

УДК 551.515.9 + 519.816

О.С. Бутенко<sup>1</sup>, М.В. Буряченко<sup>1</sup>, Л.С. Весельская<sup>1</sup>, Р.Э. Пащенко<sup>2</sup><sup>1</sup> *Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков*<sup>2</sup> *Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРА (МАСШТАБОВ) ПАВОДКОВЫХ НАВОДНЕНИЙ ПРИ НЕЧЕТКОМ ОПИСАНИИ ФАКТОРОВ ВЛИЯНИЯ

*Рассмотрена возможность применения теории нечетких множеств для решения задачи определения характера паводковых наводнений. Введено нечеткое описание факторов влияния на масштабы паводкового наводнения. На основе такого описания разработан метод принятия решения при определении масштабов паводковых наводнений. Приведены результаты определения характера паводковых наводнений при четырех различных наборах значений факторов влияния на наводнения. Показано, какие нечеткие значения факторов влияния определяют масштабы наводнения.*

**Ключевые слова:** паводковое наводнение, масштаб наводнения, нечеткое описание, фактор влияния.

### Постановка проблемы и анализ литературы

Анализ повторяемости, площади распространения и суммарного среднего годового материального ущерба, причиняемого наводнениями, показывает, что они занимают одно из первых место в ряду стихийных бедствий, происходящих в целом на планете, и в Украине в частности.

Наводнения возникают во время половодья и паводков, т.е. при подъеме уровня воды весной от таяния снегов и осенью вследствие ливневых дождей, от скопления льда при ледоходах, уменьшающих площадь сечения реки, от интенсивного таяния ледников и снежного покрова, расположенных высоко в горах, а также во время ветров с моря (нагонные наводнения). Кроме того, затопления могут возникать в результате образования завалов или перемычек на реках во время землетрясений, горных обвалов или селевых потоков, при воздействии гравитационных волн подводного землетрясения, а также при прорыве плотин. В данной работе под паводковым наводнением будем понимать интенсивный, сравнительно кратковременный, подъем уровня воды, формируемый сильными дождями, как это определено в [1].

В настоящее время при определении масштабов наводнений, в основном, оцениваются два фактора – это площадь затопления земной поверхности (1) и материальный ущерб (2), причиненный наводнением, в том числе и количество человеческих жертв. При этом рассматриваются четыре класса наводнений (по масштабу) [1]:

низкие (малые) наводнения, которые наносят незначительный материальный ущерб и почти не влияют на жизнь населения;

высокие наводнения, при которых происходит значительное затопление сравнительно больших участков земной поверхности и существенно влияющих на жизнь населения;

выдающиеся наводнения, охватывающие целые речные бассейны, и парализующие жизнь и хозяйственную деятельность населения, а также приносящие большой материальный ущерб;

катастрофические наводнения, которые вызывают затопления громадных территорий и приводят к громадным материальным убыткам, а также к гибели людей.

Фактически такой подход основан на оценке масштабов наводнения уже после его заключительной фазы (окончания наводнения), и не учитывает природных факторов, влияющих на характер наводнения, в его начальной и средней фазах.

Не отбрасывая приведенные выше два важных фактора в определении масштабов наводнений, целесообразно при оценке возможного характера наводнения учесть природные факторы влияния. Это позволит начать определение масштабов наводнения уже на начальной и особенно на средней фазах развития паводкового наводнения. Кроме того, такой подход позволит осуществить прогнозирование масштабов наводнения при различных наборах значений факторов влияния на наводнения, которые зависят от характеристик местности и осадков.

Задачу определения масштабов паводкового наводнения сформулируем следующим образом: при известных факторах влияния на паводковые наводнения необходимо принять решение о том, какой характер носит наводнение.

Определение масштабов наводнения основано на учете факторов влияния и степени их влияния на характер наводнений. Однако, численные значения степени влияния факторов определяются в условиях отсутствия необходимой статистики о степени их влияния на масштабы наводнений. Таким образом, в условиях нестохастической неопределенности факторов влияния их определение может происходить только на основе экспертных данных. Экспертиза может рассматриваться в нечеткой постановке. По-

этому представляет практический интерес рассмотрение возможности применения теории нечетких множеств для решения задачи определения масштабов паводковых наводнений.

Подход к формализации понятия нечеткого множества состоит в обобщении понятия принадлежности [2]. В обычной теории множеств существует несколько способов задания множества. Одним из них является задание с помощью характеристической функции. С точки зрения этой функции, нечеткие множества являются естественным обобщением обычных множеств, при отказе от бинарного характера этой функции и предположении, что она может принимать любые значения на отрезке  $[0,1]$ . В теории нечетких множеств характеристическая функция называется функцией принадлежности, а ее значение  $\mu_A(x)$  – степенью принадлежности элемента  $x$  нечеткому множеству  $A$ .

Более строго, нечетким множеством  $A$  называется совокупность пар [2]:

$$A = \{ \langle x, \mu_A(x) \rangle \mid x \in U \},$$

где  $\mu_A$  – функция принадлежности, т.е.  $\mu_A: U \rightarrow [0,1]$ .

**Цель статьи:** рассмотреть возможность применения теории нечетких множеств для решения задачи определения характера (масштабов) паводкового наводнения.

### Нечеткое описание факторов влияния на паводковое наводнение

Возникновение наводнений обуславливается наличием и значением определенных факторов влияния. К факторам, влияющим на наводнение и его масштабы, можно отнести:

географические факторы, определяемые наличием рек, озер, гор, долин, т.е. факторы, определяющие рельеф бассейна и величину уклона рек, а также увлажненность и водопроницаемость почвы;

атмосферные факторы – температура, давление, скорость и направление ветра, количество и интенсивность осадков, облачность;

временные и пространственные атмосферные факторы, к которым относятся продолжительность осадков, предшествующее выпадение осадков и площадь охвата осадками;

антропогенные факторы, характеризующиеся деятельностью человека (вырубка леса, разработка берегового песка, постройка гидросооружений).

К основным факторам, влияющим на возникновение и масштабы паводковых наводнений, прежде всего, относятся: количество осадков (1), их интенсивность (2) и продолжительность (3), водопроницаемость (4) и увлажненность почвы (5), величина уклона рек (6), площадь охвата осадками (7) и рельеф бассейна рек (8). Кратко рассмотрим характеристику этих факторов влияния.

Количество осадков (1) выражают в миллимет-

рах слоя воды, который образовался бы от выпадения осадков, если бы они не испарялись, не просачивались бы в почву и не стекали [3]. На территории Европы годовая сумма осадков колеблется от 1000 до 500 мм. Количество осадков также можно классифицировать следующим образом: слабые осадки (0,1 – 2 мм за 12 часов); умеренные осадки (3 – 14 мм за 12 часов); сильные осадки (15 – 49 мм за 12 часов); очень сильные осадки (больше 50 мм за 12 часов).

Интенсивность осадков (2) выражается в толщине слоя воды, выпадающей с осадками в единицу времени (мм/мин, мм/ч, мм/сут) [4]. Интенсивными (ливневыми) считаются осадки больше 3 мм/ч; умеренно интенсивными (обложными) – до 3 мм/ч и малой интенсивности (морозящими) – не превышающие 0,1 мм/ч. Строгой закономерности выпадения дождей разной интенсивности не наблюдается.

Продолжительность осадков (3) определяется в часах или минутах [4]. По времени выпадения осадки можно разделить на: кратковременные осадки общей продолжительностью менее 3 часов; продолжительные осадки – более 6 часов; временные осадки – 3 ÷ 6 часов. Установлена обратная пропорциональность между максимальной интенсивностью и продолжительностью осадков.

