

## МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДАННЫХ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ПОДГОТОВКИ К НАВОДНЕНИЮ И ЛИКВИДАЦИИ ЕГО ПОСЛЕДСТВИЙ

**Хамутова М.В., Кушников В.А., Богомолов А.С.**

*Саратовский национальный исследовательский государственный университет  
имени Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия*  
mariuka7d@rambler.ru, kushnikoff@yandex.ru, alexbogomolov@yandex.ru

**Резчиков А.Ф.**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия*  
rw4cy@mail.ru

*Аннотация. В статье рассматриваются процессы формирования необходимых для принятия решений данных в системе управления процессами подготовки к наводнению и ликвидации его последствий. Представлена модель для прогнозирования характеристик последствий наводнения. Рассмотрены основные мероприятия по предотвращению и ликвидации наводнения для различных режимов функционирования системы управления.*

*Ключевые слова: система управления, характеристики последствий наводнения, системная динамика.*

### **Введение**

Наводнение является одним из наиболее катастрофичным по масштабу и ущербу природным катаклизмом. Для уменьшения социально-экономических и других последствий наводнения требуется эффективное управление процессами подготовки к наводнению и ликвидации его последствий. Управление процессами подготовки к наводнению и ликвидации его последствий на объектах и территориях, подверженных наводнению должно решать следующий ряд основных задач: мониторинг, прогнозирование и моделирование наводнения и его последствий; организация и проведение превентивных мероприятий при подготовке к наводнению; планирование, применение и маневрирование группировки сил и средств при реагировании на угрозу и ликвидации последствий наводнения; своевременное оповещение и информирование населения, заблаговременное проведение эвакуационных мероприятий; выполнение оперативных инженерных мероприятий по защите населенных пунктов и инфраструктуры от негативного воздействия наводнения; ликвидация наводнения. Система управления должна состоять из комплекса математических моделей и методов, позволяющих прогнозировать гидрологические параметры, площадь затопления и возможные последствия наводнения, а также, оптимизировать существующие в распоряжении ресурсы. Анализ данных, полученных из указанных моделей позволит повысить эффективность и качество управление процессами подготовки и ликвидации последствий наводнений.

### **1. Постановка задачи**

В соответствии с ГОСТ 22.0.06 – 97/ГОСТ Р 22.0.06 – 95 и РД 153 – 34.2 – 002 – 01 основными характеристиками последствий наводнений являются: численность населения, оказавшегося в зоне, подверженной наводнениям (здесь выделяются: количество жертв, количество пострадавших, количество населения, оставшегося без крова и т.п.); количество населенных пунктов, попавших в зону, охваченную наводнением (здесь выделяются города, поселки городского типа, сельские населенные пункты, полностью затопленные, частично затопленные, попавшие в зону подтопления); количество объектов различных отраслей экономики, оказавшихся в зоне, охваченной наводнением; протяженность железных и автомобильных дорог, линий электропередачи, линий коммуникаций и связи, оказавшихся в зоне затопления; количество мостов и тоннелей, затопленных, разрушенных и поврежденных в результате наводнения; количество жилых домов, затопленных, разрушенных и поврежденных в результате наводнения; площадь сельскохозяйственных угодий, охваченных наводнением; количество погибших сельскохозяйственных животных. Выбор комплекса характеристик последствий наводнения зависит от специфики объекта или территории, подверженного наводнениям. Данные характеристики влияют на величину ущерба от наводнения, поэтому их минимизация является основной задачей управления объектом или территорией, подверженной наводнению.

Допустим рассматриваются регулярно затапливаемые объекты и территории, привлекаемые к предотвращению и ликвидации последствий наводнений силы и средства ограничены и ущерб от

наводнения пропорционален взвешенной сумме квадратов отклонений текущих значений характеристик последствий наводнения от их допустимых значений.

