

USSR STATE COMMITTEE
FOR HYDROMETEOROLOGY
AND CONTROL OF NATURAL ENVIRONMENT
NATURAL ENVIRONMENT AND CLIMATE MONITORING LABORATORY

USSR ACADEMY
OF SCIENCES

ISSN 0207-2564

PROBLEMS
OF ECOLOGICAL
MONITORING
AND ECOSYSTEM
MODELLING



Volume VIII

LENINGRAD GIDROMETEIOZDAT 1985

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И КОНТРОЛЮ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ЛАБОРАТОРИЯ МОНИТОРИНГА ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ И КЛИМАТА

ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА И МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКОСИСТЕМ

Том VIII

Проблемы экологического мониторинга
и моделирования экосистем

Том VIII

Редактор О. Д. Рейнгерц. Технический редактор М. И. Брайнина. Корректор Л. Б. Лаврова.
Н/К

Сдано в набор 09.08.85. Подписано в печать 19.12.85. М-22700. Формат 60×90^{1/16}. Бумага тип.
№ 1. Гарнитура литературная. Печать высокая. Печ. л. 18. Кр.-отт. 18. Уч.-изд. л. 19.95.
Тираж 1080 экз. Индекс МОЛ-47. Заказ № 290. Цена 1 р. 70 к. Заказное.

Гидрометеоиздат, 199053. Ленинград, 2-я линия, 23.

Ленинградская типография № 8 ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского
объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при
Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
190000, Ленинград, Прачечный переулок, 6.

ЛЕНИНГРАД ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ 1985

П 1603000000-233
069(02)-85 66-85

© Лаборатория мониторинга природной среды
и климата Госкомгидромета и АН СССР,
1985

УДК 504.064.36 : 574

Редколлегия: чл.-корр. АН СССР Ю. А. Израэль (председатель), канд.
биол. наук Л. М. Филиппова, д-р физ.-мат. наук С. М. Семенов, д-р биол.
наук Ф. Н. Семевский, Э. Л. Полякова (секретарь.).

Рассматриваются проблемы фоновое экологического мониторинга и неко-
торые тонкие проблемы моделирования экологических процессов, протекающих
в биосфере.

Книга представляет интерес для биологов, математиков, геофизиков, геохи-
миков и экологов широкого профиля.

The problems of background ecological monitoring are considered in the book
along with the problems of modelling ecological processes occurring in the bio-
sphere.

The book is of interest for biologists, mathematicians, geophysicists, geoche-
mists and ecologists dealing with a broad scope of problems associated with an-
thropogenic affect on the natural environment.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	6
НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ И ОПЫТ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА	
Ю. А. Израэль, Л. М. Филиппова, Г. Э. Инсаров, Ф. Н. Семеновский, С. М. Семенов. К проблеме экологических последствий загрязнения природной среды инсектицидами	7
В. А. Абакумов, С. В. Кренева, В. А. Семин. Метод распознавания образов в гидробиологическом анализе поверхностных вод	22
В. А. Абакумов, В. Н. Тальских. Закономерности изменения перифитонных сообществ в условиях загрязнения природной среды	44
Н. И. Базилевич. Концептуально-балансовые модели круговорота веществ в геосистемах как метод геосистемного мониторинга	60
Н. А. Буткевич. Эпифитная флора в районе опытной станции лесоводства Московской сельскохозяйственной академии	72
Л. Д. Воронова, А. В. Денисова, И. Г. Пушкарёв. Оценка загрязнения природной среды полихлорированными бифенилами и его экологических последствий	75
И. М. Кунина, И. Д. Инсарова. Физиологические и биохимические аспекты воздействия кадмия на растения	88
Д. Н. Маторин, П. С. Венедиктов, А. Б. Рубин. Использование люминесцентных методов для исследования состояния фотосинтетического аппарата и его реакции на воздействие факторов внешней среды	102
Н. С. Печуркин. Некоторые задачи мониторинга в связи с развитием экологически обоснованных технологий	117
Б. Б. Прохоров. Некоторые актуальные проблемы создания территориальных комплексных схем охраны природы	121
О. В. Сергиенко, Р. Г. Хлебопрос. Биотестирование многокомпонентных загрязнений	132
Х. Х. Трасс. Трансплантационные методы лишеноиндикации	140
Р. А. Юкнис, Д. А. Шипените, А. И. Жиливичус. Выявление антропогенно обусловленных изменений продуктивности лесных насаждений на основе анализа временных рядов годичного прироста деревьев	145
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОСИСТЕМ	
Н. С. Абросов, А. Г. Боголюбов. Эколого-генетические аспекты трофической конкуренции популяций	158
В. В. Алексеев, А. Ю. Лоскутов. О возможности управления системой со странным аттрактором	175
А. Н. Горбань, В. А. Охонин, М. Г. Садовский, Р. Г. Хлебопрос. Условия применимости простейшего уравнения динамики численности популяции	190
А. Б. Горстко, Я. С. Суходольский, А. А. Матвеев. Об одном приближенном методе оптимизации мониторинга загрязнения водоема неконсервативным веществом	197
М. Д. Корзухин. Изменение продуктивности и численности для двухпородной лесной сукцессии при вариации хода роста	207
А. Т. Нагиев. Определение ростовых функций хлопчатника и их использование при моделировании роста	215
А. А. Рудкова, С. М. Семенов. Модельная оценка влияния алюминия на продуктивность высших растений в связи с закислением почв	220
С. Я. Сергин, С. И. Зотов, Г. М. Баринаева, Г. Н. Ельцина. Об оценке и прогнозировании состояния подземных вод в связи с хозяйственной деятельностью	240
Ю. М. Свирижев, А. И. Абакумов, [Н. Н. Тимофеев]. Некоторые задачи экодинамики эксплуатируемых популяций и сообществ	246
А. П. Тонких. Исследование математических моделей экосистем с диффузионным и адвективным массопереносом	258
О. Г. Бать, М. А. Ханин. Адаптация гомеотермных к условиям низкой температуры окружающей среды (математическая модель)	272

