

# МОДЕЛИРОВАНИЕ РИСКА И УЩЕРБА ОТ НАВОДНЕНИЙ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ\*

С.В. КИРИЛЛОВА, М.В. НОСКОВ

*Красноярский государственный технический университет, Россия*

e-mail: KKirillov@rambler.ru, Noskov@fivt.krasn.ru

К.В. СИМОНОВ

*Институт вычислительного моделирования СО РАН,*

*Красноярск, Россия*

e-mail: lena@icm.krasn.ru

An estimation method for the status of a hydrotechnical object and coast prone to floods of different origin is proposed using the fuzzy sets theory. On the basis of regression data simulations the models with the prescribed membership function are constructed. Results of the regression modelling of the investigated data are suitable for a construction of prognostic models of probable hazard and expected damage due to the floods in the framework of expert intelligence systems.

## Введение

Оценка показателя риска чрезвычайной ситуации (ЧС) от воздействия наводнений на сооружения и берега сочетает в себе оценку вероятности неблагоприятного события и оценку ущерба. В условиях опасности и неопределенности эти две меры взаимосвязанно анализируются в системах поддержки принятия решений. Строя соответствующие комбинации этих мер, адекватных изучаемой кризисной ситуации, эксперт оценивает уровень опасности и выдает решение на последующие действия (управление риском). Указанная выше комбинация мер представляет собой меру опасности, называемую риском ЧС [1].

При исследовании воздействий от наводнений одна из наиболее сложных задач заключается в количественном описании повреждений уникальных гидротехнических сооружений и оценке риска для таких сооружений [2, 3]. В современной практике технические сооружения разного рода могут быть подвергнуты как экспериментальному, так и аналитическому изучению. Известно, что такие общие процедуры анализа существуют, однако детализированная методология, особенно процесс принятия решения, остается в сфере компетентности относительно немногих лиц и основывается главным образом на интуиции экспертов, а не на вычислительных процедурах [4].

---

\*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 04-01-00823).

© Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук, 2006.

При решении этих задач многим входным данным невозможно сопоставить количественное значение, часто они определяются качественными признаками, такими как “много”, “сильное” и т. д. Поэтому модели, построенные на числовых оценках входных данных, являются неточными. Входные данные также зависят от субъективной оценки экспертов и содержат в себе неопределенность и неоднозначность, которые важно учитывать в процессе принятия решения.

В настоящее время признано, что теория нечетких множеств полезна при решении проблем в случае, когда данные представлены в форме лингвистических выражений (словесно) и зависят от субъективных оценок экспертов [5, 6]. Рассматривая состояние объекта, важно определить само понятие повреждения как пример нечеткого множества. Естественно, оно зависит от многих параметров (входных данных), таких как материал, характеристика фундамента, изменение коэффициента затухания колебаний, наличие деформаций, трещин в колоннах и пр.

В таких обстоятельствах, включающих многие факторы, сложно построить простой классификатор, отображающий многомерное пространство признаков в определенный набор категорий. Кроме того, поскольку не существует хорошо установленного способа определять состояние повреждения, следует эффективно использовать знания, которые могут предоставить опытные инженеры. Поэтому эффективный подход к построению классификатора должен отражаться на логике экспертных рассуждений, которые реализуют экспертные системы [4]. Важным моментом в оценке состояния повреждения объекта является также количественное выражение, ущерб. Ущерб — это результат негативного изменения вследствие каких-либо событий, явлений, выражающихся в нарушении целостности объектов или ухудшении их свойств. Ущерб от стихийного бедствия или аварии равен затратам на восстановление положения, существовавшего до их наступления [1].

## 1. Модели риска ЧС от наводнений

Риск чрезвычайной ситуации от разрушительных наводнений ( $R$ ) определяется как вероятностная мера потерь, установленная для объекта или участка береговой зоны за определенное время [1, 7]:

$$R = P(H) P(F/H),$$

где  $P(H)$  — вероятность опасности;  $P(F/H)$  — вероятность потерь (уязвимость) объекта или участка береговой зоны при реализации опасности.

Риск также может оцениваться как усредненный среднемноголетний ущерб ( $Y$ ) от заданной интенсивности неблагоприятного природного явления [1, 7]:

$$Y(H) = P(H)\nu(H)V(H)D,$$

где  $\nu(H)$  — интенсивность опасности для участка береговой зоны (уязвимость участка);  $V(H)$  — степень уязвимости (вероятность разрушения объектов);  $D$  — балансовая стоимость объектов на данном участке береговой зоны.

