

# МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ НАВОДНЕНИЙ ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА УЩЕРБА

**Пронин А.А., Кушникова Е.В.**

*Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов, Россия  
gorka19800@yandex.ru, lkushnikova@gmail.com*

**Шувалов К.И.**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия  
shuval@ipu.ru*

*Аннотация. В настоящее время у информационных систем МЧС объектового уровня отсутствует подсистема управления ликвидацией последствий наводнений по критерию минимизации ущерба, позволяющая оперативно осуществлять имитацию процесса ликвидации последствий наводнения и за счет этого получить значительный экономический эффект. В статье приведена постановка задачи управления процессом ликвидации последствий наводнений. Для её решения разработана гетерогенная модель системной динамики, основанная на использовании системы нелинейных дифференциальных уравнений, уравнений регрессионного анализа и теории графов. Предложен и обоснован алгоритм решения задачи в условиях временных ограничений режима реального времени. Разработан модельный пример, иллюстрирующий основные этапы решения задачи. Сформировано и отлажено специализированное информационное программное обеспечение с использованием языков программирования C#, JavaScript и Python, на базе микросервисной архитектуры.*

*Ключевые слова: системная динамика, дифференциальные уравнения, наводнения.*

## 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, сведением лесных массивов и ростом масштабов хозяйственной деятельности человека [1-4].

Российская единая система предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (РСЧС) представляет собой иерархическую организационную платформу, целью которой является прогнозирование, предотвращение и устранение последствий природных и техногенных катастроф [2]. Наиболее близким аналогом российской ЭГИС-ЧС является Европейская система Copernicus Emergency Management Service (EMS) [3] и Global Disaster Alert and Coordination System (GDACS), созданная ООН и ЕС для международного взаимодействия [4].

До сих пор не существует системы управления ликвидацией последствий наводнений по критерию минимизации ущерба на объектном уровне. В системах более крупного масштаба, информационные системы содержат модули, основанные на использовании моделей системной динамики [5-9]. Внедрение подобных технологий в РСЧС особенно актуально в контексте роста климатических рисков. По данным IPCC, частота экстремальных паводков в умеренных широтах к 2050 году увеличится на 40%, что потребует пересмотра устаревших нормативов [10]. Ввиду отсутствия подходящих моделей, методов и средств для моделирования и анализа наводнений, работы в области создания инструментария для прогнозирования протекания наводнения и оценки эффективности разработанных мероприятий для ликвидации наводнений являются актуальной задачей. Ряд зарубежных и отечественных исследователей посвятили свои работы рассмотрению вопросов управления в чрезвычайных ситуациях, моделированию, разработке систем мониторинга и прогнозирования наводнений [6].

## 1. Постановка задачи

Требуется разработать набор формальных моделей и алгоритмов для информационно-управляющей системы МЧС РФ, позволяющих на временном интервале  $t \in [t_0; t_n]$  найти управляющие воздействия  $p(t) \in P$ , минимизирующие целевую функцию:

$$R(p(t)) = \int_{t_0}^{t_n} \sum_{i=0}^n (Z_i^* - Z_i(t, p(t)))^2 \alpha_i dt \rightarrow \min \quad (1)$$

при ограничениях:

$$\frac{dZ_i(t)}{dt} = f_i(t, p(t), Z_1(t), \dots, Z_n(t)), i = 1, 2, \dots, 14, t > 0, Z_i(t) > 0 \quad (2)$$

и граничных условиях:

$$F_i^{t_0}(Z, Z', p) = 0, F_j^{t_n}(Z, Z', p) = 0, i \in [1, k_1], j \in [1, k_2] \quad (3)$$

где  $Z_i^*$  – рекомендованные значения характеристик последствий наводнения;  $Z_i, i = 1, 2, \dots, 14$ , – текущие значения характеристик последствий наводнения;  $\alpha_i$  – весовой коэффициент  $i$ -й характеристики.