ВЫЯВЛЕНИЕ АНТРОПОГЕННО ОБУСЛОВЛЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПРОДУКТИВНОСТИ ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ГОДИЧНОГО ПРИРОСТА ДЕРЕВЬЕВ

Р. А. Юкнис, Д. А. Шипените, А. И. Жиливичус

Литовская сельскохозяйственная академия Минсельхоза СССР

Лесные экосистемы играют исключительно важную роль в природе. Занимая почти одну треть земной суши, они продуцируют примерно две трети первичной продукции. Воздействие лесов на круговорот веществ и энергии в значительной мере определяет состояние всей биосферы. Отличительной чертой лесных экосистем являются большие размеры и долголетие их главного компонента — деревьев и особая сложность структуры самих экосистем. Леса являются наиболее мощными стабилизаторами происходящих в природе разрушительных процессов (ветровая, водная эрозия и т. п.) и существенно влияют на гидрологический режим и климатические условия обширных территорий.

Стабилизирующая роль лесов особенно повышается в связи с возрастающим воздействием человека на природу, в первую очередь с ее загрязнением техногенными выбросами. Лесные экосистемы, связывая значительные количества токсических веществ, способны (до определенного предела) нейтрализовать или по крайней мере минимизировать отрицательное воздействие загрязняющих веществ.

Вследствие своего долголетия и существенного влияния на процессы, происходящие в биосфере, леса являются одним из наиболее пригодных объектов контроля, оценки и прогноза последствий антропогенного воздействия на биосферу в целом.

Основная задача биологических наблюдений и исследований, проводимых в рамках экологического мониторинга, сводится к выявлению антропогенно обусловленного тренда изучаемых биологических показателей на фоне их естественных колебаний. Главная проблема состоит в том, что даже в условиях сравнительно сильного воздействия антропогенные отклонения биологических показателей, как правило, менее интенсивны, чем их естественные колебания. Это характерно практически для всех биологических показателей, не зависимо от того, что они отражают — обилие вида, параметры отдельных индивидумов, их морфологические признаки и т. д.

Возможности выявления антропогенно обусловленных сдвигов биологических показателей на фоне их естественных колебаний в основном обуславливаются длиной временного ряда наблюдений, его изменчивостью, чувствительностью изучаемого показателя и внешним воздействием. Чем длиннее ряд наблюдений, меньше

изменчивость и больше чувствительность регистрируемых показателей, тем большей разрешающей способностью отличается система наблюдений и тем меньшие отклонения от нормы могут быть выявлены.

По годичным кольцам можно судить о различных изменениях природной среды (естественные и антропогенные), поэтому деревья обладают уникальными возможностями естественных мониторов. Главное преимущество изучения годичного радиального прироста деревьев перед другими биологическими показателями заключается именно в возможности получения уже к началу реализации системы мониторинга достаточно длинных рядов на основе ретроспективного анализа годичных колец древесины. По мнению многих специалистов [9, 17, 20], анализ годичных колец деревьев предоставляет одну из немногих реальных возможностей для объективной оценки антропогенных изменений природной среды, в том числе и на глобальном уровне.

Полезную дополнительную информацию о состоянии природной среды в прошлом можно получить при более детальном изучении внутренней структуры древесных колец [13], их химическом и радиоизотопном анализе [20]. Но в целях дендромониторинга основным носителем информации, безусловно, является годичный прирост (ширина кольца), позволяющий непосредственно судить о влиянии изменений природной среды на продуктивность лесных насаждений.

