

USSR STATE COMMITTEE
FOR HYDROMETEOROLOGY

USSR ACADEMY
OF SCIENCES

ISSN 0207-2564

NATURAL ENVIRONMENT AND CLIMATE MONITORING LABORATORY

PROBLEMS
OF ECOLOGICAL
MONITORING
AND ECOSYSTEM
MODELLING

Volume XII



LENINGRAD GIDROMETEOIZDAT 1989

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ЛАБОРАТОРИЯ МОНИТОРИНГА ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ И КЛИМАТА

ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА И МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКОСИСТЕМ

Том XII

ЛЕНИНГРАД ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ 1989

УДК 551.510.42

Редколлегия: чл.-корр. АН СССР Ю. А. Израэль (председатель), д-р физ.-мат. наук С. М. Семенов, д-р биол. наук В. А. Абакумов, канд. биол. наук Г. Э. Инсаров, Э. Л. Полякова (секретарь).

Editorial Board: Corresponding Member of the USSR Academy of Sciences, Prof. Yu. A. Izrael (Chairman), Prof. S. M. Semenov, Prof. V. A. Abakumov, Dr. G. E. Insarov, Mrs. E. L. Polyakova (Secretary)

Рассматриваются методологические вопросы фонового экологического мониторинга. Излагаются результаты экологических наблюдений и экспериментов по оценке влияния факторов загрязнения и климатических факторов на биологические объекты, принципы построения специализированных банков данных и экспертных систем, методы обработки данных и математического моделирования отклика экосистем на экзогенные воздействия. Исследуются возможности эколого-экономического анализа последствий антропогенного загрязнения атмосферы.

Представляет интерес для географов, биологов, геофизиков, специалистов в области экологического мониторинга и экологов широкого профиля.

The collection comprises papers dealing with the methodology of background ecological monitoring. The results of ecological observations and experiments for estimating the effect of pollution and climatic factors on biological objects are discussed along with the principles of creating data banks and expertise systems, methods of data processing and mathematical modelling of ecosystem response to exogenous impact. Prospects of ecological and economic analysis of the effects of man-induced pollution of the atmosphere are examined.

The book is of interest for geographers, biologists, geophysicists, specialists in the sphere of ecological monitoring, and environmentalists.

П 1502000000-188
069 (02)-89 11-89

ISBN 5-286-00572-1

© Лаборатория мониторинга природной
среды и климата (ЛАМ) Госкомгидромета
и АН СССР, 1989

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	9	
НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ И ОПЫТ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА		
Ю. А. Изразль, С. М. Семенов, И. М. Кунина. Загрязнение атмосферы регионального и глобального масштабов: оценка последствий воздействия на растительность суши и проблема экологического нормирования	10	
В. А. Абакумов, Ю. В. Курилова, В. А. Семин. Циклические колебания гидрометеорологических характеристик и биомониторинг антропогенных изменений	18	
А. А. Аугустайтис. Особенности формирования надземной фитомассы сосновых молодняков в условиях загрязнения природной среды	32	
Н. И. Базилевич. Продуктивность лугов в суббореальной степной зоне	52	
О. Б. Блюм, Ю. Г. Тютюнник. Исторический аспект регионального мониторинга тяжелых металлов в атмосфере, осуществляемый методом биогеохимической лишеноиндикации (на примере Украинской ССР)	73	
В. А. Ветров, Э. Ф. Корнакова, А. И. Кузнецова, Л. Г. Коробейникова. Содержание металлов в рыбах Байкала	88	
Т. В. Замараева, А. А. Рудкова. Изучение зависимости скорости роста одноклеточных водорослей от температуры, кислотности среды и концентраций тяжелых металлов	101	
И. Д. Инсарова, Г. Э. Инсаров. Сравнительные оценки чувствительности эпифитных лишайников различных видов к загрязнению воздуха	113	
А. Е. Кухта. Методические вопросы использования коловраток как объектов мониторинга экосистем суши	176	
Т. В. Малышева, Т. Ю. Толпышева. Экологические аспекты возобновления сосны	187	
Б. К. Павлов, Е. И. Грошева, А. М. Бейм. Оценка уровней техногенного накопления тяжелых металлов компонентами растительности лесных экосистем, существенно различающихся геохимическим фоном	204	
О. Н. Пономарева. Экспериментальное изучение влияния гербицидов на размножение почвообитающих коллембол	211	
О. А. Пястолова, Л. С. Некрасова, В. Л. Вершинин, Л. Е. Лукьянова, О. А. Лукьянов, Э. З. Гатиятуллина. Принципы зоологического контроля природной среды	220	
А. В. Пчелкин. Эпифитные лишайники Сары-Челекского заповедника	235	
О. Ф. Садыков, М. Г. Фарафонов. Значение системы раннего предупреждения в экологическом мониторинге	242	
Б. Н. Фомин, И. Я. Николишин, Г. Н. Воронская, Е. И. Грошева. Экспериментальная проверка гипотезы о транспирации металлов растениями	251	
М. А. Хачатуров. Дендрохронологические исследования в СССР и задачи биоклиматического мониторинга лесов	259	
А. Р. Чхиквадзе, Г. П. Кучава, Л. М. Будаева. Показатели степени загрязнения поверхностных вод Закавказья	266	
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОСИСТЕМ		
М. Я. Антоновский, В. М. Бухштабер, А. А. Зубенко. Статистический анализ долговременных тенденций в рядах наблюдений концентраций CO ₂ в атмосфере	273	
М. Д. Корзухин, В. К. Мацквичюс, М. Я. Антоновский. Периодическое поведение возрастно-распределенной популяции деревьев	284	
А. Б. Горстко, М. Г. Ерещукова, А. Н. Литвиненко, Н. С. Абросов. О возможностях программных систем в решении задач прогнозирования состояния водных объектов	311	
А. А. Ройтман. Анализ неравномерных иерархических массивов данных и его роль в экологических исследованиях	324	
А. А. Ройтман, Г. Э. Инсаров, С. М. Семенов. Система сбора, хранения и обработки лишенометрической информации	336	
В. В. Суханов. К моделированию стохастического роста древостоев	351	
Р. А. Юкнис, М. И. Лекене. Методы оценки антропогенных изменений роста деревьев и древостоев на основе ретроспективного анализа годичных колец древесины	363	
М. Я. Антоновский, Н. М. Виноградова, М. О. Никонова. О разработке схемы эколого-экономической экспертизы вариантов развития промышленного региона	381	