Водопроницаемость почвы (4) характеризуется тем количеством воды, которое впитывает почва с поверхности за единицу времени [5]. Выражают величину водопроницаемости почвы в мм или см водного столба в единицу времени. Если почва пропускает за 1 час более 1000 мм воды при напоре ее 5 см и температуре 10°C, водопроницаемость почвы считается провальной, от 1000 до 500 мм – излишней (высокой), от 500 до 100 мм – наилучшей, от 100 до 70 мм – хорошей, от 70 до 30 мм – удовлетворительной, меньше 30 мм – неудовлетворительной.

Увлажненность почвы (5) характеризуется коэффициентом увлажнения  $K_{увл}$ , который представляет собой отношение количества атмосферных осадков, выпадающих в данной местности, к испаряемости за один и тот же период (год, сезон, месяц) [6]. Такое отношение выражается в процентах, или в долях от единицы. Коэффициент увлажнения показывает либо избыточное увлажнение (больше единицы), если осадки превышают возможное при данной температуре испарение, либо различные степени недостаточного увлажнения (меньше единицы), если осадки меньше испаряемости.

Уклоном реки (6) называется отношение ее падения (в сантиметрах) к длине реки (в километрах) [7]. Величина уклона реки выражается в промилле или процентах. Уклоны подразделяют: на малые – меньше 0,002 промилле; средние – от 0,002 до 0,005 промилле; большие – от 0,005 до 0,015 промилле; очень большие – от 0,015 до 0,03 промилле.

Также установлено, что для разной интенсивности осадков характерны различные площади охвата

осадками (7). Так обложные осадки продолжают обычно в течение суток и более, и охватывают огромные территории, порядка сотен тысяч квадратных километров [3] (большая площадь охвата). Пространственная неоднородность ливневых осадков определяется структурой кучево-дождевых облаков, максимальные размеры конвективных ячеек в которых, редко превышает 100 км [3]. В этих пределах линейных размеров и формируется малая площадь охвата осадками.

Фактор влияния рельеф бассейна рек (8) можно разделить на две составляющие: рельеф и бассейн реки. Наибольшее влияние на масштабы паводкового наводнения оказывает рельеф, но и бассейн реки также важен для оценки характера наводнения. Рельеф бассейна рек можно разделить на: горный и равнинный. К равнинному рельефу можно отнести поверхности с высотой над уровнем моря до 500 м, а к горному – с высотой выше этой отметки. При анализе горного рельефа также важно определение вершин с максимальными высотами и характеристика склонов, их крутизна, наличие на них разломов, оврагов и т.д.

Под бассейном реки понимают территорию земной поверхности, с которой все поверхностные и грунтовые воды стекаются в данную реку, включая различные ее притоки [8]. Известно [9], что в системе Стралера-Философова элементарным бассейнам (их русла не имеют притоков) присваивается номер 1, они считаются руслами первого порядка. Второй порядок присваивается руслам после слияния двух водотоков первого порядка. Два водотока второго порядка, соединяясь, дадут начало руслу третьего порядка, два водотока третьего порядка при слиянии дадут начало реке четвертого порядка и т.д. Порядок бассейна рек в конечном итоге может влиять на площадь затопления, что необходимо учитывать при определении характера наводнения.

На практике статистическая информация о факторах влияния на паводковые наводнения сильно ограничена. Поэтому задачу определения масштабов наводнения надо рассматривать в условиях априорной неопределенности. В этих условиях определение масштабов паводкового наводнения можно осуществлять на основе проведения экспертизы и обработки экспертных данных. Подход к проведению экспертизы в условиях нечеткой постановки задачи и обработки полученных данных описан в [10].

При организации экспертизы решается задача принятия решений о выборе наиболее точной оценки масштаба наводнения  $M_{\text{опт}}$  из всего множества допустимых оценок значений  $M$  (классов наводнений). При формировании множества  $M$ , как правило, руководствуются обобщенными значениями факторов влияния, присущих различным классам наводнений. Однако, из-за отсутствия априорных данных об обобщенных значениях факторов влияния, эксперт такими значениями не руководствуется. Поэтому при определении масштабов наводнений (при

проведении экспертизы) используется множество оценок значений факторов влияния, которые доступны каждому из экспертов  $M_\ell$ . Для повышения точности прогнозной оценки система определения масштабов наводнений должна учитывать: информацию о значениях факторов влияния существующих классов наводнений  $M$ ; множества оценок значений факторов влияния  $M_\ell$ , доступные каждому эксперту; наличие связи между экспертами; наличие обратной связи; метод обработки экспертных данных.

Исходя из этого в системе определения масштабов наводнений может быть реализована такая схема экспертизы, в которой каждый  $\ell$ -й эксперт свое субъективное мнение о прогнозируемом значении фактора влияния на масштаб наводнения выражает в четкой постановке тремя оценками: отрицательной, наиболее ожидаемой и положительной. Дальнейшее повышение доверия к субъективным оценкам экспертов может заключаться в нечетких оценках прогнозных значений факторов влияния. Это реализуется тогда, когда каждый эксперт выражает свое мнение о прогнозируемом значении фактора влияния в виде нечеткого треугольного числа, функция принадлежности которого имеет вид [2]:

$$\mu_{A_k}(x) = \begin{cases} [x - (A_k - \varepsilon_1)] / \varepsilon_1, & A_k - \varepsilon_1 \leq x \leq A_k, \\ [(A_k + \varepsilon_2) - x] / \varepsilon_2, & A_k \leq x \leq A_k + \varepsilon_2, \\ 0, & 0 \leq A_k - \varepsilon_1, x \geq A_k + \varepsilon_2. \end{cases} \quad (1)$$

Графическое представление функции принадлежности факторов влияния показано на рис. 1.

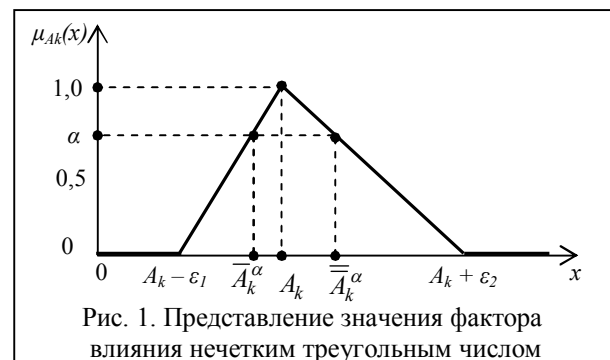


Рис. 1. Представление значения фактора влияния нечетким треугольным числом

Схема экспертиз предусматривает, что каждый  $\ell$ -й эксперт выражает свое субъективное мнение в виде трех значений  $A_k$ -м факторе влияния на масштаб наводнения, а именно:  $(A_k^\ell - \varepsilon_1^\ell)$  – отрицательная оценка (возрастающий участок треугольника);  $A_k^\ell$  – оценка, наиболее ожидаемая (вершина треугольника);  $(A_k^\ell + \varepsilon_2^\ell)$  – положительная оценка (спадающий участок треугольника). Потом эти оценки соответственно усредняются с учетом взвешивающих коэффициентов экспертов и получают описание  $A_k$ -го фактора влияния на масштаб наводнения.

