



УДК 004.942

МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК НАВОДНЕНИЯ, ВЛИЯЮЩИХ НА ВЕЛИЧИНУ ПРИЧИНЯЕМОГО УЩЕРБА

М. В. Хамутова¹, В. А. Кушников²

¹Хамутова Мария Васильевна, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, Саратов, Астраханская, 83, mariuka7d@rambler.ru

²Кушников Вадим Алексеевич, доктор технических наук, директор, Институт проблем точной механики и управления РАН, Россия, 410024, Саратов, Рабочая, 24, kushnikoff@yandex.ru

В соответствии с ГОСТ выбраны характеристики наводнений, влияющие на величину причиняемого им ущерба, прогнозирование которых позволит повысить эффективность ликвидации последствий наводнений. На основе формального аппарата системной динамики, который учитывает причинно-следственные связи между моделируемыми переменными, разработана математическая модель, позволяющая прогнозировать характеристики наводнений. Построен граф причинно-следственных связей, существующих между моделируемыми характеристиками наводнений. Математическая модель для прогнозирования характеристик наводнений описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка. Представлены функциональные зависимости правых частей системы уравнений, описывающие математическую модель. Численное решение системы уравнений получено с помощью метода Рунге – Кутты. Проведены вычислительные эксперименты, позволяющие на различных временных интервалах и с учетом изменяющихся параметров внешней среды определить моделируемые характеристики. Сравнение прогнозируемых характеристик, рассчитанных по модели с реальными значениями наводнения, произошедшего в Приморье в августе 2001 г., подтверждает адекватность математической модели. Полученные результаты могут быть использованы при разработке информационных систем прогнозирования последствий наводнения для оперативно-диспетчерского персонала МЧС.

Ключевые слова: математическая модель, системная динамика, прогнозирование характеристик наводнений.

DOI: 10.18500/1816-9791-2017-17-2-231-238

ВВЕДЕНИЕ

Наводнения встречаются практически по всей территории России, причиняют материальный ущерб, наносят вред здоровью населения и приводят к гибели людей. Для повышения эффективности ликвидации последствий наводнений необходимо спрогнозировать в режиме чрезвычайной ситуации характеристики наводнения, влияющие на величину ущерба. Существующие модели прогнозирования не позволяют определить совокупность характеристик наводнения с учетом большого количества нелинейных обратных связей между ними [1, 2]. Данное обстоятельство приводит к



уменьшению точности прогнозирования, что негативно влияет на процессы ликвидации последствий наводнений в условиях чрезвычайной ситуации.

В статье приведена математическая модель для прогнозирования характеристик наводнений, влияющих на величину ущерба. Предложен и обоснован ориентированный граф причинно-следственных связей, существующий между прогнозируемыми характеристиками наводнения. При разработке математической модели использован формальный аппарат системной динамики, учитывающий причинно-следственные связи между моделируемыми переменными. Результаты вычислительного эксперимента подтверждают адекватность математической модели.

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

В соответствии с ГОСТ¹ в качестве прогнозируемых характеристик наводнения были выбраны: X_1 — численность группировки сил, участвующих в аварийно-спасательных работах; X_2 — количество жилых домов, разрушенных и поврежденных в результате наводнения; X_3 — численность населения, эвакуированного из зоны затопления; X_4 — количество погибших; X_5 — протяженность железных и автомобильных дорог, оказавшихся в зоне затопления; X_6 — количество промышленных предприятий в зоне наводнения; X_7 — количество транспортных средств, участвующих в аварийно-спасательных работах; X_8 — численность населения в зоне затопления; X_9 — площадь сельскохозяйственных угодий, охваченных наводнением; X_{10} — количество погибших сельскохозяйственных животных.

Математическая модель прогнозирования характеристик наводнения, влияющих на величину ущерба, разрабатывается на основе аппарата системной динамики, где при описании моделируемых переменных используется система нелинейных дифференциальных уравнений 1-го порядка:

$$\frac{dX_i}{dt} = X_i^+ + X_i^-, \quad i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где X_i^+ , X_i^- , $i = \overline{1, n}$ — непрерывные или кусочно-непрерывные функции, определяющие положительную и отрицательную скорость изменения переменной X_i [3]. В свою очередь, $X_i^+ = f_i^+(F_1, F_2, \dots, F_m)$, $X_i^- = f_i^-(F_1, F_2, \dots, F_m)$ — функции от факторов F_j , $j = \overline{1, m}$, влияющих на скорость изменения переменной, при этом факторы F_j могут быть функциями от прогнозируемых переменных X_i , $i = \overline{1, n}$ [4, 5].

