

Е.П. Истомин, Л.С. Слесарева

ОЦЕНКА РИСКА ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

E.P. Istomin, L.S. Slesareva

ESTIMATION OF RISK OF THE EXTREME HYDROMETEOROLOGICAL PHENOMENA

В статье дается анализ возникновения рисков, связанных с экстремальными гидрометеорологическими явлениями. Рассмотрен подход к прогнозированию риска при известных начальных условиях исследуемого процесса. Приводится оценка рисков, их верхняя и нижняя границы.

Ключевые слова: экстремальное гидрометеорологическое явление, наводнение, риск, ущерб, гауссовский процесс.

This paper provides an analysis of the risks associated with extreme hydrometeorological events. An approach to predict the risk for known initial conditions of the process. Provides an assessment of risks, their upper and lower bounds.

Key words: the extreme, hydrometeorological, phenomenon, flooding, risk, a damage, Gaussian process.

Существует много экстремальных гидрометеорологических явлений: засуха, ураганы, лесные пожары, наводнения, лавина, сель, сильный продолжительный дождь и т.д. Все они, безусловно, опасны для человека и наносят ущерб народному хозяйству. В России по размеру экономических потерь среди последствий экстремальных гидрометеорологических явлений первое место занимают засухи; второе – комплекс экстремальных гидрометеорологических явлений (ураган, сильный ветер, шквал, смерч); третье – наводнения (30 % всех погибших вследствие гидрометеорологических явлений).

Наибольшую опасность представляют высокие (выдающиеся) наводнения, когда нарушается хозяйственная деятельность, и катастрофические наводнения, в результате которых из хозяйственного использования исключаются все пойменные угодья, наносится ущерб населенным пунктам, элементам инфраструктуры [1].

Статистические данные Всемирной метеорологической организации о последствиях опасных природных явлений свидетельствуют о том, что за XX в. в мире погибло во время наводнений около 10 млн человек, а территории, подверженные наводнениям, на которых проживают около одного миллиарда человек, сравнимы с суммарной площадью всех стран Европы [Авакян, 2000]. Несмотря на широкое применение инженерных мер защиты от наводнений, в глобальном масштабе в XX столетии экономический ущерб от наводнений возрос.

Увеличивается ущерб от наводнений и в начале XXI столетия. По данным ВМО, во время наводнений лета 2002 г. общая площадь затопленных территорий различных государств превысила 8 млн км², лишились крова 17 млн. жителей более чем в 80 странах, около 3 тыс. человек погибли; общий ущерб, нанесенный стихией, составил 30 млрд долл. [Малик, 2005]. Летом 2009 г. ущерб от наводнений, произошедших в Чехии, составил более 5,6 млрд крон (более 200 млн евро). Летом 2010 г. наводнения на юге Китая стали причиной гибели 135 человек, экономический ущерб от стихии превысил 3,8 млрд долл.

Наводнения оказывают прямое или косвенное воздействие на все отрасли хозяйства.

Непосредственный ущерб от наводнения зависит от высоты и скорости подъема уровня воды, продолжительности его стояния, времени года, степени освоенности и экономического развития территории, плотности населения, от своевременного прогноза и принятия предупредительных мер, от наличия и эффективности защитных противопаводковых гидросооружений.

Наводнения на реках, расположенных на территории России, бывают везде, но их частота, высота и время прохождения различны в разных регионах, так как зависят от условий формирования. В России общая площадь земель, подвергающихся затоплениям при наводнениях, составляет более 88 тыс. км² (около 5 % территории страны). Потенциальная угроза затопления существует более чем для 40 крупных городов и нескольких тысяч других населенных пунктов [Малик, 2005]; по материалам МЧС РФ, ежегодно со 100 %-ной вероятностью в Российской Федерации затапливаются около 50 тыс. км² земель.

Среднемноголетний ежегодный ущерб от наводнений в России оценивается в 41,6 млрд руб. (в ценах 2001 г.); отмечается увеличение ущерба от наводнений в России [Национальный, 2005].

Во многих источниках отмечается, что в последние годы увеличилась частота опасных наводнений. В первые годы XXI в. повторяемость высоких и катастрофических наводнений увеличилась по сравнению с последним десятилетием прошлого столетия в среднем на 15 %.

История Санкт-Петербурга неразрывно связана с наводнениями, которые нарушают нормальные условия жизни, затрудняют использование его приморских территорий, причиняют большой ущерб промышленности и городскому хозяйству. Они создают постоянную угрозу уничтожения памятников истории, культуры и искусства и представляют реальную опасность для жизни людей.