Если выбрать значение функции принадлежности

$A_k$ -го фактора впливання, равное  $\alpha$  ( $\mu_{A_k}(x) = \alpha$ ), то опеределяются четкие  $\alpha$ -уровневые подмножества  $\{A_k^\alpha = \bar{A}_k^\alpha, \dots, \bar{\bar{A}}_k^\alpha\}$ , где  $\bar{A}_k^\alpha, \bar{\bar{A}}_k^\alpha$  – соответственно левая и правая границы значения  $A_k$ -го фактора влияния на масштаб наводнения. Исходя из содержания нечет-

кого подмножества  $A_k$ , эксперт выбирает  $\alpha \geq \alpha_{нд}$ , где  $\alpha_{нд}$  – уровень необходимого доверия прогнозных значений  $A_k$ -го фактора влияния на масштаб наводнения, например,  $\alpha_{нд}$  может определяться как  $\alpha_{нд} = 0,5$ .

Для определения масштаба наводнения по прогнозируемым значениям факторов влияния в нечеткой постановке, рассмотрим возможную декомпозицию проблемы в иерархию, которая представлена на рис. 2.

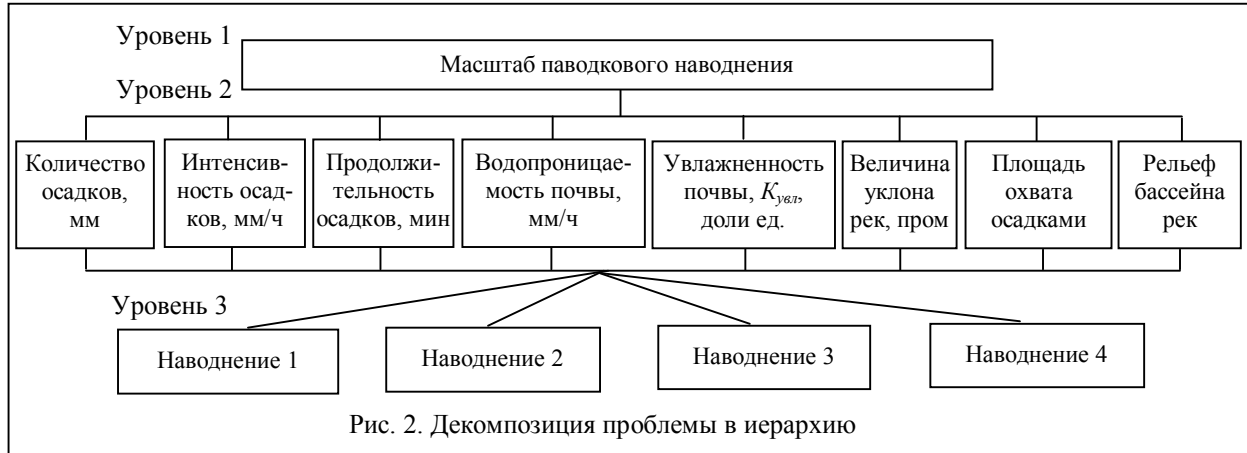


Рис. 2. Декомпозиция проблемы в иерархию

Как видно на рис. 2, декомпозиция проблемы в иерархию имеет три уровня: первый уровень характеризует цель, которая достигается при решении проблемы; второй уровень включает факторы влияния, по которым должно приниматься решение о масштабах наводнения; третий уровень определяет перечень альтернатив, которые, по мнению эксперта, составляет полное их множество.

Таким образом, при известных четырех наборах значений факторов влияния на паводковые наводнения (значения пересекаются) необходимо принять решение о характере (масштабе) наводнений.

При этом нечеткое прогнозируемое описание значений факторов влияния  $A_1, A_2, A_3$  имеет четко выраженную количественную природу и измеряется в соответствующих величинах, нечеткое прогнозируемое описание водопроницаемости и увлажнен-

ности почвы, а также величины уклона рек (факторы  $A_4, A_5$  и  $A_6$ ) может быть отнесено как к количественным, так и к качественным, а нечеткое прогнозируемое описание площади охвата осадками и рельефа бассейна рек (факторы  $A_7$  и  $A_8$ ) имеет, в основном, качественную природу.

Факторы, которые имеют количественную природу, будем прогнозировать в нечеткой постановке и прогнозные их значения описывать нечеткими треугольными числами. С использованием информации об основных факторах, влияющих на наводнение, определим (проведем экспертизу) диапазоны изменения степени влияния факторов на масштабы наводнений. В табл. 1 приведены четкие множества изменения значений факторов влияния при принятом уровне  $\alpha$  функций принадлежности для четырех классов масштабов наводнений.

Таблица 1

Значения факторов влияния на характер наводнения

Масштаб наводнения	Количество осадков, мм $A_1^\alpha$	Интенсивность осадков, мм/ч $A_2^\alpha$	Продолжительность осадков, мин $A_3^\alpha$	Водопроницаемость почвы, мм/ч $A_4^\alpha$	Увлажненность почвы, доли ед. $A_5^\alpha$	Величина уклона рек, пром $A_6^\alpha$
Наводнение 1 (Н1)	25, ..., 40	2, ..., 8	120, ..., 360	70, ..., 30	0,3 ..., 0,7	0,005, ..., 0,015
Наводнение 2 (Н2)	30, ..., 70	3, ..., 10	120, ..., 240	50, ..., 30	0,5, ..., 0,9	0,005, ..., 0,01
Наводнение 3 (Н3)	50, ..., 100	5, ..., 15	60, ..., 180	40, ..., 20	0,8, ..., 1,2	0,015, ..., 0,03
Наводнение 4 (Н4)	50, ..., 200	10, ..., 50	60, ..., 180	30, ..., 10	1,1, ..., 1,6	0,015, ..., 0,05

Как видно из анализа данных табл. 1, диапазоны изменения значений факторов влияния на наводнения пересекаются, и определить масштаб наводнения в этих условиях становится невозможно. По-

этому при обработке экспертных данных значения каждого фактора влияния на характер наводнения будем представлять нечетким подмножеством (нечетким треугольным числом).

Показатели, которые имеют качественную природу (площадь охвата осадками и рельеф бассейна рек), необходимо прогнозировать на основании введения соответствующих лингвистических переменных. Под лингвистической переменной понимают [11] кортеж  $\langle \beta, T(\beta), F, R \rangle$ , где  $\beta$  – название лингвистической переменной;  $T(\beta)$  – терм-множество лингвистической переменной;  $F$  – синтаксическое правило, которое порождает название нечеткой переменной  $\gamma \in T(\beta)$ , как вербальных значений лингвистической переменной;  $R$  – синтаксическое правило, которое ставит в соответствие каждой нечеткой переменной  $\gamma \in T(\beta)$  нечеткое подмножество  $A(\gamma)$ . Элементы  $\gamma_i, i = 1, \dots, n$ , лингвистической переменной  $\beta$  называют нечеткими переменными  $\langle \gamma, X, A(\gamma) \rangle$ , где  $X$  – область определения нечеткой переменной;  $A(\gamma) = \{ \mu_{A(\gamma)}(x)/x \}$ ,  $x \in X$ ,  $\mu_{A(\gamma)}(x)$  – значение функции принадлежности нечеткого подмножества  $A(\gamma)$ .

Для нечеткого показателя “площадь охвата осадками” может быть определена лингвистическая переменная  $\beta_n$  – “площадь”, а терм-множество  $T(\beta_n)$  может определяться двумя нечеткими переменными:  $\gamma_{n1}$  – “большая” и  $\gamma_{n2}$  – “малая”. Для нечеткого качественного показателя “рельеф бассейна рек” может быть определена лингвистическая переменная  $\beta_p$  – “рельеф”, а терм-множество  $T(\beta_p)$  может определяться также двумя нечеткими переменными:  $\gamma_{p1}$  – “равнинный” и  $\gamma_{p2}$  – “горный”.