## 2. Математическая модель и методика решения задачи

Для построения модели используется математический аппарат системной динамики [7-14]. Для описания моделируемого объекта используются системы нелинейных уравнений первого порядка:

$$\frac{dZ_i(t,p(t),a(t))}{dt} = f_i^+(F^+(t,p(t),a(t))) - f_i^-(F^-(t,p(t),a(t))), i \in [1;n], \quad (4)$$

где  $f_i^+(F^+), f_i^-(F^-)$  – непрерывные или кусочно-непрерывные функции, определяющие положительную и отрицательную скорость изменения значения системной переменной  $Z_i$ . При этом,  $F^+ = (F_1, \dots, F_m), F^- = (F_1, \dots, F_m)$  – вектора факторов  $F_{i,j} \in [1; m]$ , влияющих на скорость изменения переменной  $Z_i$ . В качестве  $F_j$  могут выступать системные переменные и параметры внешней среды. При выборе основных характеристик и параметров внешней среды для разработки модели был использован ГОСТ 22.0.06-2023 [15]. Рассматриваемые системные переменные:  $Z_1(t, p(t))$  – число погибших людей;  $Z_2(t, p(t))$  – продолжительность поражающего воздействия;  $Z_3(t, p(t))$  – площадь зоны чрезвычайной ситуации;  $Z_4(t, p(t))$  – число людей, частично или полностью утративших имущество первой необходимости;  $Z_5(t, p(t))$  – ущерб коммерческой организации;  $Z_6(t, p(t))$  – объем загрязненного грунта, почв;  $Z_7(t, p(t))$  – площадь земель, частично или полностью исключенных из сельскохозяйственного оборота;  $Z_8(t, p(t))$  – снижение плодородия земель;  $Z_9(t, p(t))$  – продолжительность аварийного периода;  $Z_{10}(t, p(t))$  – продолжительность восстановительного периода;  $Z_{11}(t, p(t))$  – число пораженных сельскохозяйственных животных;  $Z_{12}(t, p(t))$  – величина погибшего урожая;  $Z_{13}(t, p(t))$  – площадь уничтоженных, пострадавших лесных массивов;  $Z_{14}(t, p(t))$  – ущерб административно-территориальной единице (различного уровня), в денежных единицах. Рассматриваемые параметры внешней среды:  $R_{wl}(t, p(t))$  – подъем уровня воды на защищаемой территории;  $C_{hr}(t, p(t))$  – продолжительный сильный дождь;  $H_r(t, p(t))$  – сильный ливень;  $V_{hr}(t, p(t))$  – очень сильный дождь;  $S_{ew}(t, p(t))$  – размыв и смыл грунтов водными потоками на защищаемой территории;  $L_{rb}(t, p(t))$  – линейное отступление берегов на защищаемой территории. В соответствии с используемым стандартом продолжительный сильный дождь, сильный ливень и очень сильный дождь считаются отдельными источниками природной ЧС [15]. Для составления модели использовались обширные данные о ливневых наводнениях. Введем набор коэффициентов влияния  $P_i, i \in [1; N]$ , которые количественно отражают воздействие внешней среды на параметры модели. Эти коэффициенты задаются в процессе адаптации модели к конкретному объекту управления. На основании экспертного анализа предметной области установлены следующие значения:  $P_1 = 1, P_2 = 0, P_3 = -1$ .

Моделирование осуществляется с использованием причинно-следственного графа, формируемого на базе матрицы причинно-следственных связей, приведенной в таблице 1.

Таблица 1. Матрица причинно-следственных связей для разработанной модели

	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$Z_5$	$Z_6$	$Z_7$	$Z_8$	$Z_9$	$Z_{10}$	$Z_{11}$	$Z_{12}$	$Z_{13}$	$Z_{14}$	$R_{wl}$	$C_{hr}$	$H_r$	$V_{hr}$	$S_{ew}$	$L_{rb}$
$Z_1$	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	-1	1	-1	0	-1	-1	0
$Z_2$	0	0	0	-1	0	0	1	0	0	0	-1	0	0	0	1	0	1	0	0	0
$Z_3$	1	-1	0	0	0	0	1	0	1	-1	0	0	0	0	-1	0	0	0	1	-1
$Z_4$	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0
$Z_5$	0	-1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
$Z_6$	0	0	0	1	0	0	1	0	1	-1	-1	-1	1	0	0	-1	-1	-1	1	0
$Z_7$	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-1	1	1	1	-1	-1

	Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Z <sub>3</sub>	Z <sub>4</sub>	Z <sub>5</sub>	Z <sub>6</sub>	Z <sub>7</sub>	Z <sub>8</sub>	Z <sub>9</sub>	Z <sub>10</sub>	Z <sub>11</sub>	Z <sub>12</sub>	Z <sub>13</sub>	Z <sub>14</sub>	R <sub>wl</sub>	C <sub>hr</sub>	H <sub>r</sub>	V <sub>hr</sub>	S <sub>ew</sub>	L <sub>rb</sub>
Z <sub>8</sub>	0	0	0	-1	0	1	0	0	0	-1	1	0	-1	0	0	0	0	0	1	0
Z <sub>9</sub>	0	-1	0	1	-1	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Z <sub>10</sub>	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	-1	-1	-1	0	0
Z <sub>11</sub>	0	0	1	-1	0	0	1	0	1	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0
Z <sub>12</sub>	-1	0	0	0	0	1	-1	1	0	0	-1	0	1	0	0	0	0	0	1	0
Z <sub>13</sub>	0	0	-1	0	0	0	1	0	-1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0
Z <sub>14</sub>	0	1	1	0	1	0	-1	1	-1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0

Для иллюстрации на рисунке 1 представлен подграф, соответствующий переменной Z<sub>1</sub>. Вершины графа соответствуют переменным Z<sub>1</sub> – Z<sub>14</sub>, и внешним факторам R<sub>wl</sub> – L<sub>rb</sub>, а направленные дуги задают тип и направление причинно-следственных отношений между ними.

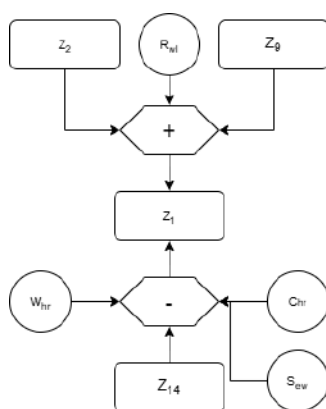


Рис. 1. Граф причинно-следственных связей для переменной Z<sub>1</sub>

В результате проведенного анализа, удалось построить модель для определения характеристик последствий наводнения, следующего вида:

$$\frac{dZ_1(t,p(t))}{dt} = f_i^+(Z_2(t,p(t)), Z_9(t,p(t)), R_{wl}(t,p(t))) - f_i^-(Z_{14}(t,p(t)), V_{hr}(t,p(t)), C_{hr}(t,p(t)), S_{ew}(t,p(t)));$$

...

$$\frac{dZ_{14}(t,p(t))}{dt} = f_i^+(Z_2(t,p(t)), Z_3(t,p(t)), Z_5(t,p(t)), Z_8(t,p(t)), Z_{11}(t,p(t)), Z_{12}(t,p(t)), Z_{13}(t,p(t))) - f_i^-(Z_7(t,p(t)), Z_9(t,p(t)));$$

Предположим, что функции правой части имеют 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. Таким образом, систему можно представить в виде:

$$\frac{dZ_1(t,p(t))}{dt} = \frac{1}{Z_1^*} ((f_1(Z_2(t,p(t))))f_2(Z_9(t,p(t)))R_{wl}(t,p(t))) - f_3(Z_{14}(t,p(t)))(V_{hr}(t,p(t)) + C_{hr}(t,p(t)) + S_{ew}(t,p(t))));$$

...

$$\frac{dZ_{14}(t,p(t))}{dt} = \frac{1}{Z_{14}^*} ((f_{53}(Z_2(t,p(t))))f_{54}(Z_3(t,p(t)))f_{55}(Z_5(t,p(t))) f_{56}(Z_8(t,p(t))) ** f_{57}(Z_{11}(t,p(t)))f_{58}(Z_{12}(t,p(t)))f_{59}(Z_{13}(t,p(t)))) - (f_{60}(Z_7(t,p(t)))f_{61}(Z_9(t,p(t))));$$