На основании анализа причинно-следственных связей, существующих между прогнозируемыми характеристиками наводнений, разработан ориентированный граф, представленный на рис. 1. Моделируемые характеристики X_i являются вершинами графа, а исходящие и входящие ребра характеризуют функциональные связи между ними.

¹ГОСТ 22.0.06-97/ГОСТ Р 22.0.06-95. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Источники природных чрезвычайных ситуаций. Поражающие факторы. Номенклатура параметров поражающих воздействий. Принят постановлением Госстандарта РФ № 308 от 20.06.1995 г.



где $A(t)$ — плотность транспортных сетей в зоне затопления, $D(t)$ — плотность населения, $F(t)$, $G(t)$, $T(t)$ — средняя скорость течения, глубина и температура воды соответственно, $I(t)$ — доля площади сельскохозяйственных угодий, $S(t)$ — площадь зоны затопления.

Зависимости f_i^- и f_i^+ определяются на основе анализа статистических данных и аппроксимируются полиномами. При отсутствии или недостоверности статистических данных, используемых при построении модели (2), эти зависимости могут быть определены исходя из физического смысла моделируемого процесса [6, 7]. Площадь зоны затопления $S(t)$, средняя скорость течения $F(t)$, средняя глубина воды $G(t)$ и средняя температура воды $T(t)$ рассчитываются экспертами по известным методикам. В частности, для определения площади зоны затопления могут использоваться методы, позволяющие моделировать динамику поверхностных вод на произвольном рельефе местности.

2. ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛИ

Проверка адекватности модели осуществляется посредством сравнения характеристик, определенных по модели (2), с реальными характеристиками наводнения, происшедшего в августе 2001 г. в Приморье. В таблице представлены функции f_i^- и f_i^+ системы (2), построенные для данного наводнения по методикам, представленным в [6, 7].

Аналитический вид функций f_i^- и f_i^+
The analytic form of the functions f_i^- and f_i^+

f_1^+	$\begin{cases} k_1 \sqrt{S(t)X_8}, & S(t) > \varepsilon, \\ 0, & S(t) \leq \varepsilon, \end{cases}$	f_6^+	$\begin{cases} k_6 S(t)^{0.5} X_8^{0.1}, & S(t) > \varepsilon, \\ 0, & S(t) \leq \varepsilon, \end{cases}$
f_2^+	$\begin{cases} k_2 F(t)G(t)t \sqrt[3]{S(t)X_8}, & S(t) > \varepsilon, \\ 0, & S(t) \leq \varepsilon, \end{cases}$	f_7^+	$k_7 X_1$
f_3^+	$k_3 \frac{X_8 X_1}{X_7}$	f_8^+	$\begin{cases} k_8 D(t)S(t), & S(t) > \varepsilon, \\ 0, & S(t) \leq \varepsilon, \end{cases}$
f_4^+	$k_4 \frac{F(t)G(t)T(t)X_8}{X_7 X_1}$	f_9^+	$\begin{cases} k_9 I(t)S(t), & S(t) > \varepsilon, \\ 0, & S(t) \leq \varepsilon, \end{cases}$
f_5^+	$\begin{cases} k_5 A(t)S(t), & S(t) > \varepsilon, \\ 0, & S(t) \leq \varepsilon, \end{cases}$	f_{10}^+	$\begin{cases} k_{10} \frac{F(t)G(t)T(t)S(t)}{X_1 X_7}, & S(t) > \varepsilon, \\ 0, & S(t) \leq \varepsilon, \end{cases}$
f_2^-	$k_{11} X_1 X_7$	f_5^-	$k_{12} X_1 X_7$
f_8^-	$k_{13} X_4$	f_9^-	$k_{14} X_1 X_7$

В частности, функция $f_1^+(S(t), X_8(t))$, характеризующая скорость изменения переменной X_1 , выбрана прямо пропорционально площади зоны затопления и численности населения в зоне затопления, что соответствует экспериментальным данным.



