

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра «математической кибернетики  
и компьютерных наук»

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
ПРОЦЕССОМ ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ НАВОДНЕНИЙ НА  
ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТАХ И ТЕРРИТОРИЯХ**

АВТОРЕФЕРАТ

НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

аспиранта 4 курса  
направления 09.06.01 – Информатика и вычислительная техника  
направленности «Математическое моделирование, численные методы и  
комплексы программ»

Хамутовой Марии Васильевны

Научный руководитель  
доктор технических наук,  
профессор

Кушников Вадим Алексеевич

Зав. кафедрой

Миронов Сергей Владимирович

Саратов 2018

**Актуальность темы.** Наводнения являются одним из самых распространённых стихийных бедствий и составляют 19% от общего числа природных катастроф. Наводнения, в том числе и катастрофические, стали происходить все чаще по всему миру, что связано с глобальным потеплением, ростом населения, сведением лесных массивов и ростом масштабов хозяйственной деятельности человека. Наводнения причиняют материальный ущерб, наносят вред здоровью населения, приводят к людским потерям и наблюдаются по всей территории Российской Федерации.

Предотвратить наводнение невозможно, но ослабить, минимизировать возможные последствия – вполне возможно. Для этого требуется эффективное управление процессом ликвидации последствиями наводнений.

Из вышеизложенного следует, что создание моделей и алгоритмов управления процессом ликвидации последствиями наводнений является актуальной проблемой. Исследованиями на данную тему посвящены работы многих отечественных и зарубежных исследователей, в частности работы В. В. Кульбы, Б. Н. Порфирьева, С. К. Шойгу, В. А. Акимова, М.А. Шахраманьяна, С. В. Борща, К. Sene, Т. Е. Adams, Т. Pagano и других. В них рассматриваются вопросы управления в ЧС, моделирования наводнений, разработки систем мониторинга и прогнозирования наводнений, а также построения информационных систем управления.

Однако в трудах этих исследователей разработке моделей прогнозирования возможных последствий наводнений уделено недостаточное внимание, что существенно влияет на качество принимаемых решений и эффективность управления процессом ликвидации последствий наводнения. Отсутствие специализированного математического обеспечения, включающего модели и алгоритмы прогнозирования характеристик последствий наводнения, описывающие сложные причинно-следственные взаимосвязи между ними, не позволит планировать эффективные действия, направленные на компенсацию возможных последствий наводнения, что существенно влияет на динамику роста ущерба.

Указанные обстоятельства обуславливают актуальность, экономическую целесообразность и практическую значимость сформулированной темы исследования, направленной на разработку математических моделей, алгоритмов и комплексов программ для управления процессами ликвидации последствий наводнения.

Тема диссертации, внедрение ее основных результатов связаны с следующими приоритетными направлениями развития науки, технологии и техники в Российской Федерации:

- Информационно - телекоммуникационные системы;
- Технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера.

**Характеристика целей исследования.** Основная цель диссертации заключается в разработке математического обеспечения и проблемно-ориентированных систем управления процессом ликвидации последствий

наводнений на промышленных объектах и территориях за счет прогнозирования возможных последствий наводнения, влияющих на величину ущерба. Для осуществления поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать математическую модель, позволяющую определить характеристики последствий наводнения, влияющие на величину ущерба;
- построить модели и алгоритмы для управления процессами ликвидации последствий наводнений на промышленных объектах и территориях;
- создать проблемно-ориентированные системы управления процессом ликвидации последствий наводнений по разработанным моделям и алгоритмам.

**Предметом исследования** являются процессы управления объектами и территориями при ликвидации последствий наводнения.

**Методы исследования.** В диссертации использованы методы теории управления, функционального анализа, аппарат системной динамики, дифференциальные уравнения, численные методы, имитационное моделирование.

#### **Научная новизна.**

1. Сформулирована постановка задачи управления процессом ликвидации последствий наводнений на промышленных объектах и территориях.

2. На основе аппарата системной динамики разработана математическая модель, позволяющая прогнозировать характеристики последствий наводнения, влияющих на величину ущерба. При разработке данной модели была использована графовая модель системной динамики, описывающая сложные причинно-следственные связи между характеристиками.

3. Разработаны методики формирования вспомогательных функциональных зависимостей математической модели, основанные на аддитивно-мультипликативном представлении, что позволило уменьшить временную сложность решаемой задачи, а также повысить эффективность и качество принимаемых решений.

4. Разработан комплекс математических моделей, методов и алгоритмов управления процессами ликвидации последствий наводнений на промышленных объектах и территориях, включающий метод определения степени готовности объекта и территории к наводнению. Предложены модели и алгоритмы для решения задачи минимизации ущерба промышленным объектам г. Аткарска.

5. На основе разработанных моделей и алгоритмов разработана проблемно-ориентированная система, позволяющая осуществить управление процессами ликвидации последствий наводнений на уровне объектов и территорий. Также предложена методика подтверждения достоверности разработанного математического обеспечения.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Теоретическая значимость диссертационного исследования заключается в разработке нового математического, алгоритмического и программного обеспечения для проблемно-

ориентированных систем управления процессами ликвидации последствий наводнений на промышленных объектах и территориях, систем поддержки принятия решений, тренажерных систем, позволяющие оценить лицами, принимающими решения, возможности минимизации негативных эффектов последствий наводнения.

Практическая значимость диссертации заключается в создании проблемно-ориентированной системы, используемой при управлении процессами ликвидации последствий наводнения на объектах и территориях, в составе которой представлена информационная система «FCFAAD», позволяющая осуществить расчет характеристик последствий наводнения в режиме тренажерной системы.