где  $f_i^{Z_i}$  – функциональная зависимость системной переменной  $Z_j$  от системной переменной  $Z_i$ , а  $i, j \in [1; 14]$ ;  $\frac{1}{Z_i^*}$  – нормировочные множители  $i \in [1; 14]$ . Если известны полиномы, устанавливающие зависимость между системными переменными, то для функциональных зависимостей  $f_i^{Z_j}$ , на основе статистических данных, экспертами или разработчиками математического обеспечения, строятся кусочно-линейные функции, аппроксимируемые полиномами.

### 3. Модельный пример

Рассмотрим решение полученной системы уравнений на примере наводнения в саратовской области, произошедшее в июне 2021 года. Для определения внутренних функций  $f_1, \dots, f_{61}$  были использованы статистические данные по наводнениям, полученные из открытых источников [16]. На основании имеющихся данных были определены и аппроксимированы внутренние функции системы (1). Рассмотрим на примере для внутренней функции  $f_7$ :

$$f_7(Z_1) = 0.00003Z_1^2 - 0.007Z_1 + 0.4, \quad (7)$$

На рисунке 2 продемонстрирована аналитическая взаимосвязь: между площадью зоны ЧС (переменная модели  $Z_3$ ) и количеством погибших (переменная модели  $Z_1$ ). Эта математическая зависимость служат базой для настройки внутренних переменных модели. При построении графика 3 и последующих, использовались нормированные характеристики, а также машинное время.

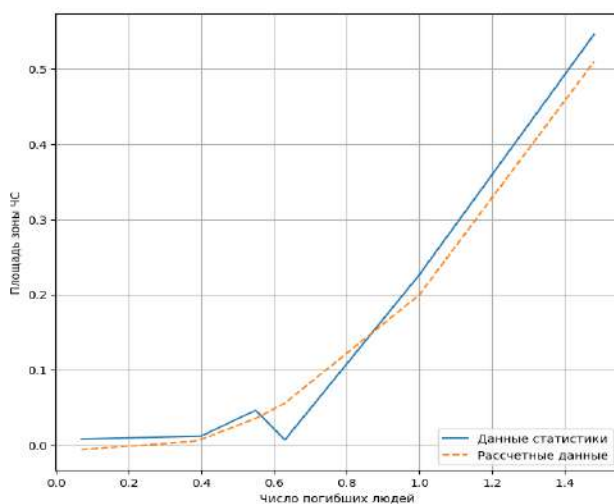


Рис. 2. График функциональной зависимости площади зоны ЧС (переменная модели  $Z_3$ ) от количества погибших (переменная модели  $Z_1$ )

На графике штрихпунктиром обозначены расчетные траектории модели, тогда как сплошные линии визуализируют реальные статистические наблюдения. Сопоставление этих данных позволяет верифицировать адекватность модели. Для разработанной модели и набора внутренних функций, подставленных в (1), был произведен расчет системы дифференциальных уравнений методом Рунге-Кутты 4 порядка. В ходе анализа имеющихся данных, было установлено, что самыми распространенными являются наводнения, длительностью от 1 до 14 дней. Поэтому требуется найти решение системы (1) для интервала  $t \in [1; 14]$  для следующих начальных значений переменных и внешних воздействий:

Таблица 2. Начальные значения переменных системы (4)

$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$Z_5$	$Z_6$	$Z_7$	$Z_8$	$Z_9$	$Z_{10}$	$Z_{11}$	$Z_{12}$	$Z_{13}$	$Z_{14}$
0,61	0,52	0,68	0,07	0,71	0,4	0,52	0,78	0,89	0,9	0,31	0,87	0,9	0,89

Таблица 3. Начальные значения внешних воздействий системы (4).

