

**УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ЛИКВИДАЦИИ
ПОСЛЕДСТВИЙ НАВОДНЕНИЙ
НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТАХ
И ТЕРРИТОРИЯХ**

Цвиркун А. Д.¹, Резчиков А. Ф.²
(ФГБУН Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)

Кушников В. А.³, Иващенко В. А.⁴
Филимонюк Л. Ю.⁵, Богомолов А. С.⁶

(Институт проблем точной механики и управления РАН,
Саратов)

Хамутова М. В.⁷

(Саратовский национальный исследовательский
государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,
Саратов)

На основе системного анализа проблемы управления процессом ликвидации последствий наводнений на промышленных объектах и территориях выполнена постановка задачи управления данным процессом. Предложено решение поставленной задачи на базе методологии системной динамики: определены основные характеристики последствий наводнений, построен ориентированный граф причинно-следственных связей, разработана математическая модель, представленная системой нелинейных дифференциальных уравнений, предложена методика, позволяющая уменьшить временную сложность разработанной модели. Проверка адекватности разработанного математического обеспечения осуществлена посредством сравнения результатов решения полученной системы уравнений с реальными данными по наводнению в Приморье в 2001 году. Разработан алгоритм решения задачи управления, в котором управляющие воздействия представлены в виде планов мероприятий, направленных на уменьшение ущерба от наводнений. Разработан про-

¹ Анатолий Данилович Цвиркун, д.т.н., профессор (tsvirkun@ipu.ru).

² Александр Федорович Резчиков, д.т.н., профессор, чл.-корр. РАН (iptmuran@san.ru).

³ Вадим Алексеевич Кушников, д.т.н., профессор (iptmuran@san.ru).

⁴ Владимир Андреевич Иващенко, д.т.н., с.н.с. (iptmuran@san.ru).

⁵ Леонид Юрьвич Филимонюк, д.т.н., н.с. (iptmuran@san.ru).

⁶ Алексей Сергеевич Богомолов, к.ф.-м.н., н.с. (iptmuran@san.ru).

⁷ Мария Васильевна Хамутова (mariuka7d@rambler.ru).

граммный комплекс, позволяющий определить характеристики последствий наводнений, влияющих на величину ущерба. Он предназначен для эксплуатации в составе существующих систем управления процессами ликвидации последствий наводнений объектового и территориального уровня. Разработана структура комплекса технических средств системы управления процессом ликвидации последствий наводнений. Сформирована информационно-логическая схема, иллюстрирующая основные этапы реализации разработанного математического обеспечения в структурных подразделениях системы МЧС объектового и территориального уровня.

Ключевые слова: управление процессом ликвидации последствий наводнения, математическая модель, системная динамика.

1. Введение

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, уничтожением 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 [1, 21].

Предотвратить наводнение невозможно, но ослабить и минимизировать возможные последствия вполне возможно. Для этого требуется эффективное управление процессом ликвидации последствий наводнений [7].

Отсюда следует, что создание моделей и алгоритмов управления процессом ликвидации последствиями наводнений является актуальной проблемой. Исследованиям на данную тему посвящены работы многих отечественных и зарубежных авторов, в частности работы В.В. Кульбы [2], Б.Н. Порфирьева, А.Ф. Резчикова, С.К. Шойгу, В.А. Акимова [5], М.А. Шахрамьяна, С.В. Борща [3], К. Sene [22], Т.Е. Adams, Т. Pagano [15] и др. В них рассматриваются вопросы управления в чрезвычайных ситуациях (ЧС), моделирования, разработки систем мониторинга и прогнозирования наводнений, а также построения со-

ответствующих информационных систем управления [2, 3, 6, 7, 15, 16, 22].

Однако проблема разработки моделей и алгоритмов для управления процессом ликвидации последствий наводнений на промышленных объектах и территориях требует дальнейших исследований, которые позволят существенно повысить оперативность и качество принимаемых решений.

В рамках системного анализа последствий наводнений был проведен обзор существующих моделей и методов систем прогнозирования и мониторинга наводнений РСЧС: методы определения площади зоны затопления, позволяющие моделировать динамику поверхностных вод на произвольном рельефе местности [8]; методы определения площади зоны затопления, основанные на ГИС-технологии, позволяющие создавать трехмерную реконструкцию поверхности исследуемой территории; гидрологические методы расчета гидрографа для определения расхода воды и уровня (глубины) воды; методы, основанные на уравнении водного баланса, и т. д. Гидрологические параметры и площадь затопления, полученные из указанных моделей и методов, в дальнейшем могут быть использованы для определения количественных значений последствий наводнений, что позволит повысить эффективность процедуры управления.

2. Решение задачи управления процессом ликвидации последствий наводнений

2.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Постановка задачи базируется на следующих допущениях, которые, по мнению ряда сотрудников МЧС, выполняются для значительного числа наводнений, возникающих на территории РФ.

– Рассматриваются наводнения, регулярно или довольно часто возникающие на контролируемых объектах и территориях (например, частичное затопление отдельных районов г. Аткарска Саратовской области рекой Медведица в весенний период).

– Привлекаемые к ликвидации последствий наводнений силы МЧС имеют достаточно ограниченные ресурсы, что

не позволяет им полностью исключить ущерб от затопления объектов и территорий. В условиях ограниченности располагаемых ресурсов добиться снижения ущерба, по мнению специалистов МЧС, возможно в основном за счет повышения оперативности и качества принимаемых управленческих решений, оформленных в виде соответствующих планов мероприятий.

– У руководителей и специалистов структурных подразделений МЧС сложилось устоявшееся мнение о величинах основных характеристик последствий наводнения X_i^* , $i = \overline{1, n}$, при достижении которых ущерб будет наименьшим возможным. В дальнейшем эти величины именуется рекомендованными значениями характеристик последствий наводнения.

– Ущерб от наводнения пропорционален взвешенной сумме отклонений текущих значений характеристик последствий наводнения $X_i(t)$, $i = \overline{1, n}$, от их рекомендованных значений X_i^* , $i = \overline{1, n}$, так как с ростом отклонений $X_i^* - X_i(t)$ или возрастают отдельные виды ущерба, или менее эффективно используются достаточно ограниченные ресурсы служб МЧС, что приводит к их быстрому исчерпанию.

Сформулируем постановку и общий подход к решению задачи управления процессом ликвидации последствий наводнений на промышленных объектах и территориях. Для информационно-управляющих систем МЧС объектового и территориального уровня разработать формальные модели и алгоритмы, позволяющие на временном интервале $t \in [t_0; t_N]$ найти управляющие воздействия (УВ) $p(t) \in P$, минимизирующие целевую функцию

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

при ограничениях:

$$(2) \quad \frac{dX_i(t)}{dt} = f(t, p(t), X_1(t), \dots, X_n(t)), \quad i = \overline{1, n}, \quad t > 0,$$

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

и граничных условиях:

$$(3) F_i^{t_0}(X, X', p) = 0, F_j^{t_N}(X, X', p) = 0, i = \overline{1, k_1}, j = \overline{1, k_2},$$

где X_i^* – рекомендованные значения характеристик последствий наводнения, нормированные относительно максимальных значений; $X_i(t)$, $i = \overline{1, n}$, – текущие значения характеристик последствий наводнения, также нормированные относительно максимальных значений; γ_i – весовой коэффициент i -й характеристики.

