

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

УДК 630*587

О ЛАЗЕРНОЙ ТАКСАЦИИ ЛЕСА

Д. П. СТОЛЯРОВ, В. И. СОЛОДУХИН

ЛенНИИЛХ

Автоматизация процесса таксации лесов в настоящее время охватывает небольшую часть работы, касающуюся в основном обработки на ЭВМ карточек с таксационными описаниями выделов для получения сводных данных по кварталам, хозяйствам, лесничествам и т. п.

Существенный технический прогресс может быть достигнут, когда будут созданы устройства, позволяющие автоматизировать весь процесс сбора и обработки таксационной информации. Определенные перспективы открываются при применении нового способа таксации с использованием лазерного профилографа. Записанные на магнитную ленту с борта самолета профилограммы можно сразу или после внесения дополнительной информации вводить в ЭВМ, которая, используя определенные процедуры и алгоритмы, вычисляет и выдает на печать таксационные показатели. Более того, на современном уровне развития средств связи возможна передача профилограмм по радиоканалу прямо с борта самолета на устройство ввода информации в ЭВМ. Таким образом процесс сбора и обработки информации можно полностью автоматизировать.

Лабораторией лесоустройства и аэрометодов ЛенНИИЛХа совместно с Государственным оптическим институтом были проведены поисковые, теоретические, экспериментальные и опытно-конструкторские работы, цель которых — разработка технических требований на опытный образец лесного лазерного авиапрофилографа и технологии применения профилографа для таксации лесного фонда.

В результате выполненных работ были сформулированы основные положения технологии таксации с применением лазерного авиапрофилографа — нового метода таксации, который дает возможность в наибольшей степени автоматизировать процесс измерения, сбора и обработки таксационных показателей. Новый метод представляет собой сочетание автоматической съемки и обработки профилограмм с наземной таксацией и дешифрированием аэрофотоснимков [3].

В настоящее время наиболее перспективны для авиационного применения в профилографах полупроводниковые лазеры, работающие при охлаждении, с накачкой электрическим током.

В результате проведенных НИР и ОКР был создан экспериментальный образец однопрофильного лазерного авиапрофилографа, с помощью которого с самолета были сняты лазерные профилограммы различных насаждений сосны, ели, осины и аэрофильмы фотопривязки на малоформатной аэропленке, а также разработана методика подготовки профилограмм для ввода в ЭВМ и их автоматической обработки.

Применение лазерного авиапрофилографа исключает субъективные оценки человеком основных таксационных показателей, в частности высоты древостоя и сомкнутости полога, как наиболее важных для определения запаса. В результате существенно снижается систематическая ошибка определения запаса, что в конечном счете обеспечивает большой народнохозяйственный эффект [4].

Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности применения однопрофильной съемки для инвентаризации лесов, особенно если учесть возможность записи профилограмм на магнитную ленту в процессе лазерной съемки с последующей автоматизацией их обработки на ЭВМ.

Система лазерного авиaproфилографа для таксации лесов должна состоять из следующих основных частей: собственно лазерного профилографа, сопряженного с барометрическим датчиком и имеющего цифровой и аналоговый выходы; малоформатного аэрофотоаппарата, установленного на общей с профилографом аэрофотоустановке; магнитного записывающего устройства и схемы нанесения единых меток времени на ленты записывающих устройств и аэрофильмы.

Как показали результаты исследования, такая система обеспечивает измерение высоты насаждения с точностью $\pm(4 \dots 5 \%)$, среднего диаметра кроны с точностью $\pm(8 \dots 9 \%)$ и запаса насаждения со случайной ошибкой $\pm 25 \%$ (IV класс), а систематической — выше I класса точности (-2%).

