

обеспечен необходимыми веществами, поскольку значительно ускоряются процессы старения и опадания хвои, а в оставшихся ассимиляционных органах в той или иной степени нарушается метаболизм.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анучин Н.П. Лесная таксация. – М.: Лесн. пром-сть, 1982. – 552 с.
2. Методы биохимического исследования растений / Под ред. А. И. Ермакова. – Л.: Колос, 1972. – 455 с.
3. Практикум по агрохимии / Под ред. В. Г. Минеева. – М.: Изд-во МГУ, 1983. – 304 с.
4. Свободные радикалы в биологии / Под ред. Прайора. – М.: Мир, 1979. – 318 с.
5. Справочник работников лесного хозяйства. – 4-е изд. – Минск: Наука и техника, 1986.

*N.M. Shebalova, L.G. Babushkina*

### **On Damage and Stability Mechanisms of Scotch Pine Growing in Technogenic Zones**

The stability of the Scotch pine to toxicants is shown to be characterized by a number of physiological-and-biochemical adaptive mechanisms ensuring its functioning in the given conditions.

УДК 630\*5

*З.Я. Нагимов*

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ РОСТА СОСНОВЫХ ДРЕВОСТОЕВ**

Выявлено влияние онтогенетических и эколого-ценотических факторов на рост и продуктивность естественных сосновых древостоев. Разработаны уравнения зависимости диаметра, высоты и видовой высоты древостоев от их возраста, густоты и условий местопроизрастания. Показан принцип составления многовариантных таблиц динамики таксационных показателей под влиянием эколого-ценотических условий.

В условиях интенсификации лесохозяйственного производства, изменения его целей большое значение приобретают точность и полнота нормативной базы лесоучетных и лесохозяйственных работ. В связи с этим интересно исследовать наиболее вероятные линии хода роста древостоев под влиянием комплекса эколого-ценотических условий.

Исследования проводили в Зауральской холмисто-предгорной и равнинной провинциях в пределах южной и средней подзон таежной зоны [3]. Экспериментальным материалом послужили более 250 пробных площадей, заложенных в естественных насаждениях возраста от 14 до 145 лет, доля участия сосны в составе не менее 7 единиц, относительная полнота 0,65 и выше.

Наша концепция моделирования роста древостоев основывалась на необходимости выявить совместное влияние онтогенетических и эколого-ценотических факторов на рост и продуктивность естественных древостоев. Поэтому для уравнений множественной регрессии в качестве определяющих факторов выбраны возраст древостоев ( $A$ ), показатель условий их местопроизрастания ( $H_{100}$ ), средняя площадь питания деревьев ( $Sp$ ). Значение средних высот в возрасте 100 лет признается наиболее информативной и удобной формой выражения классов бонитета [2, 4, 9 и др.], а средняя площадь питания деревьев – очень простой и удобный показатель при оценке влияния густоты на рост древостоев [6 и др.].

Подбору структуры регрессионных моделей предшествовало исследование парных связей среднего диаметра ( $D$ ), средней высоты ( $H$ ) и видовой высоты ( $HF$ ) древостоев от определяющих факторов. При этом зависимости средних значений диаметра, высоты и видовой высоты от одной из независимых переменных изучали на фоне стабилизации двух остальных. Данная работа, а также множественный регрессионный анализ выполняли на ПЭВМ средствами статистико-графического пакета SYSTAT-5,0. Для оценки разрабатываемых уравнений вычисляли коэффициент детерминации ( $R^2$ ), среднеквадратическую ошибку ( $\delta$ ) и достоверность констант по критерию Стьюдента ( $t$ ). Обоснование и разработку многофакторных уравнений производили методом шагового регрессионного анализа [1].