$R_{wl}$	$C_{hr}$	$H_r$	$V_{hr}$	$S_{ew}$	$L_{rb}$
0,56	0,48	0,51	0,29	0,19	0,76

Графики полученного решения приведены на рисунках 3, 4.

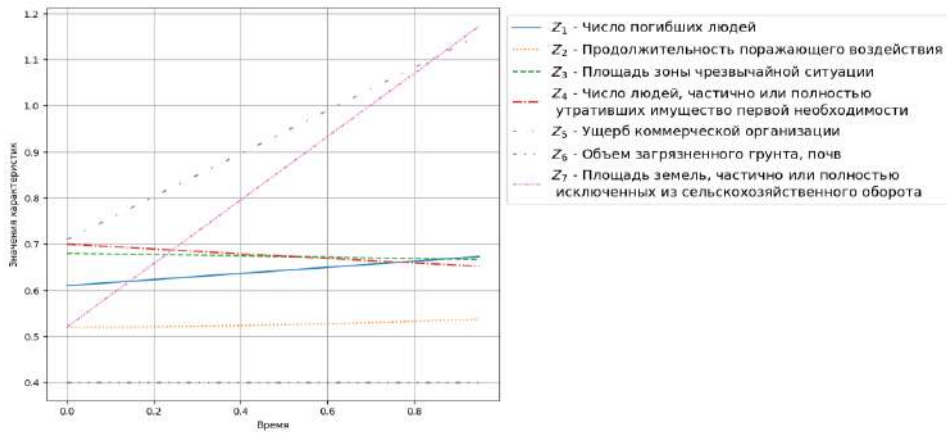


Рис. 3. Решение системы (1) для переменных  $Z_1 - Z_7$

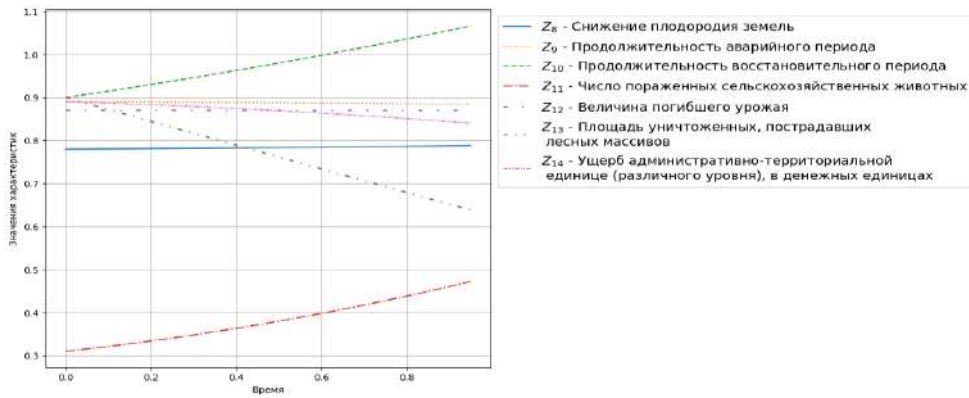


Рис. 4. Решение системы (1) для переменных  $Z_8 - Z_{14}$

$$\begin{aligned}
 Z_1: & 0.04t + 0.61, Z_2: 0.01t + 0.52, Z_3: 0.09t + 0.58, Z_4: 0.0025t - 0.03, Z_5: 0.26t^2 + 0.19t \\
 & + 0.6, Z_6: -0.01t + 0.4, Z_7: -0.014t^2 + 0.35t + 0.6, Z_8: 0.004t + 0.78, Z_9: -0.004t \\
 & + 0.89, Z_{10}: 0.1t + 0.9, Z_{11}: -0.59t^2 + 0.68t + 0.59, Z_{12}: -0.001t + 0.87, Z_{13}: -0.18t \\
 & + 0.9, Z_{14}: -0.03t + 0.89
 \end{aligned}$$

Для оценки корректности полученного решения было проведено сравнение расчетных результатов с данными статистики для исследуемых характеристик наводнений длительностью от 1 до 14 дней. На рисунке 5 приведено сравнение полученного решения для переменной  $Z_4$ .

