

П. С. ТИТАЕВ, аспирант Тверского государственного технического университета
(Россия, 170026, г. Тверь, наб. Афанасия Никитина, 22; e-mail: pati69@bk.ru)

УДК 519.711.3:630*4

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ВЕРОЯТНОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ С УЧЕТОМ ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТИ И АНТРОПОГЕННОГО ФАКТОРА

Рассмотрены основные методы математических исследований вероятности возникновения лесных пожаров. Выяснено, что научные исследования, связанные с математическим моделированием вероятности возникновения пожаров с учетом грозовой активности и антропогенного фактора, имеют преимущественно прикладное значение и направлены на обеспечение пожарной безопасности лесов и ликвидацию ландшафтных пожаров. Рассмотрено построение математической модели и методика решения задачи оптимизации системы обеспечения пожарной безопасности с использованием имитационного моделирования.

Ключевые слова: математическая модель; метод исследования; лесные пожары; система обеспечения пожарной безопасности; оптимизация; имитационное моделирование.

Нужно отметить, что с каждым годом количество лесных пожаров значительно увеличивается, а вместе с этим увеличиваются и площади выгоревших лесов.

Применяемые в настоящее время на практике методики оценки вероятности возникновения пожаров, разработанные с использованием больших массивов статистических данных (В. Г. Нестеров, Л. Ф. Ноженкова, D. X. Viegas, E. L. Garsia Diez, C. E. van Wagner, M. E. Alexander, I. E. Deeming, B. J. Stocks и др.), представляют собой формулы, алгоритмы, критерии, полученные в результате усреднения характеристик условий возгораний на больших выборках как по площадям, так и по времени [1–6]. При создании таких методик, по существу, не анализировались и не моделировались физические и химические процессы (в первую очередь наиболее значимые процессы тепло- и массопереноса) в слое лесного горючего материала, возникающие при воздействии локальных источников энергии.

Существующие теории распространения лесных пожаров (авторы моделей и алгоритмов решения задач — А. Н. Субботин, А. М. Гришин, В. А. Перминов, Л. Ю. Катаева, Г. А. Доррер, В. Г. Зверев, О. В. Шипулина и др.) не ориентированы на прогноз лесной пожарной опасности. Следствием решения задач в рамках этих теорий являются характеристики пожара (температурные поля, скорости движения продуктов сгорания, давления и плотности газов, скорости движения фронта горения и т. п.) [7–14].

В связи с этим представляется перспективным разработка нового подхода к прогнозированию лес-

ной пожарной опасности, основанного в отличие от известных (опирающихся на статистическую информацию) на имитационном моделировании.

В России в настоящее время прогнозирование лесных пожаров недостаточно эффективно, что является причиной их возникновения. Поэтому статья посвящена разработке имитационной модели вероятности возникновения лесных пожаров с учетом грозовой активности и антропогенной нагрузки.

Приведем определение имитационной модели. Имитационная модель — это логико-математическое определение предметной области, которое может быть использовано для экспериментирования на компьютере в целях исследования поведения объектов предметной области в зависимости от некоторых входных факторов [15].

Выделяют два вида имитационных моделей:

- метод статистических испытаний Монте-Карло;
- статистическое моделирование как метод имитационного моделирования [16].

Опишем суть метода статистических испытаний Монте-Карло. Допустим, известны вероятности возникновения некоторых входных факторов модели. Перебирая наугад комбинацию входных факторов модели, можно многократно воссоздавать поведение модели, сохраняя при этом одинаковые характеристики факторов [17]. В результате многократного прогона модели можно собрать статистические данные, которые бы могли быть собраны в реальном времени.

Таблица 1. Статистические данные по площади лесных насаждений в Тверской обл. в период 2008–2013 гг.

Показатель	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Общая площадь земель лесного фонда, тыс. га	2684,4	4875,6	4875,6	4875,6	4875,6	4875,6
Площадь земель, покрытых лесной растительностью, тыс. га	2258,3	4408,1	4421,4	4428,0	4434,7	4440,3
Общий средний прирост, млн. м ³	7,32	14,71	14,82	14,83	14,82	14,81

Таблица 2. Статистические данные по характеру лесных пожаров в Тверской обл. в период 2007–2011 гг.

№ п/п	Показатель	2007	2008	2009	2010	2011
1	Число лесных пожаров	123	156	108	360	91
2	Из них по причинам:					
	– сельскохозяйственного пала	2	19	41	14	1
	– по вине человека	119	137	62	319	82
3	Лесная площадь, пройденная пожарами, га	446	566	394	2333	540

Метод Монте-Карло можно применять лишь после того, как будут установлены вероятности возникновения входных факторов модели. Однако на сегодняшний день на территории Тверской обл. вероятности возникновения входных факторов модели (в нашем случае антропогенное воздействие на лесную среду и грозовая активность) еще не изучены.

В таком случае обратимся к статистическому моделированию. Статистическое и эконометрическое моделирование включает методы исследования предметной области на их статистических моделях [18]. Сюда входит построение и изучение моделей объектов с целью получения объяснений этих явлений и в результате — предсказания явлений или показателей, интересующих исследователя.

Оценка параметров таких моделей производится с помощью статистических методов, в частности методов максимального правдоподобия, наименьших квадратов, моментов [19].

