



# УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ ПОЙМЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ ЗАРЕГУЛИРОВАННЫХ РЕК.

## Ч. 2. Проектирование эффективной системы управления структурой пойменных территорий<sup>#</sup>

И. И. Исаева\*, М. А. Харитонов\*\*, А. А. Васильченко\*\*\*, А. А. Воронин\*\*\*\*,  
А. В. Хоперсков\*\*\*\*\*, А. Ю. Кликунова\*\*\*\*\*,

Волгоградский государственный университет

\*✉ [isaeva-inessa@mail.ru](mailto:isaeva-inessa@mail.ru), \*\*✉ [kharitonov@volsu.ru](mailto:kharitonov@volsu.ru), \*\*\*✉ [aa-vasilchenko@mail.ru](mailto:aa-vasilchenko@mail.ru), \*\*\*\*✉ [voronin.prof@gmail.com](mailto:voronin.prof@gmail.com),  
\*\*\*\*\*✉ [khoperskov@volsu.ru](mailto:khoperskov@volsu.ru), \*\*\*\*\*✉ [klikunova@volsu.ru](mailto:klikunova@volsu.ru)

**Аннотация.** Рассматривается задача проектирования системы управления устойчивым развитием пойменных социоприродохозяйственных систем (СПХС) на основе гидротехнических проектов стабилизации их гидрологического режима. Общая задача стратегического развития пойменной СПХС сформулирована как задача долгосрочной условной оптимизации ее социоприродохозяйственных потенциалов. С целью снижения неопределенности параметров эта задача трансформирована в задачу поиска оптимальных мест установки паводковых плотин в руслах поймы и адаптивных режимов их функционирования в период весенних попусков ГЭС для реализации целевой стабильной проектной комплексной структуры пойменной территории, удовлетворяющей условиям социохозяйственной безопасности и устойчивого затопления биотопа пойменной экосистемы. Для решения поставленной задачи разработан эмпирический метод оптимизации «доноры – акцепторы», применены точные методы оптимизации, экспертного оценивания, геоинформационного, численного гидродинамического моделирования, высокопроизводительные вычисления, методы статистического анализа данных природных наблюдений и результатов вычислительных экспериментов. Представлены результаты реализации развитого подхода для поиска оптимальных мест расположения и режимов функционирования паводковых плотин, обеспечивающих устойчивое безопасное весеннее затопление территории Волго-Ахтубинской поймы с учетом пространственной неоднородности эффекта депрессии русла р. Волги. При этом не учитывались условия судоходства на р. Волге в период весеннего попуска Волжской ГЭС, а также иные технические аспекты гидротехнического проектирования.

**Ключевые слова:** устойчивое развитие, оптимизация гидротехнических проектов, высокопроизводительные вычисления, Волго-Ахтубинская пойма.

### ВВЕДЕНИЕ

Процесс социохозяйственного освоения пойм крупных зарегулированных рек вблизи ГЭС можно разделить на три периода. Первый – период созда-

<sup>#</sup> Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-00176, <https://rscf.ru/project/23-21-00176/>.

ния пойменных социоприродохозяйственных систем (СПХС) в условиях плановых весенних попусков ГЭС – характеризуется высокой эффективностью сельского хозяйства на плодородных землях с низкими затратами на их орошение, активной урбанизацией и развитием социально-экономической инфраструктуры. В этот период создается функциональная структура пойменной террито-

рии, наилучшим образом отвечающая ее гидрологической структуре, определяемой весенними затоплениями. Контролируемая деградация паводковых процессов и пойменных экосистем кажется приемлемой платой за производство электроэнергии и развитие пойменных СПХС.

В то же время резкое нарушение природного динамического равновесия между вымыванием и осадением донного грунта в главном речном русле запускает процесс медленного понижения (депрессии) речного дна на протяжении многих десятков километров ниже ГЭС [1–4]. Этот процесс служит главным фактором медленного уменьшения площади устойчиво затапливаемой территории и увеличения площади неустойчиво затапливаемой и незатапливаемой территорий пойм. Прогрессирующая комплексная деградация пойменных СПХС вследствие роста дисгармонии между функциональной и гидрологической структурами пойменной территории определяет существо второго периода их развития.

Третьим периодом развития пойменных СПХС является их стабилизация в новых условиях. Постепенное замедление русловой депрессии и установление новых природно-техногенных равновесных значений параметров речного русла и гидрологической структуры поймы служит основой ее новой функциональной структуры, продуктивность которой значительно снижена по сравнению с первоначальной в связи с преобладанием наименее продуктивной в социальном, природном и хозяйственном отношениях неустойчиво затапливаемой территории.

Это обстоятельство свидетельствует об актуальности исследуемой в настоящей работе задачи достижения и поддержания равновесной высокоэффективной комплексной территориальной структуры поймы как основы ее устойчивого развития. Такая структура должна включать в себя достаточно большую площадь устойчиво затапливаемой территории. Управление территориальной структурой реализуется комплексным гидротехническим проектом возведения системы плотин с адаптивно управляемым переменным сечением, функционирующей в период первой фазы весенних попусков ГЭС и обеспечивающей устойчивое затопление целевой территории в широком диапазоне значений их параметров.

В первой части статьи [5] представлен общий подход к проектированию системы управления развитием пойменных СПХС зарегулированных

рек на основе оптимизации гидротехнических и социохозяйственных проектов, направленных на достижение и поддержание оптимальной стационарной комплексной (К) структуры пойменной территории, характеризуемой наилучшим проектно достижимым соответствием функционального назначения ее фрагментов характеру их весеннего паводкового затопления. В настоящей работе представлена вторая часть развиваемого подхода: совокупность алгоритмов поиска оптимальных мест расположения и адаптивных режимов функционирования паводковых плотин в руслах поймы, а также результаты реализации этих алгоритмов для северной части Волго-Ахтубинской поймы. При решении задачи управления применяются методы геоинформационного и численного гидродинамического моделирования, динамического программирования, эвристические методы оптимизации и экспертного оценивания, высокопроизводительные вычисления.

Объект реализации предлагаемого подхода – расположенная в пределах Волгоградской области северная часть Волго-Ахтубинской поймы (далее – ВАП) – занимает территорию 867 км<sup>2</sup> с общей протяженностью больших и малых русел около 800 км. Во время весеннего половодья более 70 % территории ВАП затапливается из р. Ахтубы, являющейся рукавом р. Волги [6, 7]. Создание Волжского гидрокаскада и в особенности Волжской ГЭС (ВГЭС) в 1961 г. стало главным фактором формирования, функционирования и последующей деградации ВАП [8, 9]. За период функционирования ВГЭС средняя доля вод, поступающих в р. Ахтубу из р. Волги во время весеннего попуска ВГЭС, снизилась в три раза [8, 9].

Тема и методы, рассматриваемые в настоящей работе, лежат в русле современных исследований проблем деградации пойменных территорий (см. обзор [10]), а также проблем проектирования и функционирования комплексов речных плотин. Главными целями исследования функционирования и проектирования плотин в последние десятилетия в мире являются эколого-экономические (см. обзоры [11, 12]). Наибольшая часть работ посвящена проблеме удержания плотинами речных наносов (см. обзоры [11, 12], а также [13–20]). Следующими по популярности целями исследования являются восполнение запасов грунтовых вод [17, 22–27]), защита от природных и техногенных наводнений и минимизация их ущерба [18–20, 28–34]. Проблема воздействия плотин на речные рус-



ла и почву исследуется в работах [35, 36]. Темой обзора [37] является прогнозирование состояния водной системы р. Нил с каскадом плотин. В работе [10] проводится системный анализ целостности пойм США. В статье [38] представлен обзор основных гидрологических и водохозяйственных задач и проблем, возникших в последние десятилетия на Нижней Волге (в особенности в северной части ВАП) в результате строительства и эксплуатации Волжско-Камского каскада водохранилищ, климатических изменений, техногенной деформации русел (в особенности в нижнем бьефе ВГЭС).

Среди методов исследования этих проблем основную часть занимают полевые и гидрологические наблюдения в сочетании с моделями водного баланса, гидродинамики и динамики накопления осадков (см. обзоры [11, 12], а также [13–17, 28]). Сценарно-имитационное моделирование используется авторами работ [18, 22]. Проблема оптимальности мест установки плотин также находится в центре внимания многих авторов. Авторы обзора методов оптимизации задач управления водными ресурсами [23], отмечая многочисленность и противоречивость их целей, а также их NP-полноту, делают вывод о целесообразности использования недетерминированного метаэвристического подхода (генетические алгоритмы, метод поиска гармонии и др.), обеспечивающего эффективный поиск приемлемых решений. Авторами статьи [22] предложена экспертная социально-гидрологическая модель принятия решения с учетом предпочтений агентов в сложной социоприродохозяйственной водной системе для анализа целесообразности строительства крупной плотины в водосборном бассейне р. Сега в центральной Испании. В публикации [39] для создания карт восприимчивости к наводнениям фрагментов территории поймы р. Прахова в Румынии используются нечеткие и итеративные оптимизационные модели машинного обучения.

## 1. МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 1.1. Задача управления К-структурой

Общую задачу стратегического управления пойменной СПХС можно сформулировать как следующую задачу условной оптимизации ее социоприродохозяйственных (СПХ) потенциалов:

$$\begin{aligned} \Psi_m(\mathbf{u}, \mathbf{r}, T) &= \sum_{i,j,\tau=1}^{I_j, J_m, T} \lambda_{ijm} S_{ijm}(\tau) f_{ijm}(\tau) \rightarrow \\ &\rightarrow \max_{\mathbf{u}} R_m(\tau) \leq R_m^{\text{lim}}, (\delta, \mathbf{r}^{(1)}) \leq r^{\text{max}}; \\ &m = 1, \dots, M; \tau = 1, \dots, T; \\ \mathbf{r} &= \mathbf{r}^{(1)} + \mathbf{r}^{(2)}(\mathbf{u}), \mathbf{r}^{(p)} = (r_1^{(p)}, \dots, r_K^{(p)}), p = 1, 2; \\ \mathbf{u} &= (\mathbf{u}_\delta^{(1)}, \mathbf{u}^{(2)}); \delta = (\delta_1, \dots, \delta_K), \\ \mathbf{u}_\delta^{(1)} &= (\delta_1 u_1^{(1)}, \dots, \delta_K u_K^{(1)}), \delta_i \in \{0; 1\}, \\ u_k^{(1)} &= u_k^{(1)}(\tau) \in [0; 1], k = 1, \dots, K; u^{(2)} = \{M_{ij}^{\tilde{j}}\}, \\ M_{ij}^{\tilde{j}} &\in \Omega_M (i = 1, \dots, I; j = 1, \dots, J, \tilde{j}_j \in \{1, \dots, J\}), \\ J &= \sum_{m=1}^M J_m, I = \sum_{j=1}^J I_j. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $\Psi_m$  – прогнозная оценка  $m$ -го СПХ-потенциала территории (годы  $\tau = 1, \dots, T$  относятся к будущему);  $\lambda_{ijm}, S_{ijm}, f_{ijm}(\tau)$  – соответственно коэффициент ценности, площадь, характеристическая функция (ХФ)  $i$ -го фрагмента территории с закрепленным за ним  $j$ -м видом землепользования, отнесенным к  $m$ -му СПХ-потенциалу (ХФ характеризует эффективность землепользования данного фрагмента территории в год  $\tau$ , обусловленную фактом его затопления или незатопления в период весеннего попуска ГЭС);  $R_m, R_m^{\text{lim}}$  – СПХ-риски и их предельные величины;  $I_j$  – число компактных фрагментов территории, отнесенных к  $j$ -му виду землепользования;  $J_m$  – число видов землепользования, отнесенных к  $m$ -му СПХ-потенциалу;  $M$  – количество СПХ-потенциалов, определяемое моделью К-структуры пойменной территории, являющейся суперпозицией гидрологической ( $\Gamma_1$ ) и функциональной ( $\Phi$ ) структур (подробнее см. в первой части статьи [5]);  $T$  – горизонт планирования (число лет). Вектор управления  $\mathbf{u}$  характеризует совокупность социохозяйственных (СХ) проектов, изменяющих виды землепользования некоторых фрагментов территории, и гидротехнических (ГТ) проектов в руслах поймы (установка паводковых плотин с управляемым поперечным сечением), перераспределяющих паводковые воды для изменения режима затопления целевых фрагментов территории. Формально сово-

купность ГТ-проектов представляет вектор  $\mathbf{u}_8^{(1)}$ , координаты которого обозначают доли перекрытых частей пойменных русел в год  $\tau$  при известном значении гидрографа весеннего попуска ГЭС. Соответствующий вектору  $\delta$  упорядоченный набор координат ячеек  $(x_k, y_k)$ ,  $k=1, \dots, K$ , цифровой карты рельефа пойменной территории, являющихся местами возможной установки плотин, считается известным. Вектор  $\mathbf{r} = \mathbf{r}^{(1)} + \mathbf{r}^{(2)}$  описывает финансовые ресурсы, необходимые для установки плотин. Вектор  $\mathbf{r}^{(1)}$  представляет собой ограниченную величиной  $r^{\max} \leq r^{\lim}$  часть ресурса, выделяемого Центром (величина  $r^{\max}$  является параметром). При использовании механизмов софинансирования проекта со стороны экономических субъектов территории (агентов) установка плотин в малых руслах пойм является потенциальным источником дополнительного финансирования  $\mathbf{r}^{(2)}$ . (При введении постоянных коэффициентов, характеризующих отношение затрат на возведение плотин в руслах разных иерархических уровней, зависимость решения задачи (2) от вектора  $\mathbf{r}$  сильно упрощается). Механизм управления, обеспечивающий изменение  $j$ -го вида землепользования  $i$ -го фрагмента территории на вид землепользования  $\tilde{j}$ , обозначен как  $M_{ij}^{\tilde{j}}$ . Формальным описанием механизма можно считать математическую формулировку соответствующей иерархической игры;  $\Omega_M$  – множество допустимых механизмов управления. Содержанием рисков  $R_s$  являются ущербы от частичного затопления социально-экономических или незатопления соответствующих природных или природохозяйственных фрагментов территории. Предельные величины  $R_m^{\lim}$  характеризуют допустимую меру этого явления, косвенным образом сводя это условие с учетом вида землепользования фрагментов территории к разделению карт ее затопления на желательные, допустимые и недопустимые.

