1 .

Горизонталы и обозначающие их цифры показывают количество выпавших веществ в микроэквивалентах на 1 л. А — ареалы распространения сосны желтой и псевдотсуги Мензиеза

ются сосна желтая (*Pinus ponderosa* Laws.) и псевдотсуга Мензиеза (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco). Эти леса важны также для поддержания гидрологического режима территории и для целей рекреации.

Современное состояние выпадения серы и азота в этом районе показано на рис. 1. Источниками загрязнения являются здесь медеплавильные комбинаты и другие промышленные предприятия, электростанции, работающие на каменном угле, выхлопные газы автомобилей. Степень атмосферного загрязнения сильно увеличилась после 1950 г. в связи с ростом численности населения в городах Финикс и Тузон.

В штате Колорадо изучали хвойные леса в Скалистых горах. Наиболее низкое их высотное положение — около 1600 м, вблизи г. Денвера, а вверх по склонам гор они поднимаются до высоты 3200 м над ур. м. До высоты 2500 м наиболее распространены сосна желтая и псевдотсуга Мензиеза, в то время как сосны гибкая (*P. flexilis* James) и скрученная (*P. contorta* Dougl.) и ель Энгельмана (*Picea engelmannii* (Parry) Engelm.) более обильны на больших высотах. Эти леса важны для получения древесины, а также для сохранения гидрологических условий района и для рекреации. Район подвергается воздействию загрязнителей, которые поступают как от г. Денвера, так и с его окрестностей. Источники загрязнения воздуха здесь в общем те же, что и в первом районе (промышленные предприятия, теплоэлектростанции и выхлопные газы автомобилей). Величина загрязнения сильно возросла после 1940—1950 гг.

Основные понятия (положения)

Необходимо иметь представление о возможных причинах изменчивости ширины годовых колец деревьев. Каждый источник такой изменчивости должен быть понят и контролируем или исключен до проведения окончательного анализа. В анализе используются лишь те древесно-кольцевые серии, которые точно датированы по отношению друг к другу, а затем привязаны к календарным годам.

Серия измеренных толщин годовичных колец дерева (RW) может быть представлена как функция следующих сигналов:

$$RW = f(G, D_1, D_2, C, PG, e).$$

Ниже дается подробная характеристика этих сигналов.

G — изменение толщины колец с увеличением возраста дерева. Биологический по своей природе, этот сигнал не должен связываться с другими и исключается при помощи некоторых математических трансформаций, таких, как подбор экспоненциальных или других кривых [2], метода коридора [8]. После этого рассчитываются индексы прироста.

D_1 — сигнал нарушений, характерный для отдельного дерева в определенное время. Он может быть вызван ударом молнии или сползанием каменистых обнажений вниз по склону. Такого рода сигнал может присутствовать или отсутствовать в древесно-кольцевых хронологиях и может быть исключен, если не брать образцы древесины у деревьев, содержащих механические повреждения.

D_2 — сигнал нарушений, который может быть общим для большинства или всех деревьев в древостое и по происхождению является антропогенным. Примером таких нарушений может быть неожиданное увеличение прироста в результате применения химических удобрений. Некоторые химические вещества, конечно, могут быть вредными для роста деревьев, и тогда можно наблюдать неожиданное или аномальное снижение прироста. Однако для выявления этого сигнала нужно иметь представление о величине нормального прироста. Одним из способов определения величины ожидаемого прироста является понимание возможного влияния климата на прирост деревьев.

C — климатический сигнал, или реакция ширины годовичных колец на изменчивость таких климатических переменных, как температура и осадки. При лимитировании прироста деревьев обоими или одним из этих факторов ширина годовичных колец может дать очень хорошую запись их погодичной изменчивости. В некоторых случаях величина общей изменчивости между преобразованными показателями толщины колец (индексами) и отдельной климатической переменной может быть очень высокой. Например, Д. А. Грейбилл и С. Г. Шиятов [5] выявили, что индексы ширины годовичных колец лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ldb.), произрастающей на верхней границе леса в горах Полярного Урала, имеют 60% общей изменчивости (r^2) с температурой воздуха за июнь и июль. Это было установлено при помощи корреляции индексов прироста с данными метеорологических наблюдений за 1881—1969 гг. Этот метод дает возможность предсказывать прирост деревьев в том случае, если имеются данные о климатических условиях. Он позволяет прогнозировать прирост деревьев на основе использования другой независимой переменной величины.

Другого рода изменчивостью в сериях измерений толщины колец (PG) является автокорреляция, или математическая зависимость прироста текущего года от прироста предыдущих лет. Эта изменчивость в основном биологическая, хотя климатические условия также могут вносить в нее определенный вклад. Величина изменчивости может быть относительно высокой и статистически значимой при сдвиге от одного года до нескольких лет в отдельных случаях. Если регрессионные модели используются с такими данными, то понять полученные результаты довольно трудно. Поэтому автокорреляционная связь может быть смоделирована и исключена при помощи некоторых приемов, разработанных для этих целей [1].