С учетом сделанных допущений физический смысл задачи заключается в выборе из существующих планов мероприятий такого плана, при реализации которого взвешенная сумма отклонений основных характеристик последствий наводнения от их рекомендованных значений будет наименьшей возможной, что приведет к снижению ущерба.

На рис. 1 представлена схема управления процессом ликвидации последствий наводнений.

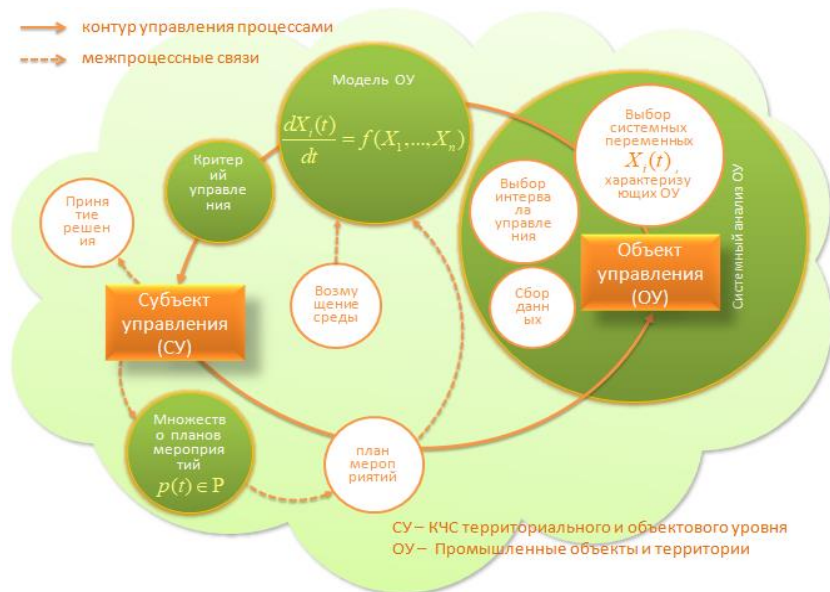


Рис. 1. Схема управления процессом ликвидации последствий наводнений

Представленная схема демонстрирует основные этапы решения задачи управления процессом ликвидации последствий наводнений на промышленных объектах и территориях.

2.2. МОДЕЛЬ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

При решении задачи (1)–(3) используют нелинейные дифференциальные уравнения в рамках системно-динамического подхода, получившего большое распространение при описании поведения многих структурно сложных систем [4, 10]. Целесообразность использования данного подхода при решении поставленной задачи обусловлена в первую очередь тем обстоятельством, что между переменными $X_i(t)$, $i = \overline{1, n}$, существует большое количество положительных и отрицательных линейных и нелинейных обратных связей (рис. 2).

В соответствии с [4] в основу системно-динамического подхода положены допущения, позволяющие перейти от известной, широко распространенной модели динамической системы

$$(4) \quad \frac{dI_j}{dt} = F_j(I_1, \dots, I_n), \quad j = 1, \dots, n,$$

к системе вида

$$(5) \quad \frac{dI_j}{dt} = \alpha_{j,0} + \sum_{k=1}^n \alpha_{j,k} \prod_{l=1}^n \omega_{j,k,l}(I_l) I_k, \quad j = 1, \dots, n.$$

Вопрос правомерности перехода в общем случае решается следующим образом. Если экспериментальное изучение исследуемого явления покажет, что система (5) 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 прогнозирования значений характеристик исследуемого явления.

Произведения функций в правых частях нелинейных дифференциальных уравнений – это, как правило, полиномы невы-

соких степеней, которые характеризуют «силу» причинно-следственной связи между двумя переменными (причиной и следствием). Они определяются на стадии адаптации модели к конкретному объекту либо с использованием регрессионных моделей или метода аппроксимации, полученных из обработки соответствующей статистической информации; либо, исходя из физического смысла моделируемого явления, либо подбором. При этом расхождение на предыстории между реальным значением прогнозируемой функции и ее моделируемой величиной должно быть не более допустимого. Возможно комбинирование указанных способов, причем решающим является выполнение последнего условия.

В процессе адаптации разработанного математического обеспечения к условиям функционирования конкретной системы управления при выборе каждой из указанных выше функций анализируется область ее допустимых значений и накладываются ограничения на область определения функции.

Непосредственно перед этапом практического использования модели (5) происходит сравнение результатов расчета с известными из практики значениями моделируемых переменных и при значительных расхождениях модель корректируется.

Многолетняя практика применения системно-динамического подхода различными группами зарубежных и отечественных исследователей (Дж. Форрестер, Д. Медоуз, Ю.И. Бродский, Ю.Н. Павловский, Г.Г. Малинецкий и др.) показала, что весьма широкий класс различных явлений может быть описан в виде системы (5).

Исходя из вышеизложенного, в основу построения модели положен математический аппарат системной динамики, в соответствии с которым моделируемый объект описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка

$$(6) \quad \frac{dX_i(t)}{dt} = X_i^+ - X_i^-, \quad i = \overline{1, n},$$

где X_i^+ , X_i^- , $i = \overline{1, n}$ – непрерывные или кусочно-непрерывные функции, определяющие положительную и отрицательную ско-

рость 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 быть системными переменными и параметрами внешней среды [10, 12].

В соответствии с ГОСТ 22.0.06-97/ГОСТ Р 22.0.06-95 и РД 153-34.2-002-01 при разработке математической модели в качестве основных характеристик последствий наводнения приняты: $X_1(t)$ – 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.

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

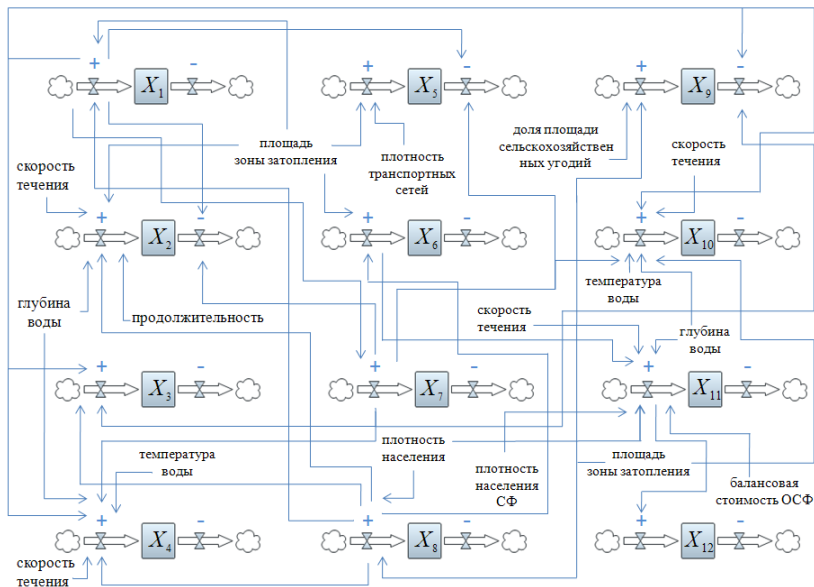


Рис. 2. Граф причинно-следственных связей, используемый при построении математической модели

Из анализа взаимосвязей между моделируемыми характеристиками последствий наводнения, с учетом принятых ограничений построена модель для определения характеристик последствий наводнения [9, 13, 18], которая имеет следующий общий вид:

пусть $A(t)$ – 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;

