

Д.т.н. Ю.А. Абрамов, к.т.н. А.Е. Басманов

РАЗРАБОТКА ВЕРОЯТНОСТНОЙ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ ПРИРОДНОГО ХАРАКТЕРА В ЛАНДШАФТНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ

Рассмотрены основные положения вероятностной методики определения величины риска возникновения чрезвычайных ситуаций в ландшафтных экосистемах. Даны рекомендации по ее применению.

Постановка проблемы. Основная характерная черта процесса обнаружения лесного пожара – длительность его распространения с момента возникновения до выявления. В силу случайного распределения времени возникновения пожара в течение суток длительность его распространения до обнаружения также случайная величина, полной характеристикой которой является функция распределения вероятностей. В связи с этим сегодня существует актуальная задача по формированию универсальной методики оценки риска возникновения чрезвычайных ситуаций природного характера в ландшафтных экосистемах

Анализ последних достижений и публикаций. Проведенный анализ публикаций [1-4] по предложенной тематике позволил сформулировать и поставить задачу по формированию основных положений вероятностной методики оценки риска возникновения чрезвычайных ситуаций природного характера в ландшафтных экосистемах и провести расчеты для крупных лесных массивов в условиях использования авиационных средств наблюдения.

Постановка задачи и ее решение. Основными параметрами авиапатрулирования, определяющими длительность распространения пожара до его обнаружения, служат кратность осмотра территории (число облетов в день) и расписание патрульных полетов.

Введем обозначения: L – протяженность патрульного маршрута, км; V – путевая скорость патрульного летательного аппарата, км/ч; ξ – проекция географических координат пожара на траекторию патрульного маршрута; η – момент возникновения пожара; S_j – начало j -го облета; $\{S_j\}_{j=1}^n$ – расписание патрульных полетов; n – кратность авиапатрулирования.

Вектор (ξ, η) определяет место и время возникновения пожара; ξ и η – независимые случайные величины. Пусть время обслуживания пожара равно нулю, а появление патрульного судна в точке ξ маршрута совпало с началом распространения пожара. Время появления лета-

тельного аппарата в этой точке при j -м вылете $U_j(\xi)$ определяется в этом случае следующим образом:

$$U_j(\xi) = S_j + \xi/V,$$

Рассмотрим на плоскости область C – пространство значений векторной случайной величины (ξ, η) . Оно будет равно:

$$\{(\xi, \eta)/\xi \in [\emptyset, L], \eta \in [\emptyset, 24]\},$$

Обозначим через

$$D_j(Z) = \{(\xi, \eta)/\xi \in [\emptyset, L], S_j + \xi/V - Z \leq \eta \leq \tau_j + \xi/V\},$$

здесь $(\xi, \eta) \in D_j(Z)$ означает, что пожар будет обнаружен за время, не большее Z , после возникновения при j -м вылете того же дня.

Выражение $q_j(Z) = P\{(\xi, \eta) \in D_j(Z)\}$ означает вероятность обнаружения пожара за время, не большее Z , при j -м вылете.

Пусть $D(Z) = \bigcup_{j=1}^m D_j(Z)$; $Q(Z) = P\{(\xi, \eta) \in D(Z)\}$ – вероятность

обнаружения пожара после его возникновения за время, не большее Z . Тогда при постоянном расписании патрульных полетов и стабильном распределении времени возникновения пожара в течение суток величина $Q(Z)$ может быть представлена в виде:

$$Q(Z) = \sum_{j=1}^m \int_0^L \int_{S_j + \xi/V - Z}^{S_j + \xi/V} f(\xi, \eta) d\xi d\eta,$$

где $f(\xi, \eta)$ – совместная плотность распределения координат пожара на маршруте и времени его возникновения в течение суток. В силу независимости случайных величин ξ и η совместная плотность распределения $f(\xi, \eta)$ может быть представлена в виде:

$$f(\xi, \eta) = f(\xi)f(\eta);$$

При равномерном распределении координаты пожара на маршруте ($f(\xi) = L^{-1}$) и нормальном распределении времени его возникновения в течение суток

$$f(\eta) = (\sigma\sqrt{2\pi})^{-1} \exp\left[-\frac{(\eta - a)^2}{2\sigma^2}\right],$$