Разработанные постановки задач, математические модели и алгоритмы, подтвержденные при апробации основных результатов диссертационного исследования, позволяют рекомендовать для практического использования в составе проблемно-ориентированных систем управления процессами ликвидации последствий наводнения на объектах и территориях:

модели и алгоритмы управления процессами ликвидации последствий наводнения на промышленных объектах и территориях;

модель для прогнозирования характеристик последствий наводнения, влияющих на величину ущерба;

программное обеспечение, реализующее разработанные модели и алгоритмы управления процессами ликвидации последствий наводнения;

**Достоверность** теоретических разработок, научных положений и выводов подтверждается корректностью применения математического аппарата теории управления, функционального анализа, теории дифференциальных уравнений, согласованностью результатов теоретических расчетов с реальными результатами, имитационным моделированием процессов управления, а также экспериментами с математическим обеспечением информационных систем.

#### **Выносимые на защиту результаты**

Постановка задачи управления процессами ликвидации последствий наводнений на промышленных объектах и территориях.

Математическая модель, позволяющая прогнозировать характеристики последствий наводнения, влияющих на величину ущерба.

Математические модели и алгоритмы, позволяющие управлять процессами ликвидации последствий наводнения на объектах и территориях, с целью снижения негативных эффектов последствий наводнения.

Проблемно-ориентированная система управление процессами ликвидации последствий наводнения на промышленных объектах и территориях.

#### **Реализация и внедрение результатов исследований.**

Результаты исследований были использованы в учебном процессе Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н.Г.Чернышевского и Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на 10 научных конференциях различного уровня:

Международная научно-практическая конференция «Проблемы управления в социально-экономических и технических системах» (Саратов, 2015, 2016, 2017 и 2018 г.г.);

XXVIII Международной конференции «Математические методы в технике и технологиях - ММТТ- 28» (Саратов, 2015);

XXIX Международной конференции «Математические методы в технике и технологиях - ММТТ-29» (Саратов, 2016);

XXX Международной конференции «Математические методы в технике и технологиях - ММТТ-30» (Саратов, 2017);

VI Международная научная конференция «Компьютерные науки и информационные технологии» памяти А.М. Богомолова (Саратов, 2016);

V Международная юбилейная научная конференция «Проблемы управления, обработки и передачи информации (УОПИ-2017)» (Саратов, 2017);

International Conference Information Technologies in Business and Industry (Tomsk, 2018);

обсуждались на научных семинарах кафедры «математической кибернетики и компьютерных наук» Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского; на научно-практических семинарах лаборатории «Системные проблемы управления и автоматизации в машиностроении» Института проблем точной механики и управления РАН Саратовского научного центра РАН.

Публикации. Основные положения и результаты диссертации опубликованы в 15 работах, 6 из них в научных журналах, рекомендованных ВАК РФ и 1 в журнале, индексируемом в Scopus.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация включает введение, четыре главы основного материала с выводами, заключение, список используемой литературы. Объем работы составляет 140 страницы, в том числе 130 страниц основного текста. В работе представлено 60 рисунков и 12 таблиц.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируется цель, научная новизна и практическая значимость результатов работы, указываются методы исследования, определяются научные положения и результаты, выносимые на защиту, описана структура и объем работы.

В первой главе выполнена классификация наводнений, выявлены причины их возникновения и проанализированы задачи аварийно-спасательных служб при ликвидации их последствий. Также представлена структура единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (РСЧС), выполнен обзор состояния автоматизированной информационно-управляющей системы (АИУС) РСЧС.

Из проведенного анализа проблем управления процессом ликвидации последствий наводнения следует, что для повышения эффективности управления

необходимо разработать для информационно-управляющих систем объектового и территориального уровня математические модели и алгоритмы для управления процессом ликвидации последствий наводнения, в составе которых имеется модель для прогнозирования последствий наводнения. Входные параметры указанной модели определяются согласно моделям и алгоритмам в составе систем прогнозирования и мониторинга наводнений, обзор которых также представлен в первой главе.

Представлена постановка и общий подход решения задачи управления процессом ликвидации последствий наводнений на промышленных объектах и территориях, которая имеет следующую формулировку. Для информационно-управляющих систем РСЧС объектового и территориального уровня разработать формальные модели и алгоритмы, позволяющие на временном интервале  $t \in [t_0; t_N]$  найти управляющие воздействия  $p(t) \in P$ , минимизирующие целевую функцию:

$$Z(p(t)) = \int_{t_0}^{t_N} \sum_{i=1}^n (X_i^* - X_i(t, p(t)))^2 \gamma_i dt \rightarrow \min$$

при ограничениях

$$\frac{dX_i(t)}{dt} = f(t, p(t), X_1(t), \dots, X_n(t)), \quad i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

$$t > 0, \quad X_i(t) > 0, \quad i = \overline{1, n},$$

и при граничных условиях

$$F_i^{t_0}(X, X', p) = 0, \quad F_j^{t_N}(X, X', p) = 0, \quad i = \overline{1, k_1}, \quad j = \overline{1, k_2},$$

где  $X_i^*$  – уставные значения характеристик последствий наводнения,  $X_i(t)$ ,  $i = \overline{1, n}$  – характеристики последствий наводнения;  $\gamma_i$  – весовой коэффициент  $i$ -ой характеристики.

**Во второй главе** представлена разработка математической модели для прогнозирования характеристик последствий наводнения, влияющих на величину ущерба. В разработке модели используется математического аппарата системной динамики, в соответствии с которой моделируемый объект описывается системой дифференциальных уравнений первого порядка.

$$\frac{dX_i(t)}{dt} = X_i^+ - X_i^-, \quad i = \overline{1, n}, \quad (2)$$

где  $X_i^+$ ,  $X_i^-$ ,  $i = \overline{1, n}$  – непрерывные или кусочно-непрерывные функции, определяющие положительную и отрицательную скорость изменения значения системной переменной  $X_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ . 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  $X_i$ , при этом  $F_j$  могут являться системными переменными и параметрами внешней среды.

В соответствии с ГОСТ 22.0.06-97/ГОСТ Р 22.0.06-95, 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.

