

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ И ПОСЛЕДСТВИЙ НИЗОВЫХ ПОЖАРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КРУПНОМАСШТАБНЫХ КАРТ РАСТИТЕЛЬНЫХ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ

**А. В. ВОЛОКИТИНА, М. А. СОФРОНОВ,
Е. А. КАРНАУХОВА (Институт леса СО РАН)**

В практике лесопожарной охраны неизбежны ситуации, когда необходим прогноз поведения и последствий пожаров. Во-первых, на своевременную ликвидацию значительного количества пожаров обычно не хватает сил и средств, поэтому надо выявлять наиболее опасные в отношении возможного ущерба (особенно при вероятности угрозы населенным пунктам и ценным объектам) и самые трудные в отношении борьбы с ними в случае их развития. Во-вторых, при составлении оптимального плана управления крупным пожаром (включая его контролирование и ликвидацию) следует предусмотреть и учесть опасные тенденции и ситуации в его распространении и развитии. В-третьих, сценарии распространения пожара и его последствий на определенной площади при различных погодных условиях нужны для выбора оптимального времени и технологии целевых выжиганий.

Наибольшее значение имеет прогноз поведения низовых пожаров, поскольку они составляют более 80 % всех пожаров растительности и верховые развиваются из них. Эффективно прогнозировать поведение и последствия пожаров можно при помощи крупномасштабных карт растительных горючих материалов (вместе с пирологическим описанием выделов) и метеорологической информации [10].

В Институте леса СО РАН разработаны простой метод и недорогая технология составления крупномасштабных карт растительных горючих материалов (РГМ), содержащих пирологическую характеристику участков растительности. Суть метода заключается в максимальном использовании имеющейся лесоустроительной информации при создании баз данных для составления карт, в том числе компьютерным способом. При наличии базы данных можно оперативно изготавливать карты отдельных участков [3].

Прогноз поведения низового пожара базируется на его модели. Учитывая, что метеорологическая информация (особенно прогнозная) при редкой сети метеостанций, а также информация о комплексах РГМ вследствие их значительного варьирования в пространстве (по площади, слоям) и во времени (по фенологическим периодам) не могут иметь высокую точность, наша модель выбрана как наиболее простая [6, 7].

Прогнозирование поведения пожара осуществляется в несколько этапов. Вначале оценивается состояние готовности к горению участков растительности вокруг очага пожара (по уровню засухи). Затем в соответствии с метеопрогнозом в процессе моделирования распространения контура пожара прогнозируются скорость распространения и интенсивность горения на этих участках. После этого с учетом таксационной характеристики древостоя и прогнозируемой интенсивности пожара на каждом участке оцениваются возможные последствия. В заключение принимается решение о целесообразности тушения пожара, а также в зависимости от его площади и скорости распростране-

ния на каждой стадии определяется оптимальное число рабочих и техники.

При прогнозе поведения пожара используются крупномасштабные карты РГМ (с пирологическим описанием выделов), метеорологический прогноз, комплект таблиц и несложных формул. При этом желательно придерживаться следующего порядка работы.

Вначале по величине лесопожарного показателя засухи (В. Г. Нестерова или ПВ-1 ЛенНИИЛХа) определяют класс засухи (КЗ) сегодняшнего дня: I класс — до 300 ед., II — 301—1000 ед., III — 1001—3000 ед., IV — 3001—10000 ед., V — 10001—30000 ед., VI — более 30000 ед. Затем имеющуюся карту РГМ превращают в карту текущей природной пожарной опасности, на которой показано состояние готовности к горению участков вокруг пожара. Для этого сравнивают КЗ сегодняшнего дня с критическими классами, указанными в пирологическом описании для каждого выдела. Если КЗ меньше критического, то состояние готовности негоримое, если больше, то горимое, при равенстве текущего КЗ и критического состояние оценивается как переходное. Выделы на карте РГМ раскрашивают или штрихуют в соответствии с тремя градациями: готовые, неготовые к горению и имеющие неопределенное (переходное) состояние.

Неопределенность в оценке состояния выделов устраняется экспертным путем с привлечением профессионального опыта и дополнительной информации (анализ характера уже пройденных огнем участков и др.).

На карту текущей природной пожарной опасности наносится контур действующего пожара. Для этого необходим абрис пожара с привязкой к квартальной сети и другим ориентирам, а также с указанием точного времени составления абриса. Из центра пожара указывают четыре направления ветра, по которым возможно распространение огня: фронтальное, тыловое, право- и левофланговое. От контура крупного пожара проводится нужное количество направлений, перпендикулярных кромке, и определяется их характер по отношению к направлению ветра. Для системы наземного обнаружения прогнозирование распространения ведется от места его возникновения.

