

Е.Ю. Мирясов, М.Т. Аманбаев, Ю.Д. Моторыгин
(Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России;
e-mail: press@igps.ru)

АНАЛИЗ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

В статье показано практическое использование стохастических методов для оценки возникновения и развития чрезвычайных ситуаций.

Ключевые слова: чрезвычайные ситуации, математические модели, природная среда.

E.Yu. Mirysov, M.T. Amanbaev, Yu.D. Motorygin **ANALYSIS OF PROBABILITIES OF BEGINNING OF EMERGENCY SITUATIONS**

In article practical use of stochastic methods for an assessment of beginning and development of emergency situations is shown.

Key words: emergency situations, mathematical models, natural environment.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 5 ноября 2013 г.

Анализ возникновения чрезвычайных ситуаций показывает, что не все они имеют одинаковую вероятность возникновения и поэтому следует уделять им разное внимание. Несмотря на все многообразие возникающих чрезвычайных ситуаций и условий, в которых производится выбор решения, сам процесс выбора носит достаточно универсальный характер.

Ситуации, в которых осуществляется выбор решения, характеризуются следующими основными факторами:

1. Наличие цели.

Необходимость принятия решения диктуется только наличием цели, которую необходимо достичь. Если цель отсутствует, то и нет никакой необходимости принимать решение.

2. Наличие альтернативных линий поведения.

Решения принимаются только тогда, когда существует более одного способа их достижения. Причём каждый из способов может характеризоваться различной вероятностью достижения цели, а также различными необходимыми затратами.

3. Наличие ограничивающих факторов.

Естественно, что лицо, принимающее решение, не обладает бесконечными возможностями. Все множество ограничивающих факторов можно разбить на три основные группы:

- экономические факторы (деньги, производственные и людские ресурсы, время и т.п.);
- технические факторы (габариты, вес, энергопотребление, надёжность, точность и т.п.);
- социальные факторы, которые учитывают требования человеческой этики и морали, а также экологические требования.

Проблему принятия решений рассмотрим на примере выбора оптимального варианта анализа возникновения чрезвычайных ситуаций.

Процесс принятия управленческих решений — это преобразование исходной информации (информации состояния) в выходную информацию (информацию управления) — приказ.

Принято делить решения на формальные и творческие. Если преобразование информации выполняется с использованием математических моделей, то выработанное решение считается формальным; если решение принимается в результате скрытой работы интеллекта лица, принимающего решения, то это решение считается творческим. Такое деление в достаточной степени условно, поскольку ни чисто формального, ни чисто творческого решения в природе не существует. Если решения принимаются с использованием математических моделей, то знания и опыт человечества (элементы творчества) используются при создании этих моделей, а интуиция (элемент творчества) используется в момент, когда лицо, принимающее решение, задает то или иное значение исходной информации или из множества альтернативных вариантов в качестве решения выбирает один. Если основным инструментом выбора решений является интеллект человека, то формальные методы, носителем которых является вся наука, скрыто присутствуют в его знаниях и опыте.

В соответствии с делением решений на творческие и формальные всё множество проблем, соответствующих любому процессу принятия решений, делят на два принципиально различных класса: проблемы концептуального характера и проблемы формально-математического (вычислительного) характера.

К **концептуальным проблемам** относят сложные логические проблемы, которые невозможно решить с использованием только формально математических методов и ЭВМ. Очень часто эти проблемы уникальны в том смысле, что они решаются впервые и не имеют прототипов в прошлом. Обычно концептуальные проблемы решаются на уровне руководителей с привлечением экспертов. В качестве экспертов выступают высококвалифицированные специалисты из различных областей науки и техники. При решении концептуальных проблем формально математические методы играют только вспомогательную роль, а главное значение придается эрудиции, опыту и интуиции эксперта. К числу концептуальных проблем относят, в частности, такие проблемы, как анализ и выбор целей, выявление совокупности показателей, характеризующих следствия принятого решения, выбор из этих показателей критерия оптимальности и т.п.