Процедура оценки уязвимости предполагает выполнение таких этапов, как: классификация объектов риска по их состоянию, структуре и свойствам, определяющим в совокупности характер реакции на воздействие неблагоприятных факторов; экономическая классификация объектов риска на заданной береговой территории, т. е. отнесение каждого объекта к тому или иному классу, оценка стоимости объекта и т. д.; определение функций

уязвимости для каждого класса объектов, т. е. оценка соотношения между воздействием опасного явления и степенью ущерба.

Ущерб для застройки опасной береговой зоны определяется как сумма ущербов для  $j$ -й застройки в каждой  $i$ -й опасной зоне с различной интенсивностью региональных и локальных неблагоприятных факторов:

$$Y = \sum_i \sum_j Y_{ij}.$$

Величина ущерба от наводнений типа  $i$  в зоне  $j$ -го типа составляет

$$Y = \sum_{i,j} R_{ij} S_j,$$

где  $S_j$  — балансовая стоимость зданий  $j$ -го типа застройки (в  $i$ -й зоне);

$$R_{ij} = \sum_l K_l N_{il}.$$

Здесь  $l$  — степень повреждения зданий при  $l = 0, 1, 2, 3, 4$ ;  $K_l$  — ущерб для зданий со степенью повреждения  $l$  в долях от общего числа зданий  $j$ -й зоны при наводнениях  $i$ -го типа;  $K_l N_{il}$  — относительный ущерб для зданий  $j$ -й зоны со степенью повреждения  $l$ .

## 2. Модель оценки состояния объекта

Пусть  $U$  — универсальное множество всех критериев (свойств), по которым оценивается состояние объекта [6]:

$$U = \{a_i, i = 0, 1, \dots, N\},$$

где  $a_i$  — критерий, по которому оценивается объект. Тогда состоянием объекта будем называть нечеткое множество  $B$ , определяющее степень повреждения объекта:

$$B = \langle U, \mu \rangle = \{a_1 | \mu_1 + a_2 | \mu_2 + \dots + a_N | \mu_N\},$$

где функция принадлежности  $\mu_i$  показывает, в какой мере объект обладает выбранным свойством  $a_i$ . В простейшем случае в качестве  $U$  может быть числовое множество

$$U = \{a_i = i, i = 0, 1, \dots, N\},$$

где критерий  $a_i$  есть факт того, что объект имеет суммарное повреждение силы  $i$ .

Это упрощение может показаться сильным, однако существуют методы классификации состояния повреждения объекта, где установлено, что все их можно свести к нечеткому множеству при соответствующем выборе функции принадлежности. На рис. 1 представлено возможное состояние объекта через определенный вид функции принадлежности. Здесь функция принадлежности  $\mu$  имеет экспоненциальный вид:

$$\mu(a_i) = c_i e^{-\frac{(a_i - b_i)^2}{a_i}}.$$

Относительно нечеткого множества  $B$  вводим лингвистическую переменную “Состояние повреждения” = {“нет”, “легкое”, “умеренное”, “сильное”, “разрушительное”}. Каждое



Рис. 1. Оценка функции принадлежности.

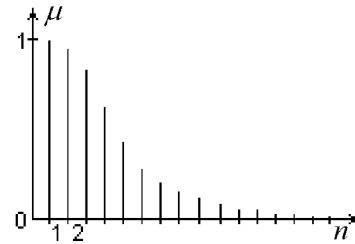


Рис. 2. Нечеткое множество состояния объекта, не имеющего повреждений.

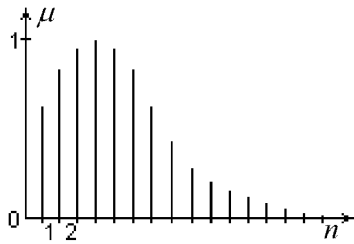


Рис. 3. Нечеткое множество состояния объекта, имеющего легкое повреждение.

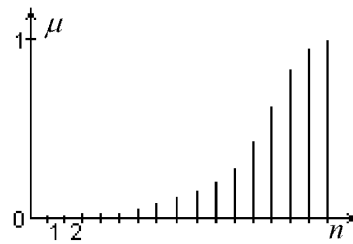


Рис. 4. Нечеткое множество состояния объекта, имеющего разрушительное повреждение.