При наводнениях с подъемом уровня воды на 2 м затапливается 36 км² площади города с ущербом в 6,5 млн долл., при подъеме уровня на 3 м затапливается 94 км² площади города с ущербом 486 млн долл. При возможном наводнении с уровнем 5 м будет затоплено 150 км² территории города с величиной прогнозируемого ущерба около 2,7 млрд долл. США. Среднегодовой ущерб городу от морских нагонных наводнений оценивается в 94 млн долл. США [<http://hidroteh.ru>].

Помимо заблаговременного прогноза наводнения не менее важной проблемой является минимизация ущерба от стихийного бедствия. Для этого необходимо использовать системный подход, используемый при осуществлении процедур и практических мероприятий по предупреждению или уменьшению бедствий, представляющих опасность для населения, экономики. Анализ риска является частью этого подхода и представляет собой систематическое использование имеющейся информации для выявления опасностей и оценки риска для отдельных групп населения и народного хозяйства. Анализ риска направлен на выявление опасностей (источника потенциального вреда или ущерба) и оценку степени риска. Степень риска рассматривается как сочетание частоты или вероятности и последствий определенного опасного события. Иными словами, понятие «риск» всегда включает два элемента: частоту, с которой происходит то или иное опасное событие, и последствия этого опасного события. То есть применение понятия риска позволяет переводить опасность в разряд измеряемых величин.

Использование доступной информации, научно обоснованных прогнозов оценки опасности стихийных бедствий помогают надежнее оценить риск. Эффективность оценки риска зависит от многих факторов. В первую очередь от правильности выбранной методики, точности ее расчетов, а также от уровня технологического оснащения при практическом применении методик, имеется в виду: наличие базы данных, длительность и пространственно-временной охват наблюдений за природными процессами, способы осуществления мониторинга окружающей среды. Кроме того, важно и решение организационных вопросов: привлечение квалифицированных и компетентных специалистов, занимающихся оценкой риска, выбор объекта для анализа, финансирование, согласованные действия всех заинтересованных структур. Высокой эффективностью могут обладать прогнозы, основанные на анализе природных факторов с моделированием перспективы развития ситуации [Welander, 1961].

Для решения вопросов о снижении уровня ущерба экономике от возможного проявления нагонных наводнений необходимо развитие процесса комплексного риск-менеджмента на региональном уровне.

Как показывает практика, ресурс снижения потенциала ущерба можно было использовать более полно. Именно поэтому становится неоспоримой важность комплексного процесса общего управления рисками природной среды.

В ряду мер по снижению рисков чрезвычайных ситуаций важное место занимают превентивные мероприятия, которые организационно-экономическими методами уменьшают уровень природных и техногенных угроз на территориях и объектах, где они проводятся. Совокупность таких мер обычно называют организационно-экономическими механизмами снижения рисков чрезвычайных ситуаций.

Организационный характер этих мероприятий обусловлен тем, что их содержание во многом составляют разнообразные управленческие меры: планирование, подготовка и принятие решений, координация действий, взаимодейст-

вие, декларирование состояния, контроль. Экономическая составляющая заключается в том, что, во-первых, реализация принятия управленческих решений требует затрат; во-вторых, эти затраты необходимо минимизировать; в-третьих, для претворения намеченного в жизнь требуется создание определенных экономических условий; в-четвертых, остро встает вопрос экономической эффективности проводимых мер, их целесообразности и т.д.

Организационно-экономические механизмы снижения рисков разнообразны и многочисленны. В качестве основных могут быть названы:

- рациональное размещение производительных сил и поселений;
- подготовка объектов экономики и систем жизнеобеспечения населения к устойчивому функционированию в чрезвычайных ситуациях;
- обновление основных производственных фондов;
- декларирование промышленной безопасности;
- лицензирование видов деятельности;
- государственный надзор и контроль [<http://www.meteo.nw.ru>].

Рассмотрим подробнее понятие риска. Риск – это степень опасности испытать негативные воздействия или неудачи в предпринимаемых действиях. Другими словами, риск – это измеренная возможность того, что ход событий, действия и результаты деятельности приведут к последствиям, отрицательно воздействующим на человеческие ценности. Поскольку риск характеризует степень опасности, он является ее мерой. Оценка риска проводится, как правило, в вероятностном виде. Недаром риск возникновения чрезвычайной ситуации часто рассматривают как вероятность или частоту возникновения источника чрезвычайной ситуации (ГОСТ Р 22.0.02-94). Для оценки риска необходимы количественные показатели. Они должны обеспечивать сравнимость степени опасности различных ее источников, состояния безопасности для различных видов деятельности и категорий, в целом оценку состояния безопасности жизнедеятельности на определенной территории.

