

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЮ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ ПРИ ОГРАНИЧЕННОМ ОБЪЕМЕ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

А. М. ЗАЯЦ, А. А. ЛОГАЧЕВ

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С. М. Кирова,
194021, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: zamfta@yandex.ru

Рассматриваются основные проблемы выбора мер по предупреждению лесных пожаров. Разработаны и исследованы математические модели для получения количественных оценок вероятностей возникновения пожара и возможного ущерба при неполной исходной информации. В предложенных моделях лесной пожар рассматривается как случайное событие, и для поддержки принятия решений при определении мер по его предупреждению использован критерий Уолли или критерий максимальности, а для оценки уровня лесной пожарной опасности применены обобщенная модель Дирихле и байесовский подход. Модели программно реализуемы и могут быть использованы в рамках комплексных систем поддержки принятия решений.

Ключевые слова: теория принятия решений, прогнозирование, обобщенная модель Дирихле, критерий Уолли, байесовский подход

Введение. Одним из важных этапов борьбы с лесными пожарами является предупреждение их возникновения. Эффективность мер по предупреждению пожаров зависит от климатических и географических характеристик лесных территорий, что обуславливает необходимость выбора противопожарных мер [1].

В настоящей статье представлены результаты разработки и исследования математических моделей, используемых для получения количественных оценок таких важных факторов, как вероятность возникновения лесного пожара и вероятность возможного ущерба, которые учитываются при принятии решения. При этом отсутствие либо ограниченный объем исходных статистических, таксационных или инвентаризационных данных усложняет процесс построения моделей и их реализацию в вычислительных системах поддержки принятия решений [2—7].

Постановка задачи. Определим процедуру выбора эффективных мер по предупреждению возникновения лесных пожаров из множества $A = \{a_1, \dots, a_n\}$ возможных как задачу принятия решений [8]. Известно, что в зависимости от совокупности метеорологических и антропогенных факторов уровень пожарной опасности может варьироваться от низкого до высокого [9]. Возможные уровни пожароопасности определим в соответствии с множеством $\theta = \{\omega_1, \dots, \omega_m\}$ состояний природы.

Каждую меру из множества A будем оценивать при различных состояниях θ природы. Совокупность оценок определим как множество $E = \{e_{1,1}, \dots, e_{n,m}\}$, состоящее из величин, обратных затратам, направленным на реализацию выбранной меры. Эти затраты связаны с возможным ущербом от пожара, его тушением и устранением последствий.

Для каждого элемента $\omega_j \in \theta$ зададим вероятность $p(\omega_j)$ j -го состояния природы, образующую распределение $p = (p_1, \dots, p_m)$, для которого $\sum_{j=1}^m p(\omega_j) = 1$. Введем для каждой пары элементов a_i и ω_j показатель эффективности $u_{ij} = \sum_{j=1}^m e_i p(\omega_j)$, определяющий затраты на реализацию i -й меры при j -м состоянии природы и значения которого можно представить в виде табл. 1.

Таблица 1

Мера	Показатель u_{ij} при состоянии природы ω_j		
	ω_1	...	ω_m
a_1	$u_{1,1}$...	$u_{1,m}$
...
a_n	$u_{n,1}$...	$u_{n,m}$

При такой постановке задача принятия решений сводится к выбору меры a_k из множества A , для которой $\sum u_{k,j} \xrightarrow{j} \max$.

Как показал анализ [10, 11], вероятности состояний природы далеко не всегда известны вследствие отсутствия достаточного количества исходной статистической информации, поэтому данные вероятности, по сути, — случайные величины с собственной функцией распределения $p = (p_1, \dots, p_m)$. Тогда ожидаемый показатель эффективности рассчитывается как

$$u_{ij} = \sum_{j=1}^m e_i M_{p_j}, \text{ где } M_{p_j} \text{ — математическое ожидание случайной величины } p_j. \text{ Для оценки}$$

математического ожидания случайной величины существует большое количество методов [10]. В рассматриваемой задаче (в условиях отсутствия или ограниченного объема статистической информации) использованы обобщенная модель Дирихле и байесовский подход.