Применяемые в настоящее время методы анализа временных рядов годичного прироста деревьев позволяют расшифровать лишь незначительную долю закодированной в годичных кольцах информации. Для реализации возможностей, предоставляемых деревьями, необходимо решить ряд серьезных проблем. В первую очередь это связано с большой изменчивостью прироста деревьев во времени. Колебания ширины годичных колец обычно носят циклический характер, но длина отдельных циклов и амплитуды их отклонений очень нестабильны. Кроме того, в одном временном ряду обычно присутствуют перекрывающиеся друг друга циклические колебания различных порядков, что крайне затрудняет их количественный анализ и выявление сигналов, обусловленных конкретными факторами.

АНАЛИЗ И ПРОГНОЗ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ГОДИЧНОГО ПРИРОСТА ДЕРЕВЬЕВ

Более детальный анализ временных рядов годичного прироста деревьев и их связей с различными внешними и внутренними факторами неотрывно связан с изучением скрытой периодичности колебаний ширины годичных колец.

Многочисленными исследованиями, которые сначала носили просто визуальный характер, а в последнее время все чаще основываются на применении различных математических методов, вы-

явлено, что для умеренных широт наиболее характерны циклы колебаний ширины годичных колец следующей длины: 2—3, 5—6, 9—13, 20—26, 80—90 лет [5, 7, 10, 20]. Наиболее интенсивными обычно являются циклы длиной 9—13 (в среднем 11) лет.

Дендрохронологами в течение последнего десятилетия разработаны первые математические модели для анализа и прогноза колебаний годичного прироста деревьев [4, 20]. Так как дендрохронологически фактически интересует не сам прирост, а его колебание во времени, то и моделируется не динамика прироста, а его отклонения от долголетней тенденции (возрастного тренда) — индексов прироста.

Для решения задач дендромониторинга основным носителем информации является годичный прирост. Временная последовательность, годичного прироста деревьев $\{Y_t, t = \overline{1, N}\}$ представляется как аддитивная смесь возрастного тренда, квазипериодической составляющей F_t и стационарного случайного процесса Z_t (рис. 1), т. е. имеет вид

$$Y_t = M_t + F_t + Z_t, \quad t = \overline{1, N}. \quad (1)$$

Детерминированная функция тренда, описывающая долговременную тенденцию развития процесса, оценивается как

$$M_t = Ae^{-Bt}. \quad (2)$$

Для получения оценок параметров A и B минимизируется функция суммы остаточных квадратов

$$\min_{A, B} \sum_{i=1}^N (y_i - Ae^{-Bi})^2$$

методом Флетчера—Пауэлла [14].

Оценка функции тренда $\hat{M}_t = \hat{A}e^{-\hat{B}t}$ исключается из реализации. Далее рассматривается последовательность $u_t = y_t - \hat{M}_t, t = \overline{1, N}$. Детерминированная функция F_t представляется конечной суммой периодических колебаний

$$F_t = \sum_{i=1}^q (m_i \cos 2\pi f_i t + n_i \sin 2\pi f_i t), \quad (3)$$

где неизвестными являются число составляющих q и параметры f_i, m_i, n_i каждой составляющей. Для их оценки применяется последовательная процедура.

Последовательность $\{u_t, t = \overline{1, N}\}$ представляется конечным отрезком Фурье, и проверяется значимость коэффициентов каждой гармоники [1]. Параметры k -й гармоники, дающей наибольший вклад в разложение процесса, используются как начальные значения параметров f_i, m_i, n_i в процедуре Флетчера—Пауэлла. Пара-

метры i -й периодической составляющей суммы (3) находятся путем минимизации функции

$$\sum_{t=1}^N [u_t - (m_i \cos 2\pi f_i t + n_i \sin 2\pi f_i t)]^2$$

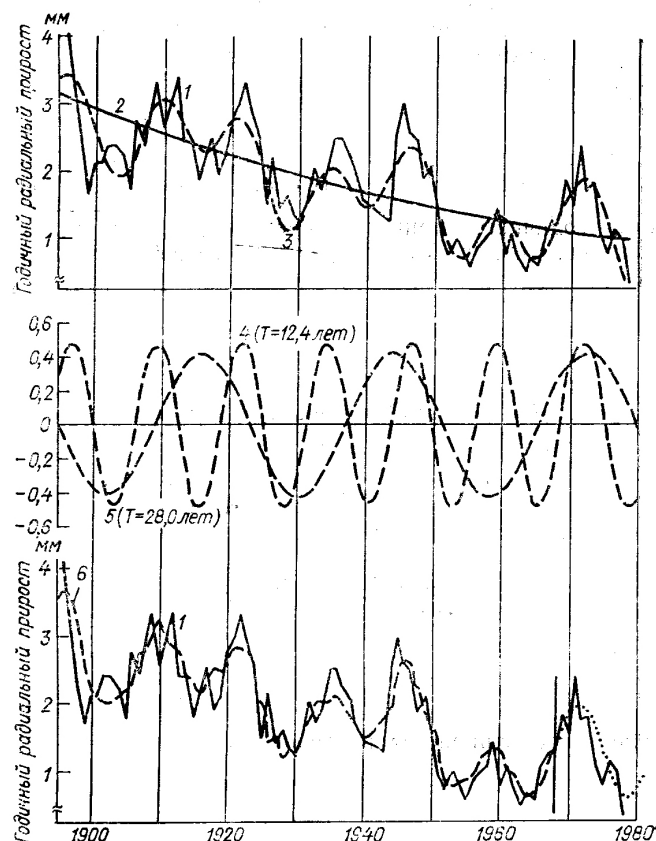


Рис. 1. Математическая модель временного ряда годового прироста деревьев (спелый сосняк). —