Функции принадлежности нечетких переменных  $\gamma_{n1}, \gamma_{n2}$  лингвистической переменной  $\beta_n$  и нечетких переменных  $\gamma_{p1}, \gamma_{p2}$  лингвистической переменной  $\beta_p$  могут быть определены в результате проведения экспертизы и обработки экспертных данных. Каждый  $\ell$ -ый эксперт,  $\ell = 1, \dots, L$ , выражает свое субъективное суждение о том: во сколько раз значение функции принадлежности  $\mu_{A(\gamma_{n1})}(x_i)$ , например, рассматривается нечеткое подмножество  $A(\gamma_{n1})$  нечеткой переменной  $\gamma_{n1}$ , больше значения функции принадлежности  $\mu_{A(\gamma_{n1})}(x_j)$ , где  $x_i, x_j \in X$ ;  $i, j = 1, \dots, n$ ;  $X$  – область определения лингвистической переменной  $\beta_n$ . Такое суждение эксперт дает, исходя из качественной шкалы оценок.

При определении значений функции принадлежности эксперты руководствуются мыслью: во сколько раз выбранный фактор влияния на характер наводнения более существенен (весомее) по отношению к другому фактору влияния с точки зрения возможности определения масштабов наводнения. При этом используется девятибальная шкала, обоснование выбора которой приведено в [11].

Если  $i$ -й и  $j$ -й факторы влияния ( $A_i^\alpha$  и  $A_j^\alpha$ ) нет смысла сравнивать, т.е. они не сравниваемые, то оценка в качественной шкале равна 0.

При условии, что  $i$ -й и  $j$ -й факторы влияния одинаково важны, то в качественной шкале оценка равна 1.

Если  $i$ -й фактор влияния незначительно важнее, чем  $j$ -й, то оценка равна 3.

Если же  $i$ -й фактор влияния просто важнее  $j$ -го – оценке присваивается значение 5.

В случае, когда  $i$ -й фактор влияния значительно важнее  $j$ -го – оценка имеет значение 7.

И наконец, если  $i$ -й фактор влияния по своей значимости абсолютно превосходит  $j$ -й – оценке присваивается значение 9.

Для обратного сравнения  $j$ -го фактора влияния с  $i$ -м ( $A_j^\alpha$  и  $A_i^\alpha$ ) используются обратные величины: 1, 1/3, ..., или 1/9.

Значения оценок 2, 4, 6, 8 и их обратные величины используются для облегчения компромиссов между незначительно отличающимися суждениями.

Как показано в работе [12], с использованием такой качественной шкалы оценок каждый эксперт может представлять бинарные сравнения  $\mu_{A(\gamma_{n1})}(x_i)$  и  $\mu_{A(\gamma_{n1})}(x_j)$  в виде матрицы  $A(\ell) = \|a_{ij}(\ell)\|$ , где  $\ell = 1, \dots, L$ ;  $i, j = 1, \dots, n$ . Затем в результате усреднения матриц получается матрица  $A = \|a_{ij}\|$ . Если полученная матрица является квадратной, то решая матричное уравнение  $AX^T = \lambda X$ , можно определить собственные числа  $\lambda$  матрицы, как корни характеристического уравнения  $A - \lambda E = 0$ , где  $E$  – единичная матрица. При этом каждому собственному числу  $\lambda$  будет соответствовать собственный вектор  $X$ . Если матрица  $A$  состоит из элементов, которые равны  $a_{ij} > 0$ ;  $a_{ji} = 1/a_{ij}$ ;  $a_{ik} = a_{ij}a_{jk}$ , где  $i, j, k = 1, \dots, n$ , (матрица является неотъемлемой, обратносимметричной и согласованной), то характеристическое уравнение имеет один корень  $\lambda = \lambda_{\max} = n$ , при этом единственному корню соответствует единственный собственный вектор  $X$ . В случае представления субъективных суждений экспертов в виде такой матрицы, решение матричного уравнения  $AX^T = nX$  будет определять собственный вектор  $X = \{ \mu_{A(\gamma)}(x)/x \}$ ,  $x \in X$ , а численная мера расхождения  $\lambda_{\max}$  и  $n$  будет определять численную меру согласованности суждений экспертов.

Если  $a_{i,j}^{(\ell)} = \mu_{A(\gamma)}(x_i) / \mu_{A(\gamma)}(x_j)$ ,  $a_{i,k}^{(\ell)} = 1/a_{i,j}^{(\ell)}$  и  $a_{i,k}^{(\ell)} = a_{i,j}^{(\ell)} a_{j,k}^{(\ell)}$ , то не диагональные значения матрицы будут  $a_{i,j}^{(\ell)} > 0$ , а диагональные –

$a_{i,i}^{(\ell)} = 1$ , где  $\mu_{A(\gamma)}(x_i), \mu_{A(\gamma)}(x_j)$  – суждения экспертов о функции принадлежности;  $i, j = 1, \dots, n$ . Также,

если  $\sum_{i=1}^n \mu_{A(\gamma)}(x_i) = 1$ , то  $\sum_{i=1}^n \mu_{A(\gamma)}(x_i) / \mu_{A(\gamma)}(x_j) =$

$= 1 / \mu_{A(\gamma)}(x_j) = k_j$ , а значит, согласно уравнения

$A\mu^T = \lambda_{\max} - \mu$  можно сформировать вектор

$\mu = \{ \mu_{A(\gamma)}(x_j) \}$ ,  $j = 1, \dots, n$ , потому что  $\mu_{A(\gamma)}(x_j) =$

$= 1/k_j$ . Далее векторы, соответствующие нечетким

переменним  $\gamma_{п1}, \gamma_{п2}$  лингвистической переменной  $\beta_{п}$  и  $\gamma_{р1}, \gamma_{р2}$  лингвистической переменной  $\beta_{р}$ ,  $\mu = \{\mu_{A(\gamma)}(x_j)\}$ , где  $j = 1, \dots, п; i = 1, \dots, 4$ , нормируются.

На рис. 3 показаны функции принадлежности нечетких подмножеств, соответствующие рассмотренным выше, нечетким переменным  $\gamma_{п1}, \gamma_{п2}, \gamma_{р1}$  и  $\gamma_{р2}$ .

Для лингвистической переменной  $\beta_{п}$  – “площадь охвата осадками”, в качестве размерности области определения  $X$  могут приниматься размеры земной поверхности, на которой идет дождь (до 100 км<sup>2</sup> или выше), а для лингвистической переменной  $\beta_{р}$  – “рельеф бассейна рек” может выступать высота над уровнем моря (до 500 м или выше). Кроме того, необходимо определить уровень функций принадлежностей  $\alpha$  для нечетких переменных  $\gamma_{п1}, \gamma_{п2}, \gamma_{р1}$  и  $\gamma_{р2}$

$$\alpha = \mu_{A(\gamma_{п1})}(x) = \mu_{A(\gamma_{п2})}(x) = \mu_{A(\gamma_{р1})}(x) = \mu_{A(\gamma_{р2})}(x),$$

которому будут соответствовать четкие множества:

$$\gamma_{п1} = \{0, \dots, \bar{\gamma}_{п1}\}; \gamma_{п2} = \{\bar{\gamma}_{п2}, \dots, \bar{\bar{\gamma}}_{п2} > \bar{\gamma}_{п2}\};$$

$$\gamma_{р1} = \{0, \dots, \bar{\gamma}_{р1}\}; \gamma_{р2} = \{\bar{\gamma}_{р2}, \dots, \bar{\bar{\gamma}}_{р2} > \bar{\gamma}_{р2}\}.$$