Последний из сигналов (e) — случайная ошибка или изменчивость, которая свойственна каждой серии ширины годовичных колец. Роль этого компонента снижается, когда производится усреднение индексов прироста у большого числа модельных деревьев (30—40 экз.) и строится обобщенная хронология. Важно использовать относительно большое число образцов древесины, чтобы получить хорошую оценку общего сигнала в приросте для данной популяции деревьев.

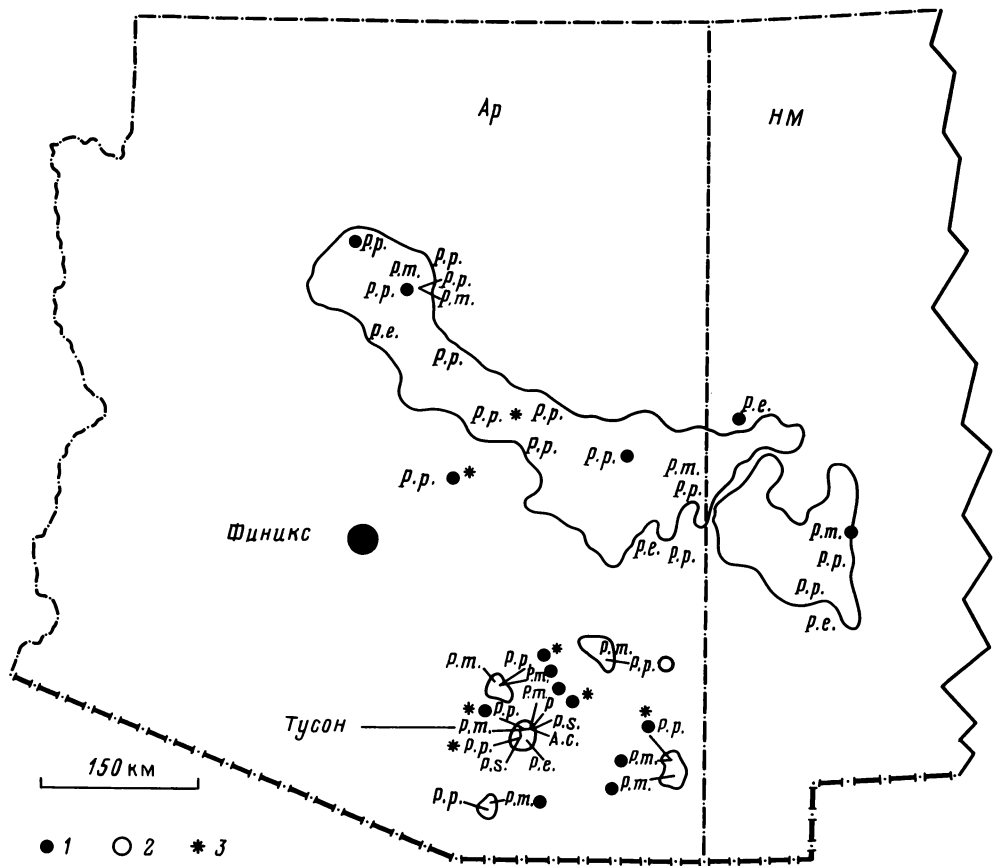


Рис. 2. Места взятия образцов древесины по видам деревьев и некоторые результаты анализа в штатах Аризона (Ар) и Нью-Мексико (НМ). Результаты t -испытаний, фактический и прогнозируемый прирост за 1951—1986 гг. ($p=0,05$): 1 — фактический прирост значительно меньше, чем прогнозируемый; 2 — фактический прирост значительно больше, чем прогнозируемый; 3 — около 50% деревьев в древостое имеют сильное снижение прироста с середины до конца текущего столетия; А. с. — *Abies concolor*; P. m. — *Pseudotsuga menziesii*; P. e. — *Pinus edulis*; P. p. — *P. ponderosa*; P. s. — *P. strobiformis*

Методы исследования

Территория штатов Аризона и Нью-Мексико была разделена на два района. Для южного района с высокой степенью атмосферного загрязнения было получено 19 обобщенных древесно-кольцевых хронологий, а для северного, с меньшей степенью загрязнения, — 20. Распределение по территории видов хвойных, с которых были получены эти хронологии, показаны на рис. 2 и в табл. 1. На некоторых участках брали образцы древесины с нескольких видов хвойных, чтобы можно было сопоставить их прирост.

Образцы древесины в штате Колорадо были взяты с различных видов и от самых низких до самых высоких местоположений, на которых растут деревья (рис. 3). Для этого района было получено 26 обобщенных хронологий.