Таким образом, для информационно-управляющих систем РСЧС объектового и территориального уровня разработать формальные модели, и методы, позволяющие на временном интервале  $t \in [t_0; t_N]$  сформировать управляющие воздействия, минимизируйте функцию [1-3]:

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

где  $X_i(t)$ ,  $i=1, \dots, n$  – характеристики последствий наводнения;  $X_i^*$  – допустимые значения характеристик последствий наводнения,  $\gamma_i$  – весовой коэффициент  $i$  – ой характеристики;  $\mathbf{a}(t)$  – вектор параметров внешней среды. В качестве управляющих воздействий  $\mathbf{p}(t)$  выбираются планы мероприятий, направленные на предупреждение и ликвидацию последствий наводнений.

## 2. Комплекс моделей и методов системы управления процессами подготовки к наводнению и ликвидации его последствий

Для моделирования характеристик последствий наводнения необходимо определить параметры внешней среды, к числу которых относятся площадь затопления, скорость течения и уровень воды, и другие гидрологические параметры. Реконструкция цифровой модели рельефа (ЦМР) с учетом данных объективного контроля уровня воды или его прогнозируемых значений позволит определить контуры и площадь затопления, или может использоваться для моделирования стока в связке с гидрологической моделью. При выборе моделей (методов) прогнозирования гидрологических параметров необходимо учитывать специфику объекта или территории, к примеру, каким типом наводнения подвержен объект. Таким образом следует выделить следующие основные модели и методы прогнозирования гидрологических параметров [4]:

Методы прогнозирования дождевых паводков, основанные на принципе суммирования одновременно добегающих масс воды и отличаются друг от друга только приемами расчета водоотдачи и определения функции добегания стока. Такие методы характеризуются краткосрочным прогнозом.

Методы прогнозирования половодья, основная идея которых заключается в том, что сток за период половодья определяется количеством снега, накопившегося в течении зимы в речном бассейне, количеством осадков, выпавших в период формирования половодья, и водопоглотительной способностью речного бассейна. Уравнение водного баланса речного бассейна за период половодья может быть записано в следующем виде:  $y = s + x_{ж} - (i + p + z_1 + z_2)$ , где  $s$  – запас воды в снеге и ледяной корке на поверхности почвы,  $x_{ж}$  – жидкие осадки,  $i$  – инфильтрация,  $p$  – количество воды, задержанной на поверхности бассейна,  $z_1$  – испарение с поверхности снежного покрова за период снеготаяния,  $z_2$  – испарение за время стекания воды по склонам и руслам,  $y$  – сток за половодье.

Методы прогнозирования заторов, зажоров, основной целью прогнозирования является определение максимального заторного и зажорного уровня воды, а также даты их наступления.

Методы прогнозирования гидрологических аварий, приливов, ветровых нагонов, идея которых заключается в гидродинамическом моделировании, основанном на применении уравнений мелкой воды (уравнения Сен-Венана). Расчет параметров волны прорыва в рамках одномерной модели выполняется на основе системы нестационарных уравнений мелкой воды, которая может быть представлена в виде:

$$\frac{\partial(Q)}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2 / \Omega)}{\partial s} = -g\Omega \frac{\partial H}{\partial s} + \frac{g}{C^2 R \Omega} Q|Q| + \frac{\partial}{\partial s} \left( v^T \Omega \frac{\partial V}{\partial s} \right), \quad \frac{\partial(\Omega)}{\partial t} + \frac{\partial(Q)}{\partial s} = F, \quad (2)$$

где  $t$  – время;  $s$  – координата вдоль направления течения;  $Q$  – расход воды;  $\Omega$  – площадь живого сечения потока;  $H$  – отметка свободной поверхности воды;  $C$  – коэффициент Шези, определяемый по формуле Маннинга;  $R$  – гидравлический радиус;  $g$  – ускорение свободного падения;  $vT$  – коэффициент турбулентной вязкости;  $F$  – удельный приток воды на единицу длины русла (боковая приточность).

Результаты, полученные из гидрологических и гидродинамических моделей, а также, из ЦМР, используются как входные данные для модели прогнозирования последствий наводнения.