выражение для $Q(Z)$ принимает вид

$$Q(Z) = \sum_{j=1}^{mL-1L} \int_0^{S_j+\xi/V} d\xi \int_{S_j+\xi/V-2}^{S_j+\xi/V} (\sigma\sqrt{2\pi})^{-1} \exp\left[\frac{(\eta - a)^2}{2\sigma^2}\right] d\eta,$$

где a – математическое ожидание (среднее значение) времени возникновения пожара в течение суток; σ – стандартное (среднеквадратическое) отклонение времени возникновения пожара.

Для практики наибольший интерес представляет расписание полетов, обеспечивающее максимум своевременно обнаруженных пожаров при каждом значении кратности авиапатрулирования. В зависимости от выполняемых авиацией функций и условий борьбы с огнем в качестве критериев оптимальности расписания используются минимум математического ожидания длительности распространения пожара до обнаружения или максимум вероятности его обнаружения в течение заданного промежутка времени после возникновения.

Оптимальное расписание полетов по критерию максимума вероятности своевременного обнаружения пожара существенным образом зависит от допустимой длительности его распространения до обнаружения, т.е. величины Z . Вероятность обнаружения пожара в течение 1 ч после его возникновения при длительности светлого времени суток 10 – 12 ч ($a = 14$; $\sigma = 2$) изменяется от 0 при вылете рано утром или поздно вечером до 0,2 при вылете на патрулирование в 14 ч. С увеличением продолжительности светлого времени суток максимальное значение вероятности своевременного обнаружения пожара падает от 0,16 при долготе дня 14 – 16 ч ($a = 14$; $\sigma = 2,5$) до 0,13 при долготе дня 20 – 22 ч ($a = 14$; $\sigma = 3$). Оптимальное время вылета остается при этом постоянным, равным 14 ч.

С увеличением допустимой длительности распространения пожара растет вероятность его своевременного обнаружения и происходит смещение оптимального времени вылета вправо по временной оси. При допустимом времени распространения пожара $Z = 2$ ч вероятность своевременного обнаружения достигает 0,38 при долготе дня 0 – 12 ч ($a = 14$; $\sigma = 2$), 0,31 при долготе дня 14 – 16 ч ($a = 14$; $\sigma = 2,5$) и 0,26 при долготе дня 20-22 ч ($a = 14$; $\sigma = 3$).

Увеличение периодичности облетов территории ведет к монотонному снижению средней длительности распространения пожара до обнаружения и росту вероятности его своевременного обнаружения. Максимум вероятности своевременного обнаружения достигается при назначении патрульных вылетов в период наибольшей интенсивности

возникновения лесных пожаров. Расписание полетов, оптимальное по критерию минимума математического ожидания длительности распространения пожара до обнаружения, смещено на более поздние сроки по сравнению с расписанием, оптимальным по критерию максимума вероятности своевременного обнаружения пожара.