Прогнозирование пожара осуществляют по выбранным временным этапам, контур пожара рассчитывают на конец каждого из них (на заданный час распределенного дня). Вначале — это время «свободного» распространения пожара: от момента обнаружения (составления абриса пожара) до расчетного времени прибытия лесопожарной команды.

На весь период прогнозирования поведения пожара необходимо составить прогнозы ветрового режима (направления и скорости ветра) и динамики относительной влажности воздуха по срокам. Метеослужба такие прогнозы обычно не делает (метеопрогнозы по срокам существуют только в аэропортах), а относительная влажность воздуха не указывается даже в суточных метеопрогнозах. Поэтому прогноз ветра и влажности воздуха по срокам составляется на основании сведений метеостанции о фактической

Характеристика типов основных проводников горения (в числителе — базовая (штилевая) скорость V_0 , м/мин, в знаменателе — поверхностная теплота сгорания слоя $Q_{сл}$, Дж/м²)

Лесопожарный показатель засухи, ед.			Типы основных проводников горения					
+	тип.	-	лишайниковый	сухомшистый	влажношмистый	рылоопадный	плотноопадный	травяно-ветошный
40	100	300	0,20/4,0	—	—	—	—	—
70	200	600	0,25/5,0	—	—	—	—	—
100	300	900	0,32/6,5	—	—	—	—	0,30/(9,0)
130	400	1200	0,40/7,5	—	—	—	—	0,33/(10,0)
160	500	1500	0,46/8,5	0,14/3,5	—	—	—	0,35/(10,0)
200	700	2000	0,54/9,0	0,16/5,3	—	0,10/4,0	—	0,38/(10,0)
300	1000	3000	0,60/9,5	0,19/10,0	0,15/2,3	0,20/7,5	0,20/3,0	0,40/(10,0)
600	2000	6000	0,64/10,0	0,25/16,0	0,22/8,8	0,30/10,0	0,23/9,0	0,40/(10,0)
1000	3000	9000	0,64/10,0	0,27/20,0	0,27/12,0	0,40/11,0	0,26/12,0	0,40/(11,0)
1300	4000	12000	0,64/10,0	0,29/22,0	0,30/13,2	0,44/11,5	0,29/13,5	0,40/(11,0)
1600	5000	15000	0,64/10,0	0,30/24,0	0,33/14,4	0,50/12,0	0,32/15,0	0,40/(11,0)

Примечания: 1. Тип — условия высыхания соответствуют типовым (горизонтальный участок, средняя полнота древостоя, облиственный состояние); «+» — условия высыхания на участке лучше типовых настолько, что критический класс засухи меньше класса, типичного для данного типа ОПГ; «-» — условия высыхания настолько же хуже типовых. 2. Болотно-моховый и «беспроводниковый» типы практически негоримы, поэтому они не включены. Представлены данные для травяно-ветошного типа ОПГ под пологом леса.

динамики этих факторов по срокам за предшествующие 1—2 дня и с учетом прогноза погоды.

Расчет вероятной скорости распространения низового пожара и его силы (интенсивности кромки) проводится в пределах каждого временного этапа прогнозирования: сначала в направлении продвижения фронта пожара, затем по флангам и тылу. Для прогноза скорости распространения кромки пожара (V_x , м/мин) используется эмпирическая формула, включающая переменные коэффициенты относительного влияния факторов [6]

$$V_x = V_0 K_\phi K_r K_w \quad (1)$$

где V_0 — базовая (штилевая) скорость, м/мин; K_ϕ , K_r и K_w — коэффициенты влияния соответственно уклона поверхности, относительной влажности воздуха и ветра.

Базовая скорость (V_0) определяется по таблице согласно типу основного проводника горения (ОПГ), указанного в пирологическом описании выделов карты РГМ, и лесопожарному показателю засухи (Нестерова или ПВ-1) данного дня; при этом учитываются условия высыхания ОПГ в выделе. Коэффициент K_ϕ находится в зависимости от уклона (ϕ), указанного в пирологическом описании, экспозиции склона и направления распространения горения (вверх по склону — углы положительные, вниз — отрицательные, поперек склона — нулевые):

ϕ	-40°	-30°	-20°	-10°	0°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°
K_ϕ	0,7	0,7	0,7	0,9	1,0	1,2	1,5	2,0	2,5	4,0	6,0	12,0

Коэффициент K_r должен соответствовать величине прогнозируемой относительной влажности воздуха (r) по срокам:

r , %	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
K_r	1,7	1,5	1,3	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,7	0,6	0,5	0,3

Коэффициент K_w устанавливается на основе скорости и направления ветра по отношению к кромке пожара (фронт, фланг, тыл):

W , м/с	0,0	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4	2,8	3,2	3,6	4,0	5,0
K_w	1,0	1,2	1,4	1,7	2,1	2,6	3,2	4,0	5,0	6,0	7,0	10,0
K'_w	1,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,2	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8
K''_w	1,0	1,1	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,5	3,0	3,5	4,5

Примечание. W — ветер на высоте 2 м; K_w — для фронта; K'_w — для тыла и фланга; K''_w — для фланга при интенсивном горении [4].

