

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОСЛЕДСТВИЙ НАВОДНЕНИЙ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАВОДНЕНИЙ

Хамутова М.В.

*Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н.Г.Чернышевского, Россия, г. Саратов, ул. Астраханская, д.83
mariuka7d@rambler.ru,*

Цвиркун А.Д., Резчиков А.Ф.

*Институт проблем управления им. В.А.Трапезникова РАН,
Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная д.65
tsvirkun@ipu.rssi.ru, rw4cy@mail.ru,*

Кушников В.А., Богомолов А.С., Иващенко В.А.

*Институт проблем точной механики и управления РАН,
Россия, г. Саратов, ул. Рабочая, 24
iptmuran@san.ru, alexbogomolov@ya.ru*

Аннотация: Проведен анализ основных составляющих процесса прогнозирования паводковых наводнений. Представлена типовая схема системы мониторинга и прогнозирования наводнений. На основе системной динамики разработана математическая модель для определения характеристик последствий наводнений, которая учитывает прогностические результаты системы мониторинга и прогнозирования наводнений. Разработанная модель может быть использована для оптимизации процесса предупреждения и ликвидации наводнений для конкретного объекта.

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

Введение

Влияние таких параметров как, площадь затопления, уровень воды, скорость течения и т.д., полученных из анализа данных, методов и моделей систем мониторинга и прогнозирования наводнений, на характеристики последствий наводнений может устанавливаться на основе системно-динамического подхода, который позволяет более детально описать взаимосвязи между характеристиками и указанными параметрами. Анализ прошлых наводнений на конкретном объекте затопления позволит на основе системной динамики разработать имитационную модель для определения характеристик последствий наводнений, что позволит анализировать различные сценарии развития наводнения и на основе чего формировать комплекс мер, направленных на предупреждение и ликвидацию наводнения.

1 Прогнозирование наводнений

Прогнозирование паводковых наводнений является сложным в методическом и технологическом плане процессом, включающим определение максимально возможного ожидаемого превышения уровня воды, а затем и возможной площади затопления. Важной составляющей прогнозирования являются сети гидрологических станций и постов, которые являются основным источником информации о гидрологическом режиме и состоянии водных объектов. Они предназначены для проведения наблюдений и сбора гидрологических данных (расход воды, уровни воды, температура воды и т. д.) используемых в гидрологических прогнозах. Еще одной важной составляющей прогнозирования является информации о метеорологических условиях на период прогноза возможных сценариев развития ситуации, источником которой служит метеорологические прогнозы (количественный прогноз осадков, прогноз температуры воздуха и т.д.). Полученная информация позволяет, в частности, составить краткосрочный прогноз паводкового стока [1].

Построения возможных зон затопления можно осуществить посредством обработки данных географических информационных систем (ГИС) для получения характеристических показателей рельефа или ландшафтных данных исследуемой территории [2].

Для обработки данных с гидрологических постов, метеорологических и ландшафтных данных, составление прогноза на основе использования различных методик прогнозирования, подготовку прогностических результатов и доведение ее до конечных пользователей используются мощные

информационные системы – системы мониторинга и прогнозирования наводнений. На рис. 1 представлена типовая структура системы мониторинга и прогнозирования наводнений [3].