тогда

$$(7) \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{dX_1(t)}{dt} = f_1^+(S(t), X_8(t)), \\ \frac{dX_2(t)}{dt} = f_2^+(F(t), G(t), S(t), X_8(t), t) - f_2^-(X_1(t), X_7(t)), \\ \frac{dX_3(t)}{dt} = f_3^+(X_8(t), X_1(t), X_7(t)), \\ \frac{dX_4(t)}{dt} = f_4^+(F(t), G(t), T(t), X_8(t), X_7(t), X_1(t)), \\ \frac{dX_5(t)}{dt} = f_5^+(A(t), S(t)) - f_5^-(X_1(t), X_7(t)), \\ \frac{dX_6(t)}{dt} = f_6^+(S(t), X_8(t)), \\ \frac{dX_7(t)}{dt} = f_7^+(X_1(t)), \\ \frac{dX_8(t)}{dt} = f_8^+(D(t), S(t)) - f_8^-(X_4), \\ \frac{dX_9(t)}{dt} = f_9^+(I(t), S(t)) - f_9^-(X_1(t), X_7(t)), \\ \frac{dX_{10}(t)}{dt} = f_{10}^+(F(t), G(t), T(t), S(t), X_1(t), X_7(t)), \\ \frac{dX_{11}(t)}{dt} = f_{11}^+(F(t), G(t), S(t), X_6, D(t), P, C), \\ \frac{dX_{12}(t)}{dt} = f_{12}^+(X_{11}); \end{array} \right.$$

Предположим, что функции правой части (7) 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 [4]. Допустим также, что коэффициенты $k_{i,l} = 0$, $l = 1, m-1$, $k_{i,l} \neq 0$, $l = m$, $k_{i,l} = 0$, $l = m+1, n$, 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 (7) можно представить в виде

$$(8) \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{dX_1(t)}{dt} = k_1^+ f_1^S(S(t)) f_1^{X_8}(X_8(t)), \\ \frac{dX_2(t)}{dt} = k_2^+ F(t) G(t) f_2^S(S(t)) f_2^{X_8}(X_8(t)) - k_2^- f_2^{X_1}(X_1(t)) f_2^{X_7}(X_7(t)), \\ \frac{dX_3(t)}{dt} = k_3^+ f_3^{X_8}(X_8(t)) f_3^{X_1}(X_1(t)) f_3^{X_7}(X_7(t)), \\ \frac{dX_4(t)}{dt} = k_4^+ F(t) G(t) T(t) f_4^{X_8}(X_8(t)) f_4^{X_7}(X_7(t)) f_4^{X_1}(X_1(t)), X_1(t), \\ \frac{dX_5(t)}{dt} = k_5^+ A(t) f_5^S(S(t)) - k_5^- f_5^{X_1}(X_1(t)) f_5^{X_7}(X_7(t)), \\ \frac{dX_6(t)}{dt} = k_6^+ f_6^S(S(t)) f_6^{X_8}(X_8(t)), \\ \frac{dX_7(t)}{dt} = k_7^+ f_7^{X_1}(X_1(t)), \\ \frac{dX_8(t)}{dt} = k_8^+ D(t) f_8^S(S(t)) - k_8^- f_8^{X_4}(X_4), \\ \frac{dX_9(t)}{dt} = k_9^+ I(t) f_9^S(S(t)) - k_9^- f_9^{X_1}(X_1(t)) f_9^{X_7}(X_7(t)), \\ \frac{dX_{10}(t)}{dt} = k_{10}^+ F(t) G(t) T(t) f_{10}^S(S(t)) f_{10}^{X_1}(X_1(t)) f_{10}^{X_7}(X_7(t)), \\ \frac{dX_{11}(t)}{dt} = k_{11}^+ PCF(t) G(t) D(t) f_{11}^S(S(t)) f_{11}^{X_6}(X_6(t)), \\ \frac{dX_{12}(t)}{dt} = k_{12}^+ f_{12}^{X_{11}}(X_{11}(t)); \end{array} \right.$$

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 данные функциональные зависимости между системными переменными на этапе решения задачи не известны, то $f_j^{X_i}$ и f_j^S определяются на основе статистических данных, экспертами или разработчиками математического обеспечения, для чего используются кусочно-линейные функции, которые могут быть аппроксимированы полиномами.

Используя статистические данные по наводнению, происшедшему в Приморье в 2001 году [5], построим полиномы зависимостей $f_j^{X_i}$ и f_j^S : $f_1^S = 0,001S^3(t) - 0,04S^2(t) + 0,6S(t) - 2,1$ и $f_1^{X_8} = 54X_8^4(t) - 137X_8^3(t) + 103,7X_8^2(t) - 20,7X_8(t) + 1,9$ соответственно (рис. 3 и 4).

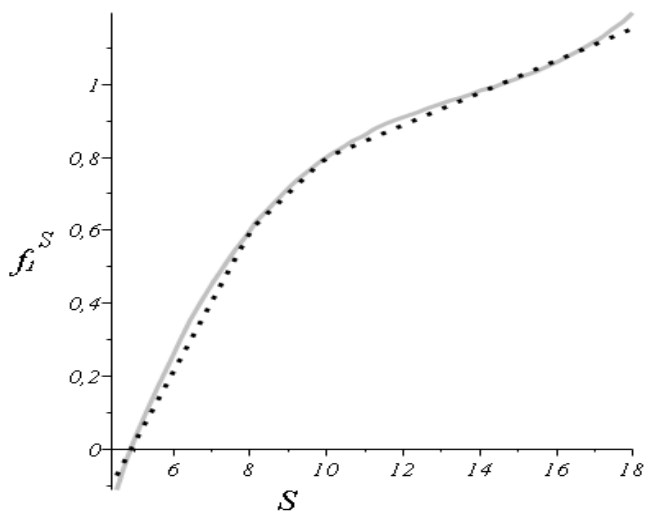


Рис. 3. Графики кусочно-линейной функции и полинома, характеризующего зависимость f_1^S

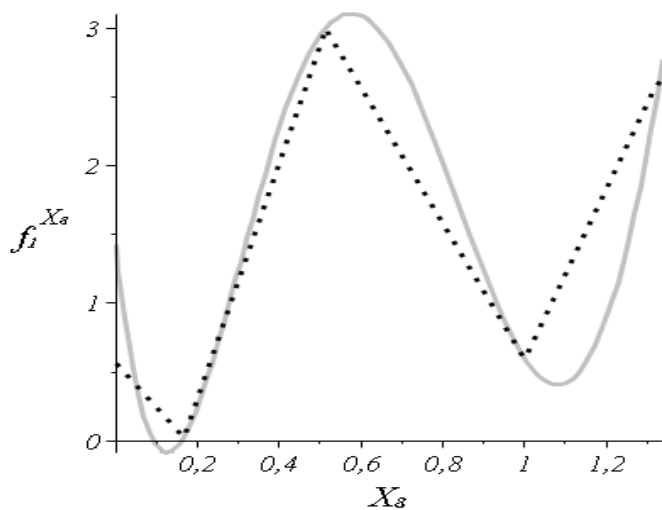


Рис. 4. Графики кусочно-линейной функции и полинома, характеризующего зависимость $f_1^{X_s}$

Перепишем систему (8) с учетом построенных полиномов

$$\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), \\
 \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 (9)$$

Система дифференциальных уравнений (9) представляет собой задачу Коши и может быть решена одним из известных численных методов. Для удобства представления полученных результатов моделируемые характеристики нормированы относительно максимальных значений за 1993 год. Результаты численного

решения системы (9) методом Рунге – Кутты 4 порядка представлены на рис. 5.