Зависимость целевых функций  $\Psi_m$  от управления описывается характеристическими функциями  $f_{ijm}(\tau) \in [0; 1]$ . Результатом оптимизации управления является их максимизация, достигаемая целевым изменением режима паводкового затопления пойм и/или вида природопользования ряда фрагментов территории. Решением задачи (1) служит вектор-функция  $\mathbf{u}^*(\tau, \mathbf{r}^{(1)})$ , зависимость которой от года  $\tau$  характеризует обусловленность площади сечения плотин ежегодным плановым гидрографом весеннего попуска ГЭС.

Задача (1) относится к области принятия решений вследствие векторного вида целевой функции и неопределенности функций  $f_{ijm}(\tau)$ . Высокая алгоритмическая сложность этой задачи обусловлена большой размерностью вектора  $\delta$ . Описанные выше модели и алгоритмы, снижающие сложность и задачи (1) и неопределенность ее параметров, в совокупности составляют авторский подход к проектированию системы управления территориальной структурой пойм зарегулированных рек, образующей основу устойчивого развития их СПХС.

Главным мотивом введения  $\Gamma_1$ -структуры является замена в характеристических функциях  $f_{ijm}(\tau)$  задачи (1) аргумента  $\tau$  на аргумент  $n$  (частоту паводковых затоплений). Помимо снижения неопределенности это дает возможность эффективного агрегирования  $\Gamma_1$ - и  $\Phi$ -структур. В целом, рост уровня агрегирования К-структуры снижает как сложность, так и точность решения задачи управления, поэтому при выборе оптимального способа агрегирования необходим сравнительный анализ полученных решений по критерию «сложность – точность».

Предполагается, что климатические условия в бассейне главного русла поймы, определяющие постоянство функции распределения объемов весенних попусков ГЭС и рельеф пойменной территории, не изменяются в течение горизонта планирования. Поэтому единственным фактором динамики  $\Gamma_1$ -структуры в исследуемый период времени является депрессия главного речного русла. Возможность прогнозирования эффекта этого явления создает основу для трансформирования задачи (1) в задачу управления К-структурой пойменной территории посредством координации ГТ- и СХ-проектов, изменяющих соответственно  $\Gamma_1$ - и  $\Phi$ -структуру. Недопустимость деградации ценных природных зон при изменении  $\Gamma_1$ -структуры, а также изменения функциональной принадлежности ряда социохозяйственных территорий при адаптивном изменении  $\Phi$ -структуры приводят к необходимости стабилизации  $\Gamma_1$ -структуры (и, соответственно, К-структуры) как необходимого условия существования решения задачи (1). Это условие согласуется с главным приоритетом концепции устойчивого развития – стабильностью экосистемы, необходимым условием которой является устойчивость паводкового затопления ее биотопа, требующая в сильной версии ежегодного превышения порогового значения площади затопляемой территории ( $S^{\text{stab}}(\tau) \geq S_{\min}^{\text{stab}}(\tau = \tau_0, \tau_0 + 1, \dots)$ ). Пороговое значение  $S_{\min}^{\text{stab}}$  определяется





для каждой территории в результате экспертного анализа. Природная неопределенность ослабляет это условие до требования устойчивого затопления биотопа пойменной экосистемы (с частотой, превышающей пороговое значение ( $n > n^{\text{lim}}$ )). В связи с отсутствием обоснованных оценок величин  $n^{\text{lim}}$  и  $S_{\text{min}}^{\text{stab}}$  в задаче управления величина  $n^{\text{lim}}$  является параметром, а целью управления является максимизация суммы СПХ-потенциалов, связанных с устойчиво затопляемой территорией поймы. При использовании в задаче (1) модели 8-элементной функциональной структуры  $\Phi_1$ , являющейся частью 24-элементной комплексной структуры  $K_{24}$ , максимизируется сумма природного, природохозяйственного, социоприродного и социоприродохозяйственного потенциалов при условии социохозяйственной безопасности. Величина проектного ресурса является параметром задачи управления, регулирующим максимальное проектно достижимое значение целевой функции и, следовательно, максимальное или почти максимальное значение  $S^{\text{stab}}$ .

Таким образом, задача (1) трансформируется в следующую задачу поиска целевой стабильной проектной структуры  $K_{24}^{pr}$ , удовлетворяющей условиям социохозяйственной безопасности и устойчивого затопления биотопа пойменной экосистемы:

$$\begin{aligned} \Psi(\mathbf{u}(\mathbf{r})) &\rightarrow \max_{\mathbf{u}(\mathbf{r})} (\delta, \mathbf{r}^{(1)}) \leq r^{\max}, \\ \Psi &= \Psi_2 + \Psi_4 + \Psi_5 + \Psi_7; \\ \Psi^p &= \Psi_2^p + \Psi_4^p + \Psi_5^p + \Psi_7^p, \quad p = 1, \dots, P; \\ \Psi_m &= \sum_{p=1}^P \Psi_m^p, \quad \Psi_m^p(\mathbf{u}(\mathbf{r})) = \\ &= \varphi_m(\mathbf{u}(\mathbf{r})) \sum_{i_{mp}=1}^{I_{mp}} \lambda_{i_{mp}} S_{i_{mp}} \quad (m = 1, \dots, 8); \\ \bigcup_{m=1}^8 K_{1m} &\supset K_{\text{min}}^{\text{stab}}, K_{3m} \subset K_m^{\text{lim}} \quad (m = 1, 3, 6); \\ \mathbf{u} &= (\mathbf{u}_8^{(1)}, \mathbf{u}^{(2)}); \quad \delta = (\delta_1, \dots, \delta_K), \\ \mathbf{u}_8^{(1)} &= (\delta_1 u_1^{(1)}, \dots, \delta_K u_K^{(1)}), \quad \delta_i = \{0; 1\}, \\ u_k^{(1)} &\in [0; 1], \quad k = 1, \dots, K; \quad u^{(2)} = \{M_{im}^{\tilde{m}}\}, \\ M_{ij}^{\tilde{m}} &\in \Omega_M \quad (i = 1, \dots, I; \quad m = 1, \dots, 8; \quad \tilde{m} = 1, \dots, 8), \\ I &= \sum_{m,p=1}^{8,P} I_{mp}; \\ \mathbf{r} &= \mathbf{r}^{(1)} + \mathbf{r}^{(2)}(\mathbf{u}), \quad \mathbf{r}^{(q)} = (r_1^{(q)}, \dots, r_K^{(q)}), \quad q = 1, 2. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $K_{im}$  – карта элемента  $(i, m)$  структуры  $K_{24}^{pr}$ ;  $K_{\text{min}}^{\text{stab}}$  – минимальная экологически безопасная карта устойчивого затопления;  $\lambda_{i_{mp}}, S_{i_{mp}}$  – соответственно коэффициент ценности и площадь компактно расположенного территориального фрагмента  $i_{mp}$ , входящего в элемент  $m$  агрегированной функциональной структуры  $\Phi_1$  в зоне  $p$  структуры  $\Gamma_2$  (см. первую часть статьи [5]);  $P$  – число элементов (зон) структуры  $\Gamma_2$ ;  $K_m^{\text{lim}}$  – пороговая карта безопасного затопления элемента  $m$  агрегированной функциональной структуры  $\Phi_1$ . Векторы  $\mathbf{u}, \delta, \mathbf{r}$  и числа  $r^{\max}, K$  описаны в задаче (1).

Условия социохозяйственной безопасности и устойчивости затопления пойменного биотопа, эквивалентные ограничениям на СПХ-риски в задаче (1), имеют вид

$$S_{3mp} \leq S_{ijp}^{\text{lim}} \quad (m = 1, 3, 6; \quad p = 1, \dots, P); \quad \sum_{m,p=1}^{8,P} S_{1mp} \geq S_{\text{min}}^{\text{stab}}. \quad (3)$$

Здесь  $S_{imp}$  – площадь элемента  $(i, m)$  структуры  $K_{24}^{pr}$  в зоне  $p$  структуры  $\Gamma_2$ . Далее приводится алгоритм решения частной задачи (2), (3) для  $\mathbf{u} = \mathbf{u}_8^{(1)}$ , т. е. для задачи поиска значений параметров ГТ-проекта, обеспечивающих устойчивое оптимальное безопасное затопление биотопа пойменной территории и ведение сельского хозяйства, основанного на ежегодном устойчивом затоплении целевой территории.

## 1.2. Алгоритм решения задачи обеспечения устойчивого оптимального безопасного затопления пойменной территории

Представим эвристический алгоритм приближенного (с погрешностью моделирования  $\varepsilon_m$  [5]) решения задачи (2), (3) в случае выполнения соотношений  $r_{\text{гл}} = k_1 r_{cp} = k_1 k_2 r_m = r^{\text{lim}}$ , где  $r_{\text{гл}}, r_{cp}, r_m$  – соответственно затраты на возведение одной плотины в главном магистральном, среднем магистральном и малом русле;  $k_1, k_2$  – целые числа. Поиск оптимальной целевой структуры  $K_{24}^{pr}$  проводится для  $G_{\tau}^{\text{yct}}$ , т. е. для гидрографа, карта затопления которого наиболее близка к карте устойчивого затопления периода  $\theta \in \left[ \tau - \frac{\Theta}{2}, \tau + \frac{\Theta}{2} - 1 \right]$ . Алгоритм и результаты поиска гидрографа  $G_{\tau}^{\text{yct}}$  с

погрешностью моделирования  $\varepsilon_m$  описан в первой части статьи [5].

### 1.2.1. ДА-алгоритм

Поиск оптимальных конфигураций плотин в малых руслах зон (или их объединениях) структуры  $\Gamma_2$  проводится эвристическим алгоритмом «доноры – акцепторы» (ДА-алгоритмом). Согласно этому алгоритму для заданного значения гидрографа  $G^c$  русловая система зоны  $p$ , насчитывающая  $M_p$  малых русел, разделяется на три группы русел: «доноров», «трансакцепторов» и «акцепторов». Акцепторы – это целевые русла, в микроразонах которых сконцентрировано большое количество целевых ячеек (т. е. ячеек, не затопленных на карте  $K^p = K^p(G^c)$ , но затопление которых увеличивает значение  $\Psi^p$ ) цифровой карты территории. Микроразоной каждого русла зоны  $p$  в данном алгоритме считается часть ее территории, каждая точка которой удалена от русла не более, чем на расстояние  $S_p(L_p)^{-1}$ , где  $S_p$  – площадь зоны,  $L_p$  – совокупная протяженность ее малых русел. В класс трансакцепторов входят русла, из которых вода может попадать в акцепторы согласно направлению течений. Доноры определяются исходя из заданной группы акцепторов и являются объектами для потенциальной установки дамб. В число доноров входят русла, не являющиеся ни акцепторами, ни трансакцепторами, и при этом являющиеся их ответвлениями согласно ориентированному графу русел. Таким образом, объем вод из доноров может быть передан по течению акцепторам путем установки в их основаниях переливных плотин, высота которых обеспечивает их полное заполнение без выхода вод на территорию.

Входными данными ДА-алгоритма для зоны  $p$  являются: максимальное число плотин в малых руслах зоны  $n_p = 1, \dots, M_p$ , карта  $K^p$  затопления зоны  $p$  из корпуса карт моделирования затоплений (ККМЗ), граф русел пойменной территории  $Gr(N, E)$  и соответствующий зоне  $p$  его подграф  $Gr_p(N_p, E_p)$ . Ранжирование акцепторов производится на основе оценки площади целевой территории в их микроразонах. Подбор множества акцепторов осуществляется взятием первых

$s$  ( $s = 1, \dots, M_p$ ) русел из списка всех русел зоны  $p$ , упорядоченного по числу целевых ячеек в их микроразонах.