1 — годичный радиальный прирост деревьев, 2 — линия возрастного тренда, 3 — суммарная кривая периодических слагаемых и возрастного тренда, 4—5 — наиболее существенные периодические слагаемые, 6 — математическая модель временного ряда. За вертикальной линией точками показаны прогнозируемые по модели значения прироста.

по параметрам f_i , m_i , n_i . Найденная оценка i -й периодической составляющей исключается из процесса u_t , и для оставшейся последовательности процедура повторяется. Поиск периодических составляющих заканчивается, когда коэффициенты всех гармоник

ряда Фурье незначимы. Далее рассматривается последовательность

$$u_t - \hat{F}_t = y_t - \hat{M}_t - \hat{F}_t, \quad t = \overline{1, N}.$$

Для описания стационарного случайного процесса подобрана модель авторегрессии

$$Z_t = \sum_{i=1}^l a_i Z_{t-i} + \varepsilon_t, \quad (4)$$

где $a_1, a_2, \dots, a_l$ — параметры авторегрессии; l — порядок авторегрессии, ε_t — последовательность независимых гауссовских величин с нулевым средним и дисперсией σ_ε^2 . Так как порядок авторегрессии l неизвестен, то по рекуррентному алгоритму оцениваются и проверяются на значимость все лаговые переменные до порядка $m = N/4$. В итоге получается модель процесса авторегрессии с максимальным лаговым переменным порядком l , притом ненулевыми (т. е. значимыми) могут быть только $l_i \leq l$ коэффициенты из $a_1, a_2, \dots, a_l$.

После оценки стационарного случайного процесса

$$\hat{Z}_t = \sum_{i=1}^l \hat{a}_i Z_{t-i}$$

формируются остатки

$$\omega_t = y_t - \hat{y}_t = y_t - \hat{M}_t - \hat{F}_t - \hat{Z}_t,$$

которые при модели, адекватно описывающей исследуемый процесс, должны быть некоррелированными. Некоррелированность остатков проверяется с помощью коэффициентов автокорреляции остатков, а также и совокупного теста, использующего эти коэффициенты [6].

Идентификация математической модели процесса (1) заканчивается диагностической проверкой остатков ω_t . Вычисляется процентная мера средней относительной погрешности модели

$$\Delta = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \left| \frac{\omega_t}{y_t} \right| \cdot 100 \, \%.$$

Большое практическое значение имеет возможность прогнозирования будущих значений временного ряда. Статистический прогноз является вероятностной оценкой возможностей развития процесса в будущем, основанной на закономерностях, выявленных по данным прошлого периода. Прогноз по трендовой — авторегрессионной модели основан на статистическом изучении динамики самого прогнозируемого показателя. Несмотря на общеизвестные недостатки такой модели, не позволяющей раскрыть роль отдельных факторов в динамике изучаемых показателей, она имеет то преимущество, что здесь в неявном виде учитывается комплексное воздействие всех факторов.

Анализ данных, собранных в сосняках Березинского биосферного заповедника и лесах нашей республики, подтвердил, что в данном регионе наиболее существенны циклические колебания ширины годовых колец длиной в 9—13 и 20—26 лет. После исключения возрастного тренда на долю этих периодов приходится примерно две трети дисперсии изучаемых рядов.

Исследование возможностей прогноза годового прироста деревьев по разработанной модели показали, что точность прогноза в основном обуславливается стабильностью выделенных периодов. При длине исходного ряда 70—100 лет удовлетворительный прогноз дальнейших значений прироста получается в среднем на одно десятилетие (рис. 1 в).

В настоящее время ритмика природных явлений вызывает повышенный интерес у представителей многих отраслей науки [12]. Комплексное познание ритмичности природных явлений и процессов, видимо, является необходимым этапом при разработке научно обоснованных прогнозов динамики биосферы и отдельных ее компонентов.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ ГОДИЧНОГО ПРИРОСТА ДЕРЕВЬЕВ С КЛИМАТИЧЕСКИМИ ФАКТОРАМИ

При выявлении антропогенно обусловленных изменений годового прироста деревьев, особенно в условиях сравнительно невысоких уровней воздействия, необходимым этапом является изучение причин естественных колебаний ширины годовых колец. На основе выявленных динамических связей годового прироста деревьев с его определяющими факторами возможно исключение значительной доли дисперсии временных рядов годового прироста деревьев и увеличение разрешающей способности самой системы наблюдений.