Брали по два буровых образца древесины с противоположных сторон ствола у 15—20 деревьев каждого изучаемого вида. У деревьев со следами сильных повреждений от пожаров или сломленной вершиной образцы древесины не брали. В связи с недостаточным увлажнением (годовое количество осадков 500—600 мм) древостои здесь в большинстве случаев имеют низкую сомкнутость крон, а конкуренция между деревьями выражена слабо. В несколь-

Число древесно-кольцевых хронологий по видам деревьев и районам исследований

Район	Вид дерева ¹					Всего
	<i>P. p.</i>	<i>P. s.</i>	<i>P. e.</i>	<i>P. m.</i>	<i>A. c.</i>	
Север ²	13	—	4	4	—	21
Юг	8	3	1	7	1	20
Итого ³	21	3	5	11	1	41

Примечания. 1. *P. p.* — *Pinus ponderosa*, *P. s.* — *P. strobiformis*, *P. e.* — *P. edulis*; *P. m.* — *Pseudotsuga menziesii*; *A. c.* — *Abies concolor*.

2. Северные хронологии получены для Уступа Моголлон и плато Колорадо, южные — для Бассейна и горных районов Центральной и Южной Аризоны. См. также рис. 1.

3. Эти хронологии получены на основе использования 1747 буровых образцов древесины, взятых с 889 модельных деревьев. Все образцы были датированы, а 1500 — измерены и стандартизированы. Для построения 41 хронологии было использовано более чем 283 000 годовичных колец.

ких сомкнутых древостоях также были взяты образцы древесины для проведения сравнительных исследований.

У образцов древесины были датированы годовичные кольца прироста опытными техниками. Затем была измерена толщина колец с точностью около 0,01 мм. Для подбора наиболее подходящей возрастной нормы прироста производилось построение и изучение графиков ширины годовичных колец. В большинстве случаев использовали негативную экспоненциальную функцию или прямую линию. Вычисление индексов прироста и их усреднение по календарным годам производили по компьютерным программам INDEX и SUMAC [2]. Длительность нескольких полученных хронологий составила более 500 лет, но большинство из них имели длительность около 250—300 лет.

Во время первоначального этапа исследований стало очевидным, что прирост некоторых деревьев был аномальным. В 7 древостоях сосны желтой, произрастающих в штате Аризона, около 50% древесно-кольцевых серий не были датированы после 1940 или 1950 гг. в результате чрезвычайно сильного снижения величины прироста. Многие деревья на этих местообитаниях снизили прирост с 1950 по 1987 г. Это было неожиданностью, так как количество осадков, определяющих в основном радиальный прирост деревьев, сильно увеличилось примерно с 1968 по 1987 г. Древостои с подобными характеристиками прироста (их оказалось 6) расположены в южной части штата Аризона, где интенсивность загрязнения воздуха наибольшая.

Хвоя у большинства этих деревьев была также тщательно изучена с точки зрения наличия повреждений. Никаких повреждений не было обнаружено. Это указывает на то, что радиальный прирост является более быстрым и чувствительным индикатором стрессовых условий среды, чем фотосинтетически активные ткани.

Каждая из 66 обобщенных хронологий была исследована на наличие значимой автокорреляции путем использования модели авторегрессии и/или скользящего среднего (ARMA, AR, MA). В случае, когда авторегрессия имела в рядах, производилось ее исключение при помощи стандартных методов. Чаще всего использовали модели ARMA (1, 1), AR (1) и AR (2). Эти модели объясняют около 10—20% изменчивости прироста у деревьев, произрастающих в несомкнутых древостоях, где влияние климатических факторов на прирост очень сильное. В более влажных и густых насаждениях эти модели объясняют 40—60% вариабельности прироста. Такие модели были подобраны для каждой древесно-кольцевой серии, начиная с того момента, когда число использованных модельных деревьев составляло более 5 экз., и до 1950 и 1960 гг. Тем самым исключили из рассмотрения тренды прироста, которые проявляются в настоящее время и важны для оценки влияния загрязнения воздушной среды на прирост деревьев.



Рис. 3. Места взятия образцов древесины по видам деревьев в штате Колорадо: *P. p.* — *Pinus ponderosa*; *P. f.* — *P. flexilis*; *P. c.* — *P. contorta*; *P. e.* — *Picea engelmannii*; *P. m.* — *Pseudotsuga menziesii*

После этого была произведена калибровка каждой древесно-кольцевой хронологии с количеством осадков за год (начиная с августа предыдущего года и кончая июлем текущего) за периоды 1896—1950 и 1896—1960 гг. Для установления связей использовали линейную регрессию, в которой в качестве независимой переменной было количество осадков, а зависимой — индексы прироста. Устойчивость этих связей во времени проверялась альтернативно при помощи использования половины временного интервала для периода калибровки. Затем производился прогноз прироста деревьев для второго периода калибровки, а также оценка точности такого прогноза [6].

Когда устанавливали статистически значимую и стабильную во времени связь между осадками и приростом деревьев до 1950 или 1960 гг., то калибровку, проведенные по этим годам, распространяли на период до 1896 г. Эти же уравнения затем применяли с использованием современных климатических данных, чтобы прогнозировать прирост деревьев с 1951 по 1986 г. и с 1961 по 1986 г. Наконец, прогнозные и факти-

ческие величины индексов прироста для этих временных интервалов (или оценочных периодов) сравнивали для установления того, существенны или нет различия между ними.