На предварительном этапе для каждого русла  $c \in N_p$  при помощи ККМЗ вычисляются значение рейтинга русла  $R_c$  (количество целевых ячеек в его микроразоне) и оценка суммарного объема вод, который потенциально может быть предоставлен данным руслом при его перекрытии  $V_c$ , равного поступающему в него объему вод за вычетом объема, необходимого для его максимального заполнения. В результате составляется *Rating* – список русел, упорядоченных в порядке убывания значений  $R_c$ .

На основном этапе для каждого значения  $s$  строятся: множество акцепторов  $A_s$  как первые  $s$  русел из списка *Rating*; множества трансакцепторов  $TS_s$  и потенциальных доноров  $PD_s$  при помощи поиска в ширину по подграфу  $Gr_p(N_p, E_p)$  с инвертированными ребрами, начиная от каждой вершины из  $A_s$ ; множество актуальных доноров  $D_s$  и соответствующий ему вектор конфигурации  $\delta_s^p = (\delta_{1s}, \dots, \delta_{M_p s})$ ,  $\delta_{js} = \{0; 1\}$ ,  $j = 1, \dots, M_p$ , путем решения следующей задачи о булевом ранце  $\sum_{c \in PD_s} \delta_{cs} V_c \rightarrow \max$ ,  $\tilde{n}_{sp} = \sum_{c \in D_s} \delta_{cs} \leq n_p$ , а также рассчитываются верхние оценки количества дополнительно затопленных ячеек  $\Delta_s$  и приращения  $\Delta\Psi_s^p$  целевой функции для зоны  $p$  по формулам  $\Delta_s = \min(TT_s, TV_s (h^{\min})^{-1})$ ,  $\Delta\Psi_s^p = \Delta_s \lambda_p$ ,  $\lambda_p = \max_{i_{mp}} \lambda_{i_{mp}}$ ,  $TT_s = \sum_{s \in A_s} R_s$ ,  $TV_s = \sum_{c \in D_s} V_c$ .

После этого решается задача

$$\Delta\Psi_s^p(\delta_s^p(K^p, n_p)) \rightarrow \max_s. \quad (4)$$

Решение задачи (4) – оптимальное число акцепторов  $s^*(n_p)$ , вектор оптимальной конфигурации плотин  $\delta^{*p}(K^p, n_p) = \delta_{s^*}^p(K^p, n_p)$  с числом плотин  $\tilde{n}_{s^* p}^*(n_p)$  и величина  $\Delta\Psi^p(\delta^{*p}(K^p, n_p))$ , отвечающие исходной карте затопления  $K^p$  – считаются результатом работы ДА-алгоритма для зоны  $p$ . Максимальное оптимальное число плотин в зоне  $p$  равно  $\tilde{n}_p^{\max} = \max_{s^*(n_p)} \tilde{n}_{s^* p}^*, 1 \leq n_p \leq M_p$ .



### 1.2.2. Алгоритм поиска эффективных решений задачи (2), (3) в зонах структуры $\Gamma_2$ пойменной территории

Для каждой из зон структуры  $\Gamma_2$  с номерами  $p = 1, \dots, P_1$ , не содержащих средних магистральных русел (СМР), при помощи алгоритма, изложенного в п. 1.3 первой части статьи [5], для гидрографа  $G_{\tau}^{\text{уст}}(L) = (\varphi(Q^{\text{уст}}, 2022, \tau, L), t^{\text{уст}})$  из фрагментов карт ККМЗ с учетом конфигурации границы зоны формируется предварительная карта затоплений  $K^p = K^p(G_{\tau}^{\text{уст}})$ ,  $G_{\tau}^{\text{уст}} = G_{\tau}^{\text{уст}}(L^p)$ , где  $L^p$  – расстояние от нижнего бьефа плотины ГЭС до зоны  $p$  с числом малых русел  $M_p$ . (Эта карта может формироваться из одного или нескольких фрагментов карт ККМЗ.) Для каждой из этих зон ДА-алгоритмом рассчитываются оптимальные конфигурации  $\delta^{*p}(K^p, n_p)$ ,  $n_p = 1, \dots, \tilde{n}_p^{\max}$ , плотин в их малых руслах.

Конфигурация  $\delta^{*p}(K^p, n_p)$  считается значимой (и обозначается  $\delta^{*p3}(K^p, n_p)$ ), если  $\Delta_{\text{отн}}(\Psi^p(\delta^{*p}(K^p, n_p)), \Psi^p(K^p)) > \varepsilon_m$ ,  $\Delta_{\text{отн}}(\Psi^p(\delta^{*p}(K^p, n_p)), \Psi^p(K^p)) = \frac{\Delta\Psi^p(\delta^{*p}(K^p, n_p))}{\Psi^p(K^p)}$ .

Для незначимых конфигураций  $\delta^{*p}(K^p, n_p)$  принимается  $\hat{\Psi}^{**p}(K^p, n_p) = \hat{\Psi}^{*p}(K^p, \delta^{*p}(K^p, n_p)) = \Psi^p(K^p)$ ,  $\delta^{*p}(K^p, n_p) = \mathbf{0}$ . Расчет соответствующих значимым конфигурациям  $\delta^{*p3}(K^p, n_p)$  значений целевой функции  $\hat{\Psi}^{**p}(K^p, n_p) = \hat{\Psi}^{*p}(\tilde{K}^p(G_{\tau}^{\text{уст}}(\tau)), \delta^{*p3}(K^p, n_p))$  производится по карте затопления  $\tilde{K}^p(G^c, \delta^{*p3}(K^p, n_p))$ , полученной прямым численным моделированием для рельефа дна малых русел, включающего плотины в их основаниях в соответствии с этими векторами. В случае нарушения условий безопасного затопления для некоторого  $n_p = \hat{n}$  происходит переход к субоптимальному решению задачи (4)  $\delta_c^{*p}(K^p, \hat{n}) = \delta_{s-1}^{*p}(K^p, \hat{n})$ . После проводится проверка на значимость величин  $\hat{\Psi}^{*p}(K^p(G_{\tau}^{\text{уст}}(\tau)), \delta_c^{*p}(K^p, \hat{n}))$ . В случае их значимости рассчитываются величины  $\hat{\Psi}^{**p}(K^p, \hat{n}) =$

$= \hat{\Psi}^{*p}(\tilde{K}^p(G_{\tau}^{\text{уст}}(\tau)), \delta_c^{*p3}(K^p, \hat{n}))$  с повторной проверкой условий безопасного затопления и т. д.

Опишем алгоритм поиска оптимальных значимых конфигураций плотин в руслах зон с номерами  $p = P_1 + 1, \dots, P$ , образуемых СМР. Целью установки каждой переливной плотины в СМР является повышение уровня затопления части зоны, расположенной выше нее по течению, за счет снижения уровня затопления части зоны, расположенной ниже по течению. Обозначим  $i_d j_d = (i_d, j_d)$ ,  $i_d \in \{1, \dots, D_p\}$ ,  $j_d \in \{1, \dots, J_{i_d}\}$ , вариант размещения плотины с номером  $d = 1, \dots, D_p$ , удаленной от начала русла на расстояние  $l_{i_d} \in \{L_1, \dots, L_{D_p}\}$ , ( $L_1, \dots, L_{D_p}$  – расстояния от начала русла до мест расположения плотин) с абсолютной высотой  $h_{i_d}^{\min} \leq h_{j_d} \leq h_{i_d}^{\max}$  ( $h_{i_d}^{\min}, h_{i_d}^{\max}$  – соответственно уровень дна русла и максимальный уровень безопасного затопления в данной точке СМР). При помощи алгоритма, изложенного в п. 1.3 первой части статьи [5], рассчитываются величины  $\varphi_p^{\text{уст}}(\tau) = \varphi(Q^{\text{уст}}, 2022, \tau, L^p)$ ,  $p = P_1 + 1, \dots, P$ , где  $L^p$  – расстояние от нижнего бьефа плотины ГЭС до начала СМР, образующего зону  $p$  с числом малых русел  $M_p$ .

Эффективными решениями задачи (2), (3) в зоне  $p$  считаются такие конфигурации  $n_p$  плотин в СМР и малых руслах  $\sigma^p = (\sigma_1, \dots, \sigma_{D_p}, \dots, \sigma_{D_p+M_p})$ ,  $\sigma_i \in \{0; 1\}$ ,  $i = 1, \dots, D_p + M_p$  (первые  $D_p$  компонент отвечают плотинам в СМР, а остальные – плотинам в малых руслах), которым соответствуют значения целевой функции  $\Psi(K^p(G_{\tau}^{\text{уст}}, \sigma^p(n_p)))$ , удовлетворяющие неравенству  $\frac{\Psi^p(K^p(G_{\tau}^{\text{уст}}, \sigma^p(n_p))) - \Psi^p(K^p(G_{\tau}^{\text{уст}}, \mathbf{0}))}{\Psi^p(K^p(G_{\tau}^{\text{уст}}, \mathbf{0}))} > \varepsilon_m$ . Для

гидрографа  $G_{\tau}^{\text{уст}}$  в ККМЗ разыскивается фрагмент  $K^p$  карты  $K(G_{\tau}^{\text{уст}})$ , отвечающий зоне  $p$ , и рассчитывается значение  $\Psi^p(K^p)$ . Для каждого варианта  $i_1 j_1$  расположения первой плотины прямым численным моделированием рассчитываются предварительная карта затопления  $K_{i_1 j_1}^p = K_{i_1 j_1}^p(G_{\tau}^{\text{уст}})$  и значение  $\Psi^p(K_{i_1 j_1}^p)$ . Если

$\Delta_{\text{отн}}(\Psi^P(K_{i_1 j_1}^P, \Psi^P(K^P))) > \varepsilon_m$ , то вариант  $i_1 j_1$  считается значимым (обозначается  $i_1^3 j_1^3$ ) и ему ставится в соответствие значимая тривиальная конфигурация дамб в малых руслах  $\delta_{i_1^3 j_1^3}^{*p3}(K_{i_1^3 j_1^3}^P, 0) = \mathbf{0}$ . Далее по каждой из карт  $K_{i_1 j_1}^P$  ДА-алгоритмом рассчитываются оптимальные конфигурации  $\delta_{i_1 j_1}^{*p}(n_p), n_p = 1, \dots, \min(k_2(k_1 - 1), M_p)$  и оценки соответствующих им величин  $\hat{\Psi}^P(K_{i_1 j_1}^P, \delta_{i_1 j_1}^{*p}(n_p))$ , которые затем проверяются на значимость. Для незначимых конфигураций  $\delta_{i_1 j_1}^{*p}(n_p)$  принимается  $\hat{\Psi}^P(K_{i_1 j_1}^P, \delta_{i_1 j_1}^{*p}(n_p)) = \Psi^P(K_{i_1 j_1}^P)$ . Для значимых конфигураций  $\delta_{i_1 j_1}^{*p3}(n_p)$  расчет  $\Psi^P(\tilde{K}_{i_1 j_1}^P(G_{\text{тп}}^{\text{уст}}, \delta_{i_1 j_1}^{*p3}(n_p)))$  производится по результатам прямого численного моделирования карты затопления  $\tilde{K}_{i_1 j_1}^P(G_{\text{тп}}^{\text{уст}}, \delta_{i_1 j_1}^{*p3}(n_p))$  для рельефа дна с вариантом  $i_1 j_1$  плотины в СМР и рельефа дна малых русел, поднятого до высот плотин в их основаниях в соответствии с вектором конфигурации, обеспечивающих их наполнение без выхода вод на территорию (эти высоты определяются в ходе предварительных вычислительных экспериментов). В случае нарушения условий безопасного затопления для некоторого  $n_p = \hat{n}$  происходит переход к субоптимальному решению задачи (4)  $\delta_{c_i j_i}^{*p}(K_{i_1 j_1}^P, \hat{n}) = \delta_{s^* - 1}^{*p}(K_{i_1 j_1}^P, \hat{n})$ . После этого производится проверка на значимость величин  $\hat{\Psi}^{*p}(K_{i_1 j_1}^P, \hat{n}) = \hat{\Psi}^{*p}(K_{i_1 j_1}^P(G_{\text{тп}}^{\text{уст}}, \delta_{c_i j_i}^{*p}(K_{i_1 j_1}^P, \hat{n})))$ ; в случае их значимости рассчитываются значения  $\hat{\Psi}^{*p}(\tilde{K}_{i_1 j_1}^P(G_{\text{тп}}^{\text{уст}}, \delta_{c_i j_i}^{*p}(K_{i_1 j_1}^P, \hat{n})))$  с повторной проверкой условий безопасного затопления и т. д.