CONTENTS

Preface	9	
SCIENTIFIC SUBSTANTIATION OF AND EXPERIENCE GAINED IN ECOLOGICAL MONITORING		
Yu. A. Izrael, S. M. Semenov, I. M. Kunina. Regional- and global-scale atmosphere pollution: assessment of the effects of impact on terrestrial plants and ecological standardization	17	
V. A. Abakumov, Yu. V. Kurilova, V. A. Semin. Cyclic variations of hydrometeorological characteristics and biomonitoring of man-induced changes	31	
A. A. Augustaitis. Peculiarities of formation of the above-ground phytomass of basic undergrowths exposed to environmental pollution ..	51	
N. I. Bazilevich. Productivity of meadows in sub-boreal steppes ..	72	
O. B. Blium, Yu. G. Tiutiunnik. Historical aspect of the regional monitoring of heavy metals in the atmosphere using biogeochemical lichen-indication techniques (taking Ukrain as an example)	87	
V. A. Vetrov, E. F. Kornakova, A. I. Kuznetsova, L. G. Korableinikova. Metals in the Lake Baikal fish	100	
T. V. Zamarayeva, A. A. Rudkova. Investigation of the dependence of unicellular algae growth on the temperature and acidity of the medium and heavy metal concentration	112	
I. D. Insarova, G. E. Insarov. Comparative assessments of epiphytic lichen sensitivity to air pollution	175	
A. E. Kukhta. Method-related items of using rotifers in terrestrial ecosystem monitoring	186	
T. V. Malysheva, T. Yu. Tolpysheva. Ecological aspects of pine restocking	203	
B. K. Pavlov, E. I. Grosheva, A. M. Beim. Assessment of the levels of technogenous accumulation of heavy metals by plant components in forest ecosystems of significantly varying geochemical backgrounds	210	
O. N. Ponomareva. Experimental study of herbicide effects on the reproduction of soil-dwelling collembolans	219	
O. A. Pyastolova, L. S. Nekrasova, V. L. Vershinin, L. E. Lukjanova, O. A. Lukjanov, E. Z. Gatiyatullina. Principles of the environment zoological management	234	
A. V. Pchiolkin. Epiphytic lichens in the Sary-Chelek Biosphere Reserve	241	
O. F. Sadykov, M. G. Farafontov. The early-warning system within ecological monitoring	250	
B. N. Fomin, I. Ya. Nikolishin, G. N. Voronskaya, E. I. Grosheva. Experimental verification of the hypothesis on metal transpiration by plants	258	
M. A. Hachaturov. Dendrochronological studies in the USSR: the goals of forest bioclimatic monitoring	265	
A. R. Chkhikvadze, G. P. Kuchava, L. M. Budayeva. Indicators of the extent of surface water pollution in Transcaucasus	272	
MATHEMATICAL ECOSYSTEM MODELLING		
M. Ya. Antonovsky, V. M. Bukhshtaber, A. A. Zubenko. Statistical analysis of long-term trends in the atmospheric CO ₂ concentrations	283	
M. D. Korzukhin, V. K. Matskyavichus, M. Ya. Antonovsky. Periodic behaviour of an age-distributed tree population	310	
A. B. Gorstko, M. G. Yereschukova, A. N. Litvinenko, N. S. Abrosov. Application of programme systems to solving problems of water quality prediction	323	
A. A. Roitman. Analysis of non-uniform hierarchical data sets and its role in ecological studies	335	
A. A. Roitman, G. E. Insarov, S. M. Semenov. The system for lichenometric data collection, storage and processing	350	
V. V. Sukhanov. Forest growth stochastic simulation	362	
R. A. Juknis, M. I. Lekene. The methods of assessment of man-induced changes in tree and tree-stand growth, based on retrospective tree-ring analysis	380	
M. Ya. Antonovsky, N. M. Vinogradova, M. O. Nikonorova. To the development of the scheme of ecological and economic expert evaluation of the variants of an industrial region development	389	

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ АНТРОПОГЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ РОСТА ДЕРЕВЬЕВ И ДРЕВОСТОЕВ НА ОСНОВЕ РЕТРОСПЕКТИВНОГО АНАЛИЗА ГОДИЧНЫХ КОЛЕЦ ДРЕВЕСИНЫ

Р. А. Юкнис, М. И. Лекене

Лаборатория мониторинга леса
при Литовской сельскохозяйственной академии

При реализации программы биологического мониторинга преимущество следует отдавать количественным, инструментально легко определяемым показателям, отражающим основные свойства изучаемых экосистем. Показатели роста и продуктивности древесного яруса интегрально отражают влияние внешних воздействий на лесные экосистемы в целом и являются основными показателями, отражающими экологические и экономические последствия загрязнения природной среды.

Возможности выявления антропогенно обусловленных изменений изучаемых биологических показателей в основном обуславливаются их чувствительностью к внешним воздействиям, изменчивостью в пространстве и во времени и длиной временного ряда наблюдений. В связи с естественной временной изменчивостью биологических показателей и их многолетней цикличностью на основе краткосрочных наблюдений возможно получение неверных и даже противоположных выводов.

Деревья, регистрируя в годичных кольцах древесины различные изменения природной среды (естественные и антропогенные), обладают уникальными возможностями естественных мониторов. Главное преимущество изучения годичного радиального прироста деревьев заключается в возможности получения уже к началу реализации системы наблюдений достаточно длинных рядов данных на основе ретроспективного анализа годичных колец древесины.

Применяемые методы оценки потерь прироста деревьев в условиях загрязненной природной среды условно можно разделить на три основные группы.

1. Методы, основанные на сравнении абсолютных или относительных величин прироста деревьев изучаемых (поврежденных) и контрольных (условно неповрежденных) древостоев.

2. Методы, основанные на сравнении прироста деревьев различных классов состояния в пределах изучаемого древостоя или их совокупности.

3. Методы, основанные на количественном анализе дендрохронологических рядов и зависимости прироста деревьев от естественных и антропогенных факторов.

Большинство применяемых в настоящее время методик относится к первой группе. Точность оценки при этом носит субъектив-

ный характер и в значительной мере зависит от удачного подбора контрольного древостоя. Для исключения возможных различий в темпах и характере роста подобранных аналогов обычно сравнивается не сам прирост, а его относительные отклонения от долголетней тенденции (возрастного тренда)—индексы прироста [2, 15, 39].

Однако прямое вычисление разницы между индексами прироста подобранных аналогов неполностью устраняет естественные различия между сравниваемыми древостоями и их ростом. Поэтому при одинаковой степени повреждения в зависимости от выбора контроля возможны различные и даже противоречивые оценки. Этот недостаток в значительной мере может быть устранен путем сравнения не самого прироста или индексов прироста поврежденного и контрольного древостоя, а соотношения прироста за изучаемый период с приростом за более ранний (отчетный) период, который обычно подбирается в отрезке временного ряда, расположенном до предполагаемого начала воздействия.

В последние годы методика подбора контрольных древостоев и сам метод оценки были модифицированы, что позволило значительно снизить субъективизм и повысить точность самих оценок [10]. Усовершенствованный метод контрольных насаждений успешно применяется в условиях достаточно сильного локального загрязнения природной среды с явно выраженным градиентом уровня загрязнения при удалении от его источника. Однако в условиях массового поражения лесов региональных масштабов подбор контрольных древостоев становится проблематичным и для решения задач фоновой мониторинга этот метод неприемлем. В связи с этим в данной статье более детально рассматриваются лишь методы второй и третьей групп.