На основе анализа взаимосвязей между исследуемыми характеристиками построен ориентированный граф причинно-следственных связей (Рисунок 1), положенный в основу построения математической модели.

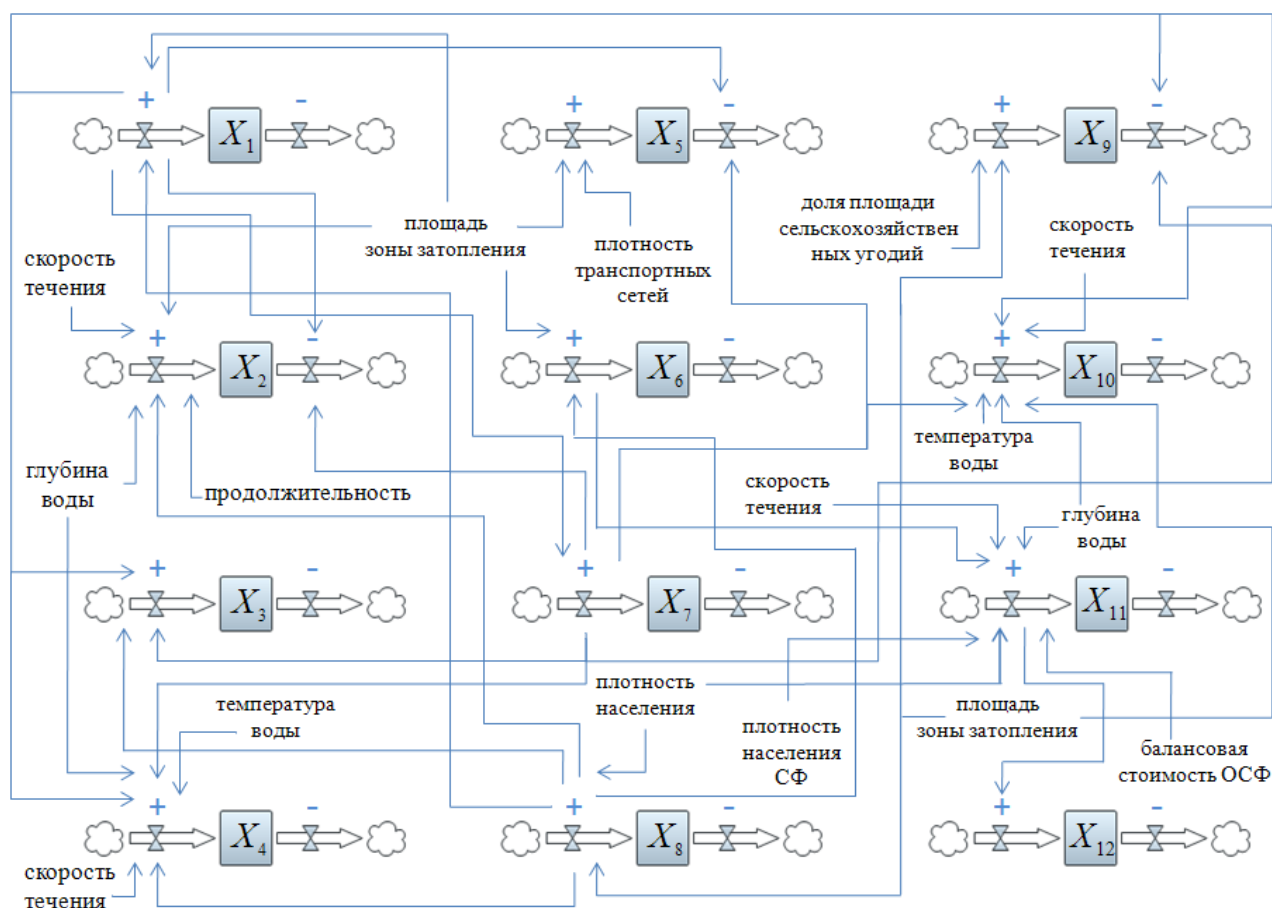


Рисунок 1 Граф причинно-следственных связей, используемый при построении математической модели

Из анализа графа причинно-следственных связей и анализа взаимосвязей, между моделируемыми характеристиками последствий наводнения, модель для прогнозирования характеристик последствий наводнения имеет общий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dX_1(t)}{dt} = f_1^+(S(t), X_8(t)), \\ \frac{dX_2(t)}{dt} = f_2^+(F(t), G(t), S(t), X_8(t), t) - f_2^-(X_1(t), X_7(t)), \\ \frac{dX_3(t)}{dt} = f_3^+(X_8(t), X_1(t), X_7(t)), \\ \frac{dX_4(t)}{dt} = f_4^+(F(t), G(t), T(t), X_8(t), X_7(t), X_1(t)), \\ \frac{dX_5(t)}{dt} = f_5^+(A(t), S(t)) - f_5^-(X_1(t), X_7(t)), \\ \frac{dX_6(t)}{dt} = f_6^+(S(t), X_8(t)), \\ \frac{dX_7(t)}{dt} = f_7^+(X_1(t)), \\ \frac{dX_8(t)}{dt} = f_8^+(D(t), S(t)) - f_8^-(X_4), \\ \frac{dX_9(t)}{dt} = f_9^+(I(t), S(t)) - f_9^-(X_1(t), X_7(t)), \\ \frac{dX_{10}(t)}{dt} = f_{10}^+(F(t), G(t), T(t), S(t), X_1(t), X_7(t)), \\ \frac{dX_{11}(t)}{dt} = f_{11}^+(F(t), G(t), S(t), X_6, D(t), P, C), \\ \frac{dX_{12}(t)}{dt} = f_{12}^+(X_{11}) \end{array} \right. , \quad (3)$$