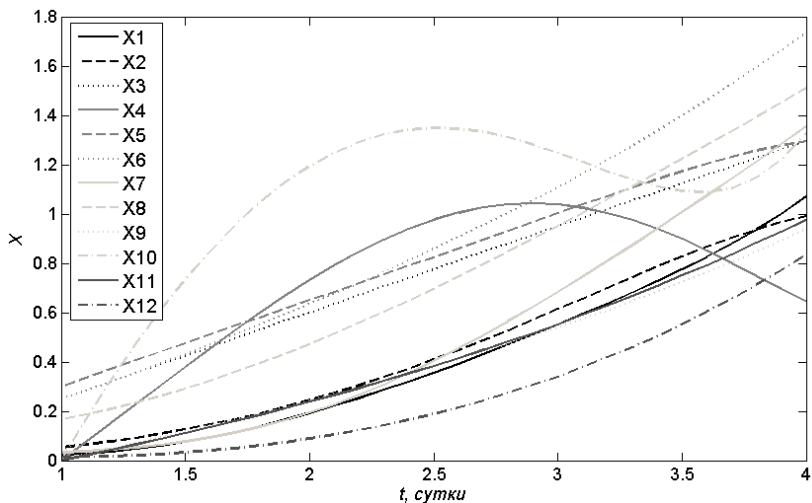


Рис. 5. Результаты прогнозирования характеристик с учетом представления функций системы (5) в аддитивно-мультипликативном виде

В связи с тем, что статистические данные по наводнению могут отсутствовать или носить фрагментарный характер, предложена альтернативная методика построения зависимостей f_i^- и f_i^+ модели (7). В таблице 1 представлены построенные на основе указанной методики функции f_i^- и f_i^+ системы (7), где коэффициенты k_i , $i = \overline{1,15}$, определяются посредством вычислительного эксперимента на этапе адаптации модели к объекту исследования.

На рис. 6 представлены результаты решения системы (7) с учетом представления функций f_i^- и f_i^+ согласно таблице 1.

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_{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_2^+	$\begin{cases} k_2F(t)G(t)T\sqrt[3]{S(t)X_8(t)}, S(t) > \varepsilon \\ 0, S(t) \leq \varepsilon \end{cases}$	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_3^+	$k_3\frac{X_8(t)X_1(t)}{X_7(t)}$	f_{12}^+	$k_{16}X_{11}(t)$
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_5^+	$\begin{cases} k_5A(t)S(t), S(t) > \varepsilon \\ 0, S(t) \leq \varepsilon \end{cases}$	f_2^-	$k_{11}X_1(t)X_7(t)$
f_6^+	$\begin{cases} k_6S(t)^{0,5}X_8^{0,1}(t), S(t) > \varepsilon \\ 0, S(t) \leq \varepsilon \end{cases}$	f_5^-	$k_{12}X_1(t)X_7(t)$
f_7^+	$k_7X_1(t)$	f_8^-	$k_{13}X_4(t)$
f_8^+	$\begin{cases} k_8D(t)S(t), S(t) > \varepsilon \\ 0, S(t) \leq \varepsilon \end{cases}$	f_9^-	$k_{14}X_1(t)X_7(t)$
f_9^+	$\begin{cases} k_9I(t)S(t), S(t) > \varepsilon \\ 0, S(t) \leq \varepsilon \end{cases}$		

Для оценки точности разработанной модели сравнивались значения характеристик последствий наводнения, рассчитанные по модели (7), 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 $\Delta_{\text{иср}}^{X_i}$ – средние значения относительных погрешностей результа-

тов, полученных по модели (9), а $\Delta_{2cp}^{X_i}$ – средние значения относительных погрешностей результатов системы (7) согласно представлению функций правой части с учетом таблицы 1.

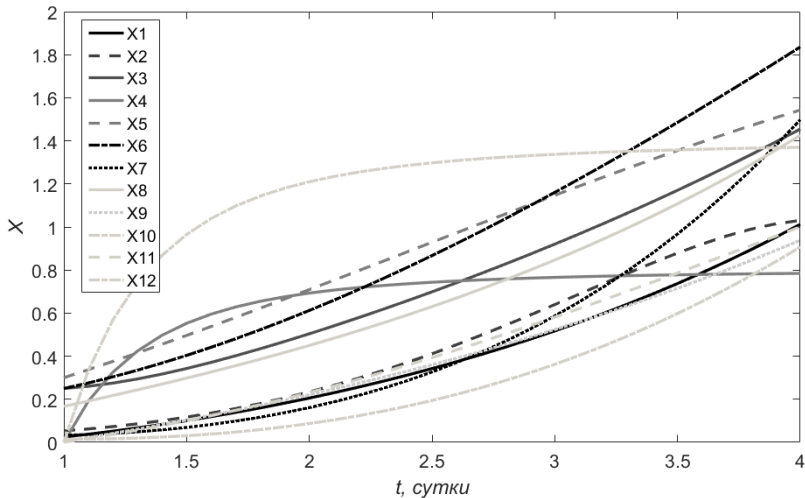


Рис. 6. Результаты прогнозирования характеристик с учетом представления функциональных зависимостей системы (7) согласно таблице 1

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 нормативных документов, определяется вид функций правых частей дифференциальных уравне-

ний (7) и уточняются коэффициенты модели, а на каждом этапе адаптации модели происходит ее корректировка.

2.3. АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ НАВОДНЕНИЯ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТАХ И ТЕРРИТОРИЯХ

На рис. 7 представлена блок-схема алгоритма решения задачи управления процессом ликвидации последствий наводнений на объектах и территориях, демонстрирующего основные этапы решения поставленной задачи.

Проиллюстрируем особенности его применения на примере наводнения в Приморье. В соответствии с данным алгоритмом для решения задачи (1)–(3) необходимо для конкретного объекта управления построить функциональные зависимости правых частей системы дифференциальных уравнений (5). Затем полученную систему следует решить численным методом, а полученные результаты аппроксимировать полиномами невысоких степеней. Для характеристик последствий наводнения, происшедшего в Приморье в 2001 году, эти полиномы имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} X_1(t, p(t)) &= 0,001t^3 + 0,0665t^2 - 0,0345t - 0,008, \\ X_2(t, p(t)) &= -0,0536t^3 + 0,4455t^2 - 0,786t + 0,447, \\ X_3(t, p(t)) &= -0,011t^3 + 0,151t^2 - 0,14t + 0,25, \\ X_4(t, p(t)) &= 0,0923t^3 - 0,859t^2 + 2,6156t - 1,849, \\ X_5(t, p(t)) &= -0,04t^3 + 0,288t^2 - 0,187t + 0,239, \\ X_6(t, p(t)) &= -0,0063t^3 + 0,104t^2 + 0,107t + 0,045, \\ (10) \quad X_7(t, p(t)) &= 0,03t^3 - 0,032t^2 + 0,01t + 0,023, \\ X_8(t, p(t)) &= 0,0132t^3 - 0,0245t^2 + 0,245t - 0,067, \\ X_9(t, p(t)) &= -0,009t^3 + 0,1115t^2 - 0,06t - 0,038, \\ X_{10}(t, p(t)) &= 0,16t^3 - 1,5t^2 + 4,57t - 3,23, \\ X_{11}(t, p(t)) &= 0,004t^3 + 0,01t^2 + 0,21t - 0,22, \\ X_{12}(t, p(t)) &= 0,034t^3 - 0,127t^2 + 0,24t - 0,145. \end{aligned}$$