Вариант  $i_1 j_1$ , для которого существуют нетривиальные значимые конфигурации, также считается значимым (и обозначается  $i_1^3 j_1^3$ ). Если значимые конфигурации отсутствуют, то вариант  $i_1 j_1$  считается незначимым и исключается из дальнейшего анализа. Если все варианты установки первой плотины незначимы, то эффективные решения задачи (2), (3) в зоне  $p$  отсутствуют. Обозначим  $i_1^{*3} j_1^{*3}(n_p) = \arg \max_{i_1^3 j_1^3} \Psi^P(\tilde{K}_{i_1^3 j_1^3}^P(G_{\text{тп}}^{\text{уст}}, \delta_{i_1^3 j_1^3}^{*p3}(n_p - k_2)))$ ,  $k_2 \leq n_p \leq k_1 k_2$ ,  $\delta_{i_1^{*3} j_1^{*3}}^{*p3}(n_p - k_2) = \delta_{i_1^{*3} j_1^{*3}}^{*p3}(K_{i_1^{*3} j_1^{*3}}^P, n_p - k_2)$ ,  $\Psi_1^{*p}(n_p - k_2) = \Psi_{i_1^{*3} j_1^{*3}}^P(\tilde{K}_{i_1^{*3} j_1^{*3}}^P(G_{\text{тп}}^{\text{уст}}, \delta_{i_1^{*3} j_1^{*3}}^{*p3}(n_p - k_2)))$ .

Варианты установки второй плотины в СМР рассматриваются для значимых вариантов размещения первой плотины ниже нее по течению. Обозначим  $i_1^3 j_1^3 i_2 j_2$  вариант установки второй плотины  $i_2 \in \{i_1^3 + 1, \dots, D_p\}, j_2 \in \{1, \dots, J_{i_2}\}$ . Для каждого из вариантов прямым численным моделированием рассчитывается предварительная карта затопления  $K_{i_1^3 j_1^3 i_2 j_2}^P = K_{i_1^3 j_1^3 i_2 j_2}^P(G_{\text{тп}}^{\text{уст}})$  и значение  $\Psi^P(K_{i_1^3 j_1^3 i_2 j_2}^P)$ . Если неравенства  $\Delta_{\text{отн}}(\Psi^P(K_{i_1^3 j_1^3 i_2 j_2}^P), \Psi^P(K^P)) > \varepsilon_m$ ,  $\Delta_{\text{отн}}(\Psi^P(K_{i_1^3 j_1^3 i_2 j_2}^P), \Psi^P(K_{i_1^3 j_1^3}^P)) > \varepsilon_m$  выполнены, то вариант  $i_1^3 j_1^3 i_2 j_2$  считается значимым (и обозначается  $i_1^3 j_1^3 i_2^3 j_2^3$ ), и ему ставится в соответствие значимая тривиальная конфигурация дамб в малых руслах  $\delta_{i_1^3 j_1^3 i_2^3 j_2^3}^{*p3}(0) = \mathbf{0}$ . Предварительное исключение незначимых вариантов ( $i_1^3 j_1^3 i_2 j_2$ ) происходит в случае выполнения неравенств  $\tilde{H}_{i_1^3 j_1^3}^P(K_{i_1^3 j_1^3}^P) < H_{i_1^3}^{0p}$ ,  $H_{i_1^3 j_1^3 i_2 j_2}^P(K_{i_1^3 j_1^3 i_2 j_2}^P) < H_{i_2}^{0p}$ , где  $\tilde{H}_{i_1^3 j_1^3}^P(K_{i_1^3 j_1^3}^P)$  – высота воды в нижнем бьефе плотины;  $H_{i_1^3}^{0p}, H_{i_2}^{0p}$  – высоты уровней, с которых начинается затопление зоны;  $H_{i_1^3 j_1^3 i_2 j_2}^P$  – высота воды над второй плотиной. Для оставшихся вариантов по каждой из карт  $K_{i_1^3 j_1^3 i_2 j_2}^P$  ДА-алгоритмом рассчитываются оптимальные конфигурации  $\delta_{i_1^3 j_1^3 i_2 j_2}^{*p}(n_p), n_p = 1, \dots, \min(k_2(k_1 - 2), M_p)$ , и соответствующие им оценки  $\hat{\Psi}^P(K_{i_1^3 j_1^3 i_2 j_2}^P, \delta_{i_1^3 j_1^3 i_2 j_2}^{*p}(n_p))$ , которые затем проверяются на значимость. Для незначимых конфигураций  $\delta_{i_1^3 j_1^3 i_2 j_2}^{*p}(n_p)$  принимается  $\hat{\Psi}^P(K_{i_1^3 j_1^3 i_2 j_2}^P, \delta_{i_1^3 j_1^3 i_2 j_2}^{*p}(n_p)) = \Psi^P(K_{i_1^3 j_1^3 i_2 j_2}^P)$ . Для значимых конфигураций  $\delta_{i_1^3 j_1^3 i_2 j_2}^{*p3}(n_p)$  расчет  $\Psi^P(\tilde{K}_{i_1^3 j_1^3 i_2 j_2}^P(\delta_{i_1^3 j_1^3 i_2 j_2}^{*p3}(K_{i_1^3 j_1^3 i_2 j_2}^P, n_p)))$  производится по результатам прямого численного моделирования карты  $\tilde{K}_{i_1^3 j_1^3 i_2 j_2}^P(\delta_{i_1^3 j_1^3 i_2 j_2}^{*p3}(K_{i_1^3 j_1^3 i_2 j_2}^P, n_p))$ . В случае нарушения условий безопасного затопления в ДА-алгоритме происходит возврат к решению задачи (4) с уменьшением  $n_p$  на единицу. Если все варианты установки второй плотины незначимы, то эффективные решения задачи (2), (3) в зоне  $p$  для





двух и более плотин отсутствуют. Обозначим  $i_1^{*3} j_1^{*3} i_2^{*3} j_2^{*3} (n_p) = \arg \max_{i_1^{*3} j_1^{*3} i_2^{*3} j_2^{*3}} \Psi^P(\tilde{K}_{i_1^{*3} j_1^{*3} i_2^{*3} j_2^{*3}}^P (G_{\text{тп}}^{\text{уст}}, \delta_{i_1^{*3} j_1^{*3} i_2^{*3} j_2^{*3}}^{*p3} (n_p - 2k_2))), \delta_2^{*p} (n_p - 2k_2) = \delta_{i_1^{*3} j_1^{*3} i_2^{*3} j_2^{*3}}^{*p3} (n_p - 2k_2), \Psi_2^{*p} (n_p - 2k_2) = \Psi^P(\tilde{K}_{i_1^{*3} j_1^{*3} i_2^{*3} j_2^{*3}}^P (G_{\text{тп}}^{\text{уст}}, \delta_2^{*p} (n_p - 2k_2))), 2k_2 \leq n_p \leq k_1 k_2, 2k_2 \leq n_p \leq k_1 k_2$ . Если неравенство  $\frac{\Psi_2^{*p} (n_p - 2k_2) - \Psi_1^{*p} (n_p - k_2)}{\Psi_2^{*p} (n_p - 2k_2)} \leq \varepsilon_m, n_p \in [2k_2, k_1 k_2]$ ,

верно, то варианты установки двух плотин в СМР считаются неэффективными. Если для некоторого  $\tilde{n}_p \in [2k_2, k_1 k_2]$  это неравенство неверно, то вариант  $i_1^{*3} j_1^{*3} i_2^{*3} j_2^{*3} (\tilde{n}_p)$  считается эффективным.

Варианты установки третьей плотины в СМР рассматриваются для эффективных вариантов размещения двух плотин ниже их по течению. Для вариантов установки трех и более плотин в СМР алгоритм в целом повторяется. Однако ввиду высокой вычислительной сложности прямого расчета большого числа вариантов эти карты конструируются из фрагментов ККМЗ с погрешностью моделирования  $\varepsilon_m$ . Для этого по значениям высот воды в СМР над плотинами  $H_{i_1^{*3} j_1^{*3} i_2^{*3} j_2^{*3}}^P (K_{i_1^{*3} j_1^{*3} i_2^{*3} j_2^{*3}}^P)$  и в их нижних бьефах  $\tilde{H}_{i_1^{*3} j_1^{*3} i_2^{*3} j_2^{*3}}^P (K_{i_1^{*3} j_1^{*3} i_2^{*3} j_2^{*3}}^P)$ , выбранным из построенного массива цифровых карт  $K_{i_1^{*3} j_1^{*3} i_2^{*3} j_2^{*3}}^P$ , строятся регрессии

$$\Delta H_2^p = b_1 \Delta \tilde{H}_1^p + b_2 (L_2 - L_1) + b_3 \Delta h_2, \quad (5)$$

$$\Delta \tilde{H}_2^p = c (\Delta H_2^p - \Delta h_2).$$

Здесь  $\Delta H_2^p$  – разность абсолютных высот уровня воды над второй плотинной и рельефа дна СМР у ее основания,  $\Delta \tilde{H}_q^p (q=1,2)$  – разность абсолютных высот уровня воды в нижнем бьефе  $q$  первой плотины и рельефа дна СМР у ее основания,  $L_2 - L_1$  – расстояние между двумя плотинами,  $\Delta h_2$  – относительная высота второй плотины.

Для каждого варианта  $i_q^{*3} j_q^{*3} i_{q+1} j_{q+1} = i_1^{*3} j_1^{*3} \dots i_q^{*3} j_q^{*3} i_{q+1} j_{q+1}$  расположения  $q+1 (q=2, \dots, D-1)$  плотины по формуле (5) и данным абсолютных высот ячеек цифровой карты в местах расположения плотин рассчитываются значения  $H_{i_q^{*3} j_q^{*3} i_{q+1} j_{q+1}}^P, \tilde{H}_{i_q^{*3} j_q^{*3} i_{q+1} j_{q+1}}^P, \hat{H}_{i_q^{*3} j_q^{*3}}^P = \frac{1}{2} (\tilde{H}_{i_q^{*3} j_q^{*3}}^P + H_{i_q^{*3} j_q^{*3} i_{q+1} j_{q+1}}^P)$ , по

которым при помощи ККМЗ рассчитываются значения расходов  $\hat{Q}_{i_q^{*3} j_q^{*3}}^P (\hat{H}_{i_q^{*3} j_q^{*3}}^P)$  и разыскиваются соответствующие им фрагменты карт из ККМЗ. Из этих фрагментов алгоритмом, изложенным в п.1.3 первой части статьи [5], конструируются предварительные карты затоплений  $K_{i_q^{*3} j_q^{*3} i_{q+1} j_{q+1}}^P$  и рассчитываются значения  $\Psi^P (K_{i_q^{*3} j_q^{*3} i_{q+1} j_{q+1}}^P)$ . Если неравенства  $\Delta_{\text{отн}} (\Psi^P (K_{i_q^{*3} j_q^{*3} i_{q+1} j_{q+1}}^P), \Psi^P (K^P)) > \varepsilon_m, \Delta_{\text{отн}} (\Psi^P (K_{i_q^{*3} j_q^{*3} i_{q+1} j_{q+1}}^P), \Psi^P (K_{i_1^{*3} j_1^{*3}}^P)) > \varepsilon_m, \dots, \Delta_{\text{отн}} (\Psi^P (K_{i_q^{*3} j_q^{*3} i_{q+1} j_{q+1}}^P), \Psi^P (K_{i_q^{*3} j_q^{*3}}^P)) > \varepsilon_m$  выполнены, то вариант  $i_q^{*3} j_q^{*3} i_{q+1} j_{q+1}$  считается значимым (обозначается  $i_{q+1}^{*3} j_{q+1}^{*3}$ ), и ему ставится в соответствие значимая тривиальная конфигурация дамб в малых руслах  $\delta_{i_{q+1}^{*3} j_{q+1}^{*3}}^{*p3} (0) = 0$ .

После поиска ДА-алгоритмом оптимальных конфигураций  $\delta_{i_q^{*3} j_q^{*3} i_{q+1} j_{q+1}}^{*p} (n_p), n_p = 1, \dots, \min(k_2(k_1 - q - 1), M_p)$ , и их проверки на значимость для незначимых конфигураций принимается  $\hat{\Psi}^{*p} (K_{i_q^{*3} j_q^{*3} i_{q+1} j_{q+1}}^P, \delta_{i_q^{*3} j_q^{*3} i_{q+1} j_{q+1}}^{*p} (n_p)) = \Psi^P (K_{i_q^{*3} j_q^{*3} i_{q+1} j_{q+1}}^P)$ . Для значимых конфигураций  $\delta_{i_{q+1}^{*3} j_{q+1}^{*3}}^{*p3} (n_p)$  функции  $\Psi^{*p} (\tilde{K}_{i_{q+1}^{*3} j_{q+1}^{*3}}^P, \delta_{i_{q+1}^{*3} j_{q+1}^{*3}}^{*p3} (n_p))$  рассчитываются по карте  $\tilde{K}_{i_{q+1}^{*3} j_{q+1}^{*3}}^P (\delta_{i_{q+1}^{*3} j_{q+1}^{*3}}^{*p} (n_p))$ , построенной прямым вычислительным гидродинамическим моделированием. Проверка условий безопасного затопления осуществляется аналогично случаю установки двух плотин.