Теперь рассмотрим модель для определения характеристик последствий наводнений, в основу которой положен математический аппарат системной динамики, в соответствии с которым моделируемый объект описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка

$$\frac{dX_i(t)}{dt} = f_i^+ - f_i^-, \quad i = \overline{1, n}, \quad (3)$$

где  $f_i^+, f_i^-, i=1, \dots, n$  – непрерывные или кусочно-непрерывные функции, определяющие положительную и отрицательную скорость изменения значения системной переменной (характеристики последствий наводнений)  $X_i(t), i=1, \dots, n$ . В свою очередь  $f_i^+(F_1, F_2, \dots, F_m), f_i^-(F_1, F_2, \dots, F_m)$  – функции от факторов  $F_j, j=1, \dots, m$  влияющих на скорость изменения переменной  $X_i$ , при этом  $F_j$  могут быть системными переменными или параметрами внешней среды [5].

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

Где используются следующие характеристики последствий наводнения:  $X_1(t)$  – численность группировки сил, участвующих в аварийно-спасательных работах;  $X_2(t)$  – количество жилых домов, разрушенных и поврежденных в результате наводнения;  $X_3(t)$  – численность населения, эвакуированного из зоны затопления;  $X_4(t)$  – количество погибших;  $X_5(t)$  – протяженность железных и автомобильных дорог, оказавшихся в зоне затопления;  $X_6(t)$  – количество промышленных предприятий в зоне наводнения;  $X_7(t)$  – количество транспортных средств, участвующих в аварийно-спасательных работах;  $X_8(t)$  – численность населения в зоне затопления;  $X_9(t)$  – площадь сельскохозяйственных угодий, охваченных наводнением;  $X_{10}(t)$  – количество погибших сельскохозяйственных животных;  $X_{11}(t)$  – ущерб основным производственным фондам в зоне затопления;  $X_{12}(t)$  – ущерб оборотным производственным фондам в зоне затопления;  $X_{13}(t)$  – количество мостов, разрушенных и поврежденных в результате наводнения. Параметры внешней среды:  $A(t)$  – плотность транспортных сетей в зоне затопление;  $D(t)$  – плотность населения в зоне затопления;  $F(t), G(t), T(t)$  – средняя скорость течения, уровень 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.

Сделаем допущение, о том, что функции правой части (3) имеют вид

$$f_i^{+/-}(F_1, \dots, F_n) = \sum_{l=1}^n k_{i,l}^{+/-} \prod_{j=1}^m f_{i,l}^{F_j}(F_j), \quad (5)$$

где коэффициенты  $k_{i,l}^{+/-}$  определяются на этапе адаптации модели к объекту исследования,  $f_{i,l}^{F_j}$  – функциональные зависимости системной переменной  $X_i(t)$  от фактора  $F_j$  определяются путем аппроксимации статистических данных [6].

Вопрос правомерности перехода к (5) в общем случае решается следующим образом. Если экспериментальное изучение исследуемого явления покажет, что система (3) описывает его достаточно адекватно (т.е., если удастся в процессе вычислительных экспериментов подобрать коэффициенты  $k_{i,l}^{+/-}$  и зависимости  $f_{i,l}^{F_j}$ , таким образом, чтобы величины моделируемых переменных совпадали с экспериментальными данными), то эта система может использоваться для определения значений моделируемых переменных исследуемого явления.

Уравнения системы (3) при  $t > 0$  и при начальных условиях  $t_0=1, X_i(t_0)=X_{i0}, i=1, \dots, n$  представляют собой задачу Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка и решаются численным методом. Полученные результаты решения аппроксимируются полиномами невысоких степеней, которые подставляются в систему (1).

$$X_i(t, \mathbf{a}(t), \mathbf{p}(t)) = \sum_{i=0}^N c_i t^i = c_0 + c_1 t + \dots + c_N t^N \quad (6)$$

На рис. 1 представлен модельный пример, демонстрирующий процедуру решения задачи (1) с использованием статистики по наводнениям в Аткарске в 1994, 1998 и 2004 гг.