Изучением зависимости колебаний ширины годовых колец от природных условий, прежде всего от климатических факторов и солнечной активности, уже почти сто лет занимается дендроклиматология. Хотя при этом решается обратная задача — как по ширине годовых колец восстановить климат прошлого, результаты и методы дендроклиматических исследований могут быть полезными при решении задач дендромониторинга.

В последнее время повышенный интерес к изучению серий древесных колец проявляют климатологи, биологи, астрофизики, географы, археологи, лесоводы и даже судебные эксперты.

При подведении итогов дендроклиматических исследований [20] было отмечено, что основные усилия дендроклиматологов направлены на создание надежной азбуки перевода показателей годового кольца деревьев на язык климатологов. Несмотря на определенные успехи в этой области, задача пока не решена. В настоящее время можно только достоверно установить, когда, в какой географической точке и для каких древесных растений была плохая, хорошая или умеренная погода. Однако точного количествен-

ного выражения связей климатических факторов с приростом деревьев современная дендроклиматология не дает.

Разработка моделей годового прироста деревьев, учитывающих влияние важнейших факторов на рост деревьев, является переходом к качественно другому уровню познания изучаемого процесса. Однако нынешний уровень знаний взаимосвязей роста деревьев с внешними и внутренними факторами недостаточен для разработки моделей такого типа.

Первым этапом к созданию динамической системы прирост деревьев — внешняя среда является выделение из всего комплекса факторов наиболее информативных. Для определения степени влияния отдельных факторов на годичный прирост деревьев применен двумерный корреляционно-спектральный анализ. На этом этапе динамическая система прирост — внешняя среда считается линейной, что, видимо, является сильным упрощением.

В качестве случайного процесса $\{x(t), t \geq 1, N\}$ берутся наблюдения за фактором, а случайный процесс $\{y(t), t = 1, N\}$ образуется соответствующими измерениями годового прироста деревьев. Основной характеристикой, определяющей динамическую линейную связь процессов $x(t)$ и $y(t)$, является функция когерентности

$$\gamma_{xy}^2(f) = \frac{|g_{xy}(f)|^2}{g_x(f) \cdot g_y(f)},$$

где $g_x(f)$, $g_y(f)$ — спектральные плотности процессов $x(t)$ и $y(t)$; $g_{xy}(f)$ — их взаимная спектральная плотность [2, 3, 11]. Взаимная спектральная плотность является комплексной функцией частоты, через $|g_{xy}(f)|^2$ обозначен квадрат ее модуля или амплитуда спектра.

Функция когерентности позволяет оценить вклад процесса $x(t)$ в процесс $y(t)$ как функцию частоты f . Значение функции погрешности на частоте f аналогично квадрату коэффициента корреляции. Значение $\gamma_{xy}^2(f)$ означает ту часть дисперсии процесса $y(t)$, которая на частоте f определяется процессом $x(f)$. Величина $(1 - \gamma_{xy}^2(f))$ служит мерой той части дисперсии $y(t)$, которая на частоте f не зависит от $x(t)$.

Спектральная плотность шума

$$g_n(f) = [1 - \gamma_{xy}^2(f)] g_y(f)$$

может быть интерпретирована как часть выходного спектра, не связанная с линейными операциями над $x(t)$ на частоте f . Посредством численного интегрирования функции $g_n(f)$ можно определить дисперсию шума σ_n^2 . Тогда степень важности фактора $x(t)$ по отношению к неучитываемым факторам можно измерить степенью детерминированности системы

$$q = 1 - \frac{\sigma_n^2}{\sigma_y^2}.$$

Величина q меняется от 0 до 1.

В качестве климатических факторов рассматривались средние температуры и суммы осадков за отдельные месяцы и за более длинные периоды (вегетационный период, гидрологический год).

Степень детерминированности системы для отдельных рассмотренных факторов в большинстве случаев находится в пределах от 0,1 до 0,25 и не превышает 0,4.

Типичный пример нормированного выборочного спектра процесса прироста $y(t)$ показан на рис. 2.

Спектр наиболее интенсивен на сравнительно низких частотах, имеет выраженный пик на частоте $(1/12)$ (соответствует колебаниям с периодом $T=12$ лет).

Для большинства исследованных факторов функции когерентности имеют наибольшие значения на больших частотах (соответствующих периодам $T=2 \div 3$ года) (рис. 3). Это показывает большую зависимость краткосрочных колебаний прироста от соответствующих колебаний температуры или количества осадков. На низких частотах, где сосредоточена основная доля мощности про-

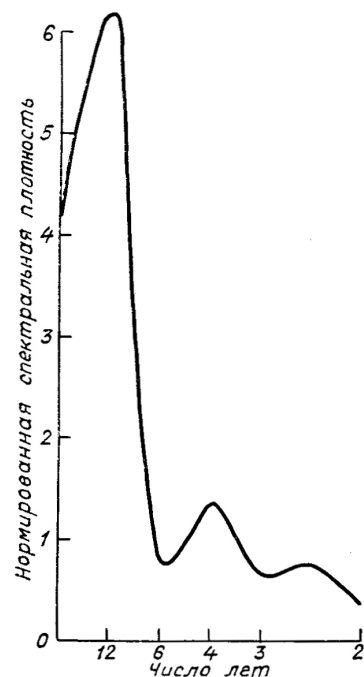


Рис. 2. Автоспектр временного ряда годичного прироста деревьев (спелый сосняк).

