

УДК 510.22

## Оценка риска и ущерба от наводнений на основе нечетких множеств

М.В. Носков<sup>а</sup>,

К.В. Симонов<sup>б</sup>, С.В. Кириллова<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Сибирский федеральный университет,  
Россия 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79

<sup>б</sup> Институт вычислительного моделирования СО РАН,  
Россия 660036, Красноярск, Академгородок <sup>1</sup>

Received 5.04.2011, received in revised form 12.04.2011, accepted 19.04.2011

*Предложена методика оценки состояния гидротехнического объекта и побережья, подверженных воздействию наводнений различной природы, с использованием теории нечетких множеств и нелинейной многопараметрической регрессии. Выделены основные признаки, определяющие состояние объекта в результате наводнений. Определена лингвистическая переменная «состояние повреждения». На основе регрессионного моделирования данных построены аналитические модели для заданных функций принадлежности. Приведен пример, иллюстрирующий методику получения количественной оценки состояния повреждения объекта по нечетким данным. Предложенная методика является основой систем принятия решения в службах контроля опасных природных процессов. Получаемые оценки состояния гидротехнического объекта возможно использовать для моделирования риска с целью решения задачи зонирования прибрежной территории.*

*Ключевые слова: нечеткое множество, риск, ущерб, наводнение, состояние повреждения, лингвистическая переменная, нечеткая переменная, нелинейная многопараметрическая регрессия.*

### 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 взаимосвязано анализируют в системах поддержки принятия решений. Комбинация этих мер, адекватная изучаемой кризисной ситуации, дает экспертную оценку уровня опасности и выдает решения на последующие действия, т. е. процедуру управления риском. Указанная выше комбинация мер представляет собой меру опасности, называемую риском ЧС [1-3].

При исследовании воздействий от наводнений и оценке показателя риска одна из наиболее сложных задач заключается в количественном описании повреждений уникальных гидротехни-

\* Corresponding author E-mail address: SVKirillova@rambler.ru

<sup>1</sup> © Siberian Federal University. All rights reserved

ческих сооружений. 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, 5].

При решении таких 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 [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 так далее. В работе [7] этот подход применен для описания состояния объектов в результате сейсмического воздействия.

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 [8]. Важным моментом оценки состояния повреждения объекта служит и количественная оценка ущерба. 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. Отметим ряд зарубежных исследований, где рассматриваются подходы для оценки экологических рисков [9-14], а также решение указанных экологических задач на основе применения нечетких множеств [15,16] и нейросетевых технологий [17-23].

В работе дано описание методики оценки состояния гидротехнического объекта, подверженного воздействию наводнений различной природы (морских наводнений или наводнений от весенних паводков), с использованием теории нечетких множеств. Предложенную методику можно рассматривать как элемент экспертных систем зонирования прибрежных территорий, предназначенный для оценки ожидаемого ущерба от наводнения и, следовательно, вероятного риска [24,25].

### **1. Модели оценки риска и состояния повреждения объекта**

При выборе участка береговой территории для строительства гидротехнического объекта естественно рассматривать риск наводнения для проектируемого объекта  $R(x)$  как один из критериев оптимизации [26]:

$$R(x) = P_x(H) \cdot P_x(U/H) \rightarrow \min_x, \quad (1)$$

где  $x$  – условный порядковый номер участка береговой территории;  $P_x(H)$  – вероятность опасности наводнений для зоны  $x$ ;  $P_x(U/H)$  – вероятность ущерба при реализации опасности для проектируемого объекта, расположенного в зоне  $x$ .

Для оценки ущерба от наводнения возникает задача оценки уязвимости (или состояния повреждения) гидротехнического объекта по отношению к этому неблагоприятному явлению. Процедура оценки уязвимости предполагает выполнение следующих этапов:

- классификацию объектов риска по их состоянию, структуре и свойствам, определяющим в совокупности характер реакции на воздействие неблагоприятных факторов;
- экономическую классификацию 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.

Как было замечено выше, при решении задачи оценки повреждения объекта многим входным данным невозможно сопоставить количественное значение, часто они определяются качественными признаками. Входные данные содержат в себе неопределенность и неоднозначность, обусловленную субъективностью оценки экспертов. Например, известно, что уязвимость объекта зависит от геологических условий участка, где он размещается, но разбиение исследуемой территории на относительно одинаковые по геологическим характеристикам зоны можно проинформировать только условно. При этом возможные состояния повреждения объекта также важно определить как примеры нечетких множеств.