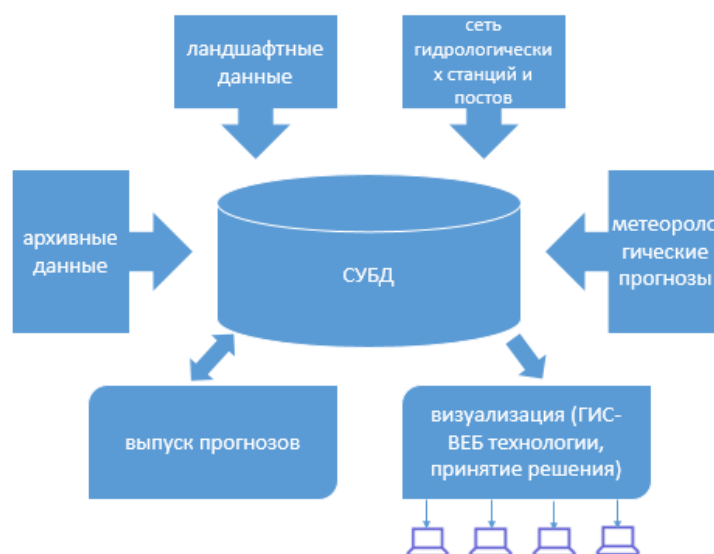


Рис. 1. Типовая структура системы мониторинга и прогнозирования наводнений

Полученные прогностические результаты (возможная площадь затопления, максимальные уровни воды, скорость течения, температура воды) могут быть использованы для определения возможных характеристик последствий наводнений, таких как количество жилых домов, разрушенных и поврежденных в результате наводнения, численность населения в зоне затопления, количество мостов, разрушенных и поврежденных в результате наводнения, и другие. Эти данные позволяют сформировать более полную картину затопления конкретного объекта и территории, на основании которой разрабатываются или корректируются планы мероприятий, способствующие повышению качества и эффективности управления процессами, связанными с предупреждением и ликвидацией наводнений.

2 Модель для определения характеристик последствий наводнения

В разработке модели используется математический аппарат системной динамики, в основе которого положены допущения, позволяющие перейти от известной, широко распространенной модели динамической системы

$$\frac{dI_j}{dt} = f_j(I_1, \dots, I_n), \quad j = 1, \dots, n \quad (1)$$

к системе вида

$$\frac{dI_j}{dt} = \alpha_{j,0} + \sum_{k=1}^n \alpha_{j,k} \prod_{l=1}^n \omega_{j,k,l}(I_l), \quad j = 1, \dots, n \quad (2)$$

Вопрос правомерности перехода в общем случае решается следующим образом. Если экспериментальное изучение исследуемого явления покажет, что система (2) описывает его достаточно адекватно (т.е., если удастся в процессе вычислительных экспериментов подобрать коэффициенты $\alpha_{j,k}$ и зависимости темпов от уровней $\alpha_{j,k}(I_1, \dots, I_n) = \alpha_{j,k} \omega_{j,k,1}(I_1) \dots \omega_{j,k,n}(I_n)$, $j, k = 1, \dots, n$, таким образом, чтобы величины моделируемых переменных совпадали с экспериментальными данными), то эта система может использоваться для определения значений моделируемых переменных исследуемого явления. Функции в правых частях нелинейных дифференциальных уравнений (2) $\omega_{j,k,l}(I_l)$ – это, как правило, полиномы невысоких степеней, которые характеризуют причинно-следственные связи между двумя переменными. Они определяются на стадии адаптации модели к конкретному объекту при обработке соответствующей статистической информации [4].

Таким образом, система дифференциальных уравнений (1) представляется следующим образом:

$$\frac{dX_i(t, \mathbf{a}(t), \mathbf{p}(t))}{dt} = f_i^+(F_1, F_2, \dots, F_m) + f_i^-(F_1, F_2, \dots, F_m), \quad i = \overline{1, n}, \quad (3)$$

где f_i^+ , f_i^- , $i = \overline{1, n}$ – темпы, непрерывные или кусочно-непрерывные функции, определяющие положительную и отрицательную скорость изменения значения характеристики последствий наводнений $X_i(t, \mathbf{a}(t), \mathbf{p}(t))$, $i = \overline{1, n}$. f_i^+ , f_i^- , $i = \overline{1, n}$ – функции от факторов F_j , $j = \overline{1, m}$, при этом F_j могут быть характеристиками последствий наводнений или параметрами внешней среды [5, 6].

