

## Лекция 2. СОВРЕМЕННОЕ НАПРАВЛЕНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ РОСТА ЛЕСА

Математическое моделирование роста леса на ЭВМ является относительно новым направлением в лесотаксационной науке. Как в большинстве новых направлений, первоначальное внимание было сконцентрировано на решении узких, специальных вопросов, а не в широком смысле на перспективу применения моделей в системе управления лесными ресурсами. Системный подход к моделированию роста леса на ЭВМ связан с пересмотром идей и способов моделирования.

Модели роста и производительности насаждений требуются для различных аспектов контроля и управления лесами: таксации насаждений, оценки вариантов ухода за лесом, прогнозирования продуктивности древостоев, оценки производительности условий произрастания. Главное же назначение математических моделей роста насаждений – обеспечить данными для анализа и проверки многочисленных гипотез относительно различных вариантов ведения лесного хозяйства (лесопользования, лесовосстановления, рубок ухода, лесомелиорации и т. д.). Совместно с моделями оптимизации лесохозяйственных мероприятий модели роста насаждений дают ключевую информацию при принятии правильных решений в управлении лесами.

Первоначально исследователи пытались связать отдельные цели (назначения) моделирования роста леса, а не основные принципы моделирования, что привело к несколько путанной классификации направлений моделирования. Тем не менее практически все модели имеют одну общую цель: в некоторой точке или точках времени (возрасте) можно получать данные о состоянии насаждения. D. Munzo (1974) указывает на три основных принципа в моделировании роста насаждений [5, 6].

Первый принцип предполагает, что основной единицей моделирования является отдельное дерево и его части. Для разработки модели роста насаждения необходимы данные таксации частей древесного ствола, измерений коры, оценки биологической конкуренции деревьев и их пространственного размещения на площади в системе координат.

Второй принцип предполагает, что основная единица моделирования – отдельное дерево. Переменными в модели представлены таксационные признаки деревьев без учета их пространственного размещения и данных таксации частей древесного ствола.

Третий принцип моделирования предполагает, что основной единицей моделирования является древостой и модели строятся для совокупности насаждений по их средним таксационным показателям.

Модели первого типа создаются на основе информации о росте отдельных деревьев в насаждении: индекс условий произрастания, фактор конкуренции деревьев, измерения ширины и длины кроны, расстояние между деревьями, анализ хода роста древесного ствола, текущий прирост по диаметру и высоте по 5-летиям вдоль ствола, положение дерева в системе координат. Это направление получило развитие в Северной Америке. Модели Newnham (1964), Lee (1967), Lin (1969, 1974), Bella (1970), Mitchell (1967), Arney (1974) и другие, хотя отчасти различные в деталях, являются подобными в принципе [5, 6]. Каждая модель основывается на постулате: размер конкуренции, которой подвергается дерево, пропорционален той части круга, что перекрывается кругами конкуренции соседних деревьев. Круг конкуренции обычно определяется как некоторая функция диаметра дерева на 1,3 м. Фактическое количество перекрытия (т. е. конкуренция) выражалось различными авторами в единицах площади окружности или углов. Newnham проверил влияние различных пространственных распределений на отпад. Lin показал, что конкуренция, которой дерево подвергалось последние 5 лет, является полезной переменной в модели роста дерева. Bella дал итеративный алгоритм для определения пределов влияния конкуренции. Arney показал возможность использования для имитационной модели насаждения текущего прироста каждого дерева по 5-летиям.

J. Lin (1974) разработал имитационную модель для прогноза текущего прироста древостоя. В насаждении проводится перечислительная таксация, измеряются положение деревьев в системе координат, текущий прирост каждого дерева по высоте и диаметру и т. д. Функции связи текущего прироста с показателями имеют вид

$$Z_d^T = f(SI, A, d, GSI, \Delta GSI);$$

$$Z_h^T = f(SI, A, d),$$

где  $Z_d^T$ ,  $Z_h^T$  – абсолютный текущий годичный прирост дерева по диаметру и высоте соответственно;  $SI$  – индекс условий местопроизрастания – показатель их потенциальной производительности;  $A$  – возраст дерева, лет;  $GSI$  – индекс растущего пространства или площадь питания дерева;  $\Delta GSI$  – текущее изменение индекса растущего пространства,  $d$  – диаметр дерева, см.

