

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ ЛЕСА И ДРЕВЕСИНЫ ИМ. В. Н. СУКАЧЕВА

Э. Н. ВАЛЕНДИК, П. М. МАТВЕЕВ, М. А. СОФРОНОВ

КРУПНЫЕ ЛЕСНЫЕ ПОЖАРЫ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
МОСКВА 1979

В 15
УДК 634.0.43

315

72.78

Валендик Э. Н., Матвеев П. М., Софронов М. А.
Крупные лесные пожары. М., «Наука». 1979 г. 198 с.

Впервые подробно рассматриваются условия развития и распространения крупных лесных пожаров, предлагаются приемы и способы борьбы с ними.

Книга рассчитана на работников лесного хозяйства.

Табл. 39, ил. 26, библи. 145 назв.

Ответственный редактор
доктор сельскохозяйственных наук
Л. К. ПОЗДНЯКОВ

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящая работа посвящена очень сложному и весьма грозному природному явлению — крупным лесным пожарам, которые способны буквально за несколько дней уничтожить плоды многолетнего труда лесоводов или подорвать сырьевые ресурсы крупнейших промышленных предприятий.

Вопрос о специальном изучении именно крупных лесных пожаров до сих пор не ставился, и авторы попытались в своей работе впервые обобщить и проанализировать материалы, относящиеся к этой проблеме. При этом большое внимание уделялось не только теоретическим вопросам природы крупных лесных пожаров, но и практическим методам борьбы с ними.

Э. Н. Валендиком написаны введение, глава «Условия развития пожаров», Э. Н. Валендиком и П. М. Матвеевым — «Распространение пожаров», М. А. Софроновым остальные три главы и заключение.

Летные эксперименты по зондированию конвекционной колонки выполнены Всесоюзным НИИ применения авиации в народном хозяйстве и Главной Геофизической обсерваторией им. Воейкова под методическим руководством Э. Н. Валендика, П. А. Воронцова и И. А. Трунова. В экспериментах принимали участие Д. А. Коновалов, В. И. Дашевский, В. Н. Антипов. Самолет пилотировали летчики-испытатели В. Я. Осадчий и В. В. Дулин.

Большую помощь при изучении крупных лесных пожаров оказали работники Красноярской авиационной базы охраны лесов.

Все исследования по изученному вопросу в Институте леса и древесины проводились под общим методическим руководством доктора сельскохозяйственных наук проф. Н. П. Курбатского.

ВВЕДЕНИЕ

Лесные пожары в СССР (да и в других странах) — явление нередкое; они возникают ежегодно. В обычные годы естественные условия облегчают борьбу с огнем: сырые болота, зеленые травы, влажный моховой покров, обильные утренние росы и слабые ветры ограничивают распространение лесных пожаров. Поэтому, несмотря на малочисленность и слабую техническую оснащенность лесной охраны, пожары своевременно локализуются. Выпадающие затем осадки помогают полностью их ликвидировать.

Слабые небольшие пожары не причиняют заметного ущерба, а в ряде случаев приносят даже некоторую пользу лесному хозяйству: они очищают лес от лишнего хлама, почти не повреждая при этом деревьев, и тем самым уменьшают пожарную опасность в лесу. Но иногда складываются благоприятные условия для массового возникновения и быстрого распространения лесных пожаров.

В период длительной засухи число возникающих пожаров достигает такой величины, что силы наземной и авиационной охраны не могут своевременно локализовать все очаги, и некоторая часть пожаров выходит из-под контроля и достигает крупных размеров.

Какой пожар считать крупным?

В США к самому высокому классу по размеру площади (классу Е) относятся пожары, охватившие более 300 акров (120 га). В ГДР именуются катастрофическими пожары площадью более 100 га. И. С. Мелехов (1965) рекомендует относить к крупным (к классу Д) пожары площадью более 150 га. В СССР принято называть крупными пожары площадью более 200 га.

Крупные лесные пожары возникают как в захламленных таежных дебрях Сибири, так и в ухоженных насаждениях Западной Европы; как в сухих эвкалиптовых лесах Австралии, так и в сырых джунглях Южной Америки.

По сообщениям печати, в Австралии в 1976 г. пройдено пожарами 117 млн. га лесов и пастбищ, это равно $\frac{1}{7}$ территорий всей страны. Некоторые пожары в центральной части континента продолжались по нескольку месяцев.

Один из самых крупных и опустошительных пожаров (Тил-

ламуцкий пожар) возник в августе 1933 г. в штате Орегон (США). Пожар продолжался 8 дней и распространился на площади 104 тыс. га.

В 1968 г. в Лос-Анджелесе пожар «Бэл-Эла» охватил 24 тыс. га лесной площади; при этом были уничтожены 506 зданий. Двадцать человек погибли на крупных пожарах «Лун» и «Каньон» в 1966 и 1968 гг.

В штате Калифорния в 1970 г. выгорело около 200 тыс. га лесов. Только один лесной пожар под названием «Лагуна» охватил 70 тыс. га.

В 1976 г. крупный пожар возник в этом же штате в заповеднике секвойи. О его размерах можно судить по нанесенному ущербу (2 млн. долл.). На тушении были заняты около 2000 пожарных, десятки самолетов и вертолетов.

Очень крупные пожары бушевали в 1967 г. в курортных лесах на юге Франции.

В 1970 г. леса средиземноморского побережья запылали вновь. Из-за сильного ветра скорость пожаров достигла 20 км/час. В тушении участвовало 2 тыс. пожарных, использовались летающие танкеры. Несмотря на это, огнем было уничтожено 20 тыс. га лесов.

В 1976 г. в департаменте Восточные Пиренеи было уничтожено и повреждено пожарами 15,5 тыс. га леса.

В Испании в 1975 г. зарегистрировано более 4 тыс. пожаров, от которых пострадало 187 тыс. га лесов, а за 9 месяцев в 1976 г. — 235 тыс. га.

В ГДР по 10—20 катастрофических лесных пожаров зарегистрировано в 1947, 1959 и 1964 гг.

В августе 1975 г. в Нижней Саксонии (ФРГ) возник крупный лесной пожар на площади 9 тыс. га. В его тушении приняли участие 1400 пожарных, 7000 солдат и 400 специалистов технических служб.

В 1976 г. из-за сильной летней засухи в Западной Европе крупные лесные пожары охватили даже Скандинавию и Англию.

Нередки крупные лесные пожары и в нашей стране. Особенно горимыми были 1915, 1921, 1932, 1934, 1955, 1958, 1972, 1975, 1976 гг. В 1972 г. лесные пожары охватили целый ряд областей европейской части РСФСР. В 1975 г. крупные лесные пожары возникли в Свердловской, Челябинской, Читинской, Сахалинской областях и Хабаровском крае. В 1976 г. массовые пожары действовали в Забайкалье и Хабаровском крае.

Если обычные вспышки лесных пожаров возникают в каждом крупном районе 1—3 раза в десятилетие, то катастрофические вспышки наблюдаются гораздо реже, но зато их следы надолго остаются и на земле и в памяти людей.

Для Сибири таким был 1915 год, когда с мая по сентябрь горели леса на территории в 1,6 млн. км² (от Тобольска до Ле-

ны), при этом совокупная площадь пожаров, по оценочным данным, достигла 12 млн. га (Шостакович, 1924).

В европейской части СССР памятен 1921 год, год страшной засухи, охватившей Поволжье, во время которой с апреля по август не выпало ни капли дождя, год образования известных Марийских гарей. Тогда пожарами было пройдено 400 тыс. га — почти 20% лесопокрытой площади Марийской АССР. Раньше столь катастрофическая вспышка пожаров на территории нынешней Марийской АССР наблюдалась в 1891 г. (Шлык, 1927).

Прошло 50 лет после засухи 1921 г., и вновь наступил засушливый год. И хотя засуха в 1972 г. была не такой интенсивной, как в 1921 г., зато она распространилась почти по всей территории европейской части СССР (за исключением северо-восточных районов). Засуха сопровождалась грандиозной вспышкой лесных пожаров.

От общего числа лесных пожаров крупные составляют в среднем лишь около 1% (0,2—2%), но зато на их долю приходится 30—70% пройденной огнем площади и до 90% ущерба, поскольку крупные лесные пожары отличаются высокой интенсивностью. Причем из анализа статистических данных можно сделать вывод, что опасность возникновения крупных и катастрофических лесных пожаров во всем мире с каждым годом возрастает все больше.

На первый взгляд кажется, что поскольку крупные лесные пожары отличаются от средних и мелких лишь своими размерами, то при борьбе с ними можно руководствоваться существующими указаниями и инструкциями. Но это далеко не так, ибо количественное увеличение линейных размеров пожара диалектически приводит к появлению нового качества. Поэтому специальная разработка вопросов борьбы именно с крупными лесными пожарами крайне необходима и весьма актуальна.

Итак, каковы же наиболее характерные особенности крупных лесных пожаров?

1. Крупные лесные пожары возникают во время продолжительных засушливых периодов, чаще всего при сильных ветрах.

2. Крупные лесные пожары действуют на фоне массовой вспышки мелких и средних пожаров.

3. Характер горения на кромке у крупного лесного пожара отличается большим разнообразием, так как кромка проходит через участки различных категорий; кроме того, пожар действует обычно в течение нескольких суток, т. е. при разных погодных условиях. В целом горение на кромке крупного лесного пожара характеризуется высокой интенсивностью (принимая иногда верховую или пятнистую форму распространения).

4. Крупные лесные пожары распространяются с высокой скоростью.

5. Крупные лесные пожары, как правило, легко преодолевают различные преграды и препятствия (минерализованные полосы, противопожарные разрывы, дороги, небольшие реки).

6. Крупные лесные пожары вызывают очень сильную задымленность обширных районов, затрудняющую действия авиации.

Крупные лесные пожары не являются чем-то неожиданным; следя за ходом погоды, можно предвидеть их появление и заблаговременно позаботиться о борьбе. Это очень важный момент, поскольку на тушение крупных лесных пожаров нельзя отвлекать оперативные силы наземной и авиационной охраны, занятой ликвидацией новых загораний.

Высокая интенсивность горения исключает, как правило, непосредственное тушение фронтальной кромки крупного лесного пожара; его пытаются обычно остановить путем создания на его пути различных преград в виде минерализованных полос, разрывов, канав, выжженных площадей и т. п. Следовательно, очень важно рассмотреть вопрос о преодолении пожарами преград. Этому вопросу посвящен второй раздел нашей работы. Четвертый и пятый разделы содержат практические рекомендации по борьбе с крупными лесными пожарами и их профилактике.

УСЛОВИЯ РАЗВИТИЯ ПОЖАРОВ

СРЕДА ПОЖАРА

Одновременное возникновение большого числа лесных пожаров не бывает совсем неожиданным. Этому стихийному бедствию предшествует обычно ряд природных предпосылок; они усиливаются хозяйственными, техническими и организационными факторами.

Решающую роль в возникновении, развитии и поведении пожара играет сочетание природных факторов: комплекс из воздушных масс, горючих материалов и рельефа, который, по Кантримену (Countryman, 1964), образует среду пожара.

Среда пожара непостоянна, она варьирует как в пространстве, так и во времени. Протяженность среды, оказывающей влияние на пожар, изменяется также с размером и характером самого пожара. Для слабого небольшого пожара окружающая среда ограничена несколькими метрами в горизонтальном и вертикальном направлениях. На больших пожарах оболочка окружающей среды может охватывать многие километры по горизонтали и простираться на сотни метров по вертикали.

Факторы среды тесно взаимосвязаны, т. е. изменение в одних группах факторов может вызвать изменение в других. Например, рельеф может влиять на местные погодные условия. Горючий материал (напочвенный покров) может модифицировать эти изменения. Погода в свою очередь может изменять такие факторы, как вид или количество материалов, способных гореть, их влагосодержание. Лесной пожар может распространяться как в открытой, так и в закрытой среде. Пожар, действующий под плотным пологом леса, находится в среде, коренным образом отличающейся от той, которая имеется над пологом или на открытых участках, например на вырубках. Влажность горючих материалов здесь намного выше, а скорость ветра внутри лесного массива меньше. Если интенсивность пожара возрастает и он перейдет в верховой, то он уже будет действовать в открытой среде. При этом резко изменятся его характеристики и поведение. Для его остановки потребуются совершенно иные средства и способы тушения.

Особенность распространения и развития лесных пожаров заключается в том, что они за период действия могут несколько раз переходить из закрытой в открытую среду и обратно. Для крупного пожара, распространяющегося на большой территории, характерно то, что одни участки его кромки могут находиться в закрытой среде, другие — в открытой.

Лесные горючие материалы

Лесные горючие материалы, по американской классификации (Deeming e. a., 1972), разделяются на: а) живые (травянистые и древесные: хвоя, листва и побеги толщиной до 6 мм) и б) мертвые. Мертвые горючие материалы в свою очередь подразделяются на три класса по времени восстановления их влажности (timelag), т. е. по времени, которое необходимо для того, чтобы частицы топлива потеряли 63% разности между первоначальным влагосодержанием и равновесным.

Первый класс (1-hour timelag fuels) имеет время восстановления влажности от 0 до 2 часов (в среднем 1 час). К этому классу относятся мертвые травянистые растения и круглое древесное топливо диаметром менее 6 мм. Включается также верхний слой иголок и листьев из лесной подстилки.

Второй класс (10-hour timelag fuels) имеет время восстановления от 2 до 20 часов (в среднем 10 часов). К нему относятся круглые древесные материалы диаметром от 6 до 25 мм, а также слой подстилки толщиной до 20 мм.

Третий класс (100-hour timelag fuels) имеет время восстановления от 20 до 200 часов (в среднем 100 часов) и включает в себя круглые древесные материалы диаметром от 25 до 75 мм, а также слой подстилки толщиной от 20 до 100 мм.

Комплекс из мертвых горючих материалов I класса и живых травянистых растений называется мелким горючим материалом (Fine fuels).

В СССР используется классификация лесных горючих материалов, разработанная проф. Н. П. Курбатским. В основу классификации положено разделение лесных горючих материалов на группы в соответствии с их ролью в процессе горения лесного биогеоценоза.

1 группа — мхи и лишайники с включенным в них опадом, а также опад в местах, лишенных растительности, и травяная ветوشь. Эта группа является основным проводником пламенного горения при напочвенных и верховых пожарах. Возможность возникновения любого пожара предопределяется влажностью горючих материалов именно данной группы, причем влажность у них быстро изменяется под влиянием погодных условий и имеет выраженную суточную цикличность.

2 группа — подстилка, туда входит полуразложившийся опад, очес мха, гумусовый торфянистый горизонт с включенными кусками гнилой древесины. Влажность подстилки также изменяется под влиянием метеорологических условий, но не столь быстро; суточная цикличность не выражена. Горение подстилки носит беспламенный характер (тление). Подстилка служит основным проводником горения при почвенных (подстилочных) пожарах в тех случаях, когда опад или мох увлажнены дождем.

3 группа — травы и кустарнички вместе с подростом, самосевом и подлеском, которые по высоте не превышают кустарничков. Травы и кустарнички имеют достаточно высокую постоянную влажность (более 50%) и, как правило, пассивно сгорают в пламени горючих материалов 1 группы, снижая тем самым интенсивность горения последних. Исключением являются смолистые кустарнички (вереск, багульник), которые усиливают горение.

4 группа — мертвые древесные остатки: валежник, сухостой, сухие сучья, пни; на вырубках — мелкие порубочные остатки. Влажность горючих материалов данной группы изменяется в той или иной степени под влиянием погодных условий. Они, как правило, не являются проводниками горения, а лишь усиливают его, придавая пожару устойчивый характер.

5 группа — подрост и подлесок (кустарники) имеют более или менее постоянную влажность. Во многих случаях (за счет смолистой хвои или сухих стеблей) усиливают пламенное горение при низовом пожаре, придают ему беглый характер.

6 группа — хвоя и листва растущих деревьев (вместе с мелкими веточками диаметром до 7 мм). Влажность хвои и листвы имеет сезонные колебания. Хвоя может активно гореть, что чрезвычайно усиливает интенсивность пожаров и служит основным проводником горения во время верховых пожаров при сильных порывах ветра, на крутых горных склонах.

7 группа — стволы растущих деревьев и живые сучья (толще 7 мм) имеют обычно постоянную высокую влажность, поэтому при пожарах, как правило, не горят и не могут служить в качестве основного проводника горения. Однако поврежденные и больные стволы могут гореть, причем у них горят сухобочины, засмоленные раны, гнилая сердцевина и т. п. Горение здоровых стволов наблюдается в том случае, если они растут плотным пучком из общего основания.)

Рельеф

Влияние рельефа на развитие пожара сказывается прямо и косвенно. Пожар распространяется значительно быстрее вверх по склону, чем вниз или по горизонтали. Это объясняется тем, что горючее, расположенное выше пожара на склоне, подвергается действию лучистого потока от пламени, подогревается и загорается быстрее. Кроме того, при пожаре возникает ветер, который направлен вверх по склону. По данным некоторых авторов (Софронов, 1967; и др.), скорость распространения пожара на склоне 15° удваивается по сравнению с горизонтальным участком.

Косвенное влияние рельефа состоит в изменении местных погодных условий и микроклимата склонов. Экспозиция скло-

на определяет тип и количество растительности. Различная интенсивность подогрева солнцем склонов разной экспозиции оказывает сильнейшее влияние на влагосодержание лесного горючего и на местный режим ветра, а отсюда — на поведение пожара.

В пересеченной холмистой местности, при коротких склонах, пожар в целом распространяется медленнее и более беспорядочно из-за усиления турбулентности воздушных потоков, чем при длинных плавных склонах.

В горной местности за отдельные короткие промежутки времени распространение пожара может идти намного быстрее, чем на равнине, а за более продолжительное время — значительно медленнее. Это различие объясняется большим количеством препятствий в горной местности и замедленным движением пожара вниз по склону.

Погода

Погодные факторы играют динамическую роль в каждой стадии лесного пожара — от его возникновения до конца борьбы с ним.

Влияние погоды может быть неувимым или грубым и непосредственным. Погода может помогать или препятствовать борьбе с пожаром.

Масса воздуха, окружающая горючие материалы, является наиболее изменчивым компонентом среды пожара. Около поверхности земли воздушная масса подвержена влиянию рельефа и взаимодействует с горючими материалами. К основным характеристикам воздушной массы, влияющим на поведение пожара, можно отнести ветер, влажность, температуру, стабильность. Температура и влажность воздуха определяют влажность горючих материалов — основных проводников горения, т. е. определяют возможность возникновения пожара, а также во многом его характер и условия распространения по местности.

Ветер с давних пор считается главным фактором распространения и развития пожара. Кроме снабжения пламени кислородом воздуха и отклонения пламени по направлению к негоревшему топливу, ветер может переносить горящие угли далеко вперед от фронта пожара и создавать новые очаги горения. При скорости ветра 15—20 м/сек переброс искр и горящих головней часто становится основным фактором движения фронта пожара.

Неустойчивость воздушной массы вызывает шквалы и приводит к порывистости, которая может настолько усилить пожар, что борьба с ним становится невозможной. Изменение погоды часто сопровождается колебанием направления ветра до 90°; в этом случае растянутый относительно пассивный фланг пожара внезапно становится широким фронтом, который легко пе-

реходит через узкие, рассчитанные на остановку фланговой кромки, минерализованные полосы.

Структура ветрового поля над пожаром также может оказывать заметное влияние на характеристики пожара и зачастую определяет, будет ли пожар создавать собственную погоду, станет ли он «машиной тепла», которая может «писать своим почерком» во взрывной ситуации.

~ КРУПНЫЕ ВСПЫШКИ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

~ Средняя Сибирь, 1915 г.

В 1915 г. пожары в Сибири начались с весны, продолжались все лето и охватили огромную площадь. По результатам обработки анкетного опроса, проведенного В. Б. Шостаковичем (1924), лесные пожары наблюдались на территории от 52° до 70° с. ш. и от 69° до 112° в. д. (около 1,6 млн. км²). Дым от этих пожаров распространился почти на всю Сибирь (64—72° с. ш. и 61—133° в. д.), а на той территории, где действовали пожары, густота дыма в течение 50 дней была так велика, что на расстоянии от 4 до 20 м не были видны окружающие предметы. В Мариинске 30 июля в 3 час дня по причине сгустившегося дыма наступил полный мрак. Из-за дыма в июле 1915 г. было зарегистрировано только 85%, а в августе — всего 65% нормального количества солнечных дней, вследствие чего хлеба поспели на 15 дней позже обычного.

Пожары зачастую были верховыми, во многих местах горели торфяники (возле Томска, Мариинска, в Нижнеудинском, Канском, Енисейском и Минусинском уездах). Преградами распространения пожаров служили только крупные реки (Ангара, Обь, Енисей, Нижняя Тунгуска). Площадь пострадавшего от огня леса оценивалась в 125 тыс. км².

Причиной огромной вспышки лесных пожаров явилась продолжительная засуха в Средней Сибири. На обширном пространстве в 3,5 млн. км², занимающем восточную часть нынешней Тюменской области, почти всю северную и восточную половины Томской области, Красноярский край, северную и западную части Иркутской области и юго-западную половину Якутской АССР, с мая по август наблюдалось незначительное количество осадков. На окраине этого района осадки достигали 50—60% нормы, а в центре района — едва 30%. В течение лета было два особенно продолжительных бездождных периода: первый (в среднем 26 дней) — с половины июня до половины июля и второй (в среднем 20 дней) — с конца июля до половины августа. Этим двум периодам соответствовали два пожарных максимума.

Марийская АССР, 1921 г.

По данным Д. Н. Шлыкова (1927), в 1921 г. на территории нынешней Марийской АССР была поразительно ранняя весна и не бывало сухое и жаркое лето: с апреля по август дождей не было совершенно, среднесуточная температура не опускалась ниже 24°.

Пожары возникли ранней весной, еще до полного схода снега и закончились в первых числах ноября. Главная вспышка пожаров совпала с ураганным ветром, который начался 22 июня. Ветер достигал такой силы, что возле пристани Мар-Посад были выброшены на берег два парохода и одна баржа. Средняя скорость пожаров во время урагана составляла 10 км/час, а временами достигала до 25 км/час как следствие пятнистой формы распространения. Отмечались характерные случаи, когда деревни, находящиеся вблизи горящего массива, оставались невредимыми, а деревни, расположенные за 5—6 км, загорались от переброшенных ветром горящих частиц. К тушению пожаров было привлечено почти все местное население и воинские подразделения. В некоторые дни борьбу с огнем вели до 25 тыс. человек, но и эта армия была бессильна перед огненной стихией: не успевали потушить один участок, как от искр и горящих частиц загорался другой. В результате лесными пожарами было уничтожено 180 тыс. га леса, 60 селений, погибло более 1 тыс. голов скота и 35 человек.

Центральные районы РСФСР, 1972 г.

Все лето 1972 г. горели леса центральных областей европейской части СССР. Ни болота, ни реки, ни дороги не были препятствием в распространении лесных пожаров. Если учесть, что пожары продолжались в течение нескольких месяцев, то нетрудно представить их последствия.

Большие пространства оказались обезлесившимися, колоссальные древесные запасы сильно истощенными, громадные площади хвойных молодняков превращены в пустоши. Убытки едва ли поддаются точному подсчету; но они, несомненно, очень велики.

В сезон 1972 г. величина лесопожарного показателя засухи (комплексного показателя) в целом по Костромской, Владимирской, Горьковской областям, Марийской АССР и по прилегающим к ним районам превысила средний многолетний уровень в 5—10 раз. Уровень пожарной напряженности изменялся и территориально, и во времени: наименьший был в Костромской области, а наибольший — в Марийской АССР.

Засушливому периоду лета 1972 г. предшествовала мало-снежная и холодная зима, а весна была ранней, сухой и теплой.

В ноябре среднемесячная температура воздуха превышала

норму на 4—5°, а осадки в виде мокрого снега и дождя превысили норму в 2—3 раза. К концу ноября повсеместно снега не было. В декабре температура воздуха была выше нормы на 2°. За весь месяц выпало 1—1,5 нормы осадков. Зато январь отличался низкими температурами воздуха и незначительным количеством выпавших осадков (в 2—4 раза меньше нормы), в результате чего почва, не покрытая снегом, глубоко промерзла. В феврале осадков выпало лишь 30—50% от месячной нормы.

Весна наступила рано. Переход среднесуточной температуры через 0° и сход снега произошли в конце марта, т. е. на неделю раньше средних многолетних сроков. В марте и в апреле выпало осадков 50—70% от нормы и лишь в отдельных районах они превысили норму. Апрель был теплый. Морозная и мало-снежная зима привела к глубокому промерзанию почвы, что усилило поверхностный сток при раннем и дружном снеготаянии. Поэтому талые воды не успели впитаться в почву. Подобный ход погоды уже предвещал быстрое пожарное созревание лесных участков.

Май отличался сухостью и высокими температурами. Количество осадков в виде кратковременных ливней с грозами составило 50—80% от нормы, относительная влажность воздуха понизилась до 30% (на 10% ниже нормы), максимальные температуры достигали 27—30°, а величина лесопожарного показателя засухи в 3—4 раза превысила средний многолетний уровень.

Следствием этого была вспышка лесных пожаров в мае на всей рассматриваемой территории. Особенно часто лесные пожары возникали во Владимирской области. По данным оперативного отделения авиационной охраны лесов, на площади около 1 млн. га ежедневно возникало до 20 лесных пожаров.

Летний период оказался необычайно засушливым. Только начало июня было умеренно теплым и характеризовалось выпадением значительного количества осадков, что снизило горимость и приостановило распространение лесных пожаров. Однако со второй половины июня и до сентября месяца установилась очень жаркая и очень сухая погода. Среднесуточная температура воздуха в июле колебалась в пределах 20—28°, а максимальная температура достигала 38°. Особенно сухим был август. Температура 30° и выше наблюдалась в течение 15—22 дней. За весь месяц выпало от 2 до 8 мм осадков, и лишь в некоторых районах Владимирской области в виде ливней выпало 20 мм осадков. В августе уровень пожарной опасности продолжал расти. Лесопожарный показатель засухи в этот период превысил 30 000 мбар·град, высохли болота и заболоченные участки леса, в результате чего пожары могли беспрепятственно распространяться по всей территории лесхозов. В августе в отдельных областях ежедневно возникало по 30—40 лесных пожа-

ров. Они распространялись на большой площади и выходили из-под контроля.

Как же возникло одновременно большое число пожаров? Известно, что на рассматриваемой территории распространены ягодниковые и мшистые типы леса. До 13%, а в некоторых областях и до 20% лесной площади приходится на заболоченные леса, в большинстве случаев осушенные. В насаждениях с мощным слоем подстилки и на осушенных торфяниках пожары гасить очень трудно, а при существующей недостаточной оснащенности лесхозов противопожарной техникой в ряде случаев и невозможно. Поэтому пожары, возникающие ежедневно в большом количестве, только локализовывались, а дотушивание их не производили. Если учесть, что в июле в зоне действия каждого оперативного отделения авиационной охраны лесов ежедневно возникало по 25—30 пожаров, а в августе — по 30—40, то нетрудно себе представить ту опасность при непрерывно нарастающей засухе, которую таили сотни только локализованных пожаров. Сухая жаркая погода, естественно, усилила в этих районах поток отдыхающих в лес. Меры по ограничению доступа в лес отдыхающих были приняты с большим запозданием, что также способствовало увеличению числа источников огня.

Особенностью погоды в августе явились штормовые ветры. С 24 августа повсеместно усилился суховей юго-восточного и южного направлений, с 27 августа скорость его на метеостанции Горький достигла 18—20 м/сек:

Даты	Август										Сентябрь						
	23	24	25	26	27	28	29	30	31	1	2	3	4	5	6	7	8
Ветер днем, м/сек	3	13	13	18	16	20	6	6	13	10	6	11	11	18	10	11	3

Под действием ветра все локализованные и недотушенные пожары возобновились, и в результате массового переноса горящих частиц они быстро распространились на большой площади. Максимальный прирост площади пожарищ по Горьковской области и Марийской АССР в ветреные дни достигал 40—120 тыс. га за день (рис. 1). Именно за эти 2—4 дня было пройдено пожарами около 90% всей площади, выгоревшей в течение всего сезона 1972 г. Это явление наблюдалось одновременно во всех областях, пораженных засухой. Каждый отдельный пожар распространялся преимущественно с юга на север или с юго-востока на запад-северо-запад. Кроме того, полоса гарей приурочена к полосе сосняков, вытянутой с запада на восток. Так возникла та сложная обстановка, которая долго будет служить уроком для всей лесопожарной охраны.

В начале сентября повсеместно прошли дожди, новые пожары стали возникать редко, но крупные пожары на осушенных торфяниках продолжали действовать и привлекали к себе всеобщее внимание.

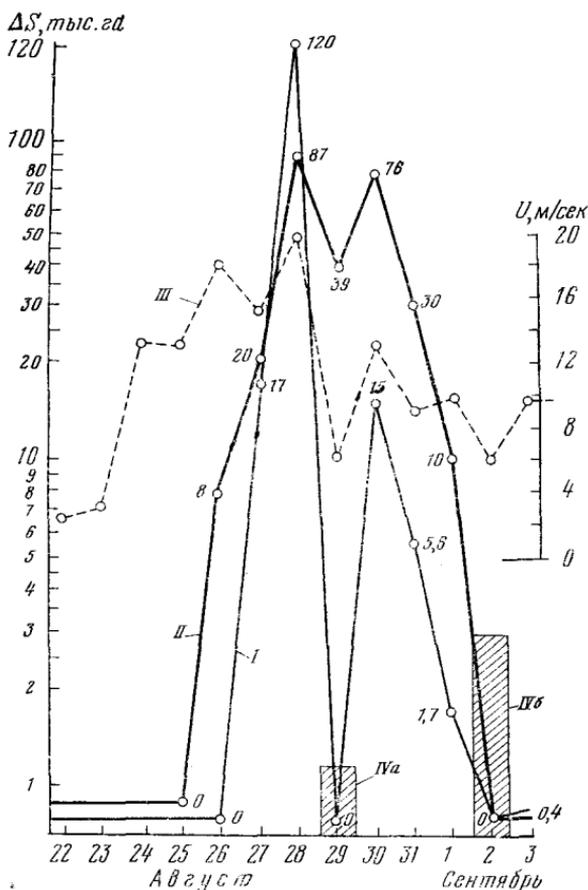


Рис. 1. Ежедневное возрастание суммарной площади пожарищ (ΔS , тыс. га) в конце августа и в начале сентября 1972 г. по Марийской АССР (I) и Горьковской области (II) под влиянием сильного ветра (III);

U — среднемаксимальная скорость ветра (м/сек);
 IVa — осадки величины 2 мм по Марийской АССР;
 IVб — осадки величины 6—11 мм по Марийской АССР и Горьковской области

Читинская область и Хабаровский край, 1976 г.

Осень 1975 г. в Читинской области была сухая, а зимой выпало минимальное количество осадков. Апрель 1976 г. характеризовался прохладной сухой солнечной погодой, относительная влажность воздуха понизилась до 23%, однако мелкие озера и речки оставались еще подо льдом. Лесные пожары начались 26 апреля (5 пожаров). 27 апреля ветер достиг скорости 20 м/сек, и число пожаров сразу увеличилось до 67. В последующие дни число пожаров все возрастало, ежедневно возникало по 12—15 новых очагов. С лесными пожарами боролись 3,5 тыс. человек рабочих с предприятий, 400 парашютистов и десантников, 70 бульдозеров и 20 тракторов. Борьбу осложняло отсутствие воды в лесных речках и озерах: подо льдом было пусто. Поэтому пришлось широко использовать шнуровую взрывчатку (накладные монозаряды).

Сильная вспышка лесных пожаров в Хабаровском крае произошла осенью 1976 г. В конце лета в крае прекратились дожди. Весь сентябрь стояла сухая теплая погода. Отмершие травы и опавшая листва пересохла. Вспышка лесных пожаров началась 5 октября от неорганизованных палов. Пожары стали быстро распространяться, загорелись торфяники. Уже через день авиация почти «ослепла» от дыма. Для борьбы с пожарами были стянуты силы авиалесоохраны со всей Сибири и Дальнего Востока, а также из Перми, Свердловска, Сыктывкара. Пожары были взяты под контроль, но 17 октября над краем пронесся ураган, причем ветер достигал скорости 30—40 м/сек. Ураган с невероятной силой раздувал тлеющие очаги, лесные пожары стали быстро распространяться, огонь преодолевал минерализованные полосы шириной в 12 бульдозерных колеи. Крупные пожары подошли к населенным пунктам и промышленным объектам, повредили линии электропередач и связи, нарушили сообщение. На борьбу были мобилизованы многие тысячи людей. К 25 октября основные очаги пожаров удалось локализовать. Широко развернулись работы по восстановлению пострадавших районов (Ключиков, 1976).

✓ Районы Скалистых гор в штатах Монтана и Айдахо, 1910 г.

Описание крупнейшей вспышки лесных пожаров 1910 г. в Скалистых горах дано в книге Ф. Дадж (Judge, 1962). Зимой в Скалистых горах на границе между Монтаной и Айдахо выпало много снега (до 2 м), но весна была сухой, а лето — необычайно засушливым. С начала июня стояла сильная жара. Посевы погибли по всей округе. В июле от гроз и других причин повсюду начались лесные пожары.

К середине июля лесная служба наняла для тушения пожаров 3 тыс. человек. Эти люди не могли справиться с пожарами, так как засуха и грозы не прекращались. В августе президент Тафт утвердил разрешение на использование регулярной армии. С помощью военных подразделений большинство пожаров было взято под контроль. Этому благоприятствовала тихая погода. Но 20 августа задул сильный ветер с северо-запада, и пожары стали быстро распространяться. Небо стало желтого цвета, а к 4 часам дня совсем потемнело. Бушевавшее пламя образовывало мощные вихри, которые выворачивали с корнем деревья. Отряды пожарных в горах были отрезаны от дорог и предпринимали отчаянные усилия, чтобы спастись.

Так отряд Эдварда Пуласки (из 42 человек) спрятался в заброшенной шахте глубиной 30 м. Во время прохождения пожара деревянные стойки шахты воспламенились, 5 человек получили смертельные ожоги.

Другой отряд из 50 человек под руководством Джона Белла пытался спастись на расчищенном участке площадью менее

1 га. Семь человек укрылись в маленькой пещере (где и погибли), а остальные бросились в ближайший ручей. Они едва не задохнулись от дыма, а трое были убиты падающими деревьями.

Руководитель третьего отряда Уильям Рок смело повел своих 70 человек через кромку пожара на выгоревшую территорию; все люди уцелели и не получили повреждений, за исключением одного труса, который в панике сбежал из отряда и затем, окруженный огнем, застрелился.

Отряд Эда Зенона из 30 человек стоял на берегу ручья, когда от горящей ветви загорелся лес на холме за ручьем. Лагерь сняли, провиант сложили на песке у ручья и покрыли мокрыми палатками. На лошадей набросили смоченные шерстяные одеяла. Жар был так велик и головни падали так часто, что и продукты, и куча плавника на отмели сгорели, несмотря на то что их поливали водой. От жары хорошо защищали ведра, надетые на голову. Спаслись все, но два человека во время прохождения пожара сошли с ума от страха.

Еще один отряд спасся, прорвавшись сквозь фронт пожара на выгоревшую площадь, кроме 19 человек, которые в панике побежали от пожара, затем спрятались в хижине, где и погибли.

Лишь один, самый крупный отряд из 150 человек, стоявший на холме и окруженный со всех сторон надвигающимся пожаром, использовал для своего спасения отжиг. Люди задыхались от дыма, поливали водой палатки и тушили сыпавшиеся сверху головни, но благодаря своевременно сделанному отжигу все уцелели.

В результате описанной вспышки пожаров 1910 г. выгорело 1,2 млн. га и погибло 85 человек.

Валлоу-Вайтман в штате Орегон, 1960 г.

Национальные леса Валлоу-Вайтман расположены в Голубых горах Валлоу на северо-востоке штата Орегон. Это самая пересеченная местность в Северной Америке.

Леса региона представлены насаждениями из сосны желтой и дугласовой пихты. Не покрытые лесом площади заняты кустарниковыми зарослями, а также лесосеками с большим количеством порубочных остатков, что повышает еще более природную пожарную опасность этих лесов. Район является наиболее засушливым на всем тихоокеанском северо-западе, и здесь ежегодно возникает около 100 пожаров от молний и 25—50 — по вине человека.

Пожароопасный сезон 1960 г. был продолжительнее обычного. Весна выдалась теплой и способствовала быстрому росту трав. Лето отличалось длительными засушливыми периодами. Максимальная температура 19 июля достигала 50° С. Это самая высокая температура за последние 70 лет. Местные служ-

бы наблюдения предсказывали прохождение грозового фронта с вероятностью 40%. Все работы в лесу были прекращены, а имеющиеся ресурсы были приведены в полную готовность для борьбы с пожарами в этих условиях.

Гроза разразилась на южной окраине леса 10 июля в 18 час. 30 мин. и двигалась через лес на северо-восток. Последние молнии отмечены в 21 час. 30 мин. Осадков не было, и лишь несколько увеличилась относительная влажность воздуха. В течение этих трех часов возникло 135 пожаров. К утру 20 июля некоторые пожары уже охватили площади по 300 га.

Всю ночь продолжалась мобилизация сил и средств для ликвидации пожаров. Утром отряды лесозаготовителей, строительных рабочих и рабочих с заводов — всего около 700 человек — 25 бульдозеров и несколько десятков автоцистерн уже участвовали в тушении пожаров или были на подходе к ним. Положение становилось угрожающим, и к полудню был выброшен десант из 45 парашютистов к 16 пожарам. К вечеру доставили еще 69 парашютистов к 24 пожарам, доступных для тушения этими силами.

В этот же день начались атаки пожаров с воздуха. Четыре самолета В-25, один РУ-2 и один РСУ непрерывно обрабатывали наиболее опасные места раствором бората. В этот день было сброшено около 200 тыс. л. Сбрасывание вели в первую очередь на небольшие пожары и на периметры быстро распространяющихся пожаров.

Большинство пожаров локализовали уже к вечеру. Через 24 часа после начала грозы все еще действовали семь пожаров классов Д и Е. Пять пожаров объединились в один на площади около 3 тыс. га. Кроме этого еще семь крупных пожаров распространились на площади от 400 до 500 га в труднодоступных районах нижней части каньона Снейк Ривер.

По всему тихоокеанскому северо-западу была проведена мобилизация людей и техники. К 24 июля в тушении участвовало уже 4700 человек, 800 из них представляли руководство и организованные отряды лесной службы. Помимо этого имелось 56 бульдозеров, 25 автоцистерн, 30 портативных помп, 80 мотоцикл, 11 вертолетов, 18 воздушных танкеров и 20 самолетов разных типов. За четыре дня борьбы на пожары было сброшено 1400 тыс. л бората.

В начале этого критического периода, а именно 22 июля, в районе пожаров были организованы два перевалочных пункта. Людские силы и техника поступали в эти лагеря. Здесь создавались отряды тушителей, которые во главе с опытными руководителями отправлялись туда, где они были необходимы. Здесь же отдыхали и находились под надзором сменные отряды. Свободные от служебных обязанностей полицейские использовались для поддержания порядка и предупреждения самовольного ухода людей с пожаров.

С 26 июля по 31 октября вновь проходили сухие грозы и возникло еще 140 пожаров, которые были локализованы на площади около 4 тыс. га.

За весь период с 19 июля по 31 октября возникло 329 пожаров, из них 73 — по вине человека. Выгоревшая площадь составила 20 тыс. га.

Крайне пожароопасная погода с одновременным возникновением массовых пожаров, как это случилось 19 июля, бывает редко. Для ведения успешной борьбы с пожарами в такой редкой ситуации необходимы мобильные и достаточно сильные резервы, которые могут прийти на помощь местным организациям (Саггу, 1960).

ОПИСАНИЯ НЕКОТОРЫХ КРУПНЫХ ПОЖАРОВ

Шуйско-Сурокский пожар

Пожару предшествовала сухая и жаркая погода. Среднесуточные температуры воздуха в июле и августе 1972 г. были на 5—7° выше нормы (20—29°), а осадков не выпадало совсем (табл. 1).

Пожар был обнаружен 23 августа в 16 часов в Шуйском лесничестве Кокшайского лесхоза (Марийская АССР) на пло-

Таблица 1

Метеорологическая обстановка в период распространения Шуйско-Сурокского пожара

Число, месяц	Температура воздуха в 13 ч, °С	Осадки, мм	Направление ветра	Скорость ветра днем, м/сек		Лесопожарный показатель засухи, мбар·град
				средняя	максимальная	
23.VIII	31,0	0	СВ	2	4	27 975
24.VIII	32,0	0	Ю	5	10	29 162
25.VIII	36,6	0	Ю	7	16	30 378
26.VIII	32,8	0	Ю-ЮВ	9	18	31 494
27.VIII	30,8	0	Ю-ЮЗ	10	18	32 678
28.VIII	23,4	0	ЮВ	7	15	33 276
29.VIII	25,3	0	Ю	7	16	33 974
30.VIII	18,8	0,3	З-СЗ	3	14	33 974
31.VIII	13,6	0,0	С	9	14	34 010
1.IX	5,8	4,3	СВ	8	14	0
2.IX	8,4	5,1	С-СВ	4	14	0
3.IX	8,7	0,0	С	7	11	2
4.IX	16,7	0	З-СЗ	5	11	24
5.IX	9,6	0	З-ЮЗ	10	11	104

щади 3,5 га. К 17 часам пожар охватил уже около 20 га. Прибывшие на тушение 38 рабочих с двумя тракторами ТДТ-40 не смогли остановить его распространение.

На следующий день, 24 августа, в тушении приняли участие уже 348 человек с пятью тракторами типа ДТ и одним бульдозером Т-100. В это время пожар охватил сосновые молодняки и, переходя местами в верховой, устремился в северо-восточном направлении к границе Звениговского лесхоза, но к 14 часам был остановлен на площади около 200 га.

В 16 часов резко увеличилась скорость ветра. Порывы достигали 10—12 м/сек. Пожар возобновился. Фронт его прошел через созданную бульдозерами просеку с минерализованной полосой и по участкам с сосновыми молодняками верховым направился в северном направлении, к границе Куярского лесхоза.

В это время в его локализации участвовало 648 тушильщиков, 7 тракторов ДТ и 5 бульдозеров С-100. К утру 25 августа пожар был остановлен на площади 1500 га. Однако опасность не миновала и передышка была недолгой. К 11 часам ветер вновь усилился, его порывы достигали 16 м/сек. Массу горящих углей, коры и головней перебрасывало через заградительную полосу. В результате на противоположной стороне в считанные минуты образовались сотни горящих очагов, распространяющихся с большой скоростью. Несмотря на усилия людей, уже через полчаса очаги объединились, и фронт пожара длиной около 2 км устремился по территории Кокшайского и Звениговского лесхозов на северо-восток. К концу дня пожар перешел границу Куярского лесхоза. Фронт его увеличился до 6 км.

В ночь на 26 августа пожар на участке со стороны Звениговского лесхоза был остановлен. Фронт его не представлял сплошной линии; он состоял из отдельных участков, протяженность которых варьировала от сотен метров до нескольких километров. Линия фронта была чрезвычайно извилистой. Это объясняется неравномерной скоростью продвижения горящей кромки. На некоторых участках, как например, в хвойных молодняках или сосняках лишайниковых, скорость продвижения достигала нескольких метров в минуту. Вместе с тем, когда пожар достигал поймы реки или болота, скорость его снижалась до дециметров в минуту. Надо отметить, что при таких погодных условиях и чрезвычайной сухости почвенного покрова ни поймы рек, ни болота не останавливали распространения пожара. На таких участках лишь снижалась его скорость. В связи с этим на отдельных участках фронт пожара вырывался вперед на несколько сотен метров, а иногда до километра. Тушению пожара сильно мешал порывистый ветер скоростью до 16—18 м/сек, который часто менял направление, и тогда фланги становились фронтом, и наоборот.

Утром 26 августа пожар снова возобновился. Ветер сменил направление, и фронт двигался на север. Один из его участков вошел в молодняки, и возник верховой пожар; скорость продвижения резко возросла. В среднем она равнялась 16 м в минуту. Пожар в этом направлении за 6 час покрыл расстояние в 6 км и к 15 час подошел к р. Кундыш.

Правый фланг, который под влиянием изменения направления ветра иногда превращался во фронт, стал угрожать пос. Силикатный. От минерализованной полосы, проложенной для защиты поселка, в западном направлении был пущен отжиг, и поселок удалось отстоять.

Успешная локализация этого пожара велась лишь на флангах, где на отдельных участках он и был ликвидирован. Вместе с тем фронт беспрепятственно проходил все рубежи как естественные, так и искусственные, созданные с помощью землеройной техники.

К ночи 26 августа длина фронта достигла 12 км. Пожар перешел р. Кундыш и к 12 часам 27 августа широким фронтом длиной около 7 км приблизился к станции Сурок.

Продвигался пожар по молоднякам и высокополнотным приспевающим сосновым древостоям, вследствие чего его интенсивность все время была на уровне сильного низового пожара, а на отдельных участках он часто переходил в верховой.

На подступах к ст. Сурок борьбу с огнем вели более 1000 человек, 20 тракторов, 30 бульдозеров.

Переброс горящих головней через создаваемые преграды и возникновение очагов в тылу линии защиты вынуждали людей отступать на новые рубежи. Днем 27 августа для остановки продвигающегося фронта пожара шириной около 7 км на автотрассе Йошкар-Ола — Казань от ст. Сурок в направлении Куяра было сосредоточено 1000 человек. Сильное задымление затрудняло ориентирование. В этой обстановке все население ст. Сурок было эвакуировано.

Отжиг вокруг станции не сделали, поэтому остановить пожар не удалось, и станция сгорела в течение полутора часов. За это время успело сгореть около 200 домов. С трудом отстояли только нефтебазу.

Пожар не остановили ни на автотрассе, ни на кромке линии железной дороги Йошкар-Ола — Казань. Наличие сосновых молодняков вдоль этих рубежей способствовало продвижению пожара верховым огнем и разлету горящих частиц далеко за пределы рубежей. Только за 24 часа 27—28 августа пожар охватил площадь около 20 тыс. га. Правый фланг линии фронта, перейдя шоссе и железную дорогу, вышел на поля и был локализован. Однако центр и левый фланг фронта продолжали продвигаться в северном направлении. Нависла угроза пос. Пешба и пионерскому лагерю. Однако на подступах к ним пожар был останов-

лен благодаря героическому усилию многих тысяч людей, мобилизованных из городов Йошкар-Ола, Казани, Волжска, Куйбышевской и Ульяновской областей.

В ночь на 30 августа с юго-восточным ветром фронт пожара повернул на северо-запад и в нескольких местах перешел р. Кокшага. Однако 31 августа он сменил направление на противоположное. Подул северный ветер, а с ним пришло и резкое похолодание. Фронт пожара стал тылом. Это дало возможность наконец остановить распространение пожара. В последующие два дня продолжавшееся похолодание и выпавшие осадки способствовали его локализации.

За период с 25 августа по 1 сентября пожар распространился на территории Куярского лесхоза на площади около 32 тыс. га.

Шуйско-Сурокский пожар продвигался до 21 сентября. Однако это уже горели только участки на флангах пожара, а также часть возобновившихся очагов в районе пос. Шеренга, Оланга, Силикатного, а также на территории Советского лесхоза. Но сентябрьская прохладная погода с частыми, хотя и небольшими осадками, способствовала ликвидации последних очагов.

✓ Кепинский пожар

Пожар возник, по всей вероятности, от грозы 28 июня 1970 г. в кв. 41 Беломорского лесничества Архангельского лесхоза. По данным метеостанции Кепино, расположенной в том районе, максимальная температура в дни, предшествовавшие пожару, превышала 30°, лесопожарный показатель засухи к 28 июня достиг 2230 мб·град.

Возникший пожар заметили в 11 час дня 29 июня с рейсового самолета и сообщили в оперативное авиаотделение. Лишь в 8 часов вечера (так как на Севере ночи в июне очень светлые) для тушения пожара доставили вертолетом 6 десантников; к тому времени пожар достиг уже площади не менее 50 га.

1 июля было доставлено 63 человека, 2 июля — 58 человек, 3 июля — 75 человек и 4 июля — 40 человек. От основной опорной линии — Мезенского тракта — не был сделан отжиг. 3 июля усилился южный ветер, пожар перешел тракт и стал распространяться на север. Лишь тогда на тушение пожара были брошены достаточные силы: 5 июля доставлено еще 350 человек, 5 бульдозеров и тракторов. 6 июля пожар был приостановлен, 7 июля начался дождь, за два дня выпало 15 мм осадков, это и помогло ликвидировать пожар. Огнем было пройдено 5680 га лесопокрытой площади.

На территории пожарища преобладали насаждения сосновые (95%), а остальная площадь была покрыта ельниками (3%) и березняками (2%). Спелые и перестойные насаждения занимали 70% площади пожарища, 22% составляли молодняки и жердняки. Преобладали низкополнотные насаждения (56%), а

44% приходилось на среднеполнотные. По степени увлажнения площадь пожарища представлена на 70% боровой группой (брусничные, лишайниковые и мохово-лишайниковые типы леса) и на 27% — группой нормального увлажнения. Незначительная часть площади в восточной части, примыкающей к болотам, занята долгомошными и сфагновыми типами леса. Так как пожар продвигался в основном на север, то в северной части пожарища (кв. 23, 10, 11 и 420) он достиг значительной силы, хотя и был преимущественно низовым. Здесь погибли даже спелые и перестойные сосняки в результате интенсивного обогрева крон мощными потоками горячих газов. В южной части пожарища (кв. 41 и 42), где продвигалась тыловая кромка пожара, сильно пострадали только молодняки и средневозрастные насаждения.

В итоге большинство насаждений (около 65%), пройденных пожаром, получили сильную степень повреждения и погибли. При этом высота нагара на стволах была от 2 до 14 м (в среднем 5,5 м). Слабую степень повреждения огнем получили 28% насаждений, расположенных в южной (тыловой) части пожарища и в восточной, примыкающей к болотам. Высота нагара на стволах там составляла 1 м с колебаниями от 0,25 до 3,5 м. Средняя степень повреждения была отмечена лишь у 7% древостоев.

Бродфордский пожар

Бродфордский пожар возник 25 февраля 1957 г. на юге Австралии в 60 км севернее Мельбурна. Он интересен тем, что развивался при погодных условиях, которые обычно не считаются благоприятными для распространения крупных пожаров. Описание этого пожара дано в статье А. Робина (Robin, 1958).

Район пожара представляет собой холмистую местность с отметками от 300 до 600 м (рис. 2). Склоны и вершины гор и холмов покрыты лесом, а долины представляют собой пастбища, заросшие кустарниками.

Лето 1956/57 г. в этом районе характеризовалось засушливостью. Количество осадков в декабре было ниже нормы (17—77%), а январь оказался исключительно сухим месяцем (8—42%). В феврале количество осадков было также меньше нормального, причем почти все дожди выпали до 16 февраля, и лишь 21 февраля был зарегистрирован небольшой местный дождь. Хотя лето и не отличалось жаркой погодой, но из-за недостатка влаги обильная травянистая растительность в течение января стала увядать. Дожди в начале февраля способствовали росту новых побегов, но из-за сохранившегося недостатка влаги в почве побеги разрослись несильно, а старая трава к концу февраля совсем высохла.

В день, предшествовавший пожару (24 февраля), рано утром над районом Бродфорда прошел слабый холодный фронт, но дождя не наблюдалось. После прохода фронта утренние запад-

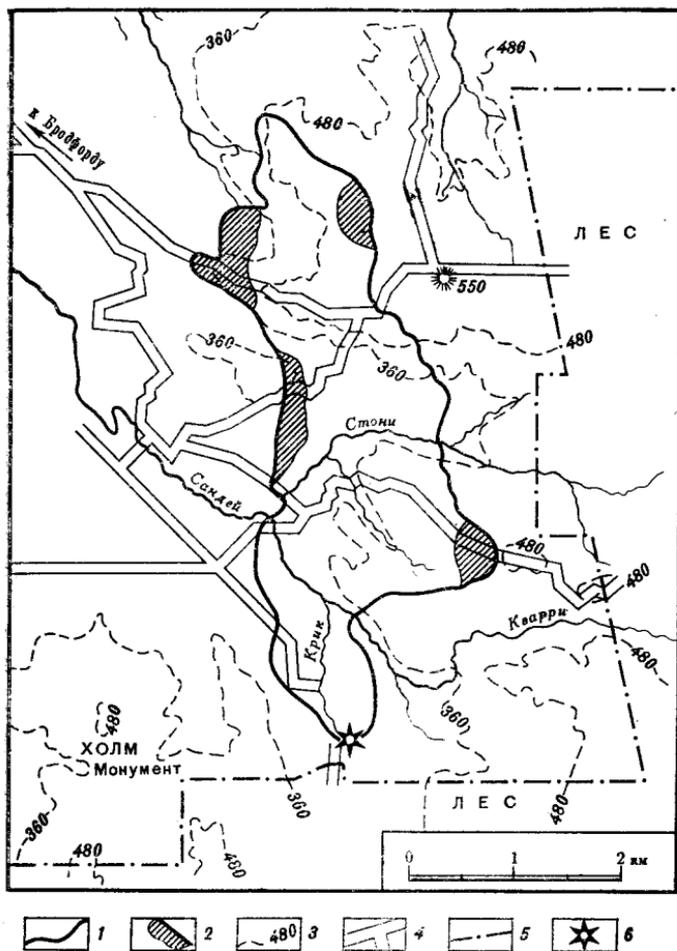


Рис. 2. Схема Бродфордского кустарникового пожара

1 — окончательные границы пожара; 2 — площади, пройденные пожаром на второй день; 3 — горизонтали (абс. высоты в метрах); 4 — дороги; 5 — граница леса; 6 — место возникновения пожара

ные ветры постепенно превратились к полудню в южные, свежие и порывистые (8—12 м/сек). Максимальные температуры были нормальными: 20—30° С, а относительная влажность воздуха не понижалась менее 47%.

День 25 февраля был такой же, как и предыдущий, лишь ветер изменил свое направление на юго-юго-восточное, причем его скорость к вечеру оставалась еще довольно высокой (5—10 м/сек). Максимальная температура не превышала 18—21°, а относительная влажность достигала 40%.

Предполагают, что пожар возник после 10 час утра от непотушенного лагерного костра. Обнаружен пожар был в 11 час дня. Довольно сильный (10—12 м/сек) юго-юго-восточный ветер погнал пожар на север, в течение 12 час он прошел по кустарникам около 7 км, продвигаясь со скоростью 0,5 км/час, преодолел по пути два ручья и три дороги, и охватил площадь более 700 га.

На следующий день, 26 февраля, погода в общем благоприятствовала тушению. Хотя максимальные температуры повысились на 5—10°, а влажность воздуха понизилась до 34%, но зато ветер был очень слабый (до 2 м/сек) переменных направлений. Поэтому пожар в течение дня был локализован. Наблюдались лишь отдельные прорывы пожара, незначительно увеличившие его площадь.

Надежная локализация не позволила пожару возобновиться 27 февраля, когда с севера подул ветер сильный (до 25 м/сек), горячий (до 30° С) и сухой (до 28% относительной влажности).

✓ ✓ **Выводы**

1. Отдельные крупные лесные пожары возникают при засухе на фоне массовой вспышки мелких пожаров.
2. Катастрофические вспышки крупных лесных пожаров развиваются в конце засухи при сочетании двух условий: штормового ветра и наличия большого количества плохо локализованных или недотушенных пожаров.
3. Крупные лесные пожары, распространяясь, легко преодолевают почти любые преграды: минерализованные полосы, противопожарные разрывы, трассы дорог, реки и т. п. Наиболее надежное средство остановки крупного лесного пожара — отжиг.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПОЖАРОВ

Известно, что уровень горимости лесов в СССР определяется сравнительно небольшим числом крупных пожаров. В последние годы успешное развитие авиапатрульной службы, разработка новых технических средств тушения пожаров позволили значительно снизить горимость лесов путем своевременного обнаружения и тушения возникающих пожаров.

Однако при некоторых условиях состояния горючих материалов и атмосферы лесные пожары развиваются настолько быстро, что за несколько часов превращаются в высокоинтенсивные, быстрораспространяющиеся крупные лесные пожары. Над такими пожарами возникают мощные конвекционные потоки продуктов горения. Эти потоки достигают иногда высоты нескольких тысяч метров и в значительной степени могут изменять метеорологическую обстановку прилегающего слоя атмосферы, а также поднимать в воздух и рассеивать перед фронтом пожара горящие частицы («пятнистые» пожары). Для успешной борьбы с крупными высокоинтенсивными пожарами нужно выяснить, как возникают конвекционные потоки над пожаром, как влияют они на распространение пожара, на возможность преодоления пожаром препятствий, на условия работы летательных аппаратов в зоне пожара.