В соответствии с нормативными документами, при разработке математической модели в качестве основных характеристик последствий наводнения выбраны: $X_1(t)$ – численность группировки сил, участвующих в аварийно-спасательных работах; $X_2(t)$ – количество жилых домов, разрушенных и поврежденных в результате наводнения; $X_3(t)$ – численность населения, эвакуированного из зоны затопления; $X_4(t)$ – количество погибших; $X_5(t)$ – протяженность железных и автомобильных дорог, оказавшихся в зоне затопления; $X_6(t)$ – количество промышленных предприятий в зоне наводнения; $X_7(t)$ – количество транспортных средств, участвующих в аварийно-спасательных работах; $X_8(t)$ – численность населения в зоне затопления; $X_9(t)$ – площадь сельскохозяйственных угодий, охваченных наводнением; $X_{10}(t)$ – количество погибших сельскохозяйственных животных; $X_{11}(t)$ – ущерб основным производственным фондам в зоне затопления; $X_{12}(t)$ – ущерб оборотным производственным фондам в зоне затопления; $X_{13}(t)$ – количество мостов, разрушенных и поврежденных в результате наводнения.

Из анализа взаимосвязей между исследуемыми характеристиками построен ориентированный граф причинно-следственных связей (рис. 2), положенный в основу построения математической модели.