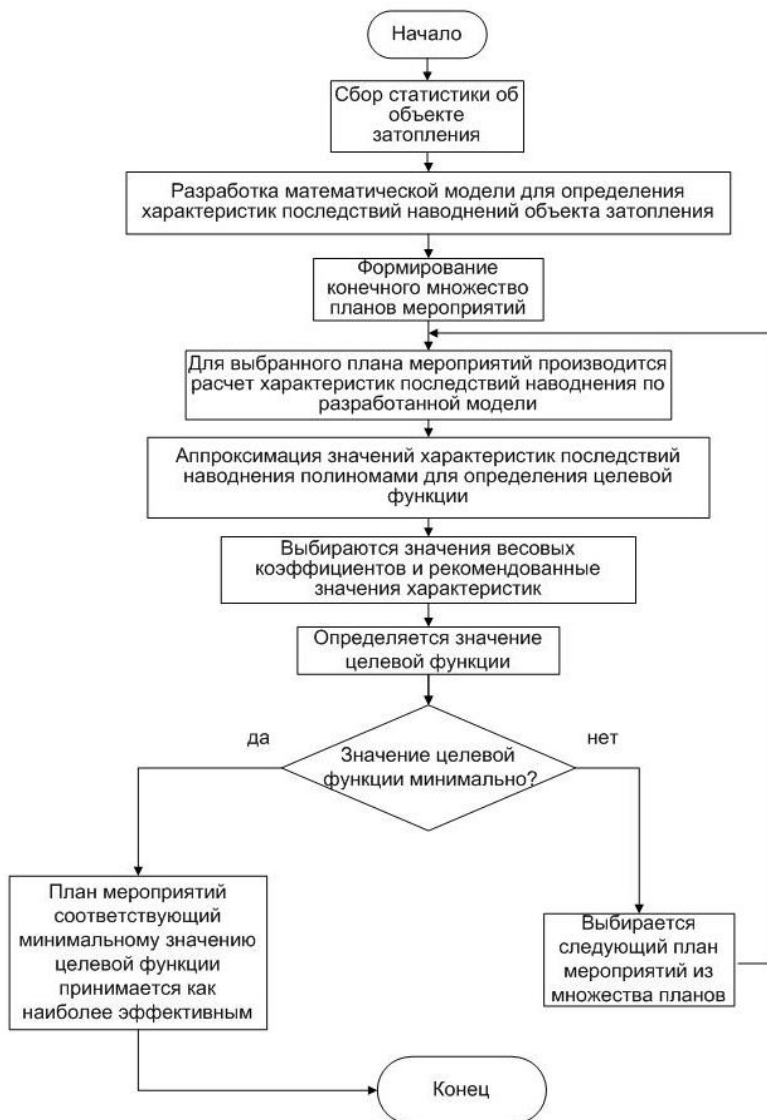


Рис. 7. Блок-схема алгоритма решения задачи управления процессом ликвидации последствий наводнений на объектах и территориях

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:

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

Экспертами выбираются рекомендованные значения характеристик X_i^* , $i = \overline{1,12}$. В целевую функцию (1) подставляются построенные полиномы (10), весовые коэффициенты (11) и рекомендованные значения, затем упрощается подынтегральная функция и вычисляется интеграл на интервале $[1; 4]$. В результате значение целевой функции при выборе первоначального плана будет иметь вид

$$(12) \quad \begin{aligned} Z(p_0) &= \int_1^4 (1,6 - 1,73t^3 + 3,5t^2 - 3,64t + 0,003t^6 - 0,06t^5 + \\ &+ 0,45t^4) dt = 0,634 \end{aligned}$$

Управляющие воздействия имеют вид планов мероприятий, направленных на минимизацию ущерба от последствий наводнений. Опыт показывает, что органы управления РСЧС используют сравнительно небольшое количество планов мероприятий $P = \{p_1(t), \dots, p_k(t)\}$, которое формируется экспертами. В процессе решения задачи (1)–(3) определяются значения $Z(p_j(t))$ для каждого плана мероприятий $p_j(t)$ из множества $P = \{p_1(t), \dots, p_k(t)\}$ и с помощью перебора выбирается тот план, реализация которого дает минимальное значение целевой функции.

Рассмотрим планы мероприятий $p_j(t) \in P$, $j = 1, 2, 3, 4$, для указанного наводнения, где реализация любого плана направлена 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 (5), полученные результаты аппроксимируются полиномами, которые подставляются в целевую функцию (1). Таким образом, например, для плана $p_4(t)$ целевая функция (1) определяется следующим выражением:

$$(13) \quad Z(p_4(t)) = \int_1^4 (-0,27t - 0,189t^3 + 0,25t^2 + 0,001t^6 - 0,01t^5 + 0,07t^4 + 0,32)dt = 0,404$$

Графики изменения целевой функции (1) при различных управляющих воздействиях представлены на рис. 8.

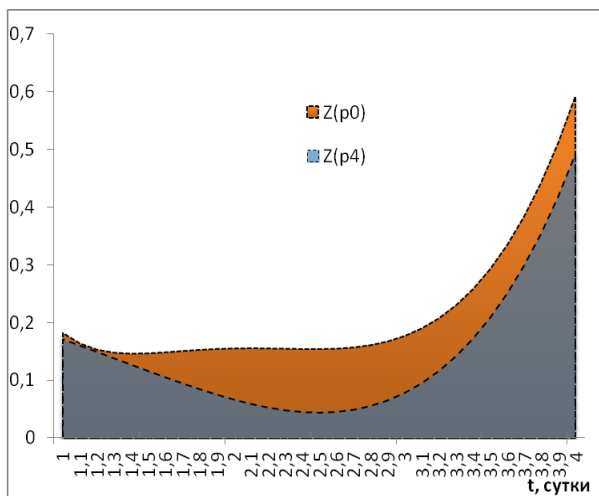


Рис. 8. Графики изменения целевой функции Z при различных управляющих воздействиях

В таблице 3 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].

Таблица 3. Значение целевой функции Z при реализации планов мероприятий

	Согласно первоначальному плану мероприятий $p_0(t)$	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

Из таблицы следует что, минимальное значение целевой функции (1) достигается при реализации плана мероприятий $p_4(t)$. Таким образом, $p_4(t)$ является оптимальным управляющим воздействием, а его выполнение реализует оптимальное управление процессом ликвидации последствий наводнений.

2.4. МОДЕЛЬНЫЙ ПРИМЕР

Саратовская область подвержена наводнениям, связанным с весенним паводком. В период весеннего половодья, разливаясь, р. Аткара затапливает на продолжительное время значительную территорию г. Аткарска Саратовской области и в отдельные годы этот процесс принимает форму стихийного бедствия. Река Аткара является частью гидрографической системы бассейна р. Дон (правобережный приток р. Медведицы) (рис. 9).

Основные этапы решения задачи управление процессом ликвидацией последствий наводнения на промышленных объектах и территориях г. Аткарска:

- прогнозирование возможных последствий наводнения;
- определение значений целевой функции;
- формирование множества планов мероприятий $P = \{p_1^a(t), p_2^a(t)\}$;
- определение для плана мероприятий $p_1^a(t)$ характеристик последствий наводнения и значения целевой функции;
- определение для плана мероприятий $p_2^a(t)$ характеристик последствий наводнения и значения целевой функции;

- сравнение значений целевой функции;
- выбор плана мероприятий соответствующего минимальному значению целевой функции.