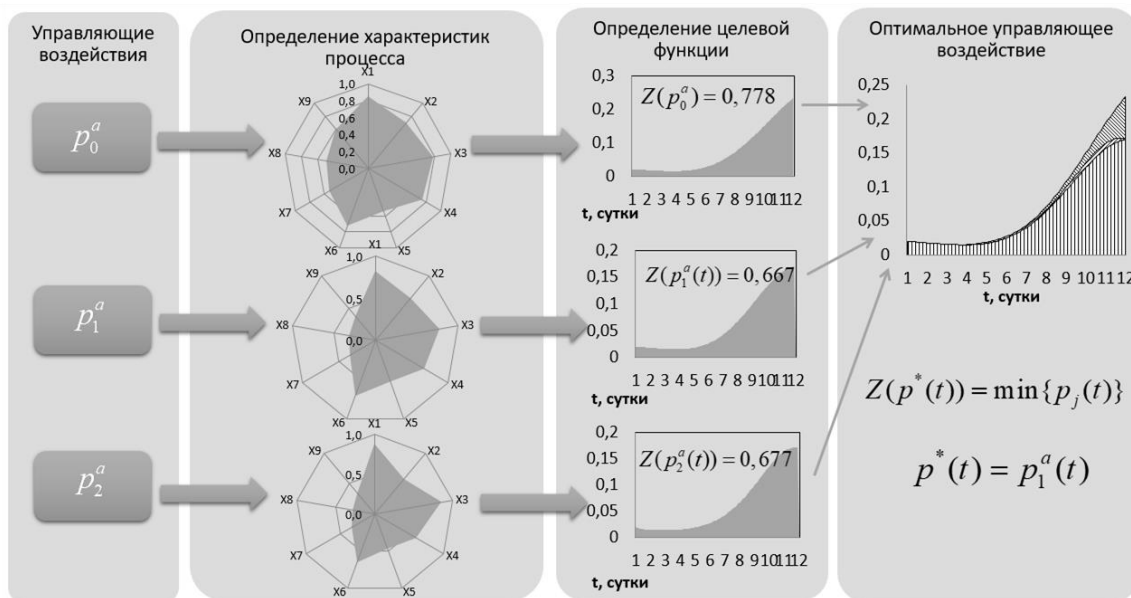


Рис. 1. Процедура решения задачи управления процессом подготовки к наводнению и ликвидации его последствий (г. Аткарска)

Следует отметить, для того чтобы представленные модели сохраняли свою точность и актуальность, необходимо проводить их калибровку и адаптацию к изменяющимся условиям.

Прогнозные данные о возможных последствиях наводнения позволят лицам, принимающим решения сформировать необходимые силы и средства, направленные на ликвидацию наводнения, целесообразно распределить ресурсы, разработать или скорректировать базовый план мероприятий, и как следствие, повысить качество управления объектом или территорией, подверженном наводнением.

### 3. Мероприятия по предупреждению и ликвидации последствий наводнений

Система управления процессами подготовки к наводнению и ликвидации его последствий на затопляемых объектах и территориях функционирует в следующих режимах [7, 8]:

1. Режим повседневной деятельности – при нормальной гидрологической обстановки.
2. Режим повышенной готовности – при ухудшении гидрологической обстановки и при получении прогноза о возможности возникновения чрезвычайной ситуации.
3. Режим чрезвычайной ситуации – при возникновении и во время ликвидации чрезвычайной ситуации.

Рассмотрим основные мероприятия, выполняемые функциональными и территориальными подсистемами РСЧС в указанных режимах (рис. 2) [9]:

М<sub>1</sub> – Мониторинг гидрологической обстановки;

М<sub>2</sub> – Прогнозирование и моделирование наводнения;

М<sub>3</sub> – Подготовка к проведению мероприятий по эвакуации населения, сельскохозяйственных животных и материальных ценностей;

М<sub>4</sub> – Подсыпка и укрепление берегозащитных сооружений;

М<sub>5</sub> – Подготовка и проведение мероприятий по отводу паводковых вод, дноуглубительные и русловыпрямительные работы;

М<sub>6</sub> – Обследование и укрепление мостов, подготовка материалов и средств к их восстановлению. Планирование и подготовка к наводнению временных переправ.