Учитывая класс точности определения запаса отдельных насаждений и то обстоятельство, что по лазерным профилограммам хорошо измеряются показатели верхнего полога насаждения, следует признать целесообразным применение новой технологии на первом этапе только для таксации простых по составу и строению лесов Севера, Сибири и Дальнего Востока при лесоустройстве их по III разряду. Наивыгоднейшее расстояние между маршрутами съемки 2 км, а площадь, охватываемая точными лазерными измерениями, составляет 60 % от площади объекта лесоустройства. На той части площади, которая таксировалась в натуре, исключаются наземные инструментальные измерения таксационных показателей (за исключением измерения возраста буравом), а на части площади, попадающей в межпросечные пространства, исключается измерительное дешифрирование под стереоскопом. Наземная таксация проводится, в основном, по просекам, а на остальной площади путем камерального дешифрирования аэрофотоснимков. В результате такого сочетания производительность труда при камеральных таксационных работах повышается на 23 %.

Вместе с тем исследованиями установлено, что новая технология при высоте лазерной аэросъемки 300 м, наряду с повышением производительности труда таксаторов и значительным народнохозяйственным эффектом от снижения систематической ошибки определения запаса, увеличивает затраты на лесоустройство от 4 до 8 к. на 1 га.

Один из путей снижения затрат на лесоустройство по новой технологии таксации леса — изыскание способов повышения потолка съемки с таким расчетом, чтобы стала возможной одновременная стандартная лесная аэрофотосъемка и лазерная аэросъемка с одного и того же самолета.

Ниже рассматриваются некоторые принципиальные теоретические подходы к использованию лазерного авиaproфилографа для измерения высот и других таксационных показателей древостоев, вопросы точности определения этих показателей по авиaproфилограммам в зависимости от объема профильной выборки.

Лазерный самолетный профилограф — это непрерывно работающий высотомер, который автоматически измеряет расстояния по вертикали от самолета до местных предметов и записывает на магнитную ленту. Его действие основано на измерении времени распространения (или фазы) света от самолета до точек отражения и обратно. Точками отражения являются кроны деревьев и земная поверхность. В результате работы профилографа на магнитной ленте записывается непрерывная профилограмма местности вдоль линии полета.

Основная отличительная черта лазерного измерения высот заключается в том, что луч лазера может быть сделан очень узким и мощным. Поэтому он не только хорошо отражается от кроны, но и проникает в узкие просветы между кронами до самой земной поверхности, давая отсчет расстояний и до кроны, и до земли в просветах между кронами [5]. Следовательно, при полете самолета одновременно записывается и профиль лесного полога, и профиль земной поверхности, находящейся под пологом. Натурные замеры показали [1], что в высокосомкнутых древостоях имеется достаточное количество сквозных (до земли) просветов в пологе, через которые возможно лазерное зондирование земной поверхности. Средние расстояния между такими просветами колеблются от 4,5 до 14,9 м. При таких расстояниях возможные ошибки определения рельефа земной поверхности под пологом определяются микрорельефом рельефа, которые могут быть легко учтены при автоматическом вычислении высот полого.

Профилограммы вводятся в ЭВМ, которая автоматически вычисляет высоту точек полого через каждые 20...30 см пути вдоль линии маршрута. Ни один из существующих или возможных в ближайшей перспективе способов не может обеспечить автоматическое определение высот точек лесного полого в условиях его высокой сомкнутости и сложного рельефа земной поверхности.

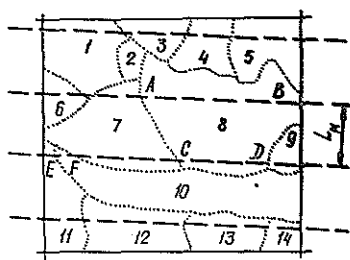


Рис. 1. Секущая длина маршрутов в различных выделах

Для осуществления лазерной таксации самолет с работающим профилографом летает по параллельным маршрутам, как изображено на рис. 1, где схематично показаны границы одного из кварталов, границы выделов и пересекающие квартал линии маршрутов (показаны пунктиром). Линии маршрутов удобно фиксировать на местности путем получения фотоизображения следа лазерного луча в щелевом аэрофотоаппарате с шириной пленки 35...70 мм.