Напрашивается следующий вывод: оценив с помощью статистического моделирования вероятность возникновения лесных пожаров в зависимости от рассматриваемых входных факторов, необходимо применить метод статистических испытаний для уточнения картины возникновения лесных пожаров. Изменяя вероятности входных факторов (управляя входными воздействиями, например снижая антропогенный фактор), можно прогнозировать результат (например, доказать, что антропогенный фактор несет большую вероятность возникновения лесного пожара, чем природный) и, подтверждая исследования статистическими данными, начать проработку мер по снижению риска возникновения лесного пожара.

Изучим входные статистические данные предметной области. Для этого используем данные офици-

Таблица 3. Число дней с грозовой активностью в Тверской обл. в период 2007–2011 гг.

Год	2007	2008	2009	2010	2011
Число дней с грозой	19	21	23	32	22

ального сайта правительства Тверской обл. В табл. 1 приведены статистические данные по площади лесных насаждений в Тверской обл. [20].

В табл. 2 представлены статистические данные по характеру лесных пожаров, взятые с официального сайта правительства Тверской обл. [20].

Обратимся к последнему фактору предметной области — грозовой активности. На сайте “Климат Тверской области” характер погоды летом описан так: “Преобладающей воздушной массой над Тверской областью является континентальный воздух умеренных широт (кВУШ). Она либо формируется непосредственно над территорией Верхневолжья, либо приходит из соседних областей. В среднем за год в Твери эта воздушная масса наблюдается в 56,9 % случаев. Континентальный воздух умеренных широт определяет летом теплую погоду с температурами +15...+20 °С (днем до +20...+25 °С), с переменной кучевой облачностью, с небольшими скоростями ветра, которые к ночи снижаются до штиля. Нередко при данном типе погоды в середине дня случаются ливневые осадки и грозы...”

В табл. 3 приведены данные о грозовой активности [21].

Поставим своей задачей проанализировать динамику изменения входных факторов модели, а также динамику изменения результирующего фактора в зависимости и степень влияния каждого фактора на характер развития лесных пожаров.

Рассмотрим такой фактор, как площадь лесных насаждений. Построим график изменения этого фактора (рис. 1) [21]. Из рис. 1 видим, что в 2008 г. наблюдался “выброс” — статистическое данное, сильно отличающееся от среднего по ряду, поэтому перестроим график для периода с 2008 по 2011 гг. (рис. 2). Кроме того, добавим на график линейный тренд с помощью средств Microsoft Excel (линию регрессии) с коэффициентом детерминации модели (доля результативного признака, объясняемого влиянием входных переменных).

Метод построения линейного тренда в этой программе основан на методах наименьших квадратов и вычисления коэффициента корреляции между двумя рядами признаков — x и y [22]. Приведем алгоритм расчета.

1. Найдем средние выборочные $x_{\text{в}}$ и $y_{\text{в}}$, которые находятся по формуле арифметической средней:

$$x_{\text{в}} = \sum_{i=1}^n x_i / n; \quad y_{\text{в}} = \sum_{i=1}^n y_i / n. \quad (1)$$

2. Далее найдем среднеквадратические отклонения s_x и s_y по формулам:

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (x - x_{\text{в}})^2}; \quad s_y = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (y - y_{\text{в}})^2}. \quad (2)$$

3. Найдем корреляционный момент:

$$K_{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{\text{в}})(y_i - y_{\text{в}}). \quad (3)$$

4. Выборочный коэффициент регрессии $r_{\text{в}}$ отыскиваем по формуле

$$r_{\text{в}} = K_{xy} / s_x^2. \quad (4)$$

5. Найдем уравнение линейной регрессии y на x в виде $y = ax + b$ (где a, b — коэффициенты линейной регрессии):

$$y - y_{\text{в}} = r_{\text{в}}(x - x_{\text{в}}). \quad (5)$$

Коэффициент регрессии $r_{\text{в}}$ характеризует изменение оценок по данной совокупности на единицу. Если увеличить x на 1, то y увеличится на $r_{\text{в}}$.

6. Найдем выборочный коэффициент корреляции r_{xy} с помощью формулы

$$r_{xy} = K_{xy} / (s_x s_y). \quad (6)$$

Выборочный коэффициент корреляции показывает меру корреляционной связи между двумя рядами признаков. Если $r_{xy} > 0$, то связь прямая, если $r_{xy} < 0$ — обратная. Чем ближе $|r_{xy}|$ к 1, тем сильнее корреляционная зависимость.

7. Найдем коэффициент детерминации, который оценивает долю влияния входных факторов модели на ее результат:

$$R^2 = r_{xy}^2. \quad (7)$$

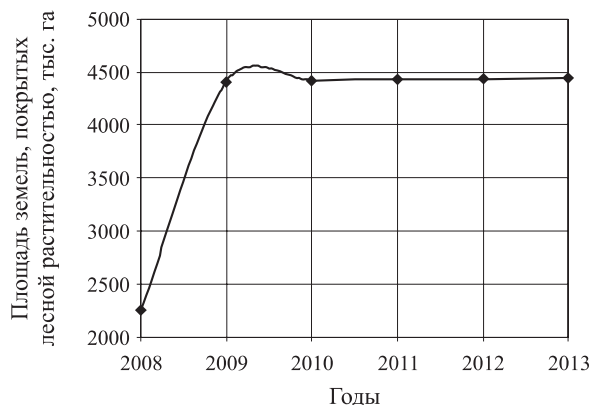


Рис. 1. Изменение общей площади лесного фонда в период 2008–2013 гг.