Методы оценки потерь прироста деревьев различных классов состояния

Крупномасштабное повреждение и усыхание лесов в странах Западной и Центральной Европы показало, что в индустриально развитых регионах эта проблема из локальной переросла в региональную и возникает серьезная опасность глобальных эффектов [40].

В нашей стране до настоящего времени повреждение лесов наблюдалось преимущественно локально, хотя зоны видимого поражения лесов вокруг наиболее крупных промышленных центров и комплексов часто распространяются на десятки километров [14, 18, 20]. В западных республиках и областях СССР такое положение дополнительно усугубляется трансграничным переносом загрязненных воздушных масс. Наблюдения и исследования, проведенные в лесах Литвы, показывают, что признаки поражения лесов региональных масштабов в нашей республике уже проявляются.

Для сбора необходимой информации о масштабах и тенденциях происходящих процессов массового поражения и усыхания лесов

в 1985 г. была разработана «Международная программа по оценке и мониторингу воздействий загрязнения воздуха на леса в регионе ЕЭК» [11], для осуществления которой были созданы два центра: «Восток» (Братислава, ЧССР) и «Запад» (Гамбург, ФРГ). В качестве основного показателя при развертывании этой программы было принято состояние деревьев по внешним признакам кроны (степень дефолиации и изменение цвета хвои). В этой же программе отмечалось, что определение класса состояния насаждений является недостаточно информативным как с экологической, так и с экономической точки зрения, и предусматривалось уделять больше внимания детальным исследованиям роста и продуктивности деревьев и древостоев на постоянных пробных площадях. Однако это направление работ в рамках упомянутой программы не получило должного развития. Для обобщения и разработки специализированных методов по изучению и оценке изменений прироста поврежденных насаждений в 1987 г. была создана специальная рабочая группа [24]. В разработанном документе большое внимание уделено изучению прироста деревьев различных классов состояния и возможностям взаимосвязи данных обследования состояния лесных насаждений и изменения их прироста и продуктивности.

Различными исследователями, изучавшими этот вопрос, получены достаточно противоречивые результаты. По данным одних исследований [28], однозначной связи между степенью поражения кроны и потерями прироста не существует [31], или же обнаружено, что прирост начинает снижаться лишь при сильном повреждении деревьев, когда потери хвои составляют 50 % и более. По данным других исследований [4, 32, 34], снижение прироста деревьев начинается раньше, чем очевидные морфологические изменения кроны.

Большинство исследователей выявило достаточно тесную зависимость потери прироста от степени повреждения кроны [4, 36], однако характер этой зависимости различается для древостоев различного породного состава, возраста и т. д. Получено, что для хвойных очевидное снижение прироста начинается при потере 15 % хвои, а для ели — при потере не менее 30 % хвои [25]. При аналогичных потерях хвои потери прироста с увеличением возраста древостоев увеличиваются [35].

Н. Крамер показал, что на зависимость прироста от потерь хвои (листвы) в значительной степени влияют различия в параметрах ствола и кроны деревьев, в пространстве их роста и т. д. Без учета этих различий выявление взаимосвязей уровня повреждений кроны и прироста деревьев часто становится невозможным [33]. Им было показано, что существует достаточно тесная зависимость отношения прироста по объему к поверхности кроны от степени дефолиации кроны. На основе этой зависимости было получено, что в пораженных ельниках при потере 30 % хвои прирост по объему в среднем уменьшается на 29 %, при потере 40 % хвои — на 49 %, при потере 50 % хвои — на 66 %.

Для выявления потерь прироста деревьев различных классов состояния нами были использованы материалы пробных древостоев, заложенных на различном расстоянии от Ионавского ПО «Азотас». В пределах каждого пробного древостоя было срублено 20—30 случайно отобранных модельных деревьев. Краткая характеристика пробных древостоев представлена в табл. 1.

Таблица 1

Краткая характеристика пробных древостоев

Пробный древостой	Расстояние от источника загрязнения, км	Возраст, число лет	Густота древостоя, шт/га	Средняя высота, м	Средний диаметр, см	Запас стволовой древесины, м³/га
1	2,3	68	290	20,1	24,5	126
2	4,0	67	330	21,9	25,8	180
3	7,0	63	310	23,6	25,6	177
4	15,0	63	540	22,7	24,9	288

Класс состояния деревьев определялся по шкале, применяемой в рамках «Международной программы по оценке и мониторингу воздействий загрязнения воздуха на леса в регионе ЕЭК»:

Класс состояния	Степень дефолиации	Потери хвои, %
1	Дефолиация отсутствует	до 10
2	Слабая дефолиация	11—25
3	Средняя дефолиация	26—60
4	Сильная дефолиация	> 60

Поскольку на зависимость прироста от потерь хвои влияют различия в параметрах самих деревьев, в занимаемом пространстве роста и тот факт, что все параметры ствола и кроны деревьев, а также площадь их роста тесно коррелируют с диаметром ствола деревьев, была изучена зависимость радиального прироста деревьев от их диаметра для различных классов состояния. Получено, что теснота этой связи тем слабее, чем более повреждены деревья. Коэффициент корреляции колеблется от 0,721 для деревьев 1-го класса состояния до 0,433 для деревьев 4-го класса. На основе полученных данных построено множественное регрессионное уравнение зависимости радиального пятилетнего прироста по диаметру деревьев и класса состояния (рис. 1).

Из представленных данных видно, что потери прироста слабо поврежденных деревьев (класс 2) составляют в среднем 14 %, средне поврежденных деревьев (класс 3) — 37 %, сильно поврежденных деревьев (класс 4) — 70 %.

Основным недостатком методов оценки потерь прироста, основанных на сравнении прироста деревьев различных классов состояния, является тот факт, что у деревьев 1-го класса состояния (условно здоровые деревья), как правило, также имеются потери прироста. По данным Г. Венка [4], неучет этого факта может привести к значительной недооценке реальных потерь прироста.

Кроме того, этот метод может быть применен лишь в условиях сравнительно острого поражения лесных насаждений.

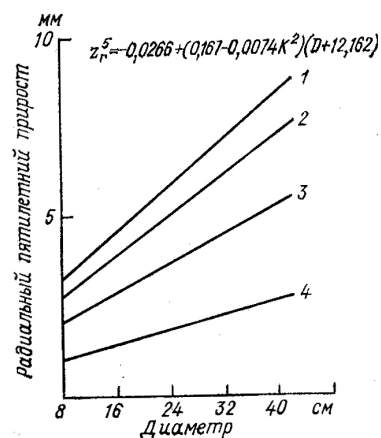


Рис. 1. Зависимость радиального пятилетнего прироста от диаметра (D) и класса состояния деревьев (K).

1 — здоровые деревья, 2 — слабо поврежденные, 3 — средне поврежденные, 4 — сильно поврежденные деревья.