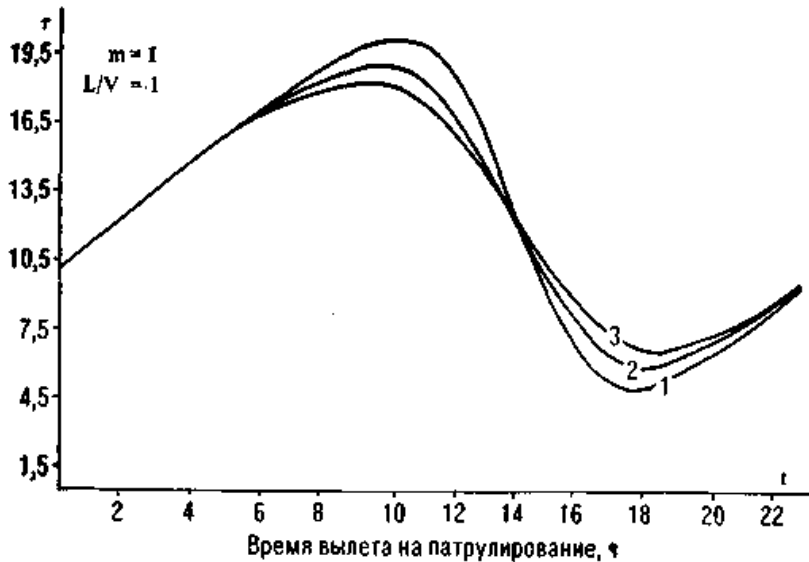


Рис. 1 – Зависимость средней длительности распространения пожара до обнаружения (τ) от времени вылета на патрулирование (t): 1 – $\sigma = 2$; 2 – $\sigma = 2,5$; 3 – $\sigma = 3$

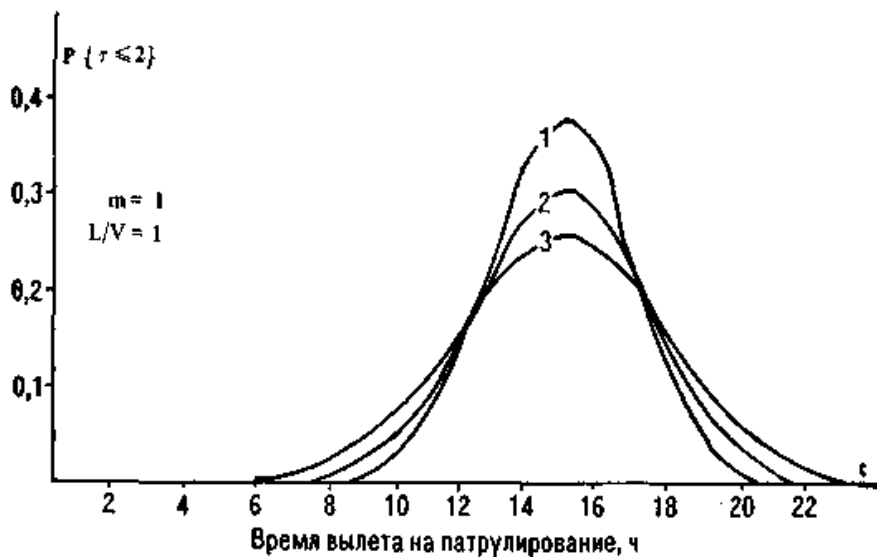


Рис. 2 – Зависимость вероятности своевременного ($\tau \leq 2$) обнаружения пожара от времени вылета на авиапатрулирование: 1 – $\sigma = 2,0$; 2 – $\sigma = 2,5$; 3 – $\sigma = 3,0$

С увеличением долготы дня расширяется интервал времени между вылетами и несколько снижается своевременность обнаружения пожаров при одной и той же кратности авиапатрулирования. Средняя

длительность распространения пожара до обнаружения обратно пропорциональна кратности авиапатрулирования и с достаточной для практики точностью может быть найдена из соотношения

$$\bar{\tau}_m = (1.04)^{m-1} \bar{\tau}_1 / m, \quad 1 \leq m \leq 5,$$

где $\bar{\tau}_1$ – средняя длительность распространения пожара до обнаружения при одноразовом авиапатрулировании (табл. 1); $\bar{\tau}_m$ – средняя длительность распространения пожара до обнаружения при m -разовом авиапатрулировании.

С увеличением кратности авиапатрулирования вероятность своевременного обнаружения пожара асимптотически приближается к единице. Зависимость вероятности своевременного обнаружения пожара от кратности авиапатрулирования имеет вид

$$Q_m(Z) = 1 - \prod_{j=1}^m P_j(Z), \quad 1 \leq m \leq 5,$$

где $P_j(Z)$ – вероятность своевременного обнаружения пожара при j -м вылете; $Q_m(Z)$ – вероятность своевременного обнаружения пожара при m -разовом патрулировании.