Точность определения таксационных показателей по авиaproфилограмме зависит от объема профильной выборки на выделе, т. е. от длины маршрутов полета, пересекающих выдел. Вследствие различий в площади, конфигурации и ориентации выделов относительно маршрутов полета секущая длина маршрутов у разных выделов неодинакова, и, следовательно, неодинакова точность таксации. На рис. 1 суммарная секущая длина маршрутов в выделе 8 оказалась достаточно большой, равной сумме отрезков $AB + CD$. В то же время выдел 10 будет протаксирован с явно недостаточной точностью, так как секущая длина в нем равна маленькому отрезку EF . Небольшие выделы могут попасть в межмаршрутные пространства (см., например, выдел 2 на рис. 1). По этим причинам площадь, таксируемая с заданной точностью, оказывается меньше площади объекта, охваченного профильной съемкой. Чем больше требуемая точность и расстояние между маршрутами, тем меньше таксируемая площадь. Кроме того, она зависит от разряда лесостроительства [2].

Действительные конфигурации и ориентации выделов чрезвычайно многообразны и не поддаются какой-либо формализации, поэтому в общем случае теоретическое определение зависимости длины секущей от площади выдела невозможно. Только в частном случае, когда площадь выдела представляется в виде круга, эту зависимость можно найти теоретическим путем. Однако при этом остаются вне поля зрения слу-

чайные факторы, связанные с конфигурацией и ориентацией выделов. Учитываются только случайное положение круга относительно системы параллельных маршрутов и случайная площадь выдела. Поэтому теоретическое рассмотрение целесообразно дополнить статистическим моделированием на аэрофотоснимках с отграниченными выделами. При моделировании искомая зависимость определяется с учетом влияния всех случайных факторов, а сопоставление результатов моделирования с теоретическими выводами дает возможность отдельно оценить степень влияния конфигурации и ориентации.

Заменим действительную конфигурацию выдела эквивалентным по площади кругом. Диаметр этого круга

$$D_b = 200 \sqrt{S_b/\pi},$$

где S_b — площадь выдела, га.

На круг случайным образом накладываем систему параллельных линий, изображающих маршруты полета. Линии располагаем на равном расстоянии друг от друга L_m . Любое положение системы линий можно определить расстоянием x некоторой начальной линии AB от центра круга (рис. 2). Поскольку нельзя отдать предпочтение ни одному из положений в пределах периода повторения от $x = 0$ до $x = L_m$, то величину x надо считать распределенной равномерно в этих пределах. При небольших расстояниях между маршрутами круг будет пересекаться несколькими линиями одновременно и суммарная секущая длина будет состоять из нескольких отрезков.

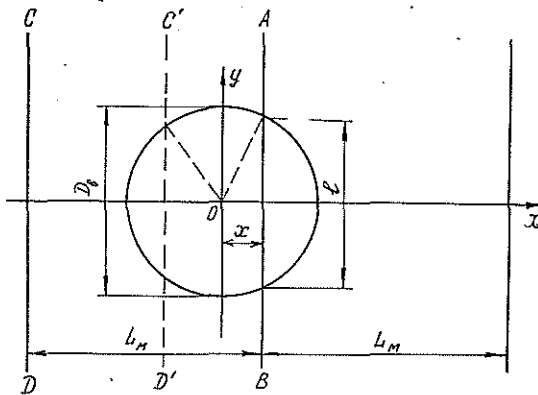


Рис. 2. К расчету длины секущей при $L_m \geq D_b$

Рис. 2. поясняет методику на примере, когда $L_m \geq D_b$. В этом случае круг пересекается только одной линией или не пересекается вовсе. При $0 \leq x \leq \frac{1}{2} D_b$ он пересекается линией AB, а при $L_m - \frac{1}{2} D_b \leq x \leq L_m$ — линией CD. В остальных положениях пересечения нет (сдвиг системы линий производим в сторону положительного направления оси x от $x = 0$ до $x = L_m$). Когда в пересечении участвует линия AB, то секущая длина l , как видно из рис. 2:

$$l = 2 \sqrt{\left(\frac{1}{2} D_b\right)^2 - x^2} = \sqrt{D_b^2 - 4x^2}.$$

Умножив и разделив на L_m и подставив выражение D_b через S_b , получим:

$$l = 2L_M \sqrt{\frac{S_B \cdot 10^4}{\pi L_M^2} - \left(\frac{x}{L_M}\right)^2},$$

где S_B — в гектарах, L_M и x — в метрах.

При $\frac{1}{2}D_B < x < L_M - \frac{1}{2}D_B$ ни одна линия не пересекает круг. Когда в пересечении участвует линия CD , занимая положение в левой половине круга (см. одно из положений $C'D'$), секущая длина:

$$l = 2 \sqrt{\left(\frac{1}{2}D_B\right)^2 - (L_M - x)^2} = 2L_M \sqrt{\frac{S_B \cdot 10^4}{\pi L_M^2} - \left(1 - \frac{x}{L_M}\right)^2}.$$

Вне своих областей существования величина секущей обращается в мнимое число, поэтому общее выражение для секущей при $L_M \geq D_B$ запишется в виде:

$$l = 2L_M \operatorname{Re} \left[\sqrt{\frac{S_B \cdot 10^4}{\pi L_M^2} - \left(\frac{x}{L_M}\right)^2} + \sqrt{\frac{S_B \cdot 10^4}{\pi L_M^2} - \left(1 + \frac{x}{L_M}\right)^2} + \sqrt{\frac{S_B \cdot 10^4}{\pi L_M^2} - \left(1 - \frac{x}{L_M}\right)^2} \right], \quad (1)$$

где знак Re означает, что нужно брать только вещественную часть выражения, стоящего в квадратных скобках.

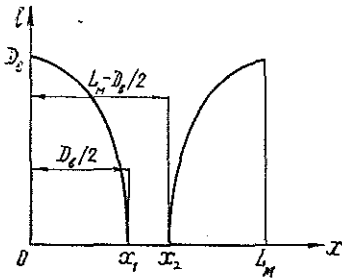


Рис. 3. Зависимость длины секущей от положения системы параллельных линий при $L_M \geq D_B$

На рис. 3 построен график изменения длины секущей в зависимости от x . При $L_M = D_B$ точки x_1 и x_2 совпадают. Наименьшая длина секущей равна нулю.

В данном случае вероятность пересечения круга равна отношению суммы длин $0x_1 + x_2L_M$ к длине отрезка $0L_M$, т. е. меньше единицы. Достоверное пересечение круга секущей заданной длины возможно только при $L_M < D_B$.

Рассматривая суммарную секущую при $0 < L_M < \infty$, получим следующее выражение:

$$l = 2L_M \operatorname{Re} \left[\sqrt{\frac{S_B \cdot 10^4}{\pi L_M^2} - \left(\frac{x}{L_M}\right)^2} + \sum_{i=1}^k \sqrt{\frac{S_B \cdot 10^4}{\pi L_M^2} - \left(i \pm \frac{x}{L_M}\right)^2} \right], \quad (2)$$

где k равно целой части выражения $\frac{200}{L_M} \sqrt{\frac{S_{BM}}{\pi}}$, в котором S_{BM} — максимальная площадь выдела в объекте.