8. Проверим значимость выборочного коэффициента корреляции при показателе $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $k = n - 2$. Вычислим наблюдаемое значение критерия Стьюдента:

$$T_{\text{набл}} = \frac{r_{xy} \sqrt{n - 2}}{\sqrt{1 - r_{xy}^2}}. \quad (8)$$

По таблице критических точек распределения Стьюдента, уровню значимости $\alpha = 0,05$ и числу степеней свободы $k = n - 2$ находим критическую точку $t_{\text{кр}}(\alpha, n - 2)$.

Если $T_{\text{набл}} > |t_{\text{кр}}|$, то гипотезу о равенстве генерального коэффициента корреляции нулю отвергаем. Следовательно, x и y имеют тесную корреляционную зависимость.

Весь расчет выполняется с помощью программы Microsoft Excel, включая решение уравнения регрессии и вычисление коэффициента детерминации по построенному графику (рис. 2) [22].

График рис. 2 показывает, что существует небольшой устойчивый прирост общей площади лесного фонда по годам — на 7,77 тыс. га (7770 га) каждый год с вероятностью 0,9667.

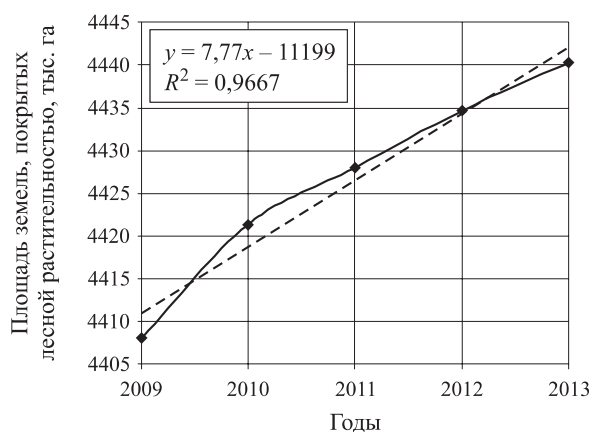


Рис. 2. Изменение общей площади лесного фонда Тверской обл. в период 2009–2013 гг.: ---- — линия тренда

Обратимся к поз. 3 табл. 2 (лесная площадь, пройденная пожарами) и возьмем среднее арифметическое за данный период: оно составляет 855,8 га в год. Зная эти данные, нетрудно вычислить процент от прироста зеленых насаждений, страдающих от лесных пожаров:

$$855,8 : 7770 \cdot 100 \% = 11,014 \%. \quad (9)$$

Анализ данных табл. 2 показывает, что 11 % прироста лесного фонда уничтожается в результате лесных пожаров.

Проанализируем изменение площади лесных пожаров в Тверской обл. по данным табл. 2 (поз. 3), исключая статистический выброс в 2010 г., и построим график зависимости (рис. 3) [22].

Нанесенная на график линия тренда показывает, что каждый год площадь лесных пожаров увеличивается на 12,4 га. Коэффициент детерминации данной статистической модели низок. Это означает, что временной фактор модели развития пожаров составляет всего 6 %. Иначе говоря, время не влияет на площадь развития лесных пожаров. Докажем это с помощью критерия Стьюдента.

Проверим значимость выборочного коэффициента корреляции при $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $k = n - 2$. Вычислим наблюдаемое значение критерия Стьюдента:

$$T_{\text{набл}} = \frac{r_{xy} \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r_{xy}^2}} = \frac{\sqrt{0,0694} \sqrt{4-2}}{\sqrt{1-0,0694}} = 0,3862.$$

По таблице критических точек распределения Стьюдента, уровню значимости $\alpha = 0,05$ и числу степеней свободы $k = n - 2$ найдем критическую точку $t_{\text{кр}}(\alpha; n - 2) = 2,631307$.

Так как $T_{\text{набл}} < t_{\text{кр}}$, принимаем гипотезу о равенстве генерального коэффициента корреляции нулю. Следовательно, ряды признаков не имеют корреляционной зависимости.

Отметим, что если проверить все предыдущие модели с помощью критерия Стьюдента на принятие гипотезы о равенстве генерального коэффициента корреляции нулю, то во всех этих случаях эта

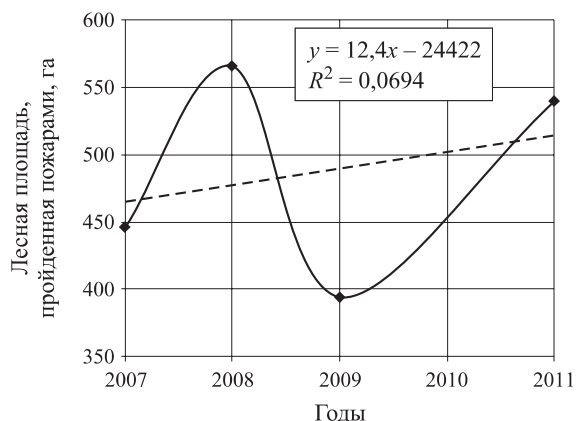


Рис. 3. Изменение лесной площади, пройденной пожарами, в Тверской обл. за период 2007–2011 гг.: ---- — линия тренда

гипотеза будет отвергнута. Это означает, что корреляционные связи предыдущих моделей значимы.

Исходя из статистического ряда *годы – лесная площадь, пройденная пожарами*, видим, что площадь лесных пожаров:

- во-первых, значительно не уменьшается;
- во-вторых, не зависит от времени.