С достаточной для практики точностью вероятность своевременного обнаружения пожара при произвольной кратности патрулирования может быть найдена из соотношения

$$Q_m(Z) = (1.04)^{m-1} [1 - (1 - Q_1(Z))^m],$$

где $Q_1(Z)$ – вероятность своевременного обнаружения пожара при одноразовом авиапатрулировании.

Характер полученных зависимостей свидетельствует о постепенном снижении относительного эффекта от наращивания кратности авиапатрулирования как в отношении средней длительности распространения пожара до обнаружения, так и вероятности его своевременного обнаружения (табл.2, 3).

Увеличение протяженности патрульных маршрутов приводит к некоторому (до 5% при $L/V = 3$ ч) повышению средней длительности распространения пожара до его обнаружения при тех же кратностях патрулирования и соответствующему снижению своевременности обнаружения. Оптимальные расписания должны рассчитываться применительно к конкретным условиям работы структурных подразделений МЧС.

Таблица 1 – Оптимальные расписания патрульных полетов по критерию минимума математического ожидания (среднего значения) длительности распространения пожара до обнаружения ($L/V \leq 1$)

Кратность патрулирования m	Оптимальное время вылетов, ч					Среднее значение длительности распространения обнаружения
	1	2	3	4	5	
Долгота дня 10 – 12 ч ($a = 14; \sigma = 2$)						
1	17,3	–	–	–	–	4,50
2	14,6	18,2	–	–	–	2,35
3	13,4	15,5	18,5	–	–	1,60
4	12,5	14,3	16,1	18,5	–	1,25
5	11,9	13,4	14,6	16,1	18,5	1,05
Долгота дня 14 – 16 ч ($a = 14; \sigma = 2,5$)						
1	17,6	–	–	–	–	5,35
2	14,6	18,8	–	–	–	2,85
3	13,1	15,8	19,7	–	–	2,00
4	12,5	14,6	16,7	20,0	–	1,50
5	11,6	13,4	15,2	17,0	20,0	1,25
Долгота дня 20 – 22 ч ($a = 14; \sigma = 3$)						
1	18,2	–	–	–	–	6,10
2	14,6	19,7	–	–	–	3,30
3	12,8	16,1	20,6	–	–	2,30
4	11,9	14,6	17,3	21,2	–	1,80
5	11,3	13,4	15,5	17,9	21,5	1,45

Силами наземной охраны обнаруживается около 18% пожаров, возникающих на обслуживаемой авиацией территории лесного фонда. В районах наземных сил и средств тушения на ее долю приходится около 26% обнаруженных пожаров, а авиационных – около 2% пожаров.

Явное преобладание авиационного способа обнаружения лесных пожаров обусловлено сравнительно низкой степенью охвата территории лесного фонда наблюдением с вышек (мачт, пунктов) и отсутствием на них регулярного дежурства. Стационарная сеть наблюдательных пунктов организована, как правило, только в районах наземной охраны и охватывает не более 30% площади этих районов.

Наземное патрулирование преобладает в зонах отдыха населения, местах лесозаготовительных работ и строительства различных объектов и трасс, а также в изолированных лесных массивах (полезачитных полосах, ленточных борах). Степень охвата лесного фонда наземным патрулированием ограничивается плотностью дорожно-транспортной сети и сравнительно низкой производительностью пат-

рулей, обусловленной малым радиусом обзора и невысокой скоростью их передвижения.

Таблица 2 – Оптимальные расписания патрульных полетов по критерию максимума вероятности своевременного обнаружения пожара при $Z = 1$ ч ($L/V \leq 1$)