Наименьшая длина суммарной секущей

$$l_n = 2L_M \operatorname{Re} \sum_{i=1}^k \sqrt{i \left(\frac{200}{L_M} \sqrt{\frac{S_B}{\pi}} - i \right)}, \quad (3)$$

где k определяется так же, как и для формулы (2). Величина l_n представляет наибольший интерес, потому что она является предельной, самой малой длиной секущей, которая обеспечивается в любом из случайных положений системы линий относительно круга. Вероятность того, что длина секущей равна или больше l_n , всегда равна единице. Событие

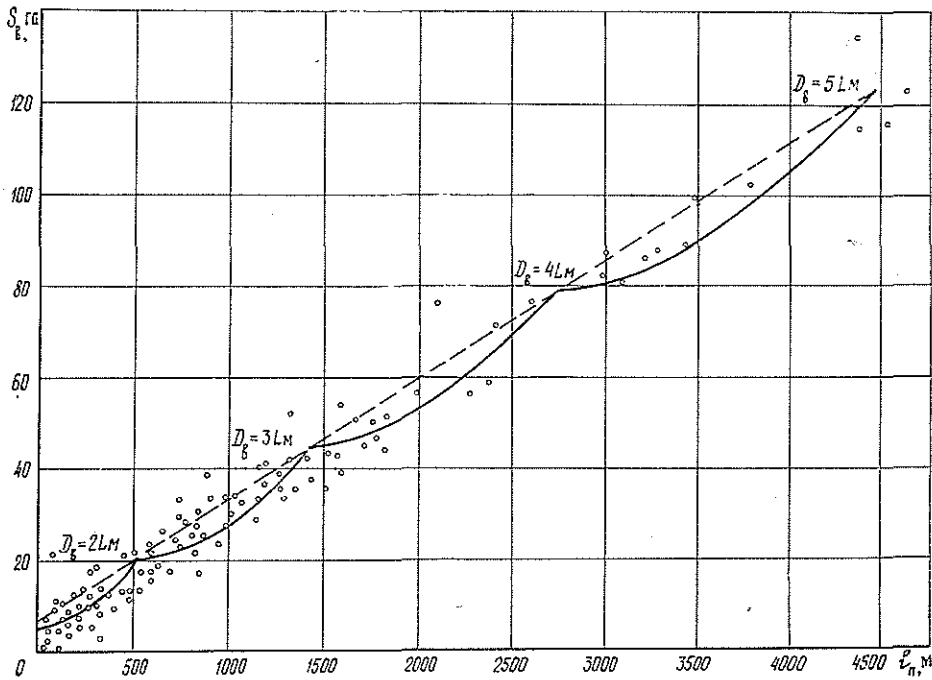


Рис. 4. Площадь выдела в зависимости от l_n при $L_M = 250$ м: сплошная линия — теоретическая зависимость для кругового выдела ($p = 1$); о — экспериментальные точки

$l \geq l_n$ достоверно. На рис. 4 сплошной линией показана зависимость S_v от l_n , выражаемая формулой (3) в случае $L_M = 250$ м. Она изображается кривой с гребнями, которые соответствуют случаям, когда диаметр круга равен целому числу L_M . Гребни лежат практически на прямой линии. Пунктиром показана линия, проведенная через гребни $D_v = 2L_M$ и $D_v = 4L_M$. Уравнение этой линии имеет вид

$$S_v = \frac{1}{10\,000} \left[\frac{3\pi}{2(2\sqrt{3}+1)} L_M l_n + \frac{2(\sqrt{3}-1)}{2\sqrt{3}+1} \pi L_M^2 \right] \text{ га}, \quad (4)$$

где L_M и l_n — в метрах.

На этом же рисунке показаны точки, полученные путем статистического моделирования. Они плотно группируются около теоретической кривой. Разброс точек характеризует влияние различий в конфигурации и ориентации выделов.

