

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 Порфириева, 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 удалено недостаточное внимание, что существенно влияет на качество принимаемых решений и эффективность управления процессом ликвидации последствий наводнения. Отсутствие специализированного математического обеспечения, включающего модели и алгоритмы прогнозирование 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 были использованы 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 аprobации 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 страниц, 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; γ_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.

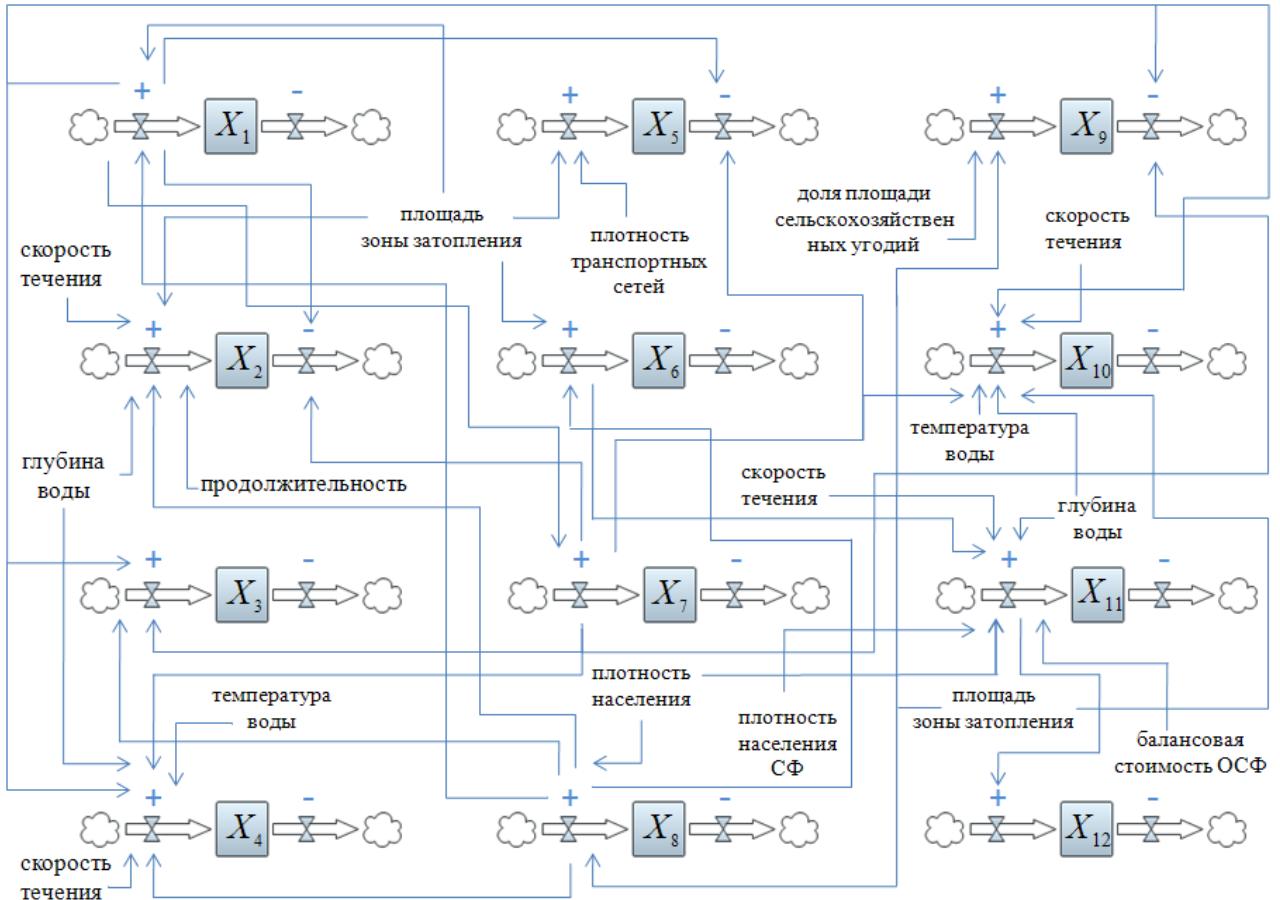


Рисунок 1 Граф причинно-следственных связей, используемый при построении математической модели

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

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

где $A(t)$ – плотность транспортных сетей в зоне затопление; $D(t)$ – 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 $f_i^{+/-}(F_1, \dots, F_n) = \sum_{l=1}^n k_{i,l}^{+/-} \prod_{j=1}^n f_i^{F_j}(F_j)$, 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:

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

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.