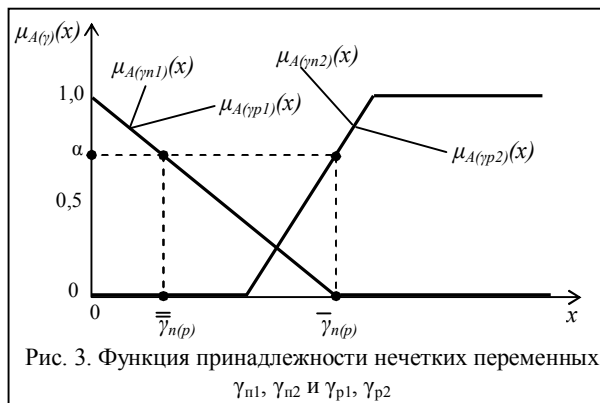


Рис. 3. Функция принадлежности нечетких переменных  $\gamma_{п1}, \gamma_{п2}$  и  $\gamma_{р1}, \gamma_{р2}$

Таким образом, все факторы влияния на масштабы наводнения, приведенные на рис. 2, как количественные, так и качественные, определяются в нечеткой постановке, и в дальнейшем учитываются в качестве четких множеств при принятом значении их функций принадлежностей.

С использованием метода анализа иерархий [11] определим масштабы наводнения при принятом уровне  $\alpha$ . Для этого проведем попарное сравнение важности факторов влияния на характер наводнения  $A_1^\alpha, A_2^\alpha, A_3^\alpha, A_4^\alpha, A_5^\alpha$  и  $A_6^\alpha$ , которые представлены в виде интервалов  $\{\bar{A}_k^\alpha, \dots, \bar{\bar{A}}_k^\alpha\}$ , где  $k = 1, \dots, 6$  (см. табл. 1), и факторов влияния  $A_7^\alpha, A_8^\alpha$  в интервалах  $\gamma_{п2}^\alpha = \{\bar{\gamma}_{п2}^\alpha, \dots, \bar{\bar{\gamma}}_{п2}^\alpha\}$  и  $\gamma_{р2}^\alpha = \{\bar{\gamma}_{р2}^\alpha, \dots, \bar{\bar{\gamma}}_{р2}^\alpha\}$ . При этом, если один фактор оценивается в  $\alpha$  раз весомее, чем другой, то второй фактор оценивается в  $1/\alpha$  раз весомее, чем первый, и т.д.

Результаты бинарного сравнения факторов влияния на масштабы наводнения, полученные по результатам экспертизы с использованием качественной девяти бальной шкалы (второй уровень иерархии), приведены в табл. 2.

При составлении таблицы в качестве экспертов выступали авторы статьи. Обозначим в таблице  $\gamma_{п2}^\alpha = A_7^\alpha, \gamma_{р2}^\alpha = A_8^\alpha$  и кратко рассмотрим доводы экспертов при заполнении табл. 2, т.е. при обосновании весомости факторов влияния на масштабы наводнения.

Сравнивая факторы влияния сами с собой, их весомости равны, поэтому в ячейки  $A_{11}^\alpha, A_{22}^\alpha, A_{33}^\alpha, A_{44}^\alpha, A_{55}^\alpha, A_{66}^\alpha, A_{77}^\alpha$  и  $A_{88}^\alpha$  таблицы ставится число 1. Также в таблице находятся факторы влияния, которые связаны между собой, и, по мнению экспертов, одинаково влияют на масштабы наводнения, поэтому в соответствующих ячейках таблицы также ставится 1.

К таким факторам влияния относятся: количество и интенсивность осадков (ячейки  $A_{12}^\alpha$  и  $A_{21}^\alpha$ ); количество осадков и малая площадь охвата осадками (ячейки  $A_{17}^\alpha$  и  $A_{71}^\alpha$ ); интенсивность осадков и малая площадь охвата осадками (ячейки  $A_{27}^\alpha$  и  $A_{72}^\alpha$ );

Таблица 2

Бинарное сравнение факторов влияния на масштабы наводнения

Характеристики факторов влияния на наводнение	$A_1^\alpha$ , мм	$A_2^\alpha$ , мм/ч	$A_3^\alpha$ , мин	$A_4^\alpha$ , мм/ч	$A_5^\alpha$ , д.ед.	$A_6^\alpha$ , пром	$A_7^\alpha$ , км <sup>2</sup>	$A_8^\alpha$ , м
$A_1^\alpha$ – количество осадков, мм	1	1	3	7	5	5	1	5
$A_2^\alpha$ – интенсивность осадков, мм/ч	1	1	1	5	5	3	1	3
$A_3^\alpha$ – продолжительность осадков, мин	1/3	1	1	5	3	5	7	3
$A_4^\alpha$ – водопроницаемость почвы, мм/ч	1/7	1/5	1/5	1	1	1/5	1/3	1/7
$A_5^\alpha$ – увлажненность почвы, доли ед.	1/5	1/5	1/3	1	1	1/5	1/3	1/7
$A_6^\alpha$ – величина уклона рек, пром.	1/5	1/3	1/5	5	5	1	5	1
$A_7^\alpha$ – малая площадь охвата осадками, км <sup>2</sup>	1	1	1/7	3	3	1/5	1	1/5
$A_8^\alpha$ – горный рельеф бассейна рек, м	1/5	1/3	1/3	7	7	1	5	1

интенсивность и продолжительность осадков (ячейки  $A_{23}^{\alpha}$  и  $A_{32}^{\alpha}$ ); водопроницаемость и увлажненность почвы (ячейки  $A_{45}^{\alpha}$  и  $A_{54}^{\alpha}$ ); а также величина уклона рек и горный рельеф бассейна рек (ячейки  $A_{68}^{\alpha}$  и  $A_{86}^{\alpha}$ ). Остальные факторы, по мнению экспертов, в разной степени (важнее) влияют на масштабы наводнений.

Так количество осадков незначительно важнее продолжительности осадков, потому что длительное выпадение осадков даже при среднем их количестве может привести к увеличению масштабов наводнения (число 3 в ячейке  $A_{13}^{\alpha}$  и число 1/3 в ячейке  $A_{31}^{\alpha}$ ). Также количество осадков значительно важнее водопроницаемости почвы, так как даже при хорошей водопроницаемости почвы большое количество осадков приводит к масштабным наводнениям (число 7 в ячейке  $A_{14}^{\alpha}$  и 1/7 в ячейке  $A_{41}^{\alpha}$ ). Кроме того, количество осадков просто важнее таких факторов влияния, как увлажненность почвы, величина уклона рек и горный рельеф бассейна рек (соответственно, числа 5 в ячейках  $A_{15}^{\alpha}$ ,  $A_{16}^{\alpha}$  и  $A_{18}^{\alpha}$ , а также числа 1/5 в ячейках  $A_{51}^{\alpha}$ ,  $A_{61}^{\alpha}$  и  $A_{81}^{\alpha}$ ). Это обусловлено тем, что при большом количестве осадков даже при недостаточном увлажнении почвы, малом уклоне рек и равнинном рельефе бассейна рек могут возникать масштабные наводнения, однако эти три фактора, безусловно, необходимо учитывать при определении характера наводнения.