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

Предположим, что функции правой части (3) имеют вид  $f_i^{+/-}(F_1, \dots, F_n) = \sum_{l=1}^n k_{i,l}^{+/-} \prod_{j=1}^n f_{i,l}^{F_j}(F_j)$ , где коэффициенты  $k_{i,l}^{+/-}$ ,  $i = \overline{1,12}$  определяются на этапе адаптации модели к объекту исследования. Предположим, что коэффициенты  $k_{i,l} = 0$ ,  $l = \overline{1, m-1}$ ,  $k_{i,l} \neq 0$ ,  $l = m$ ,  $k_{i,l} = 0$ ,  $l = \overline{m+1, n}$ , тогда выражение примет вид  $f_i^{+/-}(F_1, \dots, F_n) = k_i^{+/-} \prod_{j=1}^n f_i^{F_j}(F_j)$ , где  $F_j$  – системные переменные или параметры внешней среды. Следовательно, систему (3) можно переписать следующим образом:



$$\left\{ \begin{array}{l}
\frac{dX_1(t)}{dt} = k_1^+ f_1^S(S(t)) f_1^{X_8}(X_8(t)), \\
\frac{dX_2(t)}{dt} = k_2^+ F(t)G(t)T f_2^S(S(t)) f_2^{X_8}(X_8(t)) - k_2^- f_2^{X_1}(X_1(t)) f_2^{X_7}(X_7(t)), \\
\frac{dX_3(t)}{dt} = k_3^+ f_3^{X_8}(X_8(t)) f_3^{X_1}(X_1(t)) f_3^{X_7}(X_7(t)), \\
\frac{dX_4(t)}{dt} = k_4^+ F(t)G(t)T f_4^{X_8}(X_8(t)) f_4^{X_7}(X_7(t)) f_4^{X_1}(X_1(t)), X_1(t), \\
\frac{dX_5(t)}{dt} = k_5^+ A(t) f_5^S(S(t)) - k_5^- f_5^{X_1}(X_1(t)) f_5^{X_7}(X_7(t)), \\
\frac{dX_6(t)}{dt} = k_6^+ f_6^S(S(t)) f_6^{X_8}(X_8(t)), \\
\frac{dX_7(t)}{dt} = k_7^+ f_7^{X_1}(X_1(t)), \\
\frac{dX_8(t)}{dt} = k_8^+ D(t) f_8^S(S(t)) - k_8^- f_8^{X_4}(X_4), \\
\frac{dX_9(t)}{dt} = k_9^+ I(t) f_9^S(S(t)) - k_9^- f_9^{X_1}(X_1(t)) f_9^{X_7}(X_7(t)), \\
\frac{dX_{10}(t)}{dt} = k_{10}^+ F(t)G(t)T f_{10}^S(S(t)) f_{10}^{X_1}(X_1(t)) f_{10}^{X_7}(X_7(t)), \\
\frac{dX_{11}(t)}{dt} = k_{11}^+ PCF(t)G(t)D(t) f_{11}^S(S(t)) f_{11}^{X_6}(X_6(t)), \\
\frac{dX_{12}(t)}{dt} = k_{12}^+ f_{12}^{X_{11}}(X_{11}(t)).
\end{array} \right. , \tag{4}$$

где  $f_j^{X_i}$  – функциональная зависимость системной переменной  $X_j(t)$  от системной переменной  $X_i(t)$ , а  $f_j^S$ , в свою очередь, зависимость  $X_j(t)$  от  $S(t)$ ,  $i, j = \overline{1,12}$ . Если не существуют готовые формулы, устанавливающие зависимость между системными переменными, то для определения функциональных зависимостей  $f_j^{X_i}$  и  $f_j^S$ , на основе статистических данных, экспертами или разработчиками математического обеспечения, строятся кусочно-линейные функции, которые как показывает практика, могут быть аппроксимированы полиномами.

Используя статистические данные по наводнению, происшедшему в Приморье, в 2001 году, построим полиномы вспомогательных зависимостей  $f_j^{X_i}$  и  $f_j^S$ . На Рисунках 2, 3 представлены построенные полиномы  $f_1^S = 0,001S^3(t) - 0,04S^2(t) + 0,6S(t) - 2,1$  и  $f_1^{X_8} = 54X_8^4(t) - 137X_8^3(t) + 103,4X_8^2(t) - 20,7X_8(t) + 1,9$  соответственно.

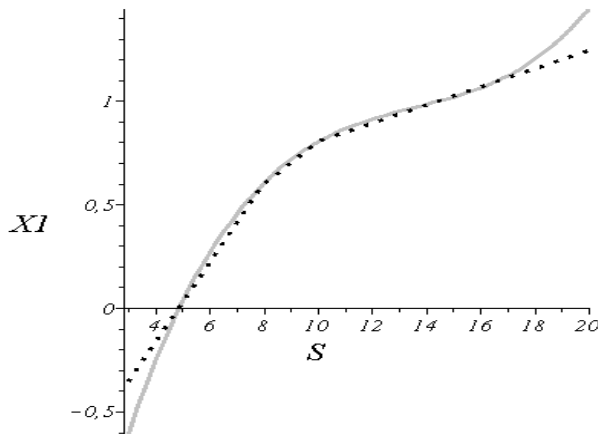


Рисунок 2 График полинома  $f_1^S$

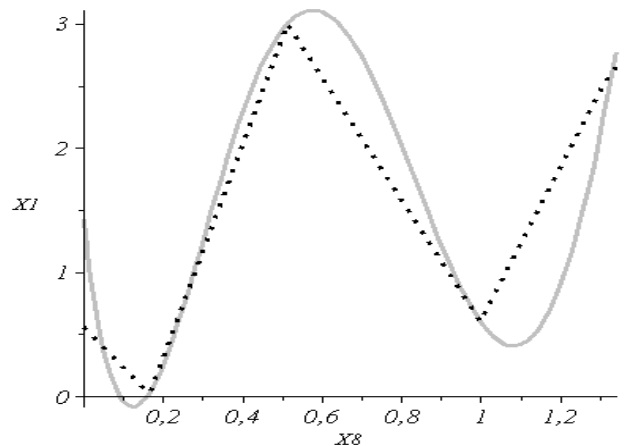


Рисунок 3 График полинома  $f_1^{X_8}$

Перепишем систему (4) с учетом построенных полиномов получим:

$$\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}} (kt(-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^+ F(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)0 \\
 \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(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}^+ F(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}^+ PCF(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)$$

Система дифференциальных уравнений (5) представляет собой задачу Коши и решается численным методом Рунге-Кутты 4-го порядка. Для удобства представления полученных результатов, моделируемые характеристики системы нормировались относительно максимальных значений. Результаты численного решения системы (5) представлены на Рисунке 4.