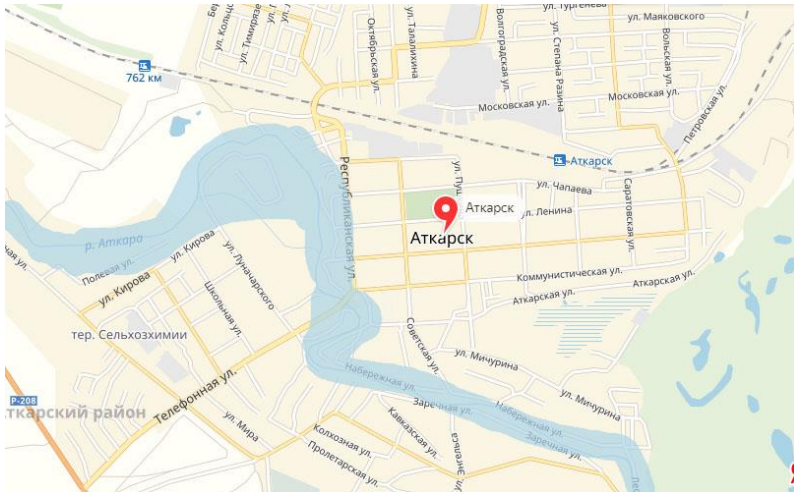


Рис. 9. Карта затопления г. Аткарска

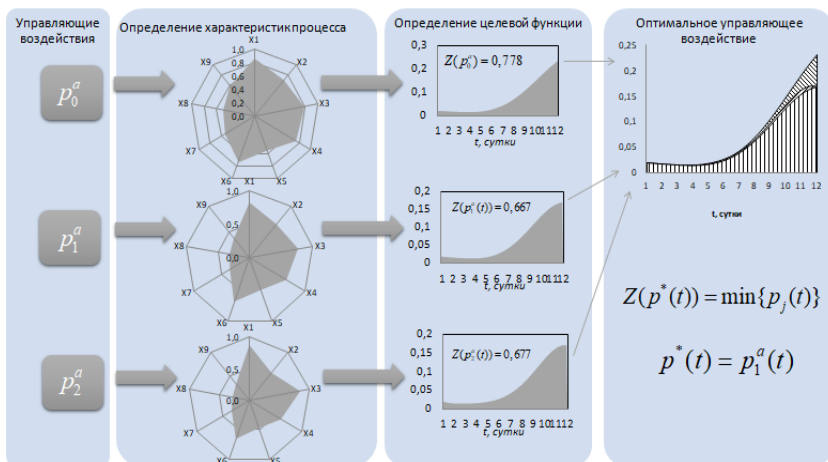


Рис. 10. Основные этапы решения задачи управления процессом ликвидации последствий наводнения на промышленных объектах и территориях г. Аткарска

На рис. 10 представлена процедура решения задачи управления процессом ликвидацией последствий наводнения на промышленных объектах и территориях г. Аткарска, включающая этапы, сформулированные выше.

Как показано выше, план мероприятий $p_1^a(t)$ минимизирует целевую функцию (1), а значит, является наиболее предпочтительным. Мероприятия верхнего уровня плана $p_1^a(t)$ представлены в виде схемы на рис. 11.

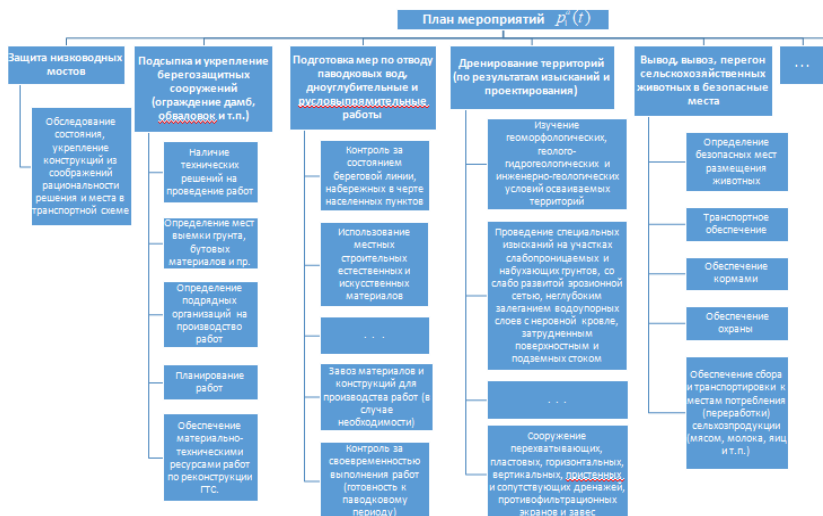


Рис. 11. Мероприятия верхнего уровня плана наиболее предпочтительного плана ликвидации последствий наводнений в г. Аткарске

Из рис. 10 следует, что реализация плана мероприятий позволит повысить эффективность управления процессом ликвидации последствий наводнения в Аткарске. Согласно результатам вычислительных экспериментов, при выборе наиболее предпочтительного плана мероприятий p_1^a количество затопленных домов снизится с 119 до 75, а количество разрушенных мостов уменьшится с 5 до 3. В целом полученные результаты вполне

согласуются с реальными данными наводнения в Аткарске в апреле 2018 года.

2.5. ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС

Основные результаты исследования реализованы в программном комплексе FCFAAD, осуществляющем расчет характеристик последствий наводнения, влияющих на величину ущерба. FCFAAD является информационной системой, предназначенной для эксплуатации в составе системы управления процессами ликвидации последствий наводнения объектового и территориального уровня [17]. Система FCFAAD – клиент-серверное приложение, интерфейс которого представлен на рис. 12.

Основные функциональные возможности ИС FCFAAD:

- расчет характеристик последствий наводнения, влияющих на величину ущерба, и их вывод на экран;
- хранение входных и расчетных данных в базе данных (БД) для последующего анализа и корректировки;
- поиск экстремумов целевой функции.

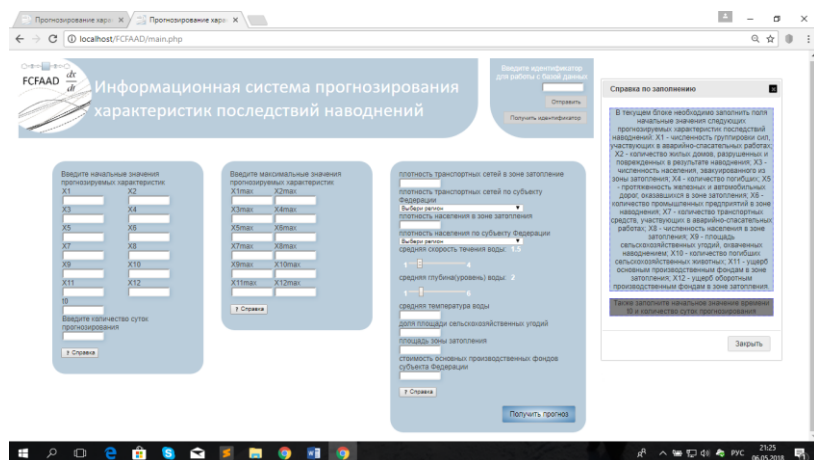


Рис. 12. Интерфейс информационной системы FCFAAD

Информационная система (ИС) FCFAAD может работать в режиме компьютерного тренажера, используемого для обучения членов комиссии по чрезвычайным ситуациям (КЧС) объектового и территориального уровня, а также ведущих специалистов МЧС и отдела по делам ГОЧС. Тренажерная система позволит отработать практические навыки и повысить опыт в области прогнозирования наводнений и принятия решений по ликвидации их последствий.