Статистическое моделирование выполняли следующим образом. Были взяты спектрально-аэрофотоснимки 20 кварталов в Карельской АССР и Вологодской области с выделами, ограниченными по III разряду лесоустройства. Масштаб снимков 1 : 15 000. Общая площадь 20 кварталов — 8 492 га. Число выделов — 464. Средняя площадь выдела — 19 га. Моделирование производили с помощью четырех прозрачных палеток с нанесенной системой параллельных линий. У первой палетки расстояние между линиями равнялось 250 м в масштабе снимка, у остальных соответственно 500, 750 и 1 000 м. Палетки были несколько больше аэроснимка по размеру. Совместив вторую от края линию первой палетки с одной из границ квартала, измеряли суммарную длину секущей во всех выделах. Сдвинув палетку на $1/5$ расстояния между линиями, снова определяли суммарные длины секущих. Затем то же самое делали при сдвиге на $2/5$, $3/5$ и $4/5$. Таким образом в каждом выделе получали значения длины секущей в зависимости от положения маршрута полета (для точного определения минимальной длины секущей плавно сдвигали палетку). Из них отбирали наименьшее значение l_n и наносили его на график в соответствии с площадью выдела, как

показано точками на рис. 4. Аналогичную работу проделывали с палетками для $L_M = 500, 750$ и $1\ 000$ м.

Рис. 4 ясно показывает, что между площадью выдела и наименьшей предельной длиной секущей l_n существует прямолинейная корреляция вида

$$S_B = a l_n + b, \text{ или } l_n = a_1 S_B + b_1.$$

В результате расчета получены следующие уравнения линий регрессии:

при $L_M = 250$ м

$$S_B = 0,0259 l_n + 3,65 \text{ га}; \quad l_n = 36,62 S_B - 102,4 \text{ м};$$

при $L_M = 500$ м

$$S_B = 0,056 l_n + 5,13 \text{ га}; \quad l_n = 17,56 S_B - 85,9 \text{ м}.$$

Угловые коэффициенты уравнений для S_B и теоретической зависимости (4) практически совпадают, а свободные члены меньше свободного члена (4), поскольку линии регрессии идут ниже линии, соединяющей гребни теоретической кривой (см. рис. 4). С достаточным для практических расчетов приближением общий вид зависимости S_B от l_n , при $250 \leq L_M \leq 500$ м можно получить из равенства (4), разделив его свободный член на $\frac{\pi}{2,9 - \frac{L_M}{220}}$:

$$S_B \approx \frac{1}{10\ 000} \left[\frac{3\pi}{2(2\sqrt{3}+1)} L_M l_n + \frac{2(\sqrt{3}-1)}{2\sqrt{3}+1} L_M^2 \left(2,9 - \frac{L_M}{220} \right) \right] \text{ га}. \quad (5)$$

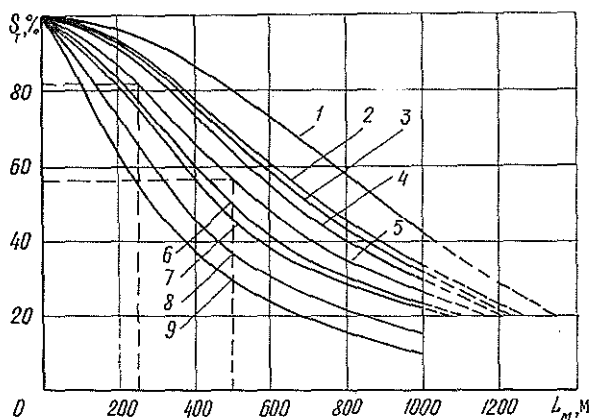


Рис. 5. Таксируемая площадь в зависимости от расстояния между маршрутами полета: 1 — $l_n = 100$ м; 2 — 200; 3 — 220; 4 — 250; 5 — 350; 6 — 440; 7 — 500; 8 — 750; 9 — 1 000 м.