цесса $y(t)$ функции когерентности имеют сравнительно небольшие значения, что показывает незначительное влияние этих факторов на низких частотах. Похожие результаты были получены и при изучении влияния климатических факторов на прирост сосны в Минусинских борах [15].

Естественно предположить, что среднесрочные колебания годичного прироста деревьев обуславливаются колебаниями солнечной активности, основной период которых (около 11 лет) соизмерим с длиной наиболее выраженных колебаний годичного прироста деревьев.

Большое внимание изучению связей годичного прироста деревьев с солнечной активностью уделяется еще со времен родоначальника дендроклиматологии А. Дугласа. Сначала были получены обнадеживающие результаты, но дальнейшие исследования показали, что в отдельных временных отрезках может быть обнаружена довольно тесная связь прироста деревьев с солнечной ак-

тивностью, однако в дальнейшем она либо исчезает, либо переходит в отрицательную. В настоящее время большинство исследователей признает, что прямой зависимости ширины годичных колец от солнечной активности не существует и она проявляется косвенно, через изменение климатических показателей [5, 16, 20]. Какие это показатели и как они влияют на прирост деревьев — вопрос до сих пор окончательно не решенный.

Корреляционно-спектральный анализ связей прироста деревьев с солнечной активностью также показал отсутствие более тесной зависимости прироста деревьев от солнечной активности в диа-

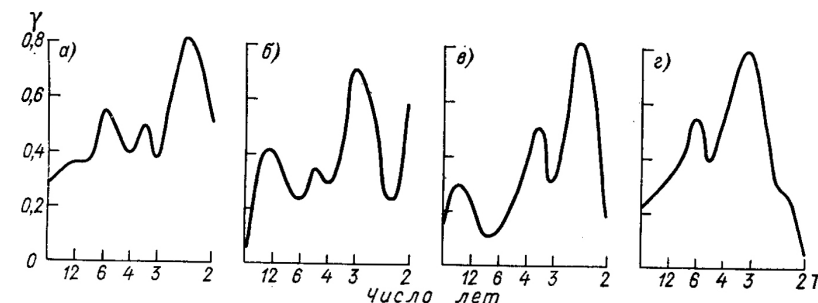


Рис. 3. Функции когерентности γ между годичным приростом деревьев и климатическими факторами (1900—1978 гг.).

а — средняя температура гидрологического года, б — количество осадков за гидрологический год, в — средняя температура апреля, г — количество осадков за апрель.

пазоне частот, близком к основному периоду колебаний активности солнца.

Теоретической основой дендроклиматических исследований считается закон лимитирующего фактора, согласно которому биологические процессы, в том числе и рост, не могут происходить быстрее, чем это определяется наиболее лимитирующим фактором [18]. При изучении влияния внешних факторов на прирост деревьев в настоящее время преобладает чисто статистический подход. Наиболее часто используются методы множественного регрессионного, факторного, а в последнее время и многомерного корреляционно-спектрального анализа [15, 18, 19]. Не вникая в недостатки и преимущества отдельных методов, отметим, что при этом не учитывается тот факт, что в своем взаимодействии с внешней средой всем живым организмам свойственно стремление к поддержанию равновесного состояния (гомеостаза).

После особенно неблагоприятных для роста деревьев лет с резким проявлением действия одного или нескольких лимитирующих факторов и сильной депрессии прироста деревьев стремление к восстановлению равновесного состояния неизбежно должно привести к возникновению затухающих колебаний годичного прироста деревьев, которые через определенное время возбуждаются

повторными проявлениями лимитирующего действия какого-либо одного или нескольких внешних факторов. Длина периодов таких колебаний и амплитуды отклонения от многолетней нормы в основном определяются силой внешних воздействий и внутренними свойствами самой системы (древостоя). На фоне этих колебаний происходят кратковременные колебания прироста деревьев, которые, как показывают исследования, в основном обуславливаются текущими изменениями климатических условий.

Какие внешние факторы вызывают сравнительно регулярно повторяющиеся периоды сильной депрессии прироста деревьев? На этот вопрос однозначного ответа не существует. Наиболее вероятно, что в умеренных широтах разные периоды сильной депрессии прироста обуславливаются такими факторами, которые значительно отклоняются от «нормы». По мнению некоторых исследователей [5, 22], значительное снижение прироста в 1928—1930 гг. и особенно в 1941—1942 гг. в основном обусловлено очень холодными зимами и затяжными веснами. В других случаях (например, 1963—1965 гг.) основным лимитирующим фактором, по всей вероятности, выступило очень ограниченное количество летних осадков.