Индекс  $GSI$  вычисляется путем оценки угла между деревом и его конкурентами. Методический подход заключается в установлении связей между шириной кроны и диаметром деревьев, растущих на открытом пространстве (индекс  $GSI=0$ ), и угнетенных ( $GSI=100$ ), которые показывают соответствующий угол (рис. 4).

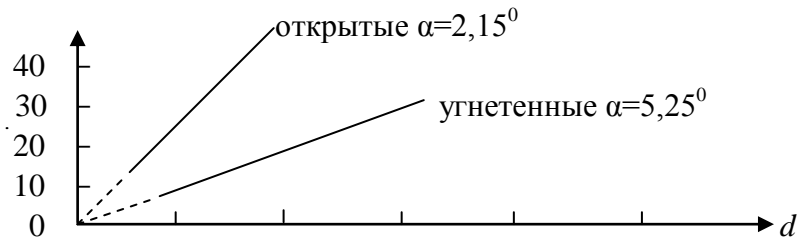


Рис. 4. Связь между шириной кроны и диаметром деревьев, растущих на открытом пространстве, и угнетенных

Между прямыми линиями на рис. 4 находятся пределы растущего пространства дерева. Таким образом, если угол между деревом и его конкурентом меньше  $2,15^0$ , то конкуренция отсутствует ( $GSI=100$ ), если угол равен или больше  $5,25^0$ , то конкуренция максимальная и индекс  $GSI=0$ .

Индекс вычисляется на ЭВМ с использованием карты пространственного распределения деревьев по площади насаждения. Для отдельного дерева растущее пространство делится на 4 части (рис. 5). В квадрате северо-запад конкуренция равна нулю (нет соседних деревьев), т. е. индекс  $GSI=100$ . В квадрате северо-восток угол конкуренции уменьшается в 5 раз, т. е.  $GSI=25-5=20$ . В квадрате юго-восток угол конкуренции  $5,25^0$ , т. е. конкуренция составляет 25 и индекс  $GSI=25-25=0$ .

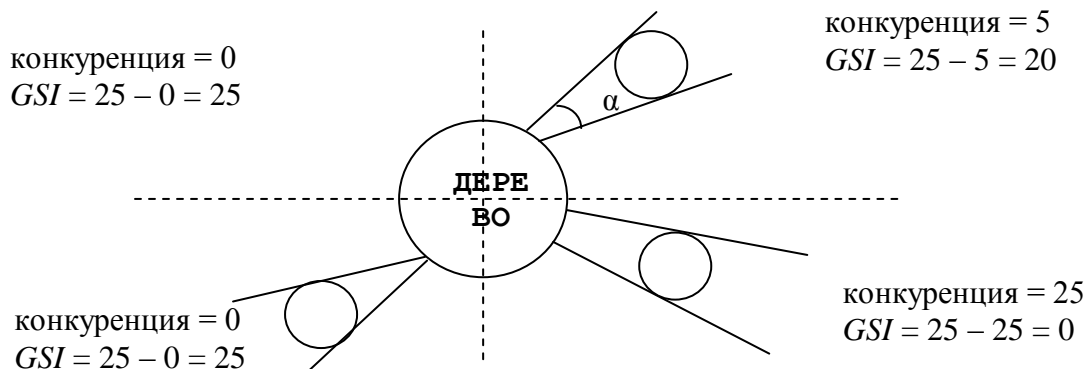


Рис. 5. Оценка индекса растущего пространства

Прогноз текущего прироста на 18 лет по имитационной модели сравнивался с данными перечислительной таксации древостоев на

пробных площадях. Результаты показывают максимальные отклонения по среднему диаметру древостоя от +4,5 до -5,0 см, средней высоте от +3,6 до -3,4 м.