ПЯТНИСТАЯ ФОРМА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОЖАРА

Отечественными учеными сравнительно хорошо изучены закономерности развития пожаров в зависимости от географического положения лесов, типов леса, состояния горючих материалов и хода погоды (Мелехов, 1933, 1939, 1947; Молчанов, 1940; Нестеров, 1939; Курбатский, 1954, 1962, 1964; Вонский, 1957; Софронов, 1967). Проведен ряд работ для выяснения влияния состояния атмосферы на возникновение и распространение лесных пожаров (Гриценко, 1952; Никитина, 1963; Франк, 1964, 1965). Изучение же поведения пожаров в зависимости от условий, которые создает сам пожар, взаимодействуя с атмосферой, у нас почти не проводилось.

Трудность изучения лесных пожаров, которые при взаимодействии с атмосферой могут оказать существенное влияние на

характер их распространения и условия тушения, объясняется тем, что такие пожары, как правило, являются настоящим стихийным бедствием. Их лабораторное исследование затруднено вследствие невозможности в настоящее время моделировать добавочный механизм распространения этих пожаров пятнами от горящих частиц, падающих на почву (Countryman, 1964, 1965, 1969; Williams e. a., 1970).

Однако имеется большое число работ, касающихся вопроса природы высокоинтенсивных лесных пожаров, взаимодействие которых с пограничным слоем атмосферы (ПГСА) вызывает видимые изменения характера распространения пожаров и воздействия их на прилегающие слои воздуха.

На опасность разлета горящих углей при высокоинтенсивных лесных пожарах указывали А. Левиз (1833), И. С. Мелехов (1933, 1936), В. Г. Нестеров (1939).

М. Е. Ткаченко (1939) писал, что при верховых пожарах иногда возникают огромные конвекционные потоки горячего воздуха, переносящие при усилении ветра зажженные куски коры, шишки, кусочки древесины на расстояния до нескольких километров. По данным Байрама (Вугат, 1954), вероятность создания пожаром конвекционного потока, способного поднять вверх кусочек горящего, быстро возрастает по мере увеличения его размера. Н. П. Курбатский (1962) отмечает, что пятнистость свойственна любому беглому верховому пожару, возникающему при сильном ветре.

Сведения о распределении скорости и температуры газового потока над лесным пожаром, могущие характеризовать возможность переноса горящих частиц, весьма отрывочны. Опубликованные работы, сделанные в данном направлении, не дают достаточной информации об этих величинах.

Так, Байрам (Вугат, 1957) указывает, что скорости конвекционного потока над пожаром могут достигать 35 м/сек. Тэйлором (Taylor, 1971) при двухкратном пролете через конвекционный поток кустарникового пожара на высоте 900 м зарегистрированы скорости 13 и 15 м/сек.

Отрывочные сведения о скорости конвекционных потоков над пожаром имеются также у Веренкампа (Vehrencamp, 1955). Им на опытах стационарных пожаров были зафиксированы вертикальные скорости газового потока, равные 5 м/сек.

Попытки выявления скорости и температуры конвекционных потоков над слабыми лесными пожарами были предприняты Вульфсоном и Гутманом (1965). Из их данных следует, что температура газового потока пожара резко понижается с высотой, а его скорость возрастает. Ими найден метод расчета скорости и температуры над точечными источниками тепла различной интенсивности. Однако полученные ими данные нераспространяемы на высоты менее 100 м, т. е. по их методике нельзя рассчитать скорости и температуры именно на тех высотах, где

горючие материалы поступают в конвекционный поток пожара. Кантримен (Countriman, 1964) делает вывод о том, что максимальная скорость воздуха, поступающего в газовый поток, имеет место выше основания пожара, но это противоречит результатам опытов, проделанных Веренкампом.

Конкретные скорости газового потока пожара Кантрименом не выявлены.

Как полезные следует отметить опыты на микромоделях, имитирующих пожары слабой интенсивности (Fauge, 1961; Rao, Bzustuski, 1969), хотя эти опыты и не могут претендовать на распространимость их результатов на естественные пятнистые пожары.

Интересны опыты, проведенные Э. Н. Валендиком (1968), измерявшим скорость газового потока над горящим валом горючего с помощью анеморумбометра М-47. Автор отмечает некоторое увеличение скорости газового потока пожара с высотой в отдельных опытах, но считает это лишь следствием сужения прохода для газов на высоте крон деревьев. Достоверность этого явления статистически им не подтверждена.

Валендиком же проведены исследования изменения зоны встречной тяги. Им выяснено, что встречная тяга усиливается при увеличении интенсивности пожара. Наибольшей силы она достигает при штиле. Определена величина зоны встречной тяги у поверхности земли в зависимости от метеорологических условий и интенсивности пожара.

В работе Фаура (Fauge, 1961) говорится, что при пожарах большой силы создавались воздушные потоки, способные перевернуть самолет.

В исследованиях С. Тарифа (Tarifa e. a., 1965) предпринята попытка смоделировать условия полета горячей частицы в воздухе и определить теоретическим путем дальность разлета горящих частиц. Использовать полученные им данные затруднительно, так как не выявлены вид, форма и размеры горящих частиц, представляющих наибольшую опасность. Кроме того, Тарифа проводил опыты со здоровой древесиной, высушенной до влажности от 25 до 2%.

В естественных условиях влажность живых здоровых веточек редко бывает меньше 90—100% (Курбатский, 1970). Имеющая же подобную влажность древесина, подверженная гнили, обладает другими физико-химическими свойствами, что должно отражаться на ее полетных свойствах и характере горения.

Однако в целом работа Тарифа весьма полезна, так как помогает лучше понять природу пятнистых пожаров. Заслуживающим внимания представляется нам сделанный Тарифа вывод о том, что частицы горючего, переносимые ветром, перемещаются по горизонтали со скоростью ветра, причем время, за которое они достигают этой скорости, настолько мало, что при практических расчетах им можно пренебречь.

Работа Кронит (1973), по нашему мнению, полезна тем, что еще раз привлекает внимание к испытанному средству тушения лесных пожаров — отжигу. Правда, с выводом, вытекающим из этой работы, что на лесных пожарах расстояние переноса горящих частиц не превышает двух высот древостоя, нельзя согласиться. Да и сам автор в этой же статье указывает, что противопожарные разрывы шириной 30—50 м и даже более не являются преградой для верховых пожаров.

С. В. Рыжков (1973) рекомендует перед верховыми пожарами выжигать полосу в 100—150 м шириной. Однако и эту рекомендацию нельзя считать правильной, так как в ряде случаев горящие частицы будут выноситься на меньшее расстояние перед кромкой пожаров, а в других это расстояние будет больше.

После того как горящая частица упадет на землю, она в зависимости от своих размеров — от вида напочвенного покрова, от его состояния, а также от погодных условий — может вызвать или не вызвать загорание напочвенного покрова.

Опасность таких источников зажигания, как: костры, спички, трубочный пепел, искры паровоза, в зависимости от влажности верхнего слоя подстилки была проанализирована Стикелом (Stickel, 1934). Приводимые им данные дают качественную картину влияния влажности горючего на способность его к загоранию и сравнительную оценку инициаторов зажигания, но, как справедливо замечал И. С. Мелехов (1947), количественные оценки влияния влажности подстилки на ее загораемость от перечисленных источников огня не могут быть использованы у нас «не только в силу физико-географических различий, но и в силу того, что показатели влажности могут быть резко различны в зависимости и от характера горючих материалов и от методики определения ее».

Действительно, как известно, различные виды напочвенного покрова имеют различную критическую влажность горения, т. е. максимальную влажность, при которой возможно горение этого вида горючего.

Более ценными, на наш взгляд, являются исследования, проведенные под руководством И. С. Мелехова (1947), в которых изучалась опасность загорания от горящих спичек в различных типах лесорастительных условий в разные часы дня. По результатам этих исследований можно сделать вывод о том, что способность к загоранию от идентичных источников огня в большой степени зависит от типа леса.

Не отрицая ценности вышеуказанных и ряда других работ, проведенных в этом направлении, нельзя не заметить, что данные о загорании напочвенного покрова от рассмотренных источников зажигания не могут быть использованы для определения вероятности загорания напочвенного покрова от горящих углей, разбрасываемых высокоинтенсивным пожаром, в силу отсутствия сведений о влиянии на этот процесс отдельных важ-

ных факторов (ветер, размер инициатора зажигания, его происхождение) и их комплекса.

Интересна в данном отношении работа Берлада (Berlad, 1970), в которой он рассматривает возможность зажигания слоя горючих материалов горящими частицами, разлетающимися от лесного пожара. Берлад обращает внимание на то, что возможность загорания горючего в этих случаях будет определяться видом горючего, его структурой, состоянием и размером горящих частиц. Тем не менее он не дает числовой оценки степени влияния всех этих факторов на загорание горючего. Большинство указаний Берлада предположительны и, по его мнению, требуют экспериментальной проверки.

В результате анализа литературных данных можно сделать следующее краткое изложение того, что известно о высокоинтенсивных лесных пожарах. При определенной, как правило, высокой интенсивности лесного пожара и ветра, скорость которого недостаточна для смятия конвекционного потока у его основания, последний увлекает вверх горящие частицы горючего. Эти частицы, покинув конвекционный поток на какой-то высоте, переносятся ветром на различные расстояния. После падения на землю они, в случае достаточной сухости почвенного покрова, могут вызвать его загорание, в результате чего перед фронтом пожара появляются новые очаги горения, которые часто превращаются в самостоятельные пожары, или соединяются с основным пожаром. Так как при неблагоприятных условиях удаленность этих очагов горения может быть весьма значительной, пятнистые пожары распространяются особенно быстро и бороться с ними чрезвычайно трудно.

Увеличение интенсивности пожара вызывает усиление трансформации воздушных потоков, вследствие чего условия полетов в зоне пожаров изменяются и могут, по-видимому, исключить возможность работы летательных аппаратов вблизи пожара.

В соответствии с рассмотренным состоянием вопроса определена программа наших исследований.

ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В программу были включены следующие вопросы:

1. Формирование конвекционного потока лесного пожара.
2. Трансформация пограничного слоя атмосферы конвекционным потоком и условия полетов в зоне пожара.
3. Влияние конвекционного потока на распространение пожара.
4. Скорости распространения крупных лесных пожаров.

При изучении условий формирования конвекционных потоков над лесными пожарами мы проводили предварительные наблюдения за распространением дыма от горящего в металличе-

ких ваннах дизельного топлива. Когда по визуальным наблюдениям получали представление о качественном характере явления, приступали к более тщательному его изучению при помощи инструментальных наблюдений за параметрами конвекционных потоков с одновременной регистрацией значений факторов погоды и пожара. Наблюдения делали на пожарах, моделируемых путем сжигания дизельного топлива, и при горении на специально подготовленных участках леса.

Для решения второго вопроса программы проводили наблюдения на пожарах, создаваемых в шелкопрядниках. Наблюдения велись синхронно с земли и с летательных аппаратов. Наземными наблюдениями устанавливали характеристики пожара и значения метеофакторов, а также осуществляли шаропилотные наблюдения. Аэрозондирование с летательных аппаратов предпринимали для определения давления, температуры воздуха, ее пульсаций, значений перегрузок, вертикальной составляющей скорости воздушного потока.

Факторы, влияющие на скорость конвекционного потока лесного пожара, выявляли сначала с помощью наблюдений на макромоделях пожаров, создаваемых при сжигании дизельного топлива. Этот род горючего был использован нами в силу того, что его теплофизические характеристики более полно изучены и освещены в литературе (Блинов, 1960; Петров, Реутт, 1960; Демидов, 1962; Ройтман, 1964). Это облегчало проведение опытов при желательных погодных условиях и варьирование интенсивностью тепловыделения на моделируемом пожаре. Кроме того, проведение опытов на моделях уменьшало сложность инструментальных наблюдений.

После того как степень влияния различных факторов пожара и погоды на скорость конвекции над пламенем пожара в пределах высоты древостоя была установлена, приступили к проведению опытов на лесных пожарах. В этой части исследований выявляли зависимость скорости конвекции от интенсивности горения на кромке. Скорость конвекции определяли с помощью анемометров Фусса, укрепляемых на сухостойных деревьях перпендикулярно стволу. Интенсивность горения на кромке пожара рассчитывали по количеству горючего, сгоревшего в единицу времени с единицы длины горящей кромки.

Изменение скорости конвекции с высотой изучали на электромоделях пожара, в качестве которых использовали электроннагревательные элементы различной мощности и с различными геометрическими размерами. Для регистрации скорости конвекции в этом случае применяли крыльчатые анемометры АСО-3.

Горение частиц лесного горючего материала в условиях конвекционного переноса изучали на специально созданной для этого установке. Основной ее частью была труба, через которую, с заданной скоростью просасывался воздух, имитирующий конвекционную струю, причем изменяли скорость струи таким обра-

зом, чтобы она была равна скорости падения горячей частицы. При помощи этого приема определяли разные скорости падения частицы на всем протяжении времени ее горения и потери веса.

Вероятность зажигания напочвенного покрова упавшими на него горящими частицами определяли путем попытки зажигания различных видов напочвенного покрова различной влажности и при разной скорости ветра частицами горючего материала, время горения которых после падения их варьировалось от 3 мин до 30 сек. Опыты проводили как в лабораторных, так и в естественных условиях. При проведении опытов в естественных условиях учитывали влияние и такого фактора, как солнечная радиация.

При составлении рекомендаций для определения возможности возникновения пятнистых загораний и удаления их от кромки пожара мы использовали добытые данные о связи скорости конвекции на высоте древостоя с интенсивностью пожара, о зависимости скорости конвекционного потока от высоты над пламенем пожара, о скорости проскальзывания горящих частиц в конвекционном потоке и о вероятности зажигания напочвенного покрова в различных условиях горящими частицами с разным временем горения. Необходимые трудоемкие расчеты при этом были произведены на ЭВМ Минск-22.

Практическая проверка рекомендаций, предлагаемых для определения вероятности и местонахождения пятнистых загораний на лесных пожарах, была проведена на естественных пожарах. Наблюдения проводили с земли и с воздуха. В каждом наблюдении регистрировали значение характеристик пожара и атмосферы, наличие и местонахождение загораний перед кромкой фронта пожара. Данные о скорости распространения крупных лесных пожаров были получены путем прямых наблюдений, а также из литературных источников.

Для анализа результатов наблюдений в работе использованы табличный и графический методы и многофакторный дисперсионный анализ. Особенности методики исследований и сведения о числе наблюдений по каждому из рассматриваемых вопросов более подробно изложены в соответствующих разделах.

Исследования по первому и второму вопросам были проведены на специально подготовленном полигоне в шелкопрядниках по берегам среднего течения р. Б. Кеть и в сосново-лиственничных древостоях в среднем течении рек Ангары и Подкаменной Тунгуски. Наблюдения на электромоделях проводили в лабораторных условиях.

Наблюдения на пожарах были запланированы в вышеуказанных районах по следующим причинам: эти районы характеризуются высокой горимостью, нередко пожары охватывают значительные площади леса, как это было, например, в 1972 г., когда площадь отдельных пожаров достигала 10 тыс. га. Естественно, что на таких больших площадях встречаются самые разнообразные участки леса, что в совокупности с различными

погодными условиями во время пожара обеспечивают самую различную интенсивность горения на разных участках периметра пожара. Во время проведения наблюдений интенсивность горения на обследованных пожарах варьировалась от 2,4 до 100 тыс. ккал/м мин. Это позволило проследить влияние интенсивности горения на скорость конвекции в довольно большом диапазоне значений интенсивности.

Наблюдения за горением частиц лесного горючего в условиях конвекционного переноса были проведены в лаборатории.

Вероятность зажигания напочвенного покрова упавшими на него горящими частицами определяли в лаборатории и на лесных участках.

Наблюдения по практической проверке рекомендаций, применяемых для определения вероятности и местонахождения пятнистых загораний на лесных пожарах, проводили при обследовании пожаров с земли и с летательных аппаратов в указанных районах.

Объектами наблюдений в наших исследованиях были следующие: 1) выявление условий формирования конвекционных потоков над лесными пожарами и факторов, влияющих на скорость конвекционного потока лесного пожара,— дымовой поток над горящим дизельным топливом и лесным горючим материалом, характеристики горящей кромки и погодных условий; 2) наблюдение за горением частиц лесного горючего материала в условиях конвекционного переноса— кусочки древесины и коры сосны (*Pinus silvestris*), лиственницы (*Larix sibirica*) и березы (*Betula verrucosa*); 3) определение вероятности зажигания напочвенного покрова, упавшими на него горящими частицами— напочвенный покров из мха Шребера (*Pleurozium schreberi*), лишайника кладония (*Cladonia rangiferina*), ветоши вейника (*Calamagrostis langsdorffii*), хвои сосны, листьев березы, а также гнилая древесина. Кроме того, объектом наблюдений в этой части работы были и разбрасываемые по напочвенному покрову горящие кусочки древесины.

При практической проверке рекомендаций по определению местонахождения пятнистых загораний объектом наблюдений были характеристики горящей кромки и погодных условий и возникающие за пределами кромки фронта загорания от падающих горящих частиц.

✓ ФОРМИРОВАНИЕ КОНВЕКЦИОННОГО ПОТОКА ЛЕСНОГО ПОЖАРА

Под конвекцией понимаются движения отдельных масс внутри жидкости или газа, зависящие от разностей плотности (в атмосфере это возникает от разностей температуры) и приводящие к перемешиванию. С конвекцией связан целый ряд атмос-



Рис. 3. Конвекционные потоки высокоинтенсивного лесного пожара.

ферных процессов. В теплое время года конвекция является тем механизмом, с помощью которого осуществляется обмен теплом, влагой и количеством движения между подстилающей поверхностью и свободной атмосферой; кроме того, конвективные движения способствуют переходу различных примесей из нижних слоев атмосферы в верхние, затем эти примеси разносятся ветром, как, например, это происходит с дымом в зоне лесных пожаров.

Конвекция проявляется в виде конвекционных потоков — т. е. движений воздуха с большой вертикальной составляющей. Конвекционные потоки, образующиеся у поверхности земли, могут возникать спонтанно (без наличия источников тепла), в результате каких-либо начальных возмущений в поле температуры или ветра, и под влиянием источников тепла (термическая конвекция), нагревающих находящийся над ними воздух. Такими источниками тепла на земной поверхности являются: сильно прогревающиеся склоны гор, островки и берега рек, свежеспаханные участки земли, асфальтовые дороги, вырубки в лесу и т. д. Лесные пожары — наиболее мощные из перечисленных источников тепла, над которыми образуются конвекционные потоки. Температуры и скорости над такими источниками тепла значительно превышают температуры и скорости спонтанных струй (Вульфсон, Гутман, 1965).

Альбрехт (Albrecht, 1942) определяет термическую конвекцию как вертикальное движение вверх больших воздушных масс под воздействием термической силы, создаваемой вследствие наличия в них более высоких температур, по сравнению с окружающим воздухом. Он делает вывод, что возникновение термической конвекции обычно имеет место при малых или умеренных скоростях ветра.

В ряде случаев над лесными пожарами, выделяющими большое количество тепла, возникают настолько мощные конвекционные потоки (рис. 3), что они способны увлекать тлеющие частицы лесного горючего материала на значительную высоту, откуда эти частицы разносятся ветром на различные расстояния. М. Я. Ройтман (1964) указывает, что мощность конвекционных потоков при горении древесных материалов может быть настолько велика, что в отдельных случаях они способны отрывать и перебрасывать конструктивные элементы зданий. Известно (Вульфсон, Гутман, 1965; Пристли, 1964), что чем мощнее источник тепла, тем больше скорость и высота конвекционного потока, развивающегося над ним, и тем больше, следовательно, вероятность подъема горящих частиц. Однако какова бы ни была мощность источника тепла, горящие частицы могут быть подняты на значительную высоту лишь в том случае, если конвекционный поток не будет смят ветром (Yugan, 1957; Whittingham, 1958).

Возникновение потоков с большой вертикальной составляющей

На лесных пожарах нас интересуют лишь такие конвекционные потоки, которые распространяются вблизи от поверхности земли с заметной вертикальной составляющей. Только такой поток в состоянии поднять частицы горючего выше окружающего древостоя. Если же продукты сгорания перемещаются с очень малой вертикальной составляющей, то в этом случае перенос частиц будет происходить не в силу конвекционного подъема его, а только под воздействием ветра у поверхности земли. Дальность такого переноса, как правило, невелика и всегда меньше дальности конвекционного переноса.

В нашу задачу входило определение условий, при которых над пожаром формируется конвекционный поток, отклоненный от вертикали на угол не более 30° . Угол в 30° был принят условно, как максимальный угол отклонения, при котором еще возможен конвекционный подъем горящих частиц. Поскольку конвекционный поток пожара возникает в результате подъема продуктов сгорания под действием сил плавучести, то основным условием возникновения конвекционного потока является нагрев подстилающей поверхности.

Большое влияние на угол наклона потока к земле оказывает ветер. Кроме того, можно предполагать, что какую-то роль в формировании конвекционных потоков играет состояние пограничного слоя атмосферы (ПГСА), так как известно, что вертикальные движения легче развиваются при неустойчивом состоянии атмосферы (Молчанов, 1925).

Состояние атмосферы неотделимо от синоптических ситуаций, складывающихся на территории распространения пожара. Условия, влияющие на развитие конвективных движений, будут зависеть от установившейся в районе пожара той или иной синоптической ситуации. Так, например, для антициклона характерны нисходящие движения, а на территории, где установился циклон, преобладают восходящие движения воздуха. От того же, какие движения воздуха будут преобладать, должна зависеть и успешность развития конвекционного потока пожара.

Однако, кроме основных синоптических ситуаций (циклон и антициклон), существует еще ряд промежуточных: «ложбина», «гребень», «седловина», которые характеризуются различными движениями воздуха в них. Большое влияние на успешность развития конвекции могут оказать теплые и холодные фронты, т. е. области раздела между различными воздушными массами.

Барические системы могут перемещаться, а некоторые из них вообще очень неустойчивы и недолговечны, как, например «седловина», проследить перемещение которой бывает обычно невозможно (Бабилов, 1946). Поэтому условия, способствующие развитию конвекции, лучше отождествлять с неустойчивым

состоянием ПГСА, наличие которого, независимо от синоптической ситуации, свидетельствует об условиях, благоприятных для развития конвекции. Потеря же устойчивости ПГСА происходит только в том случае, когда вертикальный градиент температуры (β) становится больше адиабатического (Дюбек, 1946).

Американский физик Байрам (Вугат, 1966) на основании теоретических расчетов сделал вывод, что при нейтрально-устойчивом состоянии ПГСА для существования конвекционного потока необходимым является условие, при котором отношение скорости превращения тепловой энергии пожара в кинетическую энергию газового потока (P_f) к скорости потока кинетической энергии в поле ветра (P_w) было бы равно или больше 1.

Для расчета P_f и P_w Байрамом предложены следующие уравнения:

$$P_f = \frac{\sqrt{14,9 \cdot I}}{C_p (T_0 + 427)} \quad (1)$$

$$P_w = \frac{\rho (v - r)^3}{2g}, \quad (2)$$

где P_f — скорость превращения тепловой энергии пожара в кинетическую энергию газового потока на высоте, $\text{кгм} \cdot \text{сек}^{-1} \text{м}^{-2}$; I — интенсивность пожара, ккал/мсек ; C_p — теплоемкость воздуха при постоянном давлении, $\text{ккал/кг} \cdot \text{град}$; T_0 — температура наружного воздуха, поднимаемого пожаром, град. С° ; 427 — эмпирически найденное число для шкалы Цельсия; P_w — скорость потока кинетической энергии в поле ветра на высоте над пожаром $\text{кгм} \cdot \text{сек}^{-1} \text{м}^{-2}$; g — ускорение силы тяжести, м/сек^2 ; ρ — плотность воздуха на высоте, кг/м^3 ; v — скорость ветра, м/сек ; r — скорость продвижения пожара вперед, м/сек .

Подразумевается, что при равенстве энергий ветра и пожара, конвекционный поток пожара должен быть наклонен под углом 40—50°, т. е. приблизительно по равнодействующей взаимодействующих энергий. Если это условие будет выполняться, то может представиться возможность предсказывать угол наклона конвекционного потока по известным значениям энергии ветра и пожара. Так как эти значения могут быть определены соответственно по скорости ветра и интенсивности пожара, то, зная последние, мы можем предсказать, возможно ли существование конвекционного потока пожара при данных условиях.

Байрам применяет выведенные им закономерности к конвекционному потоку от его основания до высоты 1200 м. Но энергия этого потока, несомненно, изменяется с высотой вследствие перемешивания газового потока пожара с окружающим воздухом. Поэтому прежде чем использовать уравнения, выведенные Байрамом, мы решили проверить их применимость для той части конвекционного потока, где планируется эти уравнения ис-

пользовать. Такая проверка на высотах около 600 м была произведена Э. Н. Валендиком (1966). Он нашел, что на этих высотах уравнения, предложенные Байрамом, полностью определяют возможность существования конвекционного потока.

Так как возможность формирования конвекционного потока определяется на высоте верхней границы полога древостоя, то нас интересовала применимость уравнений Байрама именно на этой высоте.

Расчеты Байрама даны лишь для условий нейтральной атмосферы. При изучении формирования конвекционных потоков над лесными пожарами необходимо было предварительно провести опыты для выяснения, оказывает ли какое-то влияние состояние ПГСА на угол наклона к горизонту конвекционного потока пожара. На возможность такого влияния указывает следующее. Из курса физики известно, что чем больше вертикальный температурный градиент, тем неустойчивей стратификация ПГСА, т. е. чем больше этот градиент, тем легче возникают конвекционные движения в этом слое атмосферы. Это в свою очередь должно привести к увеличению кинетической энергии газового потока. Так как, согласно утверждению Байрама, существование конвекционного потока определяется соотношением энергий ветра и пожара, взаимодействующих под прямым углом друг к другу, то изменение P_f или P_w должно влиять на величину угла наклона конвекционного потока.

Наблюдения за параметрами конвекционных потоков при различных интенсивностях источника тепла, скоростях ветра и состояниях атмосферы проводили на моделях пожаров на специальном полигоне и на естественных пожарах в лесу.

Полигон (рис. 4) представлял собой вырубку в лесу, на которой выделена площадка с горизонтальной поверхностью в виде полосы 110×3 м, длинной стороной расположенной поперек направления господствующего ветра. Площадка служила основанием для установки ванн с дизельным топливом.

С правого фланга, по направлению господствующего ветра, на расстоянии 100 м от полосы находились пункт шаропилотных наблюдений, представляющий собой ровную площадку для установки теодолита, и траншеи с водородными баллонами для наполнения оболочек шаров-зондов.

С наветренной стороны полосы на расстоянии 40 м на высоте 2 м устанавливали регистратор скорости ветра — анеморумбометр М-47. На расстоянии 1100 м от полигона на пожарной наблюдательной вышке был расположен пункт наблюдения за параметрами конвекционных потоков. Интенсивность горения на установке измеряли посредством расчета по количеству горящего, сгорающего в единицу времени, с учетом потерь тепла на радиацию. Учитывали также и химический недожог, который определяли по данным П. Т. Демидова (1961). Площадь поверхности горячей жидкости одной ванны была равна $0,71 \text{ м}^2$.

Ванны в зависимости от желаемой интенсивности имитируемой кромки пожара устанавливали в один или более рядов.

Скорость ветра на высоте наблюдений за параметрами газового потока определяли с помощью шаропилотных наблюдений по методике Гидрометеослужбы СССР. Вертикальный температурный градиент ПГСА определяли по данным аэрзондирования.

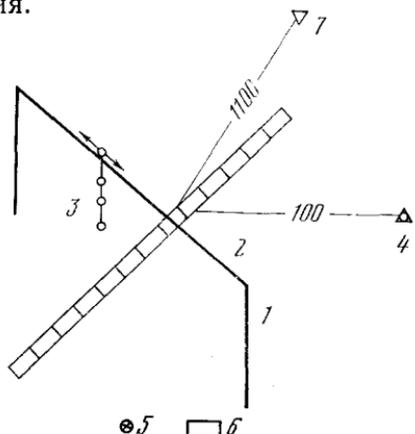


Рис. 4. Схема полигона с приборами для определения скорости конвекционного потока.

1, 2 — мачты и трос для подвешивания приборов; 3 — датчики скорости потока; 4 — пункт шаропилотных наблюдений; 5 — регистратор скорости ветра; 6 — приемник для регистрации сигналов датчиков скорости потока; 7 — пункт теодолитных наблюдений за параметрами потока

При проведении опытов на лесных пожарах интенсивность горения определяли путем расчета по количеству горючего, сгорающего в единицу времени, с учетом тепла, пошедшего на нагревание и испарение воды и на радиационное излучение; учитывали механический и химический недожог. Измерение скорости ветра, углов наклона конвекционных потоков и вертикального температурного градиента ПГСА проводили так же, как и на полигоне.

Характеристика опытных участков, погодных условий во время проведения опытов и основных параметров кромки пожаров приведена в табл. 2, 3, 4.

В табл. 5 показаны данные о величине угла наклона конвекционного потока при различных состояниях атмосферы. Критерием состояния атмосферы был вертикальный температурный градиент ПГСА (β). При $\beta < 1$ ПГСА находится в устойчивом состоянии, при $\beta = 1$ — в нейтральном и при $\beta > 1$ — в неустойчивом (Дюбюк, 1946).

В первой серии опытов при равных интенсивностях горения (4,7 тыс. ккал/м·мин) и при равных скоростях ветра (0,5—0,6 м/сек) вертикальный температурный градиент изменялся от 0,5 до 1,5. Однако величина угла наклона конвекционного потока изменялась лишь в пределах ошибки. То же мы наблюдаем во II и III сериях опытов при других равных интенсивностях и скоростях ветра.

Такая же картина наблюдается и в опытах при горении лесного горючего материала (серии опытов IV—V).

Характеристика опытных участков

Номер опыта	Площадь участка, га	Тип леса	Состав бывшего древостоя	Подрост	Подлесок	Травяно-кустарничковый ярус	Усохшие стволы, %		Запас сухостоя, м ³
							кедр	ель	
1	4,0	Шелкопрядник на месте бывшего кедровника травяно-болотного	7К3Е+Б	Береза	Ива, редкий	Вейник, осоки	100	100	140
2	0,25	Гарь на месте бывшего кедровника травяно-болотного	6К4Е	—	—	То же	100	100	140
3	0,25	Гарь на месте бывшего кедровника травяно-болотного	6К4Е	—	—	»	100	100	140
4	35,0	Шелкопрядник на месте бывшего кедровника травяно-болотного	7К3Еед.Б	—	—	»	100	100	160
5	0,8	Гарь в шелкопряднике на месте бывшего кедровника травяно-болотного	5К5Е+Б	Береза	Ива, редкий	»	100	100	60

Таблица 3

Характеристика метеорологических условий во время проведения опытов

Номер опыта	Время начала опыта		Температура воздуха, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость ветра, м/сек	Атмосферное давление, мбар	Вертикальный градиент температуры, град/100 м
	Конец опыта						
1	16 час 20 мин		27,5	26	0,4	1026	1,0
	16 час 55 мин						
2	16 час 05 мин		26,0	35	0,5	1010	1,1
	16 час 25 мин						
3	16 час 20 мин		29,8	39	0,5	1008	0,8
	16 час 40 мин						
4	14 час 45 мин		26,1	45	1,4	987	1,5
	15 час 25 мин						
5	15 час 00 мин		17,7	43	1,0	986	0,9
	15 час 20 мин						

Следовательно, как в опытах при сжигании нефтепродуктов, так и в опытах, проведенных при сгорании лесного горючего материала, величина угла наклона конвекционного потока над источником тепла не зависела от состояния ПГСА. При различных состояниях атмосферы величина этого угла в опытах

Таблица 4

Основные параметры кромки опытных пожаров

Номер опыта	Длина, м	Глубина, м	Скорость продвижения пламени, м/мин	Высота пламени, м	Интенсивность пожара, тыс·ккал/м·мин	Высота конвекционного потока, м
1	420	2,5±0,2	1,5±0,1	1,2±0,1	6,5±0,3	1460±30,0
2	50	0,5±0,1	0,6±0,1	0,6±0,1	1,5±0,2	110±5,0
3	59	0,6±0,1	0,6±0,1	0,6±0,1	1,6±0,2	120±5,0
4	2000	0,7±0,1	0,7±0,1	0,6±0,1	1,6±0,2	360±10,0
5	70	0,8±0,1	0,6±0,1	0,8±0,1	1,7±0,2	130±5,0

Таблица 5

Угол наклона конвекционного потока к горизонту при различном состоянии пограничного слоя атмосферы

Серия опыта	Номер опыта	Интенсивность источника тепла, тыс·ккал/м·мин	Скорость ветра, м/сек	Вертикальный температурный градиент β, град/100 м	Угол наклона конвекционного потока, град.
Дизельное топливо					
I	1	4,7	0,5	0,5<1	89±0,8
	2	4,7	0,5	0,5<1	88±0,7
	3	4,4	0,5	0,8<1	89±0,5
	4	4,7	0,5	1,2>1	89±0,7
	5	4,7	0,6	1,2>1	87±0,9
	6	4,7	0,6	1,2>1	88±0,8
	7	4,7	0,5	1,5>1	88±1,0
II	8	4,7	1,2	0,6<1	68±1,8
	9	4,7	1,3	1,1>1	65±1,9
III	10	3,0	0,5	0,8<1	89±0,9
	11	3,0	0,6	1,2>1	87±0,9
Лесное горючее					
IV	12	1,6	0,5	0,8<1	87±0,5
	13	1,5	0,5	1,1>1	88±0,0
V	14	1,7	1,0	0,9<1	78±2,4
	15	1,6	1,1	1,5>1	73±2,2

с равной интенсивностью горения и равной скоростью ветра варьируется в пределах ошибки.

Очевидно, что небольшая добавочная энергия фоновых восходящих потоков воздуха, дополняющая кинетическую энергию пожара, намного меньше кинетической энергии ветрового потока, и в силу этого она не в состоянии повлиять на изменение угла наклона потока на рассматриваемой высоте.

Интенсивность пожара, достаточная для создания конвекционного потока при ветре различной скорости

Скорость ветра, м/сек	$P_w = P_f$ кгм/сек·м	Интенсивность пожара, ккал/м·мин	Скорость ветра, м/сек	$P_w = P_f$ кгм/сек·м	Интенсивность пожара, ккал/м·мин
0,0—0,5	0,008	30	3,0	1,65	6 237
1,0	0,06	226	3,5	2,58	9 734
1,5	0,20	754	4,0	3,80	14 742
2,0	0,49	1852	4,5	4,97	18 751
2,5	0,96	3568	5,0	7,65	28 971

Таким образом, результаты наших опытов на полигоне и в лесу подтверждают выводы Н. И. Вульфсона и Л. Н. Гутмана (1965) о том, что «вертикальная неустойчивость атмосферы не влияет на параметры конвекционных потоков, образующихся над метеотроном».

Для установления возможности определения угла наклона конвекционного потока в зависимости от интенсивности пожара и скорости ветра необходимо было провести опыты при различных соотношениях взаимодействующих энергий. В опытах это соотношение изменялось за счет варьирования энергией пожара, так как скорость ветра — неуправляемый фактор. С целью быстрого определения величины соотношения мы заранее рассчитали значения P_f и P_w для различных интенсивностей пожара и скоростей ветра (табл. 6).

Если утверждение Байрама о том, что для существования конвекционного потока пожара необходимо и достаточно, чтобы $P_f/P_w \geq 1$, верно, то по табл. 6 легко определить, какова же должна быть интенсивность горения для создания конвекционного потока при данной скорости ветра.

Для выяснения влияния соотношений двух энергий на существование конвекционного потока пожара было проведено 9 серий опытов. Каждая серия состояла из 5 опытов и делалась при различных скоростях ветра (табл. 7). С увеличением отношения P_f/P_w вертикальная составляющая конвекционного потока увеличивается.

В том случае, когда это значение во много раз больше единицы (серии 8 и 9), конвекционный поток направлен строго вертикально, т. е. под прямым углом к горизонтальной поверхности земли. Когда же это отношение меньше единицы (серии 1, 2 и 3), вертикальная составляющая его перемещения выражена довольно слабо, и поток продуктов сгорания стелется по земле.

Эти данные подтверждают вывод Байрама о том, что существование конвекционного потока лесного пожара определяется соотношением энергии пожара и энергии ветра. Однако вопреки ожиданию оказалось, что при величине отношения P_f/P_w , равном

Угол наклона конвекционного потока пожара при различной интенсивности горения и скорости ветра у поверхности Земли

Серия опытов	Интенсивность пожара, тыс.-ккал м·мин	Скорость ветра на высоте 12 м, м/сек	Высота точки перегиба, м	P_t	P_w	P_t/P_w	Наклон газового потока к горизонту, град.
1	9,0	5,0	10	2,21	7,65	0,29	$10 \pm 1,8$
2	3,0	3,0	8	0,80	1,65	0,49	$16 \pm 2,0$
3	3,0	2,8	10	0,89	1,32	0,61	$21 \pm 2,1$
4	3,0	2,4	10	0,80	0,80	1,00	$30 \pm 2,1$
5	6,0	2,9	10	1,53	1,47	1,07	$31 \pm 1,8$
6	6,0	2,6	15	1,53	1,14	1,33	$38 \pm 1,9$
7	6,0	2,5	15	1,53	0,94	1,63	$48 \pm 1,9$
Опыты в шелкопряднике							
8	1,7	1,0	30	0,42	0,06	7,00	$78 \pm 2,4$
9	6,5	0,5	—	1,75	0,033	219,0	$90 \pm 0,0$

1, угол направления потока продуктов сгорания не равен 40° — 50° ; в этом случае он составляет лишь 30° .

Согласно данным проведенных опытов, продукты сгорания перемещаются под углом к горизонту, близким к 45° , при величине отношения $P_t/P_w = 1,5$ — $1,7$ (6 и 7 серии опытов). Такое несоответствие закономерности, установленной Байрамом, объясняется, очевидно, тем, что основание конвекционного потока пожара, естественно, должно иметь температуру более высокую, чем температура потока на больших высотах. Вследствие этого плотность потока у его основания будет меньше, чем на большой высоте. Так как с увеличением плотности потока увеличивается и его энергия, это не может не отразиться на величине соотношения энергий ветра и пожара.

Приведенные в табл. 8 результаты свидетельствуют о преобладающем влиянии ветра на существование конвекционного потока пожара. Можно видеть, что высота конвекционных потоков в большой степени зависит от скорости ветра. Чем больше скорость ветра, тем сильнее наклоняется конвекционный поток. В опытах № 2, 3 и 4 конвекционные потоки имели по 2 точки перегиба: первую у поверхности земли и вторую на той высоте, где ветер увеличивал свою скорость. Это также служит подтверждением того, что существование конвекционного потока пожара определяется соотношением энергий P_t и P_w .

В результате проведенных опытов установлено следующее:
1. Определяющими факторами формирования конвекционного потока пожара являются интенсивность горения и скорость ветра над пламенем пожара.

Угол наклона конвекционного потока при изменении скорости ветра с высотой

Номер опыта	Общая высота потока, м	Наклон потока, град.		Скорость ветра, м/сек на высоте, м
		на высоте, м		
1	60	20/3		2,5/2; 2,9/56; 5,2/113
2	432	85/2; 30/350		0,5/2; 0,5/30; 0,5/61; 0,9/122; 0,8/183; 1,1/244; 0,8/305; 3,6/427
3	368	85/2; 30/330		0,6/2; 0,6/25; 0,6/50; 0,7/100; 0,6/150; 0,7/250; 0,9/300; 3,5/400; 5,4/500
4	347	85/2; 50/20		0,4/2; 1,0/20; 2,2/39; 2,6/78; 1,0/156; 0,8/234; 0,7/312; 0,8/390
5	378	70/2		1,1/2; 1,2/39; 1,4/78; 1,9/156; 1,0/234; 0,8/312; 0,4/390; 0,3/468
6	72	25/2		2,8/2; 2,8/36; 1,0/72; 0,8/144; 0,7/216; 0,6/288
7	366	85/2		0,2/2; 0,4/20; 0,4/41; 0,7/82; 0,6/164; 0,7/246
8	40	15/2		5,0/2
9	72	50/2; 20/5		2,8/2; 3,7/41; 5,3/83; 6,0/166
10	440	85/2		1,1/2; 1,2/39; 1,4/78; 1,9/156; 1,0/234; 0,8/312; 0,4/390
11	466	85/2		1,3/2; 2,0/20; 2,0/39; 2,0/78; 1,0/156; 0,8/234; 0,7/312; 0,4/390; 0,6/68; 1,0/546

Примечания: 1) в опытах 1—7 длина кромки 80 м; ширина кромки 0,57 м; интенсивность горения 3,0 тыс. ккал/м·мин; 2) в опытах 8—11 длина кромки 40 м; ширина кромки 1,82 м; интенсивность горения 9,0 тыс. ккал/м·мин.

2. Утверждение Байрама, что отношение P_f/P_w является определяющим для формирования конвекционного потока лесного пожара, на небольших высотах (до 200—300 м) справедливо не только при нейтрально-устойчивом состоянии ПГСА, но при всех трех возможных его состояниях.

3. При отношении P_f/P_w , равном единице, конвекционный поток лесного пожара наклоняется к поверхности земли не на 45°, а на 30°, что объясняется, по-видимому, меньшей плотностью нагретых газов непосредственно над пожаром.

4. Конвекционный поток лесного пожара может сформироваться лишь при условии, когда величина P_f/P_w не менее единицы.

Факторы начальной скорости потока

Известно, что хотя в сформировавшемся конвекционном потоке температура резко понижается с высотой вследствие перемешивания его с холодным окружающим воздухом (Кантримен, 1964; Вульфсон, Гутман, 1965; Валендик, Матвеев, 1972), скорость его с увеличением высоты вначале все же возрастает и лишь затем уменьшается (Пристли, 1964; Коновалов, 1973). Из этого следует, что возможность увлечения частиц горючего материала

вверх до высоты уменьшения скорости газового потока пожара будет определяться величиной скорости потока на той высоте, где в него поступают горящие частицы. Так как поступление горящих частиц в конвекционный поток лесного пожара возможно, начиная от верхней границы пламени и кончая высотой древостоя, для определения возможности конвекционного подъема горючего необходимо выяснить, каков же вертикальный градиент скорости потока от его основания до высоты древостоя.

Для выяснения поставленного вопроса были проведены опыты на макромоделях пожаров. При этом на середине полосы из ванн с горючим были установлены две мачты высотой по 19 м. Мачты устанавливали на расстоянии 10 м от полосы ванн по линии, перпендикулярной к длинной стороне полосы, т. е. по линии направления ветра. Между мачтами был натянут трос. На трос с помощью системы блоков подвешивали датчики для определения скорости потока. Система блоков позволяла перемещать приборы между мачтами в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Для измерения скорости использовали датчики от метеорологических радиозондов с смонтированными в них контактными анемометрами, защищенными от влияния горизонтальных потоков кожухами из белой жести. Порядок проведения опытов был следующий.

Ванны, установленные для обеспечения заданной интенсивности горения, наполняли горючим по 10 л каждую. Приборы подвешивали на высоте 5, 10 и 15 м над предполагаемым уровнем вершины пламени. После этого зажигали горючее одновременно во всех ваннах. Показания приборов регистрировали, когда горение охватывало в ваннах всю поверхность горючего. Регистрацию сигналов от контактных анемометров производили при помощи специально смонтированного приемника. Вначале провели шесть предварительных опытов для того, чтобы наиболее рационально разместить приборы. Основные опыты для тщательного изучения закономерности в распределении скорости газового потока были проведены в виде шести серий с разной интенсивностью горения в каждой при длине горячей кромки 20 м (табл. 9). Каждая серия состояла из пяти идентичных опытов (повторностей). Предварительно проведенные опыты показали, что скорости потока на указанных высотах различаются между собой несущественно. Это различие находится в пределах точности измерения. Отличия скоростей газового потока во всех точках, где производились измерения, несущественны, хотя довольно ясно выражена тенденция увеличения скорости потока с высотой, что вполне объяснимо с точки зрения физики. Следовательно, для определения возможности подъема горящих частиц конвекционным потоком достаточно знать скорость потока на высоте крон деревьев.

Так как конвекционный подъем частиц горючего определяется скоростью потока на высоте древостоя, необходимо было опре-

Скорость потока на различных высотах над пожаром

Номер опыта	Интенсивность горения, тыс. ккал/м·мин	Длина горячей кромки, м	Скорость газового потока (м/сек) на высоте (м)		
			5	10	15
Предварительные опыты					
1	5,3	40	2,8	3,1	3,0
2	5,3	8	2,8	3,0	3,2
3	10,7	20	3,3	3,7	3,8
4	10,7	8	3,1	3,5	3,6
5	16,0	20	3,8	4,0	3,9
6	16,0	20	3,9	4,0	4,0
Основные опыты					
7	25,6	20	4,1±0,12	4,3±0,14	4,3±0,12
8	25,6	20	4,0±0,13	4,2±0,12	4,4±0,14
9	25,6	20	4,2±0,13	4,2±0,14	4,3±0,11
10	8,5	20	3,1±0,11	3,2±0,10	3,2±0,08
11	8,5	20	3,0±0,07	3,0±0,09	3,3±0,08
12	8,5	20	3,1±0,12	3,1±0,07	3,2±0,07

делить, какие же факторы и как влияют на этот интересующий нас параметр. По результатам предварительных опытов, проведенных в пожароопасный сезон 1971 г. (Валендик, Матвеев, 1974), нельзя было ответить на этот вопрос. Поэтому мы поставили специальные опыты.

Мы воспользовались специальной методикой (Адлер и др., 1971). В соответствии с требованиями этой методики, мы выбрали те факторы пожара и атмосферы, которые, по нашему мнению, могут оказывать влияние на скорость и температуру газового потока. Так как конвекционный поток пожара является следствием разности температур горячей кромки и окружающей территории, то одним из факторов, несомненно оказывающим влияние на интересующие нас параметры, будет интенсивность горения на кромке. В силу того что суммарное количество тепла, выделяющееся на пожаре, пропорционально длине его кромки, последняя также должна являться фактором, влияющим на скорость потока.

Значительное влияние должен оказывать и ветер, усиливающий перемешивание газового потока с чистым воздухом. Так как подъем продуктов сгорания обусловлен разностью температур потока и окружающего воздуха, в исследование необходимо было включить и такой фактор, как температура воздуха. На том же основании необходимо было исследовать и возможное влияние вертикального температурного градиента ПГСА и влажность воздуха.

Согласно требованиям, предъявляемым к планированию эксперимента, факторы должны быть независимы друг от друга и управляемы. Такие факторы, как влажность воздуха, скорость ветра, температура воздуха и вертикальный температурный градиент ПГСА, неуправляемы и отчасти взаимозависимы. Для того чтобы провести полный факторный эксперимент с участием этих факторов, проводить опыты было необходимо в то время, когда все изучаемые факторы будут иметь требуемые значения. Однако в связи с тем, что при проведении полного факторного эксперимента, кроме выполнения указанных требований, обязательно еще и рандомизация опытов, практически невозможно осуществить полный факторный эксперимент (ПФЭ) одновременно с участием всех перечисленных факторов. Поэтому мы проводили опыты в две серии.

В первой серии опытов изучали влияние интенсивности горения, длины горящей кромки, скорости ветра и относительной влажности воздуха. Во второй серии опытов прослеживали влияние температуры воздуха и вертикального температурного градиента ПГСА на скорость конвекционного потока пожара на высоте древостоя.

Каждый из избранных факторов в первой серии опытов варьировал на двух уровнях, обозначаемых знаками + и — (табл. 10). Согласно матрице планирования ПФЭ типа $Y=2^4$ было проведено 16 опытов с пятикратной повторностью наблюдений (табл. 11). Результаты отдельных наблюдений в табл. 11 обозначены как $Y_1—Y_5$, а средние значения параметра оптимизации — Y .

Дисперсию коэффициентов регрессии, необходимую для выявления значащих факторов, мы рассчитывали по формуле:

$$S^2(b_j) = \frac{S^2(Y)}{N}, \quad (3)$$

где $S^2(Y)$ — дисперсия параметра оптимизации; N — число различных опытов (число строк матрицы).

А доверительный интервал определен при этом по формуле:

$$\Delta b_j = t \cdot S(b_j), \quad (4)$$

где t — критерий Стьюдента.

Значение доверительного интервала $\Delta b_j=0,11$.

Значение коэффициентов регрессии: для (интенсивности горения) $b_1=0,39$, для (длины горящей кромки) $b_2=-0,01$, для (скорости ветра) $b_3=0,01$, для (относительной влажности воздуха) $b_4=-0,03$.

Известно, что коэффициент регрессии признается значимым, если его абсолютная величина больше доверительного интервала (Адлер и др., 1971). Из всех четырех участвующих в опыте факторов существенное влияние на скорость конвекционного потока пожара оказывает лишь интенсивность пожара. Влияние же остальных факторов (длины горящей кромки, скорости ветра и

Уровни факторов и интервалы варьирования

Фактор	Обозначение факторов	Кодированный уровень фактора			Интервал варьирования
		-1	0	+1	
Интенсивность горения, тыс·ккал/м·мин	x_1	8,5	12,75	17,0	4,25
Длина горящей кромки, м	x_2	20	60	100	40
Скорость ветра, м/сек	x_3	0,5	1,5	2,5	1,0
Относительная влажность воздуха, %	x_4	35	67	99	32

Таблица 11

Величины коэффициентов регрессии для различных факторов

Номер опыта	Буквенные обозначения факторов и их сочетаний	Значения параметра в оптимизации					
		y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y
1	(1)	3,1	3,0	3,2	3,8	3,0	3,1
2	<i>a</i>	3,6	4,1	3,9	3,7	4,1	3,9
3	<i>b</i>	2,7	3,4	3,1	3,6	3,0	3,1
4	<i>ab</i>	4,1	3,4	3,6	4,1	3,8	3,8
5	<i>c</i>	3,0	2,7	3,2	3,0	3,0	3,0
6	<i>ac</i>	3,7	3,9	4,1	3,6	4,1	3,9
7	<i>bc</i>	2,7	3,2	3,0	3,0	3,2	3,0
8	<i>abc</i>	4,1	3,7	3,6	4,1	3,9	3,9
9	<i>d</i>	3,2	3,0	3,1	2,7	3,4	3,1
10	<i>ad</i>	3,6	4,1	3,8	3,7	3,6	3,8
11	<i>bd</i>	3,2	2,7	3,4	2,7	3,1	3,0
12	<i>abd</i>	3,6	3,7	3,4	3,8	3,5	3,6
13	<i>cd</i>	2,7	3,2	2,7	3,0	3,4	3,0
14	<i>acd</i>	3,7	3,7	4,1	3,8	3,7	3,8
15	<i>bcd</i>	3,1	3,0	2,7	3,4	3,2	3,1
16	<i>abcd</i>	3,8	4,1	3,9	3,7	4,1	3,9

относительной влажности воздуха) на высоте древостоев не прослеживается. Несущественность влияния таких, казалось бы, действенных факторов, как ветер и длина кромки, по-видимому, можно объяснить тем, что на таком коротком участке пути газового потока просто не успевает сказаться охлаждающее влияние ветра и возможное возрастание энергии газового потока при увеличении длины кромки пожара.

Вторая серия опытов, предусматривающая выявление влияния температуры окружающего воздуха и вертикального температурного градиента ПГСА на скорость потока в пределах высо-

ты полога древостоя, была проведена по обычной методике, т. е. путем изменений значения исследуемого фактора при прочих равных условиях.

Влияние температуры воздуха мы попытались проследить при постоянной интенсивности горения в 8,5 тыс. ккал/м·мин при длине горящей полосы 20 м и вертикальном температурном градиенте атмосферы 1,1 град на 100 м высоты. При этих условиях были получены следующие результаты:

Номер опыта	1	2	3	4	5	6
Температура воздуха, °С	27,4	27,6	28,1	12,4	12,5	12,7
Скорость потока, м/сек	3,2±0,08	3,3±0,08	3,2±0,07	3,1±0,10	3,1±0,07	3,3±0,09

Из этих данных можно заключить, что температура атмосферного воздуха в описанных реальных условиях не оказывает заметного влияния на скорость конвекционного потока в рассматриваемом интервале высот.

Аналогично было прослежено влияние вертикального температурного градиента атмосферы на скорость потока. Опыты были проведены при интенсивности горения в 25,6 тыс. ккал/м·мин, при длине кромки пожара 20 м. В таких условиях были получены следующие результаты:

Номер опыта	1	2	3	4
Вертикальный температурный градиент, град/100 м	0,6	0,6	1,4	1,4
Скорость потока, м/сек	5,3±0,12	5,4±0,17	5,4±0,10	5,2±0,15

По этим данным можно заключить, что и вертикальный температурный градиент в небольшом интервале высот не оказывает заметного влияния на скорость конвекционного потока над пожаром.

Таким образом, в результате проведенных опытов выяснено, что из всех выше указанных факторов основным и единственно влияющим на изменение скорости газового потока в интервале высот от основания потока до высоты древостоя является интенсивность горения на кромке пожара. С увеличением интенсивности горения увеличивается и скорость конвекции.

Так как возможность конвекционного переноса горючего определяется в первую очередь скоростью конвекционного потока на высоте древостоя, всецело обусловленной интенсивностью горения, необходимо было выявить характер связи между этими параметрами.

Для этого мы провели опыты на лесных пожарах. В этих опытах при различной интенсивности определяли скорости конвекционных потоков. Опыты проводили следующим образом. Перед кромкой фронта лесного пожара по линии его продвижения на пяти сухостойных деревьях, стоявших друг от друга на 10—15 м, на высоте 15 м перпендикулярно стволу укрепляли анемо-

метры Фусса. Анемометры были защищены от горизонтальных потоков кожухами из белой жести. Их включали, когда они охватывались дымовым потоком и выключали, когда поток проходил их. Включение и выключение анемометров производили при помощи мягкой проволоки длиной 30—35 м и только в отдельных случаях длина ее достигала 50 м.

Определение скоростей по каждому анемометру производили за время прохождения горячей кромки, которое колебалось от 1 до 2,5 мин. Интенсивность пожара определяли путем учета количества горючего, сгоревшего в единицу времени с единицы длины кромки пожара (табл. 12).

Таблица 12

Зависимость скорости конвекционного потока лесного пожара от интенсивности горения

Номер опыта	Интенсивность кромки фронта пожара, тыс. ккал/м·мин	Скорость конвекционного потока, м/сек	Номер опыта	Интенсивность кромки фронта пожара, тыс. ккал/м·мин	Скорость конвекционного потока, м/сек
1	36,0	4,1±0,06	23	5,7	2,2±0,06
2	55,5	5,1±0,11	24	2,7	1,8±0,06
3	38,0	4,4±0,08	25	3,2	1,9±0,06
4	82,5	5,7±0,08	26	52,5	4,8±0,11
5	71,6	5,2±0,12	27	90,0	5,6±0,14
6	79,0	5,6±0,09	28	102,0	5,8±0,14
7	102,5	6,0±0,12	29	65,6	5,1±0,13
8	95,6	5,6±0,14	30	38,0	4,1±0,09
9	99,5	5,7±0,15	31	10,0	2,9±0,09
10	69,5	5,1±0,11	32	8,5	2,5±0,09
11	35,0	4,2±0,10	33	7,5	2,4±0,08
12	18,0	3,3±0,09	34	94,4	6,0±0,13
13	16,0	3,4±0,11	35	86,6	5,6±0,16
14	7,5	2,4±0,05	36	100,0	6,2±0,14
15	7,0	2,6±0,10	37	40,0	4,3±0,09
16	4,8	2,3±0,08	38	91,6	5,9±0,08
17	5,6	2,3±0,10	39	14,0	3,0±0,07
18	2,8	1,9±0,06	40	6,0	2,2±0,08
19	80,0	5,6±0,15	41	12,4	3,1±0,08
20	3,2	2,0±0,05	42	10,0	2,7±0,08
21	2,9	1,8±0,06	43	16,0	3,3±0,07
22	3,3	1,8±0,08			

При увеличении интенсивности пожара от 2,7 до 100 тыс. ккал/м·мин скорость газового потока пожара возрастает от 1,8 до 6,1 м/сек. При увеличении интенсивности пожара в 2 раза скорость конвекции повышается на 15—30%.

Зависимость скорости конвекции над пожаром от его интенсивности может быть представлена в логарифмических координатах.