Причем скорость ветра под пологом леса (W) дополнительно уточняется по формуле

$$W = W_m K_c \quad (2)$$

где W_m — скорость ветра на метеостанции, м/с; K_c — коэффициент, учитывающий полноту древостоя [4].

Коэффициент K_c можно получить исходя из следующей зависимости:

Полнота	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
K_c	0,77	0,70	0,60	0,48	0,38	0,30	0,23	0,16	0,11	0,07	0,05

Расчет по каждой тактической части пожара (или направлению) ведется до конца первого этапа прогнозирования (намеченного времени данного дня). Чтобы определить, до какой точки распространится кромка пожара в последнем выделе к намеченному времени, необходимо учесть длительность распространения пожара по последнему выделу

$$L_n = (V_x)_n (P_p - P_{n-1}), \quad (3)$$

где L_n — расстояние, которое пройдет кромка пожара по последнему выделу до конца намеченного этапа прогнозирования, м; $(V_x)_n$ — расчетная скорость распространения кромки в последнем выделе, м/мин; P_p — время окончания

этапа прогнозирования, ч или мин; P_{n-1} — время окончания распространения пожара по предпоследнему выделу, ч или мин.

На пути распространения пожара в каждом направлении могут встречаться преграды (не горимые на данный момент выделы) и барьеры (дороги, ручьи, реки). Если преграда шире поперечника пожара, то распространение его в данном направлении прекращается. Если пожар шире преграды, то он обходит ее с одной или двух сторон. Чтобы оценить поперечник пожара в направлении преграды, следует вначале спрогнозировать распространение пожара в соседних направлениях. Если путь пожару преграждает барьер, то тыловая и фланговые кромки обычно останавливаются, фронтальная же способна преодолевать барьеры шириной до 50 м.

Прогнозирование интенсивности кромки пожара ($I_{кр}$, кВт/м) необходимо для оценки силы пожара и определения возможных последствий. Интенсивность кромки вычисляется по формуле

$$I_{кр} = 0,017 Q_{сл} V_x \quad (4)$$

где $Q_{сл}$ — поверхностная теплота сгорания слоя, МДж/м².

Значения $Q_{сл}$ для основного проводника горения в соответствии с его типом и уровнем засухи приведены в таблице.

Влагосодержание достаточно развитого яруса кустарничков из черники, брусники или голубики составляет 90—120 %, запас — 0,1—0,2 кг/м² (в абс. сух. состоянии). Сгорание этих кустарничков в пламени основного проводника увеличивает $Q_{сл}$ на 0,5—1,0 МДж/м². В пределах пламенной кромки пожара успевает сгорать до 0,5 кг/м² опавших сухих сучьев и мелкого валежника, что добавляет еще 3—3,5 МДж/м². Запас хвой и мелких веточек в кронах хвойного подроста даже при значительном количестве под пологом леса последнего (до 10 тыс. шт/га) невелик: в среднем менее 0,1 кг/м², что дает при горении не более 0,5 МДж/м². Особую роль при пожаре выполняют куртины группового хвойного подроста в окнах, вследствие горения которых огонь может достигнуть крон верхнего полога.

Силу низовых пожаров на практике обычно оценивают по высоте пламени на фронтальной кромке: слабые — до 0,5, средней силы — 0,5—1,5, сильные — более 1,5 м [5]. Высота пламени на кромке является внешним выражением ее интенсивности [8], поэтому силу пожара в каждом выделе можно оценивать еще и по прогнозируемой интенсивности: слабые — до 35, средней силы — 35—120 и сильные — более 120 кВт/м.