Математические модели оценивания уровня пожарной опасности. Согласно обобщенной модели Дирихле, если событие, соответствующее состоянию с номером j , наблюдалось n_j раз, а полное число всех событий равно $N = \sum n_{1..m}$, то минимум и максимум оценки математического ожидания вероятности вычисляются следующим образом:

$$\underline{M}_{p_j} = \frac{n_j}{N + S}, \quad (1)$$

$$\overline{M}_{p_j} = \frac{n_j + S}{N + S}. \quad (2)$$

Здесь параметр S определяет, как быстро верхняя и нижняя границы вероятности событий сходятся при накоплении статистических данных. В работе [10] параметр S определен как число, необходимое для снижения разности между верхней и нижней границами вероятности в 2 раза. При $S = 0$ нижняя и верхняя границы сходятся, что при малом количестве исходных статистических данных может привести к поспешным и рискованным выводам. Поэтому следует использовать $S=1$, что позволит расширить интервал между минимальной и максимальной границами вероятности и получить более осторожную оценку.

Пусть по исследуемому лесному участку имеются наблюдения за 13 месяцев, из них 3 месяца сопровождались низким уровнем пожароопасности, 8 месяцев — средним и 2 месяца — высоким. Используя выражения (1) и (2), получим нижние и верхние значения M_{p_j} :

$\overline{M_{p_1}} \approx 0,21$; $\overline{M_{p_1}} \approx 0,29$, $\overline{M_{p_2}} \approx 0,57$; $\overline{M_{p_2}} \approx 0,64$, $\overline{M_{p_3}} \approx 0,14$; $\overline{M_{p_3}} \approx 0,21$. Эти интервальные оценки нижнего, среднего и высокого уровня пожароопасности применяются при расчете показателя u_{ij} для каждой меры из множества A и выбора из них оптимальной.

При байесовском подходе для определения уровня пожароопасности результатом будут не интервальные, а точечные оценки. Для расчета вероятности событий используются данные о наблюдениях (y) и априорные вероятности $P(Q)$. На основе имеющихся статистических данных рассчитываются априорные вероятности состояний природы $P(q_i) = \frac{n_i}{N}$, где n_i — число наблюдений состояния q_i , а N — общее число наблюдений множества состояний Q . При отсутствии или малом количестве статистической информации значения $P(q_i)$ могут быть получены с использованием экспертных оценок [12].

Наблюдаемыми параметрами могут быть, например, преобладающая порода древесины, расстояние до близлежащего населенного пункта, какие-либо антропогенные факторы или климатические характеристики [13]. Для каждой величины y_i на основе имеющейся статистики или экспертных оценок рассчитывается вероятность события $P(y_1, \dots, y_n | q_i)$ при q_i -м состоянии природы [14]. Согласно формуле Байеса апостериорная вероятность q_i -го события при наличии y_1, \dots, y_n наблюдений рассчитывается как

$$P(q_i | y_1, \dots, y_n) = \frac{P(y_1, \dots, y_n | q_i)P(q_i)}{\sum_{i=1}^n P(y_1, \dots, y_n | q_i)P(q_i)}. \quad (3)$$

Пусть по исследуемому лесному участку имеется ряд наблюдаемых состояний, определяющих пожароопасность: см. табл. 2, где K — количество случаев (частота повторений, в процентах), характеризующих уровни пожароопасности при реальных измерениях.

Таблица 2

Фаза наблюдений y_i	K , %, для		
	низкого уровня — q_1	среднего уровня — q_2	высокого уровня — q_3
1	45	49	67
2	39	49	60
3	14	41	73
4	77	58	47

Для приведенного примера (см. табл. 2) априорные вероятности состояний природы $P(q_1) = 25\%$, $P(q_2) = 60\%$ и $P(q_3) = 15\%$ были рассчитаны по оценкам экспертов. С использованием данных по четырем фазам наблюдений по формуле (3) вычислены апостериорные вероятности состояний природы: $P(q_1 | y_1, \dots, y_4) = 22,9\%$, $P(q_2 | y_1, \dots, y_4) = 58,5\%$, $P(q_3 | y_1, \dots, y_4) = 18,6\%$. Эти результаты согласуются с интервальными оценками, полученными с помощью обобщенной модели Дирихле, что подтверждает достоверность результатов математического моделирования при использовании различных подходов.