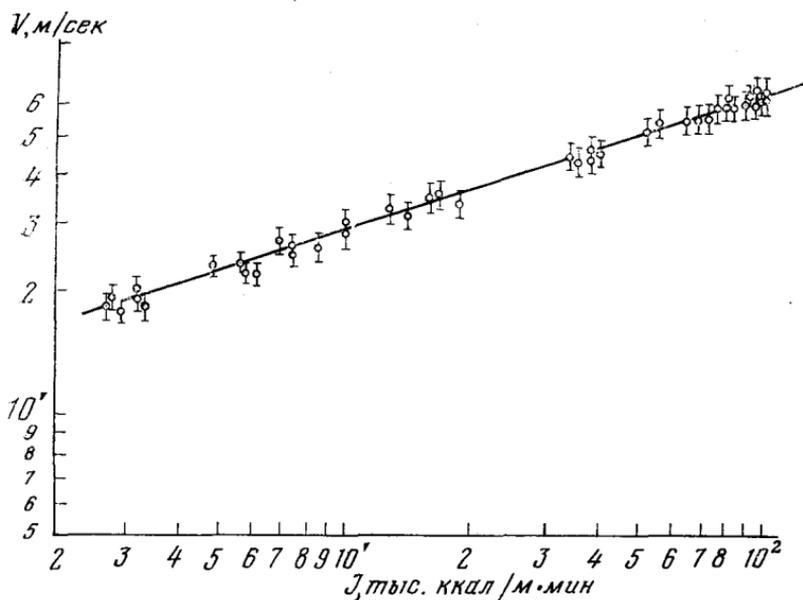


Рис. 5. Зависимость скорости газового потока пожара от интенсивного горения

натах на графике в виде прямой (рис. 5). Непосредственно она описывается степенной функцией:

$$Y = 1,30 \cdot X^{0,334}. \quad (5)$$

Используя приведенное уравнение, по заданной интенсивности пожара легко можно рассчитать скорость конвекционного потока над ним.

Изменение скорости потока с высотой

Как же происходит изменение скорости конвекционного потока на высотах, превышающих высоту древостоя? Из физики явления следует, что скорость над источником тепла должна повышаться до некоторой высоты. Это подтверждено исследованиями многих авторов (Вульфсон, Гутман, 1965; Rouse e. a., 1952; Вугат, 1954). Но закономерностей, характеризующих изменение скорости конвекции над реальными пожарами, пока еще не установлено.

Для того чтобы знать, до какой высоты могут подняться частицы горючего, попадающие в конвекционный поток, необходимо выявить, как же изменяется скорость конвекционных потоков над лесными пожарами с высотой по сравнению с их скоростью на высоте древостоя.

Непосредственные замеры параметров конвекционных потоков крупных пожаров с летательных аппаратов представляют

большие трудности, а нередко и опасность для жизни исследователей. Так, например, Фаур (Faure, 1961) пишет, что при пожаре, имевшем место в Японии в 1945 г., скорость восходящих потоков была настолько значительной, что некоторые самолеты, летящие на высоте 1800 м над пожаром, были опрокинуты. На опасность полетов сквозь конвекционные потоки пожаров указывают многие авторы: Э. Н. Валендик и др. (1973), Р. Г. Тэйлор и др. (Taylor e. a., 1971), Д. А. Коновалов (1973). Поэтому данные о скоростях, замеренных непосредственно при пролете сквозь дымовые потоки, являются уникальными, несистематическими, и могут служить лишь для общего представления о скоростях, существующих в конвекционных потоках над пожарами.

Определение скоростей потоков косвенными способами, как правило, ненадежны. Так, например, киносъёмка клубов дыма и летящих в них горящих углей, использованная для этих целей Веренкампом, может дать недостоверные значения скорости, так как неизвестны масса и объем углей, определяющие скорость проскальзывания их в газовом потоке. Фотографируя клубы дыма, Веренкамп мог судить только лишь о скоростях на периферии газового потока, которые могут отличаться от скорости в центральной части.

В связи со значительными трудностями, имеющими место при определении различных параметров конвекционных потоков, исследователи настойчиво ищут возможности определения этих параметров путем моделирования естественных пожаров. Имеются работы, проведенные в этом направлении (Faur, 1961; Bao, Brzustowski, 1969; Byram, Nelson, 1970; Lee, Hellman, 1969).

Как известно, физической моделью какого-либо процесса (образца) является другой процесс той же природы, все характеристики которого находятся между собой в тех же соотношениях, что и в образце, а одноименные характеристики образца и модели отличаются друг от друга на постоянный множитель (Кутателадзе и др., 1966). Основное правило моделирования, сформулированное М. В. Кирпичевым, гласит, что подобны те системы, условия однозначности которых равны, а критерии, составленные из условий однозначности, численно одинаковы.

Следовательно, для полного подобия модели образцу необходимо выполнить следующие требования: а) процесс, воспроизводимый в модели, относится к тому же классу физических явлений, что и процесс, протекающий в образце, т. е. что оба процесса характеризуются одинаковыми физическими величинами и описываются одним и тем же уравнением; б) геометрически модель подобна образцу; т. е. что безразмерные краевые условия в образце и модели одинаковы качественно и численно; в) безразмерные аргументы процесса, определяющие критерии подобия в образце и модели, имеют одинаковые численные значения. При выполнении перечисленных условий моделирование является прямым и полным.

Возможно также приближенное моделирование и моделирование по аналогии. При приближенном моделировании в модели воспроизводится тот же физический процесс, что и в образце (или наиболее существенная часть этого процесса) при частичном нарушении тех или иных из перечисленных выше условий полного подобия. При моделировании по аналогии в модели воспроизводится процесс другой физической природы, чем протекающий в образце, но описываемый в отношении своих параметров уравнениями того же типа, что и уравнения моделируемого процесса.

Значительных успехов в области приближенного моделирования добился Байрам, разработавший в 1966 г. масштабные законы моделирования пожаров. Его моделирование основывается на принципах частичного масштабирования в пренебрежении молекулярными параметрами, например числом Грасгофа (Lee, 1972). В результате проведенных исследований им установлено, что одним из основных требований подобия модели пожару является наличие их геометрического подобия. Условно принимая основание пожара за круг и используя электромоделю (электронагревательные элементы) такой формы, Байрам нашел, что в этом случае параметры модели и пожара относятся между собой как:

$$\left(\frac{D_m}{D_f}\right)^{1/2} = \left(\frac{Z_m}{Z_f}\right)^{1/2} = \frac{W_m}{W_f}, \quad (6)$$

где D — диаметр модели и пожара; Z — высота измерения над моделью и пожаром; W — вертикальная скорость в конвекционном потоке; m и f — обозначение модели и пожара соответственно.

Определяющим масштабным фактором в этом уравнении является отношение $\left(\frac{D_m}{D_f}\right)^{1/2}$.

Байрам доказывал, что при выполнении подобия модели и пожара скорости конвекции на одинаковых относительных высотах связаны между собой одним и тем же, характерным для данных модели и пожара, соотношением, т. е. скорость конвекции и над моделью, и над пожаром изменяется одинаково.

Байрам приводит пример, когда при диаметрах модели и пожара соответственно 12,4 и 3120 м и при высоте измерения над моделью 0,15 м и над пожаром 39 м скорость конвекции равнялась 5,5 м/сек над моделью и 39 м/сек над пожаром.

Действительно

$$\left(\frac{D_m}{D_f}\right)^{1/2} = \left(\frac{Z_m}{Z_f}\right)^{1/2} = \frac{W_m}{W_f} = \left(\frac{12,4}{3120}\right)^{1/2} = \left(\frac{0,15}{39}\right)^{1/2} = \frac{5,5}{88} = \frac{1}{16}. \quad (7)$$

Подобие пожара и модели оказалось выполнимым по его данным до высоты около 2000 м.

Дальнейшие исследования (Parker e. a., 1968; Bugan, Nelson, 1970; Lee, Hellman, 1969) доказали справедливость этих масштабных законов при моделировании естественных пожаров и подтвердили возможность использования электромоделей для этих целей.

Мы попытались использовать возможность моделирования пожаров для выявления характера изменения скорости конвекционных потоков пожара с высотой. В наших исследованиях модели представляли собой тепловые элементы в виде спиралей, окруженных листовым асбестом.

В процессе опытов мы определяли скорости конвекционных потоков на различных высотах над нагретыми тепловыми элементами. Скорости замеряли при помощи анемометра АСО-3, укрепляемого на определенной высоте над нагретой спиралью. Скорость тепловыделения рассчитывали по электрической мощности. Верхней границей конвекционных потоков считали ту высоту, на которой скорость восходящих движений равна фоновой (Priestley, 1959; Коновалов, 1973).

Реальные пожары могут иметь различную интенсивность горения и различную длину кромки. Мы попытались выявить, как изменяются скорости конвекционных потоков на различной высоте над пламенем пожара с изменением его интенсивности и длины кромки, а также до какой высоты может существовать зона активной конвекции. (Под зоной активной конвекции мы понимаем интервал от основания конвекционного потока до той высоты, где исчезает положительное ускорение восходящего движения воздуха.)

Для выявления влияния интенсивности источника тепла на скорость потока на различных высотах замеры скорости производили над моделью с одним и тем же отношением длины кромки к ее ширине и со скоростью тепловыделения, различающейся в 2 раза.

Замеры делали на высотах, равных одной, двум, трем и т. д. длинам источника тепла — спирали. Кроме того, первый замер делали на высоте в 10 раз больше диаметра спирали; его мы условно принимали за высоту пламени пожара; на реальном пожаре высота этого замера определится как равная высоте пламени (табл. 13).

С увеличением интенсивности тепловыделения от 1000 до 2000 дж/м·мин вырастают скорости конвекции, а следовательно, и высота конвекционной зоны. При неизменности геометрической формы источника тепла скорость конвекции над ним изменяется в относительных единицах одинаково даже при различной интенсивности тепловыделения.

Особое внимание привлекает тот факт, что при увеличении интенсивности горения вдвое скорость конвекционного потока на высоте первого замера возрастает на 21%, т. е. прирост скорости, так же как и на реальном пожаре, находится в пределах 15—

Изменение скорости конвекции над электромоделью пожара в зависимости от высоты измерения и интенсивности тепловыделения

Высота измерения скорости потока в длинах спирали	Интенсивность			
	1000 дж/м·мин		2000 дж/м·мин	
	Скорость потока, м/сек	Относительная скорость потока	Скорость потока, м/сек	Относительная скорость потока
10	$0,28 \pm 0,008$	1,00	$0,34 \pm 0,008$	1,00
1	$0,37 \pm 0,010$	1,33	$0,46 \pm 0,008$	1,35
2	$0,44 \pm 0,008$	1,57	$0,52 \pm 0,011$	1,54
3	$0,48 \pm 0,011$	1,72	$0,58 \pm 0,011$	1,70
4	$0,42 \pm 0,007$	1,50	$0,51 \pm 0,009$	1,50
5	$0,37 \pm 0,009$	1,32	$0,46 \pm 0,007$	1,35
6	$0,34 \pm 0,008$	1,21	$0,40 \pm 0,008$	1,19
7	$0,32 \pm 0,007$	1,14	$0,38 \pm 0,009$	1,12

Примечания. 1) длина спирали при интенсивности 1000 дж/м·мин равна 0,5 м и при интенсивности 2000 дж/м·мин равна 0,25 м; 2) отношение ширины источника тепла к его длине 1 : 50.

30%, что подтверждает возможность использования электромоделей для моделирования пожаров.

Для выявления влияния длины кромки пожара на изменение скорости конвекции с высотой мы проводили опыты на моделях с одинаковой интенсивностью выделения тепла с единицы длины, но с различным отношением длины источника тепла к его ширине. Это достигалось изменением длины одного и того же источника тепла и соответствующим изменением величины подаваемого на спираль напряжения. Опыты проведены на моделях с отношениями ширины кромки к длине как 1 : 50, 1 : 25, 1 : 10 (табл. 14).

Анализируя данные табл. 14, прежде всего можно заключить, что они подтверждают высказанное нами ранее утверждение об увеличении высоты потока при возрастании длины кромки. Это происходит вследствие того, что конвекционный поток над кромкой пожара по мере подъема не остается плоским, как у основания, непосредственно над кромкой. Под влиянием подтока окружающего воздуха он приобретает округлую форму в сечении горизонтальной плоскостью. Теплые продукты горения как бы концентрируются, и общая мощность потока увеличивается. Это явление имеет некоторые предельные размеры, над фронтом большей длины образуется ряд независимых потоков.

Из данных табл. 14 можно заключить, что скорость потока увеличивается приблизительно до $\frac{1}{4}$ — $\frac{1}{3}$ его высоты. Это еще раз подтверждает положение Роуза (Rouse e. a., 1952) о том, что зона активной конвекции над источником тепла простирается до высоты не более $\frac{1}{3}$ части всей высоты потока.

Очевидно также, что чем больше отношение ширины источника тепла к его длине, тем большей относительной высоты (выраженной в L) достигает конвекционный поток. Вместе с тем меняется и зависимость скорости конвекции от высоты.

Эти выводы согласуются с экспериментальными данными, полученными Д. А. Коноваловым (1973) с помощью приборов, установленных на самолете, который пролетал над нашими опытными пожарами. Длина кромки фронта на этих пожарах равнялась 60—70 м, а отношение ширины кромки к ее длине было равно 1 : 50. На основании данных, полученных при пролете через конвекционные струи таких пожаров, он утверждает, что увеличение вертикальной скорости в струе в этом случае происходило не более чем до 200 м, в вышележащем слое вертикальная скорость воздуха в струе замедлялась. Над обследованными им очагами пожаров конвекционная струя сливалась с фоном на высоте 500 м.

Если сравнить данные Д. А. Коновалова с данными, полученными нами на модели при $D/L=1 : 50$, то можно увидеть, что между моделью и естественным пожаром наблюдается соответствие. А именно:

1) как для модели, так и для пожара высота конвекции близка к 10-кратной длине кромки;

2) для модели и для пожара характерно увеличение вертикальной скорости конвекции до $1/4$ — $1/3$ высоты конвекционного потока;

3) максимальное значение скорости конвекции в обоих случаях наблюдается на высоте, равной трем длинам модели или кромки пожара.

Таблица 14

Величина отношения скорости конвекции на различных высотах, крагных длине спирали, к скорости конвекции на высоте, равной 10 диаметрам спирали

Высота измерения скорости конвекции в длинах спирали (L)	Отношение ширины источника тепла (D) к его длине (L)			Высота измерения скорости конвекции в длинах спирали (L)	Отношение ширины источника тепла (D) к его длине (L)		
	1:50	1:25	1:10		1:50	1:25	1:10
10	1,00	1,00	1,00	13	—	1,00	1,03
1	1,35	1,23	1,13	15	—	0,96	1,00
3	1,70	1,46	1,35	17	—	0,74	0,96
5	1,35	1,57	1,46	18	—	0,59	—
7	1,12	1,35	1,50	19	—	—	0,92
9	0,96	1,23	1,31	21	—	—	0,76
11	0,74	1,11	1,15	23	—	—	0,59
12	0,62	—	—				

На основании проведенных опытов мы считаем, что конвекционные потоки над отдельными участками кромки пожара можно приближенно рассматривать как геометрические фигуры, по форме близкие к сдавленному однополостному гиперболоиду. В отсутствие ветра высота отдельного потока всегда больше длины участка кромки, над которыми он сформировался. Скорость таких потоков при нейтрально устойчивом состоянии атмосферы возрастает приблизительно до $\frac{1}{4}$ — $\frac{1}{3}$ высоты при условии, что он не будет смят ветром. При состояниях атмосферы, способствующих или же препятствующих развитию восходящих движений воздуха, распределение скоростей в конвекционном потоке может отклоняться от того, которое выявлено нами на моделях. Однако на небольших высотах порядка 200—300 м термическое состояние атмосферы не оказывает ощутимого влияния на параметры конвекционных потоков. На это указывают Н. И. Вульфсон и Л. Н. Гутман (1965). Пристли и Болл (Priestley, Ball, 1955) утверждают, что термическая стратификация атмосферы мало влияет на параметры конвекции на небольших высотах, а далее ее влияние усиливается.

Используя полученные данные об изменении скорости конвекции, приведенные в табл. 14, и зная интенсивность пожара, можно определить скорости конвекционных потоков конкретных лесных пожаров при любой их интенсивности и размерах горящей кромки, объединяемой конвекционным потоком.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КОНВЕКЦИОННОГО ПОТОКА С ПОГРАНИЧНЫМ СЛОЕМ АТМОСФЕРЫ

Пограничным называют слой атмосферы от земной поверхности до высоты 1500 м (в некоторых случаях до 2—3 км), где под влиянием земной поверхности и турбулентного обмена наблюдаются хорошо выраженные суточные изменения метеорологических элементов. В пограничный слой на различную высоту вторгаются конвекционные потоки лесных пожаров. Пожары, где скорость выгорания может достигать нескольких килограммов в минуту с погонного метра кромки, формируют конвекционные колонки, достигающие высоты 1000—1500 м. Очень мощные колонки, простирающиеся в атмосферу на несколько тысяч метров, формируются над пожарами при скорости выгорания до десятков килограммов. Эти пожары американские исследователи называют «трехмерными». К «двухмерным» же они относят пожары со скоростью выгорания менее 1 кг в мин с погонного метра кромки. Над фронтом такого пожара не образуется заметной конвекционной колонки, а лишь невысоко поднимаются пульсирующие клубы дыма. Правда, оценка пожара как «двухмерного» или «трехмерного» весьма условна, так как над очень слабыми пожарами существует, хотя и невысокая, зона активной конвекции.

По нашим предварительным данным, конвекционная колонка лесного пожара, как конвекционный, турбулентный поток, в значительной мере может изменять метеорологическую обстановку в пограничном слое атмосферы и существенно влиять на безопасность полетов при тушении пожаров с воздуха. Проведенные исследования по этому вопросу еще недостаточны для его решения. Очень мало еще наблюдений за развитием лесных пожаров в естественной обстановке. Основной причиной этого являются большие методические и организационные трудности проведения их даже на сравнительно небольших лесных пожарах.

Несмотря на эти трудности, мы провели ряд наземных и воздушных наблюдений за поведением лесных пожаров.

В первую очередь разрабатывалась методика проведения наблюдений в сложной обстановке у лесного пожара и испытание аппаратуры на пригодность ее для исследований в этой области.

Были проведены визуальные наблюдения за общим характером развития пожаров и за формированием конвекционных колонок. Инструментальные наблюдения были проведены за некоторыми параметрами конвекционной колонки, за изменением воздушных потоков и их турбулентностью в зоне пожара, за величиной перегрузок, действующих на самолет в этой зоне. Проведены немногочисленные наблюдения и за возникновением очагов горения за пределами пожара в результате переноса горящего горючего конвекционным потоком пожара.

Наблюдения проводили на созданных специально для этой цели пожарах, на старых гарях, где горючие материалы были представлены травяной ветошью, запасы которой варьировали в пределах от 0,4 до 0,6 кг/м², а также в «шелкопрядниках», где запас сгорающих горючих материалов составлял 5—10 кг/м². В первом случае пожары были слабые, низовые, на площади от 0,2 до 2,0 га.

Поскольку наиболее важной характеристикой пожара является его интенсивность, т. е. количество тепла, выделяющееся на единице длины кромок пожара в минуту (в ккал/м·мин), желательно было сопоставить параметры конвекционной колонки с этой величиной. Однако для определения интенсивности горения, кроме запаса горючих материалов, их калорийности и скорости распространения пожара, необходимо знать еще и общий коэффициент недожога: если механический недожога (остаток горючих материалов) на пожаре, хотя и с большими трудностями, можно определить, то химический недожога пока еще определить не представляется возможным. А он, по предварительным данным, достаточно велик. По мнению Н. П. Курбатского, только унос горючего с дымом может достигать 20% от общего количества тепла, которое может выделиться на пожаре. В связи с этим мы полагаем, что в настоящее время достаточно точно определить действительную интенсивность горения при лесном

пожаре практически невозможно, тем более что в лесу состав горючих материалов, их состояние, структура и размещение по территории сильно варьируют. Поэтому в качестве тепловой характеристики пожара мы приняли скорость выгорания горючих материалов в пламенном режиме в единицу времени с единицы длины кромки пожара, т. е. $v = \omega r$, где ω — количество сгорающего горючего с 1 м^2 (в $\text{кг}/\text{м}^2$) без учета того, что часть несгоревшего горючего претерпела существенное превращение; r — скорость продвижения кромки.

Наблюдения за характером развития пожара проводили по методике лаборатории лесной пирологии Института леса и древесины СО АН СССР. Размеры конвекционной колонки определяли с помощью теодолита и при авиазондировании. Для наблюдений за воздушными потоками у пожара была использована методика шаропилотных наблюдений гидрометеослужбы и методика уравновешенных шаров П. А. Воронцова (1961). Два последних метода приняты нами в связи с тем, что они позволяют вести наблюдения за скоростью и направлением как горизонтальных, так и вертикальных воздушных потоков на различной высоте от поверхности земли и с безопасного расстояния от пожара. Кроме того, они позволяют оценить и степень турбулентности воздушных потоков.

Для наземных измерений температуры в конвекционной колонке были использованы термосопротивления ММТ-1, а для измерения скорости потока применяли модифицированные нами контактные анемометры с защитой от влияния горизонтальных потоков. Показания датчиков регистрировали с помощью модифицированного самописца Н-372 с усилителем и осциллографа Н-700. Датчики устанавливали на металлических мачтах. Были предприняты попытки подъема и ввода датчиков в конвекционную колонку с помощью шаров-зондов из оболочек № 100, наполненных водородом, но безуспешно.

Авиазондирования в зоне пожаров на разных уровнях проведены на самолете АН-2, на котором были установлены: метеорограф А-10, электрометеорограф, вариограф и датчик перегрузок МП-15. Установленная аппаратура позволяла вести наблюдения за температурой, пульсацией температуры, скоростью вертикальных потоков и за вертикальным ускорением. Все наблюдения были проведены в условиях, благоприятных для развития термической неустойчивости в зоне пожаров. Величина вертикального температурного градиента в среднем составляла около 1° на 100 м и колебалась в период опытов от 0,8 до 1,2 град. Визуальные наблюдения за общим характером развития пожаров и за формированием колонок проведены на разных пожарах. Наблюдения на слабых низовых пожарах площадью до 2 га показали, что над такими пожарами при ветре небольшой скорости, к тому же убывающей с высотой, могут образовываться конвекционные колонки высотой 300—400 м. Но на высоте при увеличе-



Рис. 6. Нижняя часть дымовой колонки

нии скорости ветра до 3 м/сек и более конвекционных колонок эти пожары совсем не образуют.

Наблюдения за развитием более крупного лесного пожара на площади до 20 га при скорости выгорания от 5 до 10 кг/м² показали, что когда скорость ветра над лесом не превышала 3 м/сек, конвекционная колонка над ним была вертикальна (рис. 6). При этом до высоты 200—300 м колонка состояла из пульсирующих клубов дыма. Выше она имела вид вертикальной струи, а на высоте 1500—1800 м оканчивалась остроконечной шапкой. На вершине ее образовалось кучевое облако, которое в отличие от дыма имеет более четкие границы.

С увеличением скорости ветра до 6—7 м/сек колонка наклонялась под углом до 45° к горизонту, струйность потока исчезала, и она состояла из пульсирующих клубов дыма.

Быстрое распространение пожара по территории в основном было связано с образованием очагов горения перед фронтом пожара в результате выпадения из колонки горящих частиц. Над новыми очагами горения возникали свои колонки. Последние при близком расположении (в пределах до 50 м) на высоте 50—100 м сливались в одну. При распространении пожара на площади около 20 га колонка достигала высоты 3200 м.

Инструментальные наблюдения за температурой и скоростью вертикальных потоков над слабыми пожарами показали, что температура резко падает с высотой и на уровне 100 м лишь на несколько десятых градуса отличается от фоновой. Скорость же конвекционных потоков, как обычно, с высотой возрастает. Согласно формуле Экснера, для вертикального ускорения при отсутствии сил трения

$$\frac{dW}{dt} = g \frac{T - T^1}{T^1}, \quad (8)$$

где W — вертикальная скорость, м/сек; t — время, сек; g — ускорение силы тяжести, м/сек²; T — температура перемещаемого воздуха °С; T^1 — температура окружающего воздуха, °С. Если $T = T^1$, то

$$\frac{dW}{dt} = 0. \quad (9)$$

Следовательно, скорость газового потока над пожаром должна увеличиваться с высотой до равенства температур окружающего и поднимающегося воздуха. Когда эти температуры благодаря перемешиванию и теплоизлучению сравниваются, ускорение газового потока должно стать равным нулю. При этом скорость будет максимальной, а далее она станет быстро уменьшаться (рис. 7). В самой верхней части колонки находится зона, где продукты сгорания будут двигаться вверх и вниз: вверх — под действием инерции, а вниз — под действием сил тяжести.

Рис. 7. Изменение температуры (t°) и скорости (V , м/сек) вертикальных потоков в зоне пожара:

- 1 — вне влияния пожара;
2 — над пожаром

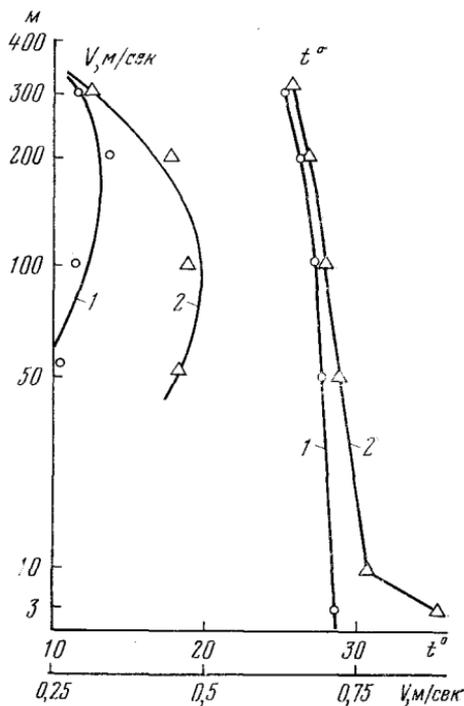
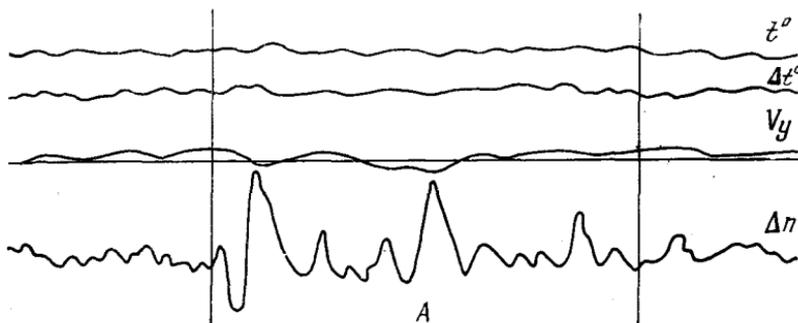


Рис. 8. Образец записи электрометеорографа.

t° — температура; Δt° — пульсации температуры; V_y — скорость упродолженных вертикальных потоков; Δn — перегрузки, действующие на самолет; А — турбулентная зона



Типичные результаты наблюдений при авиазондировании с помощью электрометеорографа показаны на рис. 8. Из рис. 8 можно заключить, что все эти параметры, за исключением перегрузок (Δn), мало отличаются от фоновых. По величине же перегрузок четко выделяется зона повышенной турбулентности, в которой перегрузки могут достигать значительной величины.

В табл. 15 приведены значения коэффициента турбулентности (K), средних перегрузок ($\Delta \bar{n}$) и максимальных перегрузок (Δn_m). Из данных табл. 15 можно заключить, что турбулентность и перегрузки растут с высотой, достигая своего максимума на уровне 100 м, а затем снижаются до фоновых.

Значения коэффициента турбулентности K ($\text{м}^2/\text{сек}$) перегрузок $\bar{\Delta n}$ и Δn_m (в долях g) над пожарами и в окружающих районах

Номер пожара	Высота полета, м	Над пожаром			Фон		
		K	$\bar{\Delta n}$	Δn_m	K	$\bar{\Delta n}$	Δn_m
1	50	81	0,25	0,60	32	0,10	0,37
	100	124	0,27	0,59	55	0,12	0,33
	200	103	0,20	0,53	45	0,10	0,40
	300	—	—	—	31	0,07	0,19
2	50	54	0,20	0,53	34	0,09	0,27
	100	112	0,29	0,53	34	0,09	0,30
	200	36	0,11	0,43	16	0,06	0,19
	300	—	—	—	37	0,03	0,24
3	50	90	0,24	0,52	24	0,03	0,26
	100	129	0,23	0,62	22	0,10	0,35
	200	65	0,14	0,26	23	0,06	0,18
4	50	79	0,21	0,45	24	0,03	0,21
	100	70	0,17	0,45	23	0,06	0,20
	200	—	—	—	16	0,04	0,18
5	50	62	0,23	0,56	21	0,10	0,37
	100	63	0,19	0,43	19	0,03	0,29
Средние	50	72	0,23	0,5	27	0,09	0,29
	100	99	0,24	0,5	31	0,09	0,29
	200	69	0,15	0,4	25	0,06	0,24
	300	—	—	—	34	0,07	0,22

Турбулентность и перегрузки над пожаром на высоте 100 м втрое больше, чем вне пожара. Большие величины K над пожаром вызваны, очевидно, тем, что на фоне общей неустойчивости пограничного слоя даже небольшие добавки тепловой энергии от пожара, обуславливающие повышение температуры на 100 м всего лишь на 0,2—0,3°, вызывают интенсивный вертикальный и горизонтальный обмены.

Изменение средних ($\bar{\Delta n}$) и максимальных значений (Δn_m) в зависимости от высоты показано на рис. 9, а коэффициент K — на рис. 10.

Известно, что скорость полета шара-пилота в турбулентном потоке больше, чем в ламинарном (Молчанов, 1925). В связи с этим отношение фактической скорости полета шара (W_{ϕ}) к расчетной (W_T) позволяет определить наличие турбулентного состояния атмосферы. В соответствии с этим мы проследили, как изменяется это отношение в зоне пожара. Соотношение величин W_{ϕ} и W_T для полетов шара вне пожара (1) и во время горения

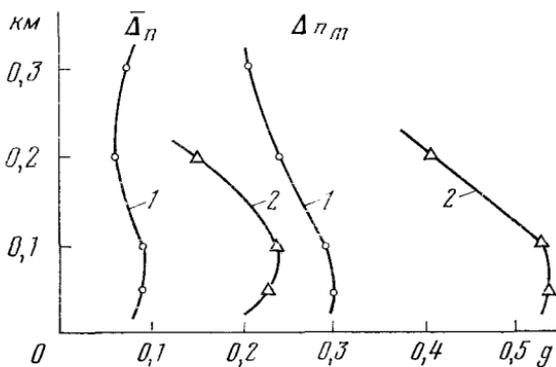


Рис. 9. Величина перегрузок, действующих на самолет в зоне пожара (1) и над пожаром (2)

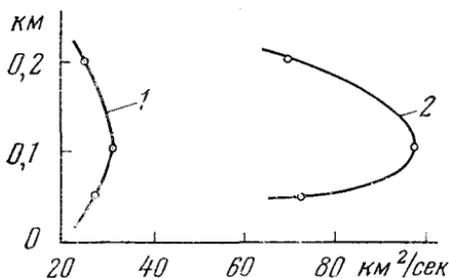
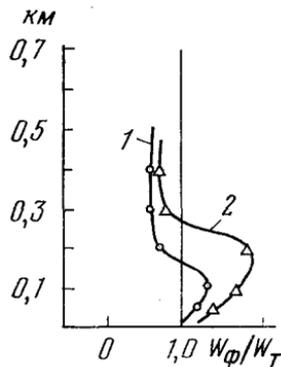


Рис. 10. Изменения коэффициента турбулентности в зоне пожара (1) и над пожаром (2)

Рис. 11. Отношение W_{ϕ}/W_T до пожара (1) и в период пожара (2) на разной высоте (H , км)



(2) приведен на рис. 11. Видно, что в зоне пожара турбулентность значительно выше, чем в окружающей атмосфере.

Как показали шаропилотные наблюдения, конвекционные потоки над пожарами, небольшими по площади и слабыми по интенсивности, не оказывают заметного влияния на направление и скорость горизонтальных потоков у пожара.

Результаты наблюдений за полетом шаров-пилотов в зоне крупного пожара приведены на рис. 12 и 13. На рис. 12 показана проекция траектории полета шара на горизонтальную плоскость, а также кромка пожара и проекция конвекционной колонки. В выносе схемы дана часть проекции траектории в более крупном масштабе. На рис. 13 изображена проекция траектории полета шара и колонки пожара на вертикальную плоскость, перпендикулярную к основному (среднему) направлению ветра.

Проследивая проекцию полета шара, можно заключить следующее. Во время наибольшей интенсивности пожара, когда

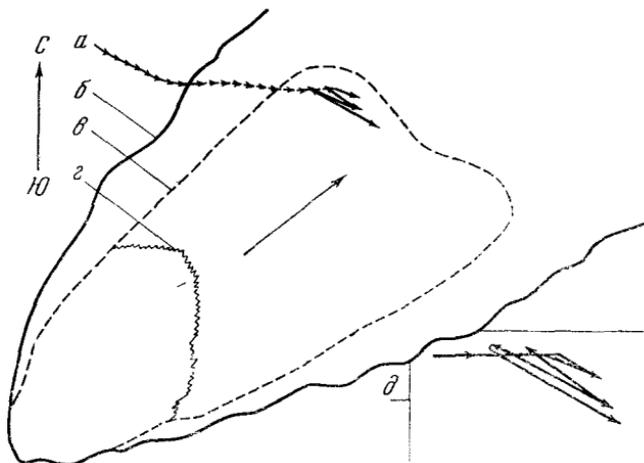


Рис. 12. Проекция движения шара-пилота на горизонтальную плоскость
а — точка выпуска шара; *б* — граница дымовой колонки; *в* — граница основания колонки;
г — кромка пожара; *д* — проекция движения шара-пилота в крупном масштабе

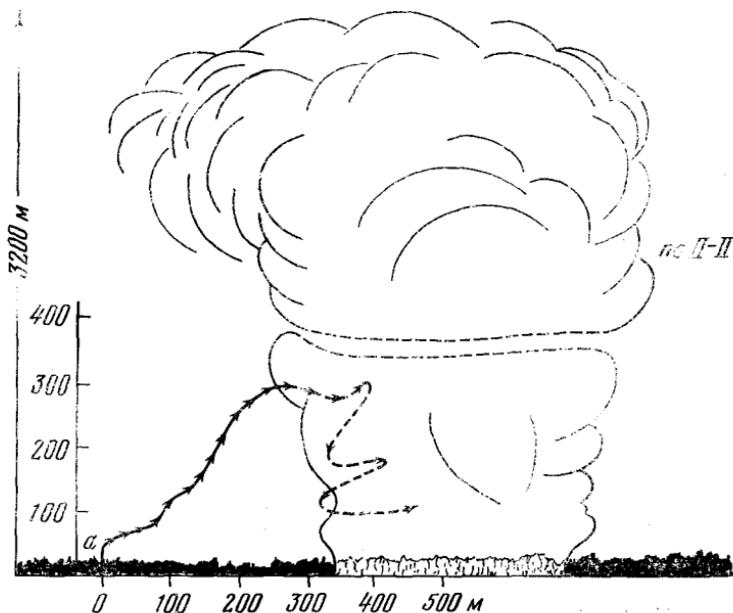


Рис. 13. Проекция движения шара-пилота на вертикальную плоскость.
а — точка выпуска шара

конвекционная колонка достигла высоты около 3200 м, воздушные потоки на расстоянии 400 м от левого фланга пожара в слое от 0 до 50 м над поверхностью земли по направлению и скорости не отличались от фоновых. На высоте 50 м (на этом же расстоянии) шар начал двигаться к колонке с переменной горизон-

гальной скоростью от 0,9 до 3,2 м/сек. Вертикальная скорость его изменялась от 0,8 до 3,4 м/сек. С высоты 320 м и на расстоянии примерно 20 м от колонки преобладали нисходящие потоки со средней скоростью 0,7 м/сек. Скорость горизонтального переноса в этот период равнялась 2,7 м/сек.

Возрастание влияния конвекционной колонки на окружающую среду до некоторой высоты объясняется, по-видимому, тем, что скорость увлекаемого в колонку воздуха пропорциональна скорости газового потока в конвекционной колонке. А так как скорость в конвекционной колонке с высотой до некоторого предела возрастает, то и зона влияния ее на окружающую среду увеличивается. Отсутствие подтока воздуха к колонке на высотах менее 50 м можно объяснить тормозящим влиянием остатков дровостоя.

Дальнейшие наблюдения показали, что по мере приближения к колонке, направления и скорости как горизонтальных, так и вертикальных составляющих траекторий полета шара резко менялись за очень короткие промежутки времени. При этом максимальная скорость горизонтальных составляющих достигала 9—11 м/сек, а вертикальных (в основном нисходящих) — 5—8 м/сек. Все это указывает на то, что в данной зоне имеются чрезвычайно высокие значения коэффициента турбулентности K , достигающие, вероятно, нескольких сотен квадратных метров в секунду. При этом наибольшее возмущение наблюдается на границе между дымом и чистым воздухом.

Проведенные исследования дают основание сделать следующие выводы.

1. Низовые пожары слабой силы при слабом ветре могут формировать конвекционные колонки высотой 300—400 м. Однако активная конвекция над такими пожарами не превышает 200 м.

2. Конвекционные колонки слабых низовых пожаров мало влияют на горизонтальные потоки воздуха, но при термической неустойчивости атмосферы могут увеличивать их турбулентность.

3. Над фронтом пожара слабой силы на высоте 100—150 м перегрузки, действующие на самолет, могут достигать величин, при которых полеты на самолете АН-2 становятся небезопасны. Над флангами и в тылу таких пожаров полеты безопасны на любой высоте.

4. Пожары средней силы и сильные, с хорошо развитой конвекционной колонкой, простирающейся до высоты нескольких тысяч метров, могут существенно трансформировать воздушные потоки на расстоянии до 400 м от них. Особенно высокая турбулентность воздушных потоков наблюдается в нескольких десятках метров с флангов и перед фронтом таких пожаров. Коэффициент турбулентности воздушных потоков K в этой зоне может достигать нескольких сотен квадратных метров в секунду.

ВЛИЯНИЕ КОНВЕКЦИОННОГО ПОТОКА НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПОЖАРА

На основании проведенных нами исследований и наблюдений на лесных пожарах, а также работ Байрама (Yugan, 1959), Ли (Lee, 1972) и других авторов можно сделать вывод, что влияние конвекционного потока на распространение пожара проявляется главным образом в виде переноса частиц лесного горючего за пределы кромки пожара, где эти частицы зажигают напочвенный покров, вызывая тем самым новые очаги пожара впереди кромки фронта. Так как при определенных условиях такие загорания возникают на значительных расстояниях от кромки основного пожара, это обстоятельство в большой мере влияет на скорость распространения лесного пожара.

При достаточно высокой скорости конвекционного потока над пожаром он подхватывает падающие с деревьев частицы горючего и поднимает их вверх. При подъеме каждая частица движется со скоростью, несколько меньшей скорости потока, как бы проскальзывая в нем. У верхнего предела потока она под действием ветра движется далее в горизонтальном направлении и одновременно под влиянием силы тяжести начинает опускаться вниз (рис. 14). Если колонка имеет наклон, то частицы, увлекаемые вверх конвекционным потоком, перемещаются одновременно и в горизонтальной плоскости. При проскальзывании вниз, они могут покидать наклонную конвекционную колонку на различной высоте. В зависимости от материала, величины и времени поле-



Рис. 14. Схема конвекционного переноса горящих частиц

1 — траектория полета горячей частицы; 2 — загорание в месте падения горячей частицы; 3 — сгорание частицы в воздухе

та частицы они могут или сгореть в воздухе, или вынестись на землю и зажечь напочвенный покров.

Расстояние переноса горячей частицы будет зависеть непосредственно от скорости ветра, от времени горения и скорости падения. Так как частицы горючего вследствие различных сочетаний параметров ветра и пожара начинают падать на различных высотах, то очевидно, что при достаточно высокой скорости конвекции наиболее опасной будет та высота, при выпадении с которой частица горючего достигает земли за время, немного меньшее времени ее сгорания. При этом частица будет перенесена на расстояние, максимально возможное для нее при данных ветровых условиях.

Горение частиц лесного горючего материала в условиях конвекционного переноса

Так как при высокоинтенсивных лесных пожарах конвекционным потоком поднимаются частицы различных размеров и форм, то это и обуславливает выпадение их на поверхность земли на различных расстояниях от кромки пожара.

На основании законов физики можно определить, что нужно для того, чтобы рассчитать максимальное расстояние переноса горящих частиц на пожарах разной интенсивности. При вертикальной колонке это расстояние Z можно рассчитать по формуле:

$$Z = t_{\text{пад}} \cdot \omega, \quad (10)$$

где $t_{\text{пад}}$ — максимально возможное время падения частицы, сек;
 ω — скорость ветра, м/сек.

Величину ω нетрудно определить при помощи шаропилотных наблюдений (Воронцов, 1961), а $t_{\text{пад}}$ рассчитать по формуле

$$t_{\text{пад}} = T(d) - (t_{\text{пдм}} + t_{\text{зжг}}), \quad (11)$$

где $T(d)$ — полное время сгорания частицы данных размеров в условиях свободного полета, как функция ее диаметра — d , сек;
 $t_{\text{пдм}}$ — время подъема частицы до начала падения, сек; $t_{\text{зжг}}$ — время, необходимое для зажигания проводников горения на поверхности земли после попадания на них горячей частицы, определяемое экспериментально.

Далее, время подъема определится из отношения:

$$t_{\text{пдм}} = \frac{H}{v_{\text{пдм}}}, \quad (12)$$

где H — высота начала падения горячей частицы, м; $v_{\text{пдм}}$ — скорость подъема частицы в конвекционном потоке до высоты H , м/сек.

Эта последняя величина определяется по разности

$$v_{\text{пдм}} = v_{\text{кнв}} - v_{\text{вн}}, \quad (13)$$

где $v_{\text{кнв}}$ — скорость конвекционного потока пожара, м/сек;

$u_{\text{вгн}}$ — скорость потока при витании в нем частицы, равная максимальной скорости проскальзывания частицы относительно потока, м/сек.

Итак, для нахождения максимально возможного расстояния разлета горящих частиц, способных вызвать загорания за пределами кромки пожара, необходимо знать все величины, требующиеся для последовательного решения приведенных уравнений, начиная с последнего.

Однако скорости конвекционного потока, которые необходимы для подъема кусочков горючего, способных вызвать загорания за пределами кромки фронта пожара, пока еще неизвестны. Неизвестны также время сгорания кусочков древесины в условиях свободного полета и характер связи между временем горения и скоростью проскальзывания частицы в вертикальном газовом потоке. Не определено и время, необходимое для зажигания проводников горения.

Воспользоваться литературными данными о пожарах, могущих носить характер пятнистых, не представляется возможным, так как одни из них описательного характера (Rothermel, 1967; Berlad, Lee, 1968; Anderson, 1968), другие же посвящены выявлению аспектов, не имеющих отношения к нашему исследованию.

Попытка определения величины $T(d)$ и $u_{\text{вгн}}$ для ряда древесных пород была предпринята С. Tarifa в 1963—1965 гг., который сжигал кусочки древесины в вертикальной трубе, где закрепляли их на проволочке в положении наибольшего сопротивления обдуваемому воздушному потоку. Однако воспользоваться данными этой работы для решения интересующих нас вопросов не представляется возможным. Дело в том, что при свободном полете в конвекционном потоке горящая частица все время меняет свою форму и положение относительно направления потока. Отсюда можно предположить, что горение ее происходит несколько иначе, чем в жестко фиксированном положении.

Кроме того, Tarifa проводил опыты со здоровой древесиной, имеющей влагосодержание от 2 до 25%. В естественных условиях влагосодержание живых здоровых веточек редко бывает меньше 100%. Древесина же, имеющая подобное влагосодержание и подверженная гнили, обладает другими физико-химическими свойствами, что также должно отражаться на ее полетных свойствах и характере горения.

Таким образом, в настоящее время в литературе, по-видимому, нет еще данных, необходимых для расчета возможного расстояния переноса горящих частиц при лесных пожарах, носящих характер пятнистых. Чтобы приблизиться к этому, мы попытались предварительно решить следующие задачи:

1) определить материал, форму и размер частиц горючего, наиболее опасных в отношении создания загораний перед фронтом пожара;

- 2) найти скорости конвекционного потока, необходимые для подъема таких частиц;
- 3) установить время горения этих частиц в условиях свободного полета;
- 4) выявить зависимость скорости падения частиц горючего от времени горения в условиях свободного полета.

Для получения экспериментальных данных, необходимых для решения этих задач, была изготовлена установка, на которой

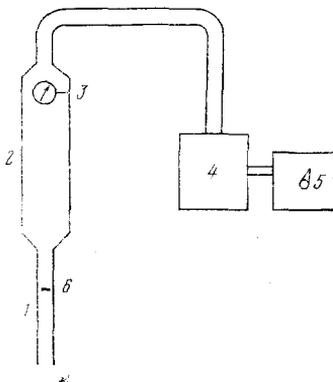


Рис. 15. Схема установки для сгорания частиц горючего в воздушном потоке.

1, 2 — трубы малого и большого диаметра; 3 — анемометр; 4 — пылесос; 5 — ЛАТР; б — частица горючего

можно имитировать подъем частиц горючего конвекционным потоком и падение их в воздухе. Она позволяет определить также и время горения частиц горючего с максимальным приближением к условиям горения их в свободном полете.

Установка состоит (рис. 15) из вертикальной стеклянной трубы (1) с внутренним диаметром 66 мм и длиной 900 мм. Эта труба соединена с другой трубой (2), внутренний диаметр которой 97 мм и длина 1000 мм. Верхний конец второй трубы присоединен к всасывающим отверстиям двух пылесосов «Буран» (4). В трубу, несколько ниже ее верхнего конца, вставлен анемометр АСО-3 (3), служащий для определения скорости потока в трубах.

Для помещения частицы горючего внутрь трубы меньшего диаметра на нижний конец ее надета проволочная сетка с размером ячеек 2×2 мм. Образцы, размеры которых меньше размера ячеек сетки, накалывали на иглу, зажигали, вводили в трубу, где снимали их с помощью пинцета и пускали в воздушный поток. Скорость движения воздуха при проведении опытов регулировали величиной напряжения, подаваемого на пылесосы через ЛАТР-5.

Для решения первого из перечисленных вопросов прежде всего необходимо было выяснить, что представляют собой частицы горящего лесного горючего, попадающие в конвекционный поток пожара.

По нашим наблюдениям, газовым потоком пожара увлекаются частицы горючего, которые падают с горящих, преимуще-

ственно сухостойных деревьев и представляют собой кусочки коры, веточек и подгнившей древесины самой различной формы. Естественно, что наиболее опасными будут те частицы горючего, которые не гаснут при максимальной скорости проскальзывания их в воздушном потоке и, находясь в условиях свободного полета в конвекционном потоке, горят продолжительнее, чем другие частицы, летящие в этом же потоке.

В качестве объектов наблюдения для начала мы взяли древесину и кору пород наиболее часто страдающих от пожаров, т. е. лиственницы, сосны и березы. В первую очередь были проведены наблюдения за возможностью горения таких частиц при максимально возможной скорости их проскальзывания в воздушном потоке. Внешне это выражалось в том, что частица находилась во взвешенном состоянии.

Опыты проводили следующим образом. Кусочки коры и древесины перечисленных древесных пород произвольной формы, как указано, вводили в трубу. Вес образцов не превышал 3,0 г. Зажигание производили с помощью специально изготовленной свечи, пламя которой было достаточным для одновременного охватывания всей поверхности образца. Скорость воздушного потока в трубе поддерживали равной скорости падения частицы, находящейся в ней. Всего было проведено свыше 100 опытов. В результате выявлено, что горение кусочков коры лиственницы, сосны и березы при обдуве их воздушным потоком со скоростью, равной максимальной скорости их падения, прекращается. Следует заметить, что толщина образцов коры лиственницы и сосны не превышала 5 мм.

Такие же опыты, проведенные с кусочками древесины указанных пород, показали, что при обдуве горящих образцов воздушным потоком соответствующей скорости они продолжают гореть. Однако пламенное горение вскоре прекращается, и частицы продолжают гореть беспламенно. Это характерно для частиц древесины самой различной формы.

Дальнейшие опыты для выявления наиболее опасных частиц горючего проводили только с кусочками древесины, влагосодержание которой было принято 12%. В конвекционный поток пожара попадают частицы различной формы. В большинстве случаев эти формы не поддаются объективной характеристике, но их можно приближенно приравнять к правильным формам, на которых мы и остановились: цилиндр, шар, диск и куб.

Главным требованием ко всем частицам горючего материала разной формы было то, чтобы при заданной скорости вертикального воздушного потока все испытуемые частицы находились в нем во взвешенном состоянии. Результаты наблюдений за временем сгорания описанных частиц лесного горючего приведены в табл. 16.

При рассмотрении приведенных данных можно видеть, что при одинаковой скорости потока наиболее длительное время го-

Время сгорания различных частиц лесного горючего, имеющих одинаковую скорость падения в воздушном потоке, при влагосодержании 12%

Форма	Размеры, мм			Максимальная скорость проскальзывания частицы в воздушном потоке, м/сек	Среднее время горения частицы в воздушном потоке, сек
	радиус	длина	высота		
Сосна					
Цилиндр	6,0	48,0	—	8,6±0,1	490±20
Шар	4,0	—	—	8,6±0,1	55±4
Диск	14,0	—	9,5	8,6±0,2	530±18
Куб	—	—	7,8	8,6±0,2	65±5
Цилиндр	4,0	32,0	—	6,5±0,1	200±10
Шар	2,8	—	—	6,5±0,1	40±3
Диск	8,0	—	5,4	6,5±0,2	140±9
Куб	—	—	5,0	6,5±0,1	54±4
Лиственница					
Цилиндр	5,0	40,0	—	8,6±0,1	310±15
Шар	3,5	—	—	8,6±0,1	55±3
Диск	10,5	—	7,0	8,6±0,2	220±14
Куб	—	—	6,7	8,6±0,1	60±4
Цилиндр	3,0	24,0	—	6,5±0,1	120±7
Шар	2,5	—	—	6,5±0,1	20±3
Диск	6,0	—	4,1	6,5±0,2	70±7
Куб	—	—	4,4	6,5±0,1	40±4
Береза					
Цилиндр	5,2	42,0	—	8,6±0,1	340±17
Шар	3,7	—	—	8,6±0,1	55±3
Диск	11,7	—	7,5	8,6±0,2	240±16
Куб	—	—	6,8	8,6±0,1	65±6
Цилиндр	3,3	26,0	—	6,5±0,1	130±7
Шар	2,6	—	—	6,5±0,1	45±3
Диск	6,5	—	4,3	6,5±0,2	75±6
Куб	—	—	4,7	6,5±0,1	50±4

рят сосновые цилиндры. Таким образом, можно считать, что среди указанных трех пород древесины сосны, по-видимому, вследствие ее меньшей плотности является в данном случае и наиболее опасной. Это ясно прослеживается по данным, приведенным в табл. 16, и для цилиндров, и для дисков. Различия во времени горения частиц в форме шара и куба находятся в пределах ошибки опыта. Это объясняется небольшой массой образцов, время горения которых вследствие этого мало и с помощью примененной методики различия во времени горения не улавливаются.

По данным табл. 16 можно заключить также, что наиболее опасной формой среди частиц горючего является цилиндр.

Оказалось, что цилиндрические частицы любой древесной породы горят значительно дольше других форм, что объясняется большей массой частиц цилиндрических форм, по сравнению с частицами других форм, при равной начальной скорости витания их в воздушном потоке.

Пожары действуют в широком диапазоне метеорологических условий, и естественно, что условия подъема частиц горючего на лесных пожарах могут быть различными.

Известно (Яворский, Пинский, 1969), что установившаяся скорость тел в газах при больших числах Рейнольдса может быть определена по формуле:

$$v_{уст} = \sqrt{\frac{2mg}{C \cdot S \cdot \rho_0}}, \quad (14)$$

где $v_{уст}$ — установившаяся или максимально возможная скорость падения тела в данном газе, м/сек; m — масса тела, кг; g — ускорение свободного падения, м/сек²; c — коэффициент формы (безразмерная величина, постоянная для тела заданной формы); s — максимальная площадь поперечного сечения частицы, перпендикулярного потоку, м²; ρ_0 — плотность газа в конвекционном потоке, кг/м³.

Из рассмотрения формулы следует, что с изменением метеорологических условий может несколько измениться лишь плотность газа в конвекционном потоке. Остальные же параметры не меняются. Но как бы не изменялась в соответствии с метеорологическими условиями плотность газа в конвекционном потоке пожара, соотношение скоростей различных частиц горючего, находящихся в этом потоке, не изменится. Следовательно, вывод о том, что наиболее опасными частицами при прочих равных условиях являются цилиндры сосновой древесины, справедлив для условий любого лесного пожара.

Кроме изложенного, в результате наблюдений установлено, что скорость падения цилиндра одного и того же диаметра возрастает, если его длина будет больше четырех диаметров. Некоторое возрастание скорости падения происходит и в том случае, если длина цилиндра будет меньше четырех диаметров. Так, при длине цилиндра, равной его диаметру, скорость витания становится более близкой к скорости витания шара того же диаметра. Это увеличение скорости объясняется тем, что с возрастанием длины цилиндра из веточки становится более ощутимой его сбежистость. Последняя приводит к тому, что для обеспечения витания такого цилиндра необходимо увеличение скорости конвекционного потока.

Возрастание скорости падения в случае чрезмерного уменьшения длины цилиндра также объясняется изменением его фор-

мы, которая по мере уменьшения длины приближается к форме куба и шара, а в связи с этим уменьшается и коэффициент формы, т. е. коэффициент аэродинамического сопротивления C , оказывающий большое влияние на величину установившейся скорости падения тел. Наиболее стабильными, по наблюдениям, являются цилиндры с длиной, равной четырем диаметрам, которые получаются при обламывании сухих веточек.

Чтобы отыскать скорости потока, необходимые для подъема частиц горючего, установить время горения частиц в условиях свободного полета и выявить зависимость скорости падения частиц от времени горения, мы провели следующие опыты. Испытуемый образец помещали на металлическую сетку, надетую на нижний конец трубы меньшего диаметра, и зажигали при помощи свечи. Период зажигания длился от 10 до 40 сек. После того как частица загоралась, через трубу пропускали воздух со скоростью, при которой частица непрерывно находилась во взвешенном состоянии в верхней части трубы. Весь период времени горения частицы, по мере ее сгорания, скорость воздушного потока соответственно уменьшали, регистрируя ее через каждые 10 сек.

Вследствие того, что кусочки древесины поднимаются тем легче, чем меньше их плотность, в этих опытах мы использовали древесину 1 и 2 стадии гниения. Кусочки древесины сосны в таком состоянии еще хорошо сохраняют форму и, кроме того, типичны для веточек сухостойных деревьев. Плотность их в абсолютно сухом состоянии равна в среднем $0,3 \text{ г/см}^3$. Влагосодержание таких образцов было равно 12%, т. е. близко к тому, которое наблюдалось в естественных условиях.

По результатам определения скоростей потока, необходимых для удержания опытных кусочков горючего во взвешенном состоянии, на рис. 16 построена прямая в логарифмических координатах. Каждая точка исходных данных найдена как среднее из 20 опытов. При рассмотрении графика видно, что с увеличением начального диаметра, а следовательно, и длины частиц горючего (согласно их соотношению 1:4) увеличивается также и скорость воздушного потока, необходимая для удержания их во взвешенном состоянии.

При сжигании кусочков древесины было выявлено, что в условиях свободного полета горение их происходит в беспламенном режиме, что цилиндры горят более интенсивно с торцов, а диаметр их почти не изменяется. Зависимость времени горения деревянных цилиндров от их первоначального диаметра может быть выражена эмпирическим уравнением:

$$T(d) = 1,8 \cdot d^{2,2}. \quad (15)$$

С увеличением начального диаметра цилиндров от 5 до 12 мм продолжительность их горения увеличивается от 1 мин до 7 мин 30 сек (рис. 17).

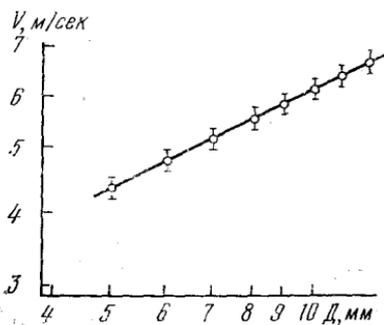


Рис. 16. Зависимость начальной скорости падения (V) сосновых цилиндров от их диаметров (D)

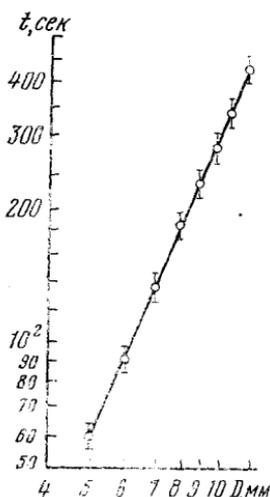


Рис. 17. Зависимость времени горения (t) сосновых цилиндров от их диаметров (D)

именных квадратов, имеет вид:

$$v = 5,9743 - 9,0955 \cdot 10^{-2}t + 5,4736 \cdot 10^{-4}t^2 - 1,1428 \cdot 10^{-6}t^3. \quad (17)$$

Следует заметить, что хотя уравнение и не совсем точно описывает изучаемую зависимость, оно приемлемо для расчетов. Время, на протяжении которого наблюдаются максимальные отклонения значений аппроксимирующих кривых от опытных данных, как правило, не превышает 30 сек; возможная погрешность колеблется от 5% (при горении цилиндра диамет-

Зависимость скорости падения частиц или скорости потока, которая необходима для поддержания цилиндрических кусочков горючего во взвешенном состоянии, от времени их горения в условиях свободного полета представлена на рис. 18. Каждая точка на графике — средний результат не менее чем из 20 наблюдений. Кривые построены по экспериментальным точкам без выравнивания.