2.6. КОМПЛЕКС ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ. ИНФОРМАЦИОННО-ЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА

На рис. 13 представлена структура комплекса технических средств системы управления процессом ликвидации последствий наводнения на примере предприятие ООО «Саратоворгсинтез».

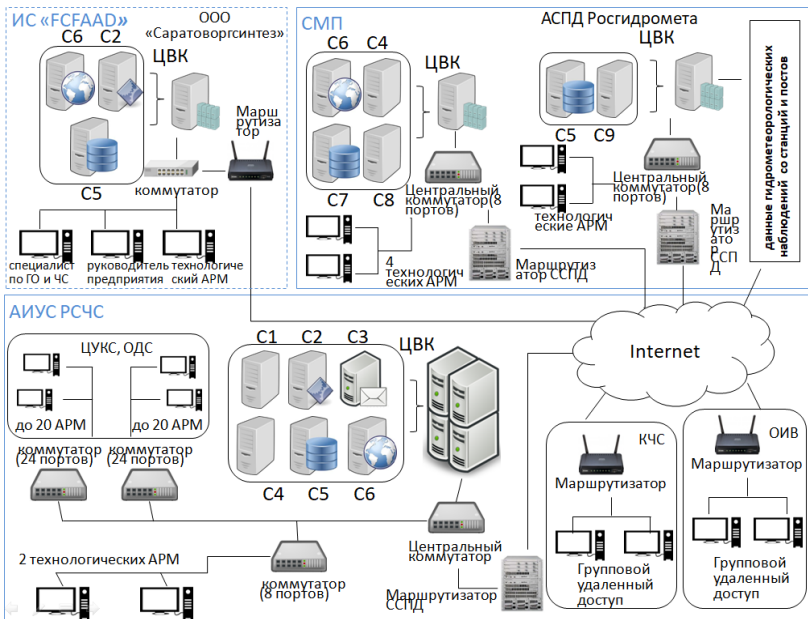


Рис. 13. Структура комплекса технических средств системы управления процессом ликвидации последствий наводнения

На рис. 13 приняты следующие обозначения: С1 – сервер видеоконференций; С2 – сервер управления; С3 – сервер электронной почты; С4 – сервер обеспечения информационной безопасности; С5 – сервер БД; С6 – веб-сервер; С7 – сервер БД (хранение растровых изображений); С8 – ГИС-сервер; С9 – сервер интеграции данных; ЦВК – центральный вычислительный комплекс; ЦУКС – центр управления кризисными ситуациями; ОДС – оперативно-диспетчерская служба; КЧС – комиссия по чрезвычайным ситуациям; ОИВ – органы исполнительной власти; АСПД – автоматизированная система передачи данных; АИУС – автоматизированная информационно-управляющая система; СМП – система мониторинга и прогнозирования наводнений; АРМ – автоматизированное рабочее место.

На рис. 14 представлена разработанная типовая информационно-логическая схема [14, 19, 20], характеризующая процедуру решения поставленной задачи с использованием ИС FCFAAD для КЧС РСЧС (МЧС) объектового и территориального уровня.

На временном интервале не менее суток осуществляется определение входных параметров математической модели (5), решается система дифференциальных уравнений и выдаются сведения об основных характеристиках последствий наводнения. Результаты прогнозирования проверяются на достоверность. Экспертами формируется множество управляющих воздействий, представленных в виде плана мероприятий. Осуществляется реализация управляющих воздействий, а затем выбор оптимального управляющего воздействия. Собранная и полученная на данном этапе информация хранится в базах данных и знаний информационной системы, в процессе решения задачи обрабатывается и анализируется.

На временном интервале месяц–квартал на основе накопленной информации происходит обучение управляющего персонала с помощью тренажерных систем, данные о результатах обучения систематизируются и анализируются.

На длительных временных интервалах происходит накопление статистических данных об эффективности использования разработанной системы прогнозирования, анализ которых поз-

воляет скорректировать разработанные математических моделей и алгоритмов для управления процессом ликвидации последствий наводнений и за счет этого повысить эффективность управления.

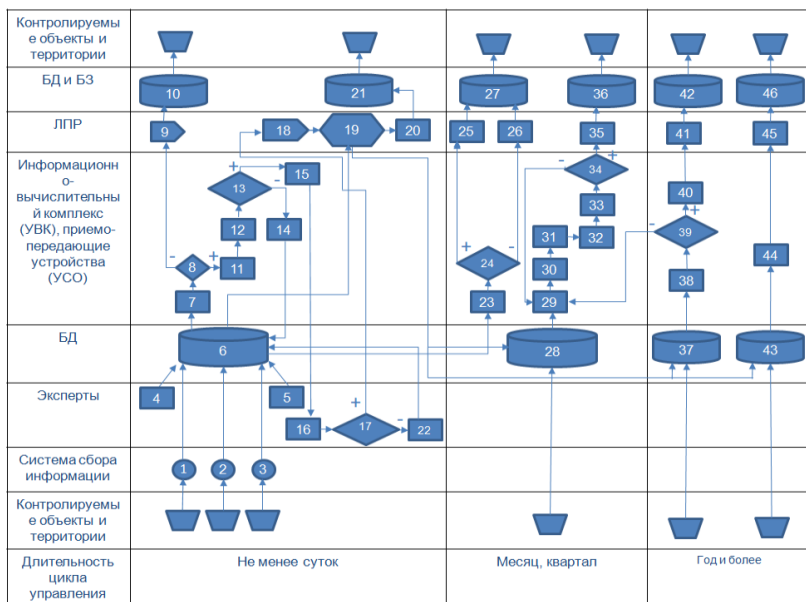


Рис. 14. Информационно-логическая схема управления процессом ликвидации последствий наводнения для КЧС РСЧС объектового и территориального уровня

На рис. 14 приняты следующие обозначения: 1, 2, 3 – уровень, температура, скорость течения воды и т.д.(данные, полученные из систем мониторинга и прогнозирования наводнений); 4 – мнение экспертов; 5 – формирование множества планов мероприятий (УВ); 6 – внесение информации в базу данных (знаний); 7 – проверка достоверности; 8 – информация достоверна; 9 – выдача на экран информации о недостоверности полученной информации; 10 – внесение информации в базу данных (знаний); 11 – определение параметров математической модели;

12 – проверка адекватности математической модели; 13 – модель адекватна; 14 – коррекция модели; 15 – расчет прогнозируемых характеристик; 16 – проверка экспериментами; 17 – эксперименты удачны; 18 – выдача на экран информации о положительной проверке экспериментами; 19 – реализация планов мероприятий (УВ), вычисление целевой функции и выбор оптимального УВ; 20 – принятие решения; 21 – внесение информации в базу данных (знаний); 22 – коррекция параметров модели; 23 – анализ результатов решения за месяц (квартал); 23 – результаты удовлетворительны; 24 – тестирование персонала; 25 – принятие решения по коэффициентам модели и процедуре прогнозирования; 27 – внесение информации в базу данных (знаний); 28 – формировании заданий для тренажерных систем; 29 – запуск тренажерной системы; 30 – формирование заданий; 31 – сбор информации о результатах работы по ликвидации последствий наводнений; 32 – выполнение заданий; 33 – оценка результатов; 34 – задание выполнено; 35 – поощрение; 36 – внесение информации об обучении в базу данных (знаний); 37 – выборка информации необходимой в результатах обучения; 38 – оценка компетентности управляющего персонала; 39 – уровень компетентности удовлетворяет; 40 – выдача на экран информации для ЛПП о требуемом уровне управляющего и диспетчерского персонала; 41 – поощрение; 42 – внесение информации о подготовке персонала в базу данных (знаний); 43 – сбор статистики по ликвидации последствий наводнений за год и более; 44 – планирование мероприятий по усовершенствованию процесса ликвидации последствий наводнений; 45 – выдача на экран информации для органов власти; 46 – внесение информации в базу данных (знаний).