Кратность патрулирования m	Оптимальное время вылетов, ч					$Q(Z)$
	1	2	3	4	5	
Долгота дня 10 – 12 ч ($a = 14; \sigma = 2$)						
1	14,0	–	–	–	–	0,20
2	13,2	14,6	–	–	–	0,37
3	12,8	14,0	15,2	–	–	0,53
4	12,5	13,7	14,6	15,8	–	0,65
5	12,2	13,1	14,0	14,9	15,8	0,75
Долгота дня 14 – 16 ч ($a = 14; \sigma = 2,5$)						
1	14,0	–	–	–	–	0,16
2	13,4	14,6	–	–	–	0,31
3	12,8	14,0	15,2	–	–	0,44
4	12,2	13,4	14,6	15,8	–	0,55
5	11,9	13,1	14,0	14,9	16,1	0,65
Долгота дня 20 – 22 ч ($a = 14; \sigma = 3$)						
1	14,0	–	–	–	–	0,13
2	13,4	14,6	–	–	–	0,26
3	12,8	14,0	15,2	–	–	0,38
4	12,2	13,4	14,6	15,8	–	0,48
5	11,6	12,8	14,0	15,2	16,4	0,57

Местным населением, экипажами транспортных средств, добровольными дружинами (общественностью) обнаруживается 1 – 2% лесных пожаров, относящихся преимущественно к районам наземной охраны.

Фактические результаты функционирования системы обнаружения лесных пожаров и ее основных компонентов характеризуются эмпирическими распределениями площади пожаров в момент обнаружения и длительности их распространения (табл. 4).

Средняя площадь пожара в момент обнаружения составляет в районах, относящихся к авиационной охране, около 0,6 га. На площади до 0,5 га здесь обнаруживается около 78% лесных пожаров.

Распределение площади пожаров в момент обнаружения, относящихся к районам наземной охраны, характеризует эффективность совместной работы авиационных и наземных средств охраны лесов. Средняя площадь пожара в момент обнаружения составляет в этих

районах около 0,4 га. На площади до 0,5 га здесь фиксируют около 87% лесных пожаров.

Таблица 3 – Оптимальные расписания патрульных полетов по критерию максимума вероятности своевременного обнаружения пожаров при $Z = 2$ ч ($L/V \leq 1$)

Кратность патрулирования m	Оптимальное время вылетов, ч					$Q(Z)$
	1	2	3	4	5	
Долгота дня 10 – 12 ч ($a = 14; \sigma = 2$)						
1	14,6	–	–	–	–	0,38
2	13,7	15,8	–	–	–	0,67
3	12,5	14,6	16,7	–	–	0,84
4	11,9	13,7	15,5	17,3	–	0,93
5	11,0	12,8	14,6	16,4	18,2	0,98
Долгота дня 14 – 16 ч ($a = 14; \sigma = 2,5$)						
1	14,6	–	–	–	–	0,31
2	13,7	15,8	–	–	–	0,57
3	12,5	14,6	–	–	–	0,76
4	11,6	13,7	–	–	–	0,87
5	11,0	12,8	–	–	–	0,93
Долгота дня 20 – 22 ч ($a = 14; \sigma = 3$)						
1	14,6	–	–	–	–	0,26
2	13,7	15,8	–	–	–	0,49
3	12,5	14,6	16,7	–	–	0,67
4	11,6	13,7	15,8	17,9	–	0,80
5	10,7	12,8	14,6	16,4	–	0,88

Таблица 4 – Распределение площади лесных пожаров в момент обнаружения

Зона охраны	Пожары, %, обнаруженные на площади, га				
	до 0,05	до 0,1	до 0,5	до 1,0	до 10,0
Авиационных сил и средств тушения	21	42	78	90,5	99,4
Наземных сил и средств тушения	43	61	87	94,4	99,6
Обслуживаемая авиацией территория	34	54	84	92,8	99,5

Распределение площади пожаров в момент их выявления, относящееся ко всей обслуживаемой авиацией территории лесного фонда,

характеризует эффективность всей системы охраны. Средняя площадь пожара в момент обнаружения составляет здесь около 0,5 га (см. табл. 4).

Распределение длительности распространения пожаров до обнаружения авиацией практически совпадает с таковым в районах авиационной охраны, где участие «заемных» средств незначительно (менее 2% обнаруженных пожаров). Среднее значение длительности распространения пожара до обнаружения авиацией составляет около 1,5 ч. Авиация в течение 1 ч обнаруживает около 60% возникших пожаров, а за 2 ч – около 80%.