Дендрохронологические методы оценки потерь прироста

В связи с возникновением проблемы повреждения и усыхания лесов в условиях загрязнения природной среды актуальность дендрохронологических исследований значительно возросла. По мнению специалистов, углубленный анализ дендрохронологических рядов предоставляет одну из немногих возможностей для объективной оценки антропогенных изменений природной среды, в том числе и на глобальном уровне [23].

При решении задач дендромониторинга анализ дендрохронологических рядов приобретает свою специфику. Во-первых, сам объект исследований рассматривается несколько с других позиций. Если для дендрохронологов основной интерес представляет не величина самого прироста, а его отклонения от долголетней тенденции — индексы прироста, то для решения задач дендромониторинга основным носителем информации является именно прирост, позволяющий непосредственно судить о продуктивности древесного яруса лесных экосистем и ее антропогенных изменениях. Колебания прироста относительно линии возрастного тренда в данном случае являются информационным шумом и представляют основную трудность при оценке антропогенных изменений прироста. Выделение сигнала конкретного фактора (в данном случае загрязнения

природной среды) на фоне колебаний, обусловленных всем комплексом внешних и внутренних факторов, является сложной задачей.

Использование индексов прироста при решении таких задач возможно лишь в том случае, когда они вычислены способом, позволяющим провести и обратные вычисления, по индексам вычислить величину прироста, т. е. когда долговременная тенденция роста, от которой вычисляются индексы, выражена аналитически и представлены параметры этого уравнения.

Метод скользящих средних, который до сих пор традиционно используется многими дендрохронологами нашей страны, не представляет такой возможности, и его применение для решения задач дендромониторинга неоправдано, тем более что при изменении этого метода для конца ряда, который в данном случае представляет наибольший интерес, индексы вычисляются с пониженной точностью. Кроме того, большим недостатком метода скользящих средних является тот факт, что его применение может привести к возникновению реально не существующих колебаний вычисленного ряда индексов, длина периода которых обуславливается периодом осреднения [13].

Для аналитического определения линии возрастного тренда ширины годичных колец в настоящее время дендрохронологами чаще всего применяются уравнения отрицательной экспоненты [29] или другие монотонно убывающие функции с максимальным значением прироста в начале дендрохронологического ряда, что не соответствует биологическим закономерностям процесса формирования прироста деревьев, который, как известно, чаще всего имеет максимальные значения на 15—40-м году жизни дерева. При решении задач дендромониторинга важно увязать данные анализа хронологий годичного прироста с моделями роста деревьев. Для этого необходимо, чтобы, интегрируя функцию прироста, можно было определить траекторию роста диаметра деревьев.

Рост деревьев по диаметру хорошо аппроксимируется кривой роста Мичерлиха, которая в нашей лесоводственной литературе известна как формула Дракина—Вуевского:

$$D = a(1 - e^{-bT})^c, \quad (1)$$

где D — диаметр деревьев; T — возраст дерева или древостоя; a , b , c — параметры уравнения.

Для аналитического выражения возрастного тренда прироста деревьев, охватывающего весь период жизни дерева, удобно использовать первую производную этой кривой.

В отличие от дендрохронологических исследований, при решении задач дендромониторинга в основном приходится работать со сравнительно короткими рядами, составленными по данным растущих деревьев и, как правило, не превышающими 100 лет. Кроме того, дендроклиматологи обычно стараются работать в экстремальных для роста деревьев условиях с явно выраженным одним лимитирующим фактором, что значительно облегчает выявление причин естественных колебаний прироста [19]. При изучении влияния ан-

тропогенных факторов на прирост деревьев чаще всего приходится изучать древостои, произрастающие в условиях, близких к оптимальным, с одновременным или поочередным проявлением действия нескольких лимитирующих факторов, что еще более затрудняет выявление и оценку антропогенных отклонений прироста на фоне его естественных колебаний.

Более детальный анализ временных рядов годичного прироста деревьев и их связей с различными внешними и внутренними факторами неотрывно связан с изучением скрытой цикличности колебаний ширины годичных колец, которые, как указывалось выше, представляют основную трудность при оценке антропогенных изменений прироста.

Ранее исследования цикличности многолетних колебаний прироста деревьев носили просто визуальный характер, а в настоящее время все чаще основываются на применении математических методов [1, 8, 19].

В разработанной авторегрессионной модели [22] временная последовательность годичного прироста деревьев $\{Y_t, t = \overline{1, N}\}$ представлена как аддитивная смесь возрастного тренда M_t , конечной суммы гармонических компонентов F_t и стационарного случайного процесса Z_t , т. е. имеет вид

$$Y_t = M_t + F_t + Z_t, \quad t = \overline{1, N}. \quad (2)$$

На основе разработанной модели проведенный анализ данных, полученных в Березинском биосферном заповеднике и лесах нашей республики, подтвердил, что для данного региона наиболее характерны циклы колебаний ширины годичных колец следующей длины: 2—3; 5—6; 9—13; 20—24; 32—35; 80—90 лет. Наиболее существенные периоды колебаний 9—13 и 20—24 года, которые после снятия возрастного тренда обуславливают примерно две трети дисперсии изучаемых рядов.

Следует отметить, что нестабильность длины циклов и амплитуд их отклонений, которая часто смущает многих исследователей, является необходимым свойством живых организмов, позволяющим им оптимально приспособиться к изменениям внешних условий.

Ритмика природных явлений вызывает повышенный интерес у представителей многих отраслей науки. Комплексное познание ритмичности природных явлений и процессов, видимо, является необходимым этапом при разработке научно обоснованных прогнозов динамики биосферы и отдельных ее компонентов.

Для оценки антропогенных изменений роста деревьев по дендрохронологическому ряду необходим прогноз «нормального» роста деревьев за изучаемый период. На основе сравнения прогнозируемых и фактических рядов прироста за этот период могут быть определены его отклонения от «нормы».

Прогноз по авторегрессионной модели основан на статистическом изучении закономерностей динамики самого прогнозируемого

показателя. Несмотря на общеизвестные недостатки таких моделей, не позволяющих раскрыть роль отдельных факторов в динамике изучаемых показателей, они имеют то преимущество, что здесь в неявном виде учитывается комплексное воздействие всех

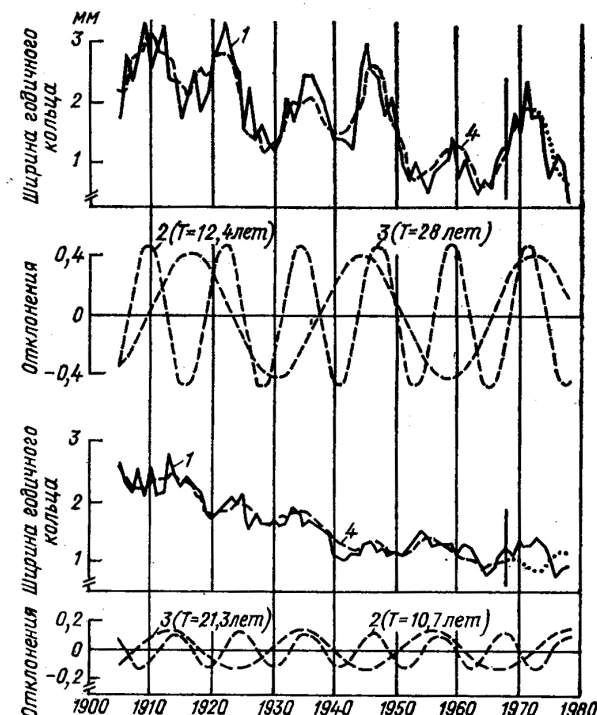


Рис. 2. Авторегрессионная модель временного ряда годичного радиального прироста деревьев (спелые сосняки).