Нечеткое множество представляет собой совокупность элементов различной природы, относительно которых нельзя с полной определенностью утверждать, принадлежит тот либо иной элемент рассматриваемой совокупности данному множеству или нет [27].

*Нечетким множеством* называется совокупность упорядоченных пар или кортежей  $A = \{ \langle x | \mu_A(x) \rangle \}$ , где  $x$  – элемент некоторого универсального множества или универсума  $X$ , а  $\mu_A(x)$  – функция принадлежности, которая ставит в соответствие каждому  $x \in X$  некоторое действительное число из замкнутого интервала  $[0, 1]$ , т.е. данная функция определяется в форме отображения:

$$\mu_A(x): X \rightarrow [0, 1].$$

*Нечеткая переменная* определяется как кортеж:  $\langle \alpha, X, A \rangle$ , где  $\alpha$  – наименование нечеткой переменной;  $X$  – область ее определения (универсум);  $A = \{ \langle x | \mu_A(x) \rangle \}$  – нечеткое множество на  $X$ , описывающее возможные значения, которые может принимать нечеткая переменная  $\alpha$ .

*Лингвистическая переменная* определяется как кортеж:  $\langle \beta, T, X, G, M \rangle$ , где  $\beta$  – наименование лингвистической переменной;  $T$  – базовое терм-множество лингвистической переменной или множество ее значений (термов), каждое из которых представляет собой наименование отдельной нечеткой переменной  $\alpha$ ;  $X$  – область определения (универсум) нечетких переменных, которые входят в определение лингвистической переменной  $\beta$ ;  $G$  – некоторая синтаксическая процедура, которая описывает процесс образования из множества  $T$  новых, осмысленных в рассматриваемом контексте значений для данной лингвистической переменной (например, с

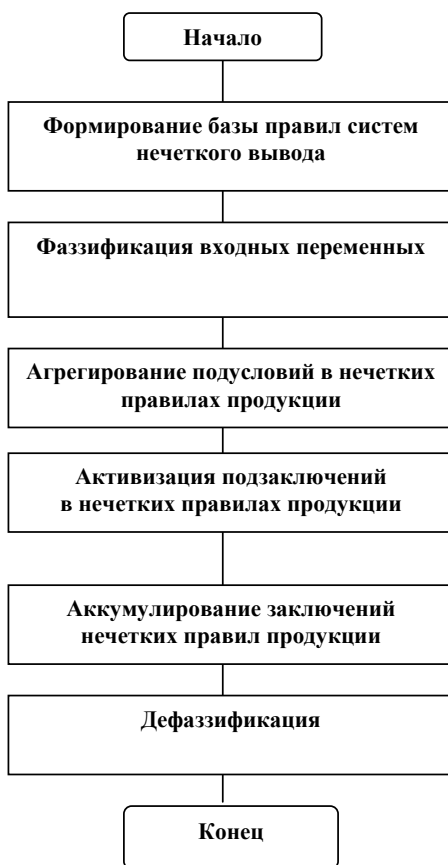


Рис. 1. Основные этапы алгоритма нечеткого вывода

помощью логических связок «И», «ИЛИ» и модификаторов типа «ОЧЕНЬ», «СЛЕГКА» и др.);  $M$  – семантическая процедура, которая позволяет поставить в соответствие каждому новому значению данной лингвистической переменной, получаемому с помощью процедуры  $G$ , некоторое осмысленное содержание посредством формирования соответствующего нечеткого множества.

На основе этих понятий строится процедура нечеткого логического вывода, которая реализуется в экспертных системах и используется для принятия решений в многокритериальных задачах, когда информация задана в виде нечетких правил [28]. Алгоритм нечеткого вывода показан на рис. 1.

В конце алгоритма (процедура дефаззификации) определяются количественные значения выходных переменных по одному из следующих методов.

*Метод центра тяжести.* Центр тяжести или центроид площади рассчитывается по формуле

$$y = \frac{\int_{Min}^{Max} x \cdot \mu(x) dx}{\int_{Min}^{Max} \mu(x) dx}, \quad (2)$$

где  $y$  – результат дефаззификации;  $x \in X$  ( $X$  – область определения нечетких переменных, которые входят в определение лингвистической переменной  $\omega$ );  $\mu(x)$  – функция принадлежности нечеткого множества, соответствующего выходной переменной  $\omega$  после этапа аккумуляции;  $Min$  и  $Max$  – левый и правый концы интервала носителя нечеткого множества рассматриваемой выходной переменной  $\omega$ .

