



# ОХРАНА И ЗАЩИТА ЛЕСА

УДК 630\*181.43

## ФОРМИРОВАНИЕ НАГАРА В СРЕДНЕТАЕЖНЫХ СОСНЯКАХ СИБИРИ<sup>1</sup>

П. А. ЦВЕТКОВ (Институт леса СО РАН)

Нагаром принято называть почернение поверхности ствола дерева под влиянием низового пожара. Основные параметры его - направленность и высота. Под направленностью понимается закономерное образование нагара наибольшей величины с заветренной стороны ствола дерева, под высотой - максимальная его протяженность по стволу. Указанные характеристики являются диагностическими признаками пожара. По ним можно установить в общих чертах направление движения горящей кромки, высоту пламени, прогнозировать послепожарный отпад. Это имеет большое практическое значение при проведении различных экспертиз, разрешении спорных ситуаций в случае отсутствия очевидцев пожара, определении размера возможного ущерба, проектировании послепожарных мероприятий по освоению горельников и т. д.

Направленность нагара в настоящее время рассматривается однозначно и дискуссий не вызывает. Считается, что нагар максимальной высоты образуется с заветренной стороны ствола из-за завихрения воздушных потоков и разрежения воздуха у его поверхности по всей длине зоны. Сюда устремляются горящие газы, и пламя поднимается на большую высоту. Вопрос же о взаимосвязи между высотой нагара и высотой пламени, а также диаметром ствола в значительной степени дискуссионный. В печати имеются противоречивые суждения на этот счет.

Разностороннее воздействие пожаров на лес первым в стране обстоятельно исследовал И. С. Мелехов [3]. Им, в частности, был сделан вывод о том, что в одновозрастных сосновых и лиственничных древостоях высота нагара не зависит от диаметра дерева. Но Г. А. Амосов [1] отмечал, что диаметр ствола влияет на высоту нагара: чем тоньше ствол, тем меньше на нем нагара. Объяснял он данное явление ослаблением завихрения воздушных потоков за тонкими стволами, а также меньшей высотой пламени на таких участках из-за ослабления ветра кронами, близко расположенными к поверхности земли. Им выведено эмпирическое уравнение зависимости высоты нагара от высоты пламени в сосняках лишайниковых и злаково-разнотравных

$$У=2,06х-1,42, \quad (1)$$

где У - высота нагара, дм; х - высота пламени, дм.

Связь между этими факторами оказалась очень тесной (коэффициент корреляции  $R=0,96$ ). Исходным материалом, на базе которого построено уравнение и сделаны основные выводы, стали результаты, полученные в процессе мелкомасштабных экспериментов. Площади выжигаемых участков составляли всего 0,01-0,05 га. Кроме того, высота пламени во время опытов регистрировалась не на стволах деревьев при прохождении горящей кромки, а на специально установленных вешках, что могло дать дополнительную погрешность в измерениях.

Г. С. Войнов и М. А. Софронов [2], проводя исследования в северотаежных сосняках европейской части страны,

установили, что вывод И. С. Мелехова об отсутствии связи между нагаром и диаметром справедлив лишь при средней высоте нагара до 1 м. В других случаях нагар на толстых деревьях поднимался выше, чем на тонких. Зависимость между высотой нагара и диаметром ствола оказалась значительной и характеризовалась корреляционным отношением 0,56. Ими выведены упрощенные эмпирические уравнения для определения средней высоты нагара в зависимости от ступени толщины.

В процессе исследований в Якутии [8] выявлено, что при слабых и сильных пожарах высота нагара не зависит от диаметра дерева. При пожарах же средней силы она возрастает с увеличением диаметра. Однако уравнения, характеризующие данную зависимость, а также связь высоты нагара с высотой пламени не приводятся. Выводы авторов базируются на фактических данных, полученных при экспериментальных выжиганиях участков размером 0,1-0,25 га. Высота пламени фиксировалась также на установленных по периметру участка вешках, а не на стволах деревьев.

Наши прежние исследования в сосняках разнотравных свидетельствуют о том, что высота нагара как с наветренной, так и с заветренной стороны ствола в определенной степени зависит от его диаметра [7]. Такая зависимость наблюдается на всех частях кромки пожара (фронт, фланги, тыл).

Сведения о нагаре содержатся во многих работах [4-6]. Однако фактических данных о взаимозависимостях между высотой нагара, высотой пламени, диаметром дерева, другими факторами в них, как правило, нет. По-видимому, это объясняется тем, что наблюдения за особенностями формирования нагара не являлись главной целью, а осуществлялись попутно, при решении других задач. Таким образом, даже краткий обзор публикаций выявил расхождения во мнениях по данному вопросу, что объясняется недостаточной изученностью явления, региональными особенностями лесов и пожаров в них, различиями в методических подходах к проведению исследований.