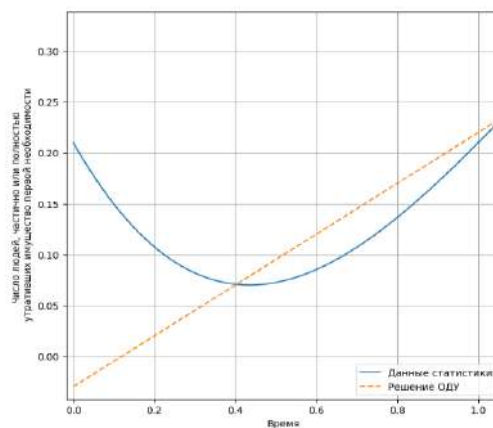


Рис. 5. Сравнение расчетных значений с полученными результатами площади зоны чрезвычайной ситуации

Рассмотрим решение задачи (1)–(3) в пространстве управлений, ограниченном планами  $p_1, p_2, p_3$ . Для анализа применим аппроксимации решений системы дифференциальных уравнений (4), выраженные в полиномиальной форме. Вычисления выполним для временного плана в 14 суток. Рассмотрим расчет решения задачи для плана  $p_1$ . Индикаторы плана мероприятий будут нормированы

будут нормированы с одинаковыми весовыми коэффициентами  $a_i = 1/14$ , что предполагает равную значимость каждого параметра.

Для плана  $p_1$  получены следующие результаты:

$$Z(p_1(t)) = \int_1^{14} \frac{1}{14} (0.04t + 0.61)^2 + \dots + \frac{1}{14} (-0.03t + 0.89)^2 dt = 2146,41.$$

Решение для плана  $p_2 = 2299,85$ ,  $p_3 = 2700,87$ .

Проведенные вычисления показывают, что план мероприятий  $p_1$  является решением задачи (1) - (3). Описание плана мероприятий отображено на рисунке 6.

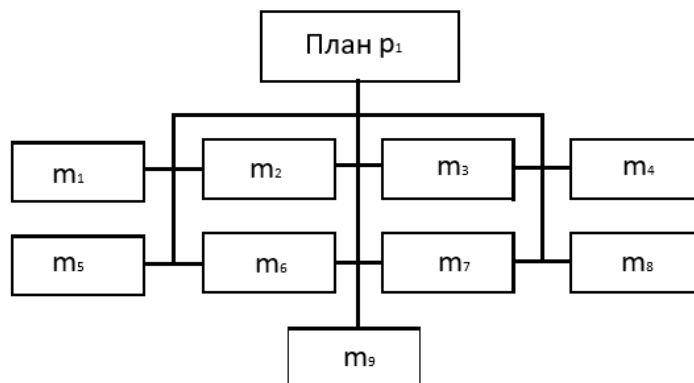


Рис. 6. Верхний уровень плана ликвидации последствий наводнения в саратовской области в июне 2021 года

Под блоками  $m_i, i \in [1; 9]$  понимаются следующие мероприятия:  $m_1$  – спрямление и углубление русел рек, их расчистка;  $m_2$  – подготовка ливневой канализации, оборудование водоотводных канав, расчистка существующих дорожных водоотводных сооружений и увеличение их пропускной способности;  $m_3$  – проведение берегоукрепительных и дноуглубительных работ;  $m_4$  – регулирование русел и стока малых рек;  $m_5$  – посадка лесозащитных полос в бассейнах рек;  $m_6$  – распашка земли поперек склонов;  $m_7$  – террасирование склонов;  $m_8$  – сохранение древесной и кустарниковой растительности в пределах прибрежных защитных полос и водоохраных зон;  $m_9$  – сооружение или ремонт ограждающих дамб, сплошного и поучасткового обвалования [17].

#### 4. Заключение

Расчеты характеристик наводнений по предложенной модели показывают достаточно высокую точность, удовлетворяющую поставленной цели. Отклонение от статистических данных, не превышает 10%, что позволяет считать данную модель пригодной для решения поставленной задачи минимизации рисков от наводнений. Решение системы дифференциальных уравнений иллюстрирует процедуру выбора рационального плана предотвращения последствий наводнения, произошедшего в Саратовской области, в июне 2021 года.