Если к вышеизложенному добавить возможные случаи резонанса или погашения колебаний прироста, вызванных различными факторами, а также вполне реальное наличие внутренне обусловленных колебаний, то ограниченность чисто статистического подхода при оценке ответных реакций деревьев на воздействие различных факторов становится очевидным. Для этого необходимо более глубокое комплексное исследование внутренних закономерностей самого процесса и внешних факторов воздействия.

Успешное решение этой сложной задачи возможно лишь при тесном сотрудничестве специалистов различных отраслей науки.

ОЦЕНКА АНТРОПОГЕННО ОБУСЛОВЛЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПРИРОСТА ДЕРЕВЬЕВ И ПРОДУКТИВНОСТИ ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ

Большинство применяемых в настоящее время методик количественной оценки потерь радиального прироста деревьев в условиях загрязненной природной среды является различными вариантами метода аналогий. Они основаны на прямом сравнении прироста или индексов прироста деревьев, изучаемых (поврежденных) и контрольных (условно неповрежденных) древостоев [5, 8]. Как показывает анализ этих методов, найти контрольное насаждение аналогичного возраста, произрастающего в аналогичных лесорастительных условиях и к тому же с достаточно синхронными колебаниями годичного радиального прироста — задача трудно осуществимая.

Точность определения антропогенно обусловленных изменений прироста деревьев методом аналогий в основном зависит от удачного подбора контрольного древостоя и в значительной мере носит

субъективный характер. Имеются различные модификации, позволяющие до минимума снизить субъективизм при подборе аналогов [8], но разрешающая способность этих методов все же сравнительно невелика, и они фактически могут применяться лишь в условиях сравнительно сильного антропогенного воздействия, когда потери прироста измеряются десятками процентов.

Другая группа методов определения антропогенных изменений прироста деревьев, разработка которых начата лишь в последние годы, основана на исследовании временных рядов годичного прироста самих изучаемых деревьев и связей этих рядов с естественными и антропогенными внешними факторами. Известны достаточно успешные попытки осуществления такого подхода при сравнительно низких уровнях загрязнения, когда отсутствуют любые внешние признаки повреждения деревьев [21]. Разрешающая способность этих методов в основном обуславливается уровнем изучения зависимости колебаний годичного прироста деревьев от внешних и внутренних естественных факторов и может быть значительно повышена за счет более адекватного описания этих зависимостей.

На основе исследований, проведенных в сосняках, произрастающих при различных уровнях загрязнения природной среды, и анализа данных разных исследователей выявлены следующие закономерности в динамике структуры и продуктивности поврежденных древостоев.

1. В условиях загрязненной природной среды присходят два основных процесса, обуславливающих снижение продуктивности лесных насаждений: снижение прироста и увеличение отпада деревьев.

2. Процесс самоизреживания в поврежденных древостоях происходит аналогично процессу в древостоях, произрастающих в условно неповрежденных антропогенному воздействию районах, т. е. в первую очередь отмирают наиболее мелкие, отстающие в росте деревья. Чем интенсивнее воздействие, тем интенсивнее происходит и процесс самоизреживания, вовлекающий в отпад деревья со стволом большого диаметра.

3. В условиях загрязненной природной среды не только происходит уменьшение прироста по различным параметрам деревьев (радиального и по высоте), но и меняются соотношения между ними, т. е. прирост по высоте снижается быстрее, чем прирост по диаметру, радиальный прирост в верхней части ствола уменьшается более значительно, чем в нижней. Аналогичные процессы с возрастом происходят и в неповрежденных древостоях, но в условиях загрязненной среды интенсивность этих процессов повышается с увеличением интенсивности воздействия.

4. В процессе деструкции поврежденных древостоев в их пространственной структуре проявляется тенденция к более групповому размещению деревьев. Аналогичная тенденция наблюдается и при естественной деструкции, обусловленной возрастом древостоев (перестойные древостои).

5. Линейный прирост ветвей в условиях загрязненной природной среды сильнее уменьшается в верхней части кроны: они становятся туповершинными, как и в перестойных древостоях.

На основе полученных результатов можно предположить, что для древостоев, произрастающих в условиях загрязненной природной среды характерно сбалансированное ускорение процессов старения. Чем интенсивнее воздействие, тем быстрее проходит процесс старения древостоев.

Вывод об ускорении процессов старения в условиях загрязненной природной среды фактически не является новым. Н. П. Красинский еще в тридцатые годы отмечал, что в условиях загрязнения происходит снижение фотосинтеза, преждевременное старение и замедление роста.