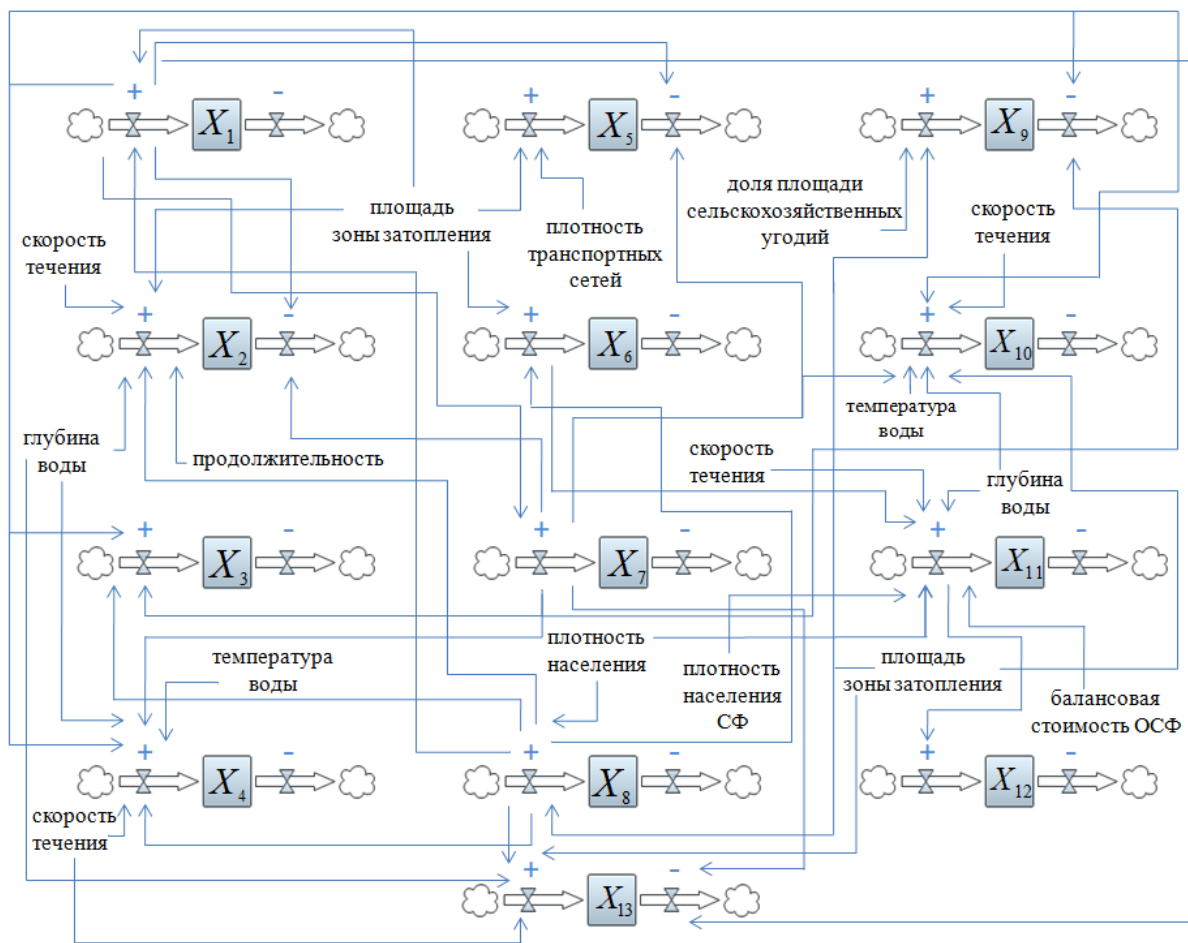


Рис. 2. Граф причинно-следственных связей, используемый при построении математической модели

Согласно представленному графу, модель для определения характеристик последствий наводнения имеет общий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l}
\frac{dX_1(t, \mathbf{p}(t))}{dt} = f_1^+(S(t), X_8(t, \mathbf{p}(t))); \\
\frac{dX_2(t, \mathbf{p}(t))}{dt} = f_2^+(V(t), G(t), S(t), X_8(t, \mathbf{p}(t)), t) + f_2^-(X_1(t, \mathbf{p}(t)), X_7(t, \mathbf{p}(t))); \\
\frac{dX_3(t, \mathbf{p}(t))}{dt} = f_3^+(X_8(t, \mathbf{p}(t)), X_1(t, \mathbf{p}(t)), X_7(t, \mathbf{p}(t))); \\
\frac{dX_4(t, \mathbf{p}(t))}{dt} = f_4^+(V(t), G(t), T(t), X_8(t, \mathbf{p}(t)), X_7(t, \mathbf{p}(t)), X_1(t, \mathbf{p}(t))); \\
\frac{dX_5(t, \mathbf{p}(t))}{dt} = f_5^+(A(t), S(t)) + f_5^-(X_1(t, \mathbf{p}(t)), X_7(t, \mathbf{p}(t))); \\
\frac{dX_6(t, \mathbf{p}(t))}{dt} = f_6^+(S(t), X_8(t, \mathbf{p}(t))); \\
\frac{dX_7(t, \mathbf{p}(t))}{dt} = f_7^+(X_1(t, \mathbf{p}(t))); \\
\frac{dX_8(t, \mathbf{p}(t))}{dt} = f_8^+(D(t), S(t)) + f_8^-(X_4(t, \mathbf{p}(t))); \\
\frac{dX_9(t, \mathbf{p}(t))}{dt} = f_9^+(I_c(t), S(t)) + f_9^-(X_1(t, \mathbf{p}(t)), X_7(t, \mathbf{p}(t))); \\
\frac{dX_{10}(t, \mathbf{p}(t))}{dt} = f_{10}^+(V(t), G(t), T(t), S(t), X_1(t, \mathbf{p}(t)), X_7(t, \mathbf{p}(t))); \\
\frac{dX_{11}(t, \mathbf{p}(t))}{dt} = f_{11}^+(V(t), G(t), S(t), X_6(t, \mathbf{p}(t)), D(t), P, C); \\
\frac{dX_{12}(t, \mathbf{p}(t))}{dt} = f_{12}^+(X_{11}(t, \mathbf{p}(t))); \\
\frac{dX_{13}(t, \mathbf{p}(t))}{dt} = f_{13}^+(V(t), G(t), S(t), X_8(t, \mathbf{p}(t))) + f_{13}^-(X_1(t, \mathbf{p}(t)), X_7(t, \mathbf{p}(t))).
\end{array} \right. \quad (4)$$

Где $A(t)$ – плотность транспортных сетей в зоне затопления, $D(t)$ – плотность населения в зоне затопления, $V(t)$, $G(t)$, $T(t)$ – скорость течения, уровень и температура воды, соответственно, $I_c(t)$ – доля площади сельскохозяйственных угодий, $S(t)$ – площадь зоны затопления, P – плотность населения по субъекту Федерации, C – стоимость основных производственных фондов субъекта Федерации.