Проанализируем отдельно зависимость числа случаев возникновения лесных пожаров от антропогенного фактора. Для этого доработаем табл. 3, взяв процент числа пожаров, возникающих из-за антропогенного фактора, от общего числа лесных пожаров (табл. 4) [23].

Возьмем среднее значение признака “процент пожаров, возникающих из-за антропогенного фактора”, — 95,5 %. Это означает, что в 95 % случаев пожар возникает по вине человека.

Построим регрессионную модель зависимости “годы – процент числа пожаров из-за антропогенного фактора от общего числа лесных пожаров” (рис. 4) [24].

Из рис. 4 видим, что процент случаев возникновения пожара по вине человеческого фактора с каждым годом снижается, но незначительно — всего на 2 % в год, средний же уровень ряда, как уже отмечалось, составляет 95,5 %. Эта статистическая мо-

Таблица 4. Вычисление процента числа пожаров из-за антропогенного фактора от общего числа лесных пожаров

№ п/п	Показатель	2007	2008	2009	2010	2011
1	Число лесных пожаров	123	156	108	360	91
2	Из них по причинам:					
	– сельскохозяйственного пала	2	19	41	14	1
	– по вине человека	119	137	62	319	82
3	Число пожаров из-за антропогенного фактора:					
	– общее	121	156	103	333	83
	– % от общего числа лесных пожаров	98,37	100,00	95,37	92,50	91,21

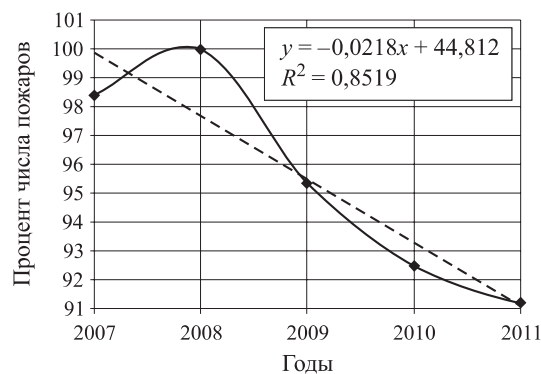


Рис. 4. Изменение процента числа пожаров из-за антропогенного фактора от общего числа лесных пожаров за период 2007–2011 гг.: — — — — линия тренда

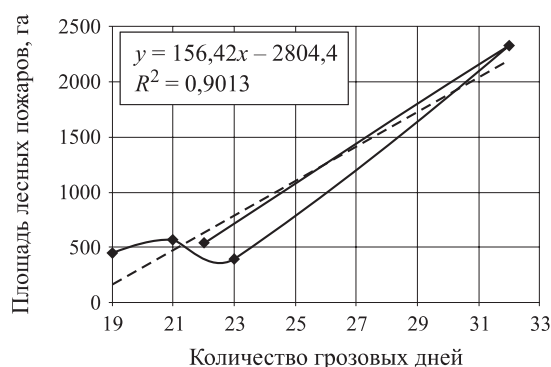


Рис. 5. Зависимость площади лесных пожаров от количества грозных дней: — — — — линия тренда

дель значима, так как коэффициент корреляции очень близок к 1:

$$r_{xy} = \sqrt{R^2} = \sqrt{0,8519} = 0,923.$$

Иначе говоря, верным оказывается утверждение, что только на 2 % (от общего числа лесных пожаров) в год снижается уровень влияния антропогенного фактора на возникновение лесных пожаров.

Проанализируем также зависимость площади лесных пожаров от количества грозных дней в году (рис. 5) [24].

Как видно из рис. 5, данная зависимость прямая и очень сильная. Каждый грозовой день “добавляет” к площади пожаров в среднем 157 га. Эта модель строилась в условиях, когда антропогенный фактор также был велик (т. е. при другом постоянном входном значении модели). Поэтому построим другую, многомерную регрессионную модель, где входными факторами будут являться “процент влияния антропогенного фактора”, “среднегодовое число дней с грозой”, а результирующим фактором — “лесная площадь, пройденная пожарами”, с целью установления совместного влияния этой пары признаков на риск возникновения пожара. Сведем исходные данные в табл. 5 [15].

Таблица 5. Исходные данные для многомерного анализа

Уровень влияния антропогенного фактора X, доли ед.	Среднегодовое число дней с грозой Y	Лесная площадь, пройденная пожарами Z, га
0,9837	19	446
1,0000	21	566
0,9537	23	394
0,9250	32	2333
0,9121	22	540

Таблица 6. Параметры модели “Регрессионная статистика”

Параметр	Значение параметра
Множественный R	0,9574
R-квадрат	0,9166
Нормированный R-квадрат	0,8333
Стандартная ошибка	338,3395
Число наблюдений	5

В результате анализа получаем следующие данные (табл. 6) (см. рис. 4) [16].

В табл. 6 множественный R — это коэффициент корреляции R, близкий к 1; связь сильная, прямая, так как величина R положительна. R-квадрат — коэффициент детерминации R². Нормированный R-квадрат — нормированное значение коэффициента детерминации, которое несильно отличается от R-квадрата. Нормированный R-квадрат R²_{норм} рассчитывается по формуле

$$R_{\text{норм}}^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{n - 1}{n - m - 1}, \quad (10)$$

где n — число наблюдений;

m — количество факторных признаков; m = 1.