Суть выдвинутого предположения состоит в том, что ускорение процесса старения происходит достаточно сбалансированно. Это создает возможность моделирования динамики продуктивности поврежденных древостоев на основе данных об изменениях одного количественного параметра, лучше всего радиального прироста деревьев, по которому оценивается скорость процессов старения. Проверка этого предположения при помощи математической модели, увязывающей динамику основных количественных параметров древостоя с данными о потерях радиального прироста деревьев показала хорошее согласие результатов моделирования с исследовательскими данными и в принципе подтвердила обоснованность вывода о сбалансированном ускорении процессов старения древостоев в условиях загрязненной природной среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андерсон Т. Статистический анализ временных рядов.— М.: Мир, 1976.— 755 с.
2. Бендат Дж., Пирсол А. Изменение и анализ временных рядов.— М.: Мир, 1974.— 463 с.
3. Бендат Дж., Пирсол А. Применение корреляционного и спектрального анализа.— М.: Мир, 1983.— 310 с.
4. Берри Б. Л., Либерман А. А., Шиятов С. Г. Периодические колебания индексов прироста лиственницы сибирской в Тазовской лесотундре и их прогноз.— Экология, 1979, № 6, с. 22—26.
5. Битвинскас Т. Т. Дендроклиматические исследования.— Л.: Гидрометеоздат, 1974.— 220 с.
6. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление.— М.: Мир, 1974, вып. 1.— 406 с.
7. Дергачев В. А., Кочаров Т. Е., Ступнева А. В. Изучение закономерностей прироста сосны географического профиля Мурманск—Карпаты методом корреляционно-спектрального анализа.— В кн.: Дендроклиматические исследования в СССР. Архангельск, 1978, с. 23.
8. Лиепа И. Я. Единая программа оценки реакции древостоя на влияние факторов воздействия.— В кн.: Моделирование и прогноз и экология. Рига, 1980, с. 44—67.
9. Ловелиус Н. В. Изменчивость прироста деревьев (дендроиндикация природных процессов и антропогенных воздействий).— Л.: Наука, 1979.— 230 с.
10. Молчанов А. А. Дендроклиматические основы прогнозов погоды.— М.: Наука, 1976.— 168 с.

11. Отнес Р., Энноксон Л. Прикладной анализ временных рядов.— М.: Мир, 1982.— 428 с.
12. Ритмика природных явлений.— Л.: Гидрометеоздат, 1979.— 346 с.
13. Терсков И. А., Ваганов Е. А. Структура сезонных образований у организмов как объект экологического мониторинга.— В кн.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Л.: Гидрометеоздат, 1981, т. 4, с. 143—154.
14. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование.— М.: Мир, 1975.— 534 с.
15. Черкашин В. П. Анализ динамических связей прирост деревьев и климатических факторов.— В кн.: Математический анализ компонентов лесных биогеоценозов. Новосибирск: Наука, 1979, с. 15—24.
16. Шиятов С. Г. Дендрохронология, ее принципы и методы.— В кн.: Проблемы ботаники на Урале. Свердловск, 1973, с. 53—81.
17. Яценко-Хмелевский А. А., Лайранд Н. И. Дендроиндикация как метод глобальной оценки влияния антропогенного воздействия на окружающую среду.— В кн.: Дендроклиматические исследования в СССР. Архангельск, 1978, с. 46.
18. Frits H. S. The climate-growth response.— In: Climate from three rings. Cambridge, 1982, p. 33—38.
19. Guiot J., Berger A. L., Munaut A. V. Response functions.— In: Climate from tree rings. Cambridge, 1982, p. 38—45.
20. Kairiūkštis L. Dendrochronology for the indication of background climate variation (Report to the USSR—USA symposium). Vilnius, 1981.— 37 p.
21. Philips S. O., Shelly J. M., Burkhardt H. E. Eastern White Pine growth retardation by fluctuating air pollutant levels: interaction of rain fall, age and symptom expression.— Phytopathology, 1977, vol. 67, N 6, p. 721—725.
22. Wenk G., Fiedler F. Interpretationen sur Periodisität der Durchmesserwachstums von Waldbäumen als Folge der Einwirkungen meteorologischer Elemente.— Abt. Math., Naturwiss., Techn., 1979 (1981), N 1, S. 467—481.

IDENTIFICATION OF MAN-INDUCED CHANGES IN THE PRODUCTIVITY OF WOOD STANDS ON THE BASIS OF TIME-SERIES ANALYSIS OF ANNUAL TREE GROWTH

R. A. Vuknis, D. A. Shipenietė, A. I. Jiliavichus

Lithuanian Agricultural Academy, USSR Ministry of Agriculture

Consideration of the possibility of using trees as natural monitors of man-induced environmental changes assumes that time-series of annual radial tree growth present an additive combination of the age trend, quasiperiodic function, and stationary random process. The authors introduce algorithms for assessing all the three components, and discuss the problem of distinguishing anthropogenic signals against the background of natural variations in annual ring size as well as limited efficiency of purely statistic approach to the problem solution.

The conclusion drawn on a balanced acceleration of wood stand aging under conditions of a contaminated environment is based on the data on the dynamics of main qualitative parameters of trees and wood stand productivity.