Исследования в штатах Аризона и Нью-Мексико

Статистические связи между порайонными климатическими данными (количество осадков с августа предыдущего по июль текущего года) и каждой из 41 предварительно выбеленных (pewhitened) древесно-кольцевых хронологий были установлены для двух калибровочных периодов [4]. Окончательно установленные величины r^2 для калибровки в пределах всей длительности этих периодов были значимы во всех случаях ($p < 0,05$). Эти величины были относительно одинаковыми для каждой хронологии в пределах рассматриваемых периодов, но имелись некоторые различия для разных районов. Среднее значение r^2 было меньшим для южного района (0,26 против 0,38 для северного района, $t = 3,69$, $p \leq 0,001$). Это различие обусловлено в основном низкими величинами калибровки у хронологий, полученных для горных районов вблизи г. Тусона.

Уравнения, полученные на основе описанных выше анализов, были использованы для определения величин индексов прироста за 1951—1986 и 1961—

Таблица 2

Сравнение результатов статистических испытаний фактического и прогнозируемого прироста у 41 хронологии за 1951—1986 и 1961—1986 гг.

Годы	Показатель	Число хронологий		
		Принимается	Отвергается	
1951—1986	r^2	36	5(4)	
1961—1986	r^2	36	5(4)	
1951—1986	t	19	1	21(13)
1961—1986	t	24	1(1)	16(11)
1951—1986	Критерий знаков	33	8(6)	
1961—1986		29	12(8)	

Примечание. 1. Принимается — нулевая гипотеза принимается; отвергается — нулевая гипотеза отвергается; отвергается (б) — нулевая гипотеза отвергается, но фактический прирост больше, чем прогнозируемый; отвергается (м) — нулевая гипотеза отвергается, но фактический прирост меньше, чем прогнозируемый.

2. Число в скобках — частота серий в пределах южного района с отвергнутыми тестами. Другие числа — общее число из 41 хронологий.

1986 гг. Затем была рассмотрена гипотеза, являются ли спрогнозированные индексы прироста близкими к фактическим величинам за эти интервалы времени. Отсутствие оснований для отвержения этой гипотезы свидетельствует о том, что связи между климатом и приростом деревьев не изменились. В этом случае ковариация между предсказанным и фактическим приростом не должна существенно отличаться и должна быть сходна с ковариацией, полученной для периода калибровки. Среднее значение предсказанного и фактического прироста не должно существенно различаться и не должно быть аномального тренда в фактическом приросте, который отсутствует в предсказанном приросте. Ковариация определялась как квадрат коэффициента корреляции Пирсона, вычислялся коэффициент детерминации, а различия между средними величинами и мерой центральной тенденции (медианой) проверялись с помощью t -критерия, различия в трендах устанавливались при помощи критерия знаков. Уровень достоверности, равный 0,05, был принят для всех тестов, которые были двусторонними.

Альтернативными гипотезами являлись следующие: 1) фактические и предсказанные серии могут не иметь значимую ковариацию или она может резко снизиться по сравнению с периодом калибровки; 2) могут быть существенные различия между средними величинами фактических и предсказанных серий; 3) может быть выражен тренд в остатках регрессии. Невозможность отвергнуть любую из альтернативных гипотез показывает, что фактический и предсказанный прирост эмпирически различаются. Это не обязательно говорит о том, что причиной этих различий в приросте является антропогенное воздействие, а лишь о том, что различие существует и что какой-то фактор (факторы), включая загрязнение, оказывают влияние на прирост. Нужны доказательства, что загрязнение атмосферы действительно приводит к какому-либо изменению в росте деревьев.

Результаты сравнения фактического и предсказанного прироста деревьев приведены в табл. 2. В течение каждого из оценочных периодов оказалось несколько случаев, когда ковариация между фактическим и на основе климата предсказанным приростом была несущественной. Однако большинство таких случаев встретилось в южной части района исследований. Важно установить, имелись ли существенные изменения ковариации по сравнению с выявленной в пределах калибрационных периодов по отношению к значениям, которые получены для одного из современных оценочных периодов. В большинстве случаев этого не наблюдалось. Исключение составили 8 случаев, причем у тех хронологий, у которых величина r^2 в каждом из оценочных периодов на 50% меньше

по сравнению с r^2 , полученной для соответствующих калибрационных периодов. Пять таких случаев обнаружено в южном районе, в окрестностях г. Тусона. В четырех из пяти местообитаний имелось значительное число образцов древесины, у которых после 1950 г. годовичные кольца было невозможно датировать. Эти образцы не были включены в обобщенные хронологии, рассматриваемые в этой работе. Три четверти серий, забракованных по критерию знаков в течение обоих периодов, были получены для южной части района исследований и соответственно включали три только что упомянутые местообитания, а также одно местообитание псевдотсуги Мензиеза и одно сосны съедобной (*Pinus edulis* Engelm.) из горных районов вблизи г. Тусона.