1 — годичный радиальный прирост деревьев; 2—3 — наиболее существенные периодические слагаемые; 4 — авторегрессионная модель временного ряда (за вертикальной линией точками обозначены прогнозируемые по модели значения прироста).

известных и неизвестных нам факторов. Точность прогноза по моделям этого типа в основном зависит от стабильности выделяемых периодов. При длине исходного ряда 70—100 лет возможно получение достаточно точного прогноза на 5—10 лет (рис. 2).

Однако прогностических возможностей моделей этого типа не стоит переоценивать. По своей сути прогноз по авторегрессионной модели является простой экстраполяцией со всеми вытекающими последствиями. Точность такого прогноза предсказать фактически невозможно, и достаточно часто (примерно для 30 % изученных рядов) она бывает совершенно неприемлемой (см. рис. 2).

Значительно более точный прогноз прироста деревьев за определенный ретроспективный период можно получить на основе многомерных моделей зависимости прироста деревьев от климатических факторов [12]. Известны достаточно успешные попытки осуществления такого подхода при сравнительно низких уровнях загрязнения [26, 27, 34].

На основе выявленных зависимостей колебаний годичного прироста деревьев от естественных факторов возможно исключение значительной доли дисперсии дендрохронологических рядов и увеличение разрешающей способности самого метода.

Изучением зависимости колебаний ширины годичных колец от природных условий, прежде всего от климатических факторов и солнечной активности, уже почти 100 лет занимаются дендроклиматологи. Хотя при этом решается обратная задача — как по ширине годичных колец восстановить климат прошлого, — результаты и методы дендроклиматических исследований могут быть использованы при решении задач дендромониторинга.

Несмотря на значительные успехи дендроклиматологов, точного количественного выражения связей климатических факторов с приростом деревьев современная дендроклиматология не дает [30]. При разработке моделей зависимости прироста деревьев от климатических факторов чаще всего рассматриваются линейные зависимости. Как показывают исследования различных авторов, теснота парных связей обычно является невысокой и в зоне умеренного климата коэффициент корреляции редко превышает 0,3—0,4 [5, 7, 9].

На рис. 3 представлены данные о тесноте связей индексов годичного радиального прироста деревьев со среднемесячными температурами и месячными осадками за текущий и прошлый год. Сбор полевых материалов проводился в лесах Ионавского района Литовской ССР, произрастающих на расстоянии 15—20 км с наветренной стороны ПО «Азотас» (средневозрастные сосняки, свежая суборь). Дендрохронологический ряд для каждого пробного древостоя составлялся по данным 25—30 учетных деревьев 1—3-го классов роста по Крафту. Учетные деревья отбирались систематическим способом по специально разработанной методике [21]. Индексы прироста рассчитывались от линии возрастного тренда, определенной аналитически по формуле отрицательной экспоненты [29].

Исследования показали (см. рис. 3), что в изучаемых сосняках наиболее существенно на рост деревьев по диаметру влияют температуры конца зимы (февраль), весны (март, апрель) и конца лета (август) текущего года, а также осенние температуры прошлого года (сентябрь, октябрь). Влияние осадков на прирост деревьев в наших условиях менее существенно. Наиболее тесная связь выявлена с осадками второй половины зимы (январь, февраль) и лета (июнь, июль).

Необходимо отметить, что изучение линейных зависимостей между приростом деревьев и природными факторами является значительным упрощением. В климатических условиях, далеких от

оптимальных, такое упрощение, видимо, является вполне обоснованным. Однако дендроклиматологами неоднократно отмечалась криволинейность связей прироста с климатическими факторами

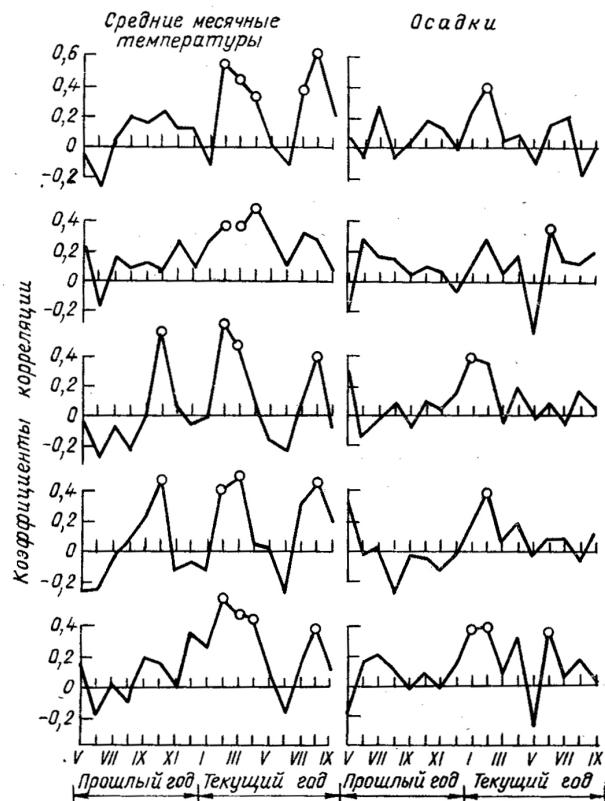


Рис. 3. Коэффициенты корреляции индексов годичного радиального прироста деревьев со среднемесячными температурами и месячными осадками.

Коэффициенты корреляции значимы при $P=0,95$.

[3, 6]. В наших условиях криволинейность этих зависимостей во многих случаях также существенна.

Еще Шелфордом [38] было показано, что лимитирующее действие на активность (рост) живых организмов оказывают как недостаток, так и избыток тепла, влаги и т. п. Было введено понятие пределов толерантности как диапазона между экологическим минимумом и максимумом. Многочисленными исследованиями и экспериментами было показано, что кривые зависимости различных

биологических показателей от внешних факторов (кривые толерантности), как правило, имеют колоколообразную форму и лучше всего аппроксимируются кривой вида

$$Y = e^{a+bX-cX^2} \quad (3)$$

или — после логарифмического преобразования —

$$\ln Y = a + bX - cX^2; \quad (4)$$

в многомерном случае имеем

$$\ln Y_i = a_0 + \left[\sum_{i=1}^n (b_i X_{i1} - c X_{i1}^2) \right]. \quad (5)$$

Теоретическое обоснование указанных зависимостей дано Б. Фоминым [17].