Для нормирования произведения факторов $S(t)$ и $X_8(t)$ используется возведение в степень 0.5, что обеспечивает наиболее точное совпадение с реальными результатами. Таким образом, искомая зависимость имеет вид

$$f_1^+(S(t), X_8(t)) = \begin{cases} k_1 \sqrt{S(t)X_8}, & S(t) > \varepsilon, \\ 0, & S(t) \leq \varepsilon. \end{cases}$$

Коэффициенты $k_i, i = \overline{1, 14}$, определяются посредством вычислительного эксперимента на этапе адаптации модели к объекту исследования. Система дифференциальных уравнений (2) с учетом данных, приведенных в таблице, была решена численным методом Рунге – Кутты 4-го порядка при начальных условиях $t_0 = 1, X_i(t_0) = X_{i0}, i = \overline{1, 10}$.

На рис. 2 представлено решение системы уравнений (2), нормированное относительно максимальных значений моделируемых характеристик: $X_i^N = X_i / X_i^{\max}$.

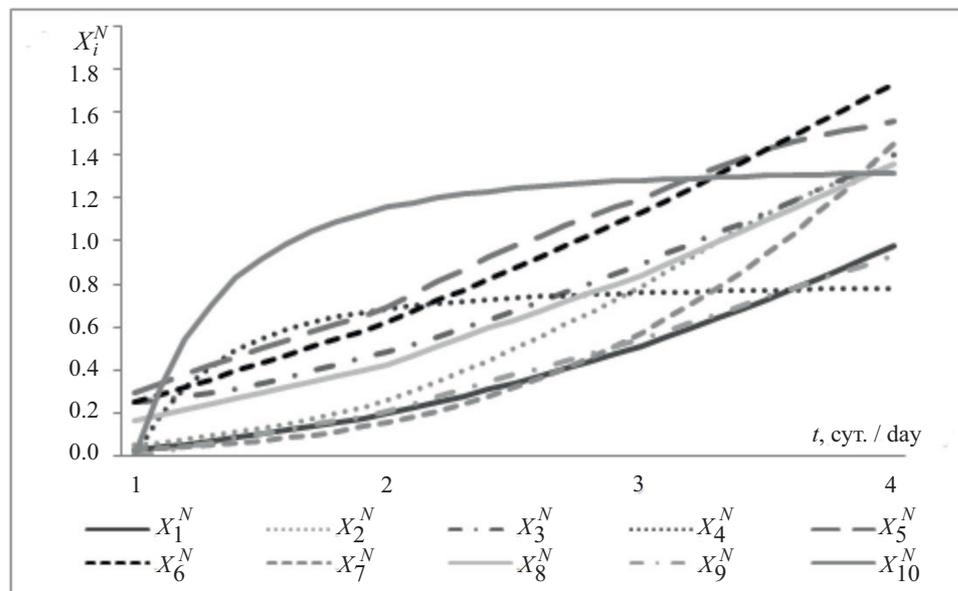


Рис. 2. Результаты прогнозирования характеристик наводнения
 Fig. 2. Results of forecasting flood characteristics

В частности, анализ зависимости $X_4^N(t)$ позволяет сделать вывод, что максимальные потери среди населения приходятся на первые сутки наводнения и в дальнейшем их рост незначителен, что подтверждается экспертами. Увеличение остальных прогнозируемых характеристик обусловлено ростом площади зоны затопления, пик которого приходится на 4-й день наводнения.

На рис. 3 выполнено сравнение характеристики $X_4^N(t)$, определенной по модели (2), с реальными статистическими данными, интерполированными многочленом Лагранжа $Y_4(t)$.