На первом этапе исследовали связь среднего диаметра древостоев с рассматриваемыми факторами. В результате обработки экспериментальных данных получено уравнение

$$\ln D = -2,4577 + 0,4436 \ln A + 0,0349 \ln^2 A + 0,569 \ln Sp - 0,0137 \ln^2 Sp + 0,0992 \ln A \ln Sp + 0,7814 \ln H_{100},$$

$$t_0 = 20,1; t_1 = 6,0; t_2 = 3,1; t_3 = 16,0; t_4 = 4,0; t_5 = 8,1; t_6 = 50,0; R^2 = 0,957;$$

$$\delta = 5,8 \%. \quad (1)$$

В этом уравнении коэффициенты регрессии при всех определяющих факторах значимы на 1 %-м уровне. Его детерминированность и точность находятся примерно на одном уровне, что и уравнений с двумя независимыми переменными, полученных предварительно для отдельных классов бонитета. В целом, анализируя статистические показатели уравнения (1), можно констатировать его высокую адекватность реальным процессам изменения среднего диаметра древостоев в исследуемых сосняках.

Совместное использование показателя условий местопроизрастания  $H_{100}$ , возраста и густоты древостоев при оценке их средних высот невозможно по условию определения первого из этих трех определяющих факторов. В древостоях одного возраста фиксированному значению  $H_{100}$  будет соот-

ветствовать только одна конкретная высота, в которой отражено влияние как эдафических, так и ценологических факторов. Поэтому при моделировании роста древостоев по высоте нами проведены дополнительные исследования. По всему массиву пробных площадей изучали зависимость средней высоты от трех пар факторов: возраста и показателя  $H_{100}$ ; возраста и средней площади питания; возраста и среднего диаметра древостоев. Несмотря на то, что все три полученных уравнения характеризуются примерно одинаковыми значениями коэффициента детерминации и среднеквадратической ошибки, предпочтение было отдано последней зависимости. Это связано с тем, что при оценке средней высоты по возрасту и показателю  $H_{100}$  не отражается влияние густоты на результирующий признак, а при оценке по возрасту и густоте высока вероятность получения результатов, не согласованных по классам бонитета. При разработке уравнений зависимости средней высоты от возраста и среднего диаметра мы исходим из того, что в однородных лесорастительных условиях при одинаковом возрасте древостоев варьирование среднего диаметра в основном определяется количеством деревьев на единице площади. Через этот показатель можно достаточно полно опосредованно установить влияние густоты древостоев на их среднюю высоту.

Полученные по отдельным классам бонитета показатели уравнений приведены в таблице. Анализируя их, следует отметить, что в абсолютном большинстве случаев коэффициенты регрессий значимы на 1 %-м уровне. Совместное влияние обоих определяющих факторов, передаваемое переменной  $\ln A \ln D$ , существенно во всех классах бонитета, кроме пятого. Коэффициенты детерминации показывают, что возраст и средний диаметр древостоев в исследуемых насаждениях объясняют от 91,7 до 97,3 % изменчивости средних высот. Можно предположить, что полученные уравнения обеспечат достаточную точность при оценке средних высот древостоев.

Известно, что при выявлении динамики запасов древостоев наиболее удобным расчетным приемом является использование средних видовых высот. Если раньше видовую высоту выражали в основном только в зависимости от высоты древостоев, то в последнее время наметился переход к многомерным связям [5, 7, 8 и др.].

С учетом характера зависимости видовой высоты от высоты, возраста и густоты древостоев получено уравнение

$$\ln HF = -0,7729 + 0,8301 \ln H + 0,2291 \ln A - 0,0236 \ln^2 A - 0,0040 \ln Sp, \\ t_0 = 16,2; t_1 = 180,0; t_2 = 9,1; t_3 = 7,4; t_4 = 2,6; R^2 = 0,987; \delta = 4,7 \%. \quad (7)$$

Уравнение (7) характеризуется очень высоким коэффициентом детерминации. Его значение свидетельствует, что совокупность трех факторов объясняет почти 99 % изменчивости видовой высоты. Вклад площади питания в объяснение общего варьирования зависимой переменной незначителен. Тем не менее влияние этого показателя статистически доказывается на 5 %-м уровне значимости. В моделях (1) – (7) все определяющие факторы могут быть заданы с любой степенью дробности и в любых сочетаниях, что позволяет разработать многовариантные таблицы динамики

Показатели уравнений регрессий вида  $\ln H = a_0 + a_1 \ln A + a_2 \ln^2 A + a_3 \ln^3 A + a_4 \ln D + a_5 \ln^2 D + a_6 \ln A \ln D$ 