В связи с высокой горимостью сосновых лесов Сибири сведения о нагаре на стволах деревьев как важнейшем диагностическом признаке пожара имеют большое теоретическое и практическое значение. Поэтому цель нашей работы - установить связи высоты нагара с основными факторами, влияющими на его образование, вывести уравнения, характеризующие эти связи.

Опираясь на имеющиеся знания и опыт, можно утверждать, что высота нагара зависит от силы низового пожара, которая характеризуется высотой пламени, от тактической части кромки (фронт, фланги, тыл), древесной породы, диаметра ствола, морфологических особенностей дерева, силы ветра, рельефа местности и др. Указанные факторы и их сочетания в неодинаковых условиях будут по-разному влиять на образование нагара.

В рамках одной статьи невозможно рассмотреть все вероятные взаимосвязи и закономерности. Остановимся лишь на вопросе влияния высоты пламени и диаметра ствола на высоту нагара. Эти факторы имеют наибольший теоретический и практический интерес, потому что в процессе научных исследований и хозяйственной деятельности часто возникает необходимость определить по высоте нагара возможную высоту пламени и, следовательно, силу пожара на данном участке леса. Остальные же факторы для каждого конкретного случая с определенным допущением можно принять как некие равные условия. Основанием для такого допущения является то, что проб-

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках международного проекта «Оценка и мониторинг воздействия гарей и интенсивности пожаров на эмиссии, баланс углерода, состояние и устойчивость лесов Сибири» при финансовой поддержке NASA и Федеральной лесной службы Министерства сельского хозяйства США (проекты № W - 19-734, USDA FS 99 ICA-076), а также гранта РФФИ № 01-04-49340. Автор выражает благодарность Государственной лесной службе и территориальной базе авиационной охраны лесов Красноярского края, всем участникам проекта за оказанное содействие.

### Основные статистические показатели

Факторы	X, м	m <sub>x</sub> , м	σ <sub>x</sub> , м	V <sub>x</sub> , %	P <sub>x</sub> , %	T
Высота пламени	0,77	0,03	0,38	50	4	25
Высота нагара:						
максимальная (H <sub>макс</sub> )	1,81	0,06	0,79	43	3	29
минимальная (H <sub>мин</sub> )	0,35	0,02	0,28	81	6	16
H <sub>макс</sub> - H <sub>мин</sub>	1,46	0,05	0,68	47	4	27

Примечание. X - среднее значение параметра; m<sub>x</sub> - стандартная ошибка; σ<sub>x</sub> - стандартное отклонение; V<sub>x</sub> - коэффициент варьирования; P<sub>x</sub> - точность; T - достоверность.

ны в площади подбираются на однородных участках леса, со сходными лесорастительными условиями и рельефом.

Исследования проводились в рамках международного проекта, программой которого предусматривались экспериментальные выжигания на специально подготовленных полигонах размером 4 га, примыкающих друг к другу. В связи с этим удалось наблюдать за формированием нагара на стволах деревьев в ходе крупномасштабных контролируемых пожаров, по характеру максимально приближенных к естественным.

Объектами служили равнинные среднетаежные сосняки кустарничково-мохово-лишайниковые. Древостои чистые, иногда с редкой примесью березы. Возраст - 120-180 лет, высота - 18-22 м, диаметр - 24-28 см, полнота - 0,6-0,9, запас - 150-300 м<sup>3</sup>/га, класс бонитета - III-IV. Насаждения неоднократно пройдены низовыми пожарами. Лесной массив представляет собой своеобразный остров, окруженный болотами, озерами, реками. Такой выбор сделан в целях соблюдения правил безопасности при проведении контролируемых пожаров.

Методика исследования заключалась в следующем. На подготовленных для выжигания полигонах размером 200x200 м была разбита квадратная сетка 25x25 м. По сторонам полигонов, параллельным направлению движения фронтальной кромки пожара, подбирали деревья различных ступеней толщины, измеряли их диаметр и нумеровали. Стволы на высоте 0,5, 1 и 1,5 м обвязывали яркими лентами, которые служили ориентиром для визуального определения высоты пламени. После пожара измеряли максимальную и минимальную высоту нагара. Всего таким образом было задействовано 160 деревьев на шести полигонах. Каждый замер считали единицей наблюдения. Полученные данные обрабатывали методами математической статистики на персональном компьютере. В результате получены уравнения, характеризующие связь нагара с факторами, влияющими на его образование, и построены линии регрессии.