значение лингвистической переменной характеризуется нечетким множеством. На рис. 2–4 приведены нечеткие множества, соответствующие значениям: “нет”, “легкое” и “разрушительное” повреждение. Здесь

$$U = \{a_i = i, i = 0, 1, \dots, N, N = 16\}.$$

При некотором суммарном повреждении  $a_i$ , таком, что  $a_i = b_i$ , можно уверенно отвечать, что объект принадлежит к классу  $i$ . Однако чем более отличается степень суммарного повреждения  $a_i$  от  $b_i$ , тем с меньшей уверенностью его можно отнести к данному классу. Так, на рис. 4  $b_i = 16$ , т. е. наиболее верно, что объект имеет повреждение суммарной силы  $n = 16$ , и неверно, что объект не имеет повреждения.

Известны многие признаки, определяющие состояние повреждения в результате наводнений. Их можно разделить на следующие группы.

1. *Множество признаков на основе визуального осмотра объекта экспертами:*  $A_1$  — наличие деформаций и трещин в балках, соединениях полов, потолков, внешних и внутренних стен, дверей, окон, лестниц, несущих перегородок.

2. *Множество признаков, получаемых из данных наблюдений о наводнениях:*  $A_2$  — изменение характеристик водного протока при воздействии на здания;  $A_3$  — изменение характеристик грунта при наводнении;  $A_4$  — общее поглощение и рассеяние энергии потока во время наводнения.

3. *Множество признаков из справочной информации об объекте:*  $A_5$  — строительный материал;  $A_6$  — высота и число этажей;  $A_7$  — характеристика фундамента и грунта;  $A_8$  — возраст сооружения.

Некоторые из признаков могут быть определены численно, другие задаются лингвистически (словесно). Однако, налагая предположение о неточности и (или) субъективности исходных данных, будем считать, что каждый признак является нечетким множеством.

### 3. Процедура оценки состояния объекта

Логика экспертных рассуждений реализуется в экспертных системах. Экспертная система (ЭС) — это программное средство, использующее экспертные знания для обеспечения высокоэффективного решения неформализованных задач в узкой предметной области [4]. Основу ЭС составляет база знаний о предметной области, которая заполняется специалистами предметной области в процессе построения и эксплуатации ЭС.

База знаний состоит из множества правил типа:

*Если (A), то (B),*

где  $A$  — предпосылка, а  $B$  — следствие.

Причем рассматривается неопределенность двух типов: неопределенность предпосылки и неопределенность самого правила.

Одним из возможных правил может быть следующее:

*Если: 1)  $A_1$  много*

*и 2)  $A_5$  железобетон,*

*то весьма возможно (0. 5), что общее повреждение сильное.*

Предпосылкой данного правила является факт того, что лингвистическая переменная  $A_1$  примет значение “много”, а лингвистическая переменная  $A_5$  примет значение “железобетон”. Результатом (следствием) является значение “сильное” лингвистической переменной  $B$  “Общее повреждение”.

Рассмотрим параметр  $A_1$ . Пусть

$$U(A_1) = \{r_i \in R | 0 < r_i < 100, i = 1, 2, \dots, N\},$$

т. е.  $U(A_1)$  — доля числа трещин в объекте, тогда

$$B(A_1) = \langle U(A_1), \mu^1 \rangle = \{r_1 | \mu_1^1 + r_2 | \mu_2^1 + \dots + r_N | \mu_N^1\}$$

— нечеткое множество, определяющее, насколько верно утверждение, что объект имеет некоторую долю повреждений.

Относительно нечеткого множества  $B(A_1)$  введем лингвистическую переменную  $A_1$ : “Наличие деформаций” = { “нет”, “мало”, “средне”, “много” }.

Нечеткое множество, соответствующее значению лингвистической переменной  $A_1$  “много”, представлено на рис. 5.

Рассмотрим параметр  $A_5$ . Пусть

$$U(A_5) = \{b_i, i = 1, 2, \dots, N\},$$

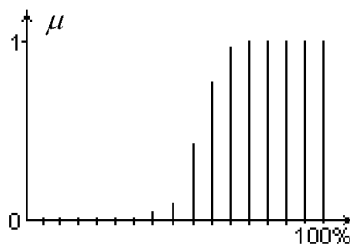


Рис. 5. Нечеткое множество “много” лингвистической переменной “Наличие деформаций”.

т. е.  $U(A_5)$  — множество характеристик материала, которыми определяются необходимые его свойства, тогда

$$B(A_5) = \langle U(A_5), \mu^5 \rangle = \{b_1|\mu_1^5 + b_2|\mu_2^5 + \dots + b_N|\mu_N^5\}$$

— нечеткое множество, определяющее степень обладания объекта каждой из характеристик. Относительно нечеткого множества  $B(A_5)$  введем лингвистическую переменную  $A_5$ : “Строительный материал” = {“железобетон”, “дерево”, “кирпич”, ... }.