Интенсивность осадков просто важнее водопроницаемости и увлажненности почвы, так как даже при их средних показателях, но ливневых осадках, вероятность масштабного наводнения достаточно высокая (соответственно, числа 5 в ячейках  $A_{24}^{\alpha}$  и  $A_{25}^{\alpha}$ , а также числа 1/5 в ячейках  $A_{42}^{\alpha}$  и  $A_{52}^{\alpha}$ ). Кроме того, интенсивность осадков незначительно важнее величины уклона рек и горного рельефа бассейна рек при определении характера наводнения, потому что при обложных и продолжительных осадках величина уклона рек и горный рельеф бассейна рек играют важную, но не определяющую роль, а ливневые осадки незначительно, однако все-таки важнее их (соответственно, числа 3 в ячейках  $A_{26}^{\alpha}$  и  $A_{28}^{\alpha}$ , а также числа 1/3 в ячейках  $A_{62}^{\alpha}$  и  $A_{82}^{\alpha}$ ).

Продолжительность осадков, по мнению экспертов, просто важнее водопроницаемости почвы и величины уклона рек, так как длительные и интенсивные осадки сильнее влияют на возможность возникновения масштабного наводнения (числа 5 в ячейках  $A_{34}^{\alpha}$  и  $A_{36}^{\alpha}$ , а также числа 1/5 в ячейках  $A_{43}^{\alpha}$  и  $A_{63}^{\alpha}$ ). В то же время, длительные осадки

влияют на увлажненность почвы, а при горном рельефе бассейна рек продолжительность осадков сильно влияет на характер наводнения, поэтому можно принять, что продолжительность осадков незначительно важнее увлажненности почвы и горного рельефа бассейна рек (числа 3 в ячейках  $A_{35}^{\alpha}$  и  $A_{38}^{\alpha}$ , а также числа 1/3 в ячейках  $A_{53}^{\alpha}$  и  $A_{83}^{\alpha}$ ). Площадь охвата осадками в значительно меньшей степени влияет на характер наводнения, чем продолжительность осадков, и в ячейку  $A_{37}^{\alpha}$  можно поставить число 7, а в ячейку  $A_{73}^{\alpha}$  – 1/7.

Водопроницаемость почвы в разной степени, но меньше, влияет на масштабы наводнения, чем величина уклона рек, площадь охвата осадками и рельеф бассейна рек, поэтому в соответствующие ячейки  $A_{46}^{\alpha}$ ,  $A_{47}^{\alpha}$  и  $A_{48}^{\alpha}$  заносим, соответственно, числа 1/5, 1/3 и 1/7, а в ячейки  $A_{64}^{\alpha}$ ,  $A_{74}^{\alpha}$  и  $A_{84}^{\alpha}$  – числа 5, 3 и 7.

Как уже отмечалось выше, водопроницаемость и увлажненность почвы практически одинаково влияют на характер наводнения, поэтому увлажненность почвы также в разной степени, но меньше, влияет на масштабы наводнения, чем величина уклона рек, площадь охвата осадками и рельеф бассейна рек, и в соответствующие ячейки  $A_{56}^{\alpha}$ ,  $A_{57}^{\alpha}$  и  $A_{58}^{\alpha}$  также ставятся числа 1/5, 1/3 и 1/7, а в ячейки  $A_{65}^{\alpha}$ ,  $A_{75}^{\alpha}$  и  $A_{85}^{\alpha}$  – числа 5, 3 и 7.

Величина уклона рек, по мнению экспертов, просто важнее малой площади охвата осадками, так как в горной местности (большой уклон рек) даже при большой площади охвата осадками вероятность масштабного наводнения остается большой (число 5 в ячейке  $A_{67}^{\alpha}$  и число 1/5 в ячейке  $A_{76}^{\alpha}$ ).

Аналогичные рассуждения также справедливы при сравнении важности малой площади охвата осадками и горного рельефа бассейна рек, поэтому в ячейку  $A_{78}^{\alpha}$  можно поставить число 1/5, а в ячейку  $A_{87}^{\alpha}$  – 5.

Данные, приведенные в табл. 2, могут быть представлена в виде матрицы  $A = \|a_{ij}\|$ , где  $i, j = 1, \dots, 8$ . В результате решения матричного уравнения  $A\mu^{\alpha T} = \lambda_{\max}\mu^{\alpha}$  получаем собственный вектор  $\mu^{\alpha} = \{0,245; 0,197; 0,161; 0,029; 0,033; 0,064; 0,048; 0,074\}$ .

Нормируемый вектор  $\mu_i^{n,\alpha} = \mu_i^{\alpha} / \sum_{i=1}^8 \mu_i^{\alpha}$ , имеет вид  $\mu^{n,\alpha} = \{0,288; 0,231; 0,189; 0,034; 0,039; 0,075; 0,056; 0,087\}$ .

Результат  $\mu^{n,\alpha}$  соответствует принятому для всех факторов влияния уровню  $\alpha$  функций принадлежности.

Рассмотрим бинарные отношения преимуществ масштабов наводнения, которые составляют содержание третьего уровня иерархии, с точки зрения каждого, из перечисленных выше, факторов влияния. Такие восемь матриц представлены в виде табл. 3.

Таблица 3  
Бинарное сравнение классов наводнений для всех факторов влияния

$A_1^\alpha$	H1	H2	H3	H4
H1	1	1/2	1/3	1/5
H2	2	1	1/2	1/3
H3	3	2	1	1/2
H4	5	3	2	1
$A_2^\alpha$	H1	H2	H3	H4
H1	1	1/3	1/5	1/7
H2	3	1	1/3	1/5
H3	5	5	1	1
H4	7	3	1	1
$A_3^\alpha$	H1	H2	H3	H4
H1	1	3	4	5
H2	1/3	1	3	4
H3	1/4	1/3	1	1
H4	1/5	1/4	1	1
$A_4^\alpha$	H1	H2	H3	H4
H1	1	3	5	7
H2	1/3	1	3	5
H3	1/5	1/3	1	2
H4	1/7	1/5	1/2	1
$A_5^\alpha$	H1	H2	H3	H4
H1	1	3	4	5
H2	1/3	1	3	4
H3	1/4	1/3	1	1
H4	1/5	1/4	1	1
$A_6^\alpha$	H1	H2	H3	H4
H1	1	1/3	1/5	1/7
H2	3	1	1/3	1/5
H3	5	5	1	1
H4	7	3	1	1
$A_7^\alpha$	H1	H2	H3	H4
H1	1	3	5	7
H2	1/3	1	3	5
H3	1/5	1/3	1	2
H4	1/7	1/5	1/2	1
$A_8^\alpha$	H1	H2	H3	H4
H1	1	1/2	1/3	1/5
H2	2	1	1/2	1/3
H3	3	2	1	1/2
H4	5	3	2	1

При составлении таблицы в качестве экспертов выступали авторы статьи. Обозначим в таблице  $\gamma_{п2}^\alpha = A_7^\alpha$ ,  $\gamma_{р2}^\alpha = A_8^\alpha$  и кратко рассмотрим доводы экспертов при построении матриц V1 – V8, т.е. при

обосновании весомости масштабов наводнения по каждому из восьми факторов влияния. Бинарные сравнения на третьем уровне иерархии эксперты проводят, руководствуясь мыслью: как отдельно каждый фактор влияния определяет масштаб наводнения. При этом эксперты также используют девяти бальную шкалу, описанную выше.