Модели принятия решений в зависимости от стратегии управления делятся на три группы.

1. Модели принятия решений **в условиях определённости**. Здесь лицо, принимающее решение, точно знает, в каком состоянии будет "природа". Остаётся только выбрать наилучшее решение. Моделями этого класса являются детерминированные модели (линейного, целочисленного и нелинейного программирования и другие оптимизационные модели).

2. Модели принятия решений *в условиях риска*. В этих моделях известно распределение вероятностей всех состояний "природы", для выбора наилучшего решения применяются следующие критерии:

2.1. Максимизация ожидаемого результата, выраженного в виде денежных платежей.

2.2. Минимизация ожидаемых потерь.

2.3. Максимизация ожидаемого результата, выраженного в виде значения полезности.

3. Модели принятия решений *в условиях неопределённости*. Здесь лицо, принимающее решения, не знает вероятностей наступления того или иного состояния "природы". В этой ситуации можно применить критерий Лапласа: присвоить всем возможным состояниям "природы" одинаковые вероятности их осуществления и затем выбрать решение, максимизирующее ожидаемый результат. Альтернативой критерию Лапласа могут служить критерии, не использующие вероятности состояний "природы". Существует три таких критерия.

3.1. **Максиминный критерий**, максимизирующий минимум денежных платежей.

3.2. **Максимаксный критерий**, максимизирующий максимум денежных платежей.

3.3. Критерий **минимаксных потерь**, минимизирующий максимум потерь.

Эти критерии в общем случае порождают различные решения.

Учитывая опыт решения экологических задач с использованием математических моделей и количественной оценки функционирования системы взаимодействия человека с окружающей средой, была выбрана динамическая модель принятия решений в условиях риска. В качестве математического аппарата выбран метод динамического программирования для решения стохастических задач, где процесс принятия решений можно представить конечным числом состояний. Переходные вероятности между состояниями описывают марковскую цепь. Структура вознаграждений в подобном процессе представляется в виде матрицы, элементами которой являются величины дохода (или затраты), возникающие при переходе из одного состояния в другое. Матрица переходных вероятностей и матрица доходов зависят от альтернатив решения, которыми располагает лицо, принимающее решение. Целью задачи является формирование оптимальной стратегии, максимизирующей ожидаемый доход от процесса, имеющего конечное или бесконечное число этапов.

Введем для каждой чрезвычайной ситуации P_i – вероятность её возникновения и W_i – ресурсы, потраченные на минимизацию вредного воздействия каждой опасности.

Фактические значения вероятностей возникновения той или иной ЧС определяются на основании статистических данных, приведённых в соответствие с нормативными и методическими документами, утверждёнными или разрешёнными для применения государственными органами, с использованием экспертных оценок, инструментальными методами, методом аэрофотосъёмки, то есть с применением всего арсенала методов экологического мониторинга.

Примем, что сумма вероятностей рассматриваемых чрезвычайных ситуаций равна единице, а ресурсы, потраченные на минимизацию вредного воздействия каждой опасности, ограничены суммой Q .

Это позволит численно объединить экономические оценки с возможностью прогнозирования ситуации и оптимизации принятия решений для повышения безопасности и улучшения экологической обстановки.

Рассмотрим процесс принятия оптимального решения *на примере лесных пожаров*. Процесс принятия решений можно представить конечным числом состояний. Переходные вероятности между состояниями описывают Марковскую цепь.

Цепь Маркова – последовательность случайных событий с конечным или бесконечным числом исходов, характеризующаяся тем свойством, что при фиксированном настоящем будущее независимо от прошлого, которое сформировало данное настоящее.