Как правило, понятие риска связывают с возможностью наступления сравнительно редких событий. При этом риск часто отождествляют с вероятностью $Q(t)$ наступления этих событий за интервал времени t (как правило, за год). Вероятность $Q(t)$ выступает в этом случае как мера (показатель) риска, удобная для сравнения рисков для одного объекта (субъекта) от различных событий или для различных объектов (субъектов) в типовых для них условиях функционирования (деятельности).

Риск связывают также с размером w ущерба от опасного события (например, опасного природного явления – наводнения, землетрясения или аварии – взрыва, пожара), как правило, в натуральном (число пострадавших и погибших, размер зоны действия опасных факторов) или стоимостном выражении. Таким образом, риск сочетает в себе вероятность неблагоприятного события и объем негативных последствий этого события (убытки, потери, ущерб).

Наиболее общим показателем риска считается математическое ожидание (среднее значение) ущерба от опасного события за год:

$$\bar{W} = \sum_{i=1}^0 P(H_i)w_i = Q(\Delta t)w,$$

где $P(H_0) = Q(\Delta t)$ – вероятность наступления, повлекшего за собой ущерб; $P(H_1) = 1 - Q(\Delta t)$ – вероятность положительного исхода; $w_0 = w$; $w_1 = 0$.

Если в течение года может произойти $N > 1$ опасного события, то показателем риска служит сумма ущербов от всех событий:

$$\bar{W} = \sum_{i=0}^N w_i = B(\Delta t)\bar{w},$$

где w_i – ущерб от i -го опасного события; \bar{w} – средний ущерб при реализации опасного события; $B(\Delta t)$ – математическое ожидание частот появления событий за год.

Таким образом, независимыми переменными, по которым оценивается риск, являются время t и ущерб w , а для оценки (прогноза) риска необходимо определять частоты реализаций опасных событий и ущерб от них [<http://www.obzh.ru>].

Постановка задачи и оценка риска

При прогнозировании риска от какого-либо события необходимо спрогнозировать вероятность наступления такого события $Q(t_3)$, где t_3 – глубина прогноза.

Событие (например, нагонное наводнение) считается наступившим, если уровень воды $[X(t)]$ превысил определенные границы, т.е. наводнение не началось, если уровень воды находится в пределах $D(t) = [a(t), b(t)]$, где $a(t) \equiv 0$, $b(t)$ – ординар, как правило, постоянная величина.

Обозначим вероятность невыхода уровня воды на интервале времени $[0, t_3]$

$$P(t_3) = P\{X(\tau) \in D(\tau), \forall \tau \in [0, t_3]\} \equiv 1 - Q(t_3).$$

Получению оценок в подобной постановке посвящены некоторые работы [Истомин, 1986; 1987], представляющие интерес для оценки надежности сложных технических систем.

Кроме $P(t_3)$, большой интерес представляет значение $P(t_3/x_0)$, т.е. вероятность невыхода случайного процесса за пределы установленных границ при условии, что нам известно значение этого процесса в начальный момент времени, $t = 0$ [$x(t = 0) = x_0$].

Известно [Истомин, 1987], что для получения точного значения $P(t_3/x_0)$ необходимо знать множество F_k всех конечномерных распределений случайного процесса $X(t)$, однако этого практически сделать невозможно. Поэтому задача состоит в оценке верхней и нижней границ данной вероятности, а соответственно, и в оценке риска.

Для нахождения верхней границы разобьем интервал $[0, t_3]$ на m частей. Обозначим $\tau = t_3/(m + 1)$.

$$t_i = t_{i+1} + \tau, \quad t_0 = 0, \quad t_m = t_3, \quad I = 1, 2, \dots, m,$$

тогда событие A_i (нахождение процесса в t_i момент времени в заданной области) может быть определено по формуле:

$$A_i = \{X(t_i) \in D(t_i)\}, \quad A = \prod_{i=1}^m A_i,$$

откуда

$$P(t_r) = \lim_{m \rightarrow \infty} P\left(\prod_{i=1}^m A_i\right).$$

Можно показать, что при $m < \infty$ справедливо неравенство

$$P(A_j A_0) \geq P(A), \quad j = \bar{1}, \bar{m}.$$

После преобразований получаем:

$$P(A_j A_0) \geq P\left(\prod_{i=1}^m A_i / A_0\right), \quad j = \bar{1}, \bar{m}. \quad (1)$$

Из выражения (1), согласно [Истомин, 1986; 1987], осуществив переход к непрерывным величинам, получим оценку сверху:

$$P^*(t_3/x_0) = \min_{\theta \in [0, t_3]} \int_{D(\theta)} dF_1 y/x_0, \quad (2)$$

где $F_1(y/x_0) = P\{X(\theta) \in y / X(0) = x_0\}$.