При сделанных допущениях функции правой части (темпы) системы (4) имеют вид:

$$f_i^{+/-}(F_1, \dots, F_m) = k_i^{+/-} \prod_{j=1}^m f_{i,j}^{+/-}(F_j), \quad i = \overline{1, n}, \quad \text{где } k_i^{+/-} \text{ – поправочный коэффициент, определяемый на}$$

этапе адаптации модели и позволяющий более точно определить системные переменные, $f_{i,j}^{+/-}(F_j)$ – вспомогательные функциональные зависимости системной переменной X_i от факторов F_j , $j = \overline{1, m}$

. Если не существуют функции, устанавливающие зависимости $f_{i,j}^{+/-}$, тогда на основе статистических данных, строятся кусочно-линейные функции, которые как показывает практика, могут быть аппроксимированы полиномами невысоких степеней

$$f_{i,j}^{+/-}(F_j) = \sum_{k=0}^l c_{i,j,k}^{+/-} F_j^k = c_{i,j,0}^{+/-} + c_{i,j,1}^{+/-} F_j + \dots + c_{i,j,l}^{+/-} F_j^l, \quad n, m, l = const.$$

Рассмотрим определение характеристик последствий наводнения на конкретном примере. На основе статистических данных затопления объектов и территорий вследствие наводнения, происшедшего в Приморье, в 2001 году, построены полиномы вспомогательных зависимостей, с учетом которых система (4) для указанного наводнения принимает следующий вид:

$$\left\{ \begin{aligned}
\frac{dX_1(t)}{dt} &= \frac{1}{X_1^{\max}} (k_1^+ (0,001S^3(t) - 0,04S^2(t) + 0,6S(t) - 2,1)(54X_8^4(t) - 137X_8^3(t) + 103,4X_8^2(t) - 20,7X_8(t) + 1,2)); \\
\frac{dX_2(t)}{dt} &= \frac{1}{X_2^{\max}} (k\varphi_1(V(t), G(t), t)(-0,02S^3(t) + 0,64S^2(t) - 6,4S(t) + 21)(-14,5X_8^2(t) + \\
&+ 22,5X_8(t) - 3,3) + k_2^-(0,57X_1^2(t) + 0,276X_1(t) + 0,05)*(-3,3X_7^2(t) + 5,6X_7(t) - 0,13)); \\
\frac{dX_3(t)}{dt} &= \frac{1}{X_3^{\max}} (k_3^+(3,28X_8^2(t) - 23,31X_8(t) + 12,3)(-1,26X_1^2(t) + 10,1X_1(t) - 17,8)(-0,33X_7^2 + 2,2X_7 - 0,26)); \\
\frac{dX_4(t)}{dt} &= \frac{1}{X_4^{\max}} (k_4^+\varphi_2(V(t), G(t), T(t))(-1,3X_8^4(t) + 1,92X_8^3(t) - 0,95X_8^2(t) + 0,3X_8(t) + 0,7)(-0,42X_7^4(t) - \\
&- 7,19X_7^3(t) + 19,34X_7^2(t) - 15,1X_7(t) + 4,435)(X_1^3(t) - X_1^2(t) + 1,5X_1(t) + 0,02)); \\
\frac{dX_5(t)}{dt} &= \frac{1}{X_5^{\max}} (k_5^+A(t)(0,01S^2(t) - 0,1S(t) + 0,5) + k_5^-(0,217X_1^2(t) - 0,505X_1(t) + 0,31) \\
&(-0,304X_7^2(t) + 1,1X_7(t) + 0,26)); \\
\frac{dX_6(t)}{dt} &= \frac{1}{X_6^{\max}} (k_6^+(0,002S^2(t) + 0,056S(t) + 0,48)(-0,05X_8^3(t) + 0,9X_8^2(t) - 0,02X_8(t) + 0,23)); \\
\frac{dX_7(t)}{dt} &= \frac{1}{X_7^{\max}} (k_7^+(3,5X_1^3(t) - 5,3X_1^2(t) + 3,27X_1(t) + 0,0003)); \\
\frac{dX_8(t)}{dt} &= \frac{1}{X_8^{\max}} (k_8^+D(t)(0,18S^3(t) - 0,06S^2(t) + 0,77S(t) - 1,77) + k_8^-(2,17X_4^2(t) - 0,0024X_4(t) + 0,16)); \\
\frac{dX_9(t)}{dt} &= \frac{1}{X_9^{\max}} (k_9^+I_c(t)(0,002S^2(t) + 0,07S(t) + 0,5) + k_9^-(0,43X_1^3(t) - 2,3X_1^2(t) + \\
&+ 3,2X_1(t) - 0,07)(1,15X_7^3(t) - 1,78X_7^2(t) + 0,93X_7(t) - 0,024)); \\
\frac{dX_{10}(t)}{dt} &= \frac{1}{X_{10}^{\max}} (k_{10}^+\varphi_3(V(t), G(t), T(t))(-0,0007S^4(t) + 0,03S^3(t) - 0,46S^2(t) + 2S(t) - \\
&- 0,4)(0,25X_1^3(t) - 1,24X_1^2(t) + 2,04X_1(t) - 0,049) \\
&(10,9X_7^3(t) - 26,57X_7^2(t) + 16,7X_7(t) - 0,515)); \\
\frac{dX_{11}(t)}{dt} &= \frac{1}{X_{11}^{\max}} (k_{11}^+PC\varphi_4(V(t), G(t))D(t)(-0,0005S^3(t) + 0,02S^2(t) - 0,01S(t) + 0,4) \\
&(-3,5X_6^3(t) + 7,8X_6^2(t) - 2,7X_6(t) + 0,25)); \\
\frac{dX_{12}(t)}{dt} &= \frac{1}{X_{12}^{\max}} (k_{12}^+(-45,3X_{11}^4(t) + 111,95X_{11}^3(t) - 84,07X_{11}^2(t) + 20,04)); \\
t_0 = 1, X_i(t_0) = X_{i0}, i = \overline{1,12}.
\end{aligned} \right. \quad (5)$$

$\varphi_1(V(t), G(t), t)$, $\varphi_2(V(t), G(t), T(t))$, $\varphi_3(V(t), G(t), T(t))$ и $\varphi_4(V(t), G(t))$ – функции, которые характеризуют степень разрушения от наводнения и определяются по нормативным документам. Система дифференциальных уравнений (5) представляет задачу Коши и решается численным методом. Для удобства представления полученных результатов, моделируемые характеристики нормировались относительно максимальных значений. Результаты численного решения системы (5) представлены на рис. 3.