Обозначим  $r_p = n_p r_m (n_p = 1, \dots, n_p^{\max})$  ресурс, выделяемый зоне  $p$  для возведения плотин в ее руслах. Представим  $n_p$  в виде  $n_p = q_1 k_2 + q_2, 0 \leq q_1 \leq D, 0 \leq q_2 < k_2$ . Тогда при этом  $n_p$  возможен  $q_1 + 1$  вариант установки плотин:  $q_1 - s$  плотин в СМР и  $q_2 + k_2 s$  плотин в малых руслах ( $s = 0, \dots, q_1$ ). Обозначим  $q = q_1 - s, n_{sp} = q_2 + k_2 (q_1 - q), i_q^{*3} j_q^{*3} = \arg \max_{i_q^{*3} j_q^{*3}} \Psi^{*p} (\tilde{K}_{i_q^{*3} j_q^{*3}}^P (\delta_{i_q^{*3} j_q^{*3}}^{*p3} (n_{sp}))), \delta_s^{*p} (n_{sp}) = \delta_{i_q^{*3} j_q^{*3}}^{*p3} (n_{sp}), \Psi_s^{*p} (\tau, n_{sp}) = \Psi^{*p} (\tilde{K}_{i_q^{*3} j_q^{*3}}^P (\delta_s^{*p} (\tau, n_{sp}))), s^*(n_p) = \arg \max_s \hat{\Psi}_s^{*p} (\tau, n_{sp}), \delta^{*p} (\tau, n_p) =$

$$= \delta_s^{*P}(\tau, n_{s^*p}) = (\delta_1^{*P}, \dots, \delta_{M_p}^{*P}), \hat{\Psi}^{**P}(\tau, n_p) = \hat{\Psi}_{s^*p}^{*P}(\tau, n_{s^*p}).$$

Тогда  $\Psi^{*P}(\sigma^{*P}(K^P(G_{\tau}^{уст}, n_p)) = \hat{\Psi}^{**P}(\tau, n_p)$ , а компоненты векторов  $\sigma^{**P}(\tau, n_p)$  определяются равенствами  $\sigma_i^{**P} = 1, i = 1, \dots, q_1 - s^*(n_p); \sigma_i^{**P} = 0, i = q_1 - s^*(n_p) + 1, \dots, D_p; \sigma_i^{**P} = \delta_{i-D_p}^{**P}(\tau, n_p); i = D_p + 1, \dots, D_p + M_p$ .

### 1.2.3. Решение задачи (2), (3) на всей территории поймы

При помощи построенных функций  $\Psi^{**P}(\tau, n_p), p = 1, \dots, P$ , и соответствующих им конфигураций плотин  $\delta^{**P}(\tau, n_p)$  и  $\sigma^{**P}(\tau, n_p)$  задача (2), (3) приводится к следующей задаче распределения ресурса с параметром  $k$ :

$$\Psi(\tau, \mathbf{n}^{(k)}) = \sum_{p=1}^P \Psi^{**P}(\tau, n_p^{(k)}) \rightarrow \max, \\ 0 \leq n_p^{(k)} \leq \tilde{n}_p^{\max}, p = 1, \dots, P; \quad (6)$$

$$\sum_{p=1}^P n_p^{(k)} = k, k = 1, \dots, k_1 k_2; \mathbf{n}^{(k)} = (n_1^{(k)}, \dots, n_P^{(k)}).$$

Задача (6) при каждом значении  $k = 1, \dots, k_1 k_2$  ( $r^{\max} = k r_m$ ) решается методом динамического программирования. Ее решениям  $\mathbf{n}^{*(k)}, \Psi_k^*(\tau) = \Psi(\tau, \mathbf{n}^{*(k)})$  отвечают конфигурации плотин в СМР и малых руслах  $\mathfrak{w}_k^*(\tau) = \langle \delta^{**1}(\tau, n_1^{*(k)}), \dots, \delta^{**P_1}(\tau, n_{P_1}^{*(k)}), \sigma^{**P_1+1}(\tau, n_{P_1+1}^{*(k)}), \dots, \sigma^{**P}(\tau, n_p^{*(k)}) \rangle$ .

Целевая карта  $\tilde{K}(G^{уст}(\tau), \mathfrak{w}_k^*(\tau))$  является приближением карты устойчивого затопления проектной структуры  $K_{24}^{Pr}(\tau)$ . Однако возможность изменения высот переливных плотин в зонах с СМР позволяет получить закон управления ими, реализующий эту карту для  $Q^c \geq Q^{уст}(\tau)$  в год  $\theta > \tau_0$ . Для этого серией прямых гидродинамических расчетов с рельефом дна СМР в зонах с номерами  $p = P_1 + 1, \dots, P$ , имитирующих установку в них одной плотины переменной высоты  $h_1^p$ , для каждого значения расхода ГЭС  $Q^c$  подбираются решения

$\tilde{h}_1^p(Q_{2022}^c)$  уравнений  $H_1^P(h_1^p(Q_{2022}^c)) = H_1^{*P}, p = P_1 + 1, \dots, P$ , где  $H_1^{*P}$  – высота воды над плотинной зоной  $p$  в конфигурации  $\mathfrak{w}_k^*(\tau)$ . Искомый закон управления высотами единственных плотин в зонах СМР имеет вид  $h_1^p(Q_0^c) = \tilde{h}_1^p(\varphi^{-1}(Q_0^c, \tau, \theta, L^P))$ , где функция  $\varphi$  определена в п. 1.3 первой части статьи [5].

При  $r^{\max} = r_{\text{гл}} = r^{\text{lim}}$  также рассматриваются варианты установки одной паводковой плотины с пропускными воротами в главном русле поймы для повышения уровня затопления зон, расположенных выше по течению, за счет снижения уровня затопления зон, расположенных ниже по течению. Обозначим  $ij = (L_i, l_j), i \in \{1, \dots, I\}, j \in \{1, \dots, J\}$ , вариант размещения плотины, удаленной от ГЭС на расстояние  $L_i = i\Delta L$  с шириной ворот  $l_j \geq l^{\min}$  ( $l^{\min}$ , минимальная для безопасного затопления территории ширина ворот, рассчитываемая из условий задачи (2), (3), а также значение  $\Delta L$  определяются алгоритмом, изложенным в п. 1.3 первой части статьи [5]). Для каждого варианта алгоритмом, изложенным в п. 1.3 первой части статьи [5], рассчитывается значение  $G_{\tau}^{уст}(L_i) = (\varphi(Q^{уст}, 2022, \tau, L_i), t^{уст})$  гидрографа главного русла непосредственно перед моделируемой плотиной. Величина расхода в нижнем бьефе моделируемой плотины после установления его постоянного значения, равного  $Q_{ij}$ , определяется прямым численным гидродинамическим моделированием с рассчитанным при помощи алгоритма, изложенного в п. 1.3 первой части статьи [5], гидрографом ГЭС  $G_{\tau}^{уст}(\tau, L_i)$  и измененным в соответствии с конфигурацией  $ij$  рельефом дна главного русла. Далее алгоритмом, изложенным в п. 1.3 первой части статьи [5], рассчитываются переменные гидрографы главного русла  $G_{\tau}^{уст}(L) = (\varphi(Q_{2022}^{уст}, 2022, \tau, L), t^{уст}), 0 \leq L \leq L_i; G_{\tau}^{уст}(L) = (\varphi(Q_{ij}, 2022, \tau, L), t^{уст}), L_i < L$ , и строится карта затопления территории  $K_{ij}(\tau)$  как композиция соответствующих фрагментов ККМЗ.

Обозначим  $i^* j^* = \arg \max_{ij} \Psi(K_{ij}(\tau)), \Psi_{\text{гл}}^*(\tau) = \Psi(K_{i^* j^*}(\tau))$ . Решением задачи (2), (3) при

$r = r_{\text{гл}} = r^{\text{lim}}$  является конфигурация  $(i^* j^*$  или  $\omega_{k_1 k_2}^*(\tau)$ ), отвечающая значению  $\Psi^*(\tau) = \max(\Psi_{k_1 k_2}^*(\tau), \Psi_{\text{гл}}^*(\tau))$ .

Задача реализации карты весеннего затопления поймы  $K_{i^* j^*}(\tau)$  для  $Q^c \geq Q^{\text{уст}}(\tau)$  в год  $\theta > \tau_0$  решается с помощью адаптивного управления шириной пропускных ворот плотины в главном русле. Для этого серией прямых гидродинамических расчетов с рельефом дна главного русла, имитирующим установку в нем паводковой плотины, для

каждого значения расхода ГЭС  $Q^c$  подбираются решения  $\tilde{l}(Q_{2022}^c)$  уравнений  $H(l(Q_{2022}^c)) = H^*$ , где  $H^*$  – высота воды в нижнем бьефе плотины в варианте  $i^* j^*$ . Искомая формула управления имеет вид  $l(Q_0^c) = \tilde{l}(\varphi^{-1}(Q_0^c, \tau, \theta, L_i))$ , где функция  $\varphi$  определена в п. 1.3 первой части статьи [5].

Логическая связь между описанными здесь и в первой части статьи [5] алгоритмами построения и решения задачи управления представлена на рис. 1–3. Структурные связи между схемами обозначены соответствующими цветовыми фонами.

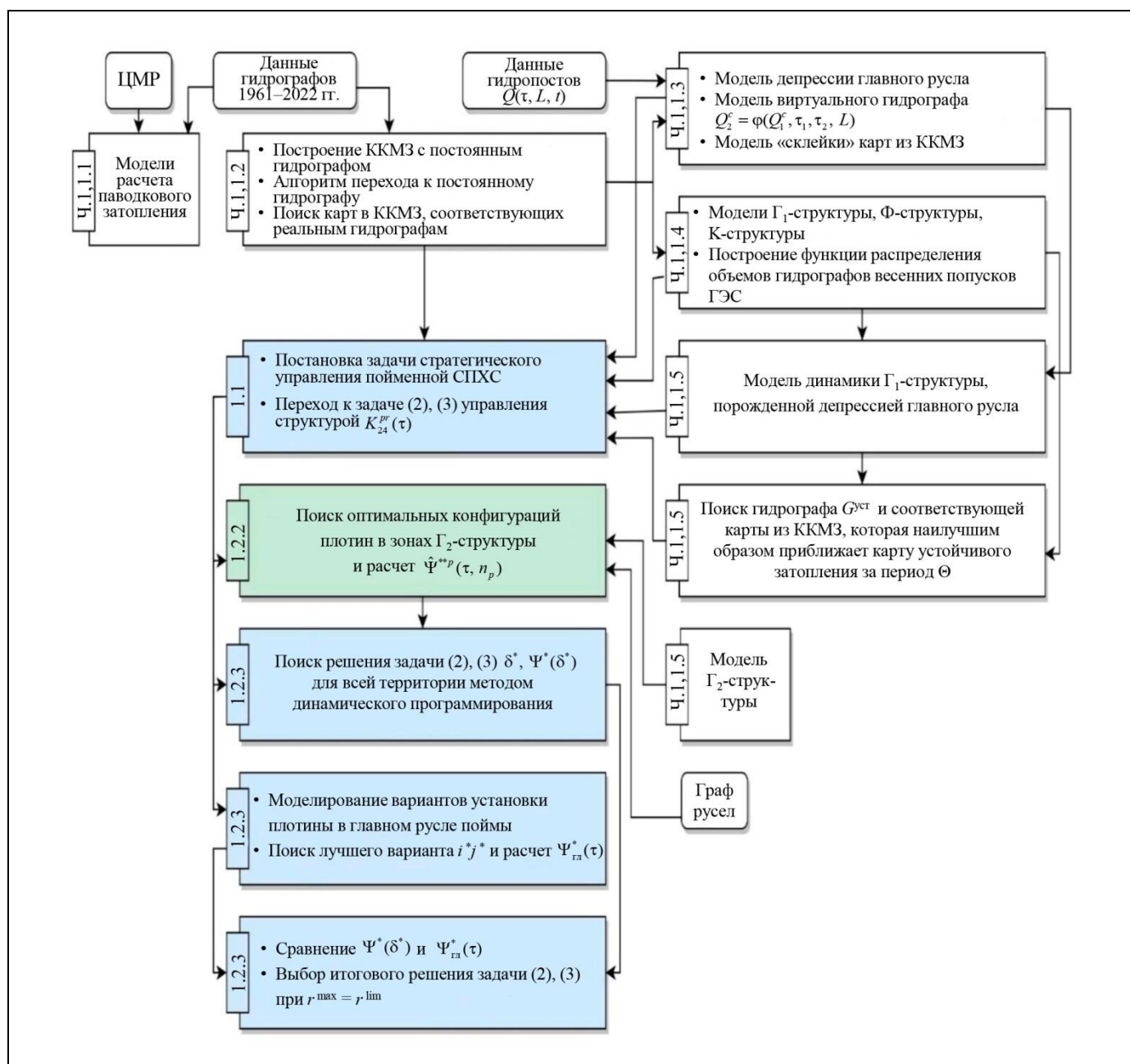
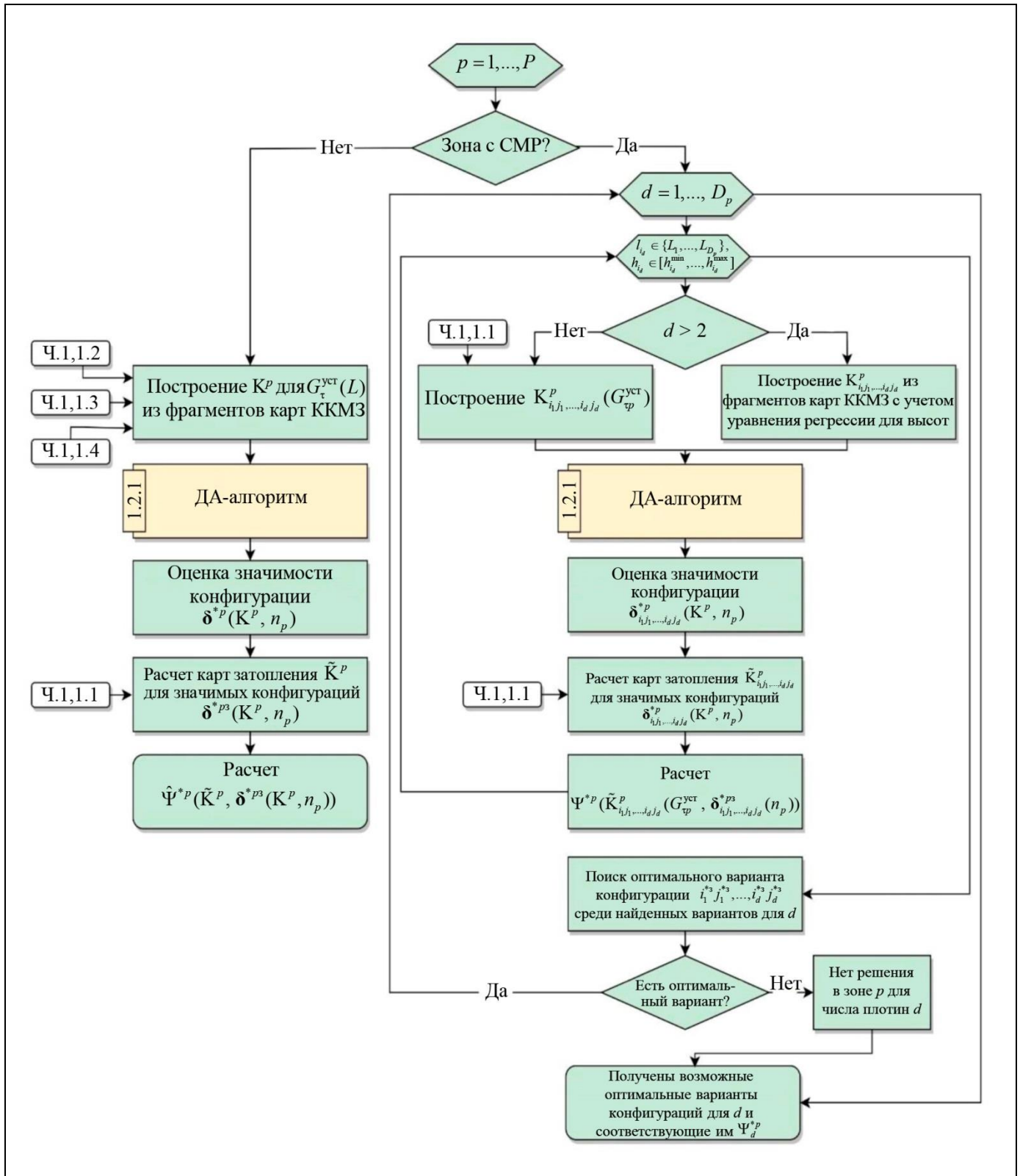