Класс бонитета	Значение коэффициентов (числитель) и критериев Стьюдента (знаменатель) при факторах воздействия						Кoeffициент детерминации	Средне-квартатическая ошибка	Номер уравнения	
	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$				$a_6$
I	<u>0,4205</u> 9,1	<u>0,5240</u> 23,0	<u>0,0594</u> 7,9	<u>-0,0268</u> 61,7	<u>0,0938</u> 9,4	<u>-0,0783</u> 12,6	<u>0,1979</u> 17,0	0,965	5,4	(2)
II	<u>-0,44758</u> 10,1	<u>0,5211</u> 12,6	<u>0,0821</u> 6,3	<u>-0,0278</u> 37,8	<u>0,0996</u> 5,1	<u>-0,0654</u> 6,8	<u>0,1744</u> 9,5	0,957	6,2	(3)
III	<u>-0,9170</u> 13,8	<u>0,6668</u> 10,9	<u>0,0622</u> 3,4	<u>-0,0268</u> 27,1	<u>0,0634</u> 2,1	<u>-0,0704</u> 5,4	<u>0,1867</u> 7,3	0,973	5,7	(4)
IV	<u>-1,2713</u> 18,1	<u>0,6689</u> 10,2	<u>0,0934</u> 5,0	<u>-0,0288</u> 30,5	<u>0,0475</u> 1,8	<u>-0,0506</u> 3,9	<u>0,1618</u> 6,2	0,917	7,7	(5)
V	<u>-1,8158</u> 16,1	<u>0,6770</u> 7,7	<u>0,1235</u> 5,7	<u>-0,0246</u> 13,9	<u>0,3359</u> 36,0	<u>-0,6303</u> 13,9	-	0,935	6,5	(6)

таксационных показателей. Для этого вначале по заданным значениям показателя  $H_{100}$ , возраста и площади питания на основе уравнения (1) определяли средние диаметры. Затем, используя средние диаметры, по уравнениям (2) – (6) вычисляли средние высоты. Таким образом, реализован так называемый рекурсивный принцип построения регрессионных моделей. Возможность построения различных по структуре рекурсивных систем уравнений при изучении фитомассы древостоев очень подробно показана в работе В.А. Усольцева [9]. В нашем случае данный принцип может быть выражен схемой

$$\left. \begin{aligned} H &= f(A, D); \\ D &= f(H_{100}, A, Sp). \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

В этой системе зависимая переменная ( $D$ ) второго уравнения входит в первое (разработанное для каждого класса бонитета) в ином качестве – в роли определяющего фактора. Второе уравнение в системе действительно для всех условий местопроизрастания, а первое имеет локальный характер и действительно для конкретного класса бонитета.

Видовые высоты находили через предварительно вычисленные средние высоты на основе уравнения (7). В этом случае рекурсивная система имела вид

$$\left. \begin{aligned} HF &= f(H, A, Sp); \\ H &= f(A, D). \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Здесь независимая переменная ( $H$ ) первого уравнения во втором является зависимой. Этим обеспечивается корректная увязка видовой высоты с уже рассмотренными таксационными признаками древостоев.

При вычислении сумм площадей сечений и запасов древостоев использованы известные в лесной таксации приемы.

Разработанные по изложенной методике таблицы динамики таксационных показателей (здесь не приводятся из-за ограничения объема) имеют важное теоретическое и практическое значение. Они наглядно показывают необходимость совместного учета возраста, густоты и условий местопроизрастания древостоев при изучении их роста и развития, дают представление об оптимальных и предельных состояниях древостоев, позволяют установить режим рубок промежуточного пользования в соответствии с хозяйственными критериями и могут служить хорошей базой при разработке различных нормативов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. – М.: Статистика, 1973. – 391 с.
2. Казимиров Н.И. Экологическая продуктивность сосновых лесов (Математическая модель). – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1995. – 132 с.
3. Колесников Б.П., Зубарева Р.С., Смолоногов Е.П. Лесорастительные условия и типы леса Свердловской области. – Свердловск: УрНЦ РАН, 1973. – 175 с.
4. Кузьмичев В.В. Закономерности роста древостоев. – Новосибирск: Наука, 1977. – 160 с.