Также как и при заполнении табл. 2, сравнивая наводнения сами с собой, их весомости равны, поэтому в ячейки V1<sub>11</sub> – V8<sub>11</sub>, V1<sub>22</sub> – V8<sub>22</sub>, V1<sub>33</sub> – V8<sub>33</sub> и V1<sub>44</sub> – V8<sub>44</sub> таблицы ставится число 1. Также значения факторов влияния  $A_2^\alpha$ ,  $A_3^\alpha$ ,  $A_5^\alpha$  и  $A_6^\alpha$  очень близки, и, по мнению экспертов, одинаково влияют на наводнение 3 и наводнение 4, поэтому при этих факторах влияния эти наводнения равновесомы и в соответствующих ячейках таблицы также ставится 1 (ячейки V2<sub>34</sub> и V2<sub>43</sub>, V3<sub>34</sub> и V3<sub>43</sub>, V5<sub>34</sub> и V5<sub>43</sub>, V6<sub>34</sub> и V6<sub>43</sub>).

Наводнения при других факторах влияния, по мнению экспертов, в разной степени важны одно относительно другого.

При анализе первого фактора влияния (количество осадков) эксперты делают вывод, что H1 в разной степени, но менее весомее, чем H2 – H4, так как H1 характеризуется наименьшим количеством осадков, поэтому в соответствующие ячейки V1<sub>12</sub>, V1<sub>13</sub> и V1<sub>14</sub> заносятся, соответственно, числа 1/2, 1/3 и 1/5, а в ячейки V1<sub>21</sub>, V1<sub>31</sub> и V1<sub>41</sub> – числа 2, 3 и 5. Также H2 по этому фактору имеет меньшую важность по сравнению с H3 и H4 из-за меньшего значения верхней границы количества осадков (числа 1/2 и 1/3 в ячейках V1<sub>23</sub> и V1<sub>24</sub>, а также числа 2 и 3 в ячейках V1<sub>32</sub> и V1<sub>42</sub>). Сравнивая H3 и H4 по количеству осадков, H4 совсем незначительно, но все же важнее H3 (число 1/2 в ячейке V1<sub>34</sub> и число 2 в ячейке V1<sub>43</sub>).

Так как количество осадков в сильной степени связано с интенсивностью осадков (второй фактор влияния), то о взаимной важности наводнений можно сделать такие же выводы, как и по первому фактору. При этом в ячейки V2<sub>12</sub>, V2<sub>13</sub> и V2<sub>14</sub> ставятся числа 1/2, 1/3 и 1/5, а в ячейки V2<sub>21</sub>, V2<sub>31</sub> и V2<sub>41</sub> – числа 2, 3 и 5, и также в ячейки V2<sub>23</sub> и V2<sub>24</sub> – 1/2 и 1/3, а в ячейки V2<sub>32</sub> и V2<sub>42</sub> – 2 и 3.

Анализируя третий фактор влияния, можно сказать, что продолжительность осадков больше влияет на H1 и H2, и эти наводнения более важны, по этому фактору, чем H3 и H4, поэтому в соответствующие ячейки V3<sub>12</sub>, V3<sub>13</sub> и V3<sub>14</sub> заносятся числа 3, 4 и 5, а в ячейки V3<sub>21</sub>, V3<sub>31</sub> и V3<sub>41</sub> – числа 1/3, 1/4 и 1/5, а также числа 3 и 4 в ячейки V3<sub>23</sub> и



$V_{324}$ , а числа 1/3 и 1/4 в ячейки  $V_{332}$  и  $V_{342}$ .

Также водопроницаемость почвы (четвертый фактор влияния) при Н1 и Н2 в разной степени, но более важны, чем Н3 и Н4, и в соответствующие ячейки  $V_{412}$ ,  $V_{413}$  и  $V_{414}$  можно поставить числа 3, 5 и 7, а в ячейки  $V_{421}$ ,  $V_{431}$  и  $V_{441}$  – числа 1/3, 1/5 и 1/7, а также числа 3 и 5 ставятся в ячейки  $V_{423}$  и  $V_{424}$ , а числа 1/3 и 1/5 в ячейки  $V_{432}$  и  $V_{442}$ . При сравнении важности Н3 и Н4 по этому фактору влияния можно сказать, что Н3 незначительно, но важнее Н4 (число 2 в ячейке  $V_{434}$  и число 1/2 в ячейке  $V_{443}$ ).

Пятый фактор влияния, увлажненность почвы, во многом зависит от продолжительности осадков и поэтому численные значения взаимных важностей наводнений по этому фактору (таблица V5) совпадает с таблицей V3.

В то же время, величина уклона рек (шестой фактор), по мнению экспертов, больше влияет на Н3 и Н4, и эти наводнения более важны, по этому фактору, чем Н1 и Н2. При этом в ячейки  $V_{612}$ ,  $V_{613}$  и  $V_{614}$  ставятся числа 1/3, 1/5 и 1/7, а в ячейки  $V_{621}$ ,  $V_{631}$  и  $V_{641}$  – числа 3, 5 и 7, и также в ячейки  $V_{623}$  и  $V_{624}$  – 1/3 и 1/5, а в ячейки  $V_{632}$  и  $V_{642}$  – 3 и 5.

Анализируя седьмой фактор, можно сказать, что малая площадь охвата осадками больше влияет на Н1 и Н2, и поэтому они в разной степени более важны, чем Н3 и Н4, а ячейки  $V_{712}$ ,  $V_{713}$  и  $V_{714}$  ставятся числа 3, 5 и 7, в ячейки  $V_{721}$ ,  $V_{731}$  и  $V_{741}$  – числа 1/3, 1/5 и 1/7, а также числа 3 и 5 ставятся в ячейки  $V_{723}$  и  $V_{724}$ , числа 1/3 и 1/5 – в ячейки  $V_{732}$  и  $V_{742}$ . Кроме того, Н3 незначительно важнее Н4 и число 2 ставится в ячейку  $V_{734}$ , а число 1/2 – в ячейку  $V_{743}$ .

Горный рельеф бассейна рек (восьмой фактор) также как и величина уклона рек (шестой фактор), по мнению экспертов, больше влияет на Н3 и Н4. Поэтому важность этих наводнений больше, по этому фактору, чем важность Н1 и Н2. Исходя из этого, ячейки  $V_{812}$ ,  $V_{813}$  и  $V_{814}$  заполняются числами 1/2, 1/3 и 1/5, а ячейки  $V_{821}$ ,  $V_{831}$  и  $V_{841}$  – числами 3, 5 и 7, а также ячейки  $V_{823}$  и  $V_{824}$  – числами 1/2 и 1/3, и ячейки  $V_{832}$  и  $V_{842}$  – 2 и 3. Для этого фактора Н4 незначительно важнее Н3 и ячейка  $V_{834}$  заполняется числом 2, а ячейка  $V_{843}$  – 1/2.

Нормированные собственные векторы  $\mu_i^{H,\alpha}$ ,  $i = 1, \dots, 8$  соответствующих матриц бинарного сравнения имеют следующий вид:

$$\mu_1^{H,\alpha} = \{0,091; 0,154; 0,261; 0,492\};$$

$$\mu_2^{H,\alpha} = \{0,063; 0,107; 0,395; 0,427\};$$

$$\mu_3^{H,\alpha} = \{0,561; 0,218; 0,111; 0,091\};$$

$$\mu_4^{H,\alpha} = \{0,597; 0,221; 0,105; 0,067\};$$

$$\mu_5^{H,\alpha} = \{0,561; 0,218; 0,111; 0,091\};$$

$$\mu_6^{H,\alpha} = \{0,063; 0,107; 0,395; 0,427\};$$

$$\mu_7^{H,\alpha} = \{0,597; 0,221; 0,105; 0,067\};$$

$$\mu_8^{H,\alpha} = \{0,091; 0,154; 0,261; 0,492\}.$$

С целью получения обобщенных показателей о характере наводнения реализуется принцип синтеза, согласно которого компонента вектора приоритетов о масштабах наводнения определяется с использованием выражения

$$\mu_k^{H,\alpha} = \sum_{i=1}^8 \mu_{i,k}^{H,\alpha} \cdot \mu_i^{H,\alpha}, \quad k = 1, 2, 3, 4,$$

где  $\mu_{i,k}^{H,\alpha}$  – нормируемое значение  $k$ -й компоненты вектора приоритета характера наводнения по  $i$ -му фактору влияния, значения которого определены  $\alpha$ -уровневым четким интервалом функции принадлежности;  $\mu_i^{H,\alpha}$  – нормируемое значение  $i$ -й компоненты вектора приоритетов факторов влияния, по которым принимается решение о масштабе наводнения, и значение которых определено  $\alpha$ -уровневым интервалом.