Рис. 1. Общая связь алгоритмов построения и решения задачи управления


 Рис. 2. Алгоритм поиска оптимальных конфигураций плотин в зонах структуры  $\Gamma_2$



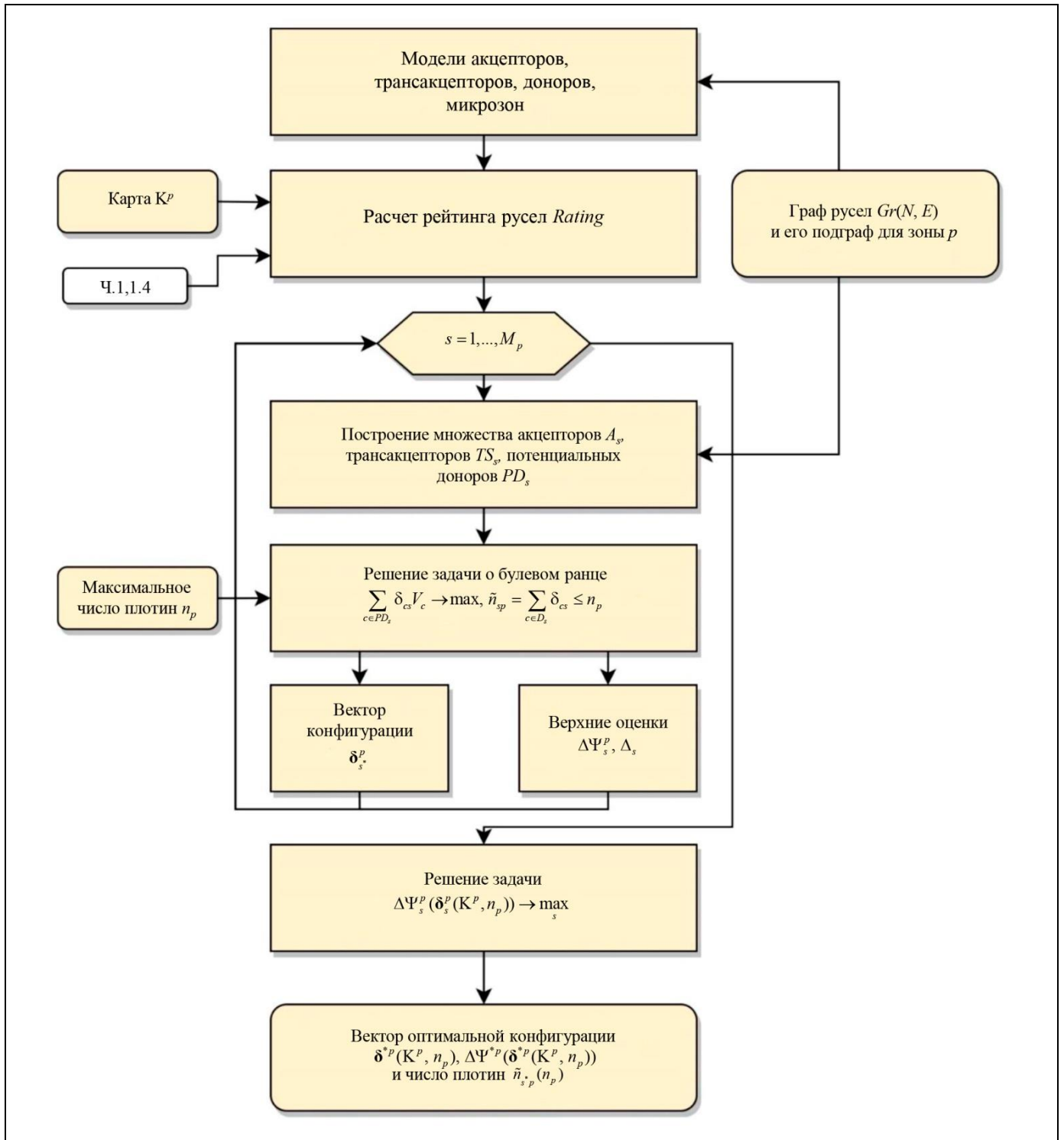


Рис. 3. Алгоритм «доноры – акцепторы»

## 2. ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЕКТА СТАБИЛИЗАЦИИ УСТОЙЧИВО ЗАТАПЛИВАЕМОЙ ТЕРРИТОРИИ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ВОЛГО-АХТУБИНСКОЙ ПОЙМЫ

На рис. 4 приведена карта территории и русловой структуры ВАП. Макрозоны В включает в себя

11 зон структуры  $\Gamma_2$  (границы этих зон указаны на рис. 7). Самую крупную, занимающую около 70 % территории ВАП, зону А (зона 12 структуры  $\Gamma_2$ ) образует магистральный рукав р. Волги – р. Ахтуба. Указаны места расположения виртуальных плотин на р. Волге (ПВ<sub>1</sub>, ПВ<sub>2</sub>, ПВ<sub>3</sub>) и на р. Ахтубе (ПА<sub>1</sub>, ПА<sub>2</sub>, ПА<sub>3</sub>)

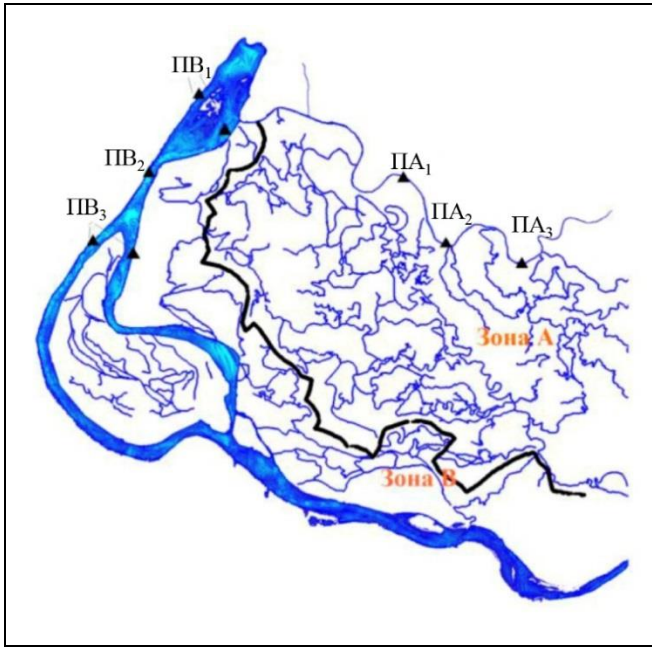


Рис. 4. Карта территории северной части Волго-Ахтубинской поймы.

При численном решении задачи (2), (3) для территории ВАП использовались значения  $k_1 = 10, k_2 = 50$ . (Итоги исследования показали, что варьирование этих коэффициентов в достаточно большом диапазоне не оказывает влияния на результат решения задачи.) В ВАП р. Ахтуба является СМР, т. е. в расчетах использовались значения  $P_1 = 11, P = 12$ .

Для исследования влияния погрешности геоинформационного моделирования (равной 0,5 м) на точность гидродинамического моделирования проведена серия вычислительных экспериментов, имитирующих затопление ВАП трапецевидным ступенчатым гидрографом устойчивого затопления  $Q_{пр}^{уст}(\theta) = \{16000 + 1650\theta, 0 \leq \theta \leq 5; 24250, 0 < \theta \leq 10; 24250 - 1650\theta, 10 < \theta \leq 15\}$  м<sup>3</sup>/с, наиболее приближенным к реальному гидрографу весеннего пуска ВГЭС, с псевдослучайным варьированием абсолютных высот ячеек цифровой модели рельефа с амплитудами  $\Delta b = \{0,5; 1,0; 1,5\}$  м. Результаты моделирования иллюстрирует рис. 5, на котором приведена динамика площади затопленной территории ВАП  $S_f$  и соответствующего ей объема паводковых вод  $V_f$  для актуального рельефа территории (базовая модель), а также динамика средних значений этих параметров для из-

мененных рельефов. Максимальные значения относительных погрешностей определения карт наибольшего затопления  $\varepsilon(\Delta b)$  (алгоритм расчета описан в первой части статьи [5]) составили:  $\varepsilon(0,5) = 0,05; \varepsilon(1,0) = 0,15; \varepsilon(1,5) = 0,40$ . Эти результаты подтверждают корректность использования значения 0,05 для характеристики агрегированной относительной погрешности гидродинамического моделирования. В работе [40] показано, что погрешность определения границ зон структуры  $\Gamma_2$  в ВАП при исследуемом диапазоне параметров гидрографа ВГЭС также не превышает 0,05.

Реализация ДА-алгоритма осуществлена на языке программирования C# с использованием средств стандартной библиотеки и библиотеки Ip\_solve версии 5.5. Для решения задачи о ранце библиотека Ip\_solve использует модифицированный метод ветвей и границ, адаптированный под решение задач целочисленного линейного программирования.

Анализ результатов применения ДА-алгоритма в 11-ти зонах малых тупиковых русел показал отсутствие значимых конфигураций малых плотин для относительной погрешности моделирования  $\varepsilon_m = 0,1$ . Эта величина равна наибольшей из погрешностей реализации всех алгоритмов представленного метода – погрешности прогнозирования русловой депрессии до 2052 г. (см. первую часть статьи [5]). Реализация описанного в п. 1.2.2 и п. 1.2.3 алгоритма поиска решения задачи (2), (3) в зоне р. Ахтубы при  $\varepsilon_m = 0,1$  и  $1 \leq n_{12} < 50$  показала отсутствие эффективных решений. При  $50 \leq n_{12} \leq 500$  установлено наличие большого числа значимых конфигураций плотин, отвечающих различным вариантам расположения одной переливной плотины в русле р. Ахтубы и большому числу комбинаций расположения переливных плотин в малых руслах зоны; наличие эффективных решений, отвечающих двум и более плотинам в р. Ахтубе, не установлено. На рис. 6 представлены линии уровней вод р. Ахтубы при  $G^{уст}(2052)$  и нескольких вариантах размещения одной и двух переливных плотин (в скобках указаны абсолютные высоты плотин). Значения абсолютных высот переливных плотин и соответствующие им линии отмечены одинаковыми цветами.