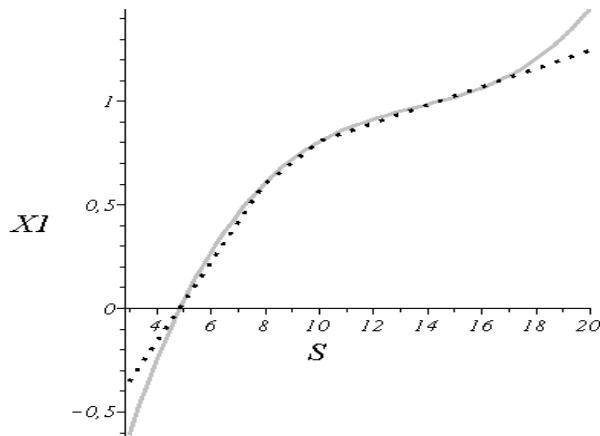


Рисунок 2 График полинома f_1^S

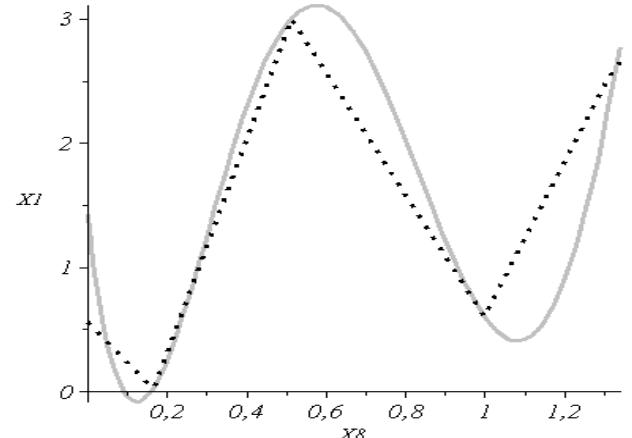


Рисунок 3 График полинома $f_1^{X_8}$

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_{i_0}, i = \overline{1, 12}
 \end{aligned}
 \right. \tag{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.

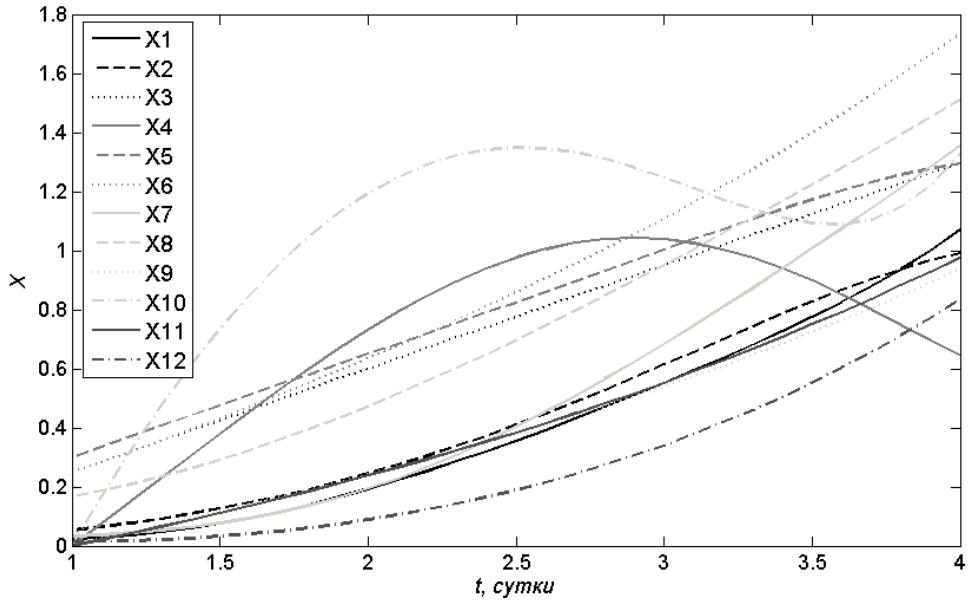


Рисунок 4 Результаты прогнозирования характеристик с учетом представления вспомогательных функций системы (3) в аддитивно-мультипликативном виде

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^+	$\begin{cases} k_2 F(t)G(t)t^{\frac{3}{2}}\sqrt[3]{S(t)X_8(t)}, S(t) > \varepsilon \\ 0, S(t) \leq \varepsilon \end{cases}$	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.