При статистическом моделировании площадь каждого выдела измеряли с помощью планиметра. Отобрав выделы, в которых предельная длина секущей не меньше наперед заданной величины l_n , находили сумму их площадей. Отнеся эту сумму к площади всего объекта ($S = 8\ 492$ га), получали ту долю площади объекта, в которой каждый выдел будет таксироваться с точностью не менее заданной. Такие подсчеты были сделаны для значений L_M , равных 250, 500, 750 и 1 000 м и ряда величин l_n от 100 до 1 000 м. Естественно, что при $L_M = 0$ доля таксируемой площади составляет 100 %. По известным пяти точкам для каждого значения l_n построены плавные зависимости, показанные на рис. 5. Из них легко определяется S_T — площадь, таксируемая при съемке профилей леса с самолета. Например, если расстояние между мар-

шрутами полета равно 500 м, а для обеспечения заданной точности определения запаса на выделе необходимая длина секущего маршрута полета — 350 м, то таксируемая площадь будет составлять 56 % от площади всего объекта. С уменьшением расстояния между маршрутами таксируемая площадь возрастает: при $L_M = 250$ м и той же длине секущего маршрута она достигает 82 %. Графики на рис. 5 справедливы только для III разряда лесоустройства. Аналогичным путем могут быть получены графики для других разрядов.

ЛИТЕРАТУРА

[1]. Методы изучения вертикальных сечений древостоев: Методические рекомендации / В. И. Солодухин, А. Я. Жуков, И. Н. Мажугин, В. И. Наркевич.— Л.: ЛенНИИЛХ, 1976.— 57 с. [2]. Распределение деревьев по площади в связи с высотой древостоев, определяемой по лазерной профилограмме / В. И. Солодухин, К. В. Шевченко, И. Н. Мажугин, Т. К. Бокова // Лесоустройство, таксация и аэрометоды: Сб. науч. тр.— Л.: ЛенНИИЛХ, 1985.— С. 75—82. [3]. Столяров Д. П., Желудов А. В., Минаев В. Н. Дистанционные методы в лесном хозяйстве // Там же.— С. 88—92. [4]. Столяров Д. П., Мошкалев А. Г. Задачи лесоустройства по улучшению использования и воспроизводства лесосырьевых ресурсов Северо-Запада РСФСР // Там же.— С. 3—14. [5]. Съемка кроны дерева с помощью лазерного дальномера / В. И. Солодухин, А. Г. Куляков, Б. И. Утенков и др. // Лесн. хоз-во.— 1977.— № 2.— С. 71—73.

Поступила 23 февраля 1987 г.

УДК 630*61

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОРГАНИЗАЦИИ И ВЕДЕНИЯ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА — ФУНДАМЕНТ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЛЕСОУСТРОЙСТВА

С. Г. СИНИЦЫН

Союзгипролесхоз

Основные цели лесного хозяйства — воспроизводство лесных ресурсов и лесоразведение. Его плановые показатели — лесовосстановление, посадка и посев леса, уход за молодняками, рубки ухода, охрана и защита лесов, выращивание молодняков ценных пород, разведение пастбищных лесонасаждений, создание защитных лесов, полезащитных полос, ввод в эксплуатацию лесосушительных систем. Все это также земледельческие мероприятия.

Совершенно иные цели промышленной деятельности в лесах — удовлетворение потребностей в продукции целлюлозно-бумажной, лесохимической промышленности, пиломатериалах, древесных плитах и других изделиях из древесины. Это определяет несовместимость функций лесной промышленности и лесного хозяйства. Лесная промышленность осуществляет индустриальные функции, лесное хозяйство — земледельческие, хотя в ограниченных размерах ведет также заготовку древесины по главному пользованию в малолесных районах. Но промышленная деятельность не является профилирующей для лесного хозяйства: это хотя и важная, но дополнительная, побочная работа. В соответствии с Основами лесного законодательства Союза ССР и союзных республик [11] и Положением о Государственном комитете СССР по лесному хозяйству [12], получение продукции из древесины и непосредственное лесопользование не являются основной задачей лесного хозяйства.

В лесном хозяйстве СССР всегда преобладало земледельческое направление, а периоды ликвидации его самостоятельности характерны снижением качественных показателей лесного фонда, ослаблением государственного контроля за лесопользованием. Отрасль создавали по существу заново, что обеспечивало повышение качественных показателей лесов (см. таблицу).