Согласно приведенным теоретическим представлениям, были вычислены натуральные логарифмы годичного радиального прироста деревьев для каждого дендрохронологического ряда и далее определены индексы логарифмов годичного радиального прироста.

При разработке многомерных моделей зависимости индексов логарифмов годичного прироста от среднемесячных температур и месячных осадков статистически достоверным ($P=0,95$) обычно оказывается влияние 3—4 факторов. Примерно для половины включенных в модель факторов достоверно влияние и квадратических членов. Такой моделью чаще всего объясняется 40—80 % дисперсии дендрохронологического ряда (рис. 4).

Среднеквадратические ошибки разработанных моделей для изученных рядов колеблются в пределах 7,2—10,4 % (табл. 2). Для прогнозируемых десятилетних отрезков среднеквадратические ошибки выше и колеблются в пределах 8,6—13,7 %.

Таблица 2

Среднеквадратические ошибки многомерных моделей климат — прирост деревьев и прогноза по этим моделям (сосняки, свежая суборь)

Пробный древостой	Средний возраст, число лет	Бонитет	Среднеквадратическая ошибка, %	
			модели	прогноза
1	56	2	7,2	12,6
2	74	2	8,2	8,6
3	62	2	9,2	13,7
4	63	2	8,1	9,8
5	52	2	10,4	12,5

Некоторыми авторами [12] для улучшения аппроксимации предлагается включить в модель в качестве дополнительного предиктора значения прироста прошлого года. Дендрохронологические ряды имеют достаточно высокую автокорреляцию (коэффициент корреляции при однолетнем лаге обычно колеблется в пределах

0,5—0,8), что значительно повышает точность модели. Например для пробного древостоя № 5 коэффициент множественной корреляции при этом возрастает с 0,616 до 0,925, а среднеквадратическая ошибка модели снижается от 10,4 до 4,9 %. Однако очевидно, что

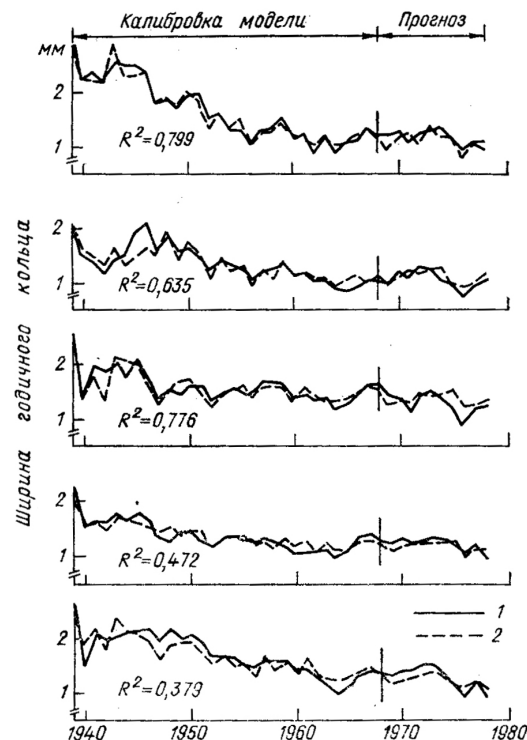


Рис. 4. Сравнение фактических и расчетных данных годичного радиального прироста деревьев в условно неповрежденных древостоях (Ионавский лесхоз, припевающие сосняки).

1 — фактические данные, 2 — расчетные данные.

реальной прогностической ценности такой прием не имеет, так как фактические значения прироста прошлого года, за исключением первого шага прогноза, будут отсутствовать.

В отечественной дендроклиматологии при разработке моделей зависимости годичного радиального прироста от климатических условий обычно используются не их месячные значения, а более обобщенные показатели — температура и осадки за гидрологический год или вегетационный период, сумма физиологически эффективных температур, длина вегетационного периода, различные гид-

ротермические показатели за определенный период и т. д. Часто в такие модели предлагается включать показатели солнечной активности, основной период колебания которой (около 11 лет) соизмерим с длиной наиболее выраженных колебаний годичного при-

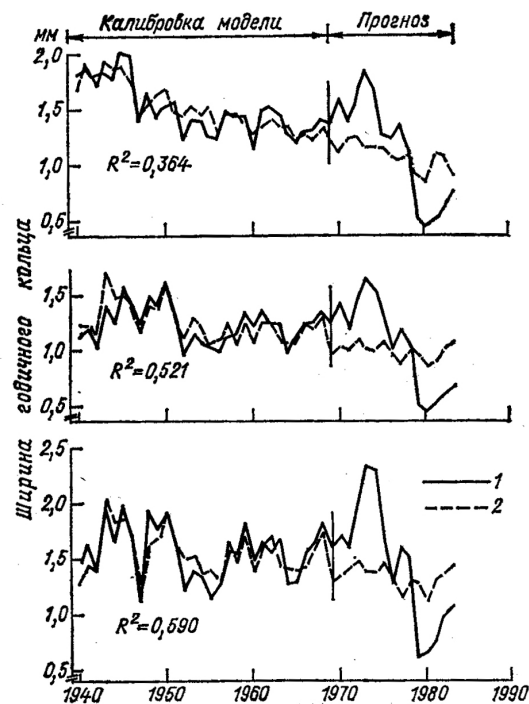


Рис. 5. Сравнение фактических и расчетных данных годичного радиального прироста деревьев в поврежденных древостоях (Ионавский лесхоз, приспевающие сосняки).

1 — фактические данные, 2 — расчетные данные.

роста. Для изученных дендрохронологических рядов достоверной связи с солнечной активностью не обнаружено.

Наши исследования показали, что обобщенные показатели климата часто более тесно коррелируют с приростом, чем климатические показатели отдельных месяцев. Однако они более тесно коррелированы и между собой, что снижает их эффективность при составлении многомерных моделей. При использовании месячных климатических показателей в модель обычно включается больше факторов и точность модели получается выше.

На рис. 5 представлены фактические и рассчитанные по многомерным моделям данные о радиальном приросте приспевающих

сосняков (свежая суборь), произрастающих на расстоянии 3—3,5 км с подветренной стороны Ионавского ПО «Азотас». Видно, что в начале 70-х годов прирост значительно повысился. Это можно объяснить начальным удобрительным воздействием азотосодержащих выбросов. Однако через 4—5 лет началось резкое снижение прироста изучаемых древостоев, а с 1979 г. стали явно заметными признаки массового поражения деревьев.

Исследования показали, что теснота связей между приростом деревьев и климатическими факторами в значительной мере зависит от длины изучаемых временных рядов. При большой длине рядов теснота связей обычно снижается. Этому, видимо, в основном способствуют две причины. Во-первых, реакция деревьев на воздействие внешних факторов в процессе онтогенеза, по данным некоторых исследователей [37], меняется. Во-вторых, с увеличением глубины ретроспекции даже при самой тщательной обработке материалов увеличивается вероятность ошибок при датировке годичных колец.