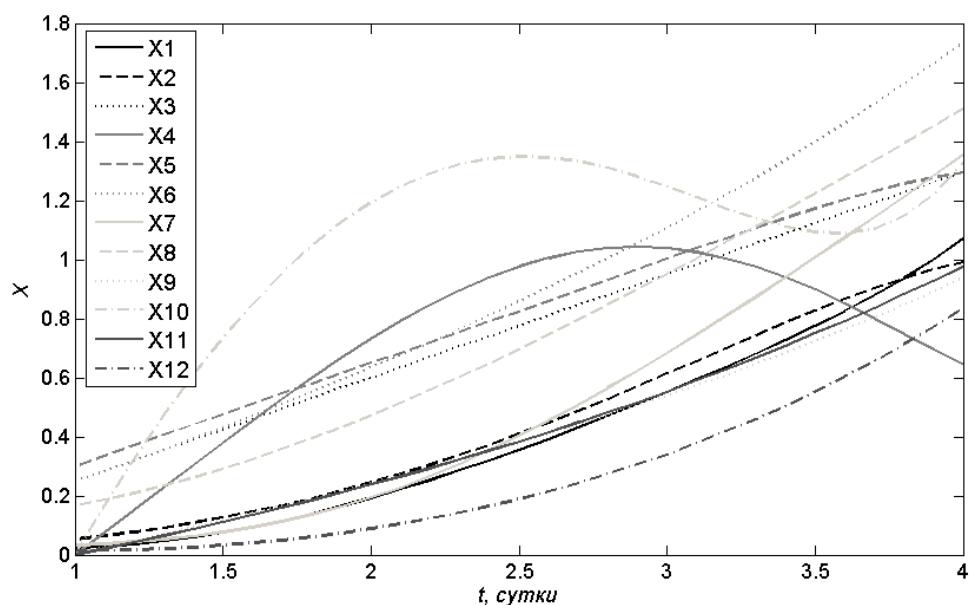


Рисунок 4 Результаты прогнозирования характеристик с учетом представления вспомогательных функций системы (3) в аддитивно-мультипликативном виде

В связи с тем, что статистические данные по наводнению могут отсутствовать или носить фрагментарный характер, в главе 2 представлена альтернативная методика построения зависимостей  $f_i^-$  и  $f_i^+$  модели (3). В Таблице 1 представлены построенные на основе указанной методики функции  $f_i^-$  и  $f_i^+$  системы (3), где коэффициенты  $k_i$ ,  $i = \overline{1,15}$ , определяются посредством вычислительного эксперимента на этапе адаптации модели к объекту исследования.

Таблица 1 Аналитический вид функций  $f_i^-$  и  $f_i^+$

$f_1^+$	$\begin{cases} k_1 \sqrt{S(t)X_8(t)}, S(t) > \varepsilon \\ 0, S(t) \leq \varepsilon \end{cases}$	$f_7^+$	$k_7 X_1(t)$	$f_2^-$	$k_{11} X_1(t) X_7(t)$
$f_2^+$	$\begin{cases} k_2 F(t)G(t)t^3 \sqrt{S(t)X_8(t)}, S(t) > \varepsilon \\ 0, S(t) \leq \varepsilon \end{cases}$	$f_8^+$	$\begin{cases} k_8 D(t)S(t), S(t) > \varepsilon \\ 0, S(t) \leq \varepsilon \end{cases}$	$f_5^-$	$k_{12} X_1(t) X_7(t)$
$f_3^+$	$k_3 \frac{X_8(t)X_1(t)}{X_7(t)}$	$f_9^+$	$\begin{cases} k_9 I(t)S(t), S(t) > \varepsilon \\ 0, S(t) \leq \varepsilon \end{cases}$	$f_8^-$	$k_{13} X_4(t)$
$f_4^+$	$k_4 \frac{F(t)G(t)T(t)X_8(t)}{X_7(t)X_1(t)}$	$f_{10}^+$	$\begin{cases} k_{10} \frac{F(t)G(t)T(t)S(t)}{X_1(t)X_7(t)}, S(t) > \varepsilon \\ 0, S(t) \leq \varepsilon \end{cases}$	$f_9^-$	$k_{14} X_1(t) X_7(t)$
$f_5^+$	$\begin{cases} k_5 A(t)S(t), S(t) > \varepsilon \\ 0, S(t) \leq \varepsilon \end{cases}$	$f_{11}^+$	$\begin{cases} k_{15} \frac{CD(t)G(t)F(t)X_6(t)}{S(t)P}, S(t) > \varepsilon \\ 0, S(t) \leq \varepsilon \end{cases}$		
$f_6^+$	$\begin{cases} k_6 S(t)^{0.5} X_8^{0.1}(t), S(t) > \varepsilon \\ 0, S(t) \leq \varepsilon \end{cases}$	$f_{12}^+$	$k_{16} X_{11}(t)$		

На Рисунке 5 представлены результаты решения системы (3) с учетом представления функции  $f_i^-$  и  $f_i^+$  согласно Таблице 1.