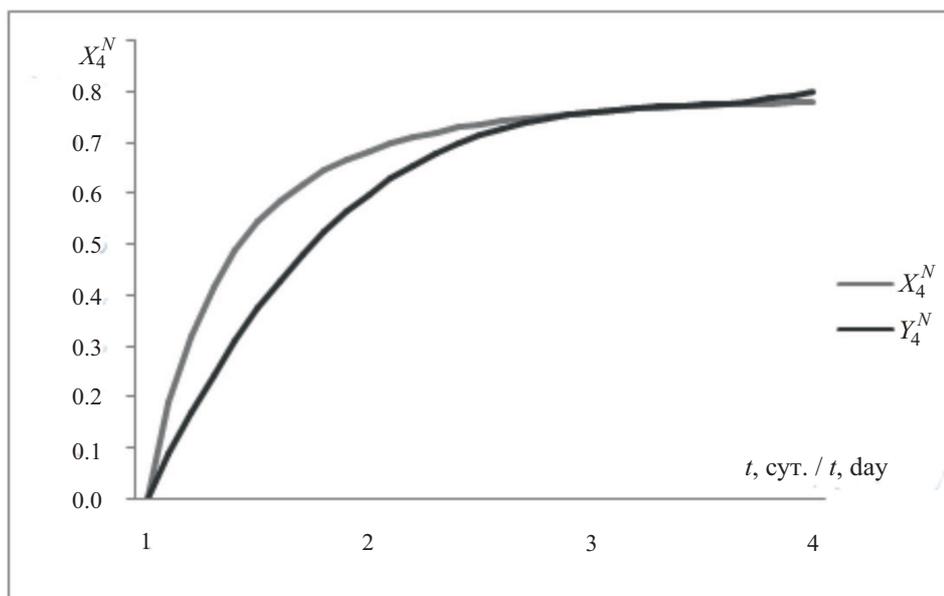


Рис. 3. Сравнение значений моделируемой характеристики $X_4^N(t)$ с реальными данными

Fig. 3. Comparison of the values of the simulated characteristic $X_4^N(t)$ with real data

Анализ полученных графиков позволяет утверждать, что значения $X_4^N(t)$ лишь незначительно отличаются от реальных данных в узлах $t = \overline{1,4} \Delta_{\text{ср}}^{X_4^N} \approx 3\%$. При сравнении остальных моделируемых характеристик модели (2) с их реальными значениями, среднее значение относительных погрешностей в узлах моделирования для каждой характеристики не превышает 10%, что позволяет утверждать, что разработанная математическая модель является адекватной [8, 9].

Библиографический список

1. Авакян А. Б. Наводнения. Концепция защиты // Изв. РАН. Сер. географическая. 2000. № 5. С. 40–46.
2. Воронин А. А., Васильченко А. А., Храпов С. С., Агафонникова Е. О. Анализ эффективности природовосстановительных проектов в эколого-экономической системе «Волжская ГЭС — Волго-Ахтубинская пойма» // Управление большими системами. М. : ИПУ РАН, 2014. Вып. 52. С. 133–147.
3. Садовничий В. А., Акаев А. А., Коротаев А. В., Малков С. Ю. Моделирование и прогнозирование мировой динамики / Научный совет по Программе фонд. исслед. Президиума РАН. М. : ИСПИ РАН, 2012. 360 с. Экономика и социология знания.
4. Бродский Ю. И. Лекции по математическому и имитационному моделированию. М. ; Берлин : Директ-Медиа, 2015. 240 с.
5. Белотелов Н. В., Бродский Ю. И., Павловский Ю. Н. Сложность. Математическое моделирование. Гуманитарный анализ : Исследование исторических, военных, социально-экономических и политических процессов. М. : Кн. дом «ЛИБРОКОМ», 2009. 320 с.
6. Федянин В. И., Проскурников Ю. Е. Организация и ведение аварийно-спасательных и других неотложных работ при ликвидации чрезвычайных ситуаций природного характера : учеб. пособие. Воронеж : Воронеж. гос. техн. ун-т, 2006. Ч. 1. 469 с.



7. РД 153-34.2-002-01. Временная методика оценки ущерба, возможного вследствие аварии гидротехнического сооружения (приказ Минэнерго России № 130 от 26.04.2001 г.). URL: https://znaytovar.ru/gost/2/RD_15334200201_Vremennaya_meto.html (дата обращения: 01.02.2017).
8. Хамутова М. В., Кушников В. А. Математическая модель прогнозирования последствий наводнений // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. 2016. № 3. С. 109–114.
9. Клюев В. В., Резчиков А. Ф., Кушников В. А., Богомолов А. С., Иващенко В. А., Филимонюк Л. Ю., Хамутова М. В. Информационно-управляющая система для поддержки принятия решения по ликвидации последствий наводнения // Вестн. компьютерных и информационных технологий. 2016. № 11 (149). С. 39–45.

Образец для цитирования:

Хамутова М. В., Кушников В. А. Модель прогнозирования характеристик наводнения, влияющих на величину причиняемого ущерба // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Математика. Механика. Информатика. 2017. Т. 17, вып. 2. С. 231–238. DOI: 10.18500/1816-9791-2017-17-2-231-238.

