

УДК 551.515.9 + 519.816

Р.Э. Пащенко¹, Л.С. Весельская², О.А. Барданова³¹ Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков² Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков³ Харьковский университет Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба, Харьков

ОПЕРАТИВНОЕ ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЯ О МАСШТАБАХ ПАВОДКОВОГО НАВОДНЕНИЯ

Рассмотрена возможность оперативного принятия решения о масштабах возможного паводкового наводнения при известных значениях факторов влияния на паводковые наводнения и рассчитанных векторах приоритетов факторов влияния и масштабов наводнения. Векторы приоритетов определяются с использованием нечеткого описания факторов влияния на масштабы паводкового наводнения. Предложен метод оперативного принятия решения о масштабах наводнения. Приведены результаты оперативного определения характера паводковых наводнений при четырех различных наборах значений факторов влияния на наводнения.

Ключевые слова: паводковое наводнение, масштаб наводнения, принятие решения, фактор влияния.

Постановка проблемы и анализ литературы

Глобальное изменение климата в последнее десятилетие привело к увеличению стихийных бедствий во всем мире. Одно из первых место в их ряду занимают паводковые наводнения, которые причиняют значительный материальный ущерб. В [1] дано определение паводкового наводнения, под которым понимается интенсивный, сравнительно кратковременный, подъем уровня воды, формируемый сильными дождями. Данное определение наводнения будем использовать при принятии решения о его масштабах.

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

Если использовать в качестве основных эти факторы, то можно увидеть, что принятие решения о масштабах наводнения становится возможным только после его окончания. Кроме того, данный подход не позволяет осуществлять оперативное принятие решения о характере наводнения на его начальной и средней фазах, а также не учитывает природных факторов влияния.

Не отбрасывая приведенные выше два важных фактора в определении масштабов наводнений, целесообразно при оценке возможного характера наводнения учесть природные факторы влияния [2 – 6]. Это позволит начать определение масштабов паводкового наводнения уже на начальных фазах его развития. Кроме того, учет природных факторов влия-

ния позволит осуществить прогнозирование масштабов наводнения при различных наборах значений факторов влияния, диапазоны изменения которых пересекаются. При принятии решения о масштабах наводнения факторы влияния, которые можно оценить количественно, будем прогнозировать в нечеткой постановке [7], и их прогнозные значения описывать нечеткими треугольными числами.

Исходя из рассмотренного выше, задачу оперативного принятия решения о масштабах паводкового наводнения сформулируем следующим образом: при известных значениях факторов влияния на паводковые наводнения и рассчитанных векторах приоритетов факторов влияния и масштабов наводнения, необходимо определить какой характер носит наводнение, которое развивается в текущий момент времени.

Цель статьи: рассмотреть возможность оперативного принятия решения о масштабах возможного паводкового наводнения.

Основные природные факторы влияния на паводковое наводнение

На возникновение паводковых наводнений влияет большое число факторов, которые могут выражаться как количественно, так и описываться качественно. В данной работе будут рассматриваться только те природные факторы влияния, которые можно оценить численными значениями.

К основным количественным факторам, влияющим на возникновение и масштабы паводковых наводнений, прежде всего, можно отнести: 1) количество осадков, 2) их интенсивность и 3) продолжительность, 4) водопроницаемость и 5) увлажненность почвы, 6) величина уклона рек. Кратко рассмотрим характеристику этих факторов влияния.

Количество осадков выражают в миллиметрах слоя воды, который образовался бы от выпадения

осадков, если бы они не испарялись, не просачивались бы в почву и не стекали [2]. Их можно разделить на: слабые (0,1 – 2 мм за 12 ч); умеренные (3 – 14 мм за 12 ч); сильные (15 – 50 мм за 12 ч); очень сильные осадки (больше 50 мм за 12 ч).

Интенсивность осадков выражается в толщине слоя воды, выпадающей с осадками в единицу времени (мм/мин, мм/ч, мм/сут) [3]. 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.