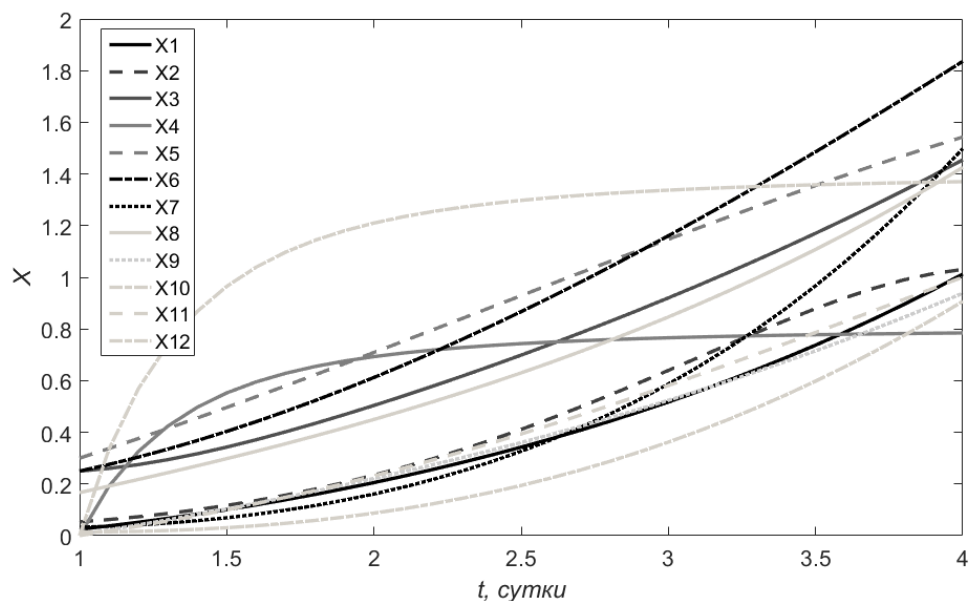


Рисунок 5 Результаты прогнозирования характеристик с учетом представления функциональных зависимостей системы (3) согласно Таблице 1

В ходе проведенного исследования сравнивались значения характеристик последствий наводнения, рассчитанные по модели (3), с реальными данными наводнения, происшедшего в Приморье, в 2001 году. Из Таблицы 2 следует, что характеристики, рассчитанные по разработанной модели, незначительно отличаются от соответствующих реальных значений, где  $\Delta_{1cp}^{X_i}$  – средние значения относительных погрешностей результатов, полученных по модели (5), а  $\Delta_{2cp}^{X_i}$  – средние значения относительных погрешностей результатов системы (3) согласно представлению вспомогательных функций правой части с учетом Таблицы 1.

Таблица 2 Сравнение средних значений относительных погрешностей

$X_i$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$	$X_{10}$	$X_{11}$	$X_{12}$
$\Delta_{1cp}^{X_i}$	16%	14%	6%	3%	11%	2%	14%	14%	5%	3%	15%	14%
$\Delta_{2cp}^{X_i}$	9%	4%	6%	15%	7%	1%	4%	4%	5%	8%	9%	8%

Разработанная модель адаптируется под каждый конкретный объект исследования, для этого осуществляется сбор и хранение информации об объекте, на основе которой выбираются системные переменные из ГОСТ, определяется вид вспомогательных функций правых частей предложенных дифференциальных уравнений (3) и уточняются коэффициенты модели, а на каждом этапе адаптации модели происходит ее корректировка.

**В третьей главе** представлено решение задачи управления процессом ликвидации последствий наводнения на промышленных объектах и территориях.

Для решения задачи (1) необходимо для конкретного объекта управления построить функциональные зависимости правых частей системы дифференциальных уравнений (3). Решить полученную систему численным методом, а полученные результаты аппроксимировать полиномами невысоких степеней. Для характеристик последствий наводнения, происшедшего в Приморье, в 2001 году, эти полиномы имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
X_1(t) &= 0.001t^3 + 0.0665t^2 - 0.0345t - 0.008; \\
X_2(t) &= -0.0536t^3 + 0.4455t^2 - 0.786t + 0.447; \\
X_3(t) &= -0.011t^3 + 0.151t^2 - 0.14t + 0.25; \\
X_4(t) &= 0.0923t^3 - 0.859t^2 + 2.6156t - 1.849; \\
X_5(t) &= -0.04t^3 + 0.288t^2 - 0.187t + 0.239; \\
X_6(t) &= -0.0063t^3 + 0.104t^2 + 0.107t + 0.045; \\
X_7(t) &= 0.03t^3 - 0.032t^2 + 0.01t + 0.023; \\
X_8(t) &= 0.0132t^3 - 0.0245t^2 + 0.245t - 0.067; \\
X_9(t) &= -0.009t^3 + 0.1115t^2 - 0.06t - 0.038; \\
X_{10}(t) &= 0.16t^3 - 1.5t^2 + 4.57t - 3.23; \\
X_{11}(t) &= 0.004t^3 + 0.01t^2 + 0.21t - 0.22; \\
X_{12}(t) &= 0.034t^3 - 0.127t^2 + 0.24t - 0.145.
\end{aligned} \tag{6}$$

Для вычисления целевой функции  $Z(p_j(t))$  необходимо задать значения весовых коэффициентов  $\gamma_i$ ,  $i = \overline{1,12}$ . Эти коэффициенты выбираются исходя из опыта оперативно-диспетчерского персонала МЧС, и определяют значимость характеристик  $X_i(t)$ ,  $\sum_{i=1}^{12} \gamma_i = 1$ . Для наводнения в Приморье, в 2001 году, указанные коэффициенты имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
\gamma_1 &= 0,2; \gamma_2 = 0,09; \gamma_3 = 0,03; \gamma_4 = 0,125; \\
\gamma_5 &= 0,075; \gamma_6 = 0,03; \gamma_7 = 0,14; \gamma_8 = 0,16; \\
\gamma_9 &= 0,08; \gamma_{10} = 0,07; \gamma_{11} = 0,05; \gamma_{12} = 0,05.
\end{aligned} \tag{7}$$