Рассмотрим  $B_1$  — результат правила вывода. Пусть

$$U(B_1) = \{a_i, i = 0, 1, \dots, N\},$$

тогда значение “сильное” лингвистической переменной  $B_1$  “Общее повреждение” есть нечеткое множество:

$$B(B_1) = \langle U(B_1), \mu^b \rangle = \{a_1|\mu_1^b + a_2|\mu_2^b + \dots + a_N|\mu_N^b\}.$$

Но так как данное утверждение “весьма” верно, т. е. с вероятностью 0.5, то нечеткое множество “весьма верно, что  $B_1$  — сильное”:

$$\begin{aligned} B(B_1) &= \langle U(B_1), \mu^b \rangle = \{a_1|0.5 * \mu_1^b + a_2|0.5 * \mu_2^b + \dots + a_N|0.5 * \mu_N^b\} = \\ &= \{a_1|\mu_1^{0.5b} + a_2|\mu_2^{0.5b} + \dots + a_N|\mu_N^{0.5b}\} = \langle U(B_1), \mu^{0.5b} \rangle = B'(B_1). \end{aligned}$$

Рассмотрим нечеткое отношение между нечеткими множествами  $R$  с соответствующей функцией нечеткого отношения:

$$R = \langle A_1 \times A_5 \times B_1', \mu(r, b, a) \rangle.$$

Так как параметры  $r, b, a$  — независимы, т. е. функция принадлежности каждого не зависит от других значений других функций принадлежности, верно

$$\mu(r, b, a) = \mu^1(r) \wedge \mu^5(b) \wedge \mu^{0.5b}(a),$$

где операция  $\wedge$  есть функция  $\min$ .

Для каждого правила, в котором предпосылками будут значения лингвистических переменных  $A_1$  и  $A_5$ , построим нечеткое отношение  $R_i$ . Тогда результирующее нечеткое отношение на нечеткие множества  $A_1$  и  $A_5$  будет равно

$$R = R_1 \vee R_2 \vee \dots \vee R_M$$

со следующей функцией принадлежности:

$$\mu^R(r, b, a) = \mu^{R_1}(r, b, a) \vee \mu^{R_2}(r, b, a) \vee \dots \vee \mu^{R_M}(r, b, a).$$

Рассмотрим процесс реализации правила вывода. Пусть  $B(A_1), B(A_5)$  — некоторые нечеткие множества, тогда результатом правил вывода будет нечеткое множество

$$B(A_5) = \langle U(A_5), \mu^5 \rangle = \{b_1|\mu_1^5 + b_2|\mu_2^5 + \dots + b_N|\mu_N^5\}$$

со следующей функцией принадлежности:

$$\mu^b(a) = \bigvee_{\forall r} (\mu^1(r) \wedge \mu^c(r, a)) = \bigvee_{\forall r, b} (\mu^1(r) \wedge \mu^5(b) \wedge \mu(r, b, a)),$$

где операция  $\vee$  есть функция  $\max$ .

Аналогично выводятся формулы для других правил вывода. Результатом экспертного анализа является нечеткое множество, представляющее состояние повреждения объекта:

$$B = \langle U, \mu \rangle = \{a_1|\mu_1 + a_2|\mu_2 + \dots + a_N|\mu_N\}.$$

Таким образом, получено нечеткое множество, определяющее состояние общего повреждения изучаемого объекта в результате воздействия наводнений.

## 4. Построение моделей функций принадлежности

Рассмотрим процедуру построения аналитических моделей для функций принадлежности на основе регрессионного моделирования экспериментальных данных. Для регрессионного моделирования применим рассмотренные выше нечеткие множества оценки состояния изучаемого объекта, некоторые из них приведены на рис. 2–4.

Основным этапом регрессионного моделирования данных с помощью программного комплекса “Модели” является построение аналитической модели функции принадлежности в виде [8]

$$K = b + c \sum_j \sin(\varphi_j + \omega_j x).$$

Таким образом, некоторые результаты регрессионного моделирования исследуемых нечетких множеств состояния объекта представлены на рис. 6 и 7 и в виде соответствующих формул, где  $K$  — модель функции принадлежности, которая показывает, в какой мере исследуемый объект обладает выбранными свойствами.