Показано, что в некоторых местообитаниях произрастают деревья с аномалиями прироста в последние десятилетия. Этот вывод полностью подтверждается анализом меры центральной тенденции. Чтобы оценить более строго некоторые результаты статистического анализа, мы исключили все случаи, где значения r^2 между фактическим приростом и осадками за период калибрации составили менее 0,25. Анализируя результаты t -испытаний на этом небольшом числе случаев, было показано, что для района исследований у 16 из 31 хронологий (52%) прирост деревьев был меньшим, чем ожидалось на основе модели за 1951—1986 гг., в то время как у 11 из 29 хронологий (38%) наблюдалось снижение прироста в 1961—1986 гг. Сходные соотношения выявлены и для всей совокупности полученных рядов (51 и 39%), и эти величины выше, чем это можно было ожидать. Даже при произвольном уровне достоверности, равном 0,10, можно ожидать отвергнутыми за оценочный период лишь три ряда.

Результаты статистических оценок указывают на наличие региональных различий в современных трендах прироста деревьев. Например, в 1961—1986 гг. у 14 серий в северном районе отсутствовало существенное снижение ожидаемого прироста, в то время как у 5 серий оно наблюдалось. В южном районе снижение прироста происходило у 6 хронологий, а у 4 хронологий этого не наблюдалось ($\chi^2 = 3,157$, $p < 0,10$). Некоторые различия между северным и южным районами существуют и для хронологий по псевдотсуге Мензиеза. Для обоих оценочных периодов только 1 из 4 серий (25%) имеет на севере существенно меньший прирост, чем предсказанный по климатическим данным, в то время как на юге это соотношение составляет 5 из 6 серий (83%) для первого оценочного периода и 4 из 5 серий — для второго оценочного периода (1961—1986 гг.).

Примеры некоторых различий между фактическим и прогнозируемым приростом в рассматриваемых хронологиях приведены на рис. 4. Верхняя серия (а) получена для слабосомкнутого древостоя сосны желтой в северном районе. Индексы прироста имеют достаточно высокую ковариацию с осадками до 1951 г. ($r^2 = 0,37$, $p < 0,001$) и даже более высокие показатели между фактическим и прогнозируемым приростом за 1951—1986 гг. ($r^2 = 0,50$, $p < 0,001$). Однако средний уровень фактического прироста за этот современный период существенно более низкий по сравнению со средним уровнем прогнозируемого прироста ($t = 4,892$, $p < 0,001$). Нижняя серия (б) получена для сравнительно сомкнутого древостоя псевдотсуги Мензиеза, произрастающей в горах Санта-Рита, немного южнее г. Тусона. Ковариация этого ряда с осадками до 1951 г. составляет 0,42 ($p < 0,001$) и очень близка ($r^2 = 0,41$, $p < 0,001$) между фактическим и прогнозируемым приростом в последующие годы. После 1960 г. прогнозируемый по климатическим данным прирост имеет довольно высокое среднее значение, что согласуется с увеличением в этот период количества выпавших осадков, но фактический прирост не показывает соответствующего увеличения ($t = 3,993$, $p < 0,001$).