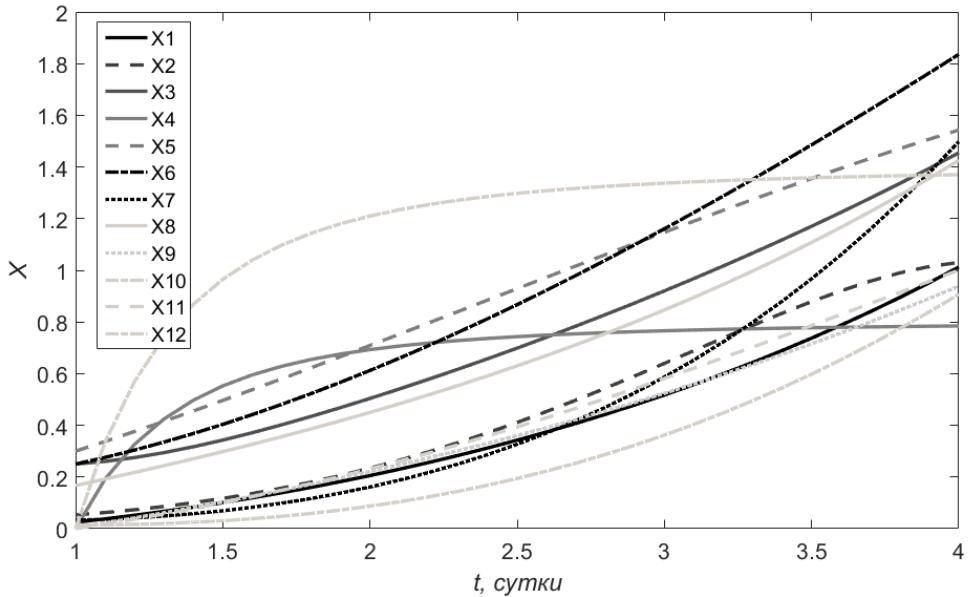


Рисунок 5 Результаты прогнозирования характеристик с учетом представления функциональных зависимостей системы (3) согласно Таблице 1

В ходе проведенного исследования сравнивались значения характеристик последствий наводнения, рассчитанные по модели (3), с реальными данными наводнения, произшедшего 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, произшедшего 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 γ_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.

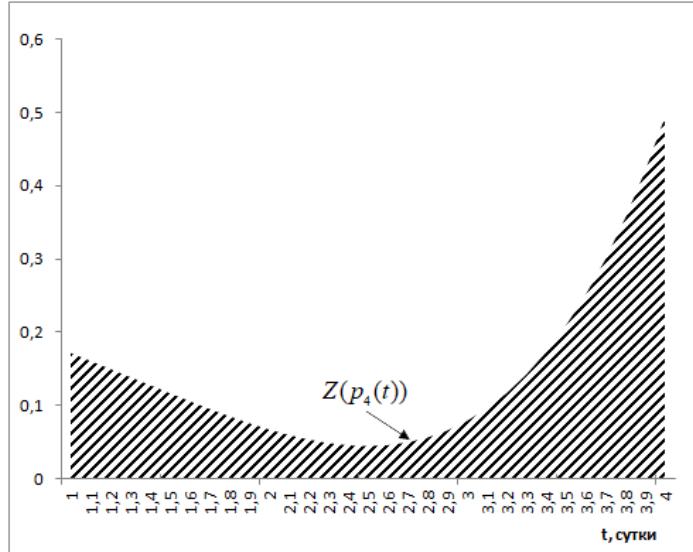


Рисунок 6 Площадь криволинейной трапеции $Z(p_4(t))$

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;	X_1	0,982	1,003
2. уточнение расчёта сил и средств;	X_2	0,997	-0,662
3. проведение тренировок по действиям в случае наводнения;	X_3	1,402	-0,151
4. отвод паводковых вод;	X_4	0,779	-0,534
5. создание защитный сооружение, способствующих уменьшений скорости потока и уровня воды	X_5	1,559	-0,105
6. увеличение группировки сил и количества транспортных средств (в том числе и плавсредств), участвующих	X_6	1,733	-0,005
	X_7	1,459	0,118
	X_8	1,365	-0,007
	X_9	0,938	-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 мероприятия $p_4(t)$. 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 управлеченческих 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. Развиты методики 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 наводнений, вызванных половодьями и паводками // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2015. Т. 4. № 1 (81). С. 131-137.
3. Клюев 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 управлении 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.