*Метод центра тяжести для одноточечных множеств.* Центр тяжести для одноточечных множеств рассчитывается по формуле

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot \mu(x_i)}{\sum_{i=1}^n \mu(x_i)}, \quad (3)$$

где  $n$  – число одноточечных (одноэлементных) нечетких множеств, каждое из которых характеризует единственное значение рассматриваемой выходной лингвистической переменной.

*Метод центра площади.* Центр площади равен  $y = u$ , где значение  $u$  определяется из уравнения

$$\int_{Min}^u \mu(x) dx = \int_u^{Max} \mu(x) dx. \quad (4)$$

Таким образом, предлагаемый подход позволяет получать количественную оценку характеристики объекта, если исходная информация задана нечетко.

## 2. Оценка состояния повреждения объекта

### 2.1. Формирование базы правил систем нечеткого вывода

Рассмотрим пример количественной оценки состояния повреждения объекта по нечетким данным. Признаки, определяющие состояние объекта в результате наводнений, можно разделить на следующие группы.

Множество признаков на основе визуального осмотра объекта экспертами:  $A1$  – наличие деформаций и трещин в балках, соединениях полов, потолков, внешних и внутренних стен, дверей, окон, лестниц, несущих перегородок.

Множество признаков, получаемых из данных наблюдений о наводнениях:  $A2$  – изменение характеристик водного протока при воздействии на здания;  $A3$  – изменение характеристик грунта при воздействии наводнений;  $A4$  – общее поглощение и рассеяние энергии потока во время наводнения.

Множество признаков из справочной информации об объекте:  $A5$  – строительный материал;  $A6$  – высота и число этажей;  $A7$  – характеристика фундамента и грунта;  $A8$  – возраст сооружения.

Некоторые из признаков могут быть определены численно, другие задаются лингвистически (словесно). Однако при предположении о неточности и (или) субъективности исходных данных будем считать, что каждому признаку соответствует лингвистическая переменная.

Лингвистически можно определить пять общих состояний повреждения:

«нет» – отсутствие повреждений или незначительные неструктурные повреждения;

«легкое» – небольшие локализованные неструктурные повреждения (трещины, отколы, смещение перегородок, повреждение окон и дверей);

«умеренное» – повсеместные, значительные неструктурные повреждения, легко устранимые структурные повреждения (разрыв в несущих стенах, массовое повреждение имущества);

«сильное» – большие структурные повреждения, возможно полные неструктурные повреждения (обвалы, разрушения и перемещение сооружений);

«разрушительное» – полное разрушение здания с потерей формы.

Эмпирические знания о рассматриваемой проблемной области могут быть представлены в форме эвристических правил, которые применяются в случае оценки состояния повреждения объекта. Например:

- если наблюдается большое количество деформаций и трещин в балках, соединениях полов, потолков, внешних и внутренних стен, дверей, окон, лестниц, несущих перегородок и здание старое, то состояние повреждения будет разрушительное;
- если наблюдается среднее количество деформаций и трещин в балках, соединениях полов, потолков, внешних и внутренних стен, дверей, окон, лестниц, несущих перегородок и здание старое, то состояние повреждения будет сильное;
- если наблюдается большое количество деформаций и трещин в балках, соединениях полов, потолков, внешних и внутренних стен, дверей, окон, лестниц, несущих перегородок и здание новое, то состояние повреждения будет сильное, и т.д.

Эта информация может использоваться при построении базы правил системы нечеткого вывода, которая позволяет оценить состояние повреждения. Но подобная база правил дает возможность получить количественную оценку состояния повреждения после наводнения, что, в общем, не маловажно для оценки и анализа риска, но практически непригодна для задачи проектирования.

Выбор оптимального участка береговой территории для строительства объекта производится в условиях, когда результаты наводнения только предвидятся и, следовательно, информации о таком признаке, как, например, «наличие деформаций», быть не может. В этом случае для оценки состояния повреждения возможно использование признаков, характеризующих:

- качество (устойчивость) постройки;
- геологические условия размещения объекта;
- процесс наводнения.

Для формирования базы правил систем нечеткого вывода предварительно определим входные и выходные лингвистические переменные и соответствующие им термы-множества, а также области определения (универсумы) нечетких переменных, которые входят в определение соответствующих лингвистических переменных.