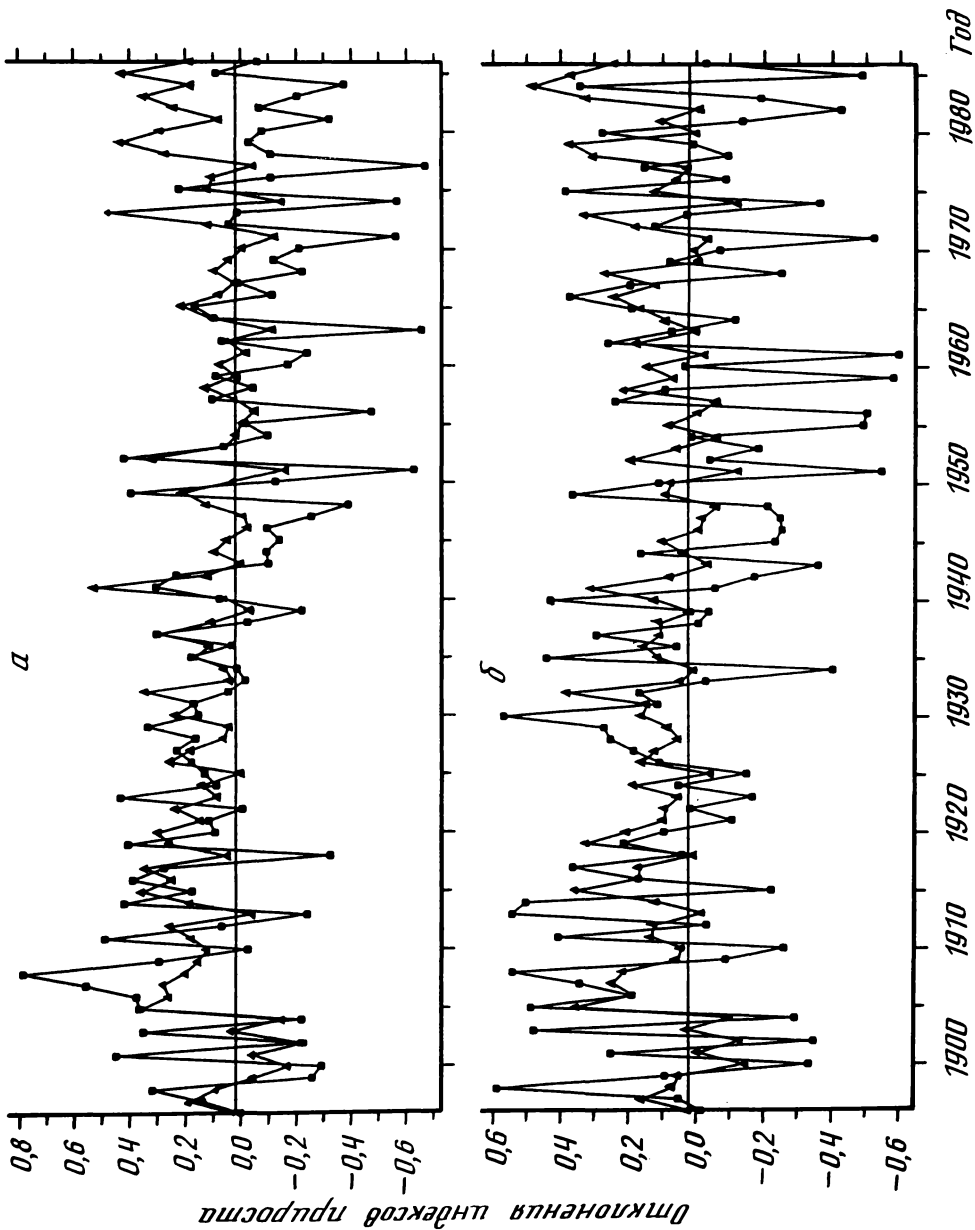


Рис. 4. Фактический и прогнозируемый прирост сосны желтой на горе Слейт, Центральная Аризона (а), и псевдотсуги Мендиза в горах Санта-Рита, Южная Аризона (б). Кривая с треугольниками показывает прогнозируемый, а с квадратами — фактический прирост

Обсуждение результатов

С середины до конца XX в. нами выявлены два типа аномального прироста деревьев в древостоях штатов Аризона и Нью-Мексико, различаемые более по степени, чем по характеру. В наиболее экстремальных случаях некоторые (но не все) деревья в древостоях сосны желтой, особенно в южной части Аризоны, показывают такой прирост в течение последних десятилетий, который дает основание сделать заключение о том, что начинается процесс усыхания деревьев. Их внешние морфологические характеристики, в частности хвоя, сделать такое заключение, однако, не позволяют. В других, менее экстремальных случаях имеются статистически значимые различия между фактическим и прогнозируемым (на основе климатических данных) приростом деревьев по таким показателям, как ковариация, тренд и особенно среднее значение в пределах того же периода. Эти различия в наибольшей степени выражены в южной части Аризоны, для которой к тому же получено большое число древесно-кольцевых хронологий по сосне желтой и псевдотсуге Мензиеза.

Хотя приведенные здесь фактические данные являются в большинстве случаев статистически значимыми, они указывают лишь на то, что возможны существенные биологические изменения. Необходим поиск доказательств, которые могут привести к выявлению причин этих изменений. Поэтому выносятся на обсуждение несколько гипотез о причинах этих аномалий в приросте деревьев, а именно: 1) прирост не среагировал на улучшение влагообеспеченности в конце XX в., что связано с внутренней (генетической) устойчивостью отдельных деревьев к засухе, испытанной ими в середине столетия; 2) осажде-ние химических элементов и изменение взаимодействия между климатом и приростом деревьев в результате деятельности человека; 3) изменение прироста в некоторых древостоях как результат естественной биологической конкуренции; 4) возможна любая комбинация вышеупомянутых гипотез. Все эти гипотезы нуждаются в дальнейшей проверке.

В настоящее время мы проводим проверку одной из этих альтернатив. Относительно влажный климат, который наблюдался в этом районе в начале текущего столетия, а также эффективная защита лесов от пожаров, проводимая Лесной службой США, могли привести к появлению большого числа молодых деревьев под пологом леса. В течение последующих 30—60 лет эти деревья могли составить серьезную конкуренцию более старым деревьям за влагу, питательные вещества и свет. В северной части района исследований в 1919 г. произошло обильное возобновление сосны желтой в результате хорошего семеношения и выпадения большого количества осадков в летние месяцы. В настоящее время проводится специальное исследование, чтобы получить индексы конкуренции для деревьев разных возрастных поколений и в различных древостоях. Это позволит нам определить, является ли конкуренция ответственной за некоторые аномальные приросты деревьев, выявленные здесь в конце XX в.