С увеличением времени выгорания частицы скорость ее падения уменьшается. Изменение последней происходит в зависимости от размеров горячей частицы по-разному. У образцов малого диаметра она уменьшается резко. У образцов с большим диаметром изменение скорости падения происходит более плавно, хотя в первоначальной стадии горения она изменяется быстрее, чем в заключительной его стадии.

Полученные данные были аппроксимированы многочленом третьей степени вида:

$$y = a + bx + cx^2 + dx^3. \quad (16)$$

На рис. 19 в качестве примера приведены экспериментальные данные в виде точек на кривой, выражающей зависимость скорости падения соснового цилиндра диаметром 8 мм от времени его горения в условиях свободного полета. Аппроксимирующее эту зависимость уравнение, полученное методом наименьших квадратов, имеет вид:

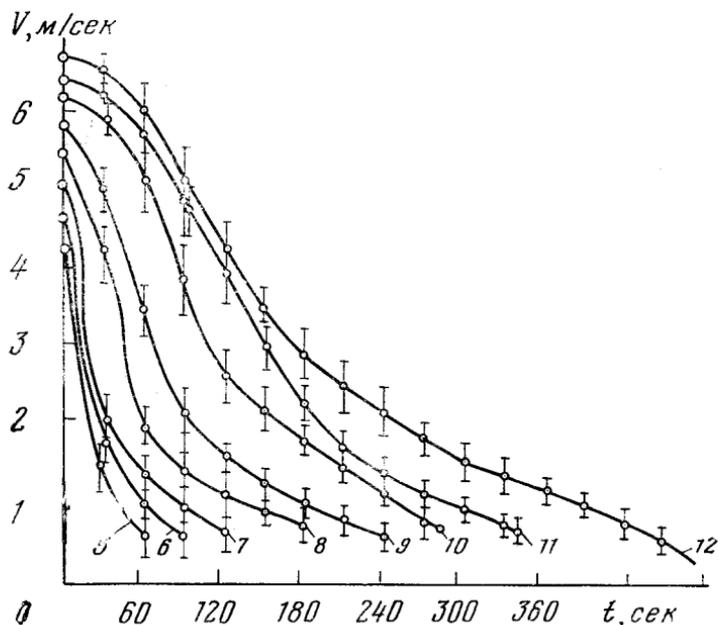


Рис. 18. Зависимость скорости падения (V) частиц лесного горячего от времени (t) их горения в воздушном потоке. Числа у кривых означают диаметры цилиндров (в мм), к которым они относятся

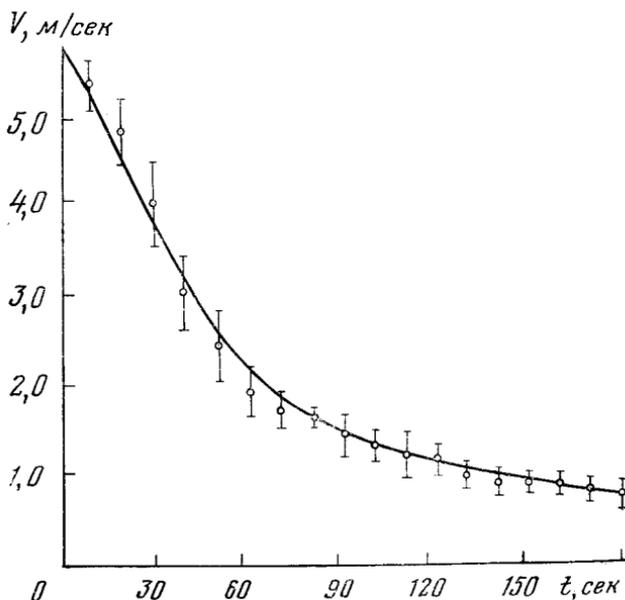


Рис. 19. Зависимость скорости падения цилиндра (V) диаметром 8 мм от времени его горения (t) и аппроксимирующая ее кривая

ром 6 мм) до 20% (при горении цилиндра диаметром 10 мм).

Используя полученные уравнения, можно определить скорость падения горящих цилиндрических частиц лесного горючего в любой момент времени, что необходимо для определения возможности подбема и расстояния переноса частиц горючего при лесных пожарах.

В результате проведенных опытов можно сделать следующие выводы.

1. Наиболее опасными в отношении создания очагов горения за пределами кромки лесного пожара являются цилиндрические кусочки сосновой древесины, затронутой гниением, с отношением диаметра к длине 1 : 4.

2. Скорость газового потока, необходимая для подъема таких частиц, с увеличением начального диаметра цилиндров от 5 до 12 мм возрастает от 4,4 до 6,7 м/сек соответственно.

3. Горение кусочков лесного горючего в условиях свободно-го полета происходит в беспламенном режиме. Время горения цилиндрических частиц с отношением диаметра к длине, как 1 : 4, зависит только от диаметра. Эта зависимость выражается степенной функцией:

$$t(d) = 1,8 \cdot d^{2,2}.$$

4. Зависимость скорости падения частиц от времени горения, может быть описана многочленом третьей степени вида $y = a + bx + ax^2 + dx^3$, причем параметры уравнения зависят от начального диаметра частицы.

Дальность полета горящих частиц

Для того чтобы определить, на какое расстояние от пожара могут быть перенесены частицы горючего, необходимо знать скорость ветра и время падения частицы на землю.

Как уже было сказано выше, это время выражается так:

$$t_{\text{пдм}} = T(d) - (t_{\text{пдм}} + t_{\text{зжг}}).$$

В этой формуле неизвестны $t_{\text{пдм}}$ и $t_{\text{зжг}}$. Но после того, как стало возможным определять скорость конвекционного потока лесного пожара и скорость проскальзывания в нем горящих частиц лесного горючего, можно определить время подъема частиц до высоты, с которой начинается их падение.

Рассмотрим имеющиеся для этого исходные данные. Мы имеем прежде всего таблицу зависимости величины, обратной относительной скорости потока, как функции высоты. В общем виде эта таблица может быть представлена так:

$$\frac{h}{f(h)} \left| \frac{h_0 \quad h_1 \quad \dots \quad h_n}{f(h_0) \quad f(h_1) \quad \dots \quad f(h_n)} \right., \quad (18)$$

где

$$f(h) = \frac{1}{\tau_{\text{КНВ}}^{\text{отн}}(h)}, \quad (19)$$

где $V_{\text{КНВ}}^{\text{отн}}(h)$ — относительная скорость потока, м/сек.

Последняя получается, как

$$v_{\text{КНВ}}^{\text{отн}}(h) = \frac{v_{\text{КНВ}}(h)}{v_0},$$

где v_0 — скорость конвекции на высоте древостоя, м/сек;
 $v_{\text{КНВ}}(h)$ — скорость конвекции, как функция от (h) , м/сек.

Кроме того, можно составить таблицу зависимости скорости проскальзывания горячей частицы от времени, т. е. $v_{\text{прск}}(t)$. Таблица будет иметь следующую форму:

$$\frac{t}{v_{\text{прск}}(t)} \left| \begin{array}{c} 0; \quad 1 \dots\dots m \\ v_{\text{прск}}(0); \quad v_{\text{прск}}(1) \dots\dots v_{\text{прск}}(m) \end{array} \right. \quad (20)$$

Конкретное ее содержание приведено в виде графика (см. рис. 18).

Время $\tau(h)$, затраченное элементом объема газа на подъем в потоке от полога леса до высоты (h) при условии, что ее начальная скорость равна v_0 , может быть вычислено с помощью интеграла:

$$\tau(h) = \int_{h_0}^h \frac{dh}{v_{\text{КНВ}}(h)}. \quad (21)$$

Но, так как

$$v_{\text{КНВ}}^{\text{отн}}(h) = \frac{v_{\text{КНВ}}(h)}{v_0}, \quad (22)$$

а

$$b(h) = \frac{1}{v_{\text{КНВ}}^{\text{отн}}(h)}, \quad (23)$$

то

$$\frac{1}{v_{\text{КНВ}}(h)} = \frac{b(h)}{v_0}. \quad (24)$$

Поэтому для вычисления времени подъема элемента объема газового потока на высоту h получаем формулу:

$$\tau(h) = \frac{1}{v_0} \int_{h_0}^h b(h) dh. \quad (25)$$

По этой формуле мы составили табл. 14, которая дает возможность определить среднюю скорость конвекции в промежутках между высотами подъема.

Расстояние проскальзывания взвешенных в потоке горящих частиц
 лесного горючего (в м) в зависимости от диаметра частиц и от времени,
 прошедшего с начала их загорания

Время, прошедшее с начала загорания, сек	Начальный диаметр цилиндра, мм					
	5	6	7	8	9	10
10	40	44	50	54	57	62
20	70	77	92	105	112	122
30	90	100	118	150	164	182
40	102	116	137	186	211	240
50	112	128	153	214	250	296
60	118	140	167	235	279	348
70	—	149	180	254	301	397
80	—	158	191	270	320	441
90	—	164	202	284	338	480
100	—	—	211	298	354	514
110	—	—	220	310	368	544
120	—	—	226	322	330	570
130	—	—	—	332	392	595
140	—	—	—	342	402	618
150	—	—	—	350	413	640
160	—	—	—	358	423	660
170	—	—	—	365	432	680
180	—	—	—	372	442	698
190	—	—	—	—	450	716
200	—	—	—	—	458	732
210	—	—	—	—	466	747
220	—	—	—	—	474	760
230	—	—	—	—	480	773
240	—	—	—	—	487	784
250	—	—	—	—	—	795
260	—	—	—	—	—	804
270	—	—	—	—	—	813
280	—	—	—	—	—	820

С другой стороны, за время τ горящая частица опускается на некоторую высоту проскальзывания, которая может быть вычислена по уравнению:

$$h_{\text{прск}}(\tau) = \int_0^{\tau} v_{\text{прск}}(t) dt. \quad (26)$$

Уравнение дает возможность составить следующую таблицу пути проскальзывания как функции времени для каждого

начального диаметра частицы.

$$\frac{\tau(h)}{h_{\text{прск}}(\tau)} \left| \frac{\tau(h_0) \quad \tau(h_1) \quad \dots \quad \tau(h_N)}{h_{\text{прск}}(\tau(h_0)); h_{\text{прск}}(\tau(h_1)); h_{\text{прск}}(\tau(h_N))} \right. \quad (27)$$

Конкретные значения пути проскальзывания приведены в табл. 17.

По данным табл. 17 нетрудно определить среднюю скорость проскальзывания горячей частицы в условно неподвижной газовой среде за любой интервал времени.

Мы построили табл. 18 искомой зависимости времени подъема горячей частицы от высоты, на которую она поднимается за это время,

$$\frac{h_{\text{част}}(\tau)}{\tau(h)} \left| \frac{h_{\text{част}}(\tau(h_0)); h_{\text{част}}(\tau(h_1)); \dots h_{\text{част}}(\tau(h_N));}{\tau(h_0); \quad \tau(h_1); \quad \dots \quad \tau(h_N)} \right. \quad (28)$$

где

$$h_{\text{част}}(\tau) = (v_{\text{кнв}} - v_{\text{прск}}) \cdot \tau. \quad (29)$$

По формуле (24) можно рассчитать время, которое требуется для падения частицы с заданной высоты. Так, например, для падения горячей цилиндрической частицы диаметром 5 мм при $v_0 = 5,5$ м/сек с высоты 50 м требуется 40 сек. Результаты расчетов для разных сочетаний параметров, произведенные на ЭВМ Минск-22, приведены в табл. 19.

После того как время подъема и падения частицы будет найдено, время, оставшееся до полного сгорания частицы ($t_{\text{ост}}$), определится по уравнению:

$$t_{\text{ост}} = T(d) - (t_{\text{пдм}} + t_{\text{пдн}}). \quad (30)$$

Расстояние переноса горячей частицы по горизонтали ветром будет равно произведению времени ее падения на среднюю скорость ветра в промежутке высот от точки падения до высоты полога древостоя.

Вероятность зажигания напочвенного покрова горящими частицами

После того как горящая частица упадет на землю, она в зависимости от своих размеров, вида напочвенного покрова, его состояния, а также от погодных условий может вызвать или не вызвать загорание напочвенного покрова. Теперь, когда мы можем рассчитать, на каком расстоянии от кромки пожара падают горящие частицы и сколько времени осталось до их полного сгорания, необходимо выявить степень влияния различных факторов на загорание горючих материалов от падающих на их поверхность горящих частиц. Иными словами, задачей дальнейшего исследования было выявление конкретных условий, при которых падающие на поверхность почвы горящие частицы вызывают загорание горючего.

Высота подъема горящих частиц (в м)

Скорость кон- векция на вы- соте древо- стоя, м/сек	Время, про- шедшее с на- чала полета, сек	Начальный диаметр цилиндра, мм																	
		5	6	7	8	9	10	5	6	7	8	9	10	5	6	7	8	9	10
		Отношение ширины горячей кромки к ее длине 1:10						Отношение ширины горячей кромки к ее длине 1:25						Отношение ширины горячей кромки к ее длине 1:50					
4,5	10	9	6	—	—	—	—	10	6	—	—	—	—	13	10	—	—	—	—
	20	29	21	—	—	—	—	30	28	—	—	—	—	33	29	—	—	—	—
	30	59	48	—	—	—	—	64	56	—	—	—	—	68	61	—	—	—	—
	40	—	87	—	—	—	—	—	99	—	—	—	—	—	110	—	—	—	—
5,0	10	14	11	4	—	—	—	16	12	6	—	—	—	19	16	9	—	—	—
	20	39	32	18	—	—	—	42	35	20	—	—	—	48	41	26	—	—	—
	30	76	66	45	—	—	—	84	74	50	—	—	—	100	87	60	—	—	—
	40	—	—	88	—	—	—	—	—	96	—	—	—	—	—	115	—	—	—
5,5	10	20	16	10	6	—	—	21	18	11	7	—	—	25	22	15	11	—	—
	20	50	43	28	15	—	—	51	45	30	17	—	—	62	53	38	24	—	—
	30	—	84	67	30	—	—	—	94	66	33	—	—	—	111	81	44	—	—
	40	—	—	115	55	—	—	—	—	122	58	—	—	—	—	148	80	—	—
	50	—	—	—	95	—	—	—	—	—	102	—	—	—	—	—	127	—	—
	60	—	—	—	146	—	—	—	—	—	159	—	—	—	—	—	194	—	—
6,0	10	25	22	15	12	8	4	27	24	17	13	10	6	30	26	20	16	13	8
	20	62	54	39	26	18	9	64	57	42	29	22	12	77	64	48	35	28	18
	30	—	105	80	46	31	15	—	114	88	51	37	20	—	129	108	68	46	28
	40	—	—	140	83	49	22	—	—	144	93	58	28	—	—	—	122	86	40
	50	—	—	—	143	83	32	—	—	—	149	99	40	—	—	—	191	139	55
	60	—	—	—	203	129	44	—	—	—	217	156	54	—	—	—	—	206	89
	70	—	—	—	—	187	69	—	—	—	—	224	83	—	—	—	—	280	134
	80	—	—	—	—	—	98	—	—	—	—	—	—	120	—	—	—	—	187
	90	—	—	—	—	—	—	136	—	—	—	—	—	167	—	—	—	—	237
	100	—	—	—	—	—	—	182	—	—	—	—	—	225	—	—	—	—	283
	110	—	—	—	—	—	—	238	—	—	—	—	—	288	—	—	—	—	—

Таблица 19

Зависимость времени падения горящих частиц цилиндрической формы (τ , сек)
от высоты падения (h , м)

Скорость инжекции а высоте ростоя, м/сек	Начальный диаметр цилиндра, мм											
	5		6		7		8		9		10	
	h	τ	h	τ	h	τ	h	τ	h	τ	h	τ

Отношение ширины горячей кромки к ее длине 1:10

4,5	9	3	21	10	—	—	—	—	—	—	—	—
	28	17	48	38	—	—	—	—	—	—	—	—
	59	—	87	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5,0	15	5	11	3	18	6	—	—	—	—	—	—
	39	29	32	16	45	27	—	—	—	—	—	—
	76	—	66	—	88	78	—	—	—	—	—	—
5,5	20	7	17	5	10	3	15	3	—	—	—	—
	50	4)	43	24	29	10	30	8	—	—	—	—
	—	—	85	—	64	42	55	23	—	—	—	—
	—	—	—	—	115	—	95	58	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	146	—	—	—	—	—
6,0	25	9	22	7	15	4	12	2	18	4	15	3
	62	—	54	32	39	17	26	6	31	7	23	4
	—	—	105	—	80	57	47	14	49	13	32	6
	—	—	—	—	140	—	83	40	83	37	45	9
	—	—	—	—	—	—	143	108	129	85	69	16
	—	—	—	—	—	—	203	—	187	170	98	28
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	137	50
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	183	80
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	238	127

Отношение ширины горячей кромки к ее длине 1:25

4,5	10	3	7	2	—	—	—	—	—	—	—	—
	30	18	28	13	—	—	—	—	—	—	—	—
	64	—	57	48	—	—	—	—	—	—	—	—
5,0	16	5	13	4	6	1	—	—	—	—	—	—
	42	31	35	18	21	7	—	—	—	—	—	—
	84	—	74	—	50	31	—	—	—	—	—	—
5,5	21	7	18	5	11	3	7	2	—	—	—	—
	51	—	45	25	31	11	17	4	—	—	—	—
	—	—	95	—	66	45	33	9	—	—	—	—
	—	—	—	—	122	—	58	25	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	103	65	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	159	—	—	—	—	—	

В качестве объектов наблюдений мы выбрали виды горючего, являющиеся наиболее характерными для основных типов леса, а в качестве инициаторов зажигания — кусочки веточек сосны в форме цилиндров различных диаметров. Эта форма инициаторов зажигания выбрана нами на основании описанных выше предварительных исследований.

Для выбора факторов, оказывающих существенное влияние на зажигание напочвенного покрова горящими частицами, мы воспользовались методикой проведения отсеивающего эксперимента (Налимов, Чернова, 1965).

В исследование были включены следующие факторы:

x_1 — влагосодержание горючего (в % от веса в абсолютно сухом состоянии);

x_2 — скорость ветра на поверхности горючего, м/сек;

x_3 — первоначальный диаметр соснового цилиндра, инициирующего зажигание, мм;

x_4 — время, оставшееся до полного сгорания соснового цилиндра, после его падения, сек;

x_5 — влагосодержание соснового цилиндра (в % от его веса в абсолютно сухом состоянии);

x_6 — температура окружающего воздуха, °С;

x_7 — относительная влажность воздуха, %.

Факторы x_1 — x_7 варьировались на двух уровнях. В этих и дальнейших опытах уровни подбирали так, чтобы факторы имели реальную область определения, т. е. варьировались в тех пределах, в которых они изменяются на пожарах. Так, например, влагосодержание горючего варьировалось в пределах значений равновесного влагосодержания горючего при относительной влажности воздуха от 60 до 20% и никогда не превышало значения влагосодержания, при котором горючее не может гореть. При установлении нижнего и верхнего пределов влагосодержания указанных видов горючего мы использовали литературные данные и наши наблюдения.

Следует отметить, что данные о влагосодержании слоя напочвенного покрова, при котором происходит горение в лесу, и о минимально возможном влагосодержании различных видов горючего довольно широко представлены в литературе (Мелехов, 1939; Нестеров, 1949; Вонский, 1957; Курбатский, 1964; Софронов, 1967; Жуковская, 1970). Сведений же о той критической влажности, при которой горючее еще может гореть, очень мало. При установлении этого верхнего предела влагосодержания мы воспользовались данными Э. Н. Валендика и Н. Ф. Гевель (1975). Уровни факторов и интервалы варьирования приведены в табл. 20. При описании способов, примененных нами при планировании экспериментов, использованы термины и обозначения, употребляемые в математической теории эксперимента (Налимов, Чернова, 1965; Адлер, Маркова, Грановский, 1971).

Уровни факторов и интервалы варьирования

Фактор	Уровень факторов			Интервал варьирования	Фактор	Уровень факторов			Интервал варьирования
	-1	0	+1			-1	0	+1	
x_1	9,0	8,0	7,0	1,0	x_5	12	9	6	3
x_2	0,3	0,9	1,6	0,6	x_6	20	25	30	5
x_3	8	10	12	2	x_7	60	45	30	15
x_4	60	120	180	60					

Согласно требованиям, предъявленным к планированию эксперимента, для того чтобы было возможно устанавливать факторы на любом уровне, вне зависимости от уровней остальных факторов, они должны быть независимы друг от друга, однозначны, совместимы и управляемы. В наших опытах взаимозависимы и неуправляемы только такие факторы, как влажность воздуха и его температура (x_6 и x_7), но мы подбирали такое время для проведения опытов, когда все факторы имели требуемые значения.

Опыты проводили следующим образом. На полигон, расположенный под пологом леса, доставляли в эксикаторах образцы горючего (мох Шребера и кусочки сухих сосновых веточек цилиндрической формы) необходимого влагосодержания. Затем подготовленные сосновые веточки зажигали при помощи специальной свечи, пламя которой было достаточным для одновременного охватывания всей поверхности соснового цилиндра. Во время горения цилиндрические кусочки горючего были насажены на иглу и обдувались воздушным потоком, образуемым вентилятором. Скорость обдувающего потока была равна скорости падения горячей частицы и определялась по уравнению (16).

Когда время горения соответствовало нужному для опыта, обгоревшие частицы сбрасывали с иглы на слой горючего, помещенный на заранее подготовленную площадку. Время, которое оставалось до полного сгорания частицы, определяли по разности:

$$T(d) - t_{сбр} = t_{эжг}, \quad (31)$$

где $T(d)$ — полное время горения соснового цилиндра, определенное нами ранее, сек; $t_{сбр}$ — время горения частицы до сбрасывания ее на слой горючего, численно равное $t_{пдм} + t_{пдн}$.

Необходимую скорость потока на поверхности горючего создавали вентилятором. Скорость потока измеряли анемометром АСО-3, установленным на поверхности горючего. Вероятность зажигания в каждом опыте определяли по числу загораний, возникших при 10-кратной попытке зажигания.

При отсеивающем эксперименте было проведено 16 вариантов опыта с 4-кратной повторностью для каждого варианта, т. е.

Матрица планирования ПФЭ : $y=2^{7-4} \dots (1)$

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
1	+	+	+	+	+	+	+	+
2	+	+	-	-	-	-	+	+
3	+	-	-	+	+	-	-	+
4	+	-	+	-	-	+	-	+
5	+	-	-	-	+	+	+	-
6	+	-	+	+	-	-	+	-
7	+	+	+	-	+	-	-	-
8	+	+	-	+	-	+	-	-

Таблица 22

Матрица планирования ПФЭ : $y=2^{7-4} \dots (2)$

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
1	+	-	-	-	-	-	-	-
2	+	-	+	+	+	+	-	-
3	+	+	+	-	-	+	+	-
4	+	+	-	+	+	-	+	-
5	+	+	+	+	-	-	-	+
6	+	+	-	-	+	+	-	+
7	+	-	-	+	-	+	+	+
8	+	-	+	-	+	-	+	+

всего $16 \cdot 4 \cdot 10 = 640$ попыток зажигания. В соответствии с этим была реализована дробная реплика матрицы планирования полного факторного эксперимента (ПФЭ) типа 2^{7-4} и обратная ей матрица, полученные согласно правилам построения дробных реплик от матрицы планирования ПФЭ. Так как при применении дробных реплик линейные эффекты смешиваются с эффектами взаимодействий, то для того, чтобы определить систему смешивания, нужно знать определяющие контрасты и генерирующие соотношения. В табл. 21 и 22 приведены обе матрицы планирования. Они заданы следующими определяющими контрастами:

- 1) $1 = x_1 x_2 x_4$; $1 = x_1 x_2 x_5$; $1 = x_2 x_3 x_6$; $1 = x_1 x_2 x_3 x_7$
 2) $1 = x_1 x_2 x_4$; $1 = -x_1 x_3 x_5$; $1 = -x_2 x_3 x_6$; $1 = -x_1 x_2 x_3 x_7$

Соответствующие им генерирующие соотношения будут:

- 1) $x_4 = x_1 x_2$; $x_5 = x_1 x_3$; $x_6 = x_2 x_3$; $x_7 = x_1 x_2 x_3$
 2) $x_4 = -x_1 x_2$; $x_5 = -x_1 x_3$; $x_6 = -x_2 x_3$; $x_7 = -x_1 x_2 x_3$

При проведении эксперимента опыты рандомизировали, т. е. очередность их выполнения определяли по таблице случайных чисел.

Так как фактор значим лишь в том случае, если значим коэффициент регрессии, стоящий при нем (Адлер и др., 1971), то для выявления факторов, оказывающих существенное влияние на зажигание горючего, мы провели проверку значимости коэффициентов регрессии при факторах. Коэффициенты регрессии находили по уравнению:

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ji}y_i}{N}, \quad (32)$$

где b_j — коэффициент регрессии при факторе; j — номер фактора; i — номер опыта; N — число опытов.

Проверку значимости каждого коэффициента, как это принято, проводили независимо от других.

Прежде всего находили дисперсию коэффициента регрессии. Она определяется по формуле:

$$S_{(b_j)}^2 = \frac{S^2(y)}{N}, \quad (33)$$

где $S_{(y)}^2$ — дисперсия параметра оптимизации, в данном случае вероятность загорания горючего (ВЗГ); N — число различных опытов (число строк матрицы — 8).

Из формулы следует, что дисперсии всех коэффициентов равны друг другу, так как они зависят только от ошибки опыта и числа опытов.

Доверительный интервал будет равен:

$$\Delta b_j = \pm t S(b_j). \quad (34)$$

Здесь t — табличное значение критерия Стьюдента; $S(b_j)$ — квадратичная ошибка коэффициента регрессии

$$S(b_j) = + \sqrt{S^2} b_j. \quad (35)$$

Согласно использованным матрицам планирования (табл. 21 и 22) и усреднения значений, полученных при обработке данных этих матриц, были найдены следующие значения коэффициентов регрессии и доверительного интервала:

$$b_0 = 5,1; \quad b_1 = 0,86; \quad b_2 = 2,01; \quad b_3 = 0,47; \quad b_4 = 0,88; \quad b_5 = 0,16; \\ b_6 = 0,19; \quad b_7 = 0,19; \quad \Delta b = 0,54.$$

Согласно правилам отбора значащих коэффициентов регрессии, для того чтобы коэффициент был значим, он должен быть больше доверительного интервала: в нашем случае более 0,54. Исходя из этого, для проведения дальнейших опытов были вы-

браны лишь те факторы, коэффициенты при которых оказались значимыми. Ими являются: скорость ветра (x_2), влажность горючего (x_1) и время горения частицы (x_4). Кроме того, для дальнейших исследований был взят и такой фактор, как начальный диаметр цилиндрика (x_3), вследствие того, что значение коэффициента при нем близко к значению доверительного интервала (0,54) и разница между ними находится в пределах ошибки.

Как можно видеть, все факторы, отобранные для проведения дальнейших опытов, независимые и управляемые, т. е. полностью удовлетворяют требованиям, предъявляемым к факторам при планировании эксперимента.

Вывод уравнений

Дальнейшие опыты для определения степени влияния каждого из значимых факторов на зажигание лесного горючего проводили в лаборатории. Как известно, большинство пожаров в лесу возникает при загорании проводников горения: мохово-лишайникового покрова, опада и подстилки. Поэтому в качестве зажигаемых горючих материалов были взяты: мох Шребера, кустистые лишайники рода кладония, ветошь вейника Лангсдорфа, опад из хвои сосны обыкновенной и листья из опада березы бородавчатой, размельченная гнилая древесина и опад из веточек сосны диаметром до 5 мм.

Опыты проводили согласно матрице планирования ПФЭ типа 2⁴. Числовое выражение факторов, как и в случае отсеивающего эксперимента, приводили к удобному масштабу и рассматривали на двух уровнях значений. Уровни и принятые интервалы их варьирования для каждого вида горючего приведены в табл. 23.

Как мы уже указали, кроме основных требований, предъявляемых к факторам при планировании эксперимента (управляемость, однозначность, совместимость и др.), они должны иметь реальную область определения. В силу этого интервалы варьирования такого фактора, как влагосодержание горючего, различны для разных видов горючего, так как равновесная влажность этих видов горючего бывает разной. Неодинаково у них и критическое влагосодержание загорания.

Для того чтобы опыты дали необходимую информацию, следует их проводить в таких условиях, при которых «параметр оптимизации», т. е. вероятность зажигания горючего (ВЗГ), не был равен ни 0 ни 100%. В противном случае отсутствует возможность количественной оценки степени влияния каждого из выбранных факторов. В соответствии с этими требованиями и были установлены уровни факторов и интервалы варьирования в табл. 23.

Для таких материалов, как мох Шребера и лишайники, опыты были проведены в два цикла. В первом цикле брали инициаторы зажигания (сосновые цилиндры) диаметром от 5 до 8 мм,

Уровни факторов и интервалы варьирования

Фактор	Уровень факторов			Интервалы варьи- рования
	-1	0	+1	

Мох Шребера

1-й цикл опытов (диаметр цилиндров 5—8 мм)

x_1 — влагосодержание горючего в % от веса в абсолютно сухом состоянии	9,0	8,0	7,0	1,0
x_2 — скорость ветра, м/сек	0,7	1,6	2,5	0,9
x_3 — первоначальный диаметр цилиндрической частицы, мм	5,0	6,5	8,0	1,5
x_4 — время, оставшееся до сгорания частицы в условиях падения в воздухе, сек	30	45	60	15

2-й цикл опытов (диаметр цилиндров 8—12 мм)

x_1	9,0	8,0	7,0	1,0
x_2	0,3	0,9	1,5	0,6
x_3	8,0	10,0	12,0	2,0
x_4	60	120	180	60

Лишайник кладония

1-й цикл опытов (диаметр цилиндра 5—8 мм)

x_1	14,0	10,0	6,0	4,0
x_2	0,7	1,6	2,5	0,9
x_3	5,0	6,5	8,0	1,5
x_4	30	45	60	15

2-й цикл опытов (диаметр цилиндров от 8—12 мм)

x_1	14,0	10,0	6,0	4,0
x_2	0,3	0,9	1,5	0,6
x_3	8,0	10,0	12,0	2,0
x_4	60	120	180	60

Веточка вейника

x_1	10,0	7,0	4,0	3,0
x_2	1,2	2,1	3,0	0,9
x_3	8,0	10,0	12,0	2,0
x_4	60	120	180	60

Опад из хвои сосны

x_1	12,0	8,0	4,0	4,0
x_2	1,8	2,4	3,0	0,6
x_3	8,0	10,0	12,0	2,0
x_4	60	120	180	60

Таблица 23 (окончание)

Фактор	Уровень факторов			Интервалы варьи- рования
	-1	0	+1	
Опад из листьев березы				
x_1	12,0	8,5	5,0	3,5
x_2	0,7	1,6	2,5	0,9
x_3	8,0	10,0	12,0	2,0
x_4	60	120	180	60
Размельченная гнилая древесина				
x_1	8,0	5,5	3,0	2,5
x_2	1,8	2,4	3,0	0,6
x_3	8,0	10,0	12,0	2,0
x_4	60	120	180	60
Опад из веточек сосны				
x_1	10,0	7,0	4,0	3,0
x_2	1,8	2,4	3,0	0,6
x_3	8,0	10,0	12,0	2,0
x_4	60	120	180	60

во втором — от 8 до 12 мм. Опыты проводили с 4-кратной повторностью. Процент случаев загорания (или ВЗГ) в каждом опыте подсчитывали по результатам из 20 наблюдений. Чтобы исключить влияние систематических ошибок, вызванных внешними условиями, опыты рандомизировали во времени. При проведении эксперимента определяли ошибки параллельных (повторных) опытов. Для этого использовали дисперсию (S^2)

$$S^2 = \frac{\sum_1^n (y_q - \bar{y})^2}{n-1}, \quad (36)$$

где $y_q - \bar{y}$ — отклонение результата любого опыта от среднего арифметического; $n-1$ — число степеней свободы, равное количеству опытов минус единица.

Отсюда находим квадратичную ошибку (S).

$$S = \sqrt{\frac{\sum_1^n (y_q - \bar{y})^2}{n-1}}. \quad (37)$$

Для определения бракованных (неудачных) опытов использовали критерий Стьюдента.

Дисперсию параметра оптимизации ВЗГ, т. е. дисперсию всего эксперимента ($S_{(y)}^2$), получали в результате усреднения дисперсий всех опытов

$$S_{(y)}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{q=1}^n (y_{iq} - \bar{y}_i)^2}{N(n-1)}, \quad (38)$$

где $i=1, 2, \dots, N$; $q=1, 2, \dots, n$.

Проверку однородности дисперсий производили с помощью критерия Фишера (F). Он представляет собой отношение большей дисперсии к меньшей.

После проведения эксперимента производили расчет коэффициентов регрессии, так как коэффициенты при независимых переменных указывают на силу влияния факторов. Коэффициенты рассчитывали по формуле (32).

В табл. 24 приведены кодированные факторы и сочетания их, т. е. условия опытов, проведенных для выяснения степени влия-

Таблица 24

Зависимость частоты загорания разных видов горючего от сочетания факторов

Номер опыта	Кодированные условия значения факторов и их сочетаний	Значения параметра оптимизации ВЗГ						
		мох Шребера		лишайник кладония		ветошь вейника	хвоя сосны	листья березы
		y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7
		Диаметр цилиндра, мм						
		5—8	8—12	5—8	8—12	5—12	5—12	5—12
1	(1)	1,0	1,5	1,0	1,8	1,5	2,8	1,0
2	<i>a</i>	3,0	5,0	2,8	4,8	5,0	7,0	6,2
3	<i>b</i>	16,0	8,5	15,8	9,5	9,2	11,2	13,0
4	<i>ab</i>	18,0	13,5	17,0	11,5	13,8	14,0	16,2
5	<i>c</i>	1,2	2,5	1,5	2,0	1,5	2,8	1,2
6	<i>ac</i>	3,2	5,0	3,0	5,0	6,0	6,2	6,8
7	<i>bc</i>	16,2	9,2	15,8	9,5	8,2	11,8	13,5
8	<i>abc</i>	18,6	16,0	17,8	14,2	14,2	14,5	16,8
9	<i>d</i>	2,8	5,5	2,5	5,5	6,0	5,5	6,2
10	<i>ad</i>	5,2	8,5	5,2	9,0	9,0	8,5	9,2
11	<i>bd</i>	19,0	14,0	18,0	14,0	13,2	13,8	16,0
12	<i>abd</i>	19,2	17,5	18,2	17,0	17,0	18,0	18,0
13	<i>cd</i>	2,8	6,2	3,0	5,8	6,0	5,8	7,0
14	<i>acd</i>	5,5	10,5	6,0	11,0	9,0	9,5	9,0
15	<i>bcd</i>	13,7	16,5	17,5	15,8	13,5	14,2	17,2
16	<i>abcd</i>	19,5	18,5	19,2	19,0	19,0	19,0	18,5

Кoeffициенты регрессии, характеризующие процессы загорания различных видов горючего

Кoeffициент регрессии	Мох Шребера		Кладония		Ветوشь вейника	Хвоя сосны	Листья березы
	Диаметр цилиндра, мм						
	5—8	8—12	5—8	8—12	5—12	5—12	5—12
B_0	10,62	9—91	10—26	9,75	9,52	10,28	11,00
B_1	0,92	1,91	0,89	1,69	2,11	1,81	1,59
B_2	7,53	4,31	7,14	4,16	4,02	4,23	5,16
B_3	0,09	0,66	0,23	0,53	0,17	0,19	0,25
B_4	0,96	2,25	0,95	2,47	2,08	1,50	1,66
B_{12}	-0,24	0,25	-0,23	-0,16	0,36	0,00	-0,37
B_{13}	0,02	0,03	0,14	0,34	0,27	0,03	-0,09
B_{14}	-0,16	-0,31	0,08	0,09	-0,20	0,16	-0,56
B_{23}	0,00	0,19	-0,05	0,19	0,05	0,13	0,09
B_{24}	0,01	0,16	-0,11	0,25	0,08	0,28	-0,37
B_{34}	-0,07	0,13	0,02	0,13	0,11	0,16	0,03
B_{123}	-0,02	0,00	0,14	0,13	0,14	0,03	0,00
B_{124}	-0,29	-0,47	-0,23	-0,25	0,05	0,23	0,16
B_{134}	0,03	-0,06	0,08	0,00	-0,05	0,13	-0,12
B_{234}	—	-0,09	-0,05	-0,09	0,23	-0,09	0,06
B_{1234}	—	-0,34	0,02	-0,22	0,08	0,06	0,03

ния каждого из учетных факторов на ВЗГ и для вывода уравнений. Числа таблицы означают среднее число случаев загорания горючего из 20 попыток загорания или частоту загорания. Дисперсии частоты загорания имели следующие значения:

Обозначение горючего	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7
Дисперсии	0,77	1,24	1,30	1,19	1,94	1,43	1,37

В табл. 25 приведены коэффциенты регрессии, характеризующие процессы загорания различных видов горючего (b_1, b_2 и т. д. есть коэффциенты при x_1, x_2 и т. д., b_0 —свободный член в уравнении регрессии). Хотя после вычисления коэффциентов можно составить уравнение регрессии, но полученные результаты нельзя обсуждать и тем более применять, пока они не проверены. Для проверки пригодности полученных результатов проводится регрессионный анализ, который включает проверку адекватности модели и проверку значимости коэффциентов.

Проверку адекватности модели мы делали по формуле:

$$F = \frac{S_{ag}^2}{S^2(y)}, \quad (39)$$

а дисперсию адекватности находили по уравнению:

$$S_{ag}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N n_i (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2}{f}, \quad (40)$$

где N — число различных опытов (число строк матрицы); n_i — число параллельных опытов в i -й строке матрицы (число повторностей в одном варианте опыта); \bar{y}_i — среднее арифметическое из n параллельных опытов; \hat{y}_i — предсказанное по уравнению значение в этом опыте; f — число степеней свободы.

Проверку значимости коэффициентов осуществляли построением доверительного интервала. Он получился равным 0,7. Так как коэффициенты при всех учтенных факторах больше доверительного интервала, то все они значимы, а коэффициенты при взаимодействии факторов незначимы.

Теперь мы имеем возможность по табл. 25 составить и рассмотреть уравнения регрессии:

$$y_1 = 10,62 + 0,92 x_1 + 7,53 x_2 + 0,96 x_4;$$

$$y_2 = 9,91 + 1,91 x_1 + 4,31 x_2 + 0,66 x_3 + 2,25 x_4;$$

$$y_3 = 10,26 + 0,89 x_1 + 7,14 x_2 + 0,95 x_4;$$

$$y_4 = 9,75 + 1,69 x_1 + 4,16 x_2 + 0,58 x_3 + 2,47 x_4;$$

$$y_5 = 9,52 + 2,11 x_1 + 4,02 x_2 + 2,08 x_4;$$

$$y_6 = 10,28 + 1,81 x_1 + 4,08 x_2 + 1,50 x_4;$$

$$y_7 = 11,00 + 1,59 x_1 + 5,16 x_2 + 1,66 x_4.$$

Расчеты по уравнениям для разных видов горючего (y_1 — y_7) показали, что линейные модели процесса зажигания лесного горючего оказались адекватными для всех испытанных видов горючего при 5%-ном уровне значимости. Рассматривая полученные уравнения, можно видеть, что наибольшее влияние на зажигание напочвенного покрова оказывает ветер, так как во всех случаях коэффициенты при x_2 значительно превышают коэффициенты при других членах уравнения.

Влияние остальных факторов рассмотрим отдельно для каждого вида горючего.

При зажигании мха Шребера угольками, время горения которых не превышает одной минуты, такие факторы, как влажность горючего и время горения, оказывают примерно одинаковое влияние. При зажигании же частицами с продолжительностью горения до 3 мин на втором месте после ветра оказывается время горения и только на третьем — влажность горючего. В последнем случае играет роль, по-видимому, то обстоятельство, что угольки большого размера выделяют большее количество тепла, что и обеспечивает более успешное зажигание горючего.

При зажигании горящими частицами с большим временем горения значащим оказывается и коэффициент при x_2 (первоначальный диаметр). Очевидно, количество тепла, выделяющееся из частицы с большим первоначальным диаметром, несколько превышает количество тепла, освобождающееся в единицу времени из частицы меньшего первоначального диаметра. Получающийся излишек тепла оказывается достаточным для некоторого повышения процента случаев загорания горючего. При зажигании лишайников наблюдается та же картина.

При зажигании листьев березы, хвои сосны и ветоши вейника, в основном, сохранялась указанная закономерность расположения факторов по степени их влияния на зажигание слоя горючего. Однако влияние изменения первоначального диаметра цилиндрика на успешность зажигания этих видов горючего не прослеживается. Это можно объяснить меньшей пористостью горючего, а следовательно, и меньшей чувствительностью горючего к слабому изменению теплового потока. По-видимому, этим же объясняется и то, что, несмотря на использование в качестве источников загорания частичек с временем горения до 3 мин, коэффициенты при x_2 для ветоши вейника и для листьев березы равны коэффициентам при x_1 , а для хвои сосны коэффициенты при x_2 даже несколько меньше коэффициента при x_1 (см. уравнения).

При проведении опытов по зажиганию гнилой размельченной древесины согласно матрице планирования ПФЭ, естественно, наблюдалось, что при любом сочетании испытываемых факторов этот вид горючего горит только в беспламенном режиме. Появления пламенного горения в исследованной области определения факторов не наблюдалось.

Горючее, представленное веточками сосны диаметром от 0,3 до 0,5 см, при исследованных значениях факторов не загорало.

Контрольные опыты

Для проверки пригодности уравнений регрессии, предназначенных для определения вероятности загорания различных видов горючего от горящих частиц, были проведены контрольные лабораторные опыты. Результаты этих опытов не были использованы для построения модели явления. Но методика проведения опытов была такой же, как и при проведении экспериментов для построения моделей. Число наблюдений в каждом опыте равнялось 10. При постановке опытов для построения модели загорания мха Шребера опыты проводили с трехкратной повторностью. При проверке же моделей для определения вероятности загорания других видов горючего мы ограничились однократными опытами, состоящими из 10 попыток зажигания каждый.

В табл. 26 представлены результаты контрольных зажиганий, проведенных в лаборатории для каждого вида горючего

Таблица 26. Сопоставление результатов контрольных опытов с вычисленной вероятностью загорания горючего (ВЗГ) (в %)

Происхождение данных	Кодированные условия — значения факторов и их сочетаний															
	(1)	a	b	ab	c	ac	bc	abc	d	ad	bd	abcd				
Мох Шребера																
Диаметр цилиндра 5—8 мм																
У ₁	3,3	10,0	73,5	86,7	6,7	16,7	77,7	90,0	13,3	26,7	90,0	93,3	10,0	30,0	86,7	96,7
У ₁	4,7	14,8	79,5	91,0	6,4	16,8	84,0	92,6	14,2	26,4	94,5	96,5	13,3	27,0	94,6	97,4
Диаметр цилиндра 8—12 мм																
У ₂	0,0	20,0	30,0	70,0	10,0	30,0	40,0	90,0	20,0	50,0	70,0	70,0	40,0	50,0	80,0	100,0
У ₂	7,5	25,4	42,2	67,5	12,6	25,4	46,2	80,0	27,4	42,5	70,0	87,5	34,2	52,6	82,5	92,6
Лишайник кладония																
Диаметр цилиндра 5—8 мм																
У ₃	10,0	10,0	70,0	80,0	0,0	10,0	70,0	90,0	10,0	30,0	100,0	90,0	20,0	30,0	80,0	100,0
У ₃	4,9	13,6	78,8	84,0	7,6	15,4	78,9	88,9	12,3	26,0	89,9	91,4	15,2	30,4	87,5	96,5
Диаметр цилиндра 8—12 мм																
У ₄	0,0	20,0	40,0	50,0	10,0	30,0	50,0	80,0	30,0	50,0	70,0	80,0	20,0	50,0	80,0	90,4
У ₄	8,7	23,8	47,5	57,6	5,0	25,0	47,4	71,3	27,4	45,4	73,8	85,0	28,7	55,0	73,8	95,0
Веточь вейника																
Диаметр цилиндра 5—12 мм																
У ₅	0,0	30,0	60,0	70,0	10,0	40,0	40,0	80,0	30,0	60,0	80,0	80,0	30,0	40,0	70,0	90,0
У ₅	7,6	25,0	46,2	68,8	7,4	30,0	44,2	71,3	30,0	45,0	66,3	85,4	36,0	45,0	67,5	95,4
Опад из хвои сосны																
Диаметр цилиндра 5—12 мм																
У ₆	10,0	40,0	50,0	70,0	0,0	20,0	60,0	70,0	30,0	50,0	60,0	90,0	40,0	50,0	80,0	100,0
У ₆	14,2	35,4	55,7	69,6	14,2	31,4	58,3	71,9	27,0	42,0	69,2	90,3	28,2	47,1	71,7	95,6
Опад из листьев березы																
Диаметр цилиндра 5—12 мм																
У ₇	10,0	20,0	60,0	80,0	0,0	30,0	60,0	80,0	30,0	40,0	70,0	100,0	40,0	50,0	80,0	90,0
У ₇	5,0	34,2	65,0	81,2	6,3	33,7	67,5	83,8	31,3	46,0	81,0	91,0	35,0	45,0	80,0	90,0

значения ВЗГ (y) для этих же видов горючих материалов, рассчитанные с помощью математической модели. В обоих случаях для сопоставимости результатов величина сравниваемых значений дана в процентах.

При рассмотрении табл. 26 можно видеть, что расчетные данные достаточно близки к экспериментальным. Особенно хорошее согласие между ними наблюдается у зеленых мхов при диаметре цилиндрика от 5 до 8 мм, так как в этом случае контрольные опыты были проведены с трехкратной повторностью.

Для выяснения возможности использования выведенных уравнений при определении вероятности зажигания напочвенных горючих материалов горящими частицами при действительных пожарах были проведены опыты и в естественных условиях. Опыты проводили как под пологом леса, так и на открытых местах. Это было вызвано тем, что при проведении предварительных опытов загорания происходили наиболее часто в случае освещения горючего солнцем. Это явление есть известный результат дополнительного нагрева горючего лучами солнца.

Для защиты места проведения опытов от прямого солнечного света использовали тень, отбрасываемую кронами деревьев. Горючим были все упоминавшиеся ранее виды. Методика опытов, в основном такая же, как и в лаборатории. Изменения заключались в том, что влагосодержание горючего определяли после опыта по образцам, взятым перед опытом. Образцами для определения влагосодержания в опытах с лишайниками и зелеными мхами служил верхний слой горючего толщиной в 2 см, а у ветоши вейника — слой в 2—2,5 см. В опытах с хвоей сосны и листьями березы толщина слоя была принята в 1 см. Это соответствовало наибольшей глубине проникновения горячей частицы внутрь слоя горючего.

То обстоятельство, что влажность горючего определяли после проведения опытов, исключало возможность проведения факторного эксперимента в объеме матрицы его планирования. Поэтому вначале проводили опыты в натуре с произвольными значениями факторов, а затем подставляли эти значения в уравнения, и по ним рассчитывали вероятность загорания. Эту рассчитанную вероятность сравнивали затем с действительным процентом загорания. Всего было проведено 70 вариантов контрольных опытов с 4-кратной повторностью при 10 попытках зажигания в каждой повторности.

При расчете вероятности загорания горючего замену кодированных переменных натуральными осуществляли по формуле кодирования

$$x_j = \frac{\tilde{x}_j - x_{ja}}{I_j}, \quad (41)$$

где x_j — кодированное значение фактора; \tilde{x}_j — натуральное зна-

чение фактора; \bar{x}_{j0} — натуральное значение основного уровня; I_j — интервал варьирования; j — номер фактора.

В табл. 27 представлена ВЗГ в процентах, полученных при проведении проверочных опытов в лесу и при расчете по уравнениям регрессии. Данные табл. 27 подтверждают возможность использования полученных уравнений для расчета ВЗГ исследованных видов горючих материалов.

Хорошее сходство результатов наблюдается при проведении опытов под пологом леса. В опытах на открытом месте важную роль играет ранее неучтенный нами фактор радиационного нагрева солнцем. Особенно ярко это выражено в опытах с покровом из мха Шребера и лишайников в часы, когда солнце находится в зените. В эти часы разница в ВЗГ для мха и лишайника между освещенными и затемненными местами была свыше 20%, а для ветоши вейника, листьев березы и хвои сосны — менее 10%.

Результаты наблюдений дают основание полагать, что выведенные уравнения регрессии пригодны для расчета вероятности зажигания перечисленных видов лесного горючего под пологом леса. Для открытых же мест она будет несколько заниженной.

В связи с этим мы провели серию дополнительных опытов при влагосодержании горючего 8%, скорости ветра 0,7 м/сек и времени, оставшегося до сгорания горящей частицы, в 90 сек. Попытки зажигания производили при высоте стояния солнца в 11, 13 и 18 час и при затенении горючего тенью, отбрасываемой деревьями, по вышеописанной методике. Долю случаев загорания горючего в каждом опыте подсчитывали по результатам 10 попыток зажигания. Опыты проводили с пятикратной повторностью. В результате получены следующие данные по ВЗГ (в %):

	В тени	На солнце в 11 час	в 13 час	в 18 час
Мох Шребера	36±2,5	50±5,0	60±5,0	47±5,2
Лишайники	42±4,3	54±4,4	62±2,5	49±4,5

Из данных следует, что когда солнце находится в зените, число загораний при освещении солнцем больше числа загорания в тени у мха Шребера на 24%, а у лишайника — на 20%. В 11 и в 18 час это повышение у мха Шребера равно 14 и 11%, а у лишайника — 12 и 7% соответственно. Это можно объяснить большей отражательной способностью белого лишайника.

Кроме описанных, были проведены аналогичные опыты под пологом леса и на открытом месте при произвольных, но регистрируемых значениях влагосодержания горючего, скорости ветра, времени, оставшегося до полного сгорания зажигающей частицы, и времени дня (табл. 28).

Приведенные данные свидетельствуют о том, что степень влияния солнечной радиации на зажигания мха Шребера и

Результаты экспериментальной проверки уравнений регрессии
для вероятности загорания горючего (ВЗГ)

Значение факторов				Вероятность загораний, %		
x_1 , %	x_2 , м/сек	x_3 , мм	x_4 , сек	расчетная	фактическая	
					в лесу	на поляне
Мох Шребера						
9,0	0,7	5	30	6,1	2,5	17,4
8,0	1,0	7	60	25,0	21,0	42,5
7,1	2,0	8	60	79,0	70,0	100,0
8,0	1,6	6	40	52,0	52,5	67,5
7,0	2,5	8	60	100,0	97,5	100,0
7,6	1,2	10	130	69,0	62,5	87,5
8,0	0,7	10	90	36,8	40,0	52,5
7,0	0,5	9	120	33,5	30,0	52,5
7,2	1,5	12	180	93,0	90,0	100,0
Лишайник кладония						
8,8	0,7	5	30	7,3	5,0	10,0
8,1	1,6	8	40	49,2	55,0	72,5
7,3	1,0	12	30	25,7	35,0	47,5
7,1	1,0	10	50	33,0	27,5	47,5
7,1	2,5	12	60	96,0	92,5	100,0
8,9	0,3	8	60	5,0	10,0	20,0
8,3	0,9	10	120	46,0	40,0	60,0
7,5	0,3	9	130	33,0	35,0	55,0
8,0	0,5	10	140	38,8	42,5	47,0
7,2	1,5	12	180	91,5	97,5	100,0
Вегость вейника]						
5,0	1,2	8	60	24,2	17,5	30,0
4,8	2,1	10	120	55,0	65,0	70,0
9,1	1,5	12	70	18,0	15,0	22,0
7,3	1,5	8	90	27,8	22,5	30,0
4,5	3,0	12	180	87,0	80,0	92,5
Опад из листьев березы						
11,4	0,7	8	60	14,3	5,0	87,5
11,8	2,5	12	180	89,0	82,5	90,0
8,4	0,7	10	100	26,5	27,5	37,5
5,3	1,6	8	70	55,5	52,5	65,0
5,3	2,5	12	180	96,5	90,0	100,0
Опад из хвои сосны						
11,4	1,8	8	60	14,7	20,0	22,5
11,0	2,5	10	70	35,0	30,0	37,5
8,2	2,4	10	120	51,0	57,5	60,0
6,0	2,4	12	100	53,0	50,0	57,5
4,3	3,0	12	180	88,0	92,5	97,5

**Влияние освещенности солнцем на вероятность загорания горючего (ВЗГ)
по наблюдениям на местности**

Номер опыта	Фактор, влияющий на загорание				Процент случаев загорания		
	влагносо- держание, %	скорость ветра, м/сек	время, остав- шееся до сго- рания зажи- гающей частицы, сек	в тени	при освещении солнцем		
					в 11 час	в 13 час	в 18 час

Мох Шребера

1	8,9	0,9	60	28±3,7	44±4,9	54±6,0	46±5,0
2	7,2	0,3	120	40±4,5	—	58±5,8	48±4,4
3	8,1	1,5	60	58±5,2	68±3,7	74±4,0	65±4,3
4	7,5	0,6	180	56±5,1	70±4,5	78±5,8	67±5,1

Лишайник кладония

1	12,0	1,6	30	51±4,9	60±5,0	67±3,6	63±4,3
2	8,8	0,3	60	8±3,7	16±4,0	22±3,7	19±3,7
3	7,1	0,9	120	50±4,5	62±4,9	74±5,1	59±4,1
4	10,0	1,5	90	64±5,1	74±4,1	82±4,9	71±4,5
5	8,1	1,2	180	74±5,1	86±6,0	94±5,1	81±5,2

лишайника варьируется в тех же пределах, которые выявлены при неизменных значениях факторов. Все имеющиеся отклонения находятся в пределах ошибки опыта.

Следовательно, для определения ВЗГ в тени можно использовать найденные уравнения регрессии. При освещении же горючего солнцем в уравнении необходимо вводить поправки: с 13 до 15 час следует прибавлять 20%, а в промежутке от 10 до 19 час — 10%.

Из всех входящих в уравнения членов наиболее сложным для определения является влагосодержание горючего.

При использовании предлагаемых уравнений можно выражать влагосодержание горючего через обуславливающий его лесопожарный показатель засухи. Из таких показателей мы воспользовались комплексным показателем Нестерова (1968), который рекомендован сейчас для определения пожарной опасности на всей территории СССР:

$$\sum_{i=1}^n t(t - \tau), \quad (42)$$

где t — температура воздуха; τ — температура точки росы.

На основании данных, собранных во время проведения опытов, мы попытались установить, каким же значениям комплексного показателя соответствует влагосодержание верхнего активного слоя изучаемых видов горючего. Для этого взяли характерные для каждого вида горючего три ступени влажности: I —

Влагосодержание вида горючего по ступеням влажности (в %)

Вид горючего	Ступень влажности		
	I	II	III
Лишайники	14	10	6
Ветошь вейника	10	7	4
Мох Шребера	9	8	7
Опад из листьев березы	12	8,5	5
Опад из хвои сосны	12	8	4

Таблица 30

Комплексный показатель при достижении ступени влажности верхних слоев горючего (в тыс. единиц)

Вид горючего	Ступень влажности		
	I	II	III
Лишайники	0,2—0,5	0,5—2,0	>2,0
Ветошь вейника	0,5—1,5	1,5—3,0	>3,0
Мох Шребера	0,7—2,0	2,0—4,0	>4,0
Опад из листьев березы	1,0—3,0	3,0—4,5	>4,5
Опад из хвои сосны	1,0—3,0	3,0—5,0	>5,0

максимальную, при которой горючее загоралось от искр; III—минимальную, наблюдавшуюся в опытах; II—среднюю между ними (табл. 29, 30).

Эти данные при определении вероятности загорания напочвенного покрова от горящих частиц позволяют использовать вместо влагосодержания горючего более легко определяемую величину лесопожарного показателя засухи (комплексного показателя).

Табл. 31 позволяет определять вероятность загорания горючего того или иного вида в зависимости от скорости ветра у его поверхности, от относительной влажности воздуха и времени, оставшегося до полного сгорания горячей частицы. Так как каждый из видов горючего является характерным для определенного типа леса, мы считаем возможным вероятность загорания указанных видов горючего считать и вероятностью загорания тех типов леса, для которых эти виды горючего характерны.