Как уже отмечалось, нагар на стволах образуется со всех сторон. При этом максимальная его протяженность - с заветренной стороны, минимальная - с наветренной. Очевидно, наибольшее влияние на послепожарный отпад и общее состояние древостоя оказывает максимальный нагар. В связи с этим в первую очередь важно установить именно его зависимость от высоты пламени, которая на практике характеризует силу пожара. Оказалось, что между этими параметрами существует значительная корреляционная связь (коэффициент корреляции - 0,54).

В таблице приведены основные статистические показатели высоты пламени и нагара. По высоте пламени можно заключить, что контролируемые пожары по силе относятся

к категории средних. При этом среднемаксимальная высота нагара больше среднеминимальной в 5,2, а средней высоты пламени - примерно в 2,4 раза. В свою очередь, средняя высота пламени больше среднеминимальной высоты нагара приблизительно в 2,2 раза. Наибольшей вариабельностью отличается минимальная высота нагара (Y=81 %). Значения точности показателей (P<sub>x</sub>) достаточно высокие и варьируют в пределах 3-6 %. Величина критерия достоверности (T) позволяет делать надежные выводы (ее значения во всех случаях больше 3).

На рисунке приведен график, иллюстрирующий связь высоты нагара с высотой пламени. Искомая зависимость примерно с одинаковой точностью аппроксимации описывается уравнениями степенной (коэффициент детерминации R<sup>2</sup>=0,298) и линейной (R<sup>2</sup>=0,291) функций. В связи с этим на практике целесообразно применять уравнение простой линейной регрессии. Оно значительно проще, и, что очень важно, им можно пользоваться в лесу.

Полученное путем регрессионного анализа уравнение, характеризующее связь высоты нагара с высотой пламени, выглядит таким образом:

$$Y=1,11x+0,96, \quad (2)$$

где Y - высота нагара, м; x - высота пламени, м.

Коэффициент регрессии оказался равным 1,11, следовательно, изменение высоты пламени на 1,0 приводит к изменению высоты нагара на 1,11. Ошибка коэффициента регрессии равняется 0,137, достоверность - 8,1, что говорит о его надежности.

На формирование нагара определенное влияние должен оказывать диаметр дерева. Анализ показал, что высота нагара связана с ним значительно слабее, чем с высотой пламени. Коэффициент корреляции между этими параметрами равен 0,26. Совместное влияние высоты пламени и диаметра ствола на высоту нагара аппроксимируется уравнением множественной линейной регрессии

$$Y=1,05x_1+0,02x_2+0,52, \quad (3)$$

где Y - высота нагара, м; x<sub>1</sub> - высота пламени, м; x<sub>2</sub> - ступень толщины, см.

Полученное уравнение согласуется с фактическими данными в большей степени, чем уравнение простой линейной регрессии. Коэффициент детерминации R<sup>2</sup>=0,317.

Для проверки адекватности установленных зависимостей фактическим данным рассчитали высоту нагара по уравнениям простой (2) и множественной (3) линейной регрессии. Аналогичные расчеты выполнены и по уравнению Г. А. Амосова (1). Результаты показали, что наибольшей точностью характеризовалось уравнение (3) - 33 %. Близким к нему оказалось уравнение (2) - 34,1 %. Самая низкая точность (59,7 %) отмечена при использовании уравнения (1).

Одновременно мы исследовали зависимость разности высоты нагара с заветренной (H<sub>макс</sub>) и наветренной (H<sub>мин</sub>) сторон ствола от высоты пламени и диаметра дерева.

Регрессионный анализ выявил, что связь H<sub>макс</sub>-H<sub>мин</sub> с высотой пламени умеренная. Коэффициент корреляции в этом случае R=0,45. Зависимость же описывается уравнением степенной функции, коэффициент детерминации при этом R<sup>2</sup>=0,208.

$$Y=1,547x^{0,442}, \quad (4)$$

где Y-H<sub>макс</sub>-H<sub>мин</sub>, м; x - высота пламени, м.