Экспертами выбираются уставные значения характеристик  $X_i^*$ ,  $i = \overline{1,12}$ . В целевую функцию (1) подставляются построенные полиномы (6), весовые коэффициенты (7) и уставные значения, затем упрощается подынтегральная функция и вычисляется интеграл на интервале  $[1;4]$ . В результате, значение целевой функции, согласно первоначальному плану, будет иметь вид:

$$Z(p_0) = \int_1^4 (1,6 - 1,73t^3 + 3,5t^2 - 3,64t + 0,003t^6 - 0,06t^5 + 0,45t^4) dt = 0,634.$$

Управляющие воздействия формируются в виде планов мероприятий, направленных на минимизацию характеристик последствий наводнений. Опыт показывает, что органы управления РСЧС, используют сравнительно небольшое количество планов мероприятий, поэтому множество планов мероприятий, формируемое экспертами  $P = \{p_1(t), \dots, p_k(t)\}$ , конечно. Для решения задачи (1) определяются значения  $Z(p_j(t))$  для каждого плана мероприятий  $p_j(t)$  из указанного множества,  $j = \overline{1,k}$  и с помощью перебора выбирается тот план, реализация которого дает минимальное значение целевой функции.

Рассмотрим планы мероприятий  $p_j(t) \in P$ ,  $j = \overline{1,4}$  для указанного наводнения, где любой план мероприятий направлен на изменение значений характеристик  $X_i(t)$ ,  $i = \overline{1,12}$ ,  $p_j : \{X_1, X_2, \dots, X_{12}\} \rightarrow \{X_1 + \alpha_1^{(j)}, X_2 + \alpha_2^{(j)}, \dots, X_{12} + \alpha_{12}^{(j)}\}$ . Для каждого

плана мероприятия производится расчет характеристик последствий наводнений согласно модели (3), полученные результаты аппроксимируются полиномами, которые подставляются в целевую функцию (1). Таким образом, для плана  $p_4(t)$  целевая функция (1) будет иметь вид:

$$Z(p_4(t)) = \int_1^4 (-0,27t - 0,189t^3 + 0,25t^2 + 0,001t^6 - 0,01t^5 + 0,07t^4 + 0,32) dt = 0,404. \quad (8)$$

Геометрический смысл интеграла (8) представлен на Рисунке 6.

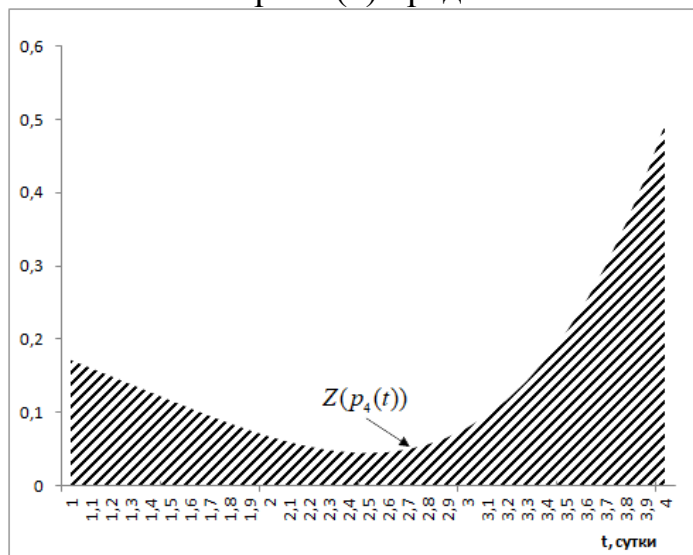


Рисунок 6 Площадь криволинейной трапеции  $Z(p_4(t))$

Мероприятия для плана  $p_4(t)$ , а также значения характеристик последствий наводнений до и после реализации плана показаны в Таблице 3.

Таблица 3 План мероприятий  $p_4(t)$

Мероприятия		Значения характеристик последствий наводнения согласно первоначальному плану $p_0$	Значения характеристик последствий наводнения при реализации плана $p_4(t)$	$\alpha_i^{(4)}$
1. подготовка к проведению мероприятий по эвакуации населения из зон возможного затопления; 2. уточнение расчёта сил и средств; 3. проведение тренировок по действиям в случае наводнения; 4. отвод паводковых вод; 5. создание защитный сооружение, способствующих уменьшений скорости потока и уровня воды 6. увеличение группировки сил и количества транспортных средств (в том числе и плавсредств), участвующих	$X_1$	0,982	1,003	0,020
	$X_2$	0,997	0,335	-0,662
	$X_3$	1,402	1,250	-0,151
	$X_4$	0,779	0,246	-0,534
	$X_5$	1,559	1,454	-0,105
	$X_6$	1,733	1,728	-0,005
	$X_7$	1,459	1,577	0,118
	$X_8$	1,365	1,358	-0,007
	$X_9$	0,938	0,928	-0,011

в аварийно-спасательных работах в полтора раза.	$X_{10}$	1,364	0,430	-0,934
	$X_{11}$	1,058	0,783	-0,275
	$X_{12}$	0,985	0,732	-0,253

В Таблице 4 представлены значения целевой функции  $Z$  согласно первоначальному плану  $p_0$  и при реализации планов мероприятий  $p_1(t)$ ,  $p_2(t)$ ,  $p_3(t)$  и  $p_4(t)$  на интервале  $[1;4]$ . Из таблицы следует что, минимальное значение целевой функции (1) достигается при реализации плана мероприятий  $p_4(t)$ . Таким образом,  $p_4(t)$  является наиболее эффективным планом мероприятий, а его выполнение реализует эффективное управление процессом ликвидации последствий наводнений.

Таблица 4 Значение целевой функции  $Z$  при реализации планов мероприятий

	согласно первоначальному плану мероприятий	при реализации плана $p_1(t)$	при реализации плана $p_2(t)$	при реализации плана $p_3(t)$	при реализации плана $p_4(t)$
$Z(p_j(t))$	0.634	0.41	0.48	0.5	0.404

Также в главе 3 предложен метод определения степени готовности промышленных объектов и территорий к наводнению. Применение указанного метода для определения степени готовности города Аткарска к весеннему паводку выявил, что города готов к паводку всего на 31%. Представлены постановка и решение задачи минимизации ущерба промышленным предприятиям г. Аткарска.