Для подсчета компоненты  $\mu_k^{H,\alpha}$  данные, полученные выше, удобно предоставить в следующем виде:

$$\mu_1^{H,\alpha} = \{0,288; 0,231; 0,189; 0,034;$$

$$0,039; 0,075; 0,056; 0,087\};$$

$$\mu_{1,1}^{H,\alpha} = \{0,091; 0,063; 0,561; 0,597;$$

$$0,561; 0,063; 0,597; 0,091\};$$

$$\mu_{1,2}^{H,\alpha} = \{0,154; 0,107; 0,218; 0,221;$$

$$0,218; 0,107; 0,221; 0,154\};$$

$$\mu_{1,3}^{H,\alpha} = \{0,261; 0,395; 0,111; 0,105;$$

$$0,111; 0,395; 0,105; 0,261\};$$

$$\mu_{1,4}^{H,\alpha} = \{0,492; 0,427; 0,091; 0,067;$$

$$0,091; 0,427; 0,067; 0,492\}.$$

Вектор приоритетов масштабов наводнения будет иметь вид:  $\mu_{i,k}^{H,\alpha} = \{0,235; 0,16; 0,254; 0,342\}$ .

Таким образом, следует принять решение, что самым масштабным будет наводнение 4 с численными значениями факторов влияния, приведенными в четвертой строке табл. 2. Менее масштабными будут наводнение 3 и наводнение 1, так как они имеют меньшие значения в векторе приоритетов (численные значения факторов влияния представлены, соответственно, в третьей и первой строках табл. 2). Необходимо

## Список літератури

отметить, что полученные значения приоритетов для этих двух наводнений близки, поэтому можно сказать, что масштабы этих наводнений будут соизмеримы. Самое низкое значения приоритета получено для наводнения 2, следовательно, его масштабы будут наименьшими (вторая строка в табл. 2). Полученные результаты можно поставить в соответствие к приведенной выше классификации наводнений по масштабу: наводнение 2 можно отнести к низким (малым) наводнениям, наводнения 3 и 1 могут соответствовать высоким наводнениям, а наводнение 4 может характеризовать выдающееся наводнение, а также при наличии человеческих жертв и катастрофическое наводнение.

## Выводы

1. Численные значения факторов влияния на масштабы наводнения изменяются в определенном интервале и диапазоны изменения этих факторов влияния пересекаются, поэтому для решения задачи определения характера (масштабов) наводнения целесообразно использовать нечеткое описание факторов влияния.

2. Для принятия решения о масштабах наводнения по прогнозируемым значениям основных факторов влияния в нечеткой постановке используется метод анализа иерархий.

3. Метод принятия решения о характере наводнения предусматривает декомпозицию проблемы в иерархию, определение сравнительной важности факторов влияния на масштабы наводнения и бинарное сравнение важности предполагаемых наводнений по каждому фактору влияния.

4. Применение разработанного метода позволяет определить масштабы наводнений при нечетком описании факторов влияния.

5. При проведении дальнейших исследований целесообразно провести анализ различной степени пресечения численных значений факторов влияния на характер наводнения, и их влияния на достоверность определения масштабов наводнения.

1. Стихийные бедствия гидрологического характера [Электронный ресурс] // Наводнения. – Режим доступа к ресурсу: <http://bezhe.de.ru/>.

2. Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения / Под ред. Р.П. Ягера. – М.: Радио и связь, 1986. – 406 с.

3. Осадки. Атмосфера и мир атмосферных явлений [Электронный ресурс] // Интернет-журнал. – Режим доступа к журналу: <http://meteoweb.ru/>.

4. Продолжительность, интенсивность и повторяемость дождей [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.clickpilot.ru>.

5. Почвенная вода [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://uchilok.net/geografia/124-rochvennaya-voda.html>.

6. Увлажнение, коэффициенты увлажнения [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.geo-site.ru>.

7. Определение уклона реки [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://есоога.исоз.иа/>.

8. Бассейн водоема [Электронный ресурс] // Энциклопедия Википедия. – Режим доступа к ресурсу: <http://ru.wikipedia.org/>.

9. Симонов Ю.Г. Речной бассейн и бассейновая организация географической оболочки / Ю.Г. Симонов, Т.Ю. Симонова // Эрозия почв и русловые процессы. – 2004. – Вып. 14. – С. 7-32.

10. Бильчук В.М. Селекция объектов дистанционного зондирования Земли при нечетком описании их характеристик рассеяния / В.М. Бильчук, Р.Э. Пащенко, А.И. Вовк // Збірник наукових праць ХУ ІС. – Х.: ХУ ІС, 2008. – Вып. 1(16). – С. 26-31.

11. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий: Пер с англ. / Т. Саати. – М.: Радио и связь, 1993. – 314 с.

12. Бильчук В.М. Прийняття рішень щодо визначення перспективних зразків озброєння при нечіткому опису їх інформаційного ресурсу / В.М. Бильчук // Системи озброєння і військова техніка. – 2006. – № 4 (8). – С. 124-130.

Поступила в редколлегию 22.08.2013

**Рецензент:** д-р физ-мат. наук, с.н.с. В.К. Иванов, Институт радиопизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков.

## ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРУ (МАСШТАБІВ) ПАВОДКОВИХ ПОВЕНЕЙ ПРИ НЕЧІТКОМУ ОПИСІ ЧИННИКІВ ВПЛИВУ

О.С. Бутенко, М.В. Буряченко, Л.С. Весельська, Р.Е. Пащенко

*Розглянута можливість застосування теорії нечітких множин для вирішення завдання визначення характеру паводкових повеней. Введений нечіткий опис чинників впливу на масштаби паводкової повені. На основі такого опису розроблений метод ухвалення рішення при визначенні масштабів паводкових повеней. Приведені результати визначення характеру паводкових повеней при чотирьох різних наборах значень чинників впливу на повені. Показано, які нечіткі значення чинників впливу визначають масштаби повеней.*

**Ключові слова:** паводкова повінь, масштаб повені, нечіткий опис, чинник впливу.

## DETERMINATION CHARACTER (SCALES) OF FLOOD FLOODS AT UNCLEAR DESCRIPTION OF FACTORS OF INFLUENCE

O.S. Butenko, M.V. Burjchenko, L.S. Veselskaj, R.E. Paschenko

*Possibility of application theory of fuzzy sets is considered for the decision of task determination character of flood floods. Unclear description of factors influence is entered on the scales of flood flood. On the basis of such description the method decision-making at determination scales of flood floods is developed. The results of determination character of flood floods are resulted at four different sets of values factors influence on floods. It is rotined, what unclear values of factors influence are determined by the scales of flood.*

**Keywords:** flood flood, scale of flood, unclear description, factor of influence.