Исследования в штате Колорадо

Для этого района было получено 26 древесно-кольцевых хронологий. В 6 случаях деревья 100-летнего возраста были использованы для построения одной хронологии, а более старые деревья использовали для построения другой хронологии (для одного местообитания). Для получения этих обобщенных хронологий было использовано 324 модельных дерева и более чем 157 000 годичных колец, которые были датированы и измерены [3].

При помощи линейного регрессионного анализа было показано, что у 16 из всех полученных хронологий на низких высотах (менее 2600 м над ур. м.) содержится относительно строгая, постоянная и значимая реакция прироста на сумму осадков, которые обычно включают в себя месячные суммы осадков

весны и лета текущего года (с марта по июль) и осадков предыдущего года с сентября по ноябрь. Среднее значение общей дисперсии (r^2) между древесно-кольцевыми хронологиями и осадками за 1897—1950 гг. составило 0,28, а для 1897—1960 гг. — 0,31. Прирост деревьев за 1951—1987 и 1961—1987 гг. был затем спрогнозирован для каждой хронологии на основе полученных регрессионных уравнений. Прогнозируемые значения были сопоставлены с фактическим приростом деревьев для указанных выше периодов, при этом использовались те же самые тесты, которые были описаны выше при изложении материалов, собранных в штатах Аризона и Нью-Мексико. Фактический и прогнозируемый прирост у всех хронологий, за исключением одной, имел значимую ковариацию ($p < 0,05$) для каждого оценочного периода. Среднее значение ковариации за 1951—1987 гг. составило 0,36, а за 1961—1987 гг. — 0,33. Не было обнаружено существенных различий в средних значениях фактического и прогнозируемого прироста для каждого оценочного периода, основанных на результатах t -испытаний.

Использование такого статистического показателя, как критерий знаков, показало, что только 2 хронологии имели некоторую разницу в трендах между фактическим и прогнозируемым приростом в обоих оценочных периодах. В целом эти результаты свидетельствуют о том, что не имелось какого-либо основного или широко распространенного изменения в связях между климатом и приростом деревьев на низких высотах после 1950 г., когда загрязнение воздушной среды стало наибольшим.

Три из оставшихся 10 хронологий не имели существенной чувствительности к климату и поэтому они не были использованы в этом исследовании. Однако они не показывают какого-либо снижения прироста в последние десятилетия. Другие 7 хронологий показывают изменение реакции на климат во времени с 1897 г. Выявлено два типа изменений прироста при анализе корреляций между индексами прироста и суммой осадков, а также с индексом сильных засух Пальмера (ИСЗП) для различных отрезков времени текущего столетия. ИСЗП является интегрированным показателем температуры воздуха и осадков, т. е. индексом, который оценивает доступность влаги для растений в течение конкретного месяца [7]. В этом исследовании использовался индекс за июнь. Временными интервалами для этих анализов были 1896—1931, 1932—1959 и 1960—1987 гг. Самый ранний период был несколько более холодным и влажным по сравнению с последующими.

Первый тип изменения прироста деревьев, представленный хронологиями FRL, NIL NIL (табл. 3, 4), характеризуется сильным увеличением корреляции между индексами прироста и осадками, а также с ИСЗП, по мере приближения к самому последнему интервалу времени. Две хронологии по сосне гибкой (FRL и NIL) получены для местообитаний, расположенных на высоте около 3200 м над ур. м., а по сосне скрученной — на высоте около 2830 м над ур. м. Однако все эти местообитания даже для столь больших высот являются относительно сухими. Изменяющаяся реакция прироста на климат — явление нормальное. В начале XX в. корреляции слабые, так как деревья не подвергались климатическому стрессу или ограничению в приросте, поскольку климат был влажным и холодным. По мере возрастания температуры воздуха в вегетационный период увеличивалась лимитирующая роль влаги и поэтому реакция прироста деревьев на климат становилась более четкой.