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

Водопроницаемость почвы характеризуется тем количеством воды, которое впитывает почва с поверхности за единицу времени [4]. Если почва пропускает за 1 ч 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 характеризуется коэффициентом увлажнения, который представляет собой отношение количества атмосферных осадков, выпадающих в данной местности, к испаряемости за один и тот же период (год, сезон, месяц) [5]. Такое отношение выражается в процентах, или в долях от единицы. Коэффициент увлажнения показывает либо избыточное увлажнение (больше единицы), либо различные степени недостаточного увлажнения (меньше единицы).

Уклоном реки называется отношение ее падения (в сантиметрах) к длине реки (в километрах) [6]. 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.

На практике статистическая информация о факторах влияния на паводковые наводнения сильно ограничена. Кроме того, основные факторы, влияющие на наводнение, имеют различные диапазоны изменения и могут пересекаться, а также эти факторы в различной степени влияют на масштабы наводнений. Поэтому задачу определения масштабов наводнения необходимо рассматривать в условиях априорной неопределенности.

Метод определения характера (масштабов) паводковых наводнений при нечетком описании факто-

ров влияния описан в [8]. В данном методе принятие решения о масштабах наводнения осуществляется по прогнозируемым значениям основных факторов влияния, которые представляются в нечетком виде. Факторы влияния участвуют в формировании решения о масштабах наводнений с использованием метода анализа иерархий на основе проведения экспертизы и обработки экспертных данных. При реализации метода предусматривается декомпозиция проблемы в иерархию, определение сравнительной важности факторов влияния на масштабы наводнения и бинарное сравнение важности предполагаемых наводнений по каждому фактору влияния. В результате проведенного анализа формируется (рассчитывается) вектор приоритетов масштабов наводнения.

В работе [8] показано, что при известных четырех наборах значений факторов влияния на паводковые наводнения, значения которых пересекаются, можно осуществить распределение четырех наводнений по их масштабу.

Таким образом, применение представленного в [8] метода позволяет определить масштабы наводнений при нечетком описании факторов влияния. Основываясь на подходе, реализованном в данном методе, рассмотрим возможность оперативного принятия решения о масштабах паводкового наводнения.

Принятие решения о масштабах паводкового наводнения

Для оперативного определения характера наводнения, которое развивается в текущий момент времени, будем использовать перечисленные выше шесть факторов влияния. Численные значения данных факторов на текущий момент времени должны быть получены каким либо методом и переданы лицу, принимающему решение о масштабах наводнения, в качестве исходных данных для анализа. Кроме того, лицо, принимающее решение (ЛПР), должно иметь в своем распоряжении набор диапазонов изменения факторов влияния на масштабы наводнения, которые характеризуют тип наводнения. Диапазоны изменения факторов влияния определяются экспертами заранее с использованием накопленной статистической информации. Набор этих данных целесообразно представлять в виде таблицы, один из вариантов которой представлен в табл. 1.

В табл. 1 приведены четкие множества изменения значений факторов влияния для четырех классов масштабов наводнений. Как видно из анализа данных табл. 1, диапазоны изменения значений факторов влияния на наводнения пересекаются, и определить масштаб наводнения в этих условиях становится невозможно.

С использованием подхода, описанного в [8], рассчитываются вектора приоритетов факторов влияния и масштабов наводнения для известных

четырёх наборов значений факторов влияния на паводковые наводнения. Рассчитанные вектора приоритетов факторов влияния и масштабов на-

воднения в дальнейшем используется ЛПР в качестве исходных данных для оценки характера наводнения.