Распределение длительности распространения пожаров до обнаружения наземными средствами характеризует эффективность функционирования последних в пределах районов наземной охраны с авиапатрулированием. Показатели своевременности обнаружения пожаров этими средствами значительно ниже, чем авиацией, даже в пределах районов наземной охраны.

Совместное функционирование авиационных и наземных средств обеспечивает более высокие показатели своевременности обнаружения пожаров в районах наземной охраны с авиапатрулированием, чем в районах авиационной охраны. В течение 1 – 2 ч после возникновения лесных пожаров здесь обнаруживается их соответственно около 70 и 90%. Средняя длительность распространения пожара до обнаружения авиацией или наземными средствами составляет около 1,3 ч.

Приведенное эмпирическое распределение длительности распространения пожаров до обнаружения авиацией близко к теоретическому распределению при 3-, 4-разовом авиапатрулировании. Фактическая кратность авиапатрулирования в периоды горимости лесов не превышает 2 – 3 вылетов в день. Имеющееся несоответствие между эмпирическим и теоретическим распределением обусловлено наличием систематических погрешностей в определении площадей пожаров (из-за отсутствия контроля) и оценке длительности распространения огня из-за игнорирования суточной динамики интенсивности горения.

Некоторое повышение своевременности обнаружения пожаров авиацией происходит за счет полетов по обслуживанию действующих пожаров, не относящихся к числу патрульных, но увеличивающих периодичность осмотра хотя бы части территории каждого структурного подразделения авиаохраны.

Необходимые условия повышения эффективности функционирования системы обнаружения лесных пожаров: повышение кратности авиапатрулирования и повсеместный переход на оптимальные расписания полетов; повышение степени охвата территории лесного фонда сетью наблюдательных вышек, мачт, пунктов и организация регулярных дежурств на них. Наземные патрули в силу приуроченности их к существующей транспортной сети, незначительного радиуса

обзора и относительно низкой скорости передвижения могут рассматриваться как дополнение к сети наблюдательных пунктов.

Повышение степени охвата территории сетью наблюдательных пунктов связано со строительством достаточно большого числа вышек (около 50 шт./млн. га) и привлечением к дежурству на них соответствующего количества пожарных-наблюдателей. Дефицит трудовых ресурсов ограничивает темпы повышения степени охвата наблюдением с вышек даже районов наземной охраны, не говоря уже о районах авиационных сил и средств тушения пожаров. Определенные перспективы открывает применение промышленных телевизионных систем, состоящих из нескольких камер, передающих изображение на видеоконтрольное устройство в пункт диспетчерского управления. Отработка таких систем, их выпуск в необходимом количестве связаны со значительными затратами времени и средств.

Выводы: на современном этапе наиболее реальными путями резкого повышения своевременности обнаружения лесных пожаров является увеличение кратности авиапатрулирования активно охраняемой территории лесного фонда и повышения степени охвата районов наземной охраны регулярным наблюдением с вышек.

ЛИТЕРАТУРА

1 Дорофеев В.М. Мониторинг состояния зданий и сооружений существующей застройки городов, поврежденных катастрофами природно-техногенного характера // ВИНТИ. Пробл. безоп. при чрезв. ситуациях. – 1998. – вып. 6. – С. 16 – 26.

2 Корсаков Г.А. Расчет зон чрезвычайных ситуаций. – СПб: Изд. СПГЛТА, 1997. – 112 с.

3 Матухов Н.А., Петров В.П. Ахметханов Р.С. Природно-техногенно-социальные системы и риски // ВИНТИ. Пробл. безоп. при чрезв. ситуациях. – 2004. – № 3. – С. 3 – 30.

4 Москвичев В.В., Лепихин А.М., Ноженкова Л.Ф. и др. Разработка ГИС „Безопасность региона”: вероятностные модели и экспертные системы для районирования территорий по риску воздействия чрезвычайных ситуаций // ВИНТИ. Пробл. безоп. при чрезв. ситуациях. – 2001. – вып. 6. – С. 53 – 61.