Второй тип изменения прироста деревьев характеризуется снижением корреляции между индексами прироста ели Энгельмана и осадками, а также с ИСЗП за июнь. Две хронологии, полученные для более молодых (MIY) и более старых (MIO) деревьев, произрастающих на западной кромке Континентального Водораздела на верхней границе леса (3410 м над ур. м.), показывают изменение корреляции от низкой и недостоверной до умеренно-отрицательной и значимой в течение указанных выше трех временных интервалов. У другой пары хронологий по молодым и старым деревьям ели Энгельмана

Таблица 3

Изменения величины коэффициента корреляции (r) и его вероятности (p) между индексами прироста и осадками в штате Колорадо

Индекс хронологии	Показатель	Интервал времени, годы		
		1896—1931	1932—1959	1960—1987
FRL *	r	0,309	0,442	0,598
	p	0,064	0,018	0,001
NIL **	r	0,103	0,342	0,255
	p	0,556	0,072	0,188
NIL *	r	0,326	0,222	0,382
	p	0,050	0,255	0,043
MIO ***	r	0,205	0,099	—0,422
	p	0,230	0,622	0,024
MIY ***	r	0,017	—0,120	—0,464
	p	0,917	0,551	0,012
TIO ***	r	0,390	0,227	0,166
	p	0,018	0,244	0,598
TIY ***	r	0,287	0,109	—0,011
	p	0,087	0,588	0,953

* Pinus flexilis, ** P. contorta, *** Picea engelmannii.

Таблица 4

Изменение величины коэффициента корреляции (r) и его вероятности (p) между индексами прироста и индексом сильных засух Пальмера (ИСЗП)

Индекс хронологии	Показатель	Интервал времени, годы		
		1896—1931	1932—1959	1960—1987
FRL *	r	0,093	0,344	0,530
	p	0,595	0,070	0,004
NIL **	r	0,155	0,252	0,447
	p	0,630	0,193	0,016
NIL *	r	0,146	0,246	0,392
	p	0,601	0,205	0,037
MIO ***	r	0,276	0,355	—0,315
	p	0,099	0,061	0,098
MIY ***	r	0,022	0,024	—0,349
	p	0,896	0,897	0,065
TIO ***	r	0,539	0,379	0,187
	p	0,001	0,044	0,658
TIY ***	r	0,383	0,275	0,057
	p	0,020	0,154	0,771

* Pinus flexilis **, P. contorta, *** Picea engelmannii.

(TIO, TIY), полученных для верхней границы леса (3500 м над ур. м.) восточного склона Континентального Водораздела, корреляция изменяется от положительной и значимой до низкой или около нуля и не значимой. Это свидетельствует о том, что деревья в настоящее время начали отрицательно реагировать на что-то, что связано с увеличением осадков. Этими факторами могут быть разнообразные загрязнители воздуха.

Заключение. Дендрохронологические методы перспективны для быстрой оценки условий роста деревьев в пределах больших территорий. Они дают возможность судить об изменениях радиального прироста и помочь в установлении того, являются ли эти изменения естественными или аномальными с точки зрения изменений климата. В тех случаях, когда выявлен аномальный прирост такой природы, необходимо проанализировать роль большого числа биологических и экологических факторов, а также возможность того, что эти изменения в приросте деревьев вызваны загрязняющими веществами.

Список литературы

1. *Box G. E. P., Jenkins G. M.* Time series analysis, forecasting, and control. Revised edition. San Francisco: Holden-Day, 1976.
2. *Graybill D. A.* Chronology development and analysis // Climate from tree rings. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1982. P. 21—30.
3. *Graybill D. A.* Analysis of growth trends and variation in conifers from the Colorado Front Range. Final report to the Western Conifers Research Cooperative, U. S. E. P. A., Corvallis, Oregon. Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, Tucson, 1989.
4. *Graybill D. A., Rose M. R.* Analysis of growth trends and variation in conifers from Central Arizona. 1. Network chronology development and analysis. Final report to the Western Conifers Research Cooperative, U. S. E. P. A., Corvallis, Oregon. Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, Tucson, 1988.
5. *Graybill D. A., Shiyatov S. G.* A 1009 year tree-ring reconstruction of mean June—July temperature deviations in the Polar Urals // Air pollution effects on vegetation, including forest ecosystems. Broomall, Pennsylvania: Northeastern Forest Experiment Station, 1989. P. 37—48.
6. *Fritts H. C.* Tree rings and climate. London; New York; San Francisco: Acad. Press, 1976. 567 p.
7. *Palmer W. C.* Meteorological drought. Weather Bureau Research, Paper 45, Washington, D. C.: U. S. A. Weather Bureau Research, 1965.
8. *Shiyatov S. G., Mazepa V. S.* Some new approaches in the construction of more reliable dendrochronological series and in the analysis of cycle components // Methods of dendrochronology. 1. Warsaw, 1987. P. 87—96.

Лаборатория изучения древесных колец
Аризонского университета,
г. Тусон, штат Аризона, США

Поступила в редакцию
12.02.1990

D. A. GRAYBILL

DENDROCHRONOLOGICAL STUDIES OF AIR POLLUTION IN THE WESTERN REGIONS OF THE USA

The theoretical and methodical fundamentals, developed in the Tree Ring Laboratory, Arizona University, are presented for using tree ring analysis for the evaluation of pollutant effect on coniferous stand increment. With the example of two most polluted regions of the USA (states Arizona, New-Mexico and Colorado) it has been shown that, because of the drastic increase in air pollution during the last 25 to 35 years, the increment response of trees to climatic factors has changed, the value of the radial increment has decreased and annual rings in the butts of some trees have not been formed.