Таблица 1

Диапазоны значений факторов влияния на характер наводнения

Масштаб наводнения	Количество осадков, мм A_1^α	Интенсивность осадков, мм/ч A_2^α	Продолжительность осадков, мин A_3^α	Водопроницаемость почвы, мм/ч A_4^α	Увлажненность почвы, доли ед. A_5^α	Величина уклона рек, пром A_6^α
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

Кратко остановимся на получении векторов приоритетов факторов влияния и масштабов наводнения для шести факторов влияния представленных в табл. 1. Для этого с использованием метода анализа иерархий проводится попарное сравнение важности факторов влияния $A_1^\alpha, A_2^\alpha, A_3^\alpha, A_4^\alpha, A_5^\alpha$ и A_6^α на характер наводнения при принятом уровне α . При этом, если один фактор оценивается в α 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, могут быть представлена в виде матрицы $A = \|a_{ij}\|$, где $i, j = 1, \dots, 6$.

В результате решения матричного уравнения $A\mu^{\alpha T} = \lambda_{\max} \mu^\alpha$ получаем собственный вектор $\mu_i^\alpha = \{0,348; 0,268; 0,174; 0,042; 0,05; 0,069\}$.

Нормируемый вектор $\mu_i^{H,\alpha} = \mu_i^\alpha / \sum_{i=1}^6 \mu_i^\alpha$, имеет вид:

$$\mu_i^{H,\alpha} = \{0,366; 0,282; 0,182; 0,044; 0,053; 0,073\}. \quad (1)$$

Полученный вектор значений соответствует важности каждого из факторов влияния на масштабы наводнения (вектор приоритетов) и может быть использован ЛПР при проведении анализа.

Для определения вектора приоритетов масштабов наводнения рассматриваются бинарные отношения преимуществ масштабов наводнения, с точки зрения каждого факторов влияния, которые перечислены выше. Бинарные отношения получают по результатам экспертизы.

Нормированные значения k -х компонент вектора приоритета характера наводнения по i -му фактору влияния $\mu_{i,k}^{H,\alpha}, i = 1, \dots, 6, k = 1, \dots, 4$, полученные с использованием похода представленного в [8], имеют следующий вид:

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

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

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

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

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

$$\mu_k^{H,\alpha} = \sum_{i=1}^6 \mu_{i,k}^{H,\alpha} \cdot \mu_i^{H,\alpha}, k = 1, 2, 3, 4,$$

где $\mu_{i,k}^{H,\alpha}$ – нормируемое значение k -й компоненты вектора приоритета характера наводнения по i -му фактору влияния, значения которого определены α -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 α -уровневым интервалом. Вектор приоритетов масштабов наводнения будет иметь вид:

$$\mu_k^{H,\alpha} = \{0,216; 0,158; 0,269; 0,357\}. \quad (2)$$

Из анализа данного вектора видно, что самым масштабным будет наводнение 4 с численными значениями факторов влияния, приведенными в четвертой строке табл. 1. Менее масштабными будут наводнение 3 и наводнение 1, так как они имеют меньшие значения в векторе приоритетов. Самое низкое значения приоритета получено для наводнения 2, следовательно, его масштабы будут наименьшими. 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 – высоким, а наводнение 4 может характеризовать выдающееся наводнение, а также при наличии человеческих жертв и катастрофическое наводнение.

Таким образом, исходными данными для ЛПР являются: численные значения данных факторов на текущий момент времени; диапазоны изменения факторов влияния (табл. 1); вектор приоритетов факторов влияния (выражение (1)) и вектор приоритетов масштабов наводнения (выражение (2)).

Предлагаемый метод оперативного принятия решения о масштабах паводкового наводнения можно разделить на несколько этапов.

На первом этапе осуществляется сравнение полученных численных значений факторов влияния с диапазонами изменения факторов влияния для возможных масштабов наводнения, которые были определены экспертами заранее (см. табл. 1). Если величина соответствующего фактора попадает в диапазон табличных значений, то ему присваивается значение "1", если не попадает, то присваивается значение "0". Полученные значения "0" и "1" представляются в виде матрицы сравнения МС, в которой число строк соответствует числу наводнений с различными диапазонами факторов влияния, а число столбцов зависит от числа факторов влияния, участвующих в анализе.