**В четвертой главе** рассмотрены вопросы экспериментального подтверждения достоверности разработанного математического обеспечения. Также в указанной главе представлена проблемно-ориентированная система, позволяющая осуществить управление процессом ликвидации последствий наводнения на промышленных объектах и территориях. Разработана информационная система FCFAAD, осуществляющая расчет характеристик последствий наводнения, влияющих на величину ущерба. Предложена методика внедрения результатов проведенных исследований в системах поддержки принятия решений и тренажерных системах для оценки влияния принимаемых управленческих решений на ущерб от наводнения.

**В заключении** диссертационной работы сформулированы основные результаты и выводы исследования:

1. Выполнена постановка задачи управления процессом ликвидации последствий наводнений на промышленных объектах и территориях.

2. Установлено, что для повышения эффективности ликвидации последствий наводнения необходимо разработать модели и алгоритмы для управления процессом ликвидации последствий наводнения на промышленных объектах и территориях, учитывающие возможные последствия наводнения.

3. Разработана математическая модель системной динамики, позволяющая осуществить прогнозирование характеристик последствий наводнения, с учетом

большого количества положительных и отрицательных обратных связей между характеристиками, влияющих на динамику объекта исследования. Развита методика построения вспомогательных функциональных зависимостей математической модели, основанные на представлении функций в аддитивно-мультипликативной форме.

4. Предложены и обоснованы математические модели и алгоритмы управления процессами ликвидации последствий наводнений на промышленных объектах и территориях.

5. Предложен метод определения степени готовности объектов и территорий к наводнению, а также модели и алгоритмы для решения задачи минимизации ущерба промышленным объектам г. Аткарска.

6. Создана проблемно-ориентированная система, позволяющая осуществить управление процессами ликвидации последствий наводнений на промышленных объектах и территориях.

#### **Публикации по теме диссертации**

*В изданиях, рекомендованных ВАК РФ*

1. Хамутова М. В., Кушников В. А. Математическая модель для информационных систем прогнозирования последствий наводнений // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика, № 3 2016 (июль) С. 109-114.

2. Кушников В.А., Хамутова М.В. Модель для прогнозирования последствий наводнения, вызванных половодьями и паводками // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2015. Т. 4. № 1 (81). С. 131-137.

3. Ключев В.В., Резчиков А.Ф., Кушников В.А., Богомолов А.С., Иващенко В.А., Филимонюк Л.Ю. М.В., Хамутова М.В. Информационно-управляющая система для поддержки принятия решения по ликвидации последствий наводнения // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2016. № 11 (149). С. 39-45.

4. Резчиков А.Ф., Кушников В.А., Иващенко В.А., Богомолов А.С., Филимонюк Л.Ю., Хамутова М.В. Моделирование последствий наводнений на основе причинно-следственных комплексов и системно-динамического подхода // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 4. С. 13-20.

5. Хамутова М.В., Кушников В.А. Модель прогнозирования характеристик наводнения, влияющих на величину причиняемого ущерба // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2017. Т. 17. № 2. С. 231-238.

6. Кушелева Е.В., Резчиков А.Ф., Кушников В.А., Иващенко В.А., Филимонюк Л.Ю., Богомолов А.С., Кушникова Е.В., Самарцев А.А., Хамутова М.В. Модель для прогнозирования распространения атмосферных поллютантов при автотранспортных заторах // Системы управления и информационные технологии, №2(72), 2018. – С. 55-60

*В изданиях, индексируемых в Scopus*

7. M V Khamutova et al Forecasting characteristics of flood effects Journal of Physics: Conf. Series 1015 (2018) 052012 doi :10.1088/1742-6596/1015/5/052012

*Прочие публикации*

8. Хамутова М.В., Кушников В.А. Модель для прогнозирования основных характеристик последствий наводнений // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. 2015. № 6 (76). С. 119-123.



9. Хамутова М.В., Кушников В.А. Математическое моделирование характеристик наводнения, влияющих на величину ущерба // В сборнике: Проблемы управления в социально-экономических и технических системах Сборник научных статей по материалам XI Международной научно-практической конференции. 2015. С. 41-44.
10. Хамутова М. В., Кушников В. А. Прогнозирование характеристик наводнения, влияющих на величину причиняемого ущерба// Проблемы управления в социально-экономических и технических системах. Сборник научных статей по материалам XII Международной научно-практической конференции. Саратов, 2016. С. 29-33.
11. Хамутова М. В., Кушников В. А. Модель прогнозирования характеристик наводнения, влияющих на величину причиняемого ущерба // В сборнике: Компьютерные науки и информационные технологии Материалы Международной научной конференции 2016. С. 452-455.
12. Хамутова М. В., Кушников В. А. Модели и алгоритмы системы поддержки принятия решений по ликвидации последствий наводнений//Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-29: сб. трудов XXIX Междунар. науч. конф.: в 12 т. Т.3. С. 31-36.
13. Хамутова М.В., Кушников В.А. Минимизация последствий наводнений на основе модели системной динамики // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. 2017. Т. 9. С. 14-17.
14. Хамутова М.В. Системно-динамический подход к моделированию характеристик наводнения // Проблемы управления в социально-экономических и технических системах. Сборник материалов XIII Международной научной конференции. 2017. С. 84-88.
15. Хамутова, М.В., Кушников В.А. Управление ликвидацией последствий наводнения на промышленных предприятиях //Проблемы управления, обработки и передачи информации (УОПИ-2017): сб. тр. V Междунар. юбилейн. науч. конф. / под ред. А.А. Львова и М.С. Светлова. Саратов: ООО СОП «Лоди», 2017. – С. 366-370.