Для составления оптимального плана тушения пожара в конце каждого временного этапа прогнозирования необходимо также установить периметр (Π , м или км) и скорость увеличения периметра (кромки) пожара ($\Delta\Pi$, м/ч). Периметр пожара на расчетное время можно вычислить так: на карте через точки, которые пожар должен достигнуть по каждому направлению, следует провести прогнозируемый контур пожара, измерить его длину и умножить на коэффициент извилистости, равный в среднем 1,5. Скорость увеличения периметра пожара ($\Delta\Pi$) зависит не от площади, а от скорости распространения его кромки ($V_{фр}$ — скорость распространения фронтальной кромки):

$V_{фр}$, м/ч	25	40	70	120	200
или м/мин	0,4	0,7	1,2	2,0	3,3
$\Delta\Pi$, м/ч	200	300	400	700	1000

Самым главным из последствий низового пожара в лесу является гибель деревьев (послепожарный отпад в древостоях). Процесс отпада может развиваться в течение

нескольких лет, поэтому его прогноз также важен. С этой целью были обследованы древостои сосны, ели, лиственницы, березы и разработаны математические модели зависимости процента отпада по ступеням толщины от высоты нагара, которые представлены в удобной графической форме [2]. Существуют связь высоты нагара на стволах с высотой пламени на кромке пожара [1], а также эмпирическая степенная зависимость высоты пламени от интенсивности кромки [8]. Использование этих двух зависимостей позволяет расчетным способом связать высоту нагара на стволах непосредственно с интенсивностью кромки пожара и заменить на упомянутых графиках послепожарного отпада высоту нагара (H_n) на интенсивность кромки пожара ($I_{кр}$):

$I_{кр}$, КВТ/М:	5	10	20	50	100	200	500
H_n , М:	0,5	0,8	1,2	1,9	2,8	4,0	6,4

Следовательно, по прогнозируемой в каждом выделе интенсивности кромки низового пожара можно определить и возможный послепожарный отпад в древостоях.

Очевидно, прогноз поведения и последствий пожаров желательно выполнять на компьютере с помощью ГИС.

Прогноз развития низового пожара в верховой подробно разработан в канадской системе FBP. Этот блок создается на основе фактического материала, получаемого при экспериментальных верховых пожарах [9]. Установлено, что возможность развития низового пожара в верховой зависит от трех факторов: интенсивности кромки низового пожара, высоты до крон и влагосодержания хвои в пологе. Интенсивность кромки низового пожара, при которой загораются отдельные кроны, называется критической. Ей соответствует критическая скорость низового пожара на данном участке, при превышении которой на 2 м/мин сгорает 40 %, на 5—70 %, на 10—90 % крон.

Источниками ошибок при прогнозировании поведения пожара могут служить:

неравномерность в распределении осадков по территории, что приводит к неточности определения величины лесопожарного показателя засухи и класса засухи (особенно при удалении от метеостанции более чем на 25 км);

недостаточная точность метеорологического прогноза;

неточности на карте РГМ, обусловленные ошибками лесоустроительной информации (неоднородность таксационных выделов, особенно при III разряде лесоустройства; ошибки в определении типов леса и т. д.);

трансформация ветра, действующего на фронтальную кромку пожара вследствие его прохождения над нагретой поверхностью пожарища;

неточности в нанесении кромки пожара на карту РГМ.

Часть неточностей и ошибок взаимно компенсируется, но некоторые из них могут повлечь за собой возрастающие со временем отклонения, так как контур пожара является интегральным итогом его распространения. Поэтому в процессе контролирования пожара рекомендуется регулярно корректировать и обновлять прогноз его поведения.

В заключение следует отметить, что практическому использованию прогнозов поведения пожаров в охране лесов препятствует отсутствие в лесхозах крупномасштабных карт растительных горючих материалов или баз данных для их оперативного составления и изготовления.

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 древостоях после низовых пожаров / Современные исследования типологии и пирологии леса. Архангельск, 1976. С. 115—121.
3. **Волокитина А. В., Климушин Б. Л., Софронов М. А.** Технология составления крупномасштабных карт растительных горючих материалов (практические рекомендации). Красноярск, 1995. 47 с.
4. **Конев Э. В.** Теплофизика лесных пожаров. Новосибирск, 1984. С. 99—125.
5. **Курбатский Н. П.** Техника и тактика тушения лесных пожаров. М., 1962. 154 с.
6. **Софронов М. А.** Лесные пожары в горах Южной Сибири. М., 1967. 152 с.
7. **Софронов М. А., Волокитина А. В.** Пирологическое районирование в таежной зоне. Новосибирск, 1990. 204 с.
8. **Alexander M. E.** Calculating and interpreting forest fire intensities // *Canad. J. Bot.* 1980. Vol. 60. № 4. P. 349—357.
9. **Development** and structure of the Canadian Forest Fire Behaviour Prediction System / Science and Sustainable Development Directorate. Inf. Rep. ST-X. Ottawa, 1992. 63 p.
10. **Volokitina A. V., Sofronov M. A.** Using large scale vegetation fuel maps for forest fire control / Proceedings of the Second Asia-Oceania Symposium: Fire Science and Technology. Khabarovsk, 1995. P. 83—89.