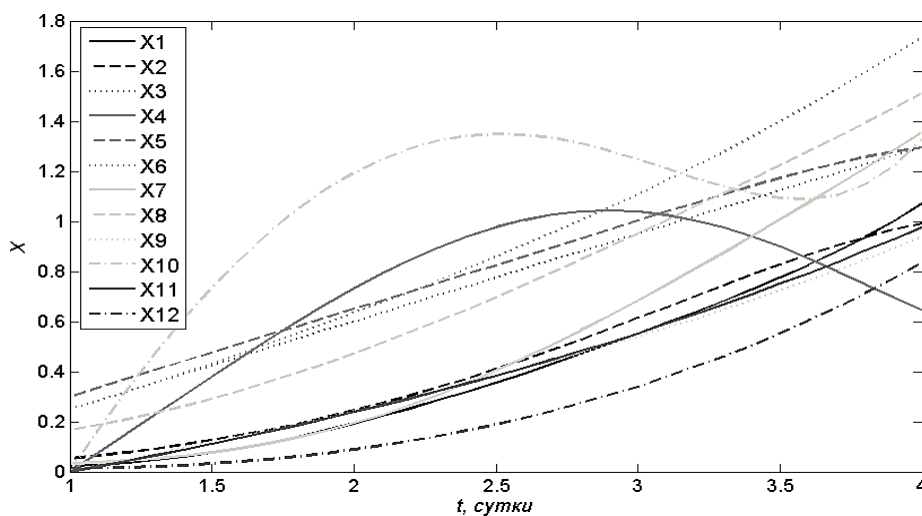


Рис. 3. Результаты решения системы (5)

Полученные результаты согласуются с статистическими данными и мнением экспертов. Они могут быть использованы при разработке информационно-советующей системы, минимизирующей ущерб от наводнений в том числе при критическом сочетании событий, каждое из которых по отдельности значительно не влияет на его величину [7-9].

Заключение

Представлены основные компоненты системы мониторинга и прогнозирования наводнения. Разработана имитационная модель на основе системной динамики, позволяющая определять характеристики последствий наводнений, и которая учитывает прогностические результаты, полученные из системы мониторинга и прогнозирования наводнения. Разработанная модель может быть использована в системах управления РСЧС на объектовом уровне для повышения качества и эффективности управления процессами, связанными с предупреждением и ликвидацией наводнений.

Литература

1. *Афонин Л.А.* Проблемы прогнозирования паводков и наводнений // Наука. Инновации. Технологии, № 1, 2014, С. 145-152.
2. *Аверченков В.И., Леонов Е.А., Догонин А.Н., Ивкина Н.Н., Крышнев Ю.В., Лепих Я.И.* Методы определения масштабов паводковых затоплений на основе 3D реконструкции с использованием данных топологии местности // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6.
3. *Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В.* Система прогнозирования паводков и раннего оповещения о наводнениях на реках Черноморского побережья Кавказа и бассейна Кубани. Труды Гидрометцентра России, выпуск 356. – ТРИАДА ЛТД Москва, 2015. 248 с.
4. *Бродский Ю. И.* Лекции по математическому и имитационному моделированию. М. -Берлин: Директ-Медиа, 2015. - 240 с.
5. *Цвиркун А. Д., Резчиков А. Ф., Кушников В. А., Хамутова М. В. и др.* Управление процессом ликвидации последствий наводнений на промышленных объектах и территориях // Управление большими системами. Выпуск 83. М.: ИПУ РАН. – 2020. – С.75-106.
6. *Khamutova M., Rezchikov A., Kushnikov V. et. al.* Algorithms for the Management of Liquidation Process of Floods Consequences // Recent Research in Control Engineering and Decision Making. 2019. Vol. 199. P. 540 – 551. DOI: 10.1007/978-3-030-12072-6_44
7. *Резчиков А.Ф., Кушников В.А., Иващенко В.А., Фоминых Д.С., Богомолов А.С., Филимонюк Л.Ю.* Предотвращение критических сочетаний событий при сварке роботизированными технологическими комплексами // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2017. № 4. С. 60-71.
8. *Щербаков М.А., Кушников В.А.* Модели и алгоритмы системы управления аварийными ситуациями при производстве стекла // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. Т. 2. № 1 (55). С. 196-200.
9. *Резчиков А.Ф., Кушников В.А., Иващенко В.А., Фоминых Д.С., Богомолов А.С., Филимонюк Л.Ю.* Минимизация ущерба от нарушения технологического процесса в сварочных роботизированных технологических комплексах // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18. № 5. С. 328-332.