В качестве нижней оценки $P(t_3/x_0)$ может быть использовано следующее выражение [<http://hidroteh.ru>]:

$$P_*(t_3/x_0) = 1 - \lim_{\tau \rightarrow 0} 1/\tau \left\{ \int_0^{t_3} \omega_1(t_1 \tau/x_0) dt - \sum_{i=2}^{s-1} \int_0^{t_3} \omega_i(t_1 \tau/x_0) dt \right\}. \quad (3)$$

Соответствующие оценки для рисков могут быть записаны:

$$\bar{W}^* = [1 - P^*(t_p/x_0)]w - \text{верхняя оценка риска}; \quad (4)$$

$$\bar{W}^* = [1 - P_*(t_p/x_0)]w - \text{нижняя оценка риска}. \quad (5)$$

Практическая реализация

Предположим, что на этапе предварительных наблюдений было установлено, что закон изменения во времени состояния водной поверхности хорошо описывается гауссовским процессом с параметрами $m_x(t)$, $\sigma_x(t)$ и $r_x(t_1, t_2)$.

Будем считать, что событие имеет двухсторонний предел $D(t) = [a(t), b(t)]$, $a(t) = 0$, $b(t) = b$.

Тогда оценка [Авакян, 2000] сверху, согласно [Истомин, 1986; 1987], примет вид:

$$P^*(t_3/x_0) = \Phi \left\{ \frac{b - m_x(t_3) - r_x(0, t_3)[x_0 - m_x(0)]}{\sigma_x(t_3)\sqrt{1 - r_x^2(0, t_3)}} \right\} - \Phi \left\{ \frac{-m_x(t_3) - r_x(0, t_3)[x_0 - m_x(0)]}{\sigma_x(t_3)\sqrt{1 - r_x^2(0, t_3)}} \right\}, \quad (6)$$

где
$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\{-z^2/2\} dz.$$

Для получения оценки снизу введем вместо $X(t)$ новый процесс

$$\xi(t) = \frac{X(t) - m_x(t)}{\sigma_x(t)}.$$

Тогда изменится и поле допуска:

$$D_\xi(t) = [\alpha(t), \beta(t)],$$

где $\alpha(t) = [-m_x(t)]/\sigma_x(t)$, $\beta(t) = [b - m_x(t)]/\sigma_x(t)$.

В выражении ([Истомин, 1986]), используя двух- и трёхмерные условные нормальные распределения, осуществим предельный переход [[Истомин, 1986; 1987]]. После преобразований окончательное выражение для $P(t_3/x_0)$ примет вид

$$P_*(t_3/x_0) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi(1 - r^2(0, t_3))}} \int_0^{t_3} |\omega(t/x_0)| dt. \quad (7)$$

Для оценки рисков используем выражения (4), (5).

Таким образом, получены оценки верхней и нижней границ $P(t_3/x_0)$ при известных начальных условиях (x_0) исследуемого процесса, которые согласно [3, 4] дают ошибку менее 10 % на достаточно большом интервале прогнозирования. Эти показатели вполне устраивают при оценке рисков экстремальных гидрометеорологических явлений.

Литература

1. Авакян А.Б., Полюшкин А.А. Влияние наводнений на жизнь общества и защита от них // Изв. АН СССР, сер. геогр., 1989, № 2, с. 41–54.
2. Авакян А.Б., Истомина М.Н. Наводнения в мире в последние годы XX в. // Водные ресурсы, 2000, т. 27, № 5, с. 469–475.

3. *Истомин Е.П.* Приближенная оценка вероятности пребывания случайного процесса в заданной области // Тр. МВТУ. Планирование и оценка результатов экспериментов, 1986, вып. 1.
4. *Истомин Е.П.* Приближенный метод индивидуального прогнозирования надежности // Надежность и контроль качества, 1987, вып. 2.
5. *Карташов Г.Д., Шведова И.Г.* Об одной задаче отбора изделий. – Изд. АН СССР. Техническая кибернетика, 1983, № 3, с. 70–75.
6. *Малик Л.К.* Факторы риска повреждения гидротехнических сооружений. Проблемы безопасности. – М.: Наука, 2005. – 354 с.
7. Национальный доклад на Всемирной конференции по уменьшению опасности бедствий, 2005. Кобе, Япония, 18–22 января 2005 г.
8. *Welander P.* Numerical prediction of storm surges // Advances in Geophysics, 1961, vol. 8.
9. <http://www.meteo.nw.ru/articles/index.php?id=532>
10. <http://www.obzh.ru/eco/index.html>
11. <http://hydroteh.ru/gts-stroitelstvo-ekspluatacija-rekonstrukcija/kompleks-sooruzheni-zaschiti-sankt-peterburga-ot-navodneni.html>