Конечной цепью Маркова называется процесс, который переходит из состояния в состояние с определенной вероятностью, так называемой вероятностью перехода. Число состояний конечно, а значение переходной вероятности полностью определяется тем, в каком состоянии находится процесс, то есть она является условной. Вероятности перехода образуют стохастическую матрицу P , номер строки которой указывает, из какого состояния происходит переход, а номер столбца – в какое состояние попадает процесс в результате перехода. Все возможные пути процесса описываются степенями матрицы переходных вероятностей – P_n .

Для переходной матрицы P существует собственный вектор α , такой что

$$\alpha P = \alpha, \quad \alpha = (\alpha_1 \ \alpha_2 \ \dots \ \alpha_n),$$

где n – число состояний моделируемого процесса.

Собственный вектор – строка α содержит такое же количество компонент, как и строка переходных вероятностей в матрице P , а их физический смысл – среднее время нахождения процесса в состоянии n .

Так как число этих состояний конечно, а значение вероятности перехода полностью определено состоянием, в котором процесс находится в данный момент времени, вероятность перехода является условной.

Параметры Марковской модели могут быть определены экспериментально или с использованием каких-либо методов оценки переходных вероятностей. Для этого могут применяться экспертные методы или расчёты с использованием традиционных методов.

Каждый переход сопровождается вознаграждениями или убытками, представленными в виде матрицы, элементами которой являются величины дохода или затраты. Матрица переходных вероятностей и матрица доходов зависят от альтернативных решений. Целью задачи является формирование оптимальной стратегии, максимизирующей ожидаемый доход от процесса, имеющего конечное или бесконечное число этапов.

В качестве возможных состояний приняты три степени состояния лесного массива:

1. Относительно удовлетворительный, горения не наблюдается.
2. Загорание (менее 0,2 га) – пожар, который может быть остановлен и потушен одним человеком.
3. Катастрофический пожар (более 2000 га), который может быть остановлен ударной группой численностью около 400 человек.

Рассмотрим Марковскую цепь событий, состоящую из 3-х состояний – S_1 , S_2 и S_3 . Поскольку других исходов процесса нет, то $S_1 + S_2 + S_3 = 1$.

Тогда процесс перехода из состояния в состояние имеет 6 событий, каждому из которых соответствует вероятность перехода. Обозначим их p_{11} , p_{12} , p_{13} , p_{21} , p_{22} , p_{23} , p_{31} , p_{32} и p_{33} .

Поскольку состояние либо остаётся, либо переходит в другое, то:

$$\begin{aligned} p_{11} + p_{12} + p_{13} &= 1; \\ p_{21} + p_{22} + p_{23} &= 1; \\ p_{31} + p_{32} + p_{33} &= 1. \end{aligned}$$

Соответствующая матрица переходных вероятностей процесса имеет вид:

$$P = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} \end{pmatrix}.$$

Для предотвращения возникновения лесного пожара можно проводить различные мероприятия, затрачивая на это определенные средства. Чтобы рассмотреть задачу принятия решений в перспективе, введем матрицу R , определяющую доходы и затраты в денежном эквиваленте, соответствующую матрице перехода:

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix}.$$

С использованием этих матриц можно выбрать наилучшую стратегию принятия решения, основываясь на минимизации ожидаемых потерь.

Обозначим через $f_n(i)$ оптимальные ожидаемые расходы, полученные на этапах от n до N включительно при условии, что система находится в начале этапа n в состоянии i и число этапов N конечно.

Обратное рекуррентное уравнение, связывающее f_n и f_{n+1} , можно записать в виде

$$f_n(i) = \max \left\{ \sum_{j=1}^m p_{ij}^k [r_{ij}^k + f_{n+1}(j)] \right\},$$

где $n = 1, 2, \dots, N, f_{n+1}(i) \equiv 0$ для всех j .