В табл. 7 приведены результаты дисперсионного анализа [19].

Расчетное значение критерия Фишера F вычисляется по формуле

$$F = \frac{\text{Регрессия}}{\text{Остаток}} = \frac{1259040,74}{114473,66} = 11,00.$$

Коэффициент F значим, если принять уровень значимости более 0,05. Даже при очень высоком уровне значимости 0,05 построенная модель значима.

Таблица 7. Дисперсионный анализ модели

Показатель	df	SS	MS	F	Значимость F
Регрессия	2	2518081,48	1259040,74	11,00	0,008
Остаток	2	228947,32	114473,66		
Итого	4	2747028,80			

Примечание. SS — регрессия; MS — остаток; F — критерий Фишера.

Таблица 8. Коэффициенты линейной многомерной модели

Фактор	Коэффициент уравнения регрессии
У-пересечение	-6337,6896
Уровень антропогенного фактора X	3349,8816
Среднегодовое число дней с грозой Y	170,7122

В модели используются коэффициенты уравнения регрессии, которые представлены в табл. 8 [21]. В результате получаем следующую формулу регрессионной зависимости:

$$Z = 3349,8816 X + 170,7122 Y - 6337,6896. \quad (11)$$

Если увеличить уровень влияния антропогенного фактора на 0,01, то площадь лесных пожаров возрастет на $3349,8816/100 \approx 33,5$ га. Если число дней с грозой увеличится на 1, то площадь лесных пожаров вырастет на 170,7122 га.

Используя построенную модель, “разыграем” случайную величину Z (площадь лесных пожаров в га). Пусть количество испытаний будет равно 10. Вначале зададим значения входных признаков X и Y в интервалах их фактических данных (от минимального значения к максимальному). Величина X изменится на основании фактических данных от 91,21 до 100 %, а Y — от 19 до 32 дней.

Составим расчетную таблицу со случайными величинами X , Y , которые случайно изменяются в фактических интервалах значений, причем Y изменится значимо (от 19 до 32). Максимальное значение $Y = 32$ было статистическим “выбросом” летом 2010 г., когда стояла аномально жаркая погода, что отразилось на эксперименте (табл. 9) [22]. Средняя полученная площадь лесных пожаров (1105,68 га) больше выведенной средней (855,8 га).

Снизим значения Y до среднестатистических (от 19 до 25) (эксперимент 2), а процент влияния антропогенного фактора оставим прежним (табл. 10) [17].

Когда количество грозовых дней в среднем уменьшается от 25 до 22, процент снижения числа лесных пожаров достигает 41,43 % ($100\% - (647,53/1105,68) \times 100\%$). Таким образом, погодный фактор оказывает значительное влияние на число лесных пожаров. Это подтверждает также построенная одномерная модель “площадь пожара – количество грозовых дней”.

Проведем третий эксперимент. Снова оставим высоким количество грозовых дней (от 19 до 32), а уровень влияния антропогенного фактора будем изменять от 0,70 до 0,75. В результате получим данные, представленные в табл. 11 [23].

Как видно из табл. 11, произошло уменьшение площади лесных пожаров на 7,5 % ($100\% - (598,9180/647,53) \cdot 100\%$).

Таблица 9. “Разыгранные” значения Z (эксперимент 1)

Номер испытания	X (доли ед.)	Y (дней)	Z (га)
1	0,9290	20	188,68
2	0,9366	20	214,20
3	0,9509	27	1457,04
4	0,9655	30	2017,88
5	0,9997	20	425,35
6	0,9188	29	1690,76
7	0,9446	26	1265,17
8	0,9901	23	905,46
9	0,9736	30	2045,23
10	0,9217	24	847,03
Среднее значение	0,9531	24,9	1105,68

Таблица 10. “Разыгранные” значения Z (эксперимент 2)

Номер испытания	X (доли ед.)	Y (дней)	Z (га)
1	0,9573	23	795,52
2	0,9948	19	238,36
3	0,9935	19	233,82
4	0,9755	23	856,66
5	0,9136	24	819,70
6	0,9538	20	271,59
7	0,9598	22	633,15
8	0,9283	24	869,06
9	0,9173	24	832,27
10	0,9960	23	925,20
Среднее значение	0,9590	22,1	647,53

Таблица 11. Данные, полученные в эксперименте 3

Номер испытания	X (доли ед.)	Y (дней)	Z (га)
1	0,7038	24	117,1406
2	0,7486	24	267,2178
3	0,7918	23	241,1006
4	0,7075	28	812,3472
5	0,7329	28	897,2821
6	0,7404	19	0,0000
7	0,7680	27	844,1173
8	0,7596	27	815,9899
9	0,7973	26	771,5269
10	0,7280	30	1222,4580
Среднее значение	0,7478	25,6	598,9180

Снижение влияния антропогенного фактора от 0,6 до 0,7 приводит к дальнейшему сокращению площади лесных пожаров (хотя погодные факторы остаются неблагоприятными) (табл. 12) [24].