Модели данного типа дают весьма детальную информацию о строении древостоя, и главное их назначение – проверить влияние различных лесохозяйственных программ, таких, как схемы посадки, рубок ухода и удобрений на рост леса. Однако самым большим препятствием к практическому применению этих моделей является требование информации о пространственном распределении деревьев и данных таксации частей древесного ствола. Такая информация дорогостоящая и не всегда имеется в наличии. Трудно также измерить биологическую конкуренцию деревьев. Значительным недостатком является большой объем внешних запоминающих устройств и вычислительных работ на ЭВМ. Применение крупномасштабной аэрофото съемки позволит более эффективно выполнять картирование деревьев по пробе, но это не уменьшит стоимости таксации частей ствола и трудности практического применения данного типа моделей.

Модели второго типа разрабатываются с использованием зависимостей относительного прироста по высоте, диаметру и объему от таксационных показателей дерева и насаждения, факторов окружающей среды (среднее расстояние между деревьями, температура и длина сезона роста, величина осадков и т. д.). В этих моделях широко используются функции распределения деревьев по диаметру, высоте и другим признакам. Моделирование режимов рубок ухода выполняется имитацией строения древостоев по диаметру с прогнозированием прироста по площади сечения, вырубаемой части, по числу деревьев и площади сечения. Моделирование прироста и отпада древостоя отличается от простых регрессионных моделей роста (Lemon, Shumauer 1962), где периодический текущий прирост по диаметру является функцией фактора конкуренции, условий местопроизрастания и объема дерева. Наибольшее распространение эти модели получили в Скандинавских странах. Сторонники «аналитического» способа моделирования хода роста насаждений концентрируют внимание на развитии математической теории и совместимости функций прироста и общей производительности насаждений (Turnbull, Pienaar 1973, Clutter 1963, 1972). С другой стороны, сторонники эмпирического изучения «лучшей» функции прироста обычно применяют регрессионный анализ с подбором наиболее подходящей регрессии без строгого внимания к математической элегантности и совместимости функций прироста

ста и производительности (Golding 1972, Vuokila 1973, Stage 1973).

A. Sullivan и J. Clutter (1972) предложили систему уравнений, составляющих алгебраически логическую модель хода роста одновозрастных насаждений по сумме площадей сечения и запасу. Цель – получить совместные модели роста и производительности насаждений [35]. Прогнозирование запаса древостоя выполняется по модели.

$$M_2 = b_0 + b_1 H_{100} + b_2 A_2^{-1} + b_3 \left(\frac{A_1}{A_2}\right) \ln G_1 + b_4 \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right) + b_5 \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right) H_{100}. \quad (1)$$

Прогнозирование суммы площадей сечения древостоя:

$$\ln G_2 = \left(\frac{A_1}{A_2}\right) \ln G_1 + b_1 \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right) + b_2 \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right) H_{100}. \quad (2)$$

Прогнозирование общей производительности насаждений:

$$M = b_0 + b_1 H_{100} + b_2 A^{-1} + b_3 \ln G, \quad (3)$$

где  $A_1, A_2$  – возраст древостоя в настоящий момент и через « $n$ » лет;  $G_1$  и  $G_2$  – соответственно сумма площадей сечения древостоя теперь и через « $n$ » лет;  $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$  – коэффициенты регрессий;  $H_{100}$  – индекс условий местопроизрастания, определяемый верхней высотой в возрасте 100 лет;  $M$  – общая производительность.

Проверка моделей 1–3 на данных таксации древостоев (102 постоянные пробные площади) подтвердила логическое постоянство и адекватность моделей.

Y. Vuokila (1980) при моделировании роста и производительности сосновых насаждений Финляндии использовал функции относительного текущего прироста деревьев и древостоев по диаметру, высоте и объему [7]. Независимыми переменными в моделях явились: показатели среднего дерева древостоя (диаметр, высота, возраст, объем); таксационные показатели древостоя (диаметр, верхняя высота, возраст, площадь сечения, запас, процент отпада по площади сечения); переменные окружающей среды (среднее расстояние до соседних деревьев, средняя температура сезона роста, число дней с температурой более +16°C). Рубки ухода прогнозируются по программам рубок ухода (способ, интенсивность и повторяемость рубок) на ЭВМ, применяя динамику строения древостоев по диаметру с помощью бета-функции [7].