Выводы:

I. При зажигании напочвенного покрова горящими частицами вероятность загорания от упавших на него горящих частиц увеличивается при возрастании скорости ветра, при уменьшении влагосодержания горючего и при увеличении времени,

Вероятность загорания напочвенного покрова от горящих частиц

Скорость ветра, м/сек	Время горения угольков, сек																
	30	60	90	120	150	180	30	60	90	120	150	180	30	60	90	120	150

Мох Шребера

При величине лесопожарного показателя засухи (комплексного показателя)

700—2000

2001—4000

4001 и более единиц

Вероятность загорания, %

0—0,5	0	7	13	19	24	30	0	17	22	28	34	39	0	26	32	38	43	49
0,5—1,0	6	23	29	35	40	46	11	33	39	44	50	55	15	42	48	50	59	65
1,0—1,5	29	41	47	53	58	64	34	51	56	62	68	73	38	64	66	72	77	83
1,5—2,0	50	54	59	65	70	76	55	63	69	74	80	86	59	73	78	84	89	95
2,0—2,5	71	80	85	91	96	100	77	86	91	96	100	100	81	90	96	100	100	100

Лишайник кладония

При величине лесопожарного показателя засухи (комплексного показателя)

200—500

501—2000

2001 и более единиц

Вероятность загорания, %

0—0,5	0	7	13	20	26	32	0	16	22	28	34	40	1	24	30	36	43	49
0,5—1,0	6	23	29	35	41	48	11	31	37	44	50	56	15	40	46	50	58	64
1,0—1,5	28	40	46	52	58	65	33	48	55	61	67	73	37	57	63	69	75	81
1,5—2,0	48	52	58	64	70	77	53	60	67	73	79	85	57	69	75	81	87	94
2,0—2,5	68	77	83	89	94	99	72	82	87	93	98	100	77	86	91	96	100	100

Таблица 31 (окончание)

Скорость ветра, м/сек	Время горения угольков, сек															
	60	90	120	150	180	60	90	120	150	180	60	90	120	150	180	
Ветощь вейника																
При величине лесопожарного показателя засухи (комплексного показателя)																
	500—1500					1501—3000					более 3001 единиц					
	Вероятность загорания, %															
0,5—1,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1,0—1,5	7	12	17	22	27	17	22	28	33	38	27	33	38	43	49	
1,5—2,0	19	24	29	35	40	29	35	40	45	50	40	45	50	56	61	
2,0—2,5	30	35	41	46	51	41	46	51	56	62	51	57	62	67	72	
2,5—3,0	41	46	52	57	62	52	57	62	67	73	62	66	73	78	83	
Опад из хвои сосны																
При величине лесопожарного показателя засухи (комплексного показателя)																
	1000—3000				3001—5000				более 5001 единиц							
	Вероятность загорания, %															
1,0—1,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1,5—2,0	14	17	21	25	29	23	26	30	34	38	32	35	39	43	47	
2,0—2,5	29	33	37	41	44	39	41	46	49	53	47	51	55	59	62	
2,5—3,0	47	51	55	59	62	56	62	64	68	71	65	69	73	77	81	
Опад из листьев березы																
При величине лесопожарного показателя засухи (комплексного показателя)																
	1000—3000				3001—4500				4501 и более единиц							
	Вероятность загорания, %															
0—0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0,5—1,0	13	17	21	25	30	21	25	29	33	38	29	33	37	41	45	
1,0—1,5	29	33	37	41	45	37	41	45	49	53	45	49	53	57	61	
1,5—2,0	43	47	52	56	60	51	55	59	64	68	59	63	67	72	76	
2,0—2,5	57	61	66	70	74	65	69	74	78	82	73	77	82	86	90	

оставшегося до сгорания упавшей частицы, а также при освещении горючего солнцем.

2. Зависимость вероятности загорания от указанных факторов может быть выражена линейными уравнениями регрессии, по которым ее можно рассчитать с достаточно высокой точностью.

3. При определении вероятности загорания напочвенного покрова влагосодержание горючего можно выражать через лесопожарный показатель засухи.

4. Для оперативного определения вероятности загорания напочвенного покрова от горящих частиц может быть использована таблица, составленная из данных, рассчитанных по уравнениям регрессии.

Пятнистые загорания на пожарах

В результате проведенных исследований мы разработали метод определения вероятности пятнистых загораний перед фронтом пожара при заданных условиях и те расстояния, на которых они могут возникать. Этот метод состоит из выполнения следующих операций.

1. Определив интенсивность горения на кромке фронта пожара, далее по уравнению $Y = 1,3 \cdot X^{0,334}$ или по графику (см. рис. 5), находим скорость конвекции на высоте древостоя, а по скорости конвекции определяем максимальные размеры частиц, поднимаемых потоком.

2. Зная величину отношения ширины кромки к ее длине и определив высоту точки перегиба конвекционного потока, по табл. 18 и 19, находим время, необходимое на подъем горящих частиц до этой высоты и для приземления частиц.

3. Посредством умножения времени падения на среднюю скорость ветра в промежутке между точкой перегиба конвекционного потока и верхней границей полога древостоя определяем расстояние переноса горящих частиц по горизонтали, а следовательно, и место их приземления.

4. Зная время, остающееся до полного сгорания приземлившейся частицы данного размера по табл. 31, определяем, может ли напочвенный покров в месте приземления загореться от такой частицы.

Для опытной проверки этого метода мы использовали наблюдения за лесными пожарами с земли и с летательных аппаратов, проведенные в Енисейском, Богучанском, Кежемском районах и в Эвенкийском национальном округе в период с 1972 по 1975 г. Участки, на которых были проведены наблюдения с земли и с воздуха, представлены сосновыми и сосново-лиственничными древостоями III—IV бонитета (см. табл. в приложении I).

При обследовании пожаров с летательных аппаратов определяли наличие или отсутствие загораний за внешними пределами кромки фронта. На крупномасштабной карте отмечали местопо-

ложения загораний относительно фронта, зарисовывали конфигурацию всего пожара. В это же время на действующий пожар высаживалась группа наблюдателей, в задачу которой входило определение с помощью расставленных вешек скорости продвижения фронта пожара, его ширины, длины, высоты пламени, затем количества сгорающего горючего по разнице запаса до и после пожара, наличия подъема вверх кусочков горючего, а также фиксирование загораний перед кромкой пожара. Кроме того, во время обследования пожара определяли: температуру воздуха и его относительную влажность психрометром Ассмана, скорость ветра на высоте 2 м — анемометром Фусса, а также высоту и форму видимого конвекционного потока — с помощью угломерного инструмента.

Определение наличия загораний производили путем обследования 50-метровой полосы, перпендикулярной тому участку кромки фронта пожара, на котором проводили наблюдения. Такая ширина полосы соответствовала наиболее интенсивно горящей части кромки, которая редко превышала 100 м. Кроме того, это обеспечивало надежность обнаружения возникших на ней загораний. Расстояние обнаруженных загораний от горящей кромки определяли непрерывным промером обследуемой полосы.

Вертикальный температурный градиент ПГСА и скорость ветра на больших высотах получали от ближайших метеостанций.

Так как скорость газового потока увеличивается с увеличением интенсивности горения на кромке пожара, а интенсивность горения на разных участках кромки варьирует, то над крупными пожарами возникает несколько отдельных конвекционных потоков (Williams e. a., 1970; Lee, 1972). Возможность конвекционного переноса горящих частиц при этом будет наиболее вероятна на том участке кромки, где интенсивность горения наибольшая. Поэтому для наблюдений на каждом из пожаров мы выбирали наиболее интенсивно горящие участки фронта пожара.

В таблице приложения 1 приведены характеристики погоды во время наблюдений и фронта пожара. Из содержания таблицы выясняется, что перед фронтом пожаров, интенсивность горения которых недостаточна для создания конвекционного потока со скоростью подъема газа в нем выше 4 м/сек, пятнистых загораний нет. Пожары, скорость газового потока которых в пределах высоты древостоя превышает 4,0—4,5 м/сек, могут вызвать такие загорания. Однако, как можно заключить по данным наших наблюдений, большая скорость подъема газового потока не всегда сопровождается переносом горящих частиц (табл. 32).

Так, например, на участке № 7, несмотря на то, что скорость конвекции достигала 6,0 м/сек, пятнистых загораний перед его фронтом не было, хотя пожар происходил в засушливую погоду. Это обстоятельство мы объясняем следующим образом. Конвекционный поток этого пожара был направлен почти вертикально

Пятнистые загорания во время пожаров на опытных участках

Опытный участок	Условия возникновения загораний										Фактическое наличие загораний перед кромкой фронта пожара и их удаленность от кромки, м
	Угол наклона конвекционного потока от земли до точки перегиба, °	Высота точки перегиба, м	Скорость ветра на высоте перегиба конвекционного потока, м/сек	Скорость ветра на поверхности напочвенного покрова, м/сек	Преобладающий напочвенный покров	Влагосодержание верхнего слоя напочвенного покрова, %	Время, оставшееся до полного сгорания частицы горючего, сек	Вероятность зажигания напочвенного покрова для наиболее удаленного очага горения, %	Максимально возможное удаление загораний от кромки (расчетное), м		
1	75	600	5,0	—	Ветошь вейника	—	—	—	—	—	—
2	50	50	5,6	—	Ветошь вейника	—	—	—	150	108,73,70,56; ближе задымленные	
3	75	450	4,8	1,2	Мох Шребера	8,0	56	49	—	—	
4	60	70	6,8	2,4	Ветошь вейника	7,5	102	48	190	183,146,140,84,82; ближе нарастание числа загораний, задымлено	
6	65	60	6,2	2,2	Ветошь вейника	5,0	113	60	140	128,100,80,58; ближе 50 м около 10 загораний	
7	75	Перегиб на высоте 1100 м	—	—	Ветошь вейника	—	—	—	—	Дальние загорания отсутствуют, имеется несколько загораний в 50-метровой зоне у кромки пожара	
19	50	90	6,1	1,0	Мох Шребера	7,0	88	48	270	218,175,170,96,90; ближе задымление от многих загораний	
27	50	70	6,8	1,8	Ветошь вейника	5,0	102	47	185	160,120,95,80,75,60; ближе 50 м более 10 загораний	
28	75	Перегиба нет, высота потока 940 м	—	—	Ветошь вейника	—	—	—	—	Дальние загорания отсутствуют, имеется несколько загораний в 50-метровой зоне у кромки фронта пожара	

Таблица 32 (окончание)

Опытный участок.	Условия возникновения загораний									
	Угол наклона конвекционного потока от земли до точки перегрева, °	Высота точки перегиба, м	Скорость ветра на высоте перегиба конвекционного потока, м/сек	Скорость ветра на поверхности напочвенного покрова, м/сек	Преобладающий напочвенный покров	Влажосодержание верхнего слоя напочвенного покрова, %	Время, оставшееся до полного сгорания частицы горючего, сек	Вероятность загорания напочвенного покрова для наиболее удаленного очага горения, %	Максимально возможное удаление загораний от кромки (расчетное), м	Фактическое наличие загораний перед кромкой фронта пожара и их удаленность от кромки, м
29	50	50	6,1	0,8	Мох Шребера	7,0	56	42	160	
34	65	80	6,7	1,6	Ветошь вейника	5,5	102	47	210	160,110,90,75,65,60; ближе 50 м около 10 загораний
36	60	100	7,0	2,3	Ветошь вейника	5,0	124	62	340	296,234,202,181,170,130,128,119,113,74,70,68,62; ближе задымлено
37	65	40	4,9	1,1	Мох Шребера	7,5	34	41	125	115,70,66,60; ближе к кромке выше 10 загораний
38	60	70	6,5	1,9	Ветошь вейника	4,5	114	49	150	114,98,84,72,70,58,55; ближе до 10 загораний
44	45	400	5,6	1,7	Ветошь вейника	6,0	77	43	270	80,74,56,52,50,45,40; ближе к кромке замечено 6 горящих частиц
45	45	400	5,6	1,6	Ветошь вейника	6,0	70	42	150	110,75,65,60,56,52; ближе к кромке замечено 8 горящих частиц
46	45	260	5,1	0,7	Мох Шребера	7,0	59	42	125	40,35; сильное задымление
47	40	350	6,1	1,8	Ветошь вейника	5,5	110	48	380	150,126,96,85,78,71,64,58; ближе к кромке замечено 5 горящих частиц

и терял эту структуру лишь на высоте 1100 м. Следовательно, падение горящих частиц могло происходить лишь с этой высоты, так как они не могут покинуть вертикальный поток вследствие существующего подтока воздуха в него. На существование такого подтока указывают Bond (1946); Ebert (1963); Coputrujan (1964); Э. Н. Валендик (1968).

Кроме того, максимальное время горения частиц, которые могут быть увлечены вверх при вертикальной скорости потока на высоте древостоя 6,0 м/сек, равно 280 сек. Но все это время частица находится в потоке, где и сгорает.

Пожары, конвекционные потоки которых наклонны, вызывают пятнистые загорания перед фронтом пожара. При рассмотрении данных табл. 32 (участки 2, 4, 6, 19, 27, 29, 34, 35, 36, 37, 38) можно заключить, что рассчитанное максимальное удаление загораний от кромки фронта близко к действительному удалению возникших загораний. Как правило, расчетное расстояние немного больше фактического. Максимальное отклонение расчетного расстояния от фактического не превышает 50 м, а наиболее характерное — 30 м.

Если сопоставить время, оставшееся до сгорания частиц (табл. 32), вызывающих загорания на максимальных расстояниях, с величинами значений факторов, влияющих на зажигание напочвенного покрова (см. табл. 31), то вероятность зажигания напочвенного покрова для таких частиц колеблется в пределах от 41 до 65%.

По мере приближения к фронту число загораний возрастает. Это объясняется, во-первых, тем, что на участок, расположенный ближе к фронту, горящие частицы падают в течение большего времени, и тем, что на высоте перегиба потока происходит падение частиц различного первоначального диаметра, а следовательно, и разного веса. Более тяжелые падают ближе, чем легкие. Так как более крупные частицы успешнее зажигают напочвенный покров, число загораний ближе к фронту возрастает. Во-вторых, из наклонной конвекционной колонки горящие частицы за счет своего вертикального проскальзывания могут выпасть раньше, не достигнув точки перегиба.

При анализе распределения количества загораний, возникших на различных расстояниях перед кромкой фронта пожаров, можно сделать следующие выводы.

1. Максимальное удаление загораний соответствует расстоянию, рассчитанному теоретически, для частиц, зажигающих напочвенный покров при данных условиях с вероятностью не меньше 50%.

2. Количество загораний растет по мере приближения к кромке пожара.

3. Если на дальней трети максимального расстояния от кромки пожара эти загорания единичны, то на второй трети их обычно до десятка, а на первой трети они носят массовый характер.

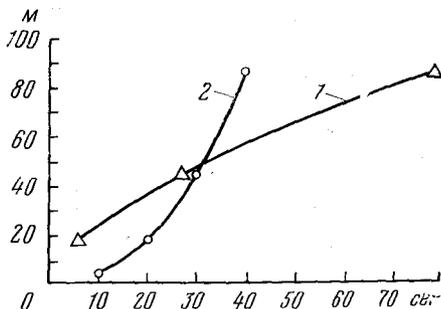
Пятнистость характерна и для таких пожаров, мощные конвекционные потоки которых наклонены к горизонту, но не имеют резко выраженной точки перегиба.

Существует ли какая-то закономерность в распределении загораний перед фронтом таких пожаров?

Из данных табл. 32 следует, что угол наклона конвекционного потока пожара № 45 равнялся 45° . Скорость подъема газов в нем на высоте древостоя равна 5,0 м/сек. Максимальное время горения частиц, увлекаемых вверх, 120 сек, а минимальное время существования горячей частицы на поверхности земли, необходимое для зажигания напочвенного покрова, 30 сек. Следовательно, на подъем частицы и падение ее остается 90 сек.

Рис. 20. Зависимость времени подъема и падения горящего соснового цилиндра диаметром 7 мм от высоты при скорости конвекции на высоте древостоя 5,0 м/сек.

1, 2 — точки, обозначающие соответственно время подъема и падения горячей частицы



По графику (рис. 20) можно определить, что на подъем горячей частицы затрачивается 36 сек, а на падение — 54 сек. Максимальная высота выпадения таких частиц из конвекционного потока равна 70 м. Так как скорость ветра на высоте 70 м равна 4,9 м/сек, то средняя скорость, с которой горящая частица должна перемещаться по горизонтали, будет равна $(4,9 + 4,8) / 2$ м/сек, а точка ее приземления должна находиться от фронта пожара на расстоянии $4,85 \cdot 54 = 260$ м.

Однако максимальное удаление загораний от фронта пожара равно 110 м. Из приведенного расчета вытекает, что частицы с временем догорания, равным 30 сек, и вероятностью зажигания напочвенного покрова 15% не зажигают напочвенный покров. Приблизительное время падения частицы можно найти путем деления расстояния от фронта пожара до точки падения на скорость ветра. Это время равно $110 : 4,85 = 23$ сек.

По графику (рис. 20) находим высоту падения и время подъема частицы на эту высоту. Затем, вычтя из полного времени горения частицы время ее подъема и падения, получим время, оставшееся до ее сгорания. Оно равно $120 - (27 + 23) = 70$ сек. По табл. 31 находим вероятность зажигания такой частицей напочвенного покрова, она равна 42%.

Наиболее удаленные загорания, носящие единичный характер, во всех рассмотренных случаях происходят от частиц с вероятностью зажигания напочвенного покрова, равной 40—50%,

т. е. как и при пожарах, конвекционные потоки которых имеют резко выраженную точку перегиба. Характер распределения загорания у пожаров с равномерным наклоном конвекционного потока подчиняется такой же закономерности, что и у пожаров, потоки которых имеют резко выраженную точку перегиба.

Итак, для того чтобы найти максимальное удаление загораний от фронта пожара, конвекционный поток которого наклонен к земле ветром, необходимо следующее.

По высоте перегиба и углу наклона конвекционной колонки определить горизонтальную проекцию того пути, который совершает частица внутри колонки до выпадения из нее.

Определить интенсивность пожара и скорость конвекции.

По скорости конвекции определить максимальные размеры горящих частиц, поднимаемых потоком.

По табл. 31 определить время, потребное для зажигания напочвенного покрова при данных условиях с вероятностью 50%.

Из полного времени горения вычесть время зажигания покрова, найти максимально допустимое время, которое может затратить на подъем и падение зажигающая частица.

По табл. 18 и 19 определить время, фактически приходящееся на падение частицы, и высоту, с которой частица начинает падать, если это время меньше максимально допустимого, то определить среднюю скорость ветра в промежутке от высоты падения до верхней границы полога древостоя, а по скорости ветра и времени падения — горизонтальную проекцию пути падения частицы, сложив ее с горизонтальной проекцией пути частицы внутри колонки, найти искомую величину — максимальное удаление загораний от фронта пожара.

Таким образом, в результате проведения наблюдений за возникновением пятнистых загораний на лесных пожарах выявлено:

1. Пятнистые загорания возможны, когда интенсивность горения на кромке фронта пожара близка к 40 тыс. ккал/м·мин и выше.

2. При выполнении этого условия пожар может носить характер пятнистого, если:

а) высота перегиба конвекционного потока не так велика, чтобы падающие с нее частицы сгорали в воздухе, или

б) конвекционный поток не имеет точки перегиба и сильно наклонен ветром;

в) время, оставшееся до полного сгорания частицы, таково, что обеспечивает возможность зажигания напочвенного покрова при данных условиях с вероятностью, имеющей практическое значение.

3. Наибольшее удаление загораний при условиях, наиболее характерных для пятнистых пожаров, редко превышает 300 м; наиболее характерное удаление равно 100—200 м.

4. Число загораний резко возрастает, по мере приближения к фронту пожара.

СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КРУПНЫХ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

Обычно скорость лесного пожара определяется скоростью продвижения его кромки. Но в случае пятнистой формы распространения горения, которая нередко наблюдается на крупных пожарах, скорость самого пожара может намного превышать скорость продвижения его кромки за счет возникновения новых очагов перед фронтом.

Скорость продвижения кромки фронта низового пожара, как правило, не превышает 7 м/мин (400 м/час). И. В. Овсянников (1969) по результатам обработки статистических материалов определяет среднемаксимальную скорость для хвойных молодняков и сухих типов леса в 4 м/мин днем и 2,5 м/мин ночью; в сырых типах леса скорость продвижения кромки снижается в 5—10 раз. На открытых захламленных местах (например, на вырубках) при сильном ветре низовой пожар может продвигаться со скоростью до 14 м/мин (Молчанов, 1940). Подробная таблица скоростей дана в «Указаниях по обнаружению и тушению лесных пожаров» (1976).

Оценить скорость продвижения кромки низового пожара довольно просто по высоте пламени, поскольку между ними существует тесная взаимосвязь, отмечавшаяся ранее Г. П. Телициным. По нашим данным можно составить следующий ряд:

Высота пламени, м	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Скорость распространения, м/мин	0,6	1,3	2,2	3,6	5,4	7,0

Нужно учитывать, что при скорости 3—4 м/мин лесной пожар может достичь крупных размеров (более 200 га) за 10—14 час.

В описаниях крупных пожаров нередко упоминаются скорости в 10—15—20 км/час (Шлыков, 1927; Нестеров, 1939; и др.). Возможно, что на некоторых участках фронта пожара в какие-то отдельные моменты скорость и достигает подобных величин (за счет пятнистого распространения при сильных порывах ветра или на крутых склонах), но в среднем скорость даже у очень интенсивных пожаров бывает не более 3 км/час. Например, Бродфордский пожар в Австралии продвигался со скоростью 0,5 км/час.

По Миссбаху (Mißbach, 1972), скорость крупных пожаров 0,5—1,7 км/час. При вспышке лесных пожаров 1972 г. в центральных областях РСФСР в период самых сильных ветров скорость распространения пожаров достигала 15—20 м/мин, а в некоторых случаях — и до 30 м/мин (1,8 км/час).

Так, 18 августа в Киржачском ЛПХ Владимирской области фронт пожара за 4 час прошел 6 км. Пожар остановили лишь на трассе железной дороги Киржач — Александров. Средняя скорость продвижения фронта этого пожара была 25 м/мин (1,5 км/час).

В Макарьевском лесхозе Костромской области фронт пожара в Юровском лесничестве 26 августа прошел 14 км за 12 час, т. е. он шел в среднем со скоростью свыше 19 м/мин. Другой пожар в этом же лесничестве, возобновившийся 26 августа, прошел 13 км за 14 час, т. е. в среднем по 15 м/мин.

Лесной пожар в Куярском лесхозе Марийской АССР, возобновившийся 25 августа, прошел за 20 час 24 км, т. е. он шел со средней скоростью 20 м/мин (1,2 км/час). Такие скорости распространения фронта пожара в этот период были обычными.

Следует заметить, что ни в одном из перечисленных случаев силами тушителей фронт пожара не был остановлен. И это не случайно. До сих пор многие считают, что с подобной скоростью может продвигаться кромка фронта пожара, и все внимание сосредоточивают на ней. Но известно, что по напочвенному покрову в лесу горение с такой скоростью распространяться не может. Эта скорость распространения пожара определяется не продвижением его кромки, а образованием очагов горения перед кромкой в результате переноса горящих частиц. Новые очаги горения сливаются и образуют конвекционные потоки со скоростью, достаточной для подъема горящих частиц и переноса их на сотни метров перед вновь возникшим фронтом пожара. Вот это явление и необходимо учитывать при борьбе с крупными лесными пожарами. Попытки создавать заградительные минерализованные полосы шириной 60 м и более во многих случаях не дали положительных результатов. Горящие частицы свободно перелетали через такие полосы.

Выводы

В результате проведенных исследований выяснено, что определяющими факторами формирования конвекционного потока пожара являются: а) интенсивность горения и б) скорость ветра у поверхности земли.

При любом состоянии пограничного слоя атмосферы конвекционный поток лесного пожара может сформироваться лишь при условии, если скорость превращения тепловой энергии пожара в кинетическую энергию газового потока больше, чем скорость потока кинетической энергии в поле ветра.

Основным фактором, влияющим на изменение скорости газового потока до высоты древостоя, является интенсивность пожара, которую можно определить достаточно точно по высоте пламени:

Высота пламени, м	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Интенсивность пожара, тыс. ккал/м·мин	1	8	22	50	80	100

Зависимость скорости конвекции на высоте полога древостоя (y) от интенсивности пожара (x) описывается степенной функцией $y=1.3 \cdot x^{0.334}$. Над пологом древостоя скорость конвекции увеличивается приблизительно до $\frac{1}{4}$ — $\frac{1}{3}$ общей высоты потока

пожара. Зависимость скорости конвекции от высоты изменяется при варьировании отношения ширины кромки пожара к ее длине.

Установлено, что наиболее опасными в отношении создания очагов горения за пределами кромки лесного пожара являются цилиндрические кусочки сосновой древесины, затронутой гниением. Скорость газового потока, необходимая для подъема таких частиц, с увеличением начального диаметра цилиндров от 5 до 12 мм возрастает от 4,3 до 6,7 м/сек соответственно. Горение кусочков лесного горючего в условиях свободного полета происходит в беспламенном режиме.

Зависимость скорости падения частиц от продолжительности горения может быть описана уравнением параболы третьей степени. Вероятность загорания напочвенного покрова от упавших на него горящих частиц увеличивается при возрастании: а) скорости ветра; б) времени, оставшегося до сгорания упавшей частицы; в) освещения горючего солнцем и г) при уменьшении влагосодержания горючего. Зависимость вероятности загорания от этих факторов может быть выражена уравнениями регрессии, по которым ее можно рассчитать с приемлемой точностью.

В результате наблюдений на лесных пожарах установлено, что для пожаров интенсивностью до 100 тыс. ккал/м·мин, действующих при ветрах, далеких от максимума (2—6 м/сек), наибольшее удаление пятнистых загораний не превышает 300 м, наиболее же характерно удаление 100—200 м.

За счет пятнистости скорость распространения пожара может значительно превысить скорость продвижения его кромки; при сильном ветре средняя скорость пятнистого пожара нередко достигает 1—2 км/час.

Несмотря на то что проведенные исследования помогают понять природу пятнистых пожаров и призваны облегчить борьбу с ними, мы считаем, что работы в этом направлении следует продолжать.

При критических пожарных ситуациях, характеризующихся высокой степенью засухи, сильными ветрами в отдельных лесных массивах могут развиваться пожары очень высокой интенсивности, с вихревыми конвекционными потоками. Естественно, что скорости конвекции на таких пожарах да и сами конвекционные потоки будут много больше, следовательно, возрастет критическая высота падения горящих частиц (та максимальная высота, при падении с которой горящие частицы не сгорают) и, следовательно, увеличится расстояние переноса частиц горючего по воздуху, что может повлечь за собой радикальные изменения в характере распределения пятнистых загораний перед кромкой пожара.

Дальнейшие усилия исследователей пятнистых пожаров должны быть направлены на изучение конвекционного переноса частиц при пожарах более высокой интенсивности, с вихревыми конвекционными потоками и при штормовых ветрах.

ПОСЛЕДСТВИЯ ПОЖАРОВ

Во время тушения крупных лесных пожаров тактически бывает иногда полезным отступить на какой-нибудь выгодный рубеж. Но поступать так допустимо лишь там, где пожар в данное время не причиняет серьезных повреждений древостою. Делая отжиг для остановки пожара, необходимо предвидеть, какие повреждения он наносит древостою, чтобы в случае слабого повреждения создать широкую и надежную полосу отжига.

При проведении в будущем профилактических противопожарных палов или при выжигании напочвенных горючих материалов под пологом древостоя в противопожарных заслонах следует подбирать такие погодные условия, при которых горение покрова не повредит древостой.

Во всех перечисленных случаях требуется прогнозирование возможного послепожарного отпада в насаждении, т. е. возможной степени повреждения древостоя.

Используя классификацию горельников И. С. Мелехова (1948), мы выделили пять степеней повреждения древостоя (рис. 21 а, б, в):

I — при которой древостой слабо повреждается пожаром, почти не изреживается; характеризуется частичным отмиранием подчиненных ярусов древостоя или даже сохранением их после слабых низовых пожаров (отпад 0—30% по числу деревьев или 0—25% по запасу);

II — при которой древостой после пожара заметно изреживается; характеризуется сохранением жизнедеятельности значительного количества деревьев верхнего полога и отмиранием подчиненной части древостоя после низовых и почвенных (подстилочных) пожаров средней силы (отпад 31—70% по числу стволов и 26—60% по запасу);

III — при которой древостой после сильного повреждения пожаром усыхает полностью или почти полностью; характеризуется сохранением жизнедеятельности только незначительного числа деревьев верхнего полога после верховых или сильных низовых пожаров, а также древостоями потенциально мертвыми (усыхающими) после почвенных (сильных подстилочных) пожаров (отпад 71—100% по числу стволов или 61—100% по запасу);

IV — при которой древостой гибнет полностью в процессе пожара; представляет собой горельники с древостоями, полностью утратившими жизнедеятельность вследствие обгорания кроны во

время верховых пожаров (отпад 100% по числу стволов и запасу);

V — при которой древостой в результате пожара вываливается; представляет собой валежные горельники после почвенных (торфяных, сильных подстилочных) пожаров (отпад 71—100% по числу стволов или 61—100% по запасу).

Величина отпада определяется прежде всего видом пожара. Так, при верховых пожарах, когда происходит обгорание кроны, деревья погибают сразу. Полная гибель древостоя характерна и для торфяных пожаров; она усугубляется, кроме того,



Рис. 21. Степени повреждения пожаром соснового древостоя:

a — первая степень повреждения (Верхне-Баргузинский лесхоз; фото Н. М. Баранова);
б — четвертая степень повреждения (Верхне-Баргузинский лесхоз; фото Н. М. Баранова);
в — пятая степень повреждения (Горьковская обл., фото Э. Н. Валендика)

сплошными вывалами. Следовательно, прогнозирование величины отпада в случае верховых или торфяных пожаров не вызывает особых затруднений. А при низовых или подстилочных пожарах величина отпада может изменяться от 0 до 100%.

Огневые повреждения деревьев, наносимые низовыми и почвенными (подстилочными) пожарами, проявляются в виде:

- а) ожогов камбия у надземной части ствола;
- б) ожогов кроны (т. е. перегрева кроны, а не обгорания);
- в) ожогов камбия корней и подземной части ствола (и даже перегорания корней).

Вид и степень огневых повреждений у деревьев определяются двумя группами факторов, одна из которых связана с характером и силой лесного пожара, вторая — с пожароустойчивыми свойствами отдельных деревьев и насаждений в целом.



ОТПАД ПОСЛЕ НИЗОВЫХ ПОЖАРОВ

Состояние вопроса

Имеются две работы о последствиях лесных пожаров, из которых можно извлечь много ценных данных по диагностике выживаемости древостоев (Мелехов, 1948; Молчанов, 1954); обе работы выполнены на материалах, собранных в Архангельской области.

Влияние низовых пожаров на отпад насаждений изучал в Сибири В. Е. Романов (1966, 1968), однако им была допущена методическая ошибка: степень повреждения (в том числе и отпад) он связывал с интенсивностью пожара, а интенсивность пожара определял по степени повреждения древостоя.

Ряд сведений по диагностике можно найти в работах И. Н. Балбышева (1963), И. В. Гуняженко (1958), Г. А. Амосова (1964) и др.

Сравнительная пожароустойчивость различных пород

В таежных лесах основными лесообразующими породами являются лиственница, ель, сосна, береза и кедр. По огнестойкости они располагаются в следующем порядке: 1) лиственница, 2) сосна, 3) береза, 4) кедр, 5) ель.

Правда, в отношении лиственницы данные несколько противоречивы. На Урале и в Западной Сибири лиственница пожаро-



устойчивее сосны, но на Европейском Севере и в Восточной Сибири лиственница страдает от огня больше, чем сосна. По нашему мнению, эти различия объясняются преимущественным характером пожаров. В Восточной Сибири лето более сухое и жаркое, чем в Западной Сибири или на Урале, поэтому там чаще возникают подстилочные пожары. В европейской части СССР лиственничники приурочены к сухим карстовым районам, что также способствует развитию подстилочных пожаров.

Толстая защитная кора опускается у лиственниц только до корневой шейки; сама корневая шейка и корневые лапы имеют очень тонкую кору. Это приводит к сильным повреждениям камбия и к последующему развитию гнилей после подстилочных пожаров (Кашин, 1968). Нижние сухие сучья у лиственниц легко опадают и накапливаются кучами у подножия старых деревьев, что еще больше способствует повреждению корневой шейки. В жердняках такого скопления хвороста не бывает, более того, в мертвопокровных лиственничных жердняках опавшая сухая хвоя, лежащая на земле, практически негорима, огонь при пожаре обходит эти места (Софронов, 1967). По тем или иным причинам, но в районах, где часты лесные пожары, преобладает сосна — другая огнестойкая порода.

Сосновые насаждения гибнут полностью только при очень сильных пожарах, в то время как отмирание еловых древостоев происходит даже после пожаров незначительной силы. Береза занимает среднее положение по устойчивости к пожарам.

По данным А. А. Молчанова (1954), отпад деревьев в древостоях разных пород в зависимости от степени захламленности составляет (в % от запаса):

Отпад, %	Степень захламленности, м ³ /га		
	10—20	21—55	56—95
в сосняках	9	13	33
в березняках	28	48	72
в ельниках	30	53	93

Отпад деревьев разных пород в зависимости от времени пожара в течение суток в среднем равен:

Отпад, %	День	Вечер	Ночь	Утро
	в сосняках	65	7	6
в березняках	65	30	26	43
в ельниках	78	46	33	44

В целом отпад в ельниках в 3—4 раза, а в березняках в 2—3 раза выше, чем в сосняках.

Что касается кедра, то по нашим данным, его устойчивость к низовым пожарам в разных районах и типах леса весьма различна. В папоротниковых типах леса среднегорья кедр после

низовых пожаров часто гибнет, зато зеленомошные кедровники верхнего лесного подпояса по своей пожароустойчивости почти не уступают соснякам (Софронов, 1967).

Влияние условий местопроизрастания (типов леса) на повреждение древостоя

Типом леса определяется количество горючих материалов в напочвенном покрове, скорость их высыхания (т. е. сила низового пожара) и возможность перехода низового пожара в почвенный. Ниже приводятся краткие пирологические характеристики типов леса, составленные по данным И. С. Мелехова (1948), А. А. Молчанова (1954), В. Г. Нестерова (1939) и А. А. Корчагина (1954).

Беломошники занимают первое место по горимости. Древостой, состоящий почти всегда из сосны, не отличается высокой полнотой, поэтому ярус кустистых лишайников под пологом сосен просыхает очень быстро и приобретает высокую горимость уже через один-два дня после дождя. Для беломошников типичны беглые низовые пожары, продвигающиеся со скоростью 2—4 м/мин при высоте пламени 15—20 (до 40) см; степень воздействия таких пожаров на древостои невелика: после пожара остаются живыми не только спелые насаждения, но даже и молодняки 15—20-летнего возраста. Правда, в некоторых случаях в очень сухих лишайниковых борах сосна образует поверхностную корневую систему, которая может быть повреждена при пожаре.

Верещатники возникают на месте беломошников и сухих зеленомошников после пожара. В составе древостоя обычно преобладает сосна. Кустарничковый ярус из вереска высотой 30—50 (до 70) см весьма усиливает низовой пожар, при этом пламя поднимается на 80—100 см и продвигается со скоростью до 3 м/мин. Еще больше усиливают горение кусты можжевельника и куртины молодняка. Сильный низовой пожар наносит серьезные повреждения древостою, особенно молоднякам.

Брусничники приурочены к повышенным дренированным участкам. Древостой чаще сосновый, реже еловый. Низовые пожары имеют, как правило, беглый характер и распространяются со скоростью 1—3 м/мин (в зависимости от участия в моховом покрове кустистых лишайников) при высоте пламени 30—50 см. После пожара в брусничниках иногда сохраняются даже сосновые молодняки. Ель повреждается сильнее.

Черничники приурочены к более увлажненным почвам. Они характеризуются достаточно сомкнутым пологом чаще из ели, реже из сосны. Низовые пожары в начале засушливого периода имеют беглую форму, а при сильной засухе приобретают устойчивую форму, что губительно сказывается на древостое, особенно еловом. Высота пламени при пожаре — 40—50 см, скорость дном — 1—2 м/мин.

Долгомошники располагаются на почвах с повышенным увлажнением. Наличие на почве густого яруса кукушкина льна, который, имея водопроводящие сосуды, высыхает очень медленно, резко снижает пожарную опасность таких типов леса. Они горят только в засуху, причем пожар приобретает беглый характер (дернина кукушкина льна обгорает лишь с поверхности), скорость продвижения пламени не превышает 0,5 м/мин. Повреждения древостоя в результате пожара незначительные.

Сфагнозники (сфагновые, осоково-сфагновые, багульниковые, голубичные и другие типы леса) занимают на севере большие территории, окружая верховые болота. Древостой редкостойный, преимущественно из сосны. Во время засухи верхний слой сфагнома довольно быстро высыхает, и пожар может по нему распространяться со скоростью до 1 м/мин. Наличие кустарничков (багульник, голубика, кассандра) препятствует как высыханию сфагнома, так и распространению пожара. При сильной засухе низовые пожары переходят в почвенные, начинается гореть торфянистый горизонт, что губительно сказывается на древостое.

Травяные типы леса летом почти негоримы. Беглые пожары средней силы возможны преимущественно весной. Древостой (чаще всего из лиственных пород) повреждается слабо.

Типы леса на почвах **повышенного грунтового увлажнения** (приручейниковые, логовые, таволговые) практически негоримы и не подвергаются воздействию пожаров в течение многих сотен лет.

По данным А. А. Молчанова (1954), величина отпада после пожара изменяется в зависимости от типов леса заметно слабее, чем в зависимости от захламленности, скорости ветра, времени пожара в течение суток, формы и возраста древостоя. Например, при слабой захламленности (до 20 м³/га) незначительная разница по отпаду в разных типах сосняков наблюдается только при прохождении пожара днем: в лишайниково-мшистом — 22%, в брусничнике — 16, в черничнике — 12, в сфагновом — 6%. При сильной захламленности отпад в лишайниково-мшистом сосняке достигает 33%, в брусничнике — 43, в травянисто-ягодниковом — 28; после ночного пожара отпад сосны в вересково-лишайниковом бору был равен 17%, в брусничнике — 13, в травянисто-ягодниковом — 8%.

Влияние полноты на степень повреждения древостоя

В изреженных древостоях лесные горючие материалы обычно оказываются более сухими, чем под пологом сомкнутых насаждений. Кроме того, в более редких древостоях выше скорость ветра. Сухое горючее в сочетании с повышенной скоростью

Отпад в насаждениях, пройденных пожаром, в зависимости от полноты древостоя (в % от общего запаса)

Захламленность, м ³ /га	Скорость ветра, м/сек	Сосняки-зеленомошники		Ельники-зеленомошники	
		полнота			
		0,7—0,8	0,3—0,4	0,7—0,8	0,3—0,4
10—20	3	5	15	20	40
	7	5	28	32	100
21—55	3	13	24	39	80
	7	20	75	85	100

Таблица 34

Отпад в древостоях с полнотой 0,5—0,6, пройденных пожаром в различное время суток (в % от запаса)

Захламленность, м ³ /га	Сосняки-зеленомошники				Ельники-зеленомошники			
	день	вечер	ночь	утро	день	вечер	ночь	утро
10—20	22	5	1	7	90	36	22	37
21—55	48	17	2	13	95	57	39	60
56—95	85	25	13	30	100	85	67	92

ветра обуславливает развитие в изреженных древостоях сильных пожаров, которые наносят значительный вред насаждению (табл. 33).

А. А. Молчанов (1954) отмечает, что в случае примыкания редины и прогалины с наветренной стороны к насаждениям эти насаждения повреждаются иногда на значительную глубину от редины или прогалины (до 200 м) с отпадом до 50% деревьев.

Пожары достигают наибольшей силы днем при низкой влажности воздуха и максимальной силе ветра. Следовательно, и наибольшие повреждения наносит пожар древостою в дневное время (табл. 34).

Зависимость отпада от возраста древостоя

Наибольшей устойчивостью против пожара отличается лес в возрасте спелости. В перестойных насаждениях сопротивляемость огню у самых толстых деревьев может снизиться (Мелехов, 1948). Максимальные повреждения пожар наносит молодым и жерднякам. По наблюдениям И. С. Мелехова (1948), сопротивляемость сосны огневому воздействию становится заметной к 50 годам жизни. Разновозрастные насаждения повреждаются пожаром сильнее, чем одновозрастные. В качестве примера устойчивости насаждений в зависимости от возраста

можно привести данные И. С. Мелехова по соснякам-зелено-мошникам:

Возраст насаждений, лет	50	100—170
Количество неповрежденных деревьев, %	30	26
Количество поврежденных, %	23	49
Количество отмерших, %	47	25

Более подробные сведения о влиянии возраста имеются у А. А. Молчанова (1954). По его данным, отпад в насаждениях различного возраста при средней захламленности и распространении пожара днем составляет (в % от общего запаса):

Возраст, лет	До 40	41—80	81—120	121—160
Отпад, %				
в сосняках	100	26	28	21
в ельниках	100	100	80	79

Как видим, устойчивость сосновых насаждений с возрастом резко возрастает, у ельников это проявляется довольно слабо.

В. Е. Романов (1966) дает следующую величину отпада по классам возраста (независимо от состава насаждения):

Интенсивность пожара	Слабая	Средняя	Сильная
Отпад, %			
в III—IV классах возраста	12	26	40
в V классе возраста	9	19	35
в VI классе возраста	7	14	30
в VII—VIII классах возраста	6	10	19

Зависимость степени повреждения деревьев пожаром от их диаметра

Величиной, с которой корреляционно связаны в древостое и высота до крон, и толщина коры, а следовательно, и степень повреждения деревьев при пожаре, является диаметр. И. С. Мелехов (1948) отмечает, что интенсивный отпад деревьев вследствие пожара происходит лишь в наиболее тонких ступенях толщины. Так сосна, начиная с 18 см, оказывается уже устойчивой. В качестве примера он приводит данные о перечете отмерших деревьев по ступеням толщины спустя три года после пожара в 50-летнем сосняке IV бонитета (число стволов до пожара 4080 шт/га, высота нагара 2,3 м):

Диаметр на высоте груди, см	4	8	12	16	20
Процент усохших ссен	100	97	38	25	0

В другом примере, тоже в сосняках 50 лет, показано более дифференцированное разделение деревьев в ступенях толщины на три категории:

Диаметр на высоте груди, см	4	8	12	16	20	24	28
Всего деревьев, шт.	314	308	240	105	34	16	2
В том числе:							
неповрежденных, %	6	28	49	58	53	50	100
поврежденных, но жизне- способных, %	7	30	28	31	30	50	—
отмерших, %	87	42	23	11	17	—	—

У А. А. Молчанова (1954) имеются данные о числе поврежденных елей в смешанном сосново-еловом лесу спустя три дня после пожара:

Диаметр на высоте груди, см	8	12	16	20	24	28	32
Процент елей, имеющих повреждения ствола и кроны	60	56	52	31	12	3	—

Связь повреждений древостоя с высотой нагара

Высота нагара является одним из объективных признаков, свидетельствующих о силе прошедшего низового пожара и о высоте пламени. Г. А. Амосов (1964) по результатам 67 огневых опытов в сосняках лишайниковых 20—60 лет и злаково-разнотравном 110—130 лет установил, что между высотой пламени и высотой нагара существует тесная связь (коэффициент корреляции 0,96) и дал уравнение этой связи:

$$y = 2,06x - 1,42, \quad (43)$$

где y — высота нагара на стволах, дм; x — высота пламени, дм.

Формула показывает, что высота нагара на стволах почти в 2 раза больше высоты пламени.

От высоты пламени в свою очередь зависит степень повреждения кроны горячими газами. По данным Г. А. Амосова, степень повреждения кроны в сосняках (при коэффициенте корреляции 0,77) определяется уравнением:

$$y = 1,46x + 0,55, \quad (44)$$

где y — степень повреждения кроны (в десятых долях); x — отношение высоты пламени к высоте до кроны (при низовых пожарах x всегда меньше 1).

Ранее И. С. Мелеховым (1948) была определена в сосняках связь между высотой нагара и длиной, а также шириной подсушин. У тонких деревьев диаметром до 10 см высота пожарной подсушины почти равна высоте нагара, а у деревьев толщиной 10—17 см пожарная подсушина ниже нагара по высоте пример-

но на полметра. Связь между высотой нагара и длиной подсушины у других пород также достаточно высока (коэффициент корреляции для ели 0,90; для березы — 0,98).

Ширина подсушины при высоте нагара 0,5 м равна в среднем 7 см, при 1,0 м — 10 см, при 1,5 м — 16 см, при 2,0 м — 28 см. Если подсушина (повреждение камбия) занимает 25—50% окружности ствола, то гибнет 5—8% деревьев, при повреждении камбия на 75% окружности ствола погибает около 60% деревьев (последняя цифра получена на 14 деревьях). Высота нагара не зависит от диаметра стволов в сосняках и лиственничниках (коэффициент корреляции 0,10—0,20); у берез и елей такая зависимость проявляется (коэффициент корреляции 0,54—0,57). Наибольшая высота нагара наблюдается у лиственниц, затем следует береза, сосна, ель и осина.

И. С. Мелехов отмечает, что поверхностное обугливание коры у толстокорых деревьев (сосна, лиственница) в отличие от деревьев с тонкой корой (ель) не всегда сопровождается поражением камбия. Однако с увеличением высоты нагара поражение камбия и отпад деревьев увеличиваются. Так, в сосняках 108 лет спустя 54 года после низового пожара из 700 оставшихся стволов 50% имели подсушины, причем высота подсушин была около 0,6 м. А при высоте подсушин 2—3 м в другом таком же сосняке осталось только 240 деревьев и те были на 87% повреждены.

По данным И. В. Гуняженко (1958), послепожарный отпад в сосновых жердняках 30 лет III бонитета при высоте нагара менее 0,5 м не превышал 25% числа стволов, при 0,5—0,75 м отпад составлял 26—50%, а при нагаре выше 0,76 м отпад был более 50%.

Наиболее обстоятельные данные по связи отпада (% от запаса) со средней высотой нагара приводит А. А. Молчанов (1954):

Средняя высота нагара, м	До 0,5	1	2	3	4	5	6	8
Сосняки								
Средний процент отпада	0	6	9	22	32	55	65	85
Число наблюдений	5	20	10	12	4	3	2	6
Ельники								
Средний процент отпада	18	44	62	75	85	87	95	95
Число наблюдений	8	31	25	14	7	7	7	13

К сожалению, автор не указывает ни возраста, ни среднего диаметра древостоя.

Программа и методика исследований

Из литературного обзора следует, что величина отпада (степень повреждения древостоя) определяется сочетанием факторов, обуславливающих, с одной стороны, силу пожара (к таким факторам относятся: запас лесных горючих материалов, длительность бездождного периода, температура и влажность воздуха, скорость ветра и т. д.) и, с другой стороны, пожароустойчивость древостоя (это будут возраст, состав, диаметр, высота, тип леса, состояние и пр.). Делать прогноз по такому количеству факторов невозможно ни математически, ни практически.

Анализируя работы И. С. Мелехова (1948), А. А. Молчанова (1954), Г. А. Амосова (1964) и др., мы пришли к выводу, что на величину отпада деревьев данной породы наибольшее влияние оказывают два параметра: высота нагара и диаметр ствола. Первый отражает силу пожара, второй — размеры дерева, от которых зависит его пожароустойчивость. Эти параметры надежны и удобны в измерении, следовательно, они могут служить хорошими диагностическими признаками. Необходимо лишь выразить математически зависимость процента отпада (в пределах древесной породы) от высоты нагара и диаметра ствола.

Для решения данной задачи использованы материалы пересчетов на пробных площадях, заложенных на пожарищах.

Процессы отпада в зависимости от степени повреждения древостоя и его состава имеют длительность от 2 до 7 лет. В слабо и среднеповрежденных сосняках процесс отпада в северной подзоне тайги, по нашим данным, завершается через 5 лет, а в средней подзоне, по данным А. А. Молчанова (1954), — через два года. В сильно поврежденных сосняках процесс отпада длится до 7 лет в северной и до 5 лет в средней подзонах тайги. Для ельников в слабо и среднеповрежденных древостоях процесс отпада будет продолжаться до 5 лет в средней подзоне тайги и не менее 7 лет — в северной, а в сильно поврежденных ельниках он практически завершается на третий (средняя подзона) — пятый (северная подзона) год после пожара.

Учитывая длительность процессов отпада, пересчеты на пробных площадях завершали спустя 3—5 лет после пожара.

Объектом исследования в сосняках послужили 52 пробных площади, заложенных в древостоях IV—Va классов бонитета типов леса черничный, брусничный и лишайниковый, пройденных низовыми пожарами различной силы. Возраст древостоев 40—240 лет, полнота 0,5—0,7, район работ Беломорско-Кулойское плато (северная подзона тайги).

В ельниках было заложено 10 пробных площадей в древостоях IV—V классов бонитета типов леса черничный и травяной на пожар ище 1972 г. в том же районе. Возраст древостоев 100—200 лет, полнота 0,6—0,7.

Березняки и лиственничники ввиду их незначительной представленности на пожарищах в районе работ специально не

исследовались. Для суждения о величине их послепожарного отпада послужили 408 лиственниц и 657 берез, которые встретились на пробных площадях, заложенных в сосняках и ельниках.

Перечет древостоя на пробах проводился с подразделением деревьев на три категории:

1) усыхающие и усохшие при наличии в их кронах менее 25% зеленой хвои (листвы);

2) поврежденные (сомнительные), имеющие в кронах по 25—50% зеленой хвои;

3) условно здоровые, у которых доля зеленой хвои в кроне превышает 50%.

При перечете у каждого дерева отмечали: диаметр на высоте груди, высоту нагара и категорию состояния (или процент зеленой хвои).

Во время обработки материала категорию поврежденных (сомнительных) деревьев делили пополам и присоединяли одну половину к усыхающим, другую — к условно здоровым.

Кроме изучения процессов отпада, был специально исследован вопрос о повреждении крон низовыми пожарами.

Повреждение крон низовыми пожарами

Принято считать, что низовые пожары травмируют в основном нижние части стволов, почвенные — корни деревьев, а кроны повреждаются преимущественно верховым огнем. Рассматривая выше вопрос о травмировании стволов, мы пришли к выводу, что при низовых пожарах от ожогов камбия на стволах могут погибать, как правило, только тонкомерные деревья (например, сосна — диаметром до 7 см): деревья средней толщины получают ожоги на подветренной стороне стволов (которые затем превращаются в подсушины); стволы же крупных деревьев (у сосны — толще 20 см, у ели — толще 40 см) не должны повреждаться совсем (если они имеют кору нормальной толщины).

Однако после низовых сильных пожаров мы часто наблюдаем полное или частичное пожелтение крон у крупных деревьев, которое проявляется в течение недели после пожара. Чем оно вызвано?

Разумеется, усыхание дерева, независимо от того, что явилось причиной усыхания, всегда сопровождается пожелтением кроны. Но как скоро наступает это пожелтение, если повреждена не сама крона, а другие части дерева? Может ли быстрое пожелтение (в течение недели) быть внешним признаком повреждения корней или ствола?

Для выяснения поставленных вопросов были осуществлены два эксперимента.

При первом эксперименте в августе 1972 г., а также в июле и сентябре 1973 г. делали искусственное травмирование стволов сосны с помощью паяльной лампы. Степень травмирования была

различной: камбий убивался огнем на подрумяненном кольце шириной 40 см на $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$ и 1,0 окружности ствола. Всего было обожжено 216 деревьев на двух пробных площадях. Результат получился весьма интересным: спустя даже три года все травмированные деревья имели зеленую хвою, лишь у сосен с кольцевым обжиганием коры крона несколько изредилась. Процент заселенных стволовыми вредителями деревьев, даже среди сосен с обжиганием по всей окружности ствола, был невелик: от 15 до 50% (по данным Г. П. Сайченко).

Следует заметить, что при обследовании трехлетнего пожара мы встречали деревья сосны с зелеными кронами, у которых камбий был умерщвлен по всей окружности ствола на значительную высоту (до 0,5 м) и заселен личинками короедов и усачей.

И результаты эксперимента, и наблюдения на пожарищах убеждают в том, что в случае травмирования ствола, смертельного для дерева, усыхание кроны происходит не сразу, а растягивается на несколько лет. Быстрое же пожелтение хвои, несомненно, связано с непосредственным повреждением кроны высокой температурой.

Для окончательного выяснения вопроса в 1975 г. был проведен второй эксперимент. В сосняке-беломошнике и в ельнике-черничнике мы выбрали 10 деревьев сосны и 10 деревьев ели различных размеров и имитировали под их кронами сильный низовой пожар. Методика опытов заключалась в следующем: с одной стороны дерева непосредственно под кроной выбирали площадку размером 1—3 м², окружали ее канавкой, добавляли на площадку сухой хворост и поджигали его вместе с покровом. Во время огневых опытов пламя имело максимальную высоту 1,5—3,5 м, а интенсивное пламенное горение продолжалось 5—8 мин. После огневых опытов в течение трех недель мы проводили систематическое наблюдение за поврежденными деревьями. Через 5—6 дней нижняя часть кроны над местом разведения костра пожелтела, а у ели спустя 20 дней после ожога желтая хвоя стала легко осыпаться.

Эксперимент показал, что при низовом пожаре может происходить ожог хвои в кронах без непосредственного контакта с пламенем, а лишь за счет восходящих потоков горючих газов. Причем проявляется повреждение крон в виде пожелтения хвои спустя 5—6 дней после пожара.

Итак, можно утверждать, что пожелтение хвои в случае, если оно наступает в течение недели после низового пожара, вызывается не ожогом стволов или корневых лап, а повреждением самих крон при фильтрации через кроны горячего воздуха во время горения. Очевидно, что с повышением бонитета и густоты насаждения высота до крон будет возрастать, а возможности ожога крон низовым пожаром будут снижаться.

Послепожарный отпад в сосняках *

В сосняках вначале был определен процент отпада в зависимости от высоты нагара по ступеням толщины для насаждений, различных по возрасту. Результаты оказались близкими, поэтому нами были объединены в пределах каждой ступени толщины все данные по отпаду в связи с высотой нагара.

Кривые, отражающие связь процента нагара в каждой ступени, расположились на графике закономерно, одна за другой, по мере увеличения диаметра (рис. 22). Все кривые имеют характерную, S-образную форму.

Зависимость процента отпада от высоты нагара в пределах одной ступени толщины наиболее точно выражается уравнением кубической параболы и характеризуется корреляционным отношением, равным 0,97. Зависимость процента отпада от толщины деревьев при одинаковой высоте нагара выражается уравнением кубической параболы с корреляционным отношением 0,90. Следовательно, исследуемая нами связь вполне достоверна.

В целом процент отпада деревьев сосны после низового пожара различной силы по ступеням толщины в зависимости от высоты нагара характеризуется системой кривых типа

$$P = a + bH_H + cH_H^2 + dH_H^3, \quad (45)$$

где P — процент отпада в определенной ступени толщины; H_H — средняя высота нагара (в м) у данной ступени толщины; a, b, c, d — коэффициенты.

Ниже приводятся рассчитанные на ЭВМ коэффициенты уравнений для вычисления процента отпада в пределах ступеней толщины (по числу стволов):

Для ступени толщины, см	8	12	16	20	24	28	32	36	40
a	-36,0	4,6	7,0	8,2	11,4	12,3	13,0	13,9	13,6
b	156,5	-15,0	-24,2	-26,4	-30,9	-30,4	-29,8	-29,8	-28,5
c	-58,93	31,88	27,07	23,10	29,22	17,45	15,46	14,29	12,97
d	7,261	-5,517	-3,751	-2,593	-2,010	-1,645	-1,346	-1,176	-1,013

На основе приведенных коэффициентов для системы уравнений было выведено единое уравнение, характеризующее отпад P (по числу стволов) в зависимости от диаметра ствола D и

* Основная часть работы по математическому анализу материалов о послепожарном отпаде в древостоях выполнена Г. С. Войновым (Войнов и Софронюк, 1976).