Входными лингвистическими переменными являются:  $\beta_1$  – «наличие деформации» и  $\beta_2$  – «возраст сооружения».

Обозначим через  $T_1$  множество значений лингвистической переменной  $\beta_1$ :  $T_1 = \{\text{«нет»}, \text{«мало»}, \text{«среднее»}, \text{«много»}\}$ . Область определения (универсум) нечетких переменных, которые входят в определение лингвистической переменной  $\beta_1$ , следующая:  $X_1 = \{x^1 \in R \mid 0 \leq x^1 \leq 100\}$  ( $x^1 \in X_1$  определяется как процент поврежденной площади поверхности объекта).

$T_2$  – множество значений лингвистической переменной  $\beta_2$ :  $T_2 = \{\text{«новое»}, \text{«примерно 25 лет»}, \text{«примерно 50 лет»}, \text{«примерно 75 лет»}, \text{«старое»}\}$ . Универсум для  $\beta_2$ :  $X_2 = \{x^2 \in R \mid x^2 \geq 0\}$ , где  $x^2 \in X_2$  определяется как возраст сооружения в годах.

Выходной лингвистической переменной является  $\beta$  – «состояние повреждения». Множество значений  $\beta$ :  $T = \{\text{«нет»}, \text{«легкое»}, \text{«умеренное»}, \text{«сильное»}, \text{«разрушительное»}\}$ . Универсум для  $\beta$ :  $X = \{x \in R \mid 0 \leq x \leq 16\}$  ( $x \in X$  определяется как общее повреждение объекта в условной шестнадцатибальной шкале).

Функции принадлежности для нечетких переменных из  $T_1$  имеют следующий вид:  

$$\mu^1(x; a, b, c) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-c}{a} \right|^{2b}}$$
 – колоколообразная функция, где  $a, b, c$  – параметры, определяющие

нечеткую переменную.

Функции принадлежности для нечетких переменных из  $T_2$  таковы:  

$$\mu^2(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases}$$
 – треугольная функция, где  $a, b, c$  – параметры, определяющие

нечеткую переменную.

Заметим, что функции принадлежности нечетких переменных могут быть заданы аналитически либо таблично (если известны значения функции принадлежности только для некоторых фиксированных элементов универсального множества). В нашем примере функции принадлежности для значений лингвистических переменных  $\beta_1$  и  $\beta_2$  заданы аналитически (рис. 3, 4), а для значений  $\beta$  – табличным способом (рис. 2).

Далее построим базу нечетких лингвистических правил. В нашем примере система нечеткого вывода, соответствующая эвристическим правилам, обозначенным выше, будет содержать три правила нечетких продукций следующего вида:

*Правило 1.* Если  $\beta_1$  есть «много» и  $\beta_2$  есть «старое», то  $\beta$  есть «разрушительное».

*Правило 2.* Если  $\beta_1$  есть «среднее» и  $\beta_2$  есть «старое», то  $\beta$  есть «сильное».

*Правило 3.* Если  $\beta_1$  есть «много» и  $\beta_2$  есть «новое», то  $\beta$  есть «сильное».

## 2.2. Построение аналитических моделей для функций принадлежности

Рассмотрим процедуру построения аналитических моделей для функций принадлежности, заданных таблично, с помощью программного комплекса «Модели», в основе которого лежит регрессионное моделирование данных [29]. Процедура состоит из следующих этапов.

1. Производится предварительное преобразование данных:

$$y_i = \ln(\mu_i), \quad (5)$$

где  $\mu_i$  – значение функции принадлежности в точке  $x_i$ .

2. Строится с помощью программного комплекса аналитическая модель в виде:

$$y(x_i) = b + c \sum_{j=1}^M \sin(\varphi_j + \omega_j x_i), \quad (6)$$

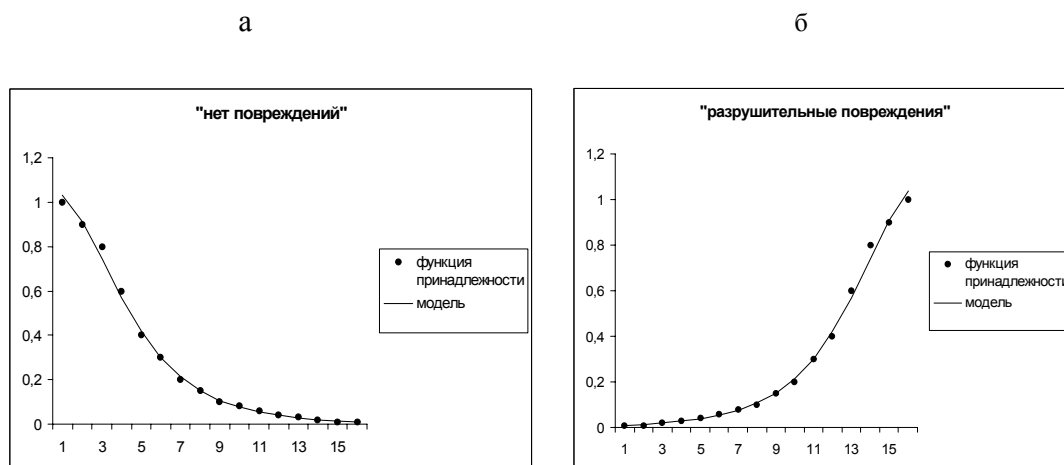


Рис. 2. Значения лингвистической переменной  $\beta$  – «состояние повреждения»: а – нечеткое множество значения «нет»  $\mu = \exp\{-7,94 + 13,6 \cdot [\sin(1,77 - 0,13x) + \sin(-2,92 + 0,17x) + \sin(-0,17 + 0,14x)]\}$ ; б – нечеткое множество значения «разрушительное»  $\mu = \exp\{-9,69 - 16,63[\sin(-0,03 - 0,12x) + \sin(-1,42 - 0,16x) + \sin(0,86 + 0,17x)]\}$

где  $y$  – выход;  $x$  – вход;  $b, c, \varphi_j, \omega_j$  – подстраиваемые параметры ( $j = \overline{1, M}$ );  $M$  – количество гармоник аппроксимирующей функции.

Аналитическая модель строится из условия минимизации функционала:

$$H = \sum_{i=1}^n \left( y(x_i, \vec{p}) - y_i \right)^2, \quad (7)$$

где  $n$  – количество точек;  $\vec{p}$  – вектор подстраиваемых параметров.

3. Производится обратное преобразование. В результате функция принадлежности имеет вид

$$\mu = \exp\left(b + c \sum_{j=1}^M \sin(\varphi_j + \omega_j x)\right). \quad (8)$$

Примеры результатов регрессионного моделирования функций принадлежности для термов лингвистической переменной «состояние повреждения» представлены на рис. 2 а, б.

### 2.3. Алгоритм нечеткого вывода

*Фаззификация входных переменных.* На рис. 3–5 приведены графики конкретных функций принадлежности для отдельных лингвистических термов (значений) соответствующих лингвистических переменных  $\beta_1$  – «наличие деформации» (рис. 3),  $\beta_2$  – «возраст сооружения» (рис. 4) и  $\beta$  – «состояние повреждения» (рис. 5). При этом наличие деформации определяется как процент поврежденной площади поверхности объекта, возраст сооружения приводится в годах, а состояние повреждения оценивается в условной шестнадцатibalльной шкале.

Используя в качестве алгоритма вывода алгоритм Мамдани [28], рассмотрим пример его выполнения для случая, когда наличие деформации 70 %, а возраст сооружения составляет 92 года. В этом случае фаззификация (процедура нахождения значений функции принадлежности

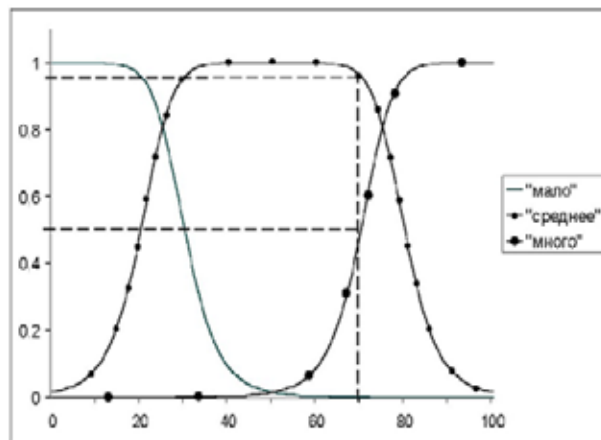


Рис. 3. Графики функций принадлежности для термов входной лингвистической переменной  $\beta_1$  – «наличие деформации»