Пример. Для выбора оптимальных мер по предупреждению лесных пожаров будем использовать критерий Уолли или критерий максимальности, согласно которому мера a_k является оптимальной, если все векторы ожидаемых показателей эффективности $\{Y(u_k - u_j)\}$ будут не меньше нуля для всех j -х состояний природы:

$$Y = \frac{1}{N+S} \sum_{j=1}^m (u_{kj} - u_{ji}) n_j + \frac{S}{N+S} \max(u_{kj} - u_{kl}), \quad l = \overline{1, m}, l \neq j.$$

Если $Y < 0$, значит, имеющейся информации недостаточно для принятия решения, а если значений Y несколько, то на основе имеющейся информации обе меры могут быть выбраны как приемлемые [11].

Пусть, например, известны значения показателя эффективности, приведенные в табл. 3.

Таблица 3

Мера A	Показатель u_{ij} при уровне лесной пожароопасности		
	низком	среднем	высоком
a_1	0,30	0,59	3,16
a_2	0,37	0,15	1,48
a_3	2,1	0,25	0,20

На исследуемом лесном участке низкий уровень пожароопасности наблюдался в течение 23 суток, средний уровень — в течение 38 суток и высокий — 13 суток. Тогда согласно выражению (4) для мер A получим следующие значения Y : $Y_1 \sim \{0,44; 0,6\}$; $Y_2 \sim \{-0,47; -0,15\}$; $Y_3 \sim \{-0,1; 0,37\}$. Здесь $Y_1 \geq 0$, поэтому в соответствии с критерием Уолли выбранная первая мера a_1 может рассматриваться как оптимальная.

Заключение. Представленные математические модели позволяют выбрать оптимальную меру по предупреждению лесных пожаров из множества A с учетом их эффективности при различных состояниях природы и неполной исходной информации. Важной особенностью предлагаемых моделей является возможность их программной реализации в различных операционных средах [15].

Результаты исследования могут быть использованы сотрудниками лесничеств и арендаторами-лесопользователями для определения мер по предупреждению лесных пожаров, а также специалистами систем поддержки принятия решений по борьбе с лесными пожарами.

Статья подготовлена по результатам работы, выполненной при поддержке гранта Правительства Санкт-Петербурга для студентов, аспирантов и молодых ученых (документ серии ПСП № 13263).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астафьев С. А., Лысенко Д. Ю., Широков А. С. Моделирование процесса распространения лесного пожара с применением теории перколяции // Изв. вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55, № 6. С. 70—74.
2. Bogatyrev V. A. An interval signal method of dynamic interrupt handling with load balancing // Automatic Control and Computer Sciences. 2000. N 34(6). P. 51—57.
3. Bogatyrev V. A., Bogatyrev A. V. Functional reliability of a real-time redundant computational process in cluster architecture systems // Automatic Control and Computer Sciences. 2015. Vol. 49, N 1. P. 46—56. DOI: 10.3103/S0146411615010022.
4. Богатырев В. А., Богатырев А. В., Богатырев С. В. Оценка надежности выполнения кластерами запросов реального времени // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 4. С. 46—48.
5. Богатырев В. А. Оценка надежности и оптимальное резервирование кластерных компьютерных систем // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2006. № 10. С. 18—21.
6. Богатырев В. А., Богатырев А. В. Оптимизация резервированного распределения запросов в кластерных системах реального времени // Информационные технологии. 2015. Т. 21, № 7. С. 495—502.
7. Turlikov A. M., Foss S. G. On ergodic algorithms in random multiple access systems with “success-failure” feedback // Problems of Information Transmission. 2010. Vol. 46, N 2. P. 184—200.