По нашим данным, при разработке многомерных моделей климата—прирост деревьев наиболее рационально использовать временные ряды длиной 30—50 лет. Анализ исследовательских данных и материалов других авторов показывает, что на основе таких моделей реальным является выявление антропогенных сдвигов прироста деревьев, составляющих не менее 10 %.

Необходимо отметить, что до настоящего времени при изучении влияния внешних факторов на прирост деревьев преобладает чисто статистический подход. При этом не учитываются некоторые основные закономерности динамики популяций — в первую очередь способность развивающихся систем (в данном случае древостоев) к саморегуляции и развитию по определенным стабильным траекториям, т. е. способность компенсировать влияние лимитирующих факторов и через переходный колебательный режим вернуться на прежнюю траекторию развития. Это свойство развивающихся систем, которое было названо гомеорезом [16], видимо, может рассматриваться как более широкое истолкование понятия гомеостаза.

Стремление системы к развитию по стабилизированной траектории приводит к тому, что реакция деревьев не всегда соответствует силе воздействия внешних факторов и в определенной мере обусловливается текущим состоянием системы. Только лишь запоздыванием реакции системы на внешние воздействия объяснить этот эффект невозможно.

Усилия по дальнейшему совершенствованию динамических моделей климата—прирост и тем самым по увеличению разрешающей способности методов по выявлению антропогенных сдвигов прироста деревьев следует направить не столько на поиски более информативных внешних факторов, сколько на комплексные исследования внутренних закономерностей самого процесса роста, его связей с внешними факторами и таких свойств изучаемой системы, как упругость, эластичность.

Заключение

При разработке методов оценки антропогенных изменений различных биологических показателей особенно важным является вопрос «нормы» — нормального состояния, нормального роста, нормальной продуктивности и т. д. Большинство применяемых методик количественной оценки потерь прироста деревьев в условиях загрязненной природной среды являются различными вариантами метода аналогий и основываются на сравнении абсолютных или относительных величин прироста изучаемых (поврежденных) и контрольных (условно неповрежденных, т. е. нормально растущих) древостоев. Точность оценки при этом зависит от удачного подбора контрольного древостоя, что в значительной мере носит субъективный характер. В последние годы этот метод был модифицирован и сейчас успешно применяется в условиях достаточно сильного локального загрязнения с явно выраженным градиентом уровня загрязнения. В условиях массового поражения лесов региональных масштабов подбор контрольных древостоев и применение самого метода аналогий становится практически невозможным.

Методы оценки потерь прироста деревьев различных классов состояния, основанные на сравнении показателей прироста пораженных и условно здоровых (нормально растущих) деревьев этого же древостоя или изучаемой совокупности древостоев, за последнее время получили широкое распространение в связи с массовым острым поражением лесных насаждений региональных масштабов. Основным недостатком этих методов является тот факт, что у деревьев 1-го класса состояния (условно здоровых), как правило, также имеются потери прироста. Следовательно, использование показателей их прироста в качестве «нормы» приводит к недооценке реальных потерь прироста.

Наиболее перспективными являются методы, основанные на количественном анализе временных рядов годичного прироста деревьев поврежденных древостоев и зависимости ширины годичных колец от естественных и антропогенных факторов. На основе выявленных зависимостей, колебаний годичного прироста деревьев от естественных факторов возможно исключение значительной доли дисперсии дендрохронологических рядов и увеличение разрешающей способности самого метода.

В наших условиях наиболее существенно на рост сосны влияют температуры зимних и весенних месяцев и осадки летних месяцев текущего года, а также температура осенних месяцев прошлого года. При разработке многомерных моделей зависимости прироста деревьев от месячных климатических показателей статистически достоверными ($P=0,95$) обычно оказываются 3—4 фактора, которые объясняют 40—80 % дисперсии дендрохронологического ряда. Наиболее рационально для этих целей использовать ряды длиной 30—50 лет. На основе таких моделей реальным является выявление антропогенных сдвигов прироста деревьев, составляющих не менее 10 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Битвинский Т. Г. Дендроклиматические исследования. — Л.: Гидрометеоздат, 1974. — 220 с.
3. Булыгин Н. Е., Давгулевич З. Н. О математическом моделировании метеорологических связей у древесных растений в прогностических целях. — В кн.: Экология и защита леса, Л., 1981, вып. 6, с. 19—21.
4. Венк Г. Методы определения потерь прироста деревьев в районах подвергнутых воздействию атмосферных загрязнителей. — В кн.: Биомониторинг лесных экосистем. Каунас: Райде, 1987, с. 34—38.
5. Глебов Ф. З., Черкашин В. Н., Мацулева Г. Н. Влияние климата на динамику радиального прироста в двух типах кедрового леса. — В кн.: Дендрохронология и дендроклиматология. Новосибирск: Наука, 1986, с. 94—100.
6. Гортинский Г. Б., Евдокимов В. Н. Способ оценки комплексного влияния температуры и осадков на прирост деревьев. — В кн.: Экология и защита леса. Л., 1981, вып. 6, с. 16—19.
7. Дашковская И. С., Мацулева Г. Н. Влияние климатических факторов на радиальный прирост деревьев и древостоев среднего Приангарья. — В кн.: Продуктивность лесных фитоценозов. Красноярск, 1984, с. 49—56.
8. Кайрюкшис Л., Дубинский И. Использование ритмических колебаний радиального прироста деревьев для прогноза изменчивости климатических условий. — Труды Литовского НИИЛХ, 1986, т. 26, с. 160—178.
9. Карпавичюс И. А. Индивидуальная и групповая изменчивость радиального прироста сосны обыкновенной в подзоне смешанных лесов. — Автореф. дисс. на соискание ученой степени канд. сель-хоз. наук. Минск, 1984. — 20 с.
10. Лиёпа И. Я. Единый метод таксации реакции древостоя на антропогенное воздействие. — Лесоведение, 1985, № 6, с. 12—18.
11. Международная совместная программа по оценке и мониторингу воздействий загрязнения воздуха на леса в регионе ЕЭК. Проект руководства. — Фрейбург, ЕЭК, 1986. — 35 с.
12. Розенберг Г. С., Феклистов П. А. Прогнозирование годичного прироста древесных растений методами самоорганизации. — Экология, 1982, № 4, с. 43—50.
13. Слуцкий Е. Е. Сложение случайных причин, как источник циклических процессов. — Вопросы конъюнктуры, 1927, вып. 1, с. 34—64.
14. Степанов А. М. К методике расчета индекса деградации биогеоценозов промышленных предприятий. — В кн.: Мониторинг лесных экосистем. Каунас, Райде, 1986, с. 201—202.
15. Стравинскене В. П. Дендроиндикация загрязнения хвойных древостоев в зоне влияния ПО «Азотас». — В кн.: Влияние промышленного загрязнения на лесные экосистемы и мероприятия по повышению их устойчивости. Каунас, Райде, 1984, с. 106—107.
16. Уодингтон К. Основные биологические концепции. — В кн.: На пути к теоретической биологии. — М.: Мир, 1970, с. 11—38.
17. Фомин Б. Теоретические предпосылки контроля фоновых антропогенных воздействий на природные экосистемы методами полевого биологического мониторинга. — В кн.: Проблемы фонового мониторинга состояния природной среды. Л.: Гидрометеоздат, 1985, с. 69—78.
18. Черненко Г. В. Структурные реакции лесных фитоценозов южной и северной тайги на промышленное загрязнение. — В кн.: Влияние промышленных предприятий на окружающую среду. М.: Наука, 1987, с. 147—157.
19. Шиятов С. Г. Дендрохронология верхней границы леса на Урале. — М.: Наука, 1986. — 135 с.
20. Шяпятаене Я. А. Динамика устойчивости хвойных лесов при локальном загрязнении среды. — В кн.: Общие проблемы биогеоценологии. — М.: 1986, с. 20—21.
21. Юкнис Р. А. Выборочные методы дендрэкологических исследований в условиях загрязнения окружающей среды. — В кн.: Разработка и внедрение на