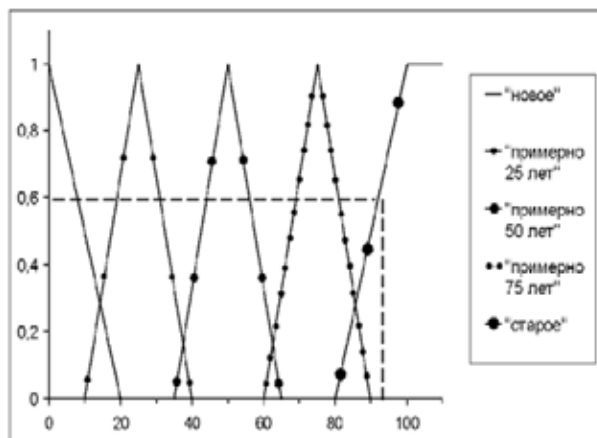


Рис. 4. Графики функций принадлежности для термов входной лингвистической переменной  $\beta_2$  – «возраст сооружения»

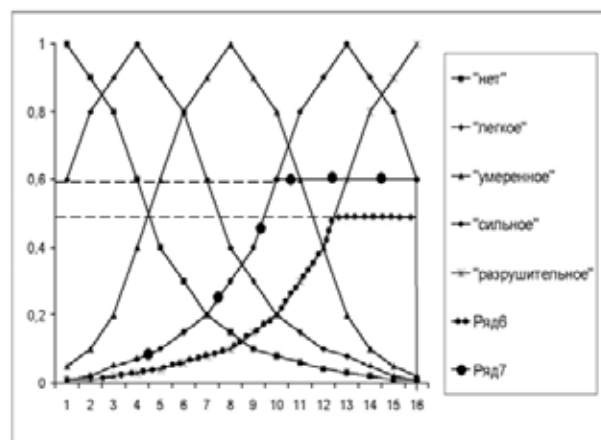


Рис. 5. График функции принадлежности для термов выходной лингвистической переменной  $\beta$  – «состояние повреждения»

термов на основе обычных, не нечетких, исходных данных) первой входной лингвистической переменной приводит к значению степени истинности 0,96 для термина «среднее» и 0,5 для термина «много» (рис. 3), а фаззификация второй лингвистической переменной приводит к значению истинности 0,6 для термина «старое» (рис. 4). Соответствующие подусловия используются в правилах нечетких продукций с номерами 1 и 2. Эти правила считаются активными и используются в текущем процессе нечеткого вывода.

Следующий этап нечеткого вывода: *агрегирование* – процедура определения степени истинности условий по каждому из правил системы нечеткого вывода. Условия правил 1 и 2 состоят из подусловий, связанных логическим «И», следовательно, при агрегировании используется операция *min*-конъюнкция. Агрегирование подусловий правила 1 дает в результате число 0,5, а агрегирование подусловий правила 2 – число 0,6.

Далее проводится процедура нахождения степени истинности каждого из подзаключений правил нечеткой продукции – *активизация*. Поскольку все заключения правил заданы в форме нечетких лингвистических высказываний вида: « $\omega$  есть  $\alpha$ », где  $\omega$  – наименование лингвистической переменной,  $\alpha$  – ее значение, а весовые коэффициенты правил по умолчанию равны 1, то активизация правил 1 и 2 приводит к двум нечетким множествам, представленным на рис. 5 (правило 1 – ряд 6, правило 2 – ряд 7).

Следующий этап: *аккумуляирование (аккумуляция)* – процедура нахождения функции принадлежности для каждой из выходных лингвистических переменных. Аккумуляирование заключений нечетких правил продукции с использованием операции *max*-дизъюнкции для правил 1 и 2 приводит в результате к нечеткому множеству, функция принадлежности которого изображена на рис. 5 (ряд 7).

Заключительным этапом является *дефаззификация* – процедура нахождения обычного (не нечеткого) значения для каждой из выходных лингвистических переменных. Дефаззификация выходной лингвистической переменной «общее повреждение» методом центра тяжести для одноточечных множеств (3) приводит к значению выходной переменной, равной 11,61 баллам степени разрушения. Если использовать построенные аналитические функции принадлежности для термов лингвистической переменной «состояние повреждения», то для дефаззификации выходной лингвистической переменной можно воспользоваться методом центра тяжести (2) и методом центра площади (4). В этом случае получаем значения, равные 11,33 и 11,72 балла соответственно.