В дальнейшем, планируется увеличить точность полученного решения за счет корректировки модели при помощи поправочных коэффициентов, а также изменения характера связи переменных между собой. Разработанные модели и методы могут быть использованы для совершенствования систем управления МЧС объектового уровня, а также при разработке соответствующих тренажерных и обучающих систем.

#### Литература

1. Цвиркун А.Д., Резчиков А.Ф., Кушников В.А., Иващенко В.А., Филлимонюк Л.Ю., Богомолов А.С., Хамутова М.В. Управление процессом ликвидации последствий наводнений на промышленных объектах и территориях // УБС. – 2020. – № 83. – С. 75–105.
2. Клюев В.В., Резчиков А.Ф., Кушников В.А., Богомолов А.С., Иващенко В.А., Филлимонюк Л.Ю., Хамутова М.В. Информационно-управляющая система для поддержки принятия решений по ликвидации последствий наводнений // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2016. – № 11 (149). – С. 39–45.
3. Кушников В.А., Кушникова Е.В. Архитектура прикладного программного обеспечения для формального анализа свойств целей и синтеза критериев управления сложными социальными и экономическими системами // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2009. – Т. 4, № 2 (43). – С. 199–201.

4. Цвиркун А.Д., Резчиков А.Ф., Кушников В.А., Дранко О.И., Богомолов А.С., Селютин А.Д. Модели и методы проверки достижимости целей и выполнимости планов в крупномасштабных системах на примере целей и планов ликвидации последствий наводнения // Автоматика и телемеханика. – 2023. – № 12. – С. 49–63.
5. Постановление Правительства РФ № 794 «О единой государственной системе предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций» (2020).
6. SEMS official site. <https://emergency.copernicus.eu/> (дата обращения 11.06.2025).
7. GDACS official site. <https://www.gdacs.org/> (дата обращения 01.06.2025).
8. IPCC. «Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability». Cambridge University Press.
9. Фролова Н.Л., Самсонов Т.Е., Киреева М.Б., Семин В.Н., Энтин А.Л. Веб-приложение «Водный режим рек Европейской территории России»: структура и функциональные возможности // ВХР. – 2024. – № 2. – С. 6–22.
10. Форрестер Д. Мировая динамика: пер. с англ. / Д. Форрестер. – М.: ООО «Изд-во АСТ», 2003. – 379 с.
11. Дранко О.И., Резчиков А.Ф., Степановская И.А., Богомолов А.С., Кушников В.А. Сценарное моделирование развития страны на основе индикативного планирования // Проблемы управления. – 2024. – № 5. – С. 25–41.
12. Rezchikov A.F., Kushnikov V.A., Ivashchenko V.A., Bogomolov A.S., Filimonyuk L., Kachur K.P. Control of the air transportation system with flight safety as a criterion // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2016. – Т. 466. – Р. 423–432.
13. Rezchikov A., Dolinina O., Kushnikov V., Ivashchenko V., Kachur K., Bogomolov A., Filimonyuk L. The problem of a human factor in aviation transport systems // Indian Journal of Science and Technology. – 2016. – Т. 9, № 46. – Р. 107351.
14. Яндыбаева Н.В., Кушников В.А. Модель Форрестера для прогнозирования показателей национальной безопасности России / Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2015. Материалы Восьмой международной конференции: в 2 томах. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук; Под общей редакцией С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна, 2015. – С. 342–347.
15. ГОСТ 22.0.06-2023 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Источники природных чрезвычайных ситуаций. Поражающие факторы. Номенклатура параметров поражающих воздействий.
16. Dartmouth floods observatory official site. <https://floodobservatory.colorado.edu/> (дата обращения 10.06.2025).
17. Методические рекомендации МЧС России по организации и проведении мероприятий, направленных на снижение последствий весеннего половодья и паводков.