фоновых станциях методов биологического мониторинга. Рига: Зинатне, 1982, с. 160—167.

22. Юкнис Р. А., Шипените Д. А., Жилиявичус А. И. Выявление антропогенно обусловленных изменений продуктивности лесных насаждений на основе анализа временных рядов годичного прироста деревьев.— В кн.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Л.: Гидрометеоиздат, 1985, т. 8, с. 145—157.

23. Яценко-Хмелевский А. А., Лайранд Н. И. Дендроиндикация как метод глобальной оценки влияния антропогенного воздействия на окружающую среду.— В кн.: Дендроклиматические исследования в СССР. Л., 1978, с. 46.

24. Basic paper on changes in increment and standing volume in denuded forests in member countries.— Hamburg, ECE, 1987.— 100 p.

25. Braker O. U., Gaggen S. Z. Tree ring analysis in the Swiss forest decline study of 1984.— In: Forest decline and reproduction: regional and global consequences.— Laxenburg, IICA, 1987, p. 19—31.

26. Cook E. R. The use of climatic response models of tree rings in the analysis and prediction of forest decline.— In: Methods of dendrochronology. Warsaw, System Research Institute Polish Academy of Science, 1987, vol. 1, p. 269—276.

27. Eckstein D. On the application of dendrochronology for the evaluation of forest damage.— In: Inventory and monitoring endangered forests. Zurich, Swiss Federal Institute of Forestry Research, 1985, p. 287—290.

28. Franz F., Preuhsler T., Röhle H. Vitalitätsmerkmale und Zuwachsreaktionen erkrankter Bergwaldbestände im bayerischen Alpenraum.— Allgemeine Forstzeitschrift, 1986, Bd 41, N 39, S. 962—964.

29. Fritts H. C. Tree rings and climate.— London: Academic Press, 1976.— 567 p.

30. Kairiūkštis L. Dendrochronology for the indication of background climate variation. Report to the USSR—USA Symposium. Vilnius, 1981.— 37 p.

31. Köhler H., Stratmann J. Wachstum und Benadelung von Fichten in Westharz.— Forst- und Holzwirt, 1986, N 6, S. 152—157.

32. Kontic R. Comparative studies on the annual ring patterns and crown conditions of conifers: the situation in Switzerland and Southern Germany.— In: Forest decline and reproduction: regional and global consequences, Laxenburg, IICA, 1987, p. 137—143.

33. Kramer H. Relation between crown parameters and volume increment of *Picea abies* stands damaged by environmental pollution.— Scand. J. of Forest Res., 1986, N 1, p. 251—263.

34. Phillips S. O., Skelly J. M., Burkhardt H. E. Eastern White Pine growth retardation by fluctuating air pollutant levels: interaction of rainfall, age and symptom expression.— Phytopathology, 1977, vol. 67, N 6, p. 721—725.

35. Röhle H. Waldschaden und Zuwachsreaktion dargestellt am Beispiel geschädigter Fichtenbestände im Nationalpark Bayerischen Wald.— Forstwissenschaftliches Centralblatt, 1986, Bd 105, N 2, S. 115—122.

36. Schweingruber F. N. Abrupt changes in growth reflected in tree ring sequences as an expression of biotic and abiotic influences.— In: Inventory and monitoring endangered forests, Zurich, Swiss Federal Institute of Forestry Research, 1985, p. 291—295.

37. Schweingruber F. H. Potentials and limitations of dendrochronology in pollution research.— In: Proceedings of the International Symposium on Ecological Aspects of Tree-Ring Analyses. New-York: Acad. Press, 1987, p. 344—352.

38. Schelford V. E. The reaction of certain animals to gradients of evaporating power and air. A study in experimental ecology.— Biological Bull., 1973, vol. 25, p. 79—120.

39. Vinš B., Mrkva P. The diameter increment losses of pine stands as a result of injurious immissions.— Acta Univ. Agric. (Brno), 1973, vol. 42, p. 25—46.

40. Wentzel K. F. Hypothesen und Theorien zum Waldsterben.— Forstarchiv, 1985, Bd 56, N 2, S. 51—56.

THE METHODS OF ASSESSMENT OF MAN-INDUCED CHANGES IN TREE AND TREE-STAND GROWTH, BASED ON RETROSPECTIVE TREE-RING ANALYSIS

R. A. Juknis, M. I. Lekene

*Forest Monitoring Laboratory,
Lithuanian SSR Agricultural Academy*

Various methods for assessing man-induced changes in tree and tree-stand growth against the background of natural long-term variations of increment are analysed along with the complications occurring due to the environment pollution on the regional scale, when the conventional methods of comparison of the increment of injured and control (presumably healthy) tree stands are unapplicable. Possibilities of utilizing the methods of the increment loss estimation, based on the comparison of increment in trees of various state in the same tree stand or the studied forest assemblage, are discussed. The methods suggested for assessing man-induced changes in tree increment are based on the study of multivariate relationships between the tree ring width and external factors.

Труды совещания

**Проблемы экологического мониторинга
и моделирования экосистем**

Том XII

Редакторы О. Д. Рейнгерц, О. Э. Александрова. Технический редактор Н. Ф. Грачева.
Корректор И. А. Динабург.

Н/К

Сдано в набор 08.06.89. Подписано в печать 14.12.89. М-17727. Формат 60×90¹/₁₆. Бумага
тип. № 1. Литературная гарнитура. Печать высокая. Печ. л. 25. Кр.-отт. 25. Уч.-изд. л. 31,26.
Тираж 1270 экз. Индекс МОЛ-64. Заказ № 166. Цена 2 р. 50 к. Заказное.
Гидрометеиздат. 199226. Ленинград, ул. Беринга, 38.

Ленинградская типография № 4 ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского
объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Государственного комитета СССР
по печати. 190000, Ленинград, Прачечный переулок, 6.