Например, в результате сравнения численных значений факторов влияния: количество осадков $A_1^\alpha = 35$ мм, интенсивность осадков $A_2^\alpha = 35$ мм/ч, продолжительность осадков $A_3^\alpha = 60$ мин, водопроницаемость почвы $A_4^\alpha = 40$ мм/ч, увлажненность почвы $A_5^\alpha = 0,3$, величина уклона рек $A_6^\alpha = 0,005$, с диапазонами изменения факторов влияния из табл. 1 получим следующую матрицу сравнения размером 4×6:

$$MC = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Как видно из анализа данной матрицы сравнения для всех типов наводнений (строк табл. 1) имеется свой набор "0" и "1".

На втором этапе обработки осуществляется перемножение матрицы сравнения МС с транспонированным вектором приоритетов факторов влияния $\mu_i^{h,\alpha}$, представленного выражением (1). Результатом умножения матрицы сравнения на вектор-столбец приоритетов факторов влияния будет вектор-столбец коэффициентов, определяющий масштаб наводнения, которое развивается в текущий момент времени,

$$Nav = MC \cdot (\mu_i^{h,\alpha})^T. \quad (3)$$

Масштаб наводнения определяется наибольшим значением коэффициента.

Для исходных данных примера, приведенного выше, получается следующий вектор-столбец коэффициентов:

$$Nav = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0,366 \\ 0,282 \\ 0,182 \\ 0,044 \\ 0,053 \\ 0,073 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,536 \\ 0,483 \\ 0,226 \\ 0,464 \end{bmatrix}.$$

Наибольшее значение коэффициента соответствует наводнению 1 ($Nav_1 = 0,536$), т.е. ЛПР может отнести его к высоким наводнениям.

Если на втором этапе получено только одно максимальное значение коэффициента масштаба наводнения, то на этом работа ЛПР завершается.

Как отмечалось выше, диапазоны изменения значений факторов влияния на наводнения пересекаются (табл. 1). Из-за этого результаты сравнения полученных численных значений факторов влияния с диапазонами изменения факторов влияния для нескольких типов наводнения могут совпадать.

Например, для исходных данных факторов влияния: $A_1^\alpha = 30$ мм, $A_2^\alpha = 7,5$ мм/ч, $A_3^\alpha = 240$ мин, $A_4^\alpha = 45$ мм/ч, $A_5^\alpha = 0,65$, $A_6^\alpha = 0,007$, матрица сравнения будет иметь следующий вид:

$$MC = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Как видно из анализа данной матрицы, ее первые и вторые строки полностью совпадают, следовательно, на втором этапе обработки будет получен вектор-столбец коэффициентов масштабов наводнения с двумя наибольшими значениями: $Nav_1 = Nav_2 = 1$. При таких исходных данных ЛПР не может принять однозначного решения о масштабах наводнения.

Для принятия решения о масштабах наводнения в таких условиях, на третьем этапе работы метода осуществляется сравнение наводнений с одинаковыми коэффициентами Nav (для рассматриваемого примера это наводнения 1 и 2) с вектором приоритетов масштабов наводнения, представленным выражением (2). Масштаб наводнения определяется наибольшим значением приоритета. Для рассматриваемого примера $\mu_1^{h,\alpha} > \mu_2^{h,\alpha}$ ($0,216 > 0,158$), следовательно, ЛПР может отнести его к наводнению 1 – высокому.

Таким образом, предложенный метод позволяет оперативно принять решение о масштабах возможного паводкового наводнения.

Также отметим, что для исключения ситуаций получения больше двух одинаковых коэффициентов масштабов наводнения на втором этапе обработки, необходимо чтобы диапазоны изменения факторов влияния для каждого типа наводнений определились квалифицированными экспертами.