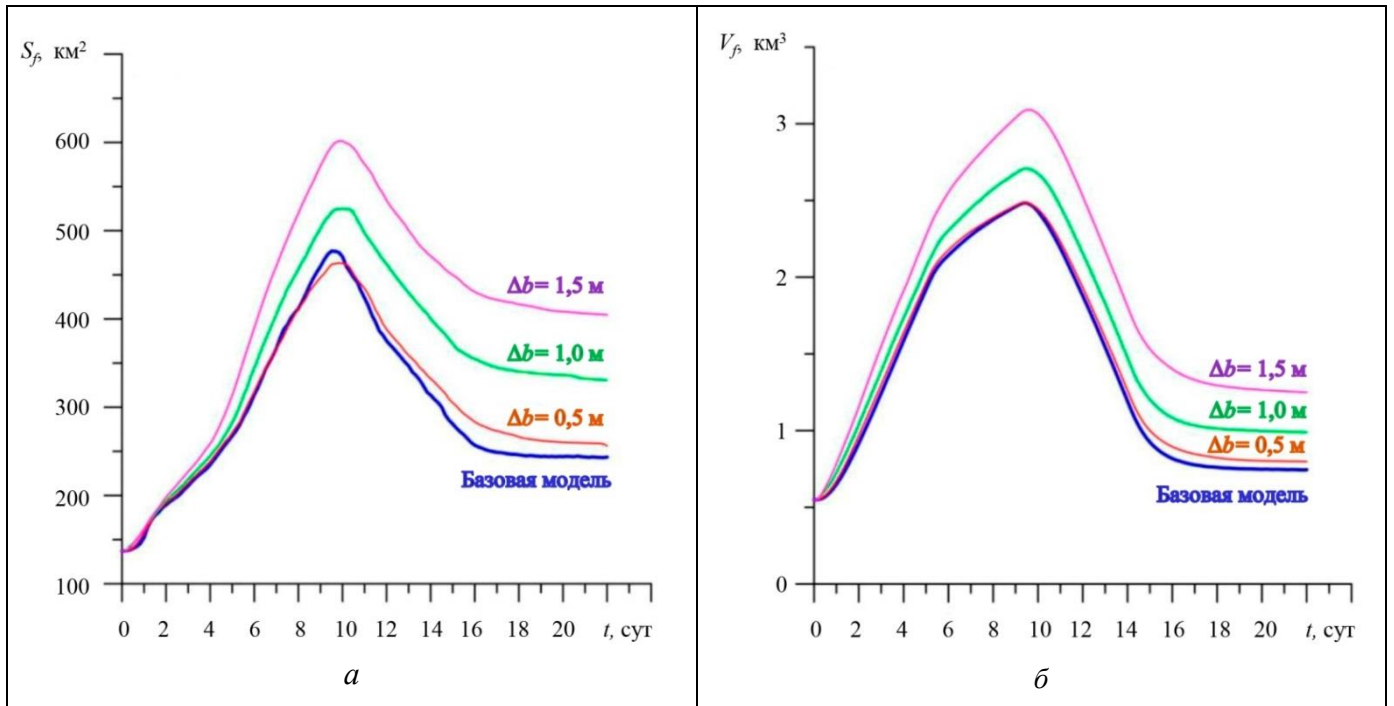


Рис. 5. Результаты моделирования: а – динамика площади затопленной территории ВАП при случайном возмущении ЦМР на 0,5 м, 1,0 м и 1,5 м для гидрографа  $Q_{mp}^{уст}(t)$ , б – соответствующая динамика объема воды

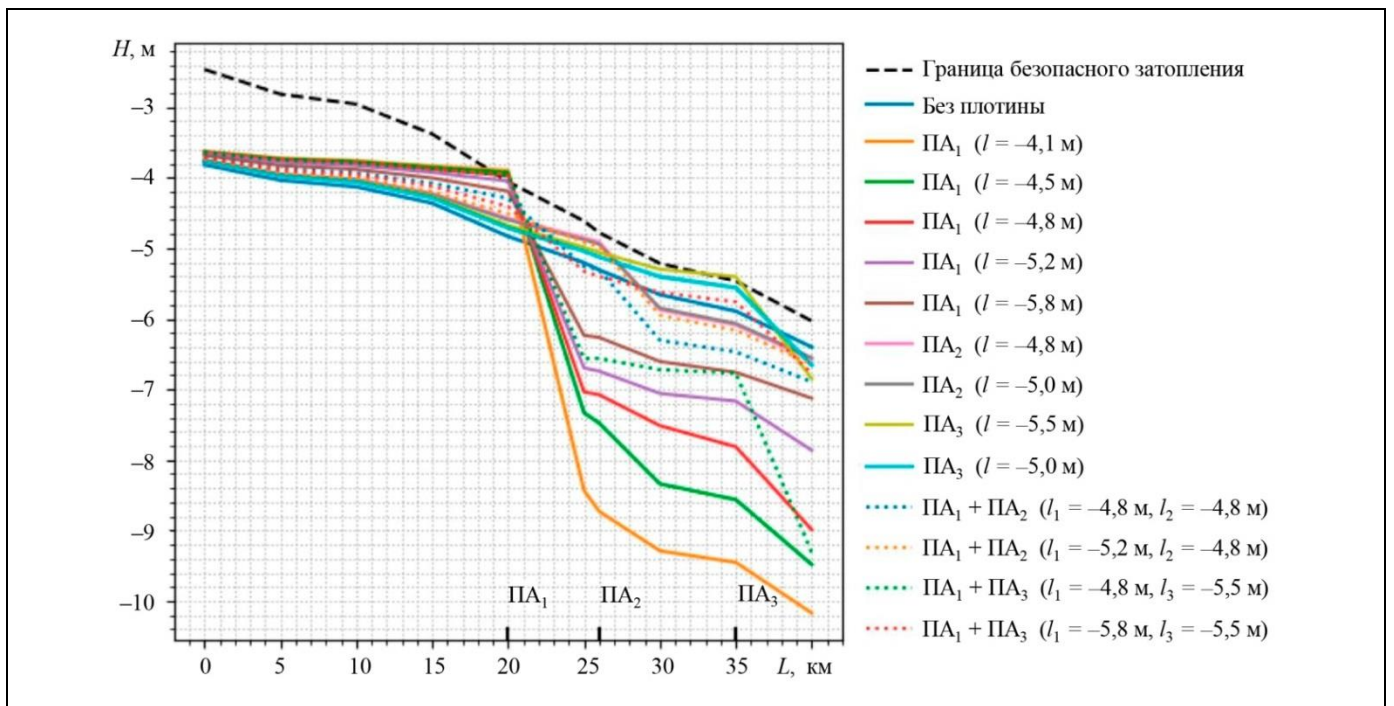


Рис. 6. Зависимость уровня воды в р. Ахтубе для различных вариантов расположения одной (ПА<sub>1</sub>, ПА<sub>2</sub>, ПА<sub>3</sub>) и двух (ПА<sub>1</sub> + ПА<sub>2</sub>, ПА<sub>1</sub> + ПА<sub>3</sub>) плотин для  $G^{уст}(2052)$

На рис. 7 приведена карта результата реализации проекта в 12-й зоне (А), соответствующая одному из значимых вариантов расположения одной плотины на р. Ахтубе (плотины ПА<sub>3</sub>;  $l_1 = 35000$  м;

$l_2 = 55$  и оптимальной конфигурации 45 плотин в малых руслах зоны. Синим цветом отмечены территории, устойчиво затопляемые в отсутствие плотин; розовым цветом – целе-



вые территории, оставшиеся незатопленными в результате установки плотин; бледно-зеленым цветом – целевые территории, затопленные в результате установки плотины ПА<sub>3</sub>; темно-зеленым цветом – целевые территории, дополнительно затопленные в результате оптимального размещения плотин в малых руслах. Проектное приращение площади устойчиво затапливаемой территории для этой конфигурации плотин составляет 16 %.

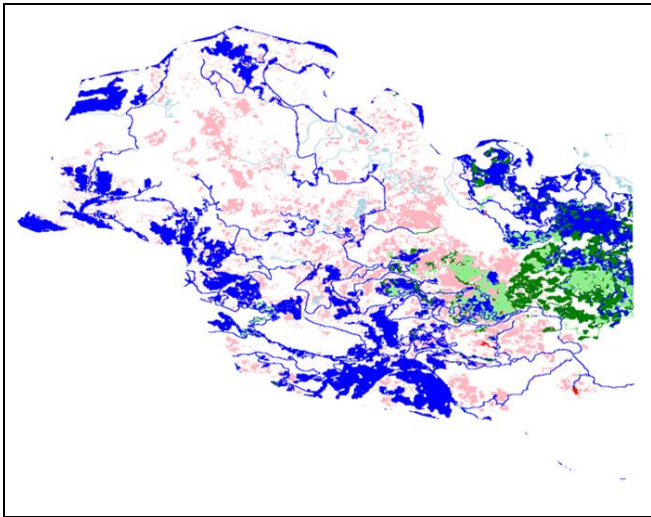


Рис. 7. Карта анализа результата реализации проекта в зоне А с плотиной ПА<sub>3</sub> на р. Ахтубе и оптимальной конфигурации 45 плотин в малых руслах

Как показали результаты исследования, задача (2), (3) при  $\varepsilon_m = 0,1$  и  $50r_m \leq r^{\max} < 500r_m$  имеет множество решений, соответствующих значениям целевой функции с относительными отличиями менее  $\varepsilon_m$ . Все решения с точностью  $\varepsilon_m$  эквивалентны варианту  $i_1 = 20000$  м;  $j_1 = -4,1$  м (плотина ПА<sub>1</sub>) в русле р. Ахтубы и различным конфигурациям плотин в малых руслах зоны А. Другими словами, решение задачи (2), (3) при  $\varepsilon_m = 0,05$  и  $50r_m \leq r^{\max} < 500r_m$  в пределах погрешности не зависит от значения  $r^{\max}$ . С учетом этого обстоятельства наилучшим решением задачи (2), (3), при  $50r_m \leq r^{\max} < 500r_m$  можно считать вариант  $i_1 = 20000$  м;  $j_1 = -4,1$  м (плотина ПА<sub>1</sub>) без плотин в малых руслах, отвечающий наименьшему значению проектного ресурса  $r^{\max} = 50r_m$ . В этом варианте площадь территории, введенной проектом в устойчивое затопление, составляет 81 км<sup>2</sup> (на рис. 8 эта территория окрашена зеленым цветом). При этом из устойчивого затопления выведена территория площадью 34 км<sup>2</sup> (на рис. 8 эта территория

окрашена красным цветом). Таким образом, прирост устойчиво затапливаемой территории составляет 25 %.

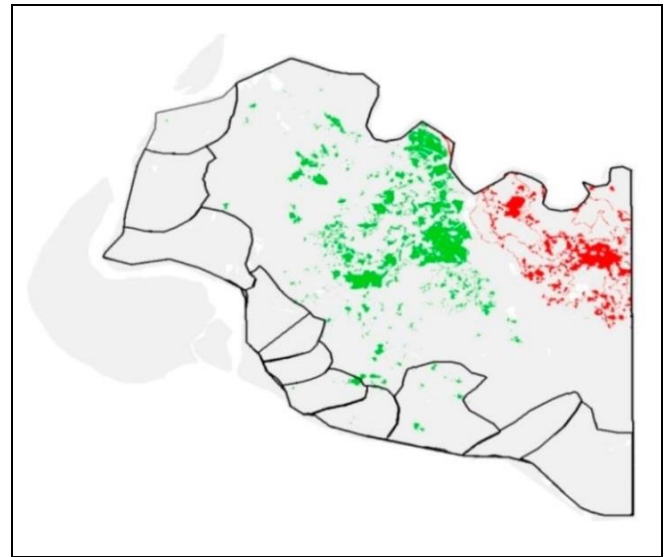


Рис. 8. Проектное изменение территории устойчивого затопления структуры  $K_{24}^{pr}$  (2052) для наилучшего решения задачи (2), (3), при  $50r_m \leq r^{\max} < 500r_m$

Этот эффект можно объяснить наличием в зоне А длинного сильно разветвленного малого русла (ерика Гнилой – Пахотный) с большой площадью территории его микрзоны. Установка плотины ПА<sub>1</sub> немного ниже этого русла приводит к значительному увеличению направляемого в него объема паводковых вод и, как следствие, к дополнительному затоплению значительной части зоны А при незначительном эффекте перераспределения вод в ее малых руслах путем установки в них малых плотин.