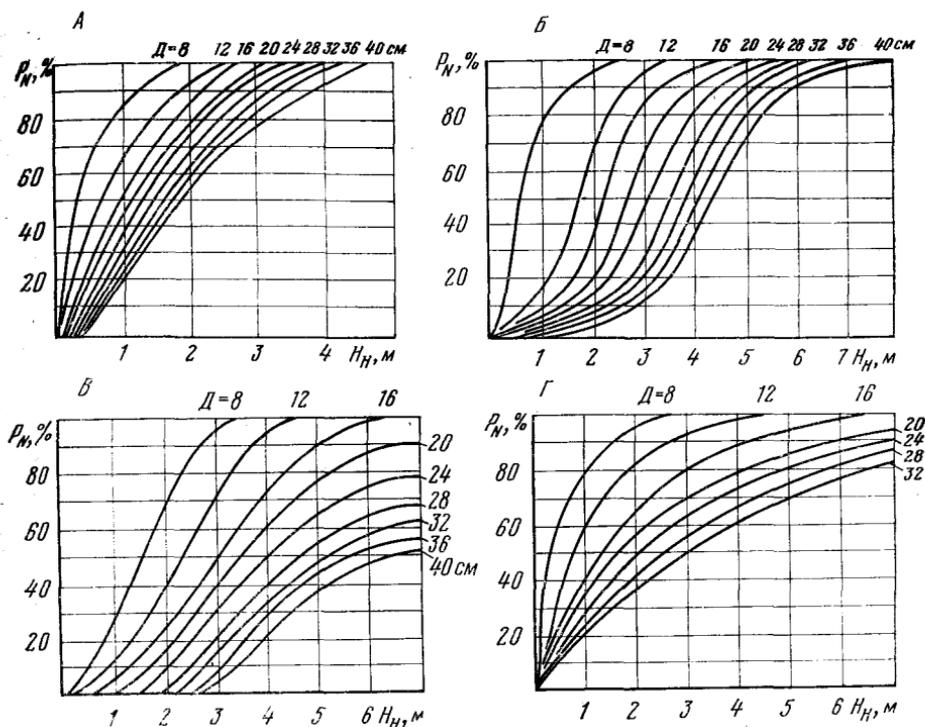


Рис. 22. Отпад по числу стволов ($P_N, \%$) у ели (А), сосны (Б), лиственницы (В) и березы (Г) в пределах ступеней толщины ($D, \text{см}$) в зависимости от высоты нагара ($H_N, \text{м}$)

высоты нагара H одновременно.

$$\begin{aligned}
 P = & -1,73 + 0,45 D + 0,099 D^2 - 0,0003 + (32,43 - 5,86 D + \\
 & + 0,177 D^2 - 0,0017 D^3) H_N + (56,52 - 2,72 D + 0,063 D^2 - \\
 & - 0,0005 D^3) H_N^2 + (-15,21 + 1,17 D + 0,034 D^2 + \\
 & + 0,0033 D^3) H_N^3.
 \end{aligned} \tag{46}$$

Необходимо отметить, что процент отпада по числу стволов в пределах ступеней толщины должен быть весьма близок к проценту отпада по запасу.

Используя установленную зависимость отпада по ступеням толщины от высоты нагара и толщины стволов, с помощью рядов распределения числа деревьев по ступеням толщины в нормальных сосновых древостоях (Третьяков и др., 1952), можно рассчитать величину послепожарного отпада в целом для древостоев в зависимости от средней высоты нагара и среднего диаметра древостоя.

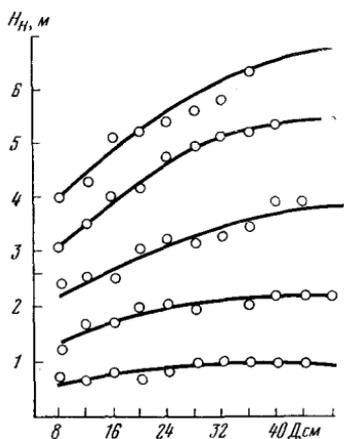


Рис. 23. Распределение высоты нагара (H_n , м) по ступеням толщины (D , см) в сосновом древостое при различных средних высотах нагара

ны вначале были выведены две эмпирические формулы:

$$H_D = (0,7 + 0,022D) H_{16}; \quad (47)$$

$$H_D = (0,6 + 0,018D) H_{24}, \quad (48)$$

где D — диаметр ступени толщины, см; H_D — средняя высота нагара (в м) при данном диаметре D ; H_{16} и H_{24} — средние высоты нагара в ступенях толщины 16 и 24 см.

Затем была рассчитана зависимость высоты нагара от толщины ствола более точно, на ЭВМ. В качестве исходной величины, отражающей силу пожара, была взята средняя высота нагара в ступени толщины 12 см (H_{12}). В результате получилась следующая система уравнений второго порядка:

$$H_D = 0,44 + 0,028 D - 0,00033 D^2 \quad (\text{при } H_{12} = 0,1 - 1,0 \text{ м}) \quad (49)$$

$$H_D = 0,96 + 0,057 D - 0,00066 D^2 \quad (\text{при } H_{12} = 1,1 - 2,0 \text{ м}) \quad (50)$$

$$H_D = 1,61 + 0,078 D - 0,00065 D^2 \quad (\text{при } H_{12} = 2,1 - 3,0 \text{ м}) \quad (51)$$

$$H_D = 2,07 + 0,140 D - 0,00144 D^2 \quad (\text{при } H_{12} = 3,1 - 4,0 \text{ м}) \quad (52)$$

$$H_D = 2,99 + 0,133 D - 0,00114 D^2 \quad (\text{при } H_{12} = 4,1 - 5,0 \text{ м}) \quad (53)$$

Корреляция между высотой нагара и диаметром стволов в пределах одного древостоя довольно значительна и характеризуется средним корреляционным отношением, равным 0,56.

Для определения средней высоты нагара в каждой ступени толщины данного древостоя достаточно измерить среднюю высоту

Однако вначале необходимо выяснить, как распределяется по ступеням толщины в древостое средняя высота нагара, т. е. выяснить связь между высотой нагара и диаметром ствола в пределах одного насаждения.

И. С. Мелехов (1948) пришел к выводу, что зависимости высоты нагара от диаметра ствола в сосняках не существует. По нашим данным, этот вывод справедлив только для случаев со средней высотой нагара до 1 м. Чем сильнее был пожар, т. е. чем больше высота нагара в целом, тем заметнее влияние диаметра ствола, тем выше нагар на толстых деревьях по сравнению с тонкими (рис. 23).

Для определения средней высоты нагара в каждой ступени толщины

ту нагара в одной из ступеней толщины (12, 16 или 24), а затем воспользоваться соответствующей формулой из числа вышеприведенных. Интервал применения формул по диаметру: от 8 до 52 см.

Итак, с учетом влияния ступени толщины на высоту нагара по проценту отпада в ступенях был рассчитан процент отпада для нормальных сосновых древостоев в целом, в зависимости от средней высоты нагара и среднего диаметра древостоя (табл. 35).

Для того чтобы судить о точности полученных кривых, мы сравнили расчетные показатели по величине отпада с фактическими данными на 52 пробных площадях. Оказалось, что точность определения отпада вполне достаточна: по числу деревьев она составляет $\pm 9,6\%$ от общего числа деревьев в данном древостое, а по запасу $\pm 8,0\%$ от запаса древостоя.

Таблица 35

Таблица для определения отпада в сосняках после низовых пожаров по числу стволов (P_H , %) и запасу P_M в целом для древостоев, в зависимости от среднего диаметра и средней высоты нагара

Средний диаметр древостоя, см	P	Средняя высота нагара на стволах, м								
		0,1— 0,5	0,6— 1,0	1,1— 1,5	1,6— 2,0	2,1— 3,0	3,1— 4,0	4,1— 5,0	5,1— 6,0	6,1 и более
8	$\frac{P_H}{P_M}$	$\frac{17}{8}$	$\frac{43}{32}$	$\frac{65}{56}$	$\frac{83}{76}$	$\frac{100}{100}$	$\frac{100}{100}$	$\frac{100}{100}$	$\frac{100}{100}$	$\frac{100}{100}$
	$\frac{P_H}{P_M}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{15}{9}$	$\frac{39}{22}$	$\frac{60}{38}$	$\frac{85}{73}$	$\frac{100}{100}$	$\frac{100}{100}$	$\frac{100}{100}$	$\frac{100}{100}$
12	$\frac{P_H}{P_M}$	$\frac{2}{1}$	$\frac{7}{4}$	$\frac{19}{10}$	$\frac{37}{21}$	$\frac{62}{45}$	$\frac{86}{84}$	$\frac{100}{100}$	$\frac{100}{100}$	$\frac{100}{100}$
	$\frac{P_H}{P_M}$	$\frac{1}{0}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{9}{6}$	$\frac{20}{12}$	$\frac{48}{33}$	$\frac{77}{72}$	$\frac{95}{95}$	$\frac{100}{100}$	$\frac{100}{100}$
16	$\frac{P_H}{P_M}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{2}{1}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{13}{9}$	$\frac{31}{23}$	$\frac{68}{60}$	$\frac{92}{87}$	$\frac{100}{100}$	$\frac{100}{100}$
	$\frac{P_H}{P_M}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{2}{1}$	$\frac{7}{5}$	$\frac{20}{16}$	$\frac{52}{47}$	$\frac{87}{82}$	$\frac{98}{96}$	$\frac{100}{100}$
20	$\frac{P_H}{P_M}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{1}{0}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{13}{12}$	$\frac{38}{36}$	$\frac{78}{75}$	$\frac{95}{93}$	$\frac{100}{100}$
	$\frac{P_H}{P_M}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{11}{9}$	$\frac{30}{27}$	$\frac{70}{66}$	$\frac{91}{88}$	$\frac{100}{100}$
24	$\frac{P_H}{P_M}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{9}{7}$	$\frac{25}{23}$	$\frac{61}{57}$	$\frac{87}{83}$	$\frac{100}{100}$
	$\frac{P_H}{P_M}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{9}{7}$	$\frac{25}{23}$	$\frac{61}{57}$	$\frac{87}{83}$	$\frac{100}{100}$

Необходимо заметить, что все закономерности по отпаду выведены для северных сосняков III—V бонитета. В высокобонитетных сосняках зависимости будут, вероятно, несколько иными.

Послепожарный отпад в ельниках

С целью прогнозирования послепожарного отпада в ельниках после низовых пожаров нами были избраны те же два показателя, что и в сосняках, — высота нагара на стволах и диаметр стволов на высоте 1,3 м.

Сначала была установлена зависимость высоты нагара на стволах ели от их диаметра при различной силе низового пожара. В качестве исходной величины, отражающей силу пожара, была взята средняя высота нагара в ступени 12 см (H_{12}). Зависимость высоты нагара от диаметра стволов ели характеризуется следующими уравнениями параболы второй степени:

$$H_0 = 0,44 + 0,027 D - 0,00037 D^2 \quad (\text{при } H_{12} = 0,1 - 1,0 \text{ м}); \quad (54)$$

$$H_0 = 1,16 + 0,069 D - 0,00062 D^2 \quad (\text{при } H_{12} = 1,1 - 2,0 \text{ м}), \quad (55)$$

где D — ступень толщины в см; H — средняя высота нагара (м) для данной ступени толщины.

Корреляция между высотой нагара и диаметром стволов в пределах одного древостоя умеренная и характеризуется корреляционным отношением 0,48. Влияние диаметра стволов на распределение высоты нагара по ступеням толщины зависит от высоты нагара в целом — при большей высоте нагара оно выражено более существенно.

Таким образом, для определения средней высоты нагара в каждой ступени толщины необходимо определить глазомерно среднюю высоту нагара в ступени 12 см и произвести расчеты по соответствующей формуле (54 или 55). Интервал применения формул: от 4 до 44 см.

Исследования показали, что зависимость процента отпада деревьев ели одной ступени толщины от высоты нагара наиболее точно отражается уравнением кубической параболы и характеризуется корреляционным отношением 0,88, т. е. несколько меньше, чем у сосны (0,97). Зависимость процента отпада деревьев ели при одинаковой высоте нагара от толщины деревьев отражается уравнениями кубической параболы с корреляционным отношением также 0,88.

В целом процент отпада деревьев ели (P) после пожара по ступеням толщины, в зависимости от высоты нагара (H_n) характеризуется системой кривых и соответствующих им кубических уравнений. Ниже приводятся коэффициенты этих уравнений.

Для ступени
толщины

8	$a=7,62$	$b=131,41$	$c=-61,78$	$d=9,560$
12	1,08	72,46	-13,97	0,2983
16	-6,34	62,06	-7,426	-0,4451
20	-7,79	51,57	-2,394	-0,9684
24	-9,06	45,46	-0,821	-0,9191
28	-9,59	39,47	0,674	-0,9072
32	-9,55	35,04	1,444	-0,8421
36	-9,44	32,46	1,653	-0,7510
40	-9,84	31,28	1,383	-0,6451

Эти уравнения послужили в качестве исходных уравнений для вывода единого уравнения, характеризующего отпад (P) по числу деревьев ели в зависимости от диаметра стволов (D) и высоты нагара (H_n) одновременно:

$$\begin{aligned}
 P = & 34,10 - 4,29 D + 0,139 D^2 - 0,00147 D^3 + \\
 & + (260,33 - 22,49 D + 0,764 D^2 - 0,00868 D^3) H_n + \\
 & + (-171,76 + 19,60 D - 0,712 D^2 + 0,00831 D^3) H_n^2 + \\
 & + (30,70 - 3,83 D + 0,145 D^2 - 0,00172 D^3) H_n^3. \quad (56)
 \end{aligned}$$

В дальнейшем с целью упрощения нами был использован графический метод расчета. Результатом расчета явилась табл. 36, показывающая отпад в процентах по числу деревьев и запасу для еловых древостоев в целом, в зависимости от их среднего диаметра и средней высоты нагара. Точность, с которой кривые отражают истинный отпад, составляет по числу деревьев $\pm 11\%$ и по запасу $\pm 9\%$ (имеются в виду проценты от общего числа стволов и общего запаса). Мы считаем, что такая точность достаточна для решения практических лесохозяйственных задач.

Если сравнить величину отпада в ельниках с величиной отпада в сосняках, то оказывается, что отпад в ельнике превосходит величину отпада в сосняке (при одинаковом диаметре и одинаковой высоте нагара) в 3 раза.

Послепожарный отпад лиственницы

У лиственницы, по данным проведенных исследований, зависимость высоты нагара на стволах от величины диаметра несколько иная, чем у сосны и ели. Вначале, с увеличением диаметра от 8 до 18 см, высота нагара возрастает, а затем она уменьшается. Причину этого явления следует искать в особенностях строения коры лиственницы. Тонкие деревья имеют отслаивающуюся, часто засмоленную кору, по которой огонь легко поднимается по стволу. У более же толстомерных деревьев кора состоит в основном из пробкового слоя, который горит слабее, чем слоистая кора тонкомерных (зачастую более молодых) деревьев.

Таблица для определения отпада в ельниках после низовых пожаров по числу стволов (P_n , %) и запасу (P_m , %) в целом для древостоев, в зависимости от среднего диаметра и средней высоты нагара

Средний диаметр древостоя, см	P_n , %	Средняя высота нагара на стволах, м						
		0,1—0,5	0,6—1,0	1,1—1,5	1,6—2,0	2,1—3,0	3,1—4,0	4,1 и более
10	$\frac{P_n}{P_m}$	$\frac{28}{22}$	$\frac{64}{52}$	$\frac{85}{77}$	$\frac{95}{93}$	$\frac{100}{100}$	$\frac{100}{100}$	$\frac{100}{100}$
	$\frac{P_n}{P_m}$	$\frac{21}{16}$	$\frac{56}{44}$	$\frac{76}{67}$	$\frac{89}{83}$	$\frac{98}{98}$	$\frac{100}{100}$	$\frac{100}{100}$
12	$\frac{P_n}{P_m}$	$\frac{12}{8}$	$\frac{40}{30}$	$\frac{62}{55}$	$\frac{80}{75}$	$\frac{94}{93}$	$\frac{100}{100}$	$\frac{100}{100}$
	$\frac{P_n}{P_m}$	$\frac{7}{4}$	$\frac{33}{24}$	$\frac{53}{45}$	$\frac{71}{67}$	$\frac{90}{88}$	$\frac{100}{100}$	$\frac{100}{100}$
16	$\frac{P_n}{P_m}$	$\frac{4}{2}$	$\frac{27}{21}$	$\frac{47}{40}$	$\frac{63}{58}$	$\frac{85}{82}$	$\frac{98}{98}$	$\frac{100}{100}$
	$\frac{P_n}{P_m}$	$\frac{2}{0}$	$\frac{23}{18}$	$\frac{41}{36}$	$\frac{57}{53}$	$\frac{79}{77}$	$\frac{96}{96}$	$\frac{100}{100}$
20	$\frac{P_n}{P_m}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{19}{16}$	$\frac{37}{34}$	$\frac{53}{50}$	$\frac{74}{73}$	$\frac{94}{94}$	$\frac{100}{100}$
	$\frac{P_n}{P_m}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{16}{14}$	$\frac{34}{32}$	$\frac{51}{47}$	$\frac{71}{70}$	$\frac{92}{92}$	$\frac{100}{100}$
24	$\frac{P_n}{P_m}$							
	$\frac{P_n}{P_m}$							
28	$\frac{P_n}{P_m}$							
	$\frac{P_n}{P_m}$							
32	$\frac{P_n}{P_m}$							
	$\frac{P_n}{P_m}$							
36	$\frac{P_n}{P_m}$							
	$\frac{P_n}{P_m}$							

Зависимость отпада лиственницы от высоты нагара по ступеням толщины также имеет свою особенность. У толстомерных деревьев даже при большой высоте нагара полного отпада деревьев не наблюдается, так как крупные деревья лиственницы надежно защищены от влияния огня толстым слоем пробковой ткани коры в нижней половине ствола (см. рис. 22, В).

Послепожарный отпад березы

Березовые древостой сравнительно редко повреждаются низовыми пожарами. Поэтому мы исследовали влияние пожаров на отпад березы, произрастающей в составе поврежденных пожарами сосновых и еловых древостоев. В результате исследования была установлена зависимость высоты нагара от диаметра стволов березы. Характер этой зависимости примерно такой же, как у сосны и ели, — с увеличением диаметра высота нагара увеличивается. Была установлена зависимость отпада по числу деревьев березы (в %) от высоты нагара и диаметра деревьев (см. рис. 22, Г).

ОТПАД ПОСЛЕ ПОЧВЕННЫХ ПОЖАРОВ

Если в насаждениях недостаточного и нормального увлажнения при низовых пожарах степень повреждения деревьев определяется высотой нагара, то в насаждениях с избыточным увлажнением почв этот показатель не всегда будет правильно отражать состояние деревьев, поврежденных пожаром, так как горение в таких типах леса при засухе может распространяться в глубь подстилки или торфяного горизонта, поражая корни деревьев, т. е. начинается почвенный (подстилочный или торфяной) пожар.

На основе наблюдений П. А. Анишина в Вологодской области можно рекомендовать в качестве приделжек следующую зависимость степени повреждения древостоя от глубины прогорания мохового очеса (подстилки) и торфянистого горизонта в сфагновых, сфагново-зеленомошных и осушенных типах леса. При этом глубина прогорания устанавливается, как средняя величина, измерением расстояния от верхней границы сгоревшего покрова (эта граница хорошо заметна на нижней части стволов) до поверхности несгоревшего слоя.

Первая степень повреждения древостоя. Сгорает растительный покров из голубики, багульника, а по наповышениям — из черники, брусники и зеленых мхов. Сфагнум, как правило, почти не повреждается. В целом очес сгорает на глубину 5—10 см, огонь не достигает торфянистого горизонта.

Вторая степень повреждения. Сгорает весь растительный покров из кустарничков и мхов, сфагнум сохраняется только в западинках, где влажность его еще высокая. Очес прогорает почти полностью, частично повреждаются корневые лапы; глубина прогорания 15—20 см. Древостой изреживается.

Третья степень повреждения. Сгорает весь очес, иногда сгорает и верхняя часть торфянистого горизонта; общая глубина прогорания составляет 20—40 см. Корневые лапы повреждаются более чем у 50% деревьев, некоторые лапы перегорают. Древостой очень сильно изреживается или погибает полностью.

Пятая степень повреждения. Общая глубина прогорания более 40 см; многие корни перегорают, что сопровождается полной гибелью и вывалом древостоя.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗМОЖНОЙ СТЕПЕНИ ПОВРЕЖДЕНИЯ ДРЕВОСТОЯ ПОЖАРОМ

Определить вероятную степень повреждения древостоя на площади, только что пройденной огнем, несложно. В случае верхового пожара будет четвертая степень повреждения, при торфяном пожаре — пятая.

На площадях, пройденных низовыми пожарами, степень повреждения определяется для каждой породы по высоте нагара и среднему диаметру древостоя. В древостое равномерно по площади участка отбирается глазомерно 10—20 шт. деревьев, близких по размеру к средним. У этих деревьев измеряется диаметр на высоте 1,3 м и высота нагара (т. е. максимальная высота закопчености на стволах); вычисляются средние величины диаметра и высоты нагара. По ним находят в табл. 37 вероятную степень повреждения древостоя (для сосняков, ельников, лиственничников и березняков).

Сложнее определять возможную степень повреждения древостоя, еще не пройденного огнем, например перед надвигающимся фронтом пожара или при проведении профилактических палов. Эту задачу можно решить с помощью пробных зажиганий. Для определения возможной степени повреждения древостоя по высоте нагара площадь пробных зажиганий должна быть несколько сотых гектара; это практически невыполнимо. Делая же пробные зажигания на нескольких квадратных метрах, можно определить высоту пламени, затем по формуле Амосова (43) легко рассчитать высоту нагара, а по высоте нагара определить возможную степень повреждения древостоя. Можно обойтись и без расчетов по формуле, если помнить, что высота нагара в 2 раза выше высоты пламени (при высоте пламени больше 0,5 м).

Для безопасного проведения пробных зажиганий, особенно при проведении профилактических палов, полезно воспользоваться цилиндрическим экраном, который был предложен канадским лесопирологом Райтом (Wright, 1967).

Взамен дефицитной у нас медной сетки его вполне можно изготовить из листового железа и, кроме того, полезно дополнить аккумулятором тепла.

Цилиндрический экран для пробных зажиганий представляет собой цилиндр, изготовленный из листового железа (стали) толщиной 1—2 мм. Диаметр цилиндра 70 см, высота 50 см. Нижний край цилиндра затачивается в виде пилы с мелкими зубьями, чтобы можно было врезать экран в покров до минерального слоя. Для доступа воздуха внутрь экрана его стенки имеют отверстия: в верхней части экрана имеется полоса крупных отверстий диаметром около 10 мм (ширина полосы 25 см, отверстия размещаются на расстоянии 50×50 мм); ниже располагается полоса мелких отверстий диаметром до 3 мм (ширина полосы 15 см, расстояния между отверстиями 15×15 мм); самая нижняя полоса шириной 10 см не имеет отверстий. Для удобства транспортировки цилиндр можно сделать разборным, из двух половинок.

С помощью цилиндрического экрана можно определять: 1) возможность загорания; 2) глубину прогорания подстилки; 3) интенсивность горения покрова: а) по высоте пламени, б) по нагреванию воды в аккумуляторе тепла.

Перед зажиганием цилиндрический экран врезают в покров до минерального слоя, а затем пучком спичек поджигают покров в центре экрана. Для полной безопасности пробных зажиганий необходимо иметь на всякий случай лопату, еловую ветку (для захлестывания) и канистру с водой. После окончания горения край выгоревшего круга смачивается водой, а сам выжженный круг окапывается.

Интенсивность горения покрова в простейшем варианте можно оценивать по высоте пламени, но более точно она оценивается по нагреванию воды в аккумуляторе тепла. Аккумулятором тепла служит металлическая банка с водой. Для этой цели проще всего использовать большую плоскую консервную банку диаметром 21 см и высотой 9 см. Банка ставится сверху в центре цилиндрического экрана на две толстые проволоки, натянутые поперек экрана. На банке укрепляется термометр таким образом, чтобы его резервуар был погружен в воду. Перед зажиганием в банку наливают 1,4 л (две бутылки по 0,7 л) холодной воды, отмечая ее начальную температуру, а затем, при окончании пламенного горения, максимальную конечную температуру. По разности начальной и конечной температур определяют степень нагревания воды (в град).

По опытам, проведенным А. В. Волокитиной, между величиной нагревания воды в тепловом аккумуляторе указанного размера и среднемаксимальной величиной пламени существует следующая зависимость (в случае горения лишайникового покрова):

Вода в аккумуляторе тепла нагревается на °С	4	7	10	12	15	18	20	23	27
При среднемаксимальной высоте пламени, дм	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Использование цилиндрического экрана обеспечивает высокую стандартность и гарантирует безопасность пробных зажиганий.

Необходимо отметить, что:

1) пробные зажигания желательно проводить под кронами деревьев;

2) высота пламени, полученная при пробных зажиганиях в цилиндрическом экране, соответствует высоте пламени при пуске пала в штиль или против ветра, но не по ветру;

3) при пробных зажиганиях следует обращать внимание на степень прогорания подстилки, т. е. на возможность развития подстилочных пожаров, весьма опасных для древостоев с поверхностной корневой системой.

ПРОФИЛАКТИКА ПОЖАРОВ

В данной главе мы не будем рассматривать все виды профилактических противопожарных мероприятий, а остановимся лишь на некоторых, имеющих значение при борьбе с крупными лесными пожарами.

ПРОТИВОПОЖАРНЫЕ РАЗРЫВЫ, ЗАСЛОНЫ И МИНЕРАЛИЗОВАННЫЕ ПОЛОСЫ

С давних пор особое внимание обращается на расчленение лесной территории искусственными преградами: минерализованными полосами и противопожарными разрывами. Искусственные преграды создаются в виде сети, делящей всю лесную площадь на замкнутые блоки. В основе лежит предположение, что возникший пожар останется локализованным внутри блока и не распространится за его пределы.

Однако как эксперименты, так и практика показывают, что ни минерализованные полосы, ни даже широкие противопожарные разрывы не в состоянии остановить крупный пожар.

Например, по опытам В. В. Фурьева и Н. П. Курбатского (1972), фронт низового пожара средней интенсивности на участке 30 м переходит через минерализованную полосу в 1,4 м шириной с вероятностью 51%, а через полосу 2,8 м шириной — с вероятностью 22%. Следовательно, на участке в 100 м вероятность перехода пожара повысится соответственно до 90 и 55%, на участке 200 м — до 99 и 80%, а на участке 500 м — до 100 и 98%. Это доказывает, что остановить крупный пожар, протяженность фронта которого всегда больше 1 км, минерализованными полосами невозможно, даже если горение на кромке будет иметь только среднюю интенсивность. В случае же сильных низовых и верховых пожаров, где проявляется пятнистая форма распространения, несостоятельными оказываются и противопожарные разрывы.

Это наблюдалось летом 1972 г. в Костромской, Владимирской и Горьковской областях и в Марийской АССР. На территории данных областей имелись крупные массивы хвойных (сосновых) насаждений с высоким процентом молодняков I и II классов возраста; до 15% сосновых лесов были представлены борами бело-

мошниками и верещатниками, а 60% — ягодниковыми и мшистыми типами леса. Сотни тысяч гектаров молодняков — это территория потенциальных верховых пожаров.

Следует подчеркнуть, что хвойные массивы в этих областях, в том числе и молодняки, были расчленены довольно густой сетью из различного рода разрывов: противопожарными и квартальными просеками, шоссейными и железными дорогами, линиями электропередач, газопроводами. Казалось, что эти разрывы должны были быть надежным препятствием для распространения лесных пожаров. Однако просеки и разрывы даже шириной 100 м и более не смогли остановить продвижение фронта верховых пожаров.

Так было в Макарьевском лесхозе Костромской области, где ни дороги, ни просеки узкоколейной железной дороги не остановили распространение пожаров. А в Марийской АССР фронт лесного пожара легко первоначально преодолел просеку шириной 60 м вместе с шоссе, а затем через 200 м еще такую же просеку у Казанской железной дороги и прекратился лишь тогда, когда достиг скошенных лугов. Таких примеров много и они не случайны. Исследования показывают, что всякого рода прогалы, разрывы и просеки значительно увеличивают скорость ветра в лесу, а следовательно, и скорость распространения пожаров и способствуют развитию низовых пожаров в верховые. Э. Н. Валендиком (1968) установлено, что перед разрывами скорости ветра под пологом леса возрастает, и чем разрыв шире, тем больше скорость ветра на противоположной стороне разрыва. В связи с этим он считает, что расчлененность хвойных массивов различного рода разрывами способствует быстрому распространению верховых пожаров.

Отрицательное влияние расчлененности массивов подтверждается характером пожаров в Марийской области в 1921 г. Известно, что засуха в Марийской области тогда была значительно продолжительнее, чем в 1972 г. Как отметил Д. М. Шлыков (1927), на территории области осадков не было с апреля по август. Пожары продолжались со второй половины апреля до ноября, и их практически не гасили. А в июле по области прошли еще и ураганные ветры. И тем не менее, несмотря на чрезвычайно длительную засуху и сильные ветры, площадь сгоревшего леса была примерно равна площади, охваченной пожарами в 1972 г. Одной из причин несколько более медленного распространения лесных пожаров в 1921 г., по всей вероятности, явилось то обстоятельство, что леса не были столь расчленены и изрежены, а молодняки занимали меньшую площадь.

Следовательно, для предупреждения распространения лесных пожаров, вероятно, целесообразно не расчленять разрывами и так достаточно изреженные леса, а создавать противопожарные заслоны, т. е. широкие полосы негоримого леса, которые преграждали бы распространение и низовых, и верховых пожаров.

Лес становится негоримым, если очистить его от сухостоя и валежника, устранить подрост и подлесок, в молодняках очистить стволы от сучьев до высоты 2 м, проложить через 50 м минерализованные полосы, а напочвенный покров между ними периодически выжигать.

По представлениям немецких лесоводов (Hübener, 1968; Mißbach, 1972), заслоны должны располагаться на небольшом расстоянии друг от друга, так как с увеличением этого расстояния защитная эффективность всей системы заслонов быстро сокращается. Если принять максимальную допустимую площадь пожара 100—200 га, то расстояния между заслонами должны быть не более 2—3 км. Создание такой системы заслонов и уход за ними — весьма дорогое мероприятие, которое может окупить себя только в самых пожароопасных массивах.

Какова должна быть ширина заслона? Поскольку при верховых пожарах длина скачка пламени по кронам достигает 100 м, а дальность разлета горящих частиц превышает иногда 300 м, мы рекомендуем создавать заслоны шириной не менее 300 м. Однако в ряде случаев даже такая ширина бывает недостаточной.

Учитывая то, что основная масса горящих частиц попадает в конвекционный поток пожара с горящего сухостоя, важным профилактическим мероприятием будет вырубка сухостойных деревьев в лесу и прежде всего в заслонах и возле них, особенно в тех местах, где возможен верховой пожар.

Итак, весь опыт борьбы с крупными лесными пожарами показывает, что их фронт преодолевает как минерализованные полосы, так и противопожарные разрывы, а в случае пятнистой формы распространения при сильном ветре их, вероятно, не смогут задержать и заслоны. Поэтому всю совокупность полос, разрывов и заслонов необходимо рассматривать не как систему непреодолимых для пожаров преград, а как сеть заранее подготовленных опорных линий для активной борьбы с пожарами. В том случае, когда минерализованные полосы (разрывы) рассматриваются как почти непреодолимые противопожарные преграды, останавливающие пожар без участия человека, зона их действия распространяется на все пространство между ними. Методика экономического обоснования системы полос для такого случая разработана П. А. Цветковым с соавторами (1974). Правда, в своей методике они не учли, что вероятность перехода пожара через минерализованную полосу увеличивается по мере возрастания размеров пожара и ширины его фронта.

Если же рассматривать минерализованные полосы и разрывы только как заранее подготовленные опорные линии для остановки фронта пожаров, то вполне очевидно, что каждая из них имеет какую-то ограниченную зону действия вокруг себя, так как в случае возникновения пожара вдалеке от полосы, пожар будет остановлен без ее помощи. Ширина зоны действия мине-

рализованной полосы зависит от величины вероятного погектарного ущерба на участках, примыкающих к полосе: чем меньше вероятный ущерб, тем шире может быть зона действия полосы, так как в этом случае можно дальше отступить перед фронтом пожара.

Экономический эффект предварительно сделанных опорных линий будет проявляться за счет сокращения времени, потребного на создание этих опорных линий в процессе остановки пожара, т. е. за счет более быстрого проведения этой операции и тем самым уменьшения потерь от пожара. Если сокращение ущерба от пожаров (среднее за год) будет превосходить ежегодные затраты на создание минерализованных полос и уход за ними, то данное мероприятие будет оправдано, в противном случае необходимо от него отказаться.

Для примера возьмем минерализованную полосу, проходящую по однородному насаждению, вернее участок этой полосы длиной 1 км (так как ширина фронта крупного пожара бывает не меньше 1 км). Обозначим ежегодные расходы по уходу за этим участком плюс амортизационные отчисления, как A_p .

Время, которое затрачивается на прокладку опорной линии длиной $L=1$ км, обозначим через T_0 , скорость пожара — через V и вероятный ущерб от пожара на единице площади — через Y . Если

$$A_p < (T_0 \cdot V \cdot L \cdot Y), \quad (57)$$

то предварительное создание опорных линий в виде минерализованных полос будет экономически оправдано.

В неравенстве (57) наиболее трудно определим вероятный ущерб от пожара на единице площади (Y), поскольку он должен отражать не только вероятную степень повреждения древостоя, но и вероятность появления огня в зоне действия минерализованной полосы (от источника загорания или от пожара). Величину вероятного погектарного ущерба можно рассчитать (правда, весьма приблизительно) по следующей формуле:

$$Y = Ч \cdot С \cdot П \cdot T^2 \cdot Э \cdot Y_0, \quad (58)$$

где Y — величина возможного погектарного ущерба от пожаров на данном участке (в руб.); $Ч$ — частота загораний на данной части территории лесхоза (количество загораний в сезон на единице площади по материалам прошлых лет); $С$ — относительное число дней в сезоне (в %), когда участки данной категории находятся в состоянии готовности к загоранию ($С = a/H$, где H — величина лесопожарного показателя засухи, при которой участок достигает готовности к загоранию, a — коэффициент для данного района); $П$ — условная скорость прироста площади пожара на участках данной категории (в га); T — среднее время свободного распространения пожара, т. е. наиболее вероятное время (в часах), которое будет затрачено на обнаружение пожара в данной

части лесхоза и на доставку к нему средств пожаротушения и остановку пожара; Y_0 — возможный погектарный ущерб на участках данной категории в случае пожара (в натуральных величинах); Э — стоимостная оценка единицы натурального ущерба (в руб.).

Можно заранее утверждать, что минерализованные полосы и заслоны будут экономически эффективны только в очень высокогоримых массивах хвойных лесов на дренированных почвах, особенно в южной части лесной зоны и в лесостепи. В среднетаежных и северотаежных лесах, а также в горных условиях необходимость в предварительном создании опорных линий почти отпадает за счет естественной расчлененности территории реками, ручьями, сырыми лощинами, дорогами, тропами и малогоримыми участками (Софронов, 1975).

ЛЕСОПОЖАРНЫЕ КАРТИНЫ

Во время крупных лесных пожаров всегда наблюдается сильное задымление территории (на десятки километров), это парализует деятельность авиационной охраны. Правильно подобрать с летательного аппарата трассу отжига с максимальным использованием природных рубежей в условиях задымления почти невозможно.

Шкалы природной (потенциальной) пожарной опасности типов леса (или категорий участков) в простейшем виде показывают очередность возможного загорания типов леса, а в более сложном варианте — при какой величине показателя засухи могут загораться участки данного типа леса, а также вид пожара, его скорость и пр.

Простые шкалы уже используются при противопожарном устройстве территорий. Очень простая шкала с тремя классами была в свое время предложена В. Г. Нестеровым (1941). И. С. Мелехов в 1947 г. разработал более детальную пятиклассную «Шкалу оценки лесных участков по степени опасности возникновения в них пожаров», которая в последующем была им дополнена; в настоящее время шкала включена в действующую лесоустроительную инструкцию и в «Указания по противопожарной профилактике...» (Зинов, 1976).

В каких единицах измерять пожарную опасность конкретных участков при противопожарном устройстве? Существует тенденция устанавливать класс для участков с учетом не только их природной пожарной опасности, но также близости или появления источников огня и возможных послепожарных последствий. Например, в лесоустроительной инструкции указано, что при наличии захламленности или густого подроста пожарная опасность участка устанавливается на класс выше по причине возможного перехода низового пожара в верховой (и следова-

тельно, гибели насаждения); точно так же выше на класс считается пожарная опасность вблизи дорог общего пользования из-за увеличенного количества источников огня; хвойные молодняки независимо от типа леса относят к самому пожароопасному классу. Можно прийти к заключению, что под измерительная величина возмозного послепожарного ущерба, зависящая от вероятности возникновения пожара на данном участке и его ожидаемых последствий. Ее можно рассчитать по предложенной выше формуле (58).

В настоящее время мы пришли к заключению, что подобные интегрированные оценки пожарной опасности участков не имеют большого практического значения. Интергрированные классы пожарной опасности, как бы точно ни были рассчитаны, при нанесении их на план дают только относительную оценку пожарной опасности, но не вскрывают конкретных причин повышенной пожарной опасности на том или ином участке, без чего невозможно правильное проектирование профилактических мероприятий. Поэтому мы считаем, что на лесопожарных планах и картах в интересах практики необходимо показывать дифференцированную оценку пожарной опасности (т. е. сами факторы, включая условия борьбы с лесными пожарами) и притом в конкретном виде. Следует напомнить, что прежняя шкала В. Г. Нестерова при всей ее примитивности давала именно дифференцированную оценку каждому участку (по характеру леса и по расстоянию от населенного пункта).

В приложении 2 мы приводим методику составления лесопожарных планов (карт). В основу разработанной нами методики положен следующий принцип: карта должна давать максимум информации, полезной для борьбы с лесными пожарами и для их профилактики, при минимуме затрат на изготовление карты. Первое условие достигается методом дифференцированной по факторам характеристики пожарной опасности участков на карте, второе условие — путем изготовления карты (плана) на базе лесоустроительных планшетов.

При составлении лесопожарной карты (плана) желательно пользоваться соответствующими шкалами природной пожарной опасности. Одна из первых шкал (для таежных лесов европейской части СССР) была разработана в ЛенНИИЛХ (Анцышкин, 1957; Курбатский, 1962). Затем появился ряд шкал для отдельных районов, отличающихся своеобразными типами леса (Фурьев, 1964; Софронов, 1967). Наиболее точная шкала для лесов северо-западной части СССР (по группам типов леса) помещена в последних методических рекомендациях ЛенНИИЛХ (Вонский и др., 1975).

Все существующие шкалы не показывают изменения природной пожарной опасности в зависимости от полноты древостоя. В связи с этим в 1968—1975 гг. мы проводили изучение

Влияния полноты древостоя в сосняках и ельниках на условиях высыхания лесных горючих материалов под пологом леса. Полученные данные позволяют существенно дополнить имеющиеся шкалы природной пожарной опасности лесных участков (см. Приложение 1, таблица).

Лесопожарные карты с раскраской выделов по классам природной пожарной опасности и с нанесением прочей ситуации, характеризующей условия возникновения, распространения и тушения пожаров, будут служить не только целям обоснованного проектирования противопожарных мероприятий в лесу, но могут с успехом использоваться в качестве оперативных карт при тушении лесных пожаров, особенно крупных.

При составлении лесопожарных карт особое внимание следует обращать на дороги (в том числе лесовозные, проселочные) и тропы (даже звериные) и на просеки, поскольку дороги, тропы и просеки, правильно нанесенные на карту, делают территорию доступной.

Выводы

1. Минерализованные полосы, противопожарные разрывы и заслоны не являются непреодолимыми преградами для фронта крупных пожаров, они могут лишь выполнять роль заранее подготовленных опорных линий.

2. В таежных лесах существует густая сеть природных рубежей (ручьев, лощин, сырых участков), которые могут быть использованы в качестве опорных линий при остановке крупных пожаров, если будут нанесены на лесопожарные карты.

3. В качестве топоосновы при составлении лесопожарных карт лучше всего использовать лесостроительные планшеты, выдела на которых раскрашиваются по классам очередности загорания.

4. Особое внимание следует уделить нанесению на карты всей сети лесных дорог и троп — основного фактора доступности территории.

БОРЬБА С ПОЖАРАМИ

ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ К ПОЖАРООПАСНОМУ СЕЗОНУ

Работа чрезвычайных пожарных комиссий (ЧПК)

Как показал опыт пожароопасного сезона 1972 г., чтобы преодолеть чрезвычайную пожарную ситуацию, приостановить ее развитие, необходимы самые решительные меры и привлечение значительных технических и людских ресурсов. Положительные результаты достигнуты были там, где своевременно создали специальные (чрезвычайные) областные и районные комиссии по борьбе с лесными пожарами (ЧПК). В их состав вошли руководители подразделений лесного хозяйства, партийные работники и руководители различных служб: связи, транспорта, снабжения, здравоохранения и др. Это позволило оперативно принимать соответствующие решения, быстро привлекать и сосредоточивать необходимые силы и средства на наиболее опасных участках борьбы с пожарами.

Из опыта 1972 г. также следует, что для борьбы с крупными лесными пожарами население наиболее целесообразно использовать через формирования гражданской обороны. Эта форма позволяет быстро привлекать на тушение пожаров наиболее работоспособных людей с высокими моральными качествами, организованных и вооруженных современными техническими средствами.

При борьбе с крупными и многочисленными пожарами в условиях задымления большое значение имеет высокое моральное состояние пожарных и населения. Это достигается путем широкой информации их через печать, радио и телевидение о нарастании пожарной опасности погоды, а также о результатах работ по тушению пожаров, о мероприятиях комиссий по борьбе с лесными пожарами.

Опыт показал, что для четкой организации тушения крупных пожаров, когда в тушении заняты сотни людей и десятки технических единиц, крайне необходимы руководители тушения пожаров высокой квалификации, хорошо знающие особенности леса, характер развития пожаров в данных конкретных условиях, и способные умело руководить большим количеством людей и техники. За рубежом подготовке руководителей тушения лесных пожаров придают очень большое значение. Например, лесная служба Австралии для подготовки высококвалифицированных руко-

водителей тушения лесных пожаров направляет своих специалистов на стажировку в США.

Учитывая ту положительную роль, которую сыграли чрезвычайные пожарные комиссии в борьбе с пожарами 1972 г., было бы весьма полезно сделать такие комиссии *постоянно действующими*, чтобы они могли заранее организовать и подготовить людей и технические средства для борьбы с крупными лесными пожарами.

До начала пожароопасного сезона районным ЧПК необходимо подобрать в каждом районе людей, которые могут успешно руководить тушением крупных пожаров; количество будущих руководителей тушения должно определяться возможным числом крупных пожаров, одновременно действующих на территории района (по опыту прошлых лет). Областные ЧПК в свою очередь подбирают будущих руководителей тушения катастрофических пожаров (площадью более 2000 га) из такого же расчета.

Руководитель тушения должен обладать соответствующими знаниями в области природы лесных пожаров, опытом их тушения, организаторским талантом, а также интересом и любовью к этому трудному и благородному делу. Совсем необязательно подбирать руководителей тушения из числа должностных лиц. Например, в США среди известных руководителей тушения самых крупных пожаров имеется даже один парикмахер из провинциального городка.

Будущие руководители тушения должны заблаговременно пройти дополнительную подготовку на семинарах. Им необходимо заранее установить деловые контакты с административными работниками предприятий и начальниками соединений гражданской обороны, которые будут обеспечивать группы по тушению людьми и техникой. Каждому руководителю следует познакомиться с личным составом группы, сформировать бригады, организовать их обучение, решить вопросы снабжения пожарной техникой, взрывчаткой, средствами связи и т. д.

Остановка крупного пожара невозможна без подробного тактического плана, составленного с учетом всех особенностей лесных участков, окружающего пожар, и прежде всего их горимости при данной погоде. Для этого лучше всего иметь специальные лесопожарные карты на каждое лесничество, составленные по разработанной нами методике.

Регламентация тушения пожаров различной крупности

Лесные пожары в зависимости от их площади предлагается разделить на шесть классов:

Класс А — загорание (менее 0,2 га, в среднем около 0,1 га) — это пожар, который может быть остановлен и потушен одним человеком (например, патрульным).

Класс Б — малый пожар (от 0,2 до 2 га, в среднем около 1 га) — это пожар, который может быть остановлен звеном из 2—4 человек.

Класс В — небольшой пожар (от 2,1 до 20 га, в среднем около 10 га) — это пожар, который может быть остановлен бригадой численностью до 10 человек.

Класс Г — средний пожар (от 21 до 200 га, в среднем около 100 га) — это пожар, который может быть остановлен специальной ударной группой численностью около 30—40 человек.

Класс Д — крупный пожар (от 201 до 2000 га, в среднем около 1000 га) — это пожар, который может быть остановлен ударной группой численностью около 100 человек.

Класс Е — катастрофический пожар (более 2000 га, в среднем около 10 тыс. га) — это пожар, который может быть остановлен ударной группировкой численностью около 400 человек.

Крупные и катастрофические пожары обычно действуют на фоне вспышки большого количества меньших по размеру пожаров. Практика борьбы с лесными пожарами показывает, что оперативные силы лесопожарной охраны (наземной и авиационной) на местах должны использоваться только для борьбы с пожарами классов А, Б, В (т. е. площадью до 20 га); отвлекать их силы на тушение крупных пожаров нецелесообразно.

Борьба с пожарами классов Г и Д организуется районной ЧПК с привлечением своей ударной группы, а также резерва авиабазы для остановки пожара.

Борьба с пожарами класса Е проводится под руководством областной (республиканской) ЧПК с использованием для остановки пожаров ударных группировок и резервов Центральной авиабазы.

Этапы тушения крупного пожара

Работы по ликвидации крупного пожара целесообразно разделить на два этапа: 1) остановка распространения пожара и 2) его локализация, т. е. устранение возможностей нового распространения пожара после его остановки. В процессе каждого этапа выполняются различные работы, которые можно свести к четырем операциям: а) непосредственная остановка пожара (тушение кромки, отжиг), б) собственно локализация (окаймление пожарища минерализованными полосами), в) окарауливание и г) дотушивание (Курбатский, 1973).

Ввиду большой протяженности кромки на крупном пожаре необходимо организовывать окарауливание не после локализации пожара, а в самом процессе остановки пожара. Бригада пожарных по мере продвижения вдоль кромки (или по трассе отжига) должна оставлять позади себя караульных, которые ликвидируют возобновление горения на кромке и занимаются дотушиванием очагов вблизи кромки. Таким образом, на крупном пожаре по

крайней мере три операции (остановка, окарауливание и дотушивание) должны выполняться одновременно.

Разделение тушения пожара на две стадии: остановка и локализация — имеет важное практическое значение. Остановка крупного пожара должна осуществляться иными способами и техническими средствами и даже другими людьми, нежели его локализация. Для быстрой остановки пожаров используются, как правило, легкие мобильные средства, а при локализации идет в ход тяжелая техника. Остановка крупного пожара требует от людей опыта, высокой слаженности в работе и мужества; при локализации пожаров достаточно добросовестности и дисциплины. Поэтому остановку крупных пожаров желательно поручать специальным группам высококвалифицированных лесных пожарных (как профессиональных, так и добровольных), которые после выполнения работы должны сразу же сменяться и вывозиться на отдых для того, чтобы быть готовыми к заброске на новый пожар. В настоящее время, когда на практике не разделяют два этапа — остановку и локализацию, зачастую при остановке тщетно пытаются применить средства и способы локализации пожара (например, останавливают фронт сильного пожара минерализованными полосами).

Учитывая вышесказанное, следует в каждом районе организовать одну ударную высококвалифицированную группу специально для остановки крупных пожаров; ее должен возглавить самый опытный руководитель. Состав группы — четыре бригады по 20—25 человек в каждой с обязательным участием взрывников. Все остальные организованные группы используются при локализации пожаров, остановленных ударной группой, т. е. сменяют ее на пожаре после того, как пожар остановлен.

Точно так же и областная ЧПК должна создать ударную группировку из 300—400 человек для остановки катастрофических пожаров. Опыт показывает, что в состав таких группировок полезно включать воинские подразделения; они получают прекрасную практику борьбы с катастрофическими пожарами, которые обязательно будут возникать в случае военных действий. В ударные группировки должны быть привлечены в качестве консультантов научные работники — лесопирологи.

ОСТАНОВКА ПОЖАРА

План остановки пожара

Для составления плана остановки крупного пожара необходимо:

- 1) иметь лесопожарную карту (схему) площади, на которой действует пожар; 2) провести разведку пожара; 3) составить прогноз развития пожара и его последствий на ближайшие дни.

Если нет специальной лесопожарной карты, она изготавливается в срочном порядке, в виде схемы. Карта должна охватывать не только площадь пожара, но и прилегающие участки на расстоянии от кромки в тылу — до 3 км, на флангах — до 5 км, перед фронтом — на расстоянии до 10 км и более в зависимости от скорости продвижения пожара. Карта (схема) составляется по разработанной нами методике (см. приложение 2). Основой ее служит выкопировка из лесоустроительных планшетов. На выкопировке дополняют шифры выделов указанием породы, типа леса (по таксационному описанию) и класса пожарной опасности участков по их готовности к загоранию, а затем, пользуясь топокартой и аэрофотоснимками, обозначают как можно точнее дороги, тропы, ручьи, реки, тальвеги лощин, поляны, редины и прочие возможные рубежи и ориентиры. На основании донесений летнабов, на схему наносят контуры пожара на каждый день его развития (с целью определения скорости распространения). Особо отмечают малоценные участки (заросли кустарников, невозобновившиеся вырубки и гари), а также участки, где непосредственное тушение кромки пожара затруднено (густые молодняки, захламленные площади, насаждения с густым подростом и подлеском).

Разведка пожара включает в себя уточнение границ пожара на плане и выявление вида и силы горения на кромке и ее отдельных частях в разное время суток, но в особенности вечером и утром. Главное внимание обращается на силу пламенного горения, т. е. на высоту пламени.

Разведку производят путем осмотра пожара с воздуха и с помощью наземного осмотра, дополняя ее расспросами очевидцев. В случае наземного осмотра на некоторых участках, окружающих пожар, для уточнения возможной силы горения и последствий полезно провести пробные зажигания. Пробные зажигания удобно делать в цилиндрическом экране.

Для составления прогноза развития пожара на ближайшие дни необходимо иметь, кроме лесопожарной карты и данных разведки, еще данные о погоде (температуре и влажности воздуха и осадках) по ближайшей метеостанции или метеопункту за период, прошедший с момента выпадения последнего обложного дождя величиной более 5 мм. На основании полученных метеоданных рассчитывается лесопожарный показатель засухи, по величине которого судят о возможности, виде и силе горения на участках, окружающих пожар.

Кроме всего вышеперечисленного, необходимо получить метеорологический прогноз на ближайшие дни и проанализировать его, обратив особое внимание на направление и силу ветра и возможное выпадение осадков.

В результате расчетов и данных разведки на карте отмечают участки негоримые или слабо горимые при данной погоде, участки, где возможен подземный (почвенный) пожар или гибель на-

саждений, а также участки, где при данной силе пожара, (высоте пламени) не ожидается серьезных повреждений древостоя.

Принимая во внимание скорость продвижения кромки пожара и характер погоды в прошедшие дни и учитывая прогноз погоды на ближайшее время (особенно, направление и силу ветра), прогнозируют возможное положение кромки на завтра и послезавтра, определяют характер и силу горения частей кромки, особенно утром и вечером, и условия тушения кромки (в смысле наличия захламленных участков и пр.).

Для прогнозирования положения кромки очень важно предсказать как можно точнее скорость ее передвижения. Скорость продвижения горящей кромки больше всего зависит от скорости и направления ветра. Против ветра тыловая кромка пожара движется медленно — 20—50 м/час. Скорость фронтовой кромки низового пожара в густом лесу, где сильного ветра не бывает, редко превышает 0,5 км/час, обычно же ее скорость 100—300 м/час. Зато на открытых пространствах (вырубки, гари, редины) скорость пожара при очень сильном ветре может достигать 2—3 км/час. С такой же скоростью продвигается и верховой пожар в моменты кратковременных «скачков», однако средняя скорость верхового пожара ненамного превышает скорость низового в лесу. Пятнистые пожары могут в отдельные моменты распространяться со скоростью до 10 км/час.

Скорость фронтальной кромки низового пожара находится примерно в квадратичной зависимости от скорости ветра: если скорость ветра увеличивается в 2 раза, то скорость фронтальной кромки — в 4 раза.

Интенсивность и скорость лесных пожаров сильно меняется в течение суток. Наиболее активен пожар днем, с 11 до 17 час. С вечера обычно стихает ветер, понижается температура, увеличивается влажность воздуха, мхов и лишайников, поэтому лесной пожар слабеет, особенно к утру, если выпадает роса, днем же он разгорается с новой силой. Вечер, ночь и утро — наиболее удобное время для непосредственного тушения кромки пожара.

На основании прогноза развития пожара, с учетом лесопирологической характеристики участков, окружающих пожар, с учетом всех возможных рубежей, которые можно использовать в качестве опорных линий (рек, ручьев, лощин, ложбин, дорог, троп и пр.), составляется план атаки пожара, план его остановки.

Прежде всего определяются приемы и способы остановки пожара. Они зависят, во-первых, от характера и силы горения на кромке и, во-вторых, от условий тушения. Непосредственное тушение кромки возможно только на участках, не захламленных, не заросших густым молодняком и кустарниками, где пламенное горение имеет форму слабого или среднего по силе низового пожара, т. е. при высоте пламени менее 1,5 м. В случае верховых, пятнистых, валежных, кустарниковых (в том числе в молодняках) и сильных напочвенных пожаров непосредственное туше-

ние кромки практически невозможно, остановить ее продвижение может только преграда в виде негоримой площади или полосы определенной ширины, с которой удален горючий материал.

Руководитель тушения должен твердо знать, какая преграда может остановить распространение данного пожара, чтобы не тратить понапрасну силы, средства и время на создание неэффективных барьеров.

Способность пожара преодолевать различные преграды зависит в основном от двух величин: 1) от интенсивности горения на фронте пожара и 2) от протяженности самого фронта. Чем длиннее фронтальная кромка и чем сильнее горение на ней, тем труднее задержать пожар какой-либо преградой.

Под пологом леса, где не бывает большого ветра, фронтальная кромка слабого низового пожара может быть надежно остановлена преградой (минерализованная полоса, выжженная полоса, дорога, ручей и пр.) при ширине ее 2—3 м. Для остановки пожара средней силы ширина преграды должна быть 5—6 м, а в случае сильного низового пожара — не менее 10 м.

На открытых пространствах способность пожара преодолевать преграды возрастает многократно. Ветер довольно легко перебрасывает горящие частицы через противопожарные разрывы, реки, болота на расстояние более 200—300 м. Поэтому остановить пожар необходимо в лесу, не подпуская его к открытому месту, т. е. заблаговременно делая отжиг от края болота, берега реки, противопожарного разрыва. И наоборот, если пожар направляется с открытого пространства (например, с вырубки) в лес, не следует препятствовать этому (за исключением тех случаев, когда лес имеет густой хвойный подрост или представлен хвойным молодняком). Остановить пожар в лесу легче, так как сила ветра там в 10—20 раз слабее, чем на вырубке.

Когда ветер стихает, способность пожара преодолевать преграды на открытом пространстве становится такой же, как в лесу.

Распространение верхового пожара задерживается полосой леса, под пологом которого выжжен напочвенный покров, поскольку без поддержки низового огня верховой огонь продвигаться долго не может. Ширина полосы с выжженным покровом должна быть не менее 200 м. Исключение составляют верховые пожары на крутых склонах, по которым они поднимаются безостановочно. На таких склонах (круче 25°) задержать верховой пожар невозможно.

Преградами на пути распространения пятнистых пожаров могут служить только обширные площади негоримых в данное время участков.

Самый простой, дешевый, надежный и быстрый способ создать преграду необходимой ширины, сделать площадь негоримой — это выжечь на ней напочвенный покров, т. е. произвести **отжиг**.

Главной ошибкой в борьбе с крупными пожарами является недостаточное использование отжига. Работники лесной охраны страдают какой-то странной «огнебоязнью».

При отжиге совсем не нужно рубить просеки, копать канавы, прокладывать бульдозером широкие полосы. Пускают отжиг от опорной линии, в качестве которой может служить дорога, тропинка, ручей, лощина, узкая (20—40 см) минерализованная полоска, смоченная полоса покрова и т. д. По самому краю опорной линии, обращенному к пожару, зажигают напочвенный покров; делать это надо не дожидаясь приближения пожара, поскольку слабое пламя отжига движется против ветра очень медленно — 20—50 м/час.

При разработке плана атаки возможны четыре варианта остановки пожара.

1. Горение с вечера до утра на всей кромке бывает слабым или средней силы, причем кромка проходит по местам, удобным для тушения. Такие пожары останавливают методом непосредственного тушения кромки; операцию начинают с вечера, бригады вначале тушат тыльную кромку, затем продвигаются по обоим флангам к «голове» пожара, утром они должны замкнуть кольцо тушения (рис. 24, а). Если кромка пожара имеет значительную протяженность, то тушение начинают не только с тыла, но одновременно и с середины флангов, двигаясь в сторону фронта.