A Model for Forecasting Characteristics of Floods Affecting the Value of the Caused Damage

M. V. Khamutova¹, V. A. Kushnikov²

¹Maria V. Khamutova, ORCID: 0000-0002-7926-1347, Saratov State University, 83, Astrakhanskaya str., 410012, Saratov, Russia, mariuka7d@rambler.ru

²Vadim A. Kushnikov, Institute of Precision Mechanics and Control, Russian Academy of Sciences, 24, Rabochaya str., 410028, Saratov, Russia, iptmuran@san.ru

According to GOST (State Standard) characteristics of floods are selected that have influence on the extent of damage. Forecasting of such characteristics will improve the efficiency of liquidation of floods effects. On the basis of formal apparatus of system dynamics that takes into account the casual relationships between modeled variables a mathematical model is developed to forecast characteristics of floods. A graph of cause-effect relations that exist between modeled characteristics is constructed. The mathematical model is described by a system of first order nonlinear differential equations. The numerical solution of the system was obtained with the aid of Runge – Kutta method. Computational experiments were conducted that allowed to determine the modeled characteristics for different time intervals. Comparison of the characteristics calculated according to the model with their real values during the Primorski Krai's flood in August 2001 confirms the adequacy of the mathematical model. The results obtained can be used in the development of information systems of forecasting the flood effects for operative and dispatching personnel of the EMERCOM.

Key words: mathematical model, system dynamics, forecasting the characteristics of floods.

References

1. Avakjan A. B. Navodneniya. Konceptiya zashhity [Floods. The concept of protection]. *Izvestiya RAN. Ser. Geograficheskaya* [Izvestiya RAS. Ser. Geographic], 2000, no. 5, pp. 40–46 (in Russian).



2. Voronin A., Vasilchenko A., Chrapov S., Agafonnikova E. Efficiency analysis for nature restoration projects in ecologo-economic system of Volga HPP and Volga-Akhtuba Floodplain. *Large-scale Systems Control*. Moscow, IPU RAN, 2014, iss. 52, pp. 133–147 (in Russian).
3. Sadovnichiy V. A., Akayev A. A., Korotayev A. V., Malkov S. Yu. Modelling and Forecasting World Dynamics. *Scientific Council for "Economics and Sociology of Knowledge" Fundamental Research Programme of the Presidium of the RAS*. Moscow, RAS ISPR, 2012.
4. Brodskij Ju. I. Lekcii po matematicheskomu i imitacionnomu modelirovaniju [Lectures on mathematical and simulation modeling]. Moscow, Berlin, Direkt-Media, 2015. 240 p. (in Russian).
5. Belotelov N. V., Brodskij Ju. I., Pavlovskij Ju. N. Complexity. Mathematical modeling. Humanitarian analysis: the Study of the historical, military, socio-economic and political processes. Moscow, LIBROKOM Publ., 2009. 320 p. (in Russian).
6. Fedianin V. I., Proskurnikov Yu. E. Organization and implementation of rescue and other emergency operations when liquidating the emergent situations of natural origin. Voronezh, Voronezh Techn. Univ. Press, 2006, pt. 1. 469 p. (in Russian).
7. RD 153-34.2-002-01. Temporary methods of assessment of damage, possible due to an accident waterworks (the Order of the Ministry of Energy of Russia no. 130, 26, April, 2001) (in Russian). Available at: https://znaytovar.ru/gost/2/RD_15334200201_Vremennaya_meto.html (accessed 01, February, 2017)
8. Khamutova M. V., Kushnikov V. A. Mathematical model for forecasting of flood effects. *Vestnik Astrakhan State Technical Univ. Ser. Management, Computer Sciences and Informatics*, 2016, no. 3, pp. 109–114 (in Russian).
9. Klyuev V. V., Rezhnikov A. F., Kushnikov V. A., Bogomolov A. S., Ivashchenko V. A., Filimonyuk L. Yu., Khamutova M. V. Informational-control system for decision-making supply during elimination of floods' consequences. *Vestnik komp'iuternykh i informatsionnykh tekhnologii* [Herald of computer and information technologies], 2016, no. 11(149), pp. 39–45 (in Russian). DOI: 10.14489/vkit.2016.11.pp.039-045.

Cite this article as:

Khamutova M. V., Kushnikov V. A. A Model for Forecasting Characteristics of Floods Affecting the Value of the Caused Damage. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Math. Mech. Inform.*, 2017, vol. 17, iss. 2, pp. 231–238 (in Russian). DOI: 10.18500/1816-9791-2017-17-2-231-238.