Таблица 12. Данные, полученные в эксперименте 4

Номер испытания	X (доли ед.)	Y (дней)	Z (га)
1	0,6021	29	629,9652
2	0,6231	25	17,4155
3	0,6503	30	961,9462
4	0,6495	21	0,0000
5	0,6349	26	227,7194
6	0,6229	28	528,9926
7	0,6094	19	0,0000
8	0,6962	24	91,6805
9	0,6611	31	1168,9514
10	0,6511	26	281,9462
Среднее значение	0,6401	25,9	390,8617

Таблица 13. Данные, полученные в эксперименте 5

Номер испытания	X (доли ед.)	Y (дней)	Z (га)
1	0,5929	27	257,7400
2	0,5325	25	0,0000
3	0,5315	26	0,0000
4	0,5237	28	196,4297
5	0,5197	20	0,0000
6	0,5768	23	0,0000
7	0,5102	21	0,0000
8	0,5941	30	773,9138
9	0,5865	25	0,0000
10	0,5007	24	0,0000
Среднее значение	0,5469	24,9	122,8084

Дальнейшее снижение влияния антропогенного фактора (от 0,5 до 0,6) приводит к значительному сокращению площади лесных пожаров (табл. 13) [24].

Таким образом, лесные пожары относительно легко возникают из-за грозовой активности, тем не менее влияние человеческого фактора на возникнове-

ние лесных пожаров неизмеримо выше и составляет порядка 95 %.

Исследовав числовые данные и проанализировав результаты вычислительного эксперимента, можно сделать следующие выводы:

- прирост площади зеленых насаждений в Тверской обл. составляет 7,7 тыс. га в год, и примерно 11 % этого прироста уничтожается в ходе пожаров;
- вероятность возникновения лесного пожара повышается с увеличением количества грозовых дней в году;
- вероятность возникновения лесного пожара повышается в связи с неблагоприятной деятельностью человека;
- количество зафиксированных лесных пожаров, происшедших по вине человека, составляет 95 % от общего количества пожаров;
- площадь лесных пожаров не уменьшается в последние несколько лет.

Если увеличить уровень влияния антропогенного фактора на 0,01, то площадь лесных пожаров возрастет на 33,49 га (3349,8816/100). Если число дней с грозовой активностью в году увеличится на 1, то площадь лесных пожаров вырастет на 170,7122 га в год, и это утверждение верно на 95,74 % (значение множественного R многомерной регрессионной модели).

Сравнение данных экспериментов 1 и 5 говорит о том, что если грозовая активность останется на прежнем (высоком) уровне и при этом уровень влияния антропогенного фактора снизится с 0,95 до 0,55, то площадь лесных пожаров сократится чуть ли не в 10 раз.

В связи с этим приходим к заключению, что исследования, целью которых является оптимизация математической модели и комплекса программ мониторинга и прогнозирования возникновения природных пожаров на основе имитационного моделирования, являются актуальными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Stocks B. J., Alexander M. E., Mc Alpine R. S. et al.* Canadian Forest Fire Danger Rating System. — Canadian Forestry Service, 1987. — 500 p.
2. *Курбатский Н. П., Костырина Т. В.* Национальная система расчета пожарной опасности США // Обнаружение и анализ лесных пожаров : сб. статей. — Красноярск : ИЛиД СО АН СССР, 1977. — С. 38–90.
3. *Deeming J. E., Lancaster J. W., Fosberg M. A., Furman R. W., Schroeder M. J.* The National Fire-Danger Rating System // USDA Forest Service — Research Paper RM-84, February 1972. — 165 p.
4. *García Diez E. L., Rivas Soriano L., de Pablo F., García Diez A.* Prediction of the daily number of forest fires // International Journal of Wildland Fire. — 1999. — Vol. 9, No. 3. — P. 207–211. doi: 10.1071/WF00003.
5. *Viegas D. X., Bovio G., Ferreira A., Nosenzo A., Sol B.* Comparative study of various methods of fire danger evaluation in Southern Europe // International Journal of Wildland Fire. — 1999. — Vol. 9, No. 4. — P. 235–246. doi: 10.1071/WF00015.