3. Заключение

Разработана постановка задачи управления процессом ликвидации последствий наводнений на промышленных объектах и территориях, предложены и обоснованы критерий эффективности, математические модели и алгоритмы решения данной задачи.

Разработана информационная система FCFAAD, реализующая модели и алгоритмы управления процессом ликвидации последствий наводнения на промышленных объектах и территориях. На примере предприятия ООО «Саратоворгсинтез» рассмотрена структура комплекса технических средств, используемого для реализации информационной системы FCFAAD. Особенности практического применения разработанного математического обеспечения пояснены с помощью модельного примера.

Литература

1. АВАКЯН А.Б. *Наводнения. Концепция защиты* // Известия РАН. Сер. географическая. – 2000.– №5. – С. 40–46.
2. АРХИПОВА Н.И., КУЛЬБА В.В. *Управление в чрезвычайных ситуациях*. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Рос. гос. гуманитар. ун-т, 1998. – 316 с.
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. – Вып. 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. ВОРОБЬЕВ В.Л., АКИМОВ В.А., СОКОЛОВ Ю.И. *Катастрофические наводнения XXI века: уроки и выводы*. – М.: ООО «Декс-Пресс», 2003. – 352 с.
6. ВОРОНИН А.А., ВАСИЛЬЧЕНКО А.А., ХРАПОВ С.С. *Анализ эффективности природовосстановительных проектов в эколого–экономической системе «Волжская ГЭС – Волго–Ахтубинская пойма»* // Управление большими системами. – 2014. – №52. – С. 133–147.
7. ДАНИЛОВ П.В., ЖИГАНОВ К.В., ПРОНИН А.В., ВИВЧАРЬ И.С. *Применение функционально-технологической концепции математического моделирования для разработки управленческих решений при ликвида-*

- ции чрезвычайных ситуаций, связанных с наводнениями // Молодой ученый. – 2016. – №27. – С. 386–89.*
8. ДЬЯКОНОВА Т.А., ПИСАРЕВ А.В., ХОПЕРСКОВ А.В., ХРАПОВ С.С. *Математическая модель динамики поверхностных вод // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1: Математика. Физика. – 2014. – №1. – С. 35–44.*
 9. 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.*
 10. САДОВНИЧИЙ В.А., АКАЕВ А.А., КОРОТАЕВ А.В., МАЛКОВ С.Ю. *Моделирование и прогнозирование мировой динамики. – М.: ИСПИ РАН, 2012. – 360 с.*
 11. ФЕДЯНИН В.И., ПРОСКУРНИКОВ Ю.Е. *Организация и ведение аварийно-спасательных и других неотложных работ при ликвидации чрезвычайных ситуаций природного характера: учеб. пособие – Воронеж: ВГТУ, 2006. – Ч. 1. – 469 с.*
 12. ФОРРЕСТЕР ДЖ. *Мировая динамика. – М.: Наука, 1978.*
 13. 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.*
 14. ШЛЫЧКОВ Е.И., ПОХАЗНИКОВ М.Ю., КУШНИКОВ В.А., КАЛАШНИКОВА О.М. *Анализ выполнимости планов мероприятий при оперативном управлении машиностроительным предприятием // Вестник СГТУ. – 2007. – №1. – С. 88–95.*
 15. ADAMS T.E., PAGANO T.C. *Flood Forecasting – A Global Perspective. – Academic Press, 2016. – 480 p.*

16. FELDER G., ZISCHG A., WEINGARTNER R. *The effect of coupling hydrologic and hydrodynamic models on probable maximum flood estimation* // Journal of Hydrology. – 2017. – Vol. 550. – P. 157–165.
17. FRANCO E.F., HIRAMA K., CARVALHO M. *Applying system dynamics approach in software and information system projects: A mapping study* // Information and Software Technology. – 2018. – Vol. 93. – P. 58–73.
18. KHAMUTOVA M.V. et al *Forecasting characteristics of flood effects* // Journal of Physics: Conf. Series. – 2018. – Vol. 1015. – Article 052012. – DOI:10.1088/1742-6596/1015/5/052012.
19. KUSHNIKOV V.A., REZCHIKOV A.F., TSVIRKUN A.D. *Control in man-machine systems with automated correction of objectives* // Meitan Kexun Jishu. – 1998. – T. 26, No. 11. – P. 168–175.
20. KUSHNIKOV V.A., REZCHIKOV A.F., TSVIRKUN A.D. *Control in man-computer systems with computer-aided goal correction* // Automation and Remote Control. – 1998. – T. 59, No. 7. Part 2. – P. 1040–1046.
21. Munich Re. *Natural catastrophes 2015. Analyses, assessments, positions.* Topics Geo. 2016.
22. SENE K. *Flood Warning, Forecasting and Emergency Response.* Berlin; London: Springer, 2008. – 303 p.

MANAGEMENT OF LIQUIDATION PROCESS OF FLOODS CONSEQUENCES ON INDUSTRIAL OBJECTS AND TERRITORIES

Anatoly Tsvirkun, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Doctor of Science, professor (tsvirkun@ipu.ru).

Alexander Rezchikov, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Doctor of Science, professor (iptmuran@san.ru).

Vadim Kushnikov, Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov, Doctor of Science, professor (iptmuran@san.ru).

Vladimir Ivashenko, Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov, Doctor of Science (iptmuran@san.ru).

Leonid Filimonyuk, Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov, Doctor of Science (iptmuran@san.ru).

Alexey Bogomolov, Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov, Cand.Sc. (iptmuran@san.ru).

Maria Khamutova, Saratov State University, Saratov (mariuka7d@rambler.ru).

Abstract: A problem of the management of liquidation process of floods consequences was formulated based on the system analysis was. System dynamics was used to solve this problem. The characteristics of floods consequences are determined and the causal diagram was constructed. The model to define characteristics of floods consequences affecting the amount of damage was developed and is represented by a system of nonlinear differential equations. The results of solution of system of differential equations were compared to a real data of the flood that occurred in Primorye in 2001. The algorithm of solving the problem of management of liquidation process of floods consequences in which a control functions are presented in the form of the action plans aimed at reducing the characteristics of floods consequences was developed. The software package was developed to implement models and algorithms. The structure of the complex of technical means of management system of liquidation process of floods consequences is developed. An informational-logical scheme illustrating the main stages of the implementation of the developed mathematical software in the structural subdivisions of the EMERCOM system of the object and territorial level has been formed.

Keywords: management of liquidation process of floods consequences, mathematical model, system dynamics.

УДК 004.942

ББК 30в6

DOI: 10.25728/ubs.2020.83.4

Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии Э.Ю. Калимулиной.

Поступила в редакцию 05.12.2018.

Опубликована 31.01.2020.