8. Каргин В. А., Майданович О. В., Охтилев М. Ю. Автоматизированная система информационной поддержки принятия решений по контролю в реальном времени состояния ракетно-космической техники // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 11. С. 20—23.
9. Ходаков В. Е., Жарикова М. В. Лесные пожары: методы исследования: Монография. Херсон: Изд-во „Гринь Д. С.“, 2011. 470 с.
10. Уткин Л. В. Анализ рисков и принятие решений при неполной информации. СПб: Наука, 2007. 404 с.
11. Заяц А. М., Уткин Л. В., Лопатников М. В. Анализ риска при реализации нового метода упреждающей загрузки WEB-страниц // Изв. Санкт-Петербургской лесотехнической акад. 2005. № 174. С. 120—127.
12. Спесивцев А. В. Управление рисками чрезвычайных ситуаций на основе формализации экспертной информации. СПб: Изд-во Политехнического ун-та, 2004. 238 с.
13. Логачев А. А. Использование данных инвентаризации лесов для создания автоматизированной системы оценки лесной пожароопасности // Современные проблемы и перспективы рационального лесопользования в условиях рынка: Сб. материалов Междунар. науч.-техн. конф. Сыктывкар: Сыктывкарский лесной ин-т, 2014. С. 300—303.
14. Зикратов И. А., Одегов С. В. Оценка информационной безопасности в облачных вычислениях на основе байесовского подхода // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 4 (80). С. 121—126.
15. Свид. о рег. прогн. № 2015660211. Программа определения успешности проведенных противопожарных мероприятий в лесах / З. Н. Андреева, А. М. Заяц, А. А. Логачев. 24.09.2015 г.

Сведения об авторах

- Анатолий Моисеевич Заяц** — канд. техн. наук, профессор; СПбГЛТУ им. С. М. Кирова, кафедра информационных систем и технологий; заведующий кафедрой;
E-mail: zamfta@yandex.ru
- Алексей Андреевич Логачев** — СПбГЛТУ им. С. М. Кирова, кафедра информационных систем и технологий; ассистент; E-mail: LogachevAA@live.ru

Рекомендована кафедрой
информационных систем
и технологий

Поступила в редакцию
18.02.16 г.

Ссылка для цитирования: Заяц А. М., Логачев А. А. Математические модели для поддержки принятия решений по предупреждению лесных пожаров при ограниченном объеме исходных данных // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 5. С. 342—347.

MATHEMATICAL MODELS FOR DECISION SUPPORT IN WILDFIRES PREVENTION WITH INCOMPLETE INITIAL DATA

A. M. Zaiats, A. A. Logachev

St. Petersburg State Forest Technical University, 194021, Russia
E-mail: zamfta@yandex.ru

The basic problems of effective measures selection in forest fires prevention are discussed. Mathematical models are developed for quantitative estimating the fire hazard level and possible damage in the case when initial information is incomplete. The presented models treat wildfire as a random event; Walley criterion or the maximality condition is applied for decision support in forest fire prevention measures determining. The generalized Dirichlet model and Bayesian approach are used for assessment of forest fire hazard level. The proposed models are easy to implement in software and employed in complex systems of decision support.

Keywords: theory of decision making, forecasting, generalized Dirichlet distribution, Walley criterion, Bayesian approach

Data on authors

- Anatoliy M. Zaiats** — PhD, Professor; St. Petersburg State Forest Technical University, Department of Information Systems and Technologies; Head of the Department; E-mail: zamfta@yandex.ru

Aleksey A. Logachev — St. Petersburg State Forest Technical University, Department of Information Systems and Technologies; Assistant; E-mail: LogachevAA@live.ru

For citation: *Zaiats A. M., Logachev A. A.* Mathematical models for decision support in wildfires prevention with incomplete initial data // *Izv. vuzov. Priborostroenie*. 2016. Vol. 59, N 5. P. 342—347 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-5-342-347