В результате имеем количественные оценки состояния повреждения гидротехнического объекта при наводнении. Предложенную методику можно рассматривать как элемент экспертной системы, предназначенный для выполнения зонирования прибрежных территорий и оценки риска. Таким образом, эксперт, используя предложенную методику оценки состояния гидротехнического объекта и оценивая стоимость объекта и вероятность возникновения наводнения, определяет риск для проектируемого строения (либо для уже имеющихся объектов) на некотором участке побережья за определенное время  $\Delta t$ :

$$R_x(\Delta t) = P_x(H) \cdot S(x, k) \cdot v(x, k, H), \quad (9)$$

где  $x$  – условный порядковый номер участка береговой территории;  $P_x(H)$  – вероятность опасности наводнений для зоны  $x$ ;  $S(x, k)$  – нормированная стоимость объекта, зависящая от участ-

ка строительства  $x$  и некоторого набора характеристик объекта  $k$ ;  $v(x, k, H)$  – нормированная оценка состояния повреждения объекта при реализации опасности.

Процедура моделирования риска с целью принятия решения о выборе участка для строительства объекта может быть следующей:

- задается период прогноза  $\Delta t$  (например, 100 лет);
- определяется максимальная опасность наводнения (максимальная высота волны) для каждого участка  $x$  за  $\Delta t$ ;
- оценивается состояние повреждения объекта при реализации опасности (по каждому участку  $x$ );
- оценивается риск для проектируемого объекта на каждом альтернативном участке.
- производится выбор участка.

Если эксперт делает вывод о том, что риск неприемлемо высок, то ему предоставляется возможность смоделировать различные ситуации: например, улучшать состояние повреждения при наводнении путем изменения технологии строительства, материалов и т.д., а затем рассчитать новые риски и принять решение.

### Заключение

Таким образом, предложена методика оценки состояния гидротехнического объекта на основе теории нечетких множеств и нелинейной многопараметрической регрессии.

Методика состоит из следующих этапов:

- выделение признаков, определяющих состояние объекта в результате наводнений, и определение соответствующих им лингвистических переменных;
- определение лингвистической переменной «состояние повреждения»;
- построение аналитических моделей для функций принадлежности, заданных таблично, применяя нелинейную многопараметрическую регрессию;
- построение базы нечетких лингвистических правил;
- использование в качестве алгоритма вывода алгоритм Мамдани.

Результатом является количественная оценка общего повреждения гидротехнического объекта.

Методика может составить основу систем принятия решения в службах контроля опасных природных процессов.

Получаемые оценки состояния гидротехнического объекта можно использовать для моделирования риска для решения задачи зонирования прибрежной территории.

*Статья подготовлена и публикуется при поддержке Программы развития Сибирского федерального университета.*

### 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. Акимов, В.А., Лесных, В.В., Радаев, Н.Н. Основы анализа и управления риском в природных и техногенной сферах. М.: ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2004. 352 с.

3. Кузьмин, И.И., Махутов, Н.А., Хетагуров, С.В. Безопасность и риск: эколого-экономические аспекты. СПб.: Изд-во СПбГУЭФ, 1997. 164 с.
4. 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.
5. Ноженкова, Л.Ф. Применение гибридных технологий интеллектуальной поддержки принятия решений по предупреждению и ликвидации ЧС // Природно-техногенная безопасность Сибири: Труды научных мероприятий. Красноярск: ИВМ СО РАН, 2001. Т. 1. С. 305 – 311.
6. Заде, Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 165 с.
7. Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения / Под ред. Р.Р. Ягер. М.: Радио и связь, 1986. С. 405.
8. Пентл, Р. Методы системного анализа окружающей среды. М.: Мир, 1981.
9. Alcamo, J. The GLASS model: A strategy for quantifying global environmental security / J. Alcamo, M.B. Endejan, F. Kaspar., T. Rösch // *Environmental Science and Policy*, 4 (1). 2002. P. 1-12.
10. Van Leeuwen, C.J. Ecological risk assessment: An input for decision-making / C.J. Van Leeuwen // *Environmental Management*, 21. 1997. P. 812-816.
11. Bartell, S.M. Ecological risk assessment: Progressing through experience or stalling in debate / S.M. Bartell // *Environmental Management*, 21. 1997. P. 822-825.
12. Adams, S.M. Assessing the current status of ecological risk assessment / S.M. Adams, M Power // *Environmental Management*, 21. 1997. P. 825-830.
13. Suter II, G.W. Generic assessment endpoints are needed for ecological risk assessment / G.W. Suter II // *Risk Analysis*, 20 (2). 2000. P.173-178.
14. Serveiss, V.B. Applying ecological risk principles to watershed assessment and management / V.B. Serveiss // *Environmental Management*, 29 (2). 2002. P.145-154.
15. Yin, Y.Y. Fuzzy relation analysis for multicriteria water resources management / Y.Y. Yin, G.H. Huang, K.W. Hipel // *Journal of Water Resources Planning and Management*, 125 (1). 1999. P.41-47.
16. Kasabov, N. (1996) Foundations of Neural Networks, Fuzzy Systems and Knowledge Engineering / N. Kasabov // MIT Press, CA, MA. 1996.
17. Ultsch, A. Kohonen's self organizing feature maps for exploratory data analysis / A. Ultsch, H.P. Siemon // *Proceedings of the INNC'90 International Neural Network Conference*. – 1990. P. 305-308.
18. Kohonen, T. Self-organizing maps of symbol strings / T. Kohonen, P. Somervuo // *Neurocomputing*, 21 (1-3). 1998. P.19-30.
19. Kohonen, T. Self-Organizing Maps / T. Kohonen. Springer, Berlin. 2001.
20. Gevrey, M. Estimating risk of events using SOM models: A case study on invasive species establishment / M. Gevrey, S. Worner, N. Kasabov, J. Pitt, J.L. Giraudel // *Ecological Modelling*. Volume 197, Issue 3-4, 25 August 2006. P. 361-372.
21. Chon, T.-S. Patternizing communities by using an artificial neural network / T.-S. Chon, Y.S. Park, K.H. Moon, E.Y. Cha // *Ecological Modelling*, 90 (1). 1996. P.69-78.