М<sub>7</sub> – Подготовительные работы по организации оказания медицинской помощи пострадавшим людям, по первоочередному жизнеобеспечению, а также по защите сельскохозяйственных животных при угрозе наводнения;

М<sub>8</sub> – Проведение мероприятий по укреплению железных и автомобильных дорог, попадающих в зоны возможного затопления. Подготовка к организации временных объездных путей;

М<sub>9</sub> – Создание запасов средств для ликвидации последствий;

М<sub>10</sub> – Осуществление мер по укреплению и защите систем тепло-, электроснабжения и связи, дорог и других транспортных коммуникаций, а также подготовка к их восстановлению.

М<sub>11</sub> – Дренажирование территорий;

М<sub>12</sub> – Оповещение населения;

М<sub>13</sub> – Эвакуация;

М<sub>14</sub> – Защита сельхозугодий, кормов;

М<sub>15</sub> – Готовность медицинских и спасательных сил и средств, коммунальных и жизнеобеспечивающих служб;

М<sub>16</sub> – Организация круглосуточного дежурства;

М<sub>17</sub> – Противоэпидемические мероприятия;

М<sub>18</sub> – Проведение инженерных-технических работ по защите территории и объектов;

М<sub>19</sub> – Выделение финансовых средств для проведения мероприятий.

	Режим 1	Режим 2	Режим 3
M1	Δt1		
M2	Δt2		
M3	Δt3		
M4	Δt4		
M5	Δt5		
M6	Δt6		
M7	Δt7		
M8	Δt8		
M9	Δt9		
M10	Δt10		
M11		Δt11	
M12		Δt12	
M13		Δt13	
M14		Δt14	
M15		Δt15	
M16		Δt16	
M17			Δt17
M18		Δt18	
M19	Δt19		

Рис. 2. Временная шкала выполнения основных мероприятий по предупреждению и ликвидации последствий наводнений

Рассмотрим постановку задачи оптимизации ресурсов при подготовке к наводнению и ликвидации его последствий, решение которой позволит сократить общее время выполнения проводимых мероприятий, материальные и человеческие ресурсы.

Обозначим, план мероприятий  $p=\{M_1, \dots, M_k\}$  – множество мероприятий, по предупреждение и ликвидацию последствий наводнений. Пусть время выполнения для  $M_i$  мероприятия составляет  $\Delta t_i$ , а  $Q_i$  и  $R_i$  – человеческие и материальные ресурсы для выполнения  $M_i$  соответственно. Время на выполнение мероприятия зависит от количества ресурсов, выделяемых на его реализацию  $\Delta t_i(Q_i, R_i)$  [10]. Таким образом, для оптимизации ресурсов при подготовке к наводнению и ликвидации его последствий необходимо решить следующую задачу

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^k \Delta t_i(Q_i, R_i) \rightarrow \min \\ \sum_{i=1}^k Q_i \rightarrow \min \\ \sum_{i=1}^k R_i \rightarrow \min. \end{cases} \quad (7)$$

Решение задачи может быть получено комплексным путем с использованием линейного программирования для оптимального распределение ресурсов при организации аварийно-спасательных и других неотложных работ в зоне затопления, а также превентивных мероприятий. Решение задачи линейного программирование позволит, к примеру, спасательным бригадам быстрее и с минимальными затратами эвакуировать пострадавшее населения в специальные пункты эвакуации или медицинские пункты.

Объем данных, включающий данные мониторинга и данные, полученные из представленных моделей и методов, позволит разработать и скорректировать эффективный план действий, направленный на повышения качества управления процессами подготовки к наводнению и ликвидации его последствий на подверженных наводнением объектах или территориях (рис. 3).