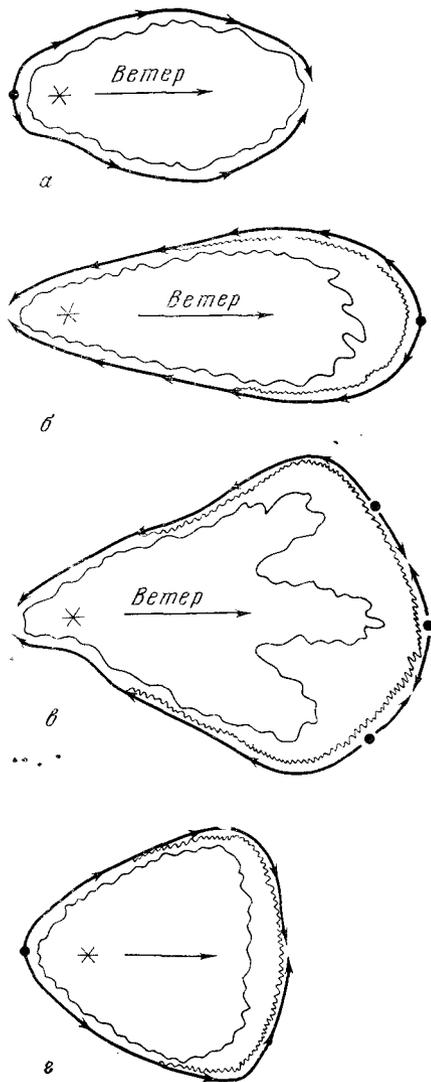


Рис. 24. Схемы остановки крупных лесных пожаров:

а — остановка пожара непосредственным тушением кромки; б — остановка пожара отжигом; типичный вариант: отжиг начинается в одной точке перед фронтом пожара; в — остановка пожара с несколькими «головами» — выступами фронта: отжиг начинается в нескольких точках, против выступов фронта (способ отсечки); г — остановка медленно распространяющегося пожара: отжиг начинают от флангов и ведут его параллельно фронту (параллельный способ)

2. Горение на кромке в ночные и утренние часы также несильное, но кромка на отдельных участках проходит по неудобным для тушения местам (по молоднякам, захламленным площадям). Днем производят вокруг таких неудобных участков отжиг, трассу отжига прокладывают по удобным для тушения местам, причем сразу же тушат внешнюю кромку отжига, концы трассы отжига выводят на кромку пожара. С наступлением вечера приступают к остановке пожара, как в первом варианте.

3. Несильное горение в ночные и утренние часы наблюдается только на тыловой и фланговых кромках, а на фронтальной кромке оно остается сильным или ослабляется на короткое время, недостаточное для непосредственного тушения всей фронтальной кромки, или фронтальная кромка проходит по неудобным для тушения местам.

В таких случаях на тыловой и фланговых кромках пожар тушат с вечера до утра, а фронт останавливают отжигом; отжиг начинают днем перед фронтом пожара, охватывая его с двух сторон и выводя концы трассы отжига на фланговые кромки. Перед фронтом отступают с таким расчетом, чтобы пожар подошел к выжженной полосе только к вечеру, когда ветер стихнет.

4. Горение почти по всей кромке сильное или кромка проходит по неудобным для непосредственного тушения местам. В данном случае пожар останавливают отжигом, его начинают днем против «головы» пожара и охватывают в замкнутое кольцо с двух сторон всю площадь пожара; перед фронтом отступают подале, чтобы он смог встретиться с отжигом к вечеру, а фланги и тыл тушат отжигом с минимального расстояния (рис. 24, б).

Остановка пожара непосредственным тушением кромки

Особой подготовки для непосредственного тушения кромки не требуется. Тушение кромки лучше всего проводить вечером, ночью и утром, когда пламенное горение ослабевает.

Основные способы тушения кромки — захлестывание и частичный отжиг; вспомогательные — опрыскивание растворами химикатов или водой из ранцевых опрыскивателей, окапывание и забрасывание грунтом.

Для захлестывания употребляют срубленные деревца подроста ели, сосны, пихты и кедра или еловые и пихтовые ветки; очень эффективны специально изготовленные металлические метлы. В наставлениях рекомендуется употреблять только ветки лиственных пород, поскольку хвойные ветви при захлестывании легко воспламеняются; опасения эти необоснованны.

Чрезвычайно ускоряет тушение кромки пожара **частичный отжиг**. Например, если на кромке пожара встретится горящий валеж, куртина молодняка, заросли кустарника, которые очень трудно затушить, тогда их обходят стороной по более чистому

месту, ведя при этом поджигание покрова и сразу же захлестывая внешнюю кромку подоженной полосы. В результате трудные для тушения объекты остаются спокойно догорать на выжженной площади пожарища.

Общее число рабочих, которые должны принимать участие в ночной атаке пожара, определяется из расчета: не менее 5 человек на 1 погонный километр кромки (с учетом ее извилистости).

Каждый рабочий должен иметь топор, легкую лопату, запас питьевой воды (1—2 фляжки) и пищи (на 1 день), теплую куртку или свитер и прочные рукавицы. В комплект снаряжения бригады должны обязательно входить два-три зажигательных аппарата (капельно-факельных) или иные зажигательные средства, желателно также иметь несколько ранцевых опрыскивателей, особенно в том случае, если по пути будут встречаться водные источники.

Остановка пожара происходит следующим образом. После дневного отдыха две бригады доставляются в «пятю» пожара и начинают тушить кромку, расходясь в противоположные стороны, к флангам. Если протяженность кромки велика, одновременно две другие бригады начинают тушить фланги примерно с их середины и движутся к «голове» пожара.

Во время работы одни рабочие тушат кромку, другие несут их снаряжение и личные вещи. По мере продвижения вдоль кромки бригада в обязательном порядке оставляет позади себя караульных. Для окарауливания выделяются уставшие рабочие из числа пожарных; на место выбывших становятся рабочие из резервной группы.

Караульный получает свое снаряжение и личные вещи, а бригадир инструктирует его и затесками на дереве отмечает границу выделенного для наблюдения участка за кромкой. Протяженность индивидуального охраняемого участка определяется каждый раз бригадиром в зависимости от конкретных условий, чтобы караульный мог наверняка справиться с поставленной задачей. При тушении слабых беглых пожаров протяженность участка кромки, охраняемого одним человеком, может достигать 500 м, а при тушении устойчивых пожаров, сопровождающихся длительным тлением мохового очеса, подстилки, валежин, протяженность участка кромки может сократиться до 100 м.

Обходя свой участок, караульный должен внимательно следить за случаями возобновления горения на потушенной кромке или перехода горения через кромку и тут же ликвидировать их, а также тушить горящие и тлеющие очаги на пожарище вблизи кромки.

Из каждых двух соседних караульных более опытный назначается старшим. После ликвидации очагов загорания и тления на кромке и возле нее каждая пара караульных несет вахту поочередно: один отдыхает, а другой патрулирует оба участка. Караульным необходимо знать, что особенно увеличивается

опасность загорания кромки с 10—11 часов утра. Но к этому времени все караульные, занимавшиеся остановкой пожара, должны быть сменены рабочими из группы, которая будет локализовать пожар.

Отжиг

Отжиг — это искусственно вызванный контролируемый низовой огонь, направляемый в сторону пожара.

Основное назначение отжига — очистка поверхности почвы от всех горючих материалов.

Очистка площади от горючих материалов с помощью отжига обходится во много раз дешевле, чем при любом другом способе. Для проведения отжига не требуется сложных машин и орудий, поэтому отжиг все чаще используют в качестве простого и очень эффективного средства для остановки лесного пожара, преграждая пожару путь широкой полосой, на которой выжжен напочвенный покров.

Кроме того, отжиг может и должен широко использоваться в качестве рационального приема при тушении кромки пожара другими средствами и способами. Прием этот заключается в создании и последующем тушении искусственной кромки пожара, которую прокладывают рядом с естественной кромкой, но по местам, удобным для тушения. Этот рациональный прием мы называем частичным отжигом.

Отжиг следует использовать также и при локализации пожара при прокладке минерализованных полос, выжигая пространство между минерализованной полосой и потушенной кромкой пожара.

К сожалению, отжиг, как простое и надежное средство тушения лесных пожаров, используется далеко не всегда.

В тех сложных условиях, которые возникли в конце августа 1972 г. в центральных районах РСФСР, единственным эффективным средством против распространения крупных пожаров на суходольных местах мог быть только отжиг. Однако применяли его в редких случаях и с большим опозданием.

Применение отжига часто тормозится тем, что многие работники лесной охраны нечетко представляют себе, где и как следует его применять, а понятие «отжиг» путают с понятием «встречный огонь».

Метод отжига был разработан В. А. Миндовским (1907). Термин «отжиг» был введен впервые В. Г. Нестеровым в 1945 г.

Тушение сильных пожаров (низовых и верховых) методом отжига получило научное обоснование в работах Н. П. Курбатского (1955) и В. П. Молчанова (1956, 1957). Были подтверждены высказывания Кинитца (1912) о том, что без поддержки низового огня вершинный огонь может продвигаться на расстояние не более 80—150 м. Полоса с выжженным напочвенным покровом шириной 150—200 м препятствует продвижению верхового пожара (при отсутствии пятнистой формы распространения).

Было также выяснено, что встречная тяга, появление которой якобы должно служить сигналом для пуска встречного огня, как правило, не наблюдается даже непосредственно перед самым фронтом верхового пожара. Метод встречного огня, описываемый в литературе, трудоемок, бесполезен и опасен.

Последующие исследования показали, что вверх по крутому горному склону вершинный пожар может продвигаться и без поддержки низового огня (Софронов, 1967), что встречная тяга существует перед фронтом пожаров взрывного типа, имеющих высокую конвекционную колонку. Однако применять в данном случае встречный огонь по методу Левиза (1833) вряд ли имеет смысл, поскольку такие пожары имеют пятнистую форму распространения за счет горящих частиц, падающих перед фронтом на расстоянии 300—500 м и более (Матвеев, 1972).

Н. П. Курбатский и В. П. Молчанов в своих работах именовали отжиг «встречным низовым огнем». Термин этот, безусловно, полностью соответствует сущности самого метода, но поскольку по названию он невольно ассоциировался с методом «встречного огня» Левиза (1833), то происходила терминологическая путаница, препятствовавшая широкому распространению эффективного метода. Правда, в «Наставлении по охране лесов от пожаров» (1956) и в «Рекомендациях по технике и тактике тушения лесных пожаров» (1964) отжиг называется именно отжигом, так же как и в последующих статьях специалистов-лесопирологов, отмечающих высокую эффективность этого метода (Симский, 1956; Горбатов, 1956; и др.).

Однако рядовые работники лесного хозяйства обычно не делали различий между двумя этими методами, невольно переносили все недостатки «встречного огня» на высокоэффективный и безопасный отжиг и опасались его применять.

Мы считаем необходимым подчеркнуть основные отличия отжига от «встречного огня».

1. Для пуска «встречного огня» рекомендовалось рубить широкую просеку с канавой посередине.

Отжиг же делают от опорной линии, в качестве которой может служить узкая минерализованная полоска (шириной около 40 см), дорога, тропа, ручей, край сырой лощины или заболоченного участка, а весной, до просыхания подстилки, даже просто смоченная из опрыскивателя полоса.

2. Перед пуском «встречного огня» требовалось сложить по краю канавы, обращенному к пожару, вал из сучьев, веток, лесного хлама, чтобы враз вспыхнуло большое пламя.

Для отжига, наоборот, убирают валежник и излишний горючий материал с края опорной полосы, обращенной к пожару, чтобы при поджигании пламя вначале было слабым и огонь не мог перейти опорную линию.

3. Пуск «встречного огня» должен был происходить в опасной близости от фронта верхового пожара, по сигналу, в момент

появления «встречной тяги». Уловить этот момент и одновременно поджечь длинный вал — для этого требовалось большое искусство и присутствие духа. А если учесть, что достаточно сильная «встречная тяга», как правило, не наблюдается, то подожженный вал чаще всего только усиливал верховой пожар. Поэтому эффективные описания пуска «встречного огня» имеются, как правило, лишь на страницах художественных произведений.

Отжиг, напротив, начинают заблаговременно, не дожидаясь подхода кромки пожара, и ведут его непрерывно, зажигая напочвенный покров по краю опорной линии. Двигаясь против ветра, пламя отжига не может перейти на кроны и вызвать верховой пожар. Таким образом, для проведения отжига совсем не требуется особого искусства и высокой храбрости. Это простой, безопасный и надежный метод.

Неудача отжига, сопровождаемая некоторой опасностью, может возникнуть в том случае, если опорная линия выбрана и проложена слишком близко перед фронтом пожара и пламя отжига не успело выжечь полосу необходимой ширины.

Другая неудача отжига наблюдается при нарушении условий непрерывного зажигания, по мере готовности опорной линии, т. е. отжиг не делают до тех пор, пока не будет готова вся опорная линия, а затем зажигают покров вдоль всей опорной линии одновременно (как при пуске «встречного огня»). В результате бывает упущено время для выжигания достаточно широкой полосы против «головы» пожара, а главное при одновременном зажигании вдоль всей опорной линии трудно заметить и своевременно потушить все искры, которые перелетают через опорную линию в пусковой момент. Для тренировки в отжиге можно использовать проведение целевых палов (см. приложение 3).

Остановка пожара косвенным тушением кромки (отжигом)

В отличие от непосредственного тушения кромки отжиг требует особой подготовки. Самое главное — правильно наметить трассу, от которой он будет проводиться.

Вначале решается вопрос, на какое расстояние следует отступить перед фронтом пожара. Необходимо, чтобы фронт пожара подошел не раньше, чем будет выжжена полоса достаточной ширины. Лучше всего, если фронт пожара подойдет к полосе отжига вечером, ночью или утром, когда горение ослабнет и, следовательно, останется меньше шансов на перебрасывание искр через полосу. Лишь в исключительных случаях, когда надо спасти какой-то важный объект или особо ценные насаждения, стоит идти на риск, останавливая фронт сильного пожара днем; но при этом желательно использовать дополнительное количество рабочих для тушения загораний от переноса горящих частиц через выжженную полосу в момент подхода фронта пожара.

Существенный элемент отжига — опорная линия, от которой ведут отжиг. Важно, чтобы через опорную линию не мог перейти слабый огонь отжига. В качестве опорных линий можно использовать лесные дороги, тропы, канавы, минерализованные полосы или проложить плужную борозду. При недостатке дорог наземные технические средства, пригодные для создания опорных линий, прибывают к месту пожара обычно с большим опозданием, и в условиях засухи пожар успевает достичь таких размеров, что остановить его уже трудно. В таких условиях опорные линии целесообразно прокладывать с помощью шланговых монозарядов, которые можно доставить на самолете или вертолете. Один километр полиэтиленового шланга, наполненного взрывчатым веществом, весит 600 кг. При использовании самолета АН-2 есть возможность вместе с парашютистами брать на борт до тысячи метров зарядов. Парашютисты-взрывники с помощью шланговых зарядов, взрывая их накладным способом, могут быстро проложить опорную линию в нужном направлении.

Чтобы подготовить полосу для остановки сильного низового пожара, огонь отжига должен продвигаться против ветра около часа, а при остановке верхового или кустарникового пожара — не менее 5 час. За это время фронт пожара может пройти значительное расстояние и причинить немалый ущерб лесу. Поэтому во всех случаях, а перед фронтом пожара в особенности, желательнее вести отжиг ускоренными способами, сокращая тем самым время выжигания полосы, что позволит отступать перед пожаром не так далеко.

После того как определено примерное расстояние, на которое следует отступить перед фронтом пожара, на карте намечают трассу отжига.

Ее прокладывают с максимальным использованием в качестве опорных линий существующих в природе рубежей (в виде дорог, троп, просек, ручьев, лощин) и преград (т. е. озер, болот, негоримых в данный момент участков). В промежутках между естественными опорными линиями трасса отжига должна проходить по незахламленной площади, минуя заросли кустарников и участки молодняков. Необходимо заранее продумать систему ориентирования на местности, чтобы не сбиться с намеченной трассы.

Самое удобное время для пуска отжига — вторая половина дня, но если трасса будет определена раньше, откладывать пуск отжига не следует: чем дольше он будет гореть, тем шире и надежнее станет полоса, тем больше будет спасено леса, так как лес при прохождении через него отжига почти не повреждается.

Отжиг ночью пускать нежелательно, так как очень легко заблудиться в темноте, но в периоды белых ночей на севере оставаться отжигом пожары вполне возможно.

Пуск отжига осуществляется двумя бригадами, расходящимися от точки перед фронтом пожара в противоположные сторо-

ны, к флангам пожара. Состав бригады и порядок ее движения следующий.

1. Направляющий (проводник) — рабочий, хорошо знающий местность или хорошо ориентирующийся на местности по плану, идет впереди, намечает трассу опорной полосы, выбирая наименее захламленные участки, максимально используя при этом существующие в лесу рубежи для пуска отжига (дороги, тропы, ручьи, края сырых лощин и негоримых участков и т. п.), чтобы сократить объем земляных работ и тем самым ускорить пуск отжига.

2. Рабочие по расчистке трассы (обычно два человека) движутся по трассе, намеченной направляющим, расчищая полосу шириной 6—7 м от валежника, подроста и подлеска.

3. Рабочие по прокладке опорной линии (не менее четырех человек) готовят опорную линию на расчищенной трассе. При прокладке минерализованной полосы вручную саперными лопатами они попарно, становясь лицом друг к другу и одновременно втыкая лопаты в края намеченной полосы, вынимают вырезанные пласты покрова; для каждой пары рабочих отводится участок трассы длиной 20—25 м; после окончания работы на одном участке они переходят на следующий. При наличии в достатке воды опорная линия обрабатывается растворами химикатов из ранцевых опрыскивателей. Очень эффективен способ прокладывания опорной полосы с помощью шланговых зарядов и монозарядов. При тушении беглых низовых пожаров можно пускать отжиг без всякой опорной полосы, если сразу же захлестывать внешнюю кромку отжига.

4. Зажигающий, который по мере готовности опорной полосы поджигает зажигательным аппаратом или железнодорожной свечой покров по краю полосы.

5. Рабочие резерва (не менее двух человек) несут поклажу (пищу, воду, горючее, лишнюю одежду работающих и пр.), а также свой инструмент (лопаты, топоры). Они подменяют рабочих, прокладывающих опорную полосу.

По мере продвижения бригады бригадир оставляет одного за другим рабочих для окарауливания опорной полосы. Каждого караульного бригадир кратко инструктирует и выделяет ему точно ограниченный участок полосы из расчета: перед фронтом низового пожара — по 200 м, перед флангом — 300 м, перед фронтом верхового пожара или сильного низового пожара на открытом месте — по 100 м на одного человека. Таким образом, караульные располагаются на расстоянии, обеспечивающем связь голосом для передачи по цепи информации и для оказания помощи друг другу. В задачу караульного входит: а) следить за тем, чтобы горение отжига (особенно, тление) не перешло за опорную полосу, для чего он должен периодически обходить участок полосы, проверять и подправлять полосу; б) ускорять продвижение отжига навстречу пожару способом, указанным

бригадиром, зажигая напочвенный покров с помощью железно-дорожной свечи или подручных средств; в) следить, чтобы за опорной полосой не возникло загораний от переноса горящих частиц, особенно во время приближения фронта пожара, и своевременно их ликвидировать. Покидать свой пост после остановки пожара караульный имеет право только с разрешения бригадира при личном осмотре последним его участка.

Численность бригады для пуска отжига при длине трассы 1 км — не менее 10 человек; на каждый следующий дополнительный километр трассы бригада увеличивается не менее чем на 5 человек. Скорость пуска отжига лимитируется скоростью прокладки опорной полосы (150—250 м/час), поэтому необходимо принимать все меры для повышения производительности именно на этой операции путем предварительного обучения рабочих, выделения дополнительных рабочих, механизмов, химикатов, взрывчатки и т. п.

Для ускорения выжигания полосы перед пожаром применяются ряд способов.

1. Способ «гребенка» (рекомендованный В. П. Молчановым), при котором отжиг ускоряется дополнительными зажиганиями покрова в направлениях, перпендикулярных опорной полосе. Это самый простой и надежный способ ускорения выжигания при остановке фронта пожара, применять его на флангах не рекомендуется.

2. Способ «опережающего огня» (предложенный Н. Н. Егоровым), при котором выжигание ведут полосами по 5—10 м шириной, параллельными опорной линии, продвигаясь в сторону пожара. Способ этот самый эффективный по скорости выжигания, но его не рекомендуется применять перед фронтом пожара в хвойных молодняках, на участках с густым подростом и захламленных, поскольку огонь в каждой выжигаемой полосе движется по ветру и может быть достаточно сильным. Особенно желательно использовать этот способ при тушении флангов пожара.

3. Способ «ступенчатого огня» заключается в том, что в дополнение к основной опорной полосе прокладывают параллельно ей ближе к пожару еще несколько полос на расстоянии 15—30 м друг от друга (концы полос должны сходиться), от каждой полосы пускают отжиг начиная с ближайшей к пожару. Этот способ рекомендуется применять при остановке фронта пожара на отдельных участках, покрытых хвойными молодняками или сильно захламленных, где пожар имеет пятнистую форму распространения (Курбатский, 1972, 1974).

Необходимо подчеркнуть, что отжиг по всей его трассе проводится без перерыва, и даже в тех местах, где трасса проходит по краю непреодолимых для пожара преград (больших озер, болот, заболоченных участков). Это делается с целью спасти как можно больше леса от надвигающегося пожара путем выжигания в лесу покрова слабым огнем отжига.

Крупные лесные пожары, распространяясь с различной скоростью по разным элементам ландшафта, принимают порою самую причудливую конфигурацию. Вышеописанный способ остановки пожара (когда отжиг начинают в одном месте против середины фронта и затем охватывают фронт, выходя на фланги) применим на пожарах компактной формы, которые распространяются достаточно быстро.

Если фронт пожара имеет пальцеобразную форму, с несколькими головками в виде далеко выдающихся выступов, то отжиг полезно начинать перед каждым выступом, т. е. одновременно в нескольких точках; затем отдельные участки отжига соединяются вместе. Такой прием американцы называют «способом отсечки (см. рис. 24, в).

В том случае, если фронт крупного пожара распространяется медленно (например, при штиле, при спуске под гору, после выпадения осадков и т. д.), необязательно начинать отжиг перед фронтом пожара, можно вести трассу отжига от флангов, продвигаясь вперед к «голове» пожара, где трассы отжига соединяются («параллельный способ») (см. рис. 24, г). Иногда трассу отжига можно вести только от одного фланга, огибая фронт полукольцом, такой способ именуют «косым» (Casey, 1971).

Особенности остановки некоторых видов пожаров

Подростно-кустарниковые и валежниковые пожары под пологом леса. Основная их особенность — постоянная возможность перейти в верховой пожар, поэтому останавливать их следует, учитывая эту особенность, т. е. останавливать их как верховые пожары, а именно сделать отжиг, охватывая пожар с фронта, причем против фронта пожара ширина выжженной полосы должна быть около 100 м; при прокладке опорной полосы для отжига в захламленных участках весьма эффективен взрывной способ.

Кустарниковые пожары (на открытых участках, покрытых горючими кустарниками и хвойными молодняками). Пожары на таких участках могут распространяться с большой скоростью и приближаться по силе к верховым. При этом вследствие разбрасывания ветром горящих частиц перед фронтом пожара такие пожары могут переходить в пятнистые. Сильные пожары в молодняках и зарослях кустарников останавливают как верховые: делают отжиг, причем ширина выжженной полосы против фронта должна быть не менее 100 м; опорную полосу для отжига стараются прокладывать по участкам, где пожар не может достигать большой силы (т. е. с листовными молодняками и негорючими кустарниками, с малой сомкнутостью хвойных молодняков и т. п.), а при отжиге в хвойном молодняке расширение отжигаемой полосы ведется способом «ступенчатого огня». Прокладку опорных полос желательно вести с помощью шланговых

зарядов, землеройной или почвообрабатывающей техники. Особое внимание надо обратить на наблюдение за пространством позади опорной полосы на глубину до 300 м (перед фронтом пожара), чтобы своевременно ликвидировать загорания от перенесенных ветром частиц.

Пожары на вырубках. Особенность пожаров на вырубках — в большой скорости распространения и в легкости преодоления ими всяких преград в дневное время. Останавливают такие пожары отжигом, причем, учитывая большую скорость их распространения, отступают перед фронтом подальше. При пуске отжига максимально используют естественные рубежи (лощины, ложбины, ручьи, заболоченные участки, дороги), а при прокладке опорных полос — землеройную и почвообрабатывающую технику. Ширина выжженной полосы ко времени подхода фронта пожара должна быть 20—100 м, в зависимости от захламленности. Ускоренное выжигание ведется способом «опережающего огня», а в случае наличия на вырубке куч порубочных остатков и куртин хвойного молодняка — способом «гребенки». Особое внимание следует обратить на организацию своевременного обнаружения и тушения загораний от искр позади опорной линии.

Валежные пожары в сухостойниках и ветровальниках. Тушить их весьма трудно: они почти непроходимы для техники, а вручную завалы не разобрать. Поэтому рекомендации сводятся к следующему: 1) незначительные площади сухостойников и ветровальников не тушат, дают им выгореть, а пожар останавливают за пределами захламленных участков; 2) в случае пожаров на обширных площадях сухостойников их останавливают отжигом; опорную полосу стараются прокладывать по местам без сухостоя и валежа (т. е. по полянам, лощинам, ущельям, ручьям и дорогам), а там, где на пути встречается валеж, используют взрывчатку (шланговые и монозаряды с подкладыванием дополнительных зарядов). Особое внимание следует обратить на своевременное обнаружение загораний позади опорной полосы от искр, горящих веток и падающих поперек полосы подгоревших стволов сухостоя.

Тушение верховых пожаров. Для остановки верховых пожаров применяется отжиг с охватом пожара начиная с фронта. Выбор рубежа для пуска отжига производится с таким расчетом, чтобы к подходу фронта пожара выгоревшая полоса была около 200 м. Поскольку верховые пожары возникают при погодных условиях, особо благоприятных для распространения горения, опорные полосы рекомендуется прокладывать преимущественно по участкам, свободным от хлама и хвойного подроста, по границам насаждений из лиственных или с преобладанием лиственных пород, по тальвегам лощин и ложбин и по водоразделам (в горах). В целях ускорения выжигания перед фронтом верхового пожара полосы требуемой ширины следует применять способы, описанные выше. На флангах верхового пожара уско-

ренное выжигание надо применять днем с большой осторожностью, только в незахламленных местах без густого подроста (или делать расчистку), так как сильный огонь отжига при ускоренном выжигании и боковом ветре может распространиться на кроны и перейти в верховой пожар.

Особое внимание следует обратить на организацию своевременного обнаружения и тушения загораний от искр за опорной полосой при подходе фронта верхового пожара.

Остановку верховых пожаров, если имеется возможность, целесообразнее осуществлять вечером или утром, когда снижается интенсивность и скорость распространения горения и когда пожары в большинстве случаев полностью или частично переходят в низовые. В этих условиях работы по остановке пожара сокращаются.

Тушение пятнистых пожаров. Ярко выраженная пятнистая форма распространения пожаров наблюдается в очень сухую погоду при сильном ветре. В это время рекомендуется тушить фланги и тыл пожара водой и отжигом (частичным отжигом), но пытаться останавливать фронт пятнистого пожара почти бессмысленно и весьма опасно. Руководитель тушения должен заблаговременно предупредить органы местной власти о эвакуации людей, животных и вывозе материальных ценностей из поселков и деревень перед надвигающимся фронтом пятнистого пожара. Заблаговременно должен быть составлен план и намечено несколько вариантов рубежей для остановки пятнистого пожара в ночные и утренние часы, т. е. когда утихнет ветер, снизится температура воздуха и пятнистый пожар ослабеет.

В настоящее время наиболее эффективным способом при борьбе с пятнистыми пожарами — отжиг. Выжигание напочвенных горючих материалов перед кромкой пожара только в том случае приведет к положительным результатам, когда не будет загорания за пределами выжженной полосы.

Наиболее полно рассмотрены вопросы применения отжига Н. П. Курбатским (1962, 1972, 1974). Для расчета расстояния (L), с которого следует начинать отжиг против низовых пожаров, он предлагает формулу:

$$L = (n + 1)l, \quad (59)$$

где n — показатель, во сколько раз фронт пожара продвигается быстрее продвижения огня отжига; l — заданная ширина полосы отжига.

Эту формулу Н. П. Курбатского нам представляется возможным использовать для определения расстояния, с которого необходимо начинать отжиг при остановке пятнистых пожаров. Для этого в уравнении (59) нужно учитывать, что ширина полосы отжига должна быть такой, чтобы при соединении огня отжига с кромкой фронта ширина этой полосы превышала расстояние разлета горящих частиц.

Возможность определения расстояния разлета частиц позволяет в каждом конкретном случае определять минимально необходимую ширину полосы отжига, что способствует успешности работ по тушению пожара и исключает выжигание излишней площади леса. Так как скорость продвижения огня отжига в среднем в 6 раз медленнее продвижения огня фронта (Н. П. Курбатский, 1974), а расстояние разлета горящих частиц иногда достигает довольно значительной величины (300 м), в ряде случаев опорную полосу для отжига нужно делать на очень большом расстоянии от кромки пожара.

Чтобы избежать этого, необходимо применять ступенчатый отжиг лентами шириной по 100 м, которые следует прокладывать с учетом дальности возможного разлета искр, в сочетании с глубоко эшелонированным охранением территории перед фронтом пожара в тылу опорной линии. Последние ленты в тылу полосы отжига можно не выжигать. Ступенчатый отжиг даст возможность ускорить выжигание напочвенного покрова перед фронтом пожара и предотвратит возникновение очагов горения за опорной линией.

Хотя способ определения дальности пятнистых загораний, проверенный нами на лесных пожарах, оказался пригодным, применение его на практике несколько затруднительно вследствие сложности определения интенсивности горения на лесном пожаре. Для облегчения расчетов можно принять, что пятнистость может возникать при сильных низовых и при всех видах верховых пожаров.

Так как наши наблюдения были проведены при скоростях ветра, далеких от максимума, то наши рекомендации не могут распространяться на пятнистые верховые пожары, действующие при ветрах очень большой скорости. Приблизительно можно принять, что интенсивность сильных низовых пожаров не превышает 40 тыс. ккал/м·мин, слабых верховых — 60 тыс. ккал/м·мин, пожары же интенсивностью от 60 до 100 тыс. ккал/м·мин следует относить к верховым средней силы. Следовательно, продолжительность горения летящих частиц для первой градации пожаров (интенсивность от 40 до 60 тыс. ккал/м·мин) составляет от 60 до 120 сек, а для второй — от 60 до 280 сек.

Из наблюдений на лесных пожарах следует, что для пожаров интенсивностью до 60 тыс. ккал/м·мин наиболее характерное максимальное удаление пятнистых загораний равно 100 м, а для пожаров второй градации — 200 м. Поэтому на пожарах первой категории, если они носят пятнистый характер, ширина полосы впереди фронта, на которую падает основная масса горящих частиц, будет равна 30—40 м. На пожарах большей интенсивности максимальное удаление горящих частиц равно 200 м и ширина полосы в этом случае увеличивается не менее чем до 70 м.

При патрулировании за опорной полосой необходимо помнить, что гнилая древесина начинает тлеть от попавшей на нее

искры даже тогда, когда загорание напочвенного покрова не происходит. Поэтому на обнаружение таких потенциальных очагов загорания нужно обращать особое внимание.

В зависимости от направления ветра на высоте перегиба конвекционного потока или у его вершины пятнистость может возникать не только перед фронтом пожара, но на флангах и в тылу. В соответствии с этим рекомендуется организовывать ликвидацию пятнистых загораний. Для более четкого представления о зоне разлета горящих частиц полезно было бы проводить картирование пожаров, носящих характер пятнистых, с летательных аппаратов, желательно с помощью инфракрасных датчиков типа «Тайга».

При тушении пожаров полеты на летательных аппаратах необходимо выполнять на минимальных высотах и как можно ближе к кромке пожара. Однако в зоне лесных пожаров нередко возникают мощные конвекционные потоки, угрожающие безопасности полетов. Мы предлагаем:

1. Полеты над слабыми низовыми пожарами в начальной стадии их развития безопасны до высоты 20 м и выше.

2. Полеты над фронтом низового пожара средней интенсивности безопасны на высоте более 200 м, однако продолжительность полета не должна превышать 30 мин.

Полеты в тыльной части такого пожара безопасны на высотах от 20 м при удалении от кромки пожара на 20 м.

3. В конечной стадии действия пожара полеты безопасны на высотах от 20 м над тыльной частью и вдоль пожара по флангам.

4. Опасны полеты через дымовые колонки светло-коричневого и более темных цветов, указывающих на высокую интенсивность выделения тепла и сильную турбулентность, вызывающую болтанку самолета. Полеты в зоне таких пожаров возможны не ближе 200—300 м от дымовой колонки.

Работы по остановке крупных пожаров, особенно пожаров, имеющих пятнистую форму распространения, довольно опасны. Падающие горящие частицы, изменение направления движения пожара из-за перемены направления ветра, задымление территории, неверно выбранный пожарный рубеж, густые заросли, каменные осыпи и россыпи на склонах, острые инструменты и неправильное их использование, применение машин в критических условиях — все это создает опасные ситуации.

Планомерно проводимые профилактические мероприятия в сочетании с правильно применяемыми мерами активной борьбы, несомненно, сведут к минимуму опасность от лесных пожаров, носящих характер пятнистых.

Тушение торфяных пожаров. Чтобы локализовать почвенный торфяной пожар, на пути его распространения следует проложить канаву и заполнить ее водой. Применение землеройной техники в таких условиях обычно затруднительно, и наиболее целесообразно применять взрывчатые вещества в виде шланго-

вых зарядов, уложенных в щель, с расчетом по 2—3 кг взрывчатки на 1 м длины канавы. На безлесных болотах для прокладки щели и укладки в нее шлангового заряда применяется трактор с навесным кротодренажным устройством, которое позволяет углубить заряды на 0,6—0,7 м. В лесу, где применение этого устройства затруднено, заряды весом до 1 кг укладывают на ту же глубину в скважины на расстоянии метра один от другого и взрывают сериями.

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ПОЖАРА

Необходимость локализации обуславливается возможностью длительного горения и в особенности тления отдельных очагов на пожарище, опасностью нового распространения пожара от них.

Способ локализации выбирается руководителем группы тушения, сменившей ударную группу, проводившую остановку пожара.

Первый способ локализации, самый надежный — окаймление пожара заградительными минерализованными полосами (в сочетании с окарауливанием и дотушиванием) — он же и самый трудоемкий, требующий много мощной землеройной техники, и по этой причине на крупных пожарах не всегда применимый.

Второй способ — это окарауливание кромки в сочетании с дотушиванием периферии пожарища или всей его площади.

Третий способ, самый простой, — окарауливание кромки пожарища до периода обложных дождей. Окарауливанием кромки пожарища вполне можно ограничиться при беглых пожарах, особенно весной, или на пожарах, возникающих в конце пожароопасного сезона, или в случае выпадения значительных осадков после остановки пожара.

Во всех случаях у руководителя тушения пожара должна иметься полная уверенность, что применяемые способы локализации пожара исключают возможность его возобновления.

Рассмотрим подробнее операции, которые используются при локализации крупных пожаров:

Окарауливание пожарища состоит в непрерывном или перидическом осмотре пройденной пожаром площади, в особенности кромки пожара, с целью предотвратить возобновление распространения горения.

Окарауливание организуется еще в процессе остановки пожара, когда бригады пожарных, по мере продвижения вдоль кромки (или по трассе отжига), оставляют позади себя караульных. После завершения работ по остановке пожара все караульные, выставленные бригадами пожарных, должны быть заменены другими рабочими.

По мере снижения опасности возобновления пожара число рабочих, занятых при наблюдении, сокращается. Круглосуточное и постоянное наблюдение заменяется периодическим патрулированием кромки пожарища только в дневное время, с 11 до 17 час.

Продолжительность окарауливания определяется в зависимости от условий погоды и работ по ликвидации пожара. Оно может быть прекращено лишь по личному распоряжению руководителя тушения, отвечающего за локализацию пожара.

Дотушивание пожара заключается в ликвидации очагов горения, оставшихся на пройденных пожаром площадях. Дотушивание начинается еще при остановке пожара: рабочие из бригады пожарных, оставшиеся для окарауливания кромки, ликвидируют очаги горения на пожарище вблизи кромки. Окончательное дотушивание производится рабочими во время, свободное от наблюдения и патрулирования кромки, а также специальными группами рабочих. В случае пожаров на сильно захламленных площадях целесообразно дать горючим материалам основательно выгореть, а затем приступить к окончательному дотушиванию пожара. В центральной части пожарища (далее 300 м от кромки) можно окапывать очаги горения, оставляя их догорать.

На пожарищах после крупных пожаров, когда ликвидация очагов горения по всей площади затруднительна, а также на пожарищах после устойчивых пожаров, с сильным прогоранием покрова и подстилки до минерального грунта, работы по дотушиванию можно проводить только по периферии пожарищ на полосе шириной 300 м.

На пожарищах после беглых пожаров, т. е. со слабым прогоранием мохового покрова, необходимо провести обязательное дотушивание очагов горения на всей площади во избежание повторного пожара на той же площади. Тщательное дотушивание очагов на всей площади необходимо проводить и на осушенных торфяниках.

Окаймление пожара заградительными минерализованными полосами (или собственно локализация). Заградительная полоса прокладывается вдоль кромки остановленного пожара по наименее захламленным местам, максимально спрямляя ее углы и повороты, с тем чтобы сократить объем работы. Пространство между остановленной кромкой пожара и заградительной полосой обязательно выжигается пуском отжига от заградительной полосы.

Заградительные минерализованные полосы вокруг небольших пожаров могут прокладываться ручными инструментами: лопатами, мотыгами, граблями (в беломошниках); с помощью взрывчатых материалов, почвообрабатывающими орудиями. Для создания заградительных полос вокруг крупных пожарищ обычно привлекается мощная техника с землеройными и почвообрабатывающими орудиями.

Минимальная ширина заградительных полос (в том случае, если проводится выжигание покрова между полосой и остановленной кромкой пожара) составляет 0,3—0,5 м, поэтому в качестве заградительных полос можно использовать опорные минерализованные полосы, созданные при пуске отжига, после их проверки и подновления.

Заградительные полосы начинают прокладывать в первую очередь в тех местах, где есть опасность возобновления распространения пожара от неликвидированных очагов горения у периферии пожарища.

Выводы

При тушении крупных и катастрофических пожаров рекомендуется:

1) разделить тушение пожаров на два этапа — остановку и локализацию, каждый из этапов должен выполняться специализированной группой;

2) при разработке плана атаки пожара максимально использовать уже имеющиеся рубежи и естественные преграды, а также учитывать различную горимость окружающих пожар участков, что возможно только при наличии подробной лесопожарной карты;

3) широко применять отжиг для остановки фронта сильного пожара и при непосредственном тушении кромки (прием частичного отжига) все преграды и все минерализованные полосы, используемые для остановки пожара или для его локализации, должны всегда и в обязательном порядке подкрепляться пуском от них отжига;

4) очень тщательно, добросовестно и непрерывно проводить окарауливание потушенной кромки пожара или кромки отжига, начиная с остановки пожара и кончая полной ликвидацией пожара; с наступлением засушливой погоды практиковать периодический осмотр пожарищ, где окарауливание уже прекращено;

5) при засушливой погоде, быстро и тщательно производить дотушивание на всей площади мелких и средних пожаров и по периферийной 300-метровой полосе на крупных пожарищах, так как в случае сильного ветра непотушенные очаги могут послужить причиной катастрофической вспышки лесных пожаров.

✓ ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ни совершенная техника, ни блестящая организация охраны не смогут решить полностью проблему лесных пожаров. Для этого требуется всесторонне использовать глубокие знания о закономерностях возникновения, распространения и развития лесных пожаров.

Внимание лесопирологов должно быть обращено на разработку двух вопросов: 1) определение и прогноз пожарной опасности в лесу; 2) исследование природы крупных лесных пожаров для разработки приемов их успешного тушения; данный вопрос включает в себя также изучение последствий и разработку профилактических мероприятий (в виде создания комплекса условий для быстрой остановки пожаров).

Необходимо развивать и совершенствовать две отдельные системы определения пожарной опасности в лесу: а) систему определения пожарной опасности по условиям погоды для районов в целом, которая используется с целью своевременного обнаружения и тушения пожаров на территории района, и б) систему определения природной пожарной опасности участков различных категорий, которая используется при противопожарном устройстве территории, а также во время тушения крупных пожаров для оценки пожароопасности участков, окружающих пожар.

Для текущего определения пожарной опасности по условиям погоды следует разработать простую и нетрудоемкую методику составления местных шкал пожарной опасности, имеющих классы, сопоставимые по своему значению в разных районах.

Прогнозирование пожарной опасности в лесу на более или менее длительный срок может базироваться лишь на метеорологическом прогнозе погоды и целиком зависит от его точности и детальности (Курбатский, 1973).

Для характеристики природной пожарной опасности территории следует совершенствовать методику составления детальных крупномасштабных лесопожарных карт.

Важным моментом в изучении природы крупных лесных пожаров, как и всякого явления, служит разработка их классификации.

Современная классификация лесных пожаров является по сути дела классификацией частей крупного пожара или, в частном случае, классификацией мелких простых, т. е. состоящих из

одной части, пожаров. Существенным признаком, по которому проводится эта классификация, служит **характер горения**.

В настоящее время классификации крупных пожаров не существует, если не считать их подразделения на «смешанные» и «сложные» (Курбатский, 1970).

В классификации крупных пожаров за существенный признак полезно принять **характер распространения пожара по территории**, по элементам того или иного ландшафта, поскольку при разработке тактического плана остановки крупного пожара самое главное — это предвидеть, как он будет распространяться в дальнейшем. Н. П. Курбатский (1973) обращает внимание на то, что типы леса и другие элементы ландшафта вместе с естественными препятствиями для огня распределены по территории не беспорядочно, а закономерно, и эта закономерность оказывает определенное влияние на распространение крупных пожаров. Примером может служить закономерное распространение пожаров по элементам горного ландшафта (Софронов, 1970).

При изучении природы крупных пожаров необходимо учитывать диалектический закон перехода количественных изменений в новое качество, т. е. закономерности, выявленные на малых пожарах, и разработанные на их основании рекомендации по борьбе с пожарами не всегда применимы к пожарам крупным.

ЛИТЕРАТУРА

- Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В.* Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1971, 283 с.
- Амосов Г. А.* Некоторые закономерности развития лесных низовых пожаров.— В кн.: Возникновение лесных пожаров. М.: Наука, 1964, с. 152—183.
- Анцишкин С. П.* Противопожарная охрана леса. М.: Гослесбуиздат, 1952.
- Бабилов М.* Авиационная метеорология. М.: Воениздат, 1964.
- Балбышев И. Н.* Сравнительная пожароустойчивость древесных пород таежной зоны.— В кн.: Лесные пожары и борьба с ними. М.: Изд-во АН СССР, 1963, с. 114—136.
- Блинов В. И.* О механизме горения нефтепродуктов в резервуарах.— В кн.: Новые способы тушения пламени нефтепродуктов, ЦНИИПО. М., 1960, с. 4—21.
- Войнов Г. С., Софронов М. А.* Прогнозирование отпада в древостое после низовых пожаров.— В кн.: Современные исследования типологии и пирологии леса. Архангельск, 1976, с. 115—121.
- Валендик Э. Н.* Ветер и лесной пожар. М.: Наука, 1968. 117 с.
- Валендик Э. Н., Гевель Н. Ф.* О полноте сгорания некоторых лесных горючих материалов.— В кн.: Проблемы лесной пирологии. Красноярск, 1975, с. 127—137.
- Валендик Э. Н., Матвеев П. М.* О формировании конвекционной колонки лесного пожара.— В кн.: Вопросы лесной пирологии. Красноярск, 1972, с. 131—139.
- Валендик Э. Н., Матвеев П. М.* Зависимость конвекционных потоков от пожара и состояния пограничного слоя атмосферы.— В кн.: Вопросы лесной пирологии. Красноярск, 1974, с. 97—117.
- Валендик Э. Н., Матвеев П. М., Трунов И. А.* Влияние лесного пожара на пограничный слой атмосферы.— В кн.: Горение и пожары в лесу. Красноярск, 1973, с. 56—75.
- Вонский С. М.* Интенсивность огня пожаров и ее практическое значение. Л., ЛенНИИЛХ, 1957.
- Вонский С. М., Тетюшева Л. В.* Скорость распространения низовых пожаров за длительный промежуток времени.— В кн.: Лесные пожары и технические средства борьбы с ними. Л., ЛенНИИЛХ, 1974, с. 23—30.
- Вонский С. М.* и др. Определение природной пожарной опасности в лесу. Методические рекомендации. Л., ЛенНИИЛХ, 1975, 38 с.
- Воронков П. А.* Методы аэрологических исследований пограничного слоя атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1961.
- Вульфсон Н. И.* Исследование конвекционных движений в свободной атмосфере. М.: Изд-во АН СССР, 1961.
- Вульфсон Н. И., Гутман Л. Н.* Влияние стационарных источников тепла на характер конвекционных движений в неустойчивой атмосфере.— Физ. атмосферы и океана, 1965, т. 1, № 6, с. 569—576.
- Горбатов Ф. М.* Отжиг — надежный способ тушения низовых пожаров.— Лесное хоз-во, 1956, № 3.
- Гриценко М. В.* Синоптические процессы, обуславливающие высокую горимость леса на европейской территории Союза ССР.— Труды ЦИП. М.: Л., 1952.

- Гуляженко М. В. Повышение продуктивности сосновых жердняков, поврежденных низовыми пожарами.— Лесное хоз-во, 1958, № 10, с. 12—15.
- Демидов П. Г. Горение и свойства горючих веществ. М.: Изд-во Министерства коммунального хозяйства РСФСР, 1962.
- Дюбюк А. Ф. Конвективные движения в атмосфере.— Метеорология и гидрология, 1946, № 6, с. 15—24.
- Егоров Н. Н. О некоторых деталях пуска встречного огня.— Лесное хоз-во, 1955, № 9.
- Жуковская В. И. Увлажнение и высыхание гигроскопических лесных горючих материалов.— В кн.: Вопросы лесной пирологии. Красноярск, 1970, с. 105—141.
- Зинов Г. И. Охрана лесов от пожаров (справочник). М.: Россельхозиздат, 1976. 188 с.
- Кашин В. И. 1968. Влияние лесных пожаров на лиственницу.— Лесное хоз-во, 1968, № 4, с. 66—64.
- Кинитц Д. О лесных пожарах.— Лесной журн., 1912, вып. 2 и 3.
- Кирпичев М. В. Теория подбоя. М.: Изд-во АН СССР, 1953.
- Ключиков З. Стихия отступает.— «Правда» № 299 от 25 октября 1976 г.
- Коновалов Д. А. Экспериментальные исследования конвекции в пограничном слое атмосферы для прикладных задач: Автореф. канд. дис. Обнинск, Ин-т экспериментальной метеорологии, 1973.
- Корчагин А. А. 1954. Условия возникновения пожаров и горимость лесов Европейского Севера.— Учен. зап. ЛГУ. Сер. геогр., 1954, № 166, вып. 2, с. 182—322.
- Коровин Г. Н. Методика расчета некоторых параметров лесных низовых пожаров.— В кн.: Сборник научно-исследовательских работ по лесному хозяйству. Л.: Лесная промышленность, 1969, вып. 12.
- Кронит Я. Я. Смелее применять встречный огонь.— Лесное хоз-во, 1973, № 8.
- Курбатский Н. П. Методологические указания для опытной разработки местных шкал пожарной опасности в лесах. Л.: Лениблиздат, 1954.
- Курбатский Н. П. Локализация сильных лесных пожаров встречным низовым огнем.— Лесное хоз-во, 1955, № 3.
- Курбатский Н. П. Техника и тактика тушения лесных пожаров. М.: Гослестехиздат, 1962. 154 с.
- Курбатский Н. П. Пожарная опасность в лесу и ее измерение по местным шкалам.— В кн.: Лесные пожары и борьба с ними. М.: Изд-во АН СССР, 1963, с. 5—30.
- Курбатский Н. П. Пожары тайги, закономерности их возникновения и развития. Автореф. докт. дис. Красноярск, 1964.
- Курбатский Н. П. О классификации лесных пожаров.— Лесное хоз-во, 1970, № 3, с. 68—73.
- Курбатский Н. П. Виды отжига и их применение при локализации лесных пожаров.— В кн.: Вопросы лесной пирологии. Красноярск, 1972, с. 153—163.
- Курбатский Н. П. Итоги и перспективы исследований природы лесных пожаров.— В кн.: Горение и пожары в лесу. Красноярск, 1973, с. 9—26.
- Курбатский Н. П. Локализация лесных пожаров отжигом.— Лесное хоз-во, 1974.
- Кутателадзе С. С., Ляховский Д. Н., Пермяков В. Л. Моделирование теплоэнергетического оборудования. М.; Л.: Энергия, 1966. 350 с.
- Левиз А. Испытанный способ тушить лесные пожары.— Лесной журн., 1833, ч. 1, кн. 2.
- Матвеев П. М. О возможности прогнозирования пятнистых пожаров.— В кн.: Изучение природы лесов Сибири. Красноярск, 1972.
- Мелехов И. С. Лесные пожары и борьба с ними. Архангельск: Северное краевое издательство, 1933.
- Мелехов И. С. Лесные пожары и борьба с ними. М.: Гослестехиздат, 1936.

- Мелехов И. С.* Опыт изучения пожаров в лесах Севера. Архангельск: АЛТИ, 1939.
- Мелехов И. С.* Сезоны лесных пожаров и построение географической схемы лесопожарных поясов.— Сборник научных исследований работ АЛТИ, вып. 8. Архангельск, 1946, с. 1—5.
- Мелехов И. С.* Природа леса и лесные пожары. Архангельск: ОГИЗ, 1947.
- Мелехов И. С.* Влияние пожаров на лес. М.; Л.: Гослестехиздат, 1948.
- Мелехов И. С.* Лесная пирология и ее задачи.— В кн.: Современные вопросы охраны лесов от пожаров и борьбы с ними. М.: Лесная промышленность, 1965, с. 5—25.
- Миндовский В. А.* О лесных пожарах.— Лесопром. вестн., 1907, № 44 и 45.
- Молчанов А. А.* Скорость распространения лесных пожаров в зависимости от метеорологических условий и характера древостоя.— Лесное хоз-во, 1940, № 6, с. 64—67.
- Молчанов А. А.* Влияние лесных пожаров на древостой.— Труды Ин-та леса, 1954, т. 16, с. 314—335.
- Молчанов В. П.* Встречный огонь в борьбе с верховыми и сильными низовыми пожарами.— Лесное хоз-во, 1956, № 6.
- Молчанов В. П.* Условия распространения верховых пожаров в сосняках.— Лесное хоз-во, 1957, № 8, с. 50—53.
- Молчанов П. А.* Средние отклонения вертикальных скоростей шаро-пилотов от теоретических по базисным наблюдениям.— Труды Аэрологической обсерватории. Л.: Гидрометеиздат, 1925, с. 84—89.
- Мусин М. З.* Лесные пожары в борах Казахского мелкосопочника и их профилактика: Автореф. канд. дис. Красноярск, 1974, 24 с.
- Налимов В. В., Чернова Н. А.* Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. М.: Наука, 1965.
- Наставление по охране лесов от пожаров. М.: Минсельхоз, 1956.
- Нестеров В. Г.* Природа лесных пожаров и борьба с ними. Пушкино, ВНИИЛМ, 1939.
- Нестеров В. Г.* Уроки Кирсинского пожара.— Лесное хоз-во, 1939, № 4, с. 32—34.
- Нестеров В. Г.* Основы противопожарного устройства лесной территории.— Лесное хоз-во, 1941, № 3, с. 24—28.
- Нестеров В. Г.* Пожарная охрана леса. М.: Гослестехиздат, 1945.
- Нестеров В. Г.* Горимость леса и методы ее определения. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1949.
- Нестеров В. Г., Гриценко М. В., Шабунина Т. А.* Использование температуры точки росы при расчете показателя горимости леса.— Метеорология и гидрология, 1968, № 9, с. 102—105.
- Никитина Е. А.* Вероятность возникновения лесных пожаров при различном характере барического поля.— Труды ЦИП, 1963, вып. 124.
- Николаев Д.* Лесные пожары на Урале и борьба с ними. Свердловск: Ураллестехиздат, 1932.
- Нордстрем Б.* Лесные пожары. М.: Сельхозгиз, 1931.
- Овсянников И. В.* О некоторых вопросах совершенствования охраны лесов от пожаров.— Лесное хоз-во, 1969, № 7, с. 59—62.
- Петров И. И., Реутт В. И.* Тушение пламени жидких топлив методом перемешивания.— В кн.: Новые способы тушения пламени нефтепродуктов. М.: Гостоптехиздат, 1960, с. 31—83.
- Пристли С. Х. Б.* Турбулентный перенос в приземном слое атмосферы. Пер. с англ. Л.: Гидрометеиздат, 1964.
- Рекомендации по технике и тактике тушения лесных пожаров. Сборник руководящих указаний по охране лесов РСФСР от пожаров. М.: Лесная промышленность, 1964.
- Ройтман М. Я.* Дымовые и взрывные люки. М.: Высшая школа, 1964. 76 с.
- Романов В. Е.* Влияние низовых пожаров на отпад насаждений.— Лесное хоз-во, 1968, № 5, с. 22—23.
- Рыжков С. В.* Встречный огонь — доступный метод локализации лесных пожаров.— Лесное хоз-во, 1973, № 8.

- Серебрянников П. П., Матренинский В. В.* Лесные пожары и борьба с ними. М.: Гослестехиздат, 1937.
- Софронов М. А.* Лесные пожары в горах Южной Сибири. М.: Наука, 1967. 149 с.
- Софронов М. А.* Лесные пожары в горах Алтая.— В кн.: Вопросы лесной пирологии. Красноярск, 1970, с. 241—273.
- Софронов М. А.* Усовершенствование лесопожарного показателя засухи. Материалы годичной сессии Архангельского ин-та леса и лесохимии за 1972 г. Архангельск, 1973, с. 66—68.
- Софронов М. А.* Еще раз о противопожарном устройстве концентрированных вырубок.— Лесное хоз-во, 1975, № 7, с. 79—80.
- Софронов М. А., Звонкова А. А.* Противопожарные мероприятия на концентрированных вырубках.— Лесное хоз-во, 1972, № 8, с. 56—59.
- Симский А. М.* Опыт тушения лесных пожаров в ленточных борах Алтайского края.— Лесное хоз-во, 1956, № 10, с. 3.
- Скворецкий В. И.* О рационализации авиаохраны в западной Сибири.— Лесное хоз-во, 1955, № 1.
- Стародумов А. М.* О горимости лесов в различных географических районах Дальнего Востока.— Бюл. научн.-техн. информ. ДальНИИЛХ, 1958, № 5.
- Телицин Г. П.* Расчет объема работ скорости и продолжительности локализации лесного пожара.— Лесное хоз-во, 1965, № 4, с. 44—47.
- Ткаченко М. С.* Общее лесоводство. М.: Сельхозгиз, 1939.
- Третьяков Н. В., Горский П. В., Самойлович Г. Г.* Справочник таксатора. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1952.
- Указания по противопожарной профилактике в лесах и регламентации работы лесопожарных служб. М., Госкомитет лесного хоз-ва СМ СССР, 1973. 35 с.
- Указания по обнаружению и тушению лесных пожаров. М.: Госкомитет лесного хоз-ва СМ СССР, 1976. 110 с.
- Франк В. В.* Лесные пожары и состояние атмосферы.— В кн.: Возникновение лесных пожаров. М.: Наука, 1964, с. 83—102.
- Франк В. В.* Метод установления связи возникновения и распространения лесных пожаров с характером барического поля.— В кн.: Современные вопросы охраны леса от пожаров и борьба с ними. М.: Лесная промышленность, 1965, с. 38—52.
- Фураев В. В.* Шелкопрядники в Западно-Сибирской низменности и пожары в них.— В кн.: Возникновение лесных пожаров. М.: Наука, 1964, с. 103—123.
- Фураев В. В., Курбатский Н. П.* Эффективность защитных минерализованных полос в сосновых молодняках.— В кн.: Вопросы лесной пирологии. Красноярск, 1972, с. 140—152.
- Цветков П. А., Фураев В. В., Доррер Г. А.* Методика расчета оптимальной сети противопожарных полос в сосновых молодняках.— В кн.: Вопросы лесной пирологии. Красноярск, 1974, с. 226—240.
- Червоный М. Г.* Охрана лесов от пожаров. М.: Лесная промышленность, 1973.
- Шлыков Д. Н.* Очерк лесного хозяйства Марийской области. Йошкар-Ола, 1927.
- Шостакович В. Б.* Лесные пожары в Сибири в 1915 г.— Изв. Вост.-Сиб. отд. Рус. Геогр. о-ва, 1924, т. 47. Иркутск, с. 1—9.
- Яворский Б. М., Пинский А. А.* Основы физики. М.: Наука, 1969. 455 с.
- Albrecht.*— Wiss. Abh. Reich Wetterdienst, 1942, Bd. IX, N 5.
- Anderson H. E.* Sundance fire, «An analysis of fire phenomena».— U. S. Forest Serv. Res. Paper, INT-56, 1968.
- Arnold R. K., Buck C. C.* Blow-up fires silviculture or weather problems.— J. Forest., 1954.
- Berlad A. L., Lee R. S.* «Long range spotting».— Combust. and Flame, 1968, N 12, p. 172.
- Berlad A. L., Prasad C.* The preflame region of spreading forest fires.— Combust. and Flame, 1969.