Модели второго типа требуют меньше информации и могут быть полезны при создании системы принятия решений и оценке альтернативных вариантов ведения лесного хозяйства. Серьезный недостаток этих моделей – отсутствие надежности в прогнозировании те-

кущего прироста древостоев и имитации роста насаждений.

Дальнейшим развитием моделей второго типа явились модели роста леса в виде случайного стохастического процесса (Т. Suzuki 1971, 1974; L. Peden и др. 1973; Н. Bruner, J. Moser 1973). Информация собирается в виде данных периодических таксаций насаждений на стационарах. За период роста (1 год) дерево может остаться в данной ступени толщины или перейти в другое состояние: следующую ступень толщины, из растущего состояния в сухостой, отпад или вырубленную часть. Процесс роста леса рассматривается в виде непрерывно-временной модели описания вероятностей перехода дерева из одного состояния в другое А. Маркова. Т. Suzuki и J. Umemura (1974) условные переходные вероятности описывают дифференциальным уравнением А.Н. Колмогорова [8]. L. Peden и др. (1973) применили модель А. Маркова.

Это направление моделирования роста насаждений является попыткой еще глубже и точнее описать процесс роста леса. Основная цель – прогнозирование роста насаждений. Трудность в создании моделей – большой объем опытных данных и вычислительных работ на ЭВМ.

Модели третьего типа широко используются в различных странах в виде таблиц хода роста [6, 10]. Современные ЭВМ позволяют разработать сложные регрессионные модели. К сожалению, ценность таких регрессионных моделей в условиях пассивного эксперимента невелика, поэтому работа идет по созданию имитационных моделей роста леса, использующих регрессионные модели связи таксационных признаков древостоев.

Модели (таблицы) роста и производительности насаждений получили широкое распространение в нашей стране. Н.Н. Свалов выполнил детальный обзор и анализ методов составления таблиц хода роста, разработал новый метод их составления, включающий случайный отбор исходных данных, классификацию насаждений по верхней высоте и производительности древостоев, моделирование уровней полноты и производительности древостоев [10].

Большое преимущество регрессионных моделей – в возможности использовать массовую лесоустроительную информацию, получаемую в процессе инвентаризации лесов, в их простоте и меньшем объеме вычислений на ЭВМ.

В СССР развивался биофизический подход к теории роста леса (Г.М. Хилыми, 1955; И.А. Тересков, М.И. Терескова, 1980), решались задачи прогнозирования древесных запасов и экологической обусловленности динамики биологических систем (И.Я. Лиела, 1980), применения математических методов для оценки биологических закономерностей роста и продуктивности насаждений (П.В. Воропаев, 1966; В.М. Иванюта, 1969; Г.Л. Кравченко, 1972; И.В. Карманова, 1976; В.В. Кузьмичев, 1977). Особый подход применяется к моделированию хода роста разновозрастных насаждений (П.М. Верхунов, 1976; В.Ф. Лебков, 1967; И.В. Семечкин, 1967; Э.Н. Фалалеев, 1983; В.Г. Кузнецова, Д.П. Столяров, 1981). В.В. Загреев изучил общие закономерности и географические особенности роста насаждений и разработал модели или всеобщие таблицы роста основных насаждений СССР по классам бонитета [11].

Хотя сейчас имеются четкие различия между тремя типами моделей роста леса, со временем они уменьшаются и рассмотренные принципы моделирования будут дополнять друг друга.

Моделирование роста леса в значительной степени зависит от наличия достаточно надежной и полной лесоводственной информации. Сбор этой информации – весьма трудоемкий и дорогостоящий процесс. Однако в противоположность распространенному мнению огромный банк долговременных наблюдений на постоянных пробных площадях является необязательным. Относительно малое число проб, особенно полезных для создания системы принятия решения, в сочетании с временными выборочными пробами (выборочная лесоинвентаризация) и анализами хода роста древесных стволов могут обеспечить данными для разработки приемлемых функций роста насаждений.