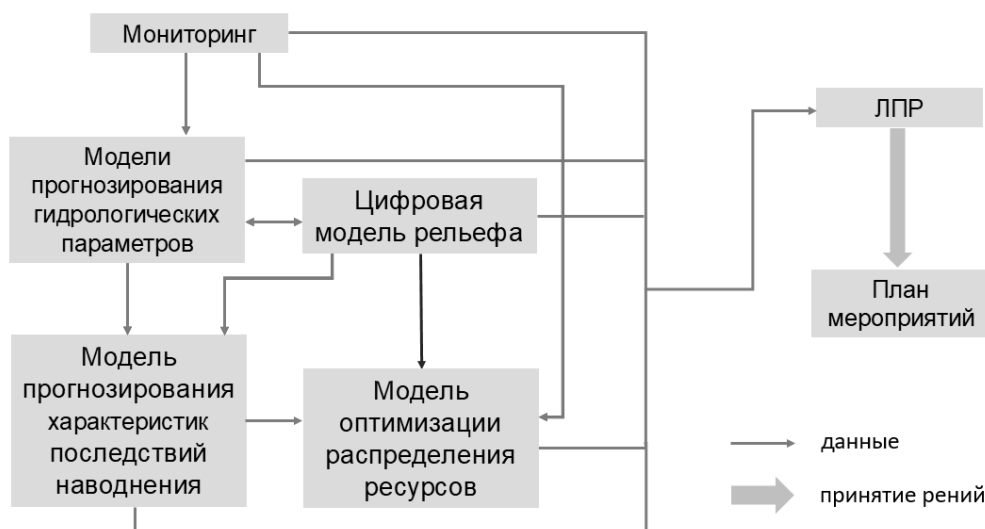


Рис. 3. Комплекс моделей и методов, позволяющие формировать данные для принятия решений

На основе комплекса представленных моделей и методов может быть разработана автоматизированная информационная система управления, позволяющая визуализировать расчетные данные и формировать комплекс мероприятий, направленных на предотвращение и ликвидацию наводнения. Автоматизация системы управления позволит сделать процесс управления менее зависимым от компетентности лиц, принимающих решение.

#### 4. Заключение

Для повышения качества и эффективности систем управления ЧС, связанных с наводнением, учитывая различные режимы функционирования необходимо создать комплекс моделей и методов, который позволит прогнозировать гидрологические параметры, площадь и контуры затопления, характеристики последствий наводнения и сроки затопления, а также оптимизировать ресурсы. На основании анализа данных, полученного из комплекса моделей и методов прогнозирования формируются план мероприятий, реализация которого позволит минимизировать последствия наводнения для объекта или территории, подверженного наводнением.

## Литература

1. *Khamutova, M., Rezchikov, A., Kushnikov, V. et al.*: Algorithms for the Management of Liquidation Process of Floods Consequences. Recent Research in Control Engineering and Decision Making, Vol.199, p. 540–551 (2019).
2. *Khamutova, M., Kushnikov, V.*: Models and Algorithms for Managing the Process of Eliminating the Flood Effects at Flood-Prone Objects and Areas. Proceedings of 2021 14th International Conference Management of Large-Scale System Development, MLSD 2021. 14. С. 9600228 (2021).
3. *Khamutova, M.V., Kushnikov, V.A., Dranko, O.I.*: A mathematical model for choosing an action plan for the prevention and elimination of flood effects. IFAC-PapersOnLine, 55(3), pp. 113–118 (2022).
4. Попов Е.Г. Гидрологические прогнозы. Гидрометеиздат 1979. 256 с.
5. *Садовничий В. А., Акаев А. А., Коротаев А. В., Малков С. Ю.* Моделирование и прогнозирование мировой динамики. М.: ИСПИ РАН, 2012. 360 с.
6. *Бродский, Ю. И.* Лекции по математическому и имитационному моделированию. М. -Берлин: Директ-Медиа, 2015. - 240 с.
7. *С. А. Косяченко, Н. А. Кузнецов, В. В. Кульба, А. Б. Шелков.* Модели, методы и автоматизация управления в условиях чрезвычайных ситуаций, Автомат. и телемех., 1998, выпуск 6, 3–66.
8. Методические рекомендации по организации подготовки и сопровождения паводкоопасного периода на территории субъекта Российской Федерации (Утв. МЧС России 11.10.2021)
9. Методические рекомендации органам исполнительной власти субъектов Российской Федерации по применению технических решений для защиты от паводков и наводнений/МЧС России. М: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2019 г. 92 с.
10. *Самороковский А. Ф.* Модель оптимального распределения ресурса оперативным штабом при проведении эвакуации в условиях возникновения чрезвычайной ситуации Вестник Воронежского института МВД России. 2021. №. 1. 122-130.