Связь разности высот нагара с диаметром ствола оказалась слабой (коэффициент корреляции R=0,28). Эта зависимость аппроксимируется полиномиальной функцией (коэффициент детерминации еще ниже, R<sup>2</sup>=0,132)

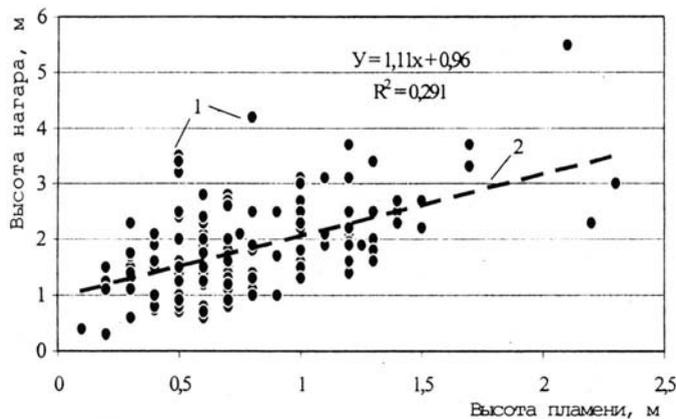
$$Y=0,002x^2-0,074x+1,927, \quad (5)$$

где Y-H<sub>макс</sub>-H<sub>мин</sub>, м; x - ступень толщины, см.

Результаты проведенных исследований позволили выявить следующее. Нагар, образующийся на стволах деревьев под действием огня, - важный диагностический признак низового пожара, который дает возможность определить направление распространения различных тактических частей кромки, а также оценить его силу.

В среднетаежных сосняках Сибири наблюдается более чем пятикратное различие между максимальной и минимальной высотой нагара. Оно носит вероятностный характер и теснее связано с высотой пламени (R=0,45), чем с диаметром дерева (R=0,28).

Для практических целей наибольшее значение имеет максимальный нагар. Как выяснилось, именно этот параметр теснее всего коррелирует с высотой пламени (R=0,54). Данная зависимость удовлетворительно аппроксимируется уравнением простой линейной регрессии.



Связь высоты нагара с высотой пламени:  
1 - фактические данные; 2 - выравненные данные

На образование нагара некоторое влияние оказывает диаметр ствола. В нашем случае оно оказалось довольно слабым ( $R=0,26$ ). Совместное влияние высоты пламени и диаметра ствола на протяженность нагара аппроксимируется уравнением множественной линейной регрессии. Его точность несколько выше, нежели простой регрессии. Однако на практике мы рекомендуем использовать уравнение простой линейной регрессии, которое при определении силы пожара требует знания лишь среднего значения высоты нагара и предполагает самые элементарные расчеты. Это дает возможность применять его непосредственно в природных условиях. Из уравнения (2) следует, что с определенной долей упрощения можно считать высоту нагара примерно равной высоте пламени, увеличенной на 1 м.

Сравнительно невысокие коэффициенты корреляции между высотой нагара, высотой пламени и диаметром, а также результаты проверки уравнений на адекватность фактическим данным свидетельствуют о том, что образование нагара обусловлено совместным влиянием множества факторов. Использование же при построении уравнений одного-двух из них, хотя и очень важных, не позволяет надеяться на высокую точность. Лучшие результаты может дать многофакторная модель. Однако она будет очень громоздкой и для практического использования малопримемлемой.

Полученные уравнения регрессии носят, по-видимому, региональный характер, что, однако, требует дополнительной проверки. Кроме того, они справедливы лишь в пределах минимальных и максимальных значений переменных, на основе которых выведены. И хотя этот диапазон достаточно широк (высота пламени колеблется от 0,2 до 2,3 м, диаметр - от 7 до 50 см), но все-таки ограничен. Экстраполировать линии тренда за его границы следует очень осторожно.

Насколько нам известно, аналогичных данных до настоящего времени получено не было.

#### Список литературы

1. **Амосов Г. А.** Некоторые закономерности развития лесных низовых пожаров / Возникновение лесных пожаров. М., 1964. С. 152-183.
2. **Войнов Г. С., Софронов М. А.** Прогнозирование отпада в древостое после низовых пожаров / Современные исследования типологии и пирологии леса. Архангельск, 1976. С. 115-121.
3. **Мелехов И. С.** Влияние пожаров на лес. М.-Л., 1948. 126 с.
4. **Молчанов А. А.** Влияние пожаров на древостой / Труды Института леса АН СССР. Т. 16. 1962. С. 314-335.
5. **Молчанов А. А., Преображенский И. Ф.** Леса и лесное хозяйство Архангельской обл. М., 1957. 239 с.
6. **Мусин М. З.** Определение отпада деревьев до и после пожара и методы повышения пожароустойчивости древостоев в борах Казахского мелкосопочника / Горение и пожары в лесу. Красноярск, 1973. С. 278-300.
7. **Цветков П. А.** К вопросу о диагностике лесных пожаров / Современные исследования типологии и пирологии леса. Архангельск, 1976. С. 108-114.
8. **Щербаков И. П., Забелин О. Ф., Карпель Б. А. и др.** Лесные пожары в Якутии и их влияние на природу леса. Новосибирск, 1979. 224 с.