В то же время значительное понижение уровня р. Ахтубы ниже плотины ПА<sub>1</sub> является причиной отсутствия дополнительного эффекта от установки в этой части русла других плотин. Оптимальный режим управления высотой этой плотины для  $Q^c \geq Q^{уст}(\tau)$  при  $\theta > \tau_0$ , рассчитанный при помощи линейной регрессии  $h_1^{12}(Q_{2022}^c) = -0,00088Q_{2022}^c + 15,48$ , построенной по результатам вычислительных экспериментов, с учетом формулы (3) из первой части статьи [5] имеет вид

$$h_1^{12}(Q_0^c) = -0,00088Q_0^c - 0,0611\theta + 138,52. \quad (7)$$

Для поиска решения задачи (2), (3) при  $r^{\max} = r^{\lim}(k = 500)$  в ходе вычислительных экспериментов, имитирующих варианты размещения



одной плотины в русле р. Волги для  $L_i = 7500i$  м ( $i = 1, \dots, 3$ );  $l_j = 100 + 50j$  м ( $j = 1, \dots, 16$ ), с помощью алгоритмов, изложенных в п. 1.3 первой части статьи [5], и ККМЗ строились карты  $K_{ij}(2052)$  затопления территории ВАП и рассчитывались значения функций  $\Psi(K_{ij}(2052))$ .

На рис. 9 представлены рассчитанные линии уровней вод р. Волги при  $G^{ycr}(2052)$  для нескольких вариантов размещения одной плотины. Анализ результатов исследования показывает, что варианты  $(L_1, l_{14}) = (7500 \text{ м}, 800 \text{ м})$ ;  $(L_2, l_3) = (7500 \text{ м}, 250 \text{ м})$ ;  $(L_3, l_1) = (22500 \text{ м}, 150 \text{ м})$ , соответствующие границе безопасного затопления, обеспечивают максимальные (неразличимые в пределах  $\varepsilon_m = 0,1$ ) значения функции  $\Psi$  и постпроектные структуры  $K_{24}^{pr}(2052)$ . С учетом этого обстоятельства наилучшим выбором можно считать вариант  $(L_1, l_{14}) = (7500 \text{ м}, 800 \text{ м})$  плотины ПВ<sub>1</sub>, имеющий наибольшее значение ширины пропускных ворот. На рис. 10 приведены зависимости соответствующих этому решению значений СПХ-критериев  $\Psi_m$  ( $m = 1, \dots, 8$ ) от ширины пропускных ворот  $l$ .

На рис. 11 зеленым цветом отмечено проектное приращение территории устойчивого затопления

структуры  $K_{24}^{pr}(2052)$  по сравнению с прогнозной структурой  $K_{24}^{mod}(2052)$  для плотины ПВ<sub>1</sub> ( $L = 8500$  м,  $l = 800$  м). Красным цветом отмечены территории, выведенные из устойчивого затопления. Соответствующее этому решению приращение площади территории устойчивого затопления в зоне А составляет  $146 \text{ км}^2$  при выводе из устойчивого затопления территории площадью  $13 \text{ км}^2$  в макроzone В.

Увеличившаяся на 79 % постпроектная величина относительной площади устойчиво безопасно затопляемой территории равна 0,34.

Полученная целевая карта устойчиво затопляемой территории в зоне А может быть реализована в год  $\theta \geq 2022$ ,  $22250 \leq Q^c \leq 28000 \text{ м}^3/\text{с}$ , при режиме управления шириной пропускных ворот

$$l_{ПВ_1}^*(\tau, Q^c) = 0,12Q^c - 7,78\theta + 13860, \quad (8)$$

рассчитанном при помощи линейной регрессии, построенной по результатам вычислительных экспериментов (см. п. 1.2.3), с учетом формулы (3) из первой части статьи [5]. Таким образом, оптимальные параметры данного проекта обеспечивают в зоне А стабильность структуры  $K_{24}^{pr}(\tau)$  и при  $\tau > 2052$ .

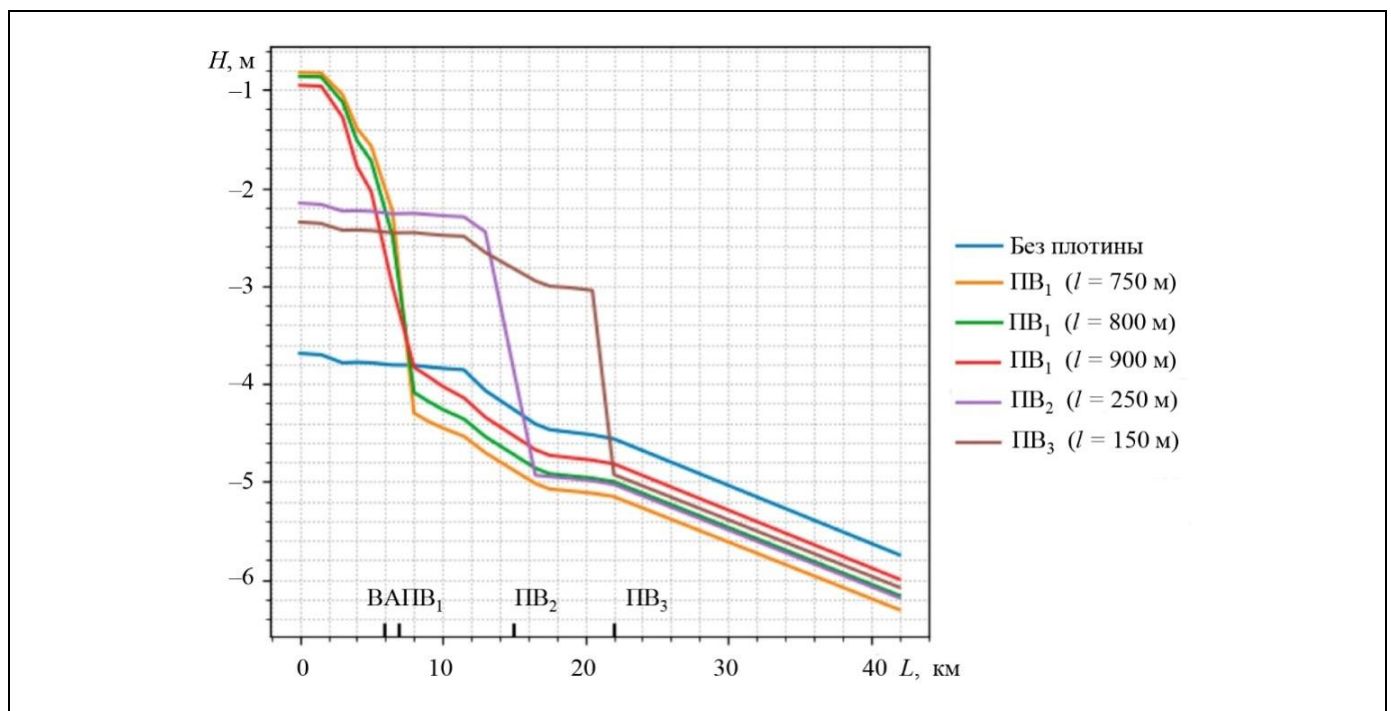


Рис. 9. Зависимость абсолютных значений уровня р. Волги от ширины пропускных ворот плотин ПВ<sub>1</sub>, ПВ<sub>2</sub>, ПВ<sub>3</sub> для  $G^{ycr}(2052)$

( $L$  – расстояние от ВГЭС, ВА – место входа в Волго-Ахтубинский канал)

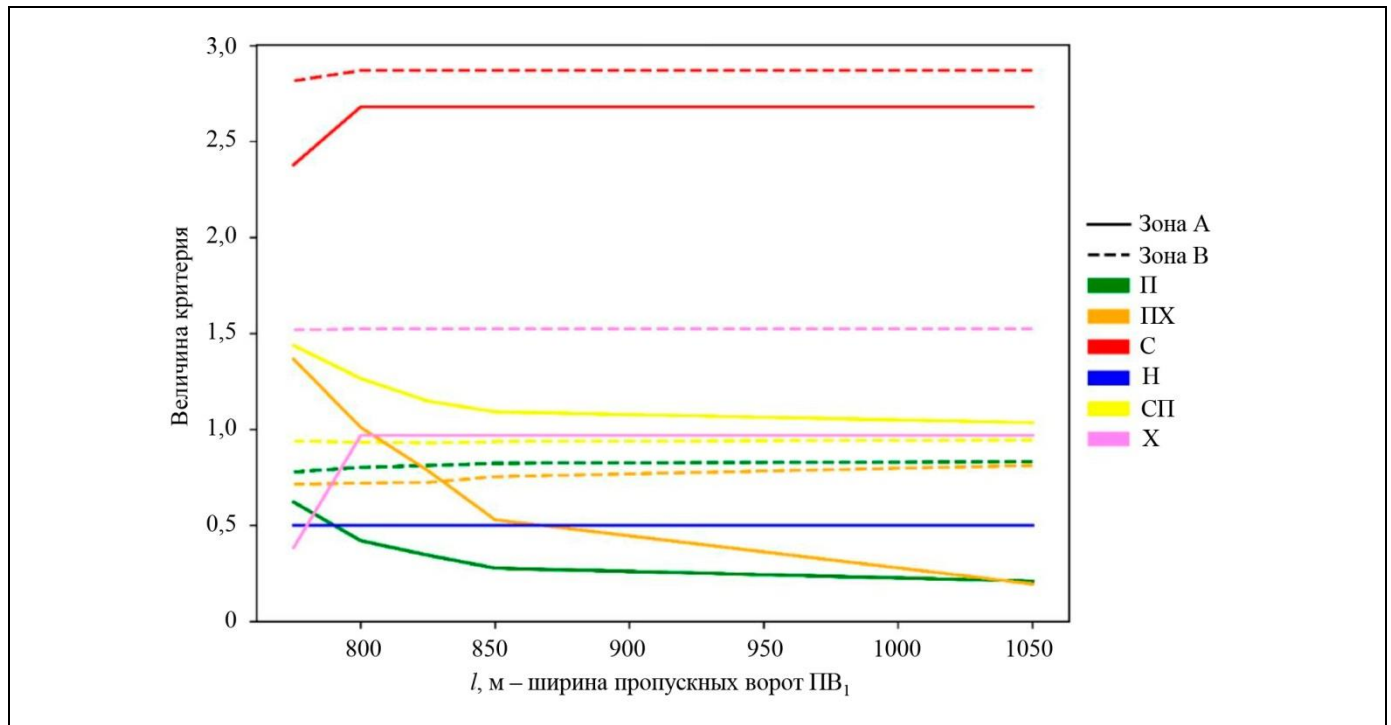


Рис. 10. Зависимости значений территориальных СПХ-потенциалов (П – природный, ПХ – природохозяйственный, С – социальный, Н – неопределенный, СП – социоприродный, Х – хозяйственный) зон А и В К-структуры  $K_{24}^{pr}$  (2052) от ширины пропускных ворот плотины ПВ<sub>1</sub>

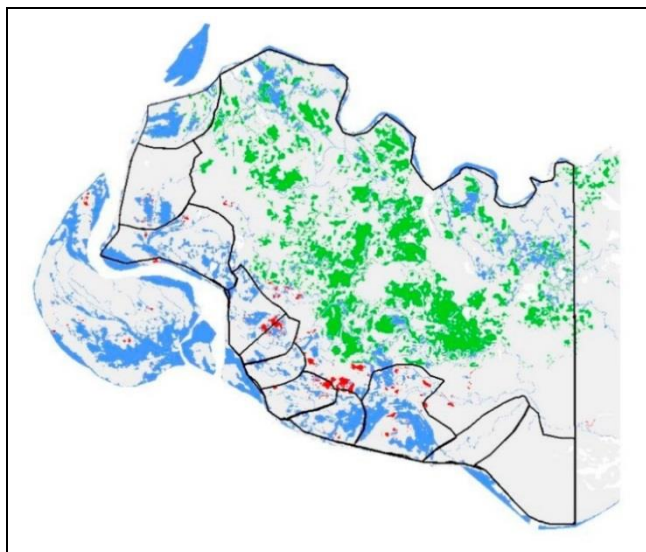


Рис. 11. Проектное изменение территории устойчивого затопления структуры  $K_{24}^{pr}$  (2052) для решения задачи (2), (3) при  $r^{\max} = r^{\lim}$ : плотины ПВ<sub>1</sub> ( $L=8\ 500\text{м}$ ,  $l=800\text{м}$ ).

Относительная погрешность режимов управления плотинами (7) и (8), определяемая погрешностями каждого этапа моделирования, превышает 0,1, что может поставить под сомнение их практическую пригодность. Действительно, эти выражения показывают лишь возможность использования плотин за пределами горизонта моделирования.

Фактический режим управления плотинами должен рассчитываться ежегодно на основе актуальных данных о рельефе и планируемых параметрах весенних паводковых затоплений ГЭС.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе представлена вторая часть методов и алгоритмов комплексной модели управления устойчивым развитием пойменных СПХС на основе гидротехнических проектов стабилизации их гидрологического режима и проектов социоэкономического развития. Целью управления является достижение и поддержание определяющей эффективности СПХС оптимальной квазистационарной комплексной структуры пойменной территории, характеризующейся наилучшим проектно достижимым соответствием функционального назначения фрагментов ее территории характеру их весеннего паводкового затопления. Реализация развитого подхода для конкретных пойменных СПХС опирается на созданный