- Berlad A. L.* Fire spread in solid fuel arrays. State Univ. N. Y. Dept Eng. N. Y., 1970.
- Bond H.* Fire and air war. National Fire Protection Assoc. Boston, Mass., 1946.
- Byram G. M.* Atmospheric conditions related to blow-up fires.—U. S. Forest Serv., Southeast. Forest Expt. Sta., 1954, p. 35.
- Byram G. M.* Some principles of burning and their significance in forest fire behavior.—Fire Control Notes, 1957, N 2.
- Byram G. M.* Scaling laws for modeling mass fires.—Pyrodynamics, 1966, v. 4, N 3, p. 271—284.
- Byram G. M., Nelson R. M.* The modeling of pulsating fires.—Fire Technol., 1970, v. 6.
- Carry B. B.* The Wallowa-Whitman story. 1960.—Fire Control Notes, 1961, N 22, p. 2.
- Caseu Iim.* Fighting wildfires.—Fire Eng., 1971, 124, N 9, p. 82—85.
- Countryman C. M.* Mass fires and fire behavior.—U. S. Forest Serv. Res. Paper, PSW-19 manuscript, 1964, p. 52.
- Countryman C. M.* Mass fire characteristics in large scale tests.—Fire Technol., 1965, v. 1, p. 303—317.
- Countryman C. M.* Projects Flamebeau—an investigation of mass fire (1964—1967). Final rept, vol. 1. Pasific Southwest Forest and Range Experiment Station, Berkeley, California, 1969, p. 119.
- Davis K. P.* Forest fire: control and use. New York—Toronto—London, 1959.
- Deeming J. E., Lancaster J. W., Fosberg M. A., Furman R. W., Schnoeder M. J.* The national fire-danger rating system. USDA Forest Service. Res. paper RM 84. February 1972.
- Ebert C. N. V.* Hamburg's firestorm weather. National fire protection Association Quaterly, 1963, p. 253—260.
- Emmons C. N. V., Ging S. J.* The fire whirl.—Eleventh Symp. (Intern.) combust. Combustion inst., Pittsburg, 1967.
- Faure I.* Study of convection currents created by fires of lange areas.—Intern. Symp. Use Models Fire Res. Nat. Acad. Sci.—Nat. res. Council, Washington, 1961.
- Gisborne H. T.* The principles of asurina forest fire danger.—J. Forest., 1936, v. 34, N 8, p. 786—793. Soc. Amer. Forestres.
- Hübener E.* Zur Prognose und Ökonomie der Waldbrandschubzriegele.—Die sozialistische Förstschoff, 1968, N 12, p. 373—375.
- Judge F.* Forest fire. N. Y., 1962. 143 p.
- Lee B. T.* Laboratory scaling of the fluid mechanical aspects of large fires. Combust. Sci. and Technol., 1972, v. 4, N 5, p. 233—239.
- Lee S. L., Hellman G. M.* Study of firebrand trajectories in a turbulent swirling natural convection plume.—Combust. and Flame, 1969, N 13, p. 645—655.
- Lee S. L.* Fire research.—Dept Mechanics State Univ. N. Y. Stony Brook, 1972, v. 25, N 5, p. 503—509.
- Mißbach K.* Die Bedeutung des Funkenfluges der Eisenbahnen für die Entstehung von Waldbränden.—Berlin, 1965, Bd. 14, H. 6, 591—609.
- Mißbach K.* Waldbrand. Verhüttung und Bekämpfung. VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag. Berlin, 1972. 132 p.
- Morton B. R., Taylor G. I.* Forced plumes.—J. Fluid Mechan., 1959, v. 5, p. 151—153.
- Morton B. R.* Modeling fire plumes.—10th Symp. (Intern.) Combust. 1965, p. 973—982.
- Orloff L., Deris I.* Modeling of ceiling fires.—13th Symp. (Intern.) Combust., 1971, p. 979—992.
- Parker W. J., Corlett R. C., Lee B. R.* An experimental test of mass fire scalling principles. USNRDL T. R. 68—117. California, 1968.
- Priestley C. H. B., Ball F. K.* Continuous convection from an isolated sourse of heat.—Quart. J. Rog. Meteorol. Soc., 1955, 81, p. 144—157.
- Priestley C. H. B.* Turbulent transfer in the lower atmosphere. Chicago, 1959.
- Rao V. K., Brzustouski T. A.* Preliminary hot-wire measurements on fire con-

- vection zones over model fires.— Combust. Sci. and Technol., 1969, v. 1, p. 34—48.
- Reifsnnyder W. E.* Weather and fire control practices (Fifth World Forestry Congress). Washington, 1960.
- Robin A. G.* Weather conditions associated with the Broadford fire.— Proc. Fire Weather Confer. Melbourne, 1958.
- Rouse H., Vich C. S., Humphreys H. W.* Gravitational convection from a boundary source.— Tellus, 1952, v. 4, p. 201—210.
- Rothermel R.* The Sundance fire- a condensed report. Combustion Inst. Pittsburg, 1967.
- Stickel P. W.* Weather and forest fire hazard.— J. Forest., 1934, N 1.
- Tarifa C. S. e. a.* Open fires and transport of firebrands.— U. S. Forest. Service Grant, FG-Sp-114. Second Annu. Rept, Madrid, 1963.
- Tarifa C. S., Notario P. P., Moreno F. G.* On the flight path and the lifetimes of burning particles of wood.— 10th Symp. (Intern.) Comb. Pittsburg, 1965, p. 1031—1037.
- Taylor R. J. e. a.* Some meteorological aspects of intense forest fires.— Division Meteorolog. Physics Techn. Paper. Australia, 1971, N 21.
- Vehrencamp J. E.* An investigation of fire behavior in a natural atmospheric environment. Univ. Calif. Dept Eng., Los Angeles, 1955, p. 55—60.
- Williams D. W. e. a.* Operation Europa an Australian mass fire experiment. Rept 386. Defence Standards Laboratories. Australian Defense Scientific Service Department of Supply, Commonwealth of Australia Maribyrnon Victoria, Australia. September, 1970.
- Whittingham H. E.* Meteorological factors controlling success of failure of shrub burnes in plantation areas in Southeast Queensland (Proc. Fire weather Conf.). Melbourne, 1958.
- Wright J. G.* Forest-fire hasard research as developed and conducted at the Petawawa forest experiment station. Forest Service Department of the Interior Canada, Ottawa, 1967, p. 40.

Характеристика горения и его условий на опытных участках

Номер опытного участка	Характеристика опытного участка			Погодные условия во время пожара на опытном участке	Характеристика фронтальной кромки пожара в пределах опытного участка	Наличие или отсутствие загораний перед фронтальной кромкой пожара
	категория участка	описание участка	запас сгорающих при пожаре лесных горючих материалов (кг/м ²) по группам			
1	Молодняк по гари	1) С, Л, Б, Ос 10 лет, средней густоты; 3) малина, шиповник; 4) вейник, осочка	I—1,0 II—0,8 III+V+VI—0,25 IVa—0,9 IVб—2,1	$t^{\circ}=22$ $r=35$ $\Gamma=2037$ $u=2,5$ $\Delta t^{\circ}=1,3$	$l=70$ $b=6,5$ $h=1,7$ $V_{кр}=2,3$ $l=36,0$ $V_{кнв}=4,1$	—
2	Молодняк по гари	1) С, Л, Б, Ос 10 лет, средней густоты; 3) малина; 4) вейник, иван-чай, осочка	I—0,9 II—0,6 III+V+IV—0,45 IVa—0,25 IVб—4,9	$t^{\circ}=24$ $r=32$ $\Gamma=2037$ $u=3,0$ $\Delta t^{\circ}=1,3$	$l=55$ $b=6,5$ $h=2,2$ $V_{кр}=4,2$ $l=55,5$ $V_{кнв}=5,1$	+
3	Сосняк-брусничник	1) 6С 3Л 1Б+Ос 100 лет; 0,6; IV 2) С, Л 10—12 лет, средней густоты; 3) малина, шиповник, редкий; 4) брусника, грушанка; 5) зеленые мхи	I—1,1 II—1,3 III+IV+V—0,3 IVa—1,0 IVб—5,6	$t^{\circ}=29$ $r=34$ $\Gamma=2449$ $u=2,5$ $\Delta t^{\circ}=0,6$	$l=50$ $b=6,0$ $h=1,8$ $V_{кр}=2,5$ $l=38$ $V_{кнв}=4,4$	—

4	Молодняк по гари	1) С, Л, Б, Ос 10—12 лет, средней густоты; 3) малина, редкий; 4) вейник, иван-чай, осочка	I—0,9 II—0,75 III+IV+V—0,25 IVa—0,3 IVб—5,0	$t^{\circ}=26$ $r=32$ $\Gamma=2449$ $u=4,0$ $\Delta t^{\circ}=0,6$	$l=65$ $b=7,0$ $h=2,5$ $V_{кр}=6,1$ $l=82,5$ $V_{кнв}=5,7$	+
5	Молодняк по гари	1) С 10 лет, густой; 4) отсутствует	I—0,85 II—0,7 III+IV+V—0,45 IVa—0,5 IVб—5,1	$t^{\circ}=28$ $r=30$ $\Gamma=2449$ $u=3,5$ $\Delta t^{\circ}=0,7$	$l=60$ $b=7,0$ $h=2,5$ $V_{кр}=5,2$ $l=71,6$ $V_{кнв}=5,2$	Не обследовано
6	Молодняк по гари	1) С, Л, Б, Ос 10—12 лет, средней густоты; 3) малина, редкий; 4) вейник, осочка	I—1,05 II—0,65 III+V+VI—0,3 IVa—0,2 IVб—5,1	$t^{\circ}=29$ $r=32$ $\Gamma=6327$ $u=3,7$ $\Delta t^{\circ}=0,7$	$l=55$ $b=6,5$ $h=2,4$ $V_{кр}=5,5$ $l=79$ $V_{кнв}=5,6$	+
7	Молодняк по гари	1) С 10—12 лет, средней густоты; 4) вейник, иван-чай, осочка	I—0,85 II—0,85 III+V+VI—0,45 IVa—0,5 IVб—4,7	$t^{\circ}=28$ $r=26$ $\Gamma=6327$ $u=3,6$ $\Delta t^{\circ}=0,7$	$l=70$ $b=8,5$ $h=3,0$ $V_{кр}=6,4$ $l=102,5$ $V_{кнв}=6,0$	Не обследовано
8	Молодняк по гари	1) С 10—12 лет, густой; 4) отсутствует	I—0,8 II—0,8 III+V+VI—0,45 IVa—0,4 IVб—4,4	$t^{\circ}=33$ $r=24$ $\Gamma=6327$ $u=3,8$ $\Delta t^{\circ}=0,7$	$l=65$ $b=7,0$ $h=2,8$ $V_{кр}=6,6$ $l=95,6$ $V_{кнв}=5,6$	Не обследовано

Номер опыт- ного участ- ка	Характеристика опытного участка			Погодные условия во время пожа- ра на опытном участке	Характеристи- ка фронталь- ной кромки пожара в пре- делах опытно- го участка	Наличие или отсутствие загора- ний перед фрон- тальной кромкой пожара
	категория участка	описание участка	запас сгорающих при пожаре лесных горючих материалов (кг/м ²) по группам			
9	Молодняк по гари	1) С 10 лет, густой; 4) отсутствует	I—0,85 II—0,85 III+V+VI—0,5 IVa—0,3 IVб—5,0	$t^{\circ}=30$ $r=32$ $\Gamma=6327$ $u=3,8$ $\Delta t^{\circ}=0,7$	$l=70$ $b=9,0$ $h=2,8$ $V_{кр}=6,7$ $l=99,5$ $V_{кнв}=5,7$	Не обследовано
10	Сосняк-брусничник	1) 6С 4Л+Б, Ос 90—100 лет; 0,6; IV; 2) С, Л 10 лет, средней густоты; 4) брусника, грушанка; 5) зеленые мхи	I—0,65 II—1,3 III+V+VI—0,35 IV—0,6 IV—5,4	$t^{\circ}=28$ $r=36$ $\Gamma=6327$ $u=3,6$ $\Delta t^{\circ}=0,7$	$l=55$ $b=7,0$ $h=2,3$ $V_{кр}=5,1$ $l=69,5$ $V_{кнв}=51,0$	Не обследовано
11	Сосняк голубично- брусничник	1) 7С 2Л 1Ос+Б 120 лет; 0,6; III; 2) С, Л 8—10 лет, редкий; 3) шиповник, редкий; 4) голубика, брусника, осочка; 5) зеленые мхи	I—0,6 II—1,45 III+V+VI—0,35 IVa—0,6 IVб—2,8	$t^{\circ}=26$ $r=38$ $\Gamma=6327$ $u=2,6$ $\Delta t^{\circ}=0,7$	$l=60$ $b=4,5$ $h=1,7$ $V_{кр}=2,9$ $l=35,0$ $V_{кнв}=4,2$	—
12	Старая гарь	2) С, 8—10 лет, редкий; 3) шиповник, малина, редкий; 4) вейник, иван-чай	I—0,85 II—0,7 III+V+VI—0,2 IVa—0,2 IVб—3,5	$t^{\circ}=23$ $r=28$ $\Gamma=8436$ $u=2,2$ $\Delta t^{\circ}=1,2$	$l=75$ $b=4,0$ $h=1,4$ $V_{кр}=2,0$ $l=18,0$ $V_{кнв}=3,3$	—

13	Молодняк по гари	1) С, Л 10—12 лет, густой; 3) шиповник, редкий	I—0,85 II—0,6 III+V+VI—0,15 IVa—0,2 IVб—0,3	$t^{\circ}=22$ $r=29$ $\Gamma=8436$ $u=2,2$ $\Delta t^{\circ}=1,2$	$l=80$ $b=5,5$ $h=1,3$ $V_{кр}=1,8$ $l=1,6$ $V_{кнв}=3,4$
14	Сосняк голубично-брусничный	1) 9С 1Л+Сс 80—100 лет; 0,8; IV; 2) С, Л 10—12 лет, редкий; 4) голубика, брусника; 5) зеленые мхи	I—0,65 II—1,15 III+V+VI—0,15 IVa—0,25 IVб—2,0	$t^{\circ}=21$ $r=34$ $\Gamma=8436$ $u=2,0$ $\Delta t^{\circ}=1,1$	$l=80$ $b=2,5$ $h=1,1$ $V_{кр}=1,5$ $l=7,5$ $V_{кнв}=2,4$
15	Сосняк голубично-брусничный	1) 7С 2Л 1Ос+Б 100—120 лет; 0,8; III 2) С, Л 10—20 лет; редкий; 4) голубика, брусника, черника, осочка; 5) зеленые мхи	I—0,65 II—1,2 III+V+VI—0,15 IVa—0,2 IVб—1,5	$t^{\circ}=20$ $r=36$ $\Gamma=8436$ $u=1,5$ $\Delta t^{\circ}=1,1$	$l=60$ $b=2,5$ $h=1,0$ $V_{кр}=1,3$ $l=7,0$ $V_{кнв}=2,6$
16	Сосняк голубичный	1) 6С 3Л 1Ос+Б 100—120 лет; 0,7; IV; 2) С, Л 10—20 лет, редкий; 4) голубика, черника; 5) зеленые мхи	I—0,5 II—1,1 III+V+VI—0,2 IVa—0,25 IVб—1,55	$t^{\circ}=20$ $r=38$ $\Gamma=8436$ $u=1,4$ $\Delta t^{\circ}=0,9$	$l=45$ $b=1,5$ $h=0,9$ $V_{кр}=1,1$ $l=4,8$ $V_{кнв}=2,3$
17	Сосняк голубичный	1) 7С 2Л 1Б+Сс 80—100 лет; 0,7; IV; 2) С, Л 10—12 лет, редкий; 4) голубика, черника; 5) зеленые мхи	I—0,75 II—1,2 III+V+VI—0,1 IVa—0,15 IVб—1,65	$t^{\circ}=19$ $r=40$ $\Gamma=8436$ $u=1,4$ $\Delta t^{\circ}=0,9$	$l=140$ $b=2,0$ $h=0,9$ $V_{кр}=1,2$ $l=5,6$ $V_{кнв}=2,3$

Номер опыт- ного участ- ка	Характеристика опытного участка			Погодные условия во время пожа- ра на опытном участке	Характеристи- ка фронталь- ной кромки пожара в пре- делах опыт- ного участка	Наличие или отсутствие загора- ний перед фронт- альной кромкой пожара
	категория участка	описание участка	запас сгорающих при пожаре лесных горю- чих материалов (кг/м²) по группам			
18	Молодняк по гарю	1) С, Б, Ос 10—12 лет, средней густоты; 3) малина, редкий; 4) вейник, иван-чай, осочка	I—0,9 II—0,85 III+V+VI—0,45 IVa—0,35 IVб—5,0	$t^{\circ}=18$ $r=43$ $\Gamma=8436$ $u=0,8$ $\Delta t^{\circ}=0,9$	$l=70$ $b=0,8$ $h=0,8$ $V_{кр}=0,7$ $l=2,8$ $V_{кнв}=1,9$	—
19	Сосняк голубичный	1) 7С 1Л 1Ос 1Б; 2) С, Л 10—12 лет; редкий; 4) голубика, черника; 5) зеленые мхи	I—0,4 II—0,95 III+V+VI—0,15 IVa—0,3 IVб—1,8	$t^{\circ}=23$ $r=24$ $\Gamma=10\ 964$ $u=3,8$ $\Delta t^{\circ}=1,1$	$l=75$ $b=7,0$ $h=2,5$ $V_{кр}=5,6$ $l=80$ $V_{кнв}=5,6$	+
20	Лиственничник го- лубичный	1) 7Л 3С+Ос 100 лет; 0,7; IV; 2) С, Л 15—20 лет, редкий; 3) рябина, редкий; 4) голубика, багульник; 5) сфагнум	I—0,3 II—0,85 III+V+VI—0,45 IVa—0,1 IVб—0,06	$t^{\circ}=24$ $r=46$ $\Gamma=652$ $u=0,9$ $\Delta t^{\circ}=1,4$	$l=90$ $b=0,8$ $h=0,7$ $V_{кр}=0,9$ $l=3,2$ $V_{кнв}=2,0$	—
21	Лиственничник го- лубичный	1) 7Л 2С 1Ос 100 лет; 0,7; IV 2) С, Л 15—20 лет, редкий; 4) голубика, багульник; 5) сфагнум	I—0,35 II—0,85 III+V+VI—0,45 IVa—0,2 IVб—0,3	$t^{\circ}=26$ $r=45$ $\Gamma=652$ $u=0,6$ $\Delta t^{\circ}=1,4$	$l=50$ $b=0,7$ $h=0,6$ $V_{кр}=0,7$ $l=2,9$ $V_{кнв}=1,8$	—

22	Лиственничник голубичный	1) 6Л ЗС 10с 100 лет; 0,7; IV; 2) С, Л 15—20 лет, редкий; 4) голубика, багульник; 5) сфагнум	I—0,3 II—0,8 III+V+VI—0,5 IVa—0,1 IVб—0,1	$t^{\circ}=27$ $r=43$ $\Gamma=652$ $u=0,8$ $\Delta t^{\circ}=1,4$	$l=90$ $b=0,8$ $h=0,7$ $V_{кр}=0,9$ $I=3,3$ $V_{кнв}=1,8$	—
23	Лиственничник голубичный	1) 7Л 2С 10с 100 лет; 0,7; IV; 2) С, Л 15—20 лет, редкий; 4) голубика, багульник; 5) сфагнум	I—0,35 II—0,85 III+V+VI—0,45 IVa—0,2 IVб—0,3	$t^{\circ}=26$ $r=45$ $\Gamma=652$ $u=1,3$ $\Delta t^{\circ}=1,5$	$l=230$ $b=1,3$ $h=0,8$ $V_{кр}=1,2$ $I=57,0$ $V_{кнв}=2,2$	—
24	Лиственничник голубичный	1) 7Л 2С 10с 100 лет; 0,7; IV; 2) С, Л 10—20 лет, редкий; 4) голубика, багульник; 5) сфагнум	I—0,25 II—0,95 III+V+VI—0,45 IVa—0,05 IVб—0,04	$t^{\circ}=24$ $r=54$ $\Gamma=652$ $u=0,8$ $\Delta t^{\circ}=1,5$	$l=120$ $b=0,7$ $h=0,9$ $V_{кр}=0,9$ $I=3,2$ $V_{кнв}=1,9$	—
25	Лиственничник голубичный	1) 7Л ЗС+Ос 100 лет; 0,7; IV; 2) С, Л 10—20 лет, редкий; 4) голубика, багульник; 5) сфагнум	I—0,35 II—1,05 III+V+VI—0,35 IVa—0,05 IVб—0,09	$t^{\circ}=25$ $r=50$ $\Gamma=652$ $u=0,7$ $\Delta t^{\circ}=1,5$	$l=100$ $b=0,7$ $h=0,6$ $V_{кр}=0,7$ $I=2,7$ $V_{кнв}=1,8$	—
26	Молодняк по гарн	1) С, Л, Б, Ос 10—12 лет, средней густоты; 3) малина, шиповник, редкий; 4) вейник, иван-чай, осочка	I—0,85 II—0,7 III+V+VI—0,4 IVa—0,25 IVб—4,0	$t^{\circ}=33$ $r=25$ $\Gamma=6876$ $u=3,5$ $\Delta t^{\circ}=1,3$	$l=40$ $b=5,0$ $h=2,1$ $V_{кр}=4,4$ $I=52,5$ $V_{кнв}=4,8$	Не обследовано

Номер опыт- ного участ- ка	Характеристика опытного участка			Погодные условия во время пожа- ра на опытном участке	Характеристи- ка фронталь- ной кромки пожара в пределах опытного участка	Наличие или отсутствие загора- ний перед фрон- тальной кромкой пожара
	категория участка	описание участка	запас сгорающих при пожаре лесных горючих материалов (кг/м ²) по группам			
27	Молодняк по гари	1) С, Л, Ос 10—12 лет, средней густоты; 3) малина, шиповник, редкий; 4) вейник, иван-чай, осочка	Ис—0,9 II—0,8 III+V+VI—0,45 IVa—0,5 IVб—4,8	$t^{\circ}=32$ $r=28$ $\Gamma=6876$ $u=3,7$ $\Delta t^{\circ}=1,3$	$l=55$ $b=7,0$ $h=2,8$ $V_{кр}=6,1$ $I=90,0$ $V_{кнв}=5,6$	+
28	Молодняк по гари	1) С, Л, Б, Ос 10—12 лет, средней густоты; 4) вейник, иван-чай, осочка	I—0,9 II—0,95 III+V+VI—0,45 IVa—0,5 IVб—4,7	$t^{\circ}=32$ $r=29$ $\Gamma=6876$ $u=3,8$ $\Delta t^{\circ}=1,3$	$l=90$ $b=8,5$ $h=2,9$ $V_{кр}=6,3$ $I=102$ $V_{кнв}=5,8$	—
29	Сосняк брусничный	1) 7С 2Л 1Б 100 лет; 0,6; IV; 2) С, Л 8—10 лет, средней густоты; 4) брусника, грушанка; 5) зеленые мхи	I—1,0 II—1,45 III+V+VI—0,15 IVa—0,45 IVб—5,2	$t^{\circ}=28$ $r=30$ $\Gamma=6876$ $u=3,6$ $\Delta t^{\circ}=1,3$	$l=60$ $b=7,0$ $h=2,2$ $V_{кр}=4,7$ $I=65,5$ $V_{кнв}=5,1$	+
30	Молодняк по гари	1) С, Л, Б, Ос 10—12 лет, средней густоты; 4) вейник, иван-чай, осочка	I—0,8 II—0,8 III+V+VI—0,4 IVa—0,3 IVб—5,2	$t^{\circ}=27$ $r=36$ $\Gamma=6876$ $u=3,2$ $\Delta t^{\circ}=1,3$	$l=80$ $b=6,8$ $h=1,7$ $V_{кр}=2,8$ $I=38,0$ $V_{кнв}=4,1$	—

31	Сосняк голубичный	<ol style="list-style-type: none"> 1) 7С 2Л 1Ос 120 лет; 0,7; IV; 2) С, Л 10—20 лет, редкий; 3) рябина, редкий; 4) голубика, черника, осочка; 5) зеленые мхи 	<p>I—0,65 II—0,9 III+V+VI—0,25 IVa—0,2 IVб—1,8</p>	<p>$t^{\circ}=34$ $r=36$ $\Gamma=1175$ $u=1,5$ $\Delta t^{\circ}=1,1$</p>	<p>$l=50$ $b=1,5$ $h=1,2$ $V_{кр}=1,5$ $l=10,0$ $V_{кнв}=2,9$</p>	—
32	Сосняк голубично-брусничный	<ol style="list-style-type: none"> 1) 8С 1Л 1Ос 100 лет; 0,8; IV; 2) С, Л 10—12 лет, редкий; 3) рябина, редкий; 4) голубика, брусника; 5) зеленые мхи 	<p>I—0,6 II—1,25 III+V+VI—0,2 IVa—0,3 IVб—2,2</p>	<p>$t^{\circ}=30$ $r=38$ $\Gamma=1175$ $u=1,1$ $\Delta t^{\circ}=1,1$</p>	<p>$l=70$ $b=0,9$ $h=0,9$ $V_{кр}=1,4$ $l=8,5$ $V_{кнв}=2,5$</p>	—
33	Сосняк голубично-брусничный	<ol style="list-style-type: none"> 1) 6С 3Л 1Б+Ос 100 лет; 0,8; III; 2) С, Л 10—12 лет, редкий; 3) рябина, редкий; 4) голубика, брусника; 5) зеленые мхи 	<p>I—0,65 II—1,7 III+V+VI—0,15 IVa—0,2 IVб—1,6</p>	<p>$t^{\circ}=29$ $r=41$ $\Gamma=1175$ $u=1,1$ $\Delta t^{\circ}=1,1$</p>	<p>$l=90$ $b=1,2$ $h=0,3$ $V_{кр}=7,5$ $l=7,5$ $V_{кнв}=2,4$</p>	—
34	Старая гарь	<ol style="list-style-type: none"> 2) С, Л, Б, Ос 10—12 лет, редкий; 3) шиповник, малина, редкий; 4) вейник, иван-чай, осочка 	<p>I—0,75 II—0,6 III+V+VI—0,4 IVa—0,4 IVб—0,4</p>	<p>$t^{\circ}=28$ $r=21$ $\Gamma=4336$ $u=3,6$ $\Delta t^{\circ}=0,9$</p>	<p>$l=65$ $b=8,0$ $h=2,7$ $V_{кр}=6,7$ $l=94,4$ $V_{кнв}=6,0$</p>	+
35	Молодняк по гарь	<ol style="list-style-type: none"> 1) С, Л, Ос 10—12 лет, средней густоты; 3) малина, редкий; 4) вейник, осочка 	<p>I—0,85 II—1,0 III+V+VI—0,3 IVл—0,45 IVб—5,3</p>	<p>$t^{\circ}=23$ $r=23$ $\Gamma=7396$ $u=3,8$ $\Delta t^{\circ}=1,0$</p>	<p>$l=70$ $b=6,5$ $h=2,6$ $V_{кр}=5,2$ $l=86,6$ $V_{кнв}=5,6$</p>	+

Номер опыт- ного участ- ка	Характеристика опытного участка		запас сгорающих при пожаре лесных горю- чих материалов (кг/м ²) по группам	Погодные условия во время пожа- ра на опытном участке	Характеристи- ка фронталь- ной кромки пожара в пре- делах опытно- го участка	Наличие или отсутствие загора- ний перед фрон- тальной кромкой пожара
	категория участка	описание участка				
36	Старая гарь	2) С, Б, Ос 10—12 лет, редкий; 3) шиповник, редкий; 4) вейник, осочка	I—0,95 II—1,0 III+V+VI—0,5 IVa—0,5 IVб—4,65	$t^{\circ}=25$ $r=22$ $\Gamma=7396$ $u=3,5$ $\Delta t^{\circ}=1,0$	$l=70$ $b=8,5$ $h=2,9$ $V_{кр}=6,5$ $I=100,0$ $V_{кнв}=6,2$	+
37	Сосняк голубично- брусничный	1) 6С 3Л 1Ос+Б 100—120 лет; 0,6; IV; 2) С, Л 10—12 лет, средней густоты; 3) рябина, редкий; 4) голубика, черника, брусника; 5) зеленые мхи	I—0,9 II—1,2 III+V+VI—0,4 IVa—1,1 IVб—2,75	$t^{\circ}=27$ $r=25$ $\Gamma=9017$ $u=2,9$ $\Delta t^{\circ}=0,9$	$l=50$ $b=6,0$ $h=1,8$ $V_{кр}=3,0$ $I=40,0$ $V_{кнв}=4,5$	+
38	Молодняк по гарь	1) С, Л, Ос 10—12 лет, средней гус- тоты; 3) рябина, редкий; 4) вейник, иван-чай, осочка	I—0,9 II—0,6 III+V+VI—0,4 IVa—0,45 IVб—4,8	$t^{\circ}=27$ $r=22$ $\Gamma=9017$ $u=3,7$ $\Delta t^{\circ}=0,9$	$l=70$ $b=7,5$ $h=2,7$ $V_{кр}=6,2$ $I=91,6$ $V_{кнв}=5,9$	+
39	Сосняк голубично- брусничный	1) 9С 1Л+Ос 100—120 лет, 0,8; IV; 2) С, Л 10—12 лет, редкий; 3) рябина, редкий; 4) голубика, брусника; 5) зеленые мхи	I—0,65 II—1,2 III+V+VI—0,15 IVa—0,25 IVб—2,1	$t^{\circ}=24$ $r=58$ $\Gamma=495$ $u=1,3$ $\Delta t^{\circ}=0,7$	$l=120$ $b=2,5$ $h=1,3$ $V_{кр}=1,4$ $I=14,0$ $V_{кнв}=3,0$	—

40	Сосняк голубично-брусничный	1) 8С 1Л 1Ос+Б 100—120 лет; 0 8; III; 2) СЛ 10—12 лет, редкий; 3) рябина, редкий; 4) голубика, брусника, черника; 5) зеленые мхи	I—0,55 II—1,35 III+V+VI—0,3 IVa—0,2 IV6—1,6	$t^{\circ}=34$ $r=28$ $\Gamma=1881$ $u=1,3$ $\Delta t^{\circ}=1,4$	$l=80$ $b=0,8$ $h=0,8$ $V_{кр}=1,2$ $I=6,0$ $V_{кнв}=2,2$	—
41	Сосняк брусничный	1) 6С 4Л+Б, Ос 80—100 лет; 0,8; III; 2) С, Л 8—10 лет, редкий; 4) голубика, брусника; 5) зеленые мхи	I—0,8 II—1,4 III+V+VI—0,15 IVa—0,3 IV6—1,6	$t^{\circ}=15$ $r=52$ $\Gamma=6930$ $u=1,6$ $\Delta t^{\circ}=1,1$	$l=70$ $b=3,0$ $h=1,2$ $V_{кр}=1,6$ $I=12,4$ $V_{кнв}=3,1$	—
42	Сосняк брусничный	1) 6С 4Л+Б, Ос 80—100 лет; 0,7; III; 2) С, Л 8—10 лет, редкий; 3) ива, редкий; 4) голубика, брусника; 5) зеленые мхи	I—0,95 II—1,35 III+V+VI—0,1 IVa—1,2 IV6—0,8	$t^{\circ}=16$ $r=52$ $\Gamma=6930$ $u=1,4$ $\Delta t^{\circ}=1,1$	$l=80$ $b=3,0$ $h=1,2$ $V_{кр}=1,3$ $I=10,0$ $V_{кнв}=2,7$	—
43	Сосняк брусничный	1) 5С 4Л 1Б+Ос 2) С, Л 8—10 лет, редкий; 3) ива, шиповник, редкий; 4) брусника, грушанка; 5) зеленые мхи	I—0,7 II—1,25 III+V+VI—0,1 IVa—0,2 IV6—1,5	$t^{\circ}=16$ $r=52$ $\Gamma=6930$ $u=1,8$ $\Delta t^{\circ}=1,1$	$l=85$ $b=3,5$ $h=1,3$ $V_{кр}=1,6$ $I=16,0$ $V_{кнв}=3,3$	—
44	Молодняк по гары	1) С, Л 8—10 лет, средней густоты; 3) шиповник, малина, редкий; 4) вейник, иван-чай, осочка	I—0,8 II—0,8 III+V+IV—0,45 IVa—0,3 IV6—5,2	$t^{\circ}=27$ $r=31$ $\Gamma=6400$ $u=3,7$ $\Delta t^{\circ}=1,3$	$l=55$ $b=6,0$ $h=2,1$ $V_{кр}=4,0$ $I=50,0$ $V_{кнв}=5,0$	+

Номер опыт- ного участ- ка	Характеристика опытного участка			Погодные условия во время пожа- ра на опытном участке	Характеристи- ка фронталь- ной кромки пожара в пре- делах опытного участка	Наличие или отсутствие загора- ний перед фронт- альной кромкой пожара
	категория участка	описание участка	запас сгорающих при пожаре лесных горю- чих материалов (кг/м ²) по группам			
45	Молодняк по гари	1) С, Л 8—10 лет, средней густоты; 3) шиповник, малина; 4) вейник, иван-чай, осочка	I—0,7 II—0,8 III+V+VI—0,4 IVa—0,25 IVб—4,6	$t^{\circ}=27$ $r=31$ $\Gamma=6400$ $u=3,7$ $\Delta t^{\circ}=1,3$	$l=45$ $b=6,0$ $h=2,2$ $V_{кр}=4,2$ $I=50,0$ $V_{кнв}=5,0$	+
46	Молодняк по гари	1) 8С 1Л 1Ос 130 лет; 0,6; III; 2) С, Л 8—10 лет, средней густоты; 3) рябина, шиповник, редкий; 4) голубика, осочка; 5) зеленые мхи	I—0,55 II—1,4 III+V+VI—0,35 IVa—0,6 IVб—2,8	$t^{\circ}=26$ $r=33$ $\Gamma=7320$ $u=2,6$ $\Delta t^{\circ}=1,0$	$l=40$ $b=5,0$ $h=1,8$ $V_{кр}=2,6$ $I=40,0$ $V_{кнв}=4,5$	+
47	Молодняк по гари	1) С, Л 8—10 лет, средней густоты; 3) шиповник, малина, редкий; 4) вейник, иван-чай	I—0,75 II—0,9 III+V+VI—0,25 IVa—0,25 IVб—4,9	$t^{\circ}=28$ $r=29$ $\Gamma=8495$ $u=3,9$ $\Delta t^{\circ}=1,1$	$l=60$ $b=6,5$ $h=2,4$ $V_{кр}=5,0$ $I=80,0$ $V_{кнв}=5,5$	+

Примечание. Описание участка: 1) древостой (состав, возраст, полнота, густота, бонитет); 2) подрост; 3) подлесок; 4) травяно-кустарничковый ярус; 5) мохово-лишайниковый ярус.

Группы лесных горючих материалов: I — мохово-лишайниковый покров вместе с опадом, ветошью травы и опавшими сучками до 1 см диаметром; II — подстилка; III+V+VI — травы, кустарнички, зеленая хвоя и листья подлеска, подроста и древостоя; IVa — опавшие сучья от 1 до 5 см диаметром; IVб — валежник диаметром более 5 см.

Погодные условия во время пожара на опытном участке: t° — температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$; r — относительная влажность воздуха, %; Γ — лесопожарный показатель засухи Нестерова, единиц; u — скорость ветра на высоте 2 м на открытом месте, м/сек; Δt° — вертикальный температурный градиент атмосферы, град./100 м.

Характеристика фронтальной кромки пожара: l — длина наиболее интенсивно горящей части кромки, м; b — ширина кромки, м; h — высота пламени, м; $V_{кр}$ — скорость продвижения кромки, м/мин; I — интенсивность пожара, тыс. ккал/м·мин; $V_{кнв}$ — скорость конвекционного потока на высоте древостоя, м/сек.

**Рекомендации по составлению
схематических лесопожарных планов (карт)**

В настоящее время в лесхозах имеются **схемы противопожарных мероприятий**. В качестве тоиосновы для них использованы схемы лесов лесхоза, имеющие очень мелкий масштаб (от 1 : 100000 до 1 : 500 000). На схему противопожарных мероприятий нанесены лесопожарные выделы, причем их минимальная площадь (в среднем) около 400 га. Выделы раскрашены по пяти классам, в соответствии с помещенной в лесоустроительной инструкции «Шкалой оценки лесных участков по степени опасности возникновения в них пожаров». Класс пожарной опасности участка представляет собой **интегрированную** оценку, зависящую от: 1) характера леса; 2) близости к источникам огня и 3) возможных послепожарных последствий.

Необходимо отметить, что интегрированная оценка маскирует конкретные причины повышенной пожарной опасности участка, которые необходимо знать при проектировании профилактических мероприятий в каждом конкретном случае.

На схему нанесены также существующие и проектируемые минерализованные полосы, разрывы, дороги, реки, кордоны и т. п. Очень мелкий масштаб схемы и интегрированная оценка пожарной опасности затрудняют обоснованное проектирование профилактических мероприятий и полностью исключают использование схемы в качестве оперативной карты при тушении лесных пожаров.

Предлагаемые нами схематические лесопожарные планы (карты) отличаются от существующих схем противопожарных мероприятий прежде всего своим более крупным масштабом, так как в качестве топоосновы для них берутся планшеты.

Вторым отличием лесопожарных планов является подход к оценке пожарной опасности территории: не интегрированный, а **дифференцированный**, т. е. показывающий конкретно условия возникновения, распространения, развития и тушения лесных пожаров, а также вызываемые последствия.

На планшетах обычно уже имеются шифры таксационных выделов, по которым можно судить о номере выдела, классе возраста, бонитете, полноте, запасе. Характеристика каждого выдела дополняется указанием: 1) преобладающих пород древостоя; 2) типа мохово-лишайникового покрова или опада; 3) класса очередности загорания; 4) отметки о возможности сильного повреждения древостоя при пожаре. Кроме этого на планшет наносятся: места возникновения пожаров за последние 10 лет; гидрографическая сеть (включая тальвеги лощин); пути транспорта; линии хребтов в (горах); противопожарные разрывы, минерализованные полосы, кордоны, вертолетные площадки и т. п.

Шкала очередности загорания лесных участков

(в числителе—класс очередности загорания, в знаменателе—величина лесопожарного показателя засухи, при которой может загораться участок данной категории)

Пирологический тип мохово-лишайникового и мертвого покровов		Тип леса и соответствующие ему растительные ассоциации	Полнота насаждения			Листьяги и лиственные весной, редины, сухостойники и прочие открытые места
тифр	характеристика		0,9 и более	0,6—0,8	0,3—0,5	
Лш	Лишайники рода кладония (с примесью зеленых мхов) на сухих почвах	Лишайниковый (беломошник)—бруснично-лишайниковая, чернично-лишайниковая, толокнянко-лишайниковая, воронично-лишайниковая, кустарничково-лишайниковая, мохово-лишайниковая	II 800	II 400	I 200	I 100
Бл	Блестящие и зеленые мхи (часто с примесью лишайников) на дренированных почвах	Вересковый (верещатник)—бруснично-вересковая, лишайниково-вересковая и т. п. Брусничный (брусничник)—чернично-брусничная, воронично-брусничная, вороничная, травяно-брусничная, костянично-брусничная Черничник свежий —бруснично-черничная, воронично-черничная, луговиково-черничная, травяно-черничная, рябиново-черничная, костяничная, майниково-черничная Кисличный (кисличник)—майниково-кисличная, чернично-кисличная, кислично-черничная, кислично-папоротниковая, рябиниковая, кислично-разнотравная	III 1000	II 800	II 400	I 200
Эм	Зеленые мхи (с примесью сфагнума и политрихума) на слабо дренированных почвах	Черничник влажный —хвощово-черничная, голубично-зеленомошная, голубичная Ерниковый и ивовый	IV 4000	II 2000	II 1000	II 500

Пирологический тип мохово-лишайникового и мертвого покровов		Тип леса и соответствующие ему растительные ассоциации	Полнота насаждения			Листьяги и лиственные весной, редины, сухостояники и прочие открытые места
шифр	характеристика		0,9 и более	0,6—0,8	0,3—0,5	
Сф	Сфагнумы (с примесью зеленых мхов и политрихума) на почвах верхового заболачивания	Чернично-сфагновый —хвощово-черничная Кустарничково-сфагновый —голубично-сфагновая, багульниково-сфагновая, багульниково-болотная, ерничково-сфагновая Сфагновый —морозково-сфагновая, пушице-сфагновая, долгомошно-сфагновая Сосна и ель по болоту	V 16 000	IV 8000	IV 4000	III 2000
Гп	Гипновые мхи и сфагнумы (с примесью зеленых мхов) на почвах переходного и низового заболачивания	Осочко-сфагновый —хвощово-сфагновая, хвощовая Травяно-сфагновый —сфагново-травяная, болотно-травяная Вахтово-сфагновый	V 24 000	V 18 000	V 12 000	IV 9000
Дм	Политрихумы (с примесью сфагнума и зеленых мхов)	Долгомошный (долгомошник) —чернично-долгомошная, голубично-долгомошная, кустарничково-долгомошная, хвощово-долгомошная, травяно-долгомошная, осоко-долгомошная	V 24 000	V 12 000	IV 6000	III 3000
Зл	Травяная ветوشь злаков и осок	Вейниковые, луговиковые, осоковые растительные ассоциации	III 1600	II 800	Весной II 400	I 200
			IV 8000	IV 4000	Летом III 2000	III 1000
Тр	Травяная ветوشь из разнотравья, крупнотравья и высокотравья	Крупнотравный —травяно-таволговая, папоротниково-таволговая, папоротниково-хвощовая, кислочно-папоротниковая, папоротниковая, травяная, чернично-травяная, зеленомошно-травяная и Лугово-приручейный —приручейная, логовая, лог, таволговая Разнотравный.	IV 4000	III 2000	Весной II 1000	II 800
			V 24 000	V 18 000	Летом V 12 000	IV 9000

Пирологический тип мохово-лишайникового и мертвого покровов		Тип леса и соответствующие ему растительные ассоциации	Полнота насаждения			Листьяги и лиственные весной, ре- дины, сухо- стойники и прочие от- крытые места
шифр	характеристика		0,9 и более	0,6— 0,8	0,3— 0,5	
Оп	Опад из корот- кой хвои (ели, пихты, листвен- ницы) и уплот- ненной листвы на дренирован- ных и сухих поч- вах	Участки различных типов леса, где более 50% по- верхности почвы покрыва- ет уплотненный опад из хвои или листвы	IV 4000	III 2000	II 1000	II 500
Ор	Опад из длин- ной хвои (кедра, сосны) и рыхлой листвы на дрени- рованных почвах	Участки различных типов леса, где более 50% по- верхности почвы покрыва- ет рыхлый опад из хвои или листвы	III 1000	II 800	II 400	I 200

Предлагаемые схематические лесопожарные планы (карты) предназначаются для использования их как при проектировании профилактических мероприятий, так и в качестве оперативных карт при составлении планов тушения возникших лесных пожаров (особенно крупных).

Шкала очередности загорания участков (см. таблицу)

Шкала, по которой определяются классы очередности загорания для участков различных категорий, составлена с учетом влияния полноты древостоя на скорость высыхания лесных горючих материалов. Древостои не дифференцированы по составу, так как, по нашим данным, состав при одинаковой полноте незначительно влияет на поступление под полог интегральной радиации.

Основной группой лесных горючих материалов, определяющей возможность загорания и распространения горения, является первая группа, включающая живой мохово-лишайниковый покров и мертвый напочвенный покров (опад, ветошь травы). Покров, по его лесопирологическим свойствам, разделен нами на 10 основных типов (6 типов мохово-лишайникового покрова и 4 типа мертвого напочвенного покрова).

Величины лесопожарного показателя засухи, при которых возможны загорания участков, отличающихся по типу покрова и полноте древостоя, даны ориентировочно (по существующим шкалам и нашим наблюдениям). Дать точную величину показа-

теля не представляется возможным, поскольку между первоначальным мозаичным проявлением загораемости и последующим устойчивым горением всего покрова имеется значительный интервал как по времени, так и по величине показателя засухи. Существующая неоднородность (синузиальность) покрова еще больше увеличивает этот интервал.

Мы приводим условия, при которых вероятно гибель или сильное повреждение древостоя в результате пожара. Они составлены в основном по данным натурного обследования пожарниц 1972 г. Возможны сильные повреждения насаждений:

	Из сосны, лиственницы, из лиственных пород	Из ели, пихты, кедра
При возрасте	До 40 лет	До 80 лет
При полноте	До 0,4	До 0,6
При захламленности	Более 50 м ³ /га	Более 25 м ³ /га
При густом хвойном подросте или втором ярусе из ели		
По условиям местопроизрастания: с шифрами Зм, Сф, Дм		
На склонах южной и западной экспозиции при крутизне более 25°		

Разделение на классы по очередности загорания произведено в соответствии с единой шкалой пожарной опасности погоды. Так, в первый класс очередности загорания включены участки, которые могут гореть при первом классе пожарной опасности погоды (т. е. в интервале 0—300 единиц), во втором классе — участки, загорающиеся при втором классе (301—1000) и т. д.

Порядок составления лесопожарных схем-планов

Схематические лесопожарные планы составляются по лесничествам в период лесоустройства. В качестве топографической основы используются дополнительные комплекты лесоустроительных планшетов.

Кроме комплектов планшетов необходимо иметь еще следующие материалы:

1) таксационное описание всех кварталов лесничества; 2) книгу по учету лесных пожаров; 3) топографические карты района в масштабе 1 : 25000 — 1 : 100000 или 4) комплект аэрофотоснимков хорошего качества в масштабе 1 : 10000 — 1 : 30000.

При составлении лесопожарных схем-планов выполняются последовательно следующие операции.

1. Вначале дополняются шифры выделов на планшетах указанием: а) преобладающих пород древостоя; б) типа покрова; в) класса по очередности загорания; г) возможной степени повреждения пожаром.

В шифре указываются буквами породы, имеющие в формуле состава древостоя не менее 3 единиц, например: 9С 1Е записывается как С; 3С 3В 2Е 2Лц записывается как СБ и т. д.

Если все породы имеют в составе менее трех единиц, ставится символ «Хв» в случае преобладания хвойных пород или «Лс» — когда преобладают лиственные.

Если насаждения двухъярусные, преобладающие породы первого и второго ярусов пишут через косую черту, например: 1) 6Б4Е, 2) 10Е записывается как БЕ/Е.

Тип покрова обозначается соответствующим буквенным шифром (Лш, Сф, Тр, Гп, Зм, Зл, Дм, Бл, Ор, Оп), в зависимости от типа леса, типа вырубки или описания покрова. Соотношение между типами леса (вырубки) и типами покрова дано в таблице.

Класс очередности загорания участка (выдела) зависит от типа покрова и полноты древостоя и берется из той же таблицы.

В случае двухъярусных насаждений общая полнота (с которой связана сомкнутость) определяется в соответствии с формулой:

$$P = P_1 + P_2(1 - P_1),$$

где P — общая полнота, P_1 — полнота первого яруса, P_2 — полнота второго яруса.

Например, если полнота первого яруса 0,6, а второго — 0,4, то общая полнота составит:

$$P = 0,6 + 0,4(1 - 0,6) \approx 0,8.$$

Классы очередности загораний обозначаются в шифре выдела арабскими цифрами 1, 2, 3, 4, 5. В случае различий загораемости весной и летом (на участках с типами покрова Зл, Тр, а также в лиственных и лиственничных насаждениях без примеси вечнозеленых хвойных пород) ставят через косую черту оба класса: 1/3; 2/3.

Из числа возможных послепожарных последствий отмечается лишь возможная гибель древостоя.

Возможная гибель древостоя на участке в случае пожара обозначается горизонтальной чертой над цифрой класса очередности загорания ($\bar{2}$, $\bar{3}$, $\bar{5}$).

Все дополнения шифров делаются простым мягким карандашом и располагаются следующим образом по отношению к напечатанному шифру:

Класс очередности загорания (5);	Шифр выдела, напечатанный на планшете;	Состав древостоя (С/Е); тип покрова (Дм).
----------------------------------	--	---

Если выдел очень мал и не имеет полного шифра, то ставится только класс очередности загорания.

Шифр выдела, после его дополнения, дает почти все необходимые сведения об участке (состав древостоя, его возраст, бонитет, полноту, запас, площадь, тип покрова, класс очередности за-

горения и возможные послепожарные последствия). Когда потребуются дополнительные сведения, их можно взять из таксационного описания по номеру выдела.

2. Раскрашивание выделов по классам очередности загорания. Раскрашивание ведут в соответствии с ранее проставленными карандашом, цифрами классов. Используются акварельные или анилиновые краски пяти цветов: 1 класс — ярко-розовый (фиолетово-красный); 2 класс — оранжевый (красно-желтый); 3 класс — бледно-желтый; 4 класс — салатный (желто-зеленый); 5 класс — сине-зеленый или серо-зеленый.

Интенсивность окрашивания должна быть очень слабой не затрудняющей чтение карты. В случае возможной послепожарной гибели насаждений (т. е. если цифры класса имеют черту наверху: $\bar{4}$, $\bar{3}$) выдел окрашивается в более густой цвет.

Если выдел сразу относится к двум классам загорания (например, он имеет первый класс весной и третий класс летом), то центральная часть выдела закрашивается цветом более высокого класса, а края выдела — цветом более низкого класса.

3. После раскрашивания делается обводка черной тушью дополнений, сделанных карандашом в шифре выделов (цифры классов загорания можно не обводить, так как они дублируют раскраску плана).

4. Нанесение мест возникновения пожаров за последние 5—10 лет. Места возникновения определяют по книге учета пожаров, желательно также уточнение их по другим источникам (абрисы летнабов, кроки обследования пожарниц, сведения от лесной охраны, данные таксационных описаний и т. п.). Места возникновения пожаров наносят темно-красными точками.

5. Ярко-голубой краской (лазурью) окаймляют реки, ручьи, озера, водоемы, сеть канав на осушенных площадях. Пользуясь топокартой (или аэроснимками), а также журналами таксации, на лесопожарную карту наносят голубыми штриховыми линиями тальвеги лощин и ложбин. Обозначаются также ручьи, реки, озера и другие водные преграды на площадях земфонда и гослесфонда, непосредственно граничащих с территорией лесничества.

6. Красно-коричневой тушью окаймляют имеющиеся на планшетах, а также (пользуясь топокартой или аэроснимками) дополнительно наносят условными знаками все дороги (особенно, лесовозные) и тропы. Кроме того, указывают дороги на тех площадях земфонда и гослесфонда, которые непосредственно прилегают к территории лесничества.

7. При горном или холмистом рельефе наносят линии хребтов и водоразделов (в виде «елочки», коричневой тушью).

8. Соответствующими знаками красной тушью наносят: 1) минерализованные полосы; 2) противопожарные разрывы; 3) наблюдательные пункты (вышки); 4) пожарно-химические станции; 5) места хранения лесопожарного инвентаря; 6) конторы

лесничество, дома и кордоны лесников; 7) метеопункты и метеостанции; 8) вертолетные площадки и т. д.

9. Планшеты лесопожарной карты должны быть разрезаны на части и наклеены на ткань для того, чтобы ими возможно было пользоваться в лесу.

Приложение 3

Правила проведения целевых палов

1. Из целевых палов в настоящее время пока еще проводят только сельхозпалы, а именно выжигание травяной ветоши на лесных лугах и пастбищах. Сельхозпалы должны проводиться в организованном порядке в сроки, согласованные с органами лесного хозяйства.

2. Наиболее безопасный период проведения сельхозпалов — осень.

3. Сельхозпалы проводятся при первом или втором классах пожарной опасности погоды, т. е. при величине комплексного лесопожарного показателя засухи не более 1000 единиц; класс пожарной опасности определяется лесхозом или оперативным авиатделением.

4. Пал начинают после полудня, не раньше 14 час. и только при тихой погоде (если скорость ветра не превышает 5 м/сек).

5. Пал проводится бригадой численностью не менее шести человек.

6. Бригада должна иметь топоры, лопаты, ранцевые опрыскиватели или ведра, зажигательные средства (факелы, железно-дорожные свечи и т. п.); для захлестывания пламени удобны специальные металлические метлы.

7. Перед выжиганием руководитель тщательно осматривает периферию площади и намечает трассу отжига вокруг всей выжигаемой площади.

8. Трасса отжига должна проходить по чистым местам; при необходимости она очищается от валежа, кустарника и молодняка в виде полосы шириной 2 м, причем горючие материалы удаляются с полосы за пределы выжигаемой площади.

9. Рабочие заранее заготавливают ветки (лучше всего кедровые, еловые и сосновые) или деревца подроста для захлестывания кромки отжига и разносят их по трассе.

10. Выжигание начинают с подветренной стороны участка в одной точке, затем бригада разделяется на два звена, которые расходятся в противоположные стороны по трассе, делая отжиг, охватывая с двух сторон участок, намеченный к выжиганию. Впереди звена идет зажигающий, за ним, несколько отставая, первый пожарный, который захлестывает внешнюю кромку полосы отжига, а сзади, на расстоянии полусотни метров — второй пожарный, который дотушивает внешнюю кромку.

11. После того как на подветренной стороне участка выгорит полоса отжига шириной 10 м, можно делать дополнительные за-
жигания на самом участке, двигаясь против ветра.

12. При выжигании необходимо следить, чтобы не было заго-
раний от искр, перелетевших через полосу отжига.

13. После окончания пала тщательно осматривают край выж-
женного участка, раскапывают и заливают водой все тлеющие
очаги и смотрят, нет ли тлеющих очагов от переброшенных искр.

14. В обязательном порядке до захода солнца следует наблю-
дать за выжженной площадью (из расчета два человека на 1 км
кромки).

15. В последующие три дня регулярно делать осмотр всех
выжженных площадей; время осмотра — с 11 до 16 час.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Введение	4
Условия развития пожаров	8
Среда пожара	8
Крупные вспышки лесных пожаров	12
Описание некоторых крупных пожаров	20
Распространение пожаров	27
Пятнистая форма распространения пожара	27
Программа и методика исследований	31
Формирование конвекционного потока лесного пожара	34
Взаимодействие конвекционного потока с пограничным слоем атмосферы	58
Влияние конвекционного потока на распространение пожара	68
Скорости распространения крупных лесных пожаров	111
Последствия пожаров	114
Отпад после низовых пожаров	117
Отпад после почвенных пожаров	135
Практическое определение возможной степени повреждения древостоя пожаром	135
Профилактика пожаров	139
Противопожарные разрывы, заслоны и минерализованные полосы	139
Лесопожарные карты	143
Борьба с пожарами	146
Подготовительные мероприятия к пожароопасному сезону	146
Остановка пожара	149
Локализация пожара	167
Заключение	170
Литература	172
Приложения	178

ЭРИК НИКОЛАЕВИЧ ВАЛЕНДИК,
ПЕТР МИХАЙЛОВИЧ МАТВЕЕВ,
МАРК АДРИАНОВИЧ СОФРОНОВ

КРУПНЫЕ ЛЕСНЫЕ ПОЖАРЫ

Утверждено к печати Институтом леса и древесины
имени В. Н. Сукачева Сибирского отделения
Академии наук СССР

Редактор издательства Е. К. Исаев
Художник В. Сергеев
Технический редактор В. И. Зудина
Корректора Н. М. Вселюбская, А. А. Смогилева

ИБ № 5375

Сдано в набор 31.07.78
Подписано к печати 30.11.78
Т-17039. Формат 60×90¹/₁₆
Бумага 1
Гарнитура литературная
Печать высокая
Усл. печ. л. 12,5. Уч.-изд. л. 13,5
Тираж 2650 экз. Тип. Зак. 4243
Цена 1 р. 40 к.

Издательство «Наука»
117485, Москва, В-485, Профсоюзная ул., 94а

2-я типография издательства «Наука»
121099, Москва, Г-99, Шубинский пер., 10

СПИСОК ОПЕЧАТОК

Страница	Строка	Написано	Должно быть
119	1 сн	—1—2 м/мин	—1—22 м/мин
143	15 св	картины	карты