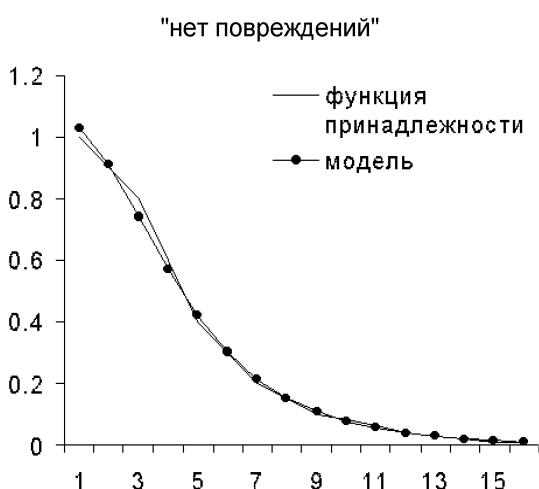


Рис. 6. Нечеткое множество состояния объекта, не имеющего повреждений ( $K = -7.94 + 13.6[\sin(1.77 - 0.13x) + \sin(-2.92 + 0.17x) + \sin(-0.17 + 0.14x)]$ ).

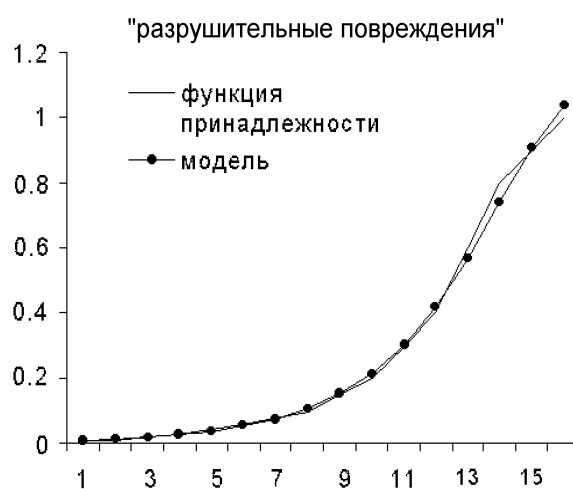


Рис. 7. Нечеткое множество состояния объекта, имеющего разрушительное повреждение ( $K = -9.69 - 16.63[\sin(-0.03 - 0.12x) + \sin(-1.42 - 0.16x) + \sin(0.86 + 0.17x)]$ ).

## Выводы

Предложена модель оценки состояния гидротехнического объекта, подверженного воздействию наводнения, с использованием теории нечетких множеств. Описан алгоритм вывода состояния изучаемого объекта на основе входных признаков об объекте. Выделены признаки, существенно влияющие на результат оценки состояния объекта.

На основе регрессионного моделирования построены аналитические модели для заданной функции принадлежности. Результаты регрессионного моделирования пригодны для построения прогностических моделей в рамках соответствующих экспертных геоинформационных систем.

## Список литературы

- [1] Акимов В.А., Новиков В.Д., Радаев Н.Н. Природные и техногенные чрезвычайные ситуации: опасности, угрозы, риски. М.: ЗАО ФИД "Деловой экспресс", 2001. 343 с.
- [2] Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Региональные проблемы безопасности. Красноярский край / С.П. Воронов, В.В. Москвичев и др. М.: МГФ Знание, 2001. 574 с.
- [3] Воронов С.П., Николаев В.А., Ничепорчук В.В. и др. Проблемы прогнозирования и предупреждения ЧС, вызванных весенними паводками в Красноярском крае // Тр. Первой Всерос. конф. по финансово-актуарной математике и смежным вопросам. Красноярск: ИВМ СО РАН, 2002. С. 56–67.
- [4] Ноженкова Л.Ф. Применение гибридных технологий интеллектуальной поддержки принятия решений по предупреждению и ликвидации ЧС // Природно-техногенная безопасность Сибири: Тр. науч. мероприятий. Красноярск: ИВМ СО РАН, 2001. Т. 1. С. 305–311.
- [5] Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 165 с.
- [6] Ягер Р. Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения. М.: Радио и связь, 1986. 406 с.
- [7] Оценка риска цунами и сейсмического риска береговых зон Сахалинской области / Г.Л. Кофф, Б.В. Левин, Е.Н. Морозов, О.В. Барсукова. М.; Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2005. 61 с.
- [8] Носков М.В., Симонов К.В., Щемель А.Л. Нелинейная многопараметрическая регрессия данных наблюдений // Вопр. мат. анализа. Красноярск: ИЦП КГТУ, 2003. Вып. 7. С. 103–120.

*Поступила в редакцию 15 сентября 2006 г.*