22. Maier, H.R. Neural networks for the prediction and forecasting of water resources variables: A review of modelling issues and applications / H.R. Maier, G.C. Dandy // *Environmental Modelling and Software*, 15 (1). 2000. P. 101-124.
23. Park, Y.-S. Applications of artificial neural networks for patterning and predicting aquatic insect species richness in running waters / Y.-S. Park, R. Céréghino, A. Compin, S Lek // *Ecological Modelling*, 160 (3). 2003. P. 265-280.
24. Кириллова, С.В., Носков, М.В., Симонов, К.В. Моделирование риска и ущерба от наводнений на основе нечетких множеств // *Вычислительные технологии*. 2006. Т. 11. С. 51-58.
25. Бурцев, А.А., Ничепорчук, В.В., Симонов, К.В. Оценка рисков аварийных ситуаций на гидроэлектростанциях Красноярского края // *Журнал Сибирского федерального университета. Серия «Техника и технологии»*. 2008. Т. 1. №2. С. 207-218.
26. Оценка риска цунами и сейсмического риска береговых зон Сахалинской области / Г.Л. Кофф, Б.В. Левин, Е.Н. Морозов, О.В. Борсукова. М. – Южно – Сахалинск, 2005. 61 с.
27. Кофман, А. Введение в теорию нечетких множеств: Пер. с франц. М.: Радио и связь, 1982. 432 с.
28. Леоненков, А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 736 с.
29. Носков, М.В., Симонов, К.В., Щемель, А.Л. Нелинейная многопараметрическая регрессия данных наблюдений // *Вопросы математического анализа*. Красноярск: ИЦП КГТУ, 2003. Вып. 7. С. 103–120.

## **Risk and Damage Estimation from Floods Based on Fuzzy Sets Theory**

**Michael V. Noskov<sup>a</sup>,  
Konstantin V. Simonov<sup>b</sup> and Svetlana V. Kirillova<sup>a</sup>**

<sup>a</sup>*Siberian Federal University,*

*79 Svobodny, Krasnoyarsk 660041 Russia*

<sup>b</sup>*Institute of Computational Modeling SB RAS, ICM SB RAS,  
Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia*

---

*An estimation method for the status of the hydrotechnical object and coast prone to floods of different origin is proposed using the fuzzy sets theory and nonlinear multiparameter regression. The basic signs defining a status of the object as a result of flooding are allocated. The linguistic variable "status of damage" is defined. On a basis of regression data simulations analytical models for the prescribed membership functions are constructed. The example illustrating the method of reception a quantitative estimation of a status of damage for object using the fuzzy data is offered. The proposed methodology is the basis for decision-making systems in control services of dangerous natural processes. Received estimations of a status of hydrotechnical object may be use for risk simulation in the problem of zoning the coastal territory.*

*Keywords: Fuzzy set, risk, damage, flood, status of damage, linguistic variable, fuzzy variable, nonlinear multiparameter regression.*

---