6. *Нестеров В. Г.* Горимость леса и методы ее определения. — М.–Л. : Гослесбумиздат, 1949. — 76 с.
7. *Гришин А. М., Барановский Н. В.* Сравнительный анализ простых моделей сушки слоя ЛГМ, включая данные экспериментов и натуральных наблюдений // Инженерно-физический журнал. — 2003. — Т. 76, № 5. — С. 166–169.
8. *Гришин А. М., Фильков А. И.* Прогноз возникновения и распространения лесных пожаров. — Кемерово : Практика, 2005. — 202 с.
9. *Гришин А. М., Катаева Л. Ю., Лобода Е. Л.* Математическое моделирование сушки слоя лесных горючих материалов // Вычислительные технологии. — 2001. — Т. 6. — Спец. вып. (Труды Международной конференции RDRAMM-2001), ч. 2. — С. 140–144.
10. *Субботин А. Н.* Математическая модель распространения низового лесного пожара по подстилке или слою опада хвой // Пожарная безопасность. — 2008. — № 1. — С. 109–116.
11. *Перминов В. А.* Математическое моделирование распространения плоского фронта лесного пожара // Вычислительные технологии. — 2006. — Т. 11, № S3. — С. 109–116.
12. *Гришин А. М., Перминов В. А.* Переход низового лесного пожара в верховой // Физика горения и взрыва. — 1990. — Т. 26, № 6. — С. 27–35.
13. *Кулеш Р. Н., Субботин А. Н.* Зажигание торфа внешним локальным источником тепла // Пожаровзрывобезопасность. — 2009. — Т. 18, № 4. — С. 13–18.
14. *Preisler H. K., Brillinger D. R., Burgan R. E., Benoit J. W.* Probability based models for estimation of wildfire risk // International Journal of Wildland Fire. — 2004. — Vol. 13, No. 2. — P. 133–142. doi: 10.1071/WF02061.
15. *Шикин Е. В., Чхартишвили А. Г.* Математические методы и модели в управлении : учеб. пособие. — М. : Дело, 2000. — 440 с.
16. *Джеффферс Дж.* Введение в системный анализ: применение в экологии / Пер. с англ. — М. : Мир, 1981. — 256 с.
17. *Гмурман В. Е.* Теория вероятностей и математическая статистика. — М. : Высшая школа, 2008.
18. *Гришин А. М., Зима В. П., Самойлов В. И.* Экспериментальная проверка эффективности действия дезинтегратора ДНЛП на фронт низового лесного пожара // Материалы международной конференции. — Томск : Изд-во ТГУ, 1999. — С. 48–53.
19. *Горстко А. Б., Домбровский Ю. А., Сурков Ф. А.* Модели управления эколого-экономическими системами. — М. : Наука, 1984. — 120 с.
20. *Гришин А. М.* Моделирование и прогноз катастроф : учеб. пособие. — Кемерово : Изд-во “Практика”, 2005. — Ч. 2. — 562 с.
21. *Заславский Б. Г., Полуэктов Р. А.* Управление экологическими системами. — М. : Наука, 1988. — 296 с.
22. *Ризниченко Г. Ю., Рубин А. Б.* Математические модели биологических продукционных процессов. — М. : Изд-во МГУ, 1993. — 302 с.
23. *Франс Дж., Торнли Дж. Х. М.* Математические модели в сельском хозяйстве / Пер. с англ. — М. : Агропромиздат, 1987. — 400 с.
24. Официальный сайт Правительства Тверской области. URL : http://www.region.tver.ru/region/region_forest.html (дата обращения: 25.11.2014).

Материал поступил в редакцию 3 декабря 2014 г.

English

SIMULATION MODEL OF THE PROBABILITY OF OCCURRENCE OF FOREST FIRES TAKING INTO ACCOUNT THUNDERSTORM ACTIVITY AND ANTHROPOGENIC LOAD

TITAEV P. S., Postgraduate Student of Tver State Technical University
(Afanasiya Nikitina Embankment, 22, Tver, 170026, Russian Federation;
e-mail address: pati69@bk.ru)

ABSTRACT

Every year the number of forest fires considerably increases and along with this also increase the burned-out areas of forests. The main tasks of fire protection of forests are prevention of forest fires, optimum suppression and elimination of their consequences. Important aspects from the point of view of fire prevention are technologies and methods of prognostication.

Basic methods of mathematical research of the probability of occurrence of forest fires are considered in this article. It is found out that the scientific researches related to the mathematical modeling of the probability of occurrence of fires taking into account thunderstorm activity and anthropogenic load have mainly applied value and are aimed at providing of fire safety of forests and elimination of the landscape fires. Creation of mathematical model and methods of solving of a task of optimization of fire safety system using simulation modeling is considered.

After investigation of the numerical data and after analysis of results of computing experiment it is possible to say that if thunderstorm activity will remain at the same (high) level and the level of influence of the anthropogenous factor will be reduced from 0.95 to 0.55, the area of forest fires will be reduced nearly by 10 times. In this regard it is possible to conclude that researches which purpose is optimization of mathematical model and software package for monitoring and prognosis the occurrence of wildfires on the basis of simulation modeling are relevant.

Keywords: mathematical model; research method; forest fires; fire safety system; optimization; simulation.