Приведённое уравнение основано на том, что накапливающиеся расходы $[r_{ij}^k + f_{n+1}(j)]$ получаются в результате перехода из состояния i на этапе n в состояние j на этапе $n + 1$ с вероятностью p_{ij}^k . Введём обозначение

$$v_i^k = \sum_{j=1}^m p_{ij}^k r_{ij}^k,$$

тогда рекуррентное уравнение можно записать следующим образом:

$$f_N(i) = \max(v_j^k);$$

$$f_n(i) = \max \left\{ v_i^k + \sum_{j=1}^m p_{ij}^k f_{n+1}(j) \right\}, \quad n = 1, 2, \dots, N-1.$$

Для примера рассмотрим задачу принятия решения, когда $k = 1$, что соответствует решению не вкладывать средства в экологию, и $k = 2$ – вкладывать деньги в пожарную безопасность и мониторинг.

Тогда

$$p^1 = \begin{pmatrix} 0,2 & 0,5 & 0,3 \\ 0 & 0,5 & 0,5 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad R^1 = \begin{pmatrix} 7 & 6 & 3 \\ 0 & 5 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix},$$

$$p^2 = \begin{pmatrix} 0,3 & 0,6 & 0,1 \\ 0,1 & 0,6 & 0,3 \\ 0,05 & 0,4 & 0,55 \end{pmatrix}, \quad R^2 = \begin{pmatrix} 6 & 5 & -1 \\ 7 & 4 & 0 \\ 6 & 3 & -2 \end{pmatrix}.$$

Для переходной матрицы P_1 : если в текущем году состояние лесной обстановки относительно удовлетворительное (вторая строка матрицы), то в следующем году оно может остаться удовлетворительным с вероятностью 0,5 или стать плохой p_{23} с той же вероятностью. При этом доход в первом случае составит $r_{22} = 5$ у.е., во втором – $r_{23} = 1$ у.е., а накапливающийся доход составит:

$$v_2^1 = 3.$$

Рассчитаем остальные значения, сведя их в табл. 1.

Таблица 1

**Выбор оптимального решения по вложению материальных средств
для предотвращения лесных пожаров**

v_i^k		$f_1(i)$	Оптимальное решение k
$k = 1$	$k = 2$		
5,3	4,7	5,3	1
3	3,1	3,1	2
-1	0,4	0,4	2

Эти значения показывают, что если состояние пожарной лесной обстановки в начале периода хорошее (состояние 1), то при одном переходе оптимальный ожидаемый годовой доход составляет 5,3 у.е. Если в начальный период состояние леса относительно удовлетворительное (состояние 2) или плохое (состояние 3), то оптимальным будет решение $k = 2$ – вкладывать деньги в улучшение противопожарной обстановки и мониторинга с ожидаемыми годовыми доходами 3,1 и 0,4.

Аналогично можно смоделировать задачи принятия решения с конечным и бесконечным числом этапов, причем переходные вероятности и функции дохода не обязательно должны быть одинаковы для каждого года. Данные задачи решаются в виде задачи линейного программирования.

Литература

1. **Акимов В.А., Лесных В.В., Радаев Н.Н.** Основы анализа и управления риском в природной и техногенной сферах. М.: Деловой экспресс, 2004. 352 с.
2. **ГОСТ Р 14.09-2005.** Руководство по оценке риска в области экологического менеджмента.
3. **Артамонов В.С., Белобратова В.П., Бельшина Ю.Н. и др.** Расследование пожаров: учебник. С.-Пб.: С.-Пб. УГПС МЧС России, 2007. 562 с.
4. **Моторыгин Ю.Д., Ловчиков В.А., Паринова Ю.Г.** Прогнозирование опасных факторов пожара: лабораторный практикум. С.-Пб.: С.-Пб. УГПС МЧС России, 2008.
5. **Моторыгин Ю.Д.** Математическое моделирование процессов возникновения и развития пожаров: монография. С.-Пб.: С.-Пб. УГПС МЧС России, 2011. 184 с.
6. **Моторыгин Ю.Д., Ловчиков В.А., Дементьев Ф.А., Бельшина Ю.Н.** Прогнозирование опасных факторов пожара: учебное пособие. С.-Пб.: Астерион, 2013. 108 с.