Рассмотрим несколько наборов факторов влияния, представленных в табл. 2, и примем на их основе решение о масштабе наводнения с использованием

предложенного метода. Отметим, что значения факторов влияния должны быть получены контактными методами.

Таблица 2

Принятие оперативного решения о масштабе наводнения

Набор исходных данных	A_1^α , мм	A_2^α , мм/ч	A_3^α , мин	A_4^α , мм/ч	A_5^α , доли ед.	A_6^α , пром.	2 этап	3 этап	Масштаб наводнения
Вариант 1	45	14,2	190	45	0,75	0,008	0,299; 0,718 ; 0,282; 0,282	-	Н2, малое
Вариант 2	50	9,5	315	25	1,00	0,020	0,182; 0,648; 0,818 ; 0,483	-	Н3, высокое
Вариант 3	50	10	300	35	0,85	0,014	0,299; 0,745 ; 0,745 ; 0,648	0,158 < 0,269	Н3, высокое
Вариант 4	60	12	300	25	1,15	0,025	0,182; 0,366; 0,818 ; 0,818	0,269 < 0,357	Н4, выдающееся

Как видно из данных, приведенных в табл. 2, для первых двух вариантов наборов факторов влияния решение о масштабе наводнения принимается на 2 этапе работы метода, а для двух последних вариантов – на 3 этапе.

Таким образом, результаты, представленные в табл. 2, подтверждают работоспособность предложенного метода.

Выводы

1. Предложен метод оперативного принятия решения о масштабах возможного паводкового наводнения при известных значениях факторов влияния на паводковые наводнения и рассчитанных векторах приоритетов факторов влияния и масштабов наводнения.

2. Векторы приоритетов определяются с использованием нечеткого описания факторов влияния на паводковые наводнения.

3. Приведены результаты оперативного определения характера паводковых наводнений при четырех различных наборах значений факторов влияния.

4. При проведении дальнейших исследований целесообразно оценить возможность создания системы поддержки принятия решения о масштабах наводнения с использованием предложенного метода.

Список литературы

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

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

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

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

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

6. Определение уклона реки [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://escoera.ucoz.ua/>.

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

8. Определение характера (масштабов) паводковых наводнений при нечетком описании факторов влияния / О.С. Бутенко, М.В. Буряченко, Л.С. Весельская, Р.Э. Пашенко // Системи обробки інформації. – Х.: XV ПС, 2013. – Вип. 8(115). – С. 278-287.

Поступила в редколлегию 1.06.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Н.И. Адаменко, Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Харьков.

ОПЕРАТИВНЕ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕННЯ ПРО МАСШТАБИ ПАВОДКОВОЇ ПОВЕНІ

Р.Е. Пашенко, Л.С. Весельська, О.А. Барданова

Розглянута можливість оперативного прийняття рішення про масштаби можливої паводкової повені при відомих значеннях факторів впливу на паводкові повені і розрахованих векторах пріоритетів факторів впливу і масштабів повені. Вектори пріоритетів визначаються з використанням нечіткого опису факторів впливу на масштаби паводкової повені. Запропонований метод оперативного прийняття рішення про масштаби повені. Приведені результати оперативного визначення характеру паводкових повеней при чотирьох різних наборах значень факторів впливу на повені.

Ключові слова: паводкова повінь, масштаб повені, ухвалення рішення, чинник впливу.

OPERATIVE DECISION-MAKING ABOUT THE SCALES OF FLOOD

R.E. Paschenko, L.S. Veselskaja, O.A. Bardanova

Possibility of operative decision-making is considered about the scales of possible leash flood at the known values of factors influence on floods and expected vectors priorities of factors influence and scales of flood. The vectors priorities are determined with the use of unclear description of factors influence on the scales of flood. The method of operative decision-making about the scales of flood is offered. The results operative determination character of floods are resulted at four different sets of values factors influence on floods.

Keywords: flood flood, scale of flood, decision-making, factor of influence.