### **Особенности лесоводственной информации**

Определенная научная и производственная задача в лесном хозяйстве может быть решена на основе лесоводственной информации. Наблюдения (визуальное описание типов леса, глазомерная таксация, фенологические наблюдения и т. д.) и измерения (высот, диаметров деревьев) – возможные способы сбора данных в лесном хозяйстве. Под данными мы понимаем измерения и наблюдения, а под лесоводственной информацией – преобразованные и обработанные данные,

необходимые для принятия научных выводов или управленческих решений.

В принципе большинство наблюдений (даже качественных признаков объекта) можно выразить числом, т. е. представить как результат измерения. Измерения, выраженные числом, получают в одной из 4 измерительных шкал [1].

1. Нормальная шкала – применяется в том случае, если подсчитывают число идентичных объектов без оценки их качественного значения. Например, подсчитываем число типов леса на плане лесонасаждений, число деревьев определенной породы без измерений их диаметров и высот и т. д. При обработке таких данных допустимыми являются статистики: мода – наибольшая численность; критерий Пирсона  $\chi^2$ -квадрат для оценки различия между случайными величинами.

2. Порядковая шкала – признаки ранжируются в иерархическую систему. Интервалы такой шкалы, как правило, не равные. Например, классификация деревьев по классам роста или продуктивности, сортировка бревен по сортам, сортиментам и т. д. При обработке таких данных ни среднее значение, ни среднеквадратическое отклонение не могут правильно характеризовать выборочную совокупность. Допустимые статистики: мода, медиана (средина ряда),  $\chi^2$ -квадрат коэффициент ранговой корреляции.

3. Интервальная шкала предусматривает равные интервалы. Начало отсчета не находится на нуле, но фиксировано. Это – различные температурные шкалы, деление времени (динамики процесса) на дни, недели, месяцы, годы. Интервальная шкала определяет истинное количество информации, поэтому при обработке допустимо применение статистик: средней, среднеквадратического отклонения, коэффициента корреляции.

4. Шкала отношений имеет равные интервалы и начало отсчета – нуль. Фундаментальные измерительные системы для длины, веса, времени и получаемые от них объемы, запасы, температура и влажность основываются на данной шкале.

Любые измерения содержат определенную точность и соответствующую ошибку, так как истинного значения измеряемой величины мы не можем точно знать (процесс познания бесконечен). Диаметр дерева измеряется в разных направлениях, изменяется в течение времени суток, определенную погрешность измерений имеет мерная вил-



ка, влияют на ошибку измерений схема выборки, время измерений и т. д.

Различают прямые, косвенные, совокупные измерения [2]. Прямое измерение – результат получают непосредственно в процессе измерения (диаметр, высота, прирост дерева). Косвенное измерение – результат получают на основе известной зависимости. Запас древостоя непосредственно измерить нельзя, но его можно оценить косвенно:  $M = GHF$ . Совокупные измерения – результат находят путем решения системы уравнений, отдельные члены которых получены прямыми или косвенными измерениями.

Различия в подходах к измерениям и особенности лесоводственной информации порождают три основных источника ошибок лесоводственной информации [1].

1. Ошибки, возникающие в процессе сбора исходных данных. К этой группе относятся два типа ошибок: а) ошибки выборки или репрезентативности данных; б) ошибки измерений.

2. Ошибки вычислений, вытекающие из приближенного характера исходных данных. В традиционных задачах лесного дела, где объем вычислений был невелик, эти ошибки не имели большого значения. Однако применение математических методов и ЭВМ привело к существенному возрастанию сложности решаемых задач и погрешности исходных данных; накапливаясь в процессе счета, эти данные могут совершенно исказить результат.

3. Ошибки математического моделирования возникают из-за приближенного отражения моделью процесса или явления, неправильной интерпретации результатов и практического применения модели.

В настоящее время математическое моделирование является одним из средств научно-технического прогресса в лесном хозяйстве, но при этом следует помнить о возможных сложностях. Во-первых, для аналитического описания явления можно с успехом применить различные типы математических моделей. Во-вторых, возможны стремления исследователя применить сложный математический аппарат и как можно больше переменных в модели или использовать значительно упрощенную модель.

Во многих исследованиях в лесном деле отсутствуют четко определенные количественные понятия. Поэтому при математическом моделировании следует правильно применять статистические методы,

критерии верификации моделей и их адекватности реальному процессу [38].