

Научная статья  
УДК 614.841/.849  
doi:10.34987/vestnik.sibpsa.2022.27.51.019

## Влияние граничащих участков лесного массива при прогнозировании пожаров

*Александр Валерьевич Широухов*  
*Константин Серафимович Иванов*

*Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия*  
*Автор ответственный за переписку: Широухов Александр Валерьевич, shiroukhov75@mail.ru*

**Аннотация.** В статье рассматривается порядок определения вероятности возникновения того или иного состояния участка лесного массива, в частности, наибольший интерес представляет состояние горения. Прогнозирование строится на анализе статистических данных по рассматриваемому участку лесной территории. В качестве одного из факторов рассматривается влияние соседних участков на вероятность возгорания на исследуемом участке. Оценка влияния граничащих участков формируется на основании анализа состояния соседних участков и преобладающего направления ветра.

**Ключевые слова:** вероятность возникновения очага возгорания, вероятность влияния, нормирование значение показателей фактора, метод факторного анализа, системы графо// Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2022. № 2 (25). С. 1-9. в

**Для цитирования:** Широухов А.В., Иванов К.С. Влияние граничащих участков лесного массива при прогнозировании пожаров // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2022. № 2 (25). С. 166-173.

Original article

## INFLUENCE OF BORDERING FOREST AREAS WHEN PREDICTING FIRES

*Alexander V. Shiroukhov*  
*Konstantin S. Ivanov*

*Saint-Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Saint Petersburg, Russia*  
**Corresponding author:** Alexander V. Shiroukhov, shiroukhov75@mail.ru

**Abstract.** The article discusses the procedure for determining the probability of occurrence of a particular state of a forest area; in particular, the state is fires of the greatest interest. Forecasting is based on the analysis of statistical data on the considered section of the forest territory. The influence of neighboring sites on the probability of fire in the studied area is considered as one of the factors. The assessment of the influence of the bordering areas is formed based on the analysis of the state of neighboring areas and the prevailing wind direction.

**Keywords:** the probability of occurrence of a fire source, the probability of influence, the normalized value of factor indicators, the method of factor analysis, graph systems.

**For citation:** Shiroukhov A.V., Ivanov K.S. Influence of bordering forest areas when predicting fires // Siberian Fire and Rescue Bulletin 2022. № 2 (25). С. 166-173.

События и процессы возникновения и развития лесных пожаров, как правило, являются случайными и должны исследоваться на основе статистических методов. Оценка вероятности возникновения возгорания является важнейшей задачей с точки зрения прогнозирования лесных пожаров, а также принятия профилактических мер по предотвращению возникновения очагов возгорания. По сути, оценку риска (меры опасности) возникновения очага пожара можно оценить эмпирическим показателем – вероятностной оценкой. Подобный подход хорошо себя зарекомендовал в смежных областях исследований [1; 2; 3]. Как правило, оценка вероятности определяется методами факторного анализа [1]. Процесс возникновения и развития очага возгорания обуславливается широким спектром факторов [4; 5; 6], как коррелируемыми (влажность горючего материала от нормы осадков в регионе), так и обособленными (климатические условия, антропогенный фактора и т.д.).

Для решения задачи по определению количественной оценки вероятности возникновения очага возгорания в лесном массиве предлагается применить метод факторного анализа [1]. В качестве модели предлагается применить линейную многофакторную модель, так как данная модель обеспечивает наименьшую погрешность [1; 7]. Вероятность возникновения очага возгорания, в данной модели, можно определить, как:

$$P_k = \sum_{i=1}^n a_{ik} F_{ik} \quad , \quad (1)$$

где  $P_k$  - вероятность возникновения очага возгорания, на рассматриваемом участке лесного массива в рассматриваемый временной промежуток;

$a_{ik}$  - факторная нагрузка (коэффициент), характеризующий влияние каждого из факторов на вероятность возникновения очага возгорания;

$F_{ik}$  - факторы, влияющие на вероятность возникновения очага возгорания, на рассматриваемом участке лесного массива в рассматриваемый временной промежуток;

$i$  - рассматриваемый временной промежуток;

$k$  - рассматриваемый участок лесного массива.

Количество факторов, влияющих на вероятность возникновения достаточно велико. И часть факторов оказывает существенное влияние на вероятность возникновения возгорания (факторы имеют большой «вес»), другие же влияют не столь значительно (имеют нулевой или малый «вес»), следовательно, в порядке допущения, рядом малозначительных факторов можно пренебречь.

Почти все используемые факторы являются разноразмерными, данное обстоятельство вызывает затруднения в применении их количественных значений. Для согласования размерностей и упрощения расчетов в последующих вычислениях целесообразно применить безразмерные нормированные значения факторов:

$$f_{ik} = \frac{F_{ik} - m_f}{\sigma_i} \quad , \quad (2)$$

где  $f_{ik}$  - безразмерное нормированное значение показателей фактора;

$F_{ki}$  - абсолютное значение показателей фактора;

$m_f$  - математическое ожидание показателей фактора за период наблюдений (определяется на основе статистических данных);

$\sigma_i$  - среднеквадратическое отклонение показателей фактора.

При рассмотрении вероятностной модели возникновения очага возгорания на каком-то определенном участке лесного массива нельзя пренебрегать состоянием (наличие открытого очага огня, наличие тления и т.д.) участков, граничащих с исследуемым. Соответственно, следует рассматривать в качестве фактора, оказывающего влияние на формирование вероятности возникновения либо распространения очага возгорания, состояние участков,

непосредственно граничащих с исследуемым участком и степень их влияния на него. Данный фактор является лишь одним из факторов, участвующих в формировании вероятностной оценки возникновения либо распространения очага возгорания. Каждый из рассматриваемых факторов оказывает влияние в разной степени (имеет разный вес в модели оценки), степень влияния которых определяется на основании статистических показателей. Анализ статистических данных [8; 9] позволяет сделать вывод о том, что влияние граничных участков имеет один из самых высоких показателей веса, наравне с показателями гидрометеорологического состояния и фактором наличия горючего материала на участке.

В данном случае, в качестве участка лесной растительности целесообразно рассматривать квадратный участок со стороной равной одному километру, что соответствует размерам лесных кварталов. Данное условие позволит в последующем упростить процесс аппроксимации разрабатываемой модели к реальному лесному массиву, так же следует сделать допущение о том, что стороны участков лесного массива ориентированы по сторонам горизонта, данное допущение позволит упростить порядок описания зависимостей от направления ветра.

Таким образом, принимая во внимание сделанные допущения (рис. 1), с исследуемым участком  $(k, q)$  постоянно граничит восемь соседних участков  $(k \pm 1, q \pm 1)$ , каждый из которых может находиться в одном из следующих состояний:

- отсутствие горения (очага возгорания) с возможностью последующего возгорания;
- наличие очага активного горения (возгорания);
- тление (догорание);
- отсутствие горения (очага возгорания) без возможности последующего возгорания (пепелище).

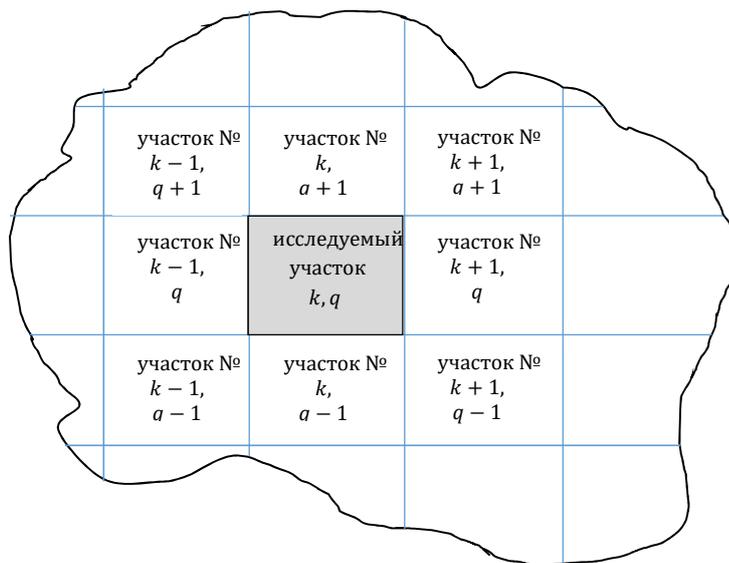


Рис. 1. Схема расположения граничащих участков лесного массива

В итоге возможно тридцать два сочетания вариантов состояний граничных участков.

Следует отметить, что при наличии очага активного горения на любом из граничащих участков вероятность возникновения очага возгорания на исследуемом участке резко возрастает, а направление ветра лишь увеличивает эту вероятность.

Ключевую роль в определении направления распространения фронта пламени будет играть направление ветра. То есть при наличии ветра со стороны участка, находящегося в состоянии активного горения, вероятность возникновения возгорания на исследуемом участке многократно возрастает, вплоть до 100%. При этом допускаем, что остальные условия, необходимые для возникновения возгорания (наличие сухого горючего материала, отсутствие осадков и т.д.) выполняются.

Очевидно, что при отсутствии ветра, распространение фронта пламени так же будет иметь место, но характер его изменения будет определяться фактором наличия горючего материала на

границе участков. По этой причине, случай распространения при отсутствии ветра не нашел отражения в данной статье.

Таким образом, для определения фактора влияния граничащих участков следует рассмотреть совокупность следующих составляющих: наличие ветра и состояние подветренного участка.

В дальнейшем, под влиянием граничащего участка будем понимать возможность распространения пламени на территорию исследуемого участка от граничащего или переход исследуемого участка в состояние активного горения (т.е. возникновение очага возгорания в пределах участка) с определенной долей вероятности.

Так как в гидрометеорологических наблюдениях учитывается дискретное положение направления ветра (всего восемь: южный, юго-восточный и т.д.), с учетом деления на граничащие участки и с учетом возможных состояний каждого из участков, получаем 256 вариантов взаимных состояний. Если учитывать реальное, а не упрощенное дискретные состояния направлений и значения скорости ветра, то количество возможных вариантов возрастает многократно, что значительно усложняет процесс описания и определения какого-то фактора (факторов), т.е. модели описывающей вероятность возникновения очага возгорания на исследуемом участке.

Сделаем предположение, что влияние граничащих участков на вероятность возникновения очага возгорания на исследуемом участке процесс случайный и непрерывный во времени. Исходя из этого допуская, что вероятность того или иного влияния граничащих участков подчиняется нормальному закону распределения вероятностей. Тогда, используя «правило трех сигм» [7], можно определить вероятность попадания в заданный интервал возможных значений. Если интервал определить, как среднеквадратическое отклонение, то вероятность попадания в каждый заданный интервал относительно центра рассеивания составит 0,34; 0,14; 0,02; соответственно полная вероятность попадания в каждый из интервалов составит - 0,68; 0,28; 0,04.

Исходя из сделанных предположений, степень влияния граничащих участков условно можно разделить на три группы:

- высокая, с вероятностью попадания в данную группу ( $P \approx 0,68$ );
- средняя, с вероятностью попадания в данную группу ( $P \approx 0,28$ );
- низкая, с вероятностью попадания в данную группу ( $P \approx 0,04$ ).

Очевидно, что сумма вероятностей составляет 1,0, т.е. граничащий участок неизбежно окажет влияние на исследуемый участок (о чем было сказано выше).

Если в качестве влияния граничащих участков рассматривать вероятность возможности распространения открытого огня от одного участка к другому (граничащий - исследуемый), то интерес представляют только те состояния граничащих участков, которые содержат фазу горения, либо фазу догорания (тления). Догорание на граничащем участке будет оказывать меньшее влияние на возникновение очага возгорания на исследуемом участке. Полностью исключить данное влияние нельзя, т.к. при наличии ветра достаточной силы и соответствующего направления, а также наличия на данном участке сухого горючего материала (остатков), возможен краткосрочный переход на локальных участках из состояния тления в состояние активного горения с последующим распространением пламени. Данный процесс может носить локальный характер, как в пространстве, так и во времени. Ввиду того что, временные интервалы в рассматриваемой вероятностной модели носят дискретный характер (день, неделя, квартал), а продолжительность описанного процесса перехода из состояния тления в состояние активного горения может быть многократно меньше продолжительности рассматриваемых временных интервалов, то и данные участки не следует рассматривать как участки в состоянии активного горения.

Таким образом, в дальнейшем будем предполагать, что граничащие участки находятся в состоянии горения (наличие очага активного горения). Исходя из рассматриваемых состояний граничащих участков и возможных направлений ветра, оказание влияния на вероятность

возникновения очага возгорания на исследуемом участке можно представить в виде системы графов [1]. В данном графе (рис. 2) влияние граничащих участков (Б1, Б2, Б3) на исследуемый участок (А), в зависимости от положения направления ветра по отношению к границам исследуемого участка и их состояния, оценивается как вероятность перехода из одного дискретного состояния (отсутствие горения с возможностью последующего возгорания) в следующее дискретное состояние (состояние горения):

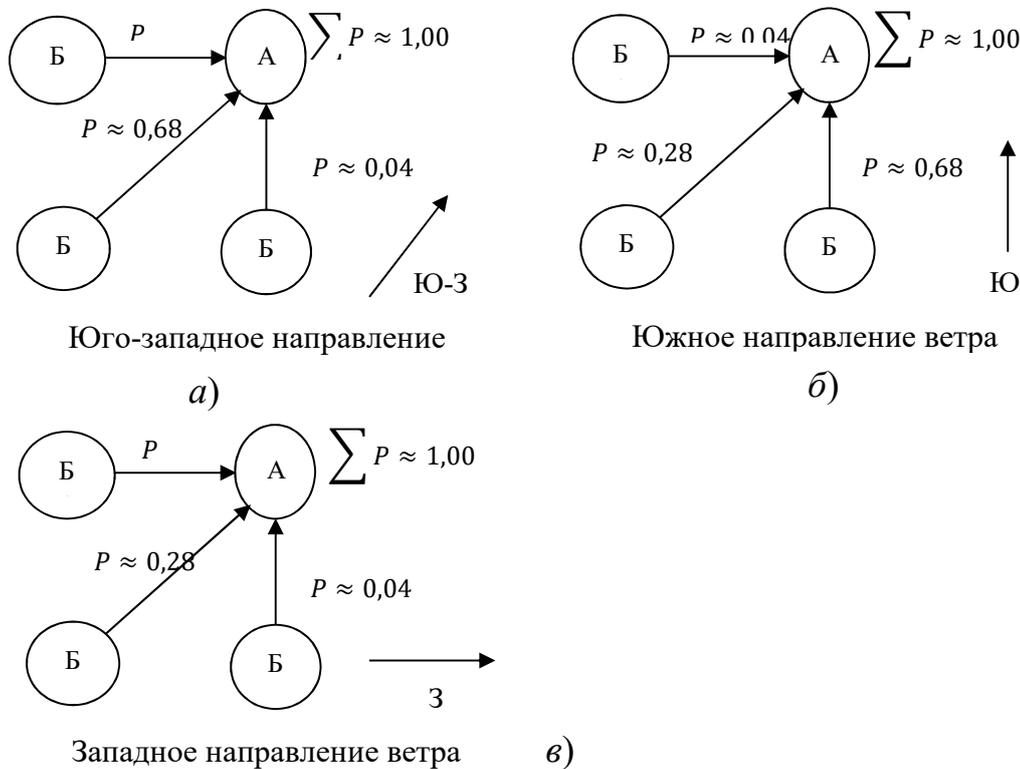


Рис. 2. Описание вероятностного состояния исследуемого участка в зависимости от влияния граничащих участков с использованием графов

Если каждый из граничных участков находится в одном из возможных состояний, то при различных направлениях ветра вероятность перехода исследуемого участка в активную фазу горения будет распределяться как в таблице.

**Таблица. Распределение вероятности влияния граничащих участков**

	направление ветра (географически ориентированное)							
	С	С-В	С-З	Ю	Ю-В	Ю-З	В	З
участок №1 $k - 1, q + 1$	0,28	0,68	-	-	-	-	-	0,28
участок №2 $k, q + 1$	0,68	0,28	0,28	-	-	-	0,04	0,04
участок №3 $k + 1, q + 1$	0,28	-	0,68	-	-	-	0,28	-
участок №4 $k + 1, q$	0,04	-	0,04	0,04	-	-	0,68	-
участок №5 $k + 1, q - 1$	-	-	-	0,28	-	-	0,28	-
участок №6 $k, q - 1$	-	-	-	0,68	0,28	0,28	0,04	0,04
участок №7 $k - 1, q - 1$	-	-	-	0,28	0,68	0,68	-	0,28
участок №8 $k - 1, q$	0,04	0,04	-	0,04	0,04	0,04	-	0,68

Логично ввести следующее ограничение: обратное влияние исследуемого участка на граничащие (например, при смене направления ветра на противоположное) – не рассматривается.

Так как, все состояния граничащих участков рассматриваются как события совместные, то суммарная вероятность влияния нескольких граничащих участков на процесс возникновения горения (находящихся в различных состояниях) рассматривается как вероятность совместного события. Суммарное влияние одного и того же граничащего участка, находящегося в различных состояниях (горения и тления), в одно и тоже время следует рассматривать как вероятность влияния от участка находящегося в состоянии горения, так как в данном случае состояние вероятности влияния от участка в состоянии тления оказывается много меньше чем от участка в состоянии горения.

При использовании рассматриваемого фактора в общей модели вероятностного прогноза, возникает необходимость в определении вероятности влияния нескольких граничащих участков, находящихся в различных состояниях. Вероятность влияния каждого граничащего участка определить не представляет труда, суммарную вероятность следует рассматривать как вероятность совместных событий [6].

$$P_{kq} = \sum_{i=1}^8 P_i + \sum_{g=1}^8 P_i P_g - \prod_{i=1}^8 P_i,$$

где  $P_{kq}$  – суммарная вероятность влияния от всех граничащих участков;

$P_i, P_g$  - вероятность влияния каждого из участков;

$i, g$  - номера граничащих участков.

Поскольку вероятность влияния, величина безразмерная, то и в процедуре нормирования не нуждается, следовательно, может быть применена в рассматриваемой вероятностной модели как фактор, характеризующий влияние участков, граничащих с рассматриваемым участком.

В статье не рассматривается такой показатель как скорость ветра, так как в данном случае скорость ветра влияет на скорость перехода из одного состояния исследуемого участка в другое, а вероятность данного перехода в первую очередь определяется направлением ветра и взаимным расположением исследуемого участка и граничащего по отношению к направлению ветра.

В последующем целесообразно рассмотреть влияние скорости ветра в распространении очага возгорания, на основе дискретного фактора времени.

Предлагаемый компонент многофакторной модели позволит определить вероятность возникновения очага возгорания на определенном участке лесного массива в зависимости от состояний и расположения граничащих участков на фоне изменяющегося направления ветра. Варьируя исходные данные можно прогнозировать данный процесс. Обладая информацией о вероятности возникновения возгорания появляется возможность заблаговременного принятия того или иного решения. Временные рамки данного прогноза ограничиваются рамками прогнозирования изменения влияющих факторов. Так как, часть влияющих факторов статична на рассматриваемом промежутке времени, либо изменяется по известным законам, а другая часть легко прогнозируема с достаточной точностью на длительные промежутки времени, то составление вероятностного прогноза не вызывает затруднений. Точность такого прогноза будет повышаться с увеличением объема статистических данных, используемых для составления модели.

#### Список источников

1. Широухов А.В., Мороз Н.А. Прогнозирование процесса возникновения очагов возгорания на участках территории. // Комплексные проблемы техносферной безопасности: материалы XVII МНПК/ ФГБОУ ВО Воронежский ГТУ.2021.
2. Филипенко В.А., Зотов А.В. Прогнозирование площади лесного пожара с помощью машинного обучения. // Безопасность техногенных и природных систем: науч. журнал. 2019. №3.

3. Кулик В., Лобанов С.В. Гидрологический прогноз лесных пожаров и их предотвращение. // Экологический вестник Приморья. 2002.
4. Широухов А.В. Определение объема горючего материала на участке лесного массива при построении вероятностной модели возникновения очага возгорания. // Мониторинг, моделирование и прогнозирование опасных природных явлений и чрезвычайных ситуаций: материалы X ВНИПК / ФГБОУ ВО Сибирская ПСА ГПС МЧС России.2020. С.74-79.
5. Широухов А.В., Иванов К.С. Оценка влияния антропогенного фактора лесного массива на вероятность возникновения очага пожара. // Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы. Мониторинг, предотвращение и ликвидация чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера: материалы МНИПК/ СПб УГПС МЧС России.2021.
6. Taylor, S.W.; Alexander, M.E. Science, technology, and human factors in fire danger rating. // The Canadian experience. Int. J. Wildland Fire 2006, 15, 121–135.
7. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: учебник/ Е.С. Вентцель, - 11-е изд., стер. – М.: КНОРУС, 2010. – 664 с.
8. Y. Xie, Minggang Peng Forest fire forecasting using ensemble learning approaches.// Neural Computing and Applications, Computer Science.2018. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper>
9. A. Nebot Forest Fire Forecasting Using Fuzzy Logic Models.// Forests 12(8) July 2021. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.researchgate.net/publication>
10. Алексеев В.Е., Захарова Д.В. Теория графов: учебное пособие НГУ им. Лобачевского. 2017. 119 с.

#### **List of sources**

1. Shiroukhov A.V., Moroz N.A. Forecasting the process of occurrence of fires in the areas of the territory. // Complex problems of technosphere safety: materials of the XVII international scientific and practical conference/ Voronezh State Technical University.2021.
2. Filipenko V.A., Zotov A.V. Forecasting the area of a forest fire using machine learning. // Safety of technogenic and natural systems: scientific journal. 2019. №3.
3. Kulik V., Lobanov S.V. Hydrological forecast of forest fires and their prevention.// Ecological Bulletin of Primorye. 2002.
4. Shiroukhov A.V. Determination of the volume of combustible material on a forest plot when constructing a probabilistic model of the occurrence of a fire source.// Monitoring, modeling and forecasting of natural hazards and emergencies: materials of the X international scientific and practical conference/ Siberian PSA of the Ministry of Emergency Situations of Russia.2020. P.74-79.
6. Taylor, S.W.; Alexander, M.E. Science, technology, and human factors in fire danger rating. // The Canadian experience. Int. J. Wildland Fire 2006, 15, 121–135.
7. Wentzel E.S. Probability theory: textbook/ E.S. Wentzel, - 11-th ed., ster. – М.: KNORUS, 2010. – 664 p.
8. Y. Xie, Minggang Peng Forest fire forecasting using ensemble learning approaches.// Neural Computing and Applications, Computer Science.2018. [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.semanticscholar.org/paper>.
9. A. Nebot Forest Fire Forecasting Using Fuzzy Logic Models.// Forests 12(8) July 2021. [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.researchgate.net/publication>.
10. Alekseev V.E., Zakharova D.V. Graph theory: textbook of the UNN named after Lobachevski. 2017. 119 p.

#### ***Информация об авторах***

А.В. Широухов – кандидат технических наук, доцент  
К.С. Иванов – кандидат технических наук, доцент

#### ***Information about the author***

A.V. Shiroukhov - Ph.D. of Engineering Sciences, Docent  
K.S. Ivanov - Ph.D. of Engineering Sciences, Docent

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 17.03.2022; одобрена после рецензирования 18.05.2022; принята к публикации 30.06.2022.

The article was submitted 17.03.2022, approved after reviewing 18.05.2022, accepted for publication 30.06.2022.