REFERENCES

1. Stocks B. J., Alexander M. E., Mc Alpine R. S. et al. *Canadian Forest Fire Danger Rating System*. Canadian Forestry Service, 1987. 500 p.
2. Kurbatskiy N. P., Kostyrina T. V. Natsionalnaya sistema rascheta pozharoy opasnosti SShA [National fire danger rating system of the USA]. *Obnaruzheniye i analiz lesnykh pozharov : sb. statey* [Detection and analysis of forest fires. Collected papers]. Krasnoyarsk, Institute of Forest and Wood of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 1977, pp. 38–90.
3. Deeming J. E., Lancaster J. W., Fosberg M. A., Furman R. W., Schroeder M. J. The National Fire-Danger Rating System. *USDA Forest Service — Research Paper RM-84*, February 1972. 165 p.
4. García Diez E. L., Rivas Soriano L., de Pablo F., García Diez A. Prediction of the daily number of forest fires. *International Journal of Wildland Fire*, 1999, vol. 9, no. 3, pp. 207–211. doi: 10.1071/WF00003.
5. Viegas D. X., Bovio G., Ferreira A., Nosenzo A., Sol B. Comparative study of various methods of fire danger evaluation in Southern Europe. *International Journal of Wildland Fire*, 1999, vol. 9, no. 4, pp. 235–246. doi: 10.1071/WF00015.
6. Nesterov V. G. Gorimost lesa i metody yeye opredeleniya [Forest fire statistics and methods of its definition]. Moscow–Leningrad, Goslesbumizdat, 1949. 76 p.
7. Grishin A. M., Baranovskiy N. V. Sravnitelnyy analiz prostykh modeley sushki sloya LGM, vklyuchaya dannyye eksperimentov i naturnykh nablyudeniy [Comparative analysis of simple models of drying of the layer of forest combustibles, including the data of experiments and natural observations]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2003, vol. 76, no. 5, pp. 166–169.
8. Grishin A. M., Filkov A. I. *Prognoz vozniknoveniya i rasprostraneniya lesnykh pozharov* [Prognosis of the occurrence and spread of forest fires]. Kemerovo, Praktika Publ., 2005. 202 p.
9. Grishin A. M., Kataeva L. Yu., Loboda Ye. L. Matematicheskoye modelirovaniye sushki sloya lesnykh goryuchikh materialov [Mathematical modeling of drying of the layer of combustible forest materials]. *Vychislitelnyye tekhnologii — Computational Technologies*, 2001, vol. 6, special issue (Proceedings of International Conference RDAMM-2001), part 2, pp. 140–144.
10. Subbotin A. N. Matematicheskaya model rasprostraneniya nizovogo lesnogo pozhara po podstilke ili sloyu opada khvoi [Mathematical model of spread of the ground forest fire on a ground litter or a layer of needles litter]. *Pozharnaya bezopasnost — Fire Safety*, 2008, no. 1, pp. 109–116.
11. Perminov V. A. Matematicheskoye modelirovaniye rasprostraneniya ploskogo fronta lesnogo pozhara [Mathematical modeling of spread of a flat front of forest fire]. *Vychislitelnyye tekhnologii — Computational Technologies*, 2006, vol. 11, no. S3, pp. 109–116.
12. Grishin A. M., Perminov V. A. Perekhod nizovogo lesnogo pozhara v verkhovoy [Transition of the forest ground fire to crown fire]. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1990, vol. 26, no. 6, pp. 27–35.
13. Kulesh R. N., Subbotin A. N. Zazhiganiye torfa vneshnim lokalnym istochnikom tepla [Ignition of peat by external local source of heat]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2009, vol. 18, no. 4, pp. 13–18.
14. Preisler H. K., Brillinger D. R., Burgan R. E., Benoit J. W. Probability based models for estimation of wild-fire risk. *International Journal of Wildland Fire*, 2004, vol. 13, no. 2, pp. 133–142. doi: 10.1071/WF02061.

15. Shikin Ye. V., Chkhartishvili A. G. *Matematicheskiye metody i modeli v upravlenii: ucheb. posobiye* [Mathematical methods and models in management: tutorial]. Moscow, Delo Publ., 2000. 440 p.
16. Jeffers J. *Vvedeniye v sistemnyy analiz: primeneniye v ekologii* [Introduction to the system analysis: application in ecology]. Moscow, Mir Publ., 1981. 256 p.
17. Gmurman V. Ye. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* [Probability theory and mathematical statistics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2008.
18. Grishin A. M., Zima V. P., Samoylov V. I. *Ekspperimentalnaya proverka effektivnosti deystviya dezintegratora DNLP na front nizovogo lesnogo pozhara* [Experimental checking of efficiency of action of a disintegrator of ground forest fires (DGFF) on the front of ground forest fire]. Tomsk, Tomsk State University Publ., 1999, pp. 48–53.
19. Gorstko A. B., Dombrovskiy Yu. A., Surkov F. A. *Modeli upravleniya ekologo-ekonomicheskimi sistemami* [Models of management of ecological-economic systems]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 120 p.
20. Grishin A. M. *Modelirovaniye i prognoz katastrof: ucheb. posobiye* [Modeling and prognosis of accidents: tutorial]. Kemerovo, Praktika Publ., 2005, part 2. 562 p.
21. Zaslavskiy B. G., Poluektov R. A. *Upravleniye ekologicheskimi sistemami* [Management of ecological systems]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 296 p.
22. Riznichenko G. Yu., Rubin A. B. *Matematicheskiye modeli biologicheskikh produktsionnykh protsessov* [Mathematical models of biological production processes]. Moscow, Lomonosov Moscow State University Publ., 1993. 302 p.
23. Frans J., Thornley J. H. M. *Mathematical models in agriculture*. London, Butterworths, 1984 (Russ. ed.: Frans J., Thornley J. H. M. *Matematicheskiye modeli v selskom khozyaystve*. Moscow, Agroprom-izdat, 1987. 400 p.).
24. Official site of the Government of Tver region. Available at: http://www.region.tver.ru/region/region_forest.html (Accessed 25 November 2014).



Издательство «ПОЖНАУКА»

Представляет книгу

А. Я. Корольченко, Д. О. Загорский
КАТЕГОРИРОВАНИЕ ПОМЕЩЕНИЙ И ЗДАНИЙ ПО ВЗРЫВОПОЖАРНОЙ
И ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ. — М.: Пожнаука, 2010. — 118 с.



В учебном пособии изложены принципы категорирования помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности, содержащиеся в современных нормативных документах. На примерах конкретных помещений рассмотрено использование требований нормативных документов к установлению категорий. Показана возможность изменения категорий помещений путем изменения технологии или внедрения инженерных мероприятий по снижению уровня взрывопожароопасности и повышению надежности технологического оборудования и процессов.

Пособие рассчитано на студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальностям «Пожарная безопасность», «Безопасность технологических процессов и производств», «Безопасность жизнедеятельности в техносфере», студентов строительных вузов и факультетов, обучающихся по специальности «Промышленное и гражданское строительство», сотрудников научно-исследовательских, проектных организаций и нормативно-технических служб, ответственных за обеспечение пожарной безопасности.

121352, г. Москва, а/я 43; тел./факс: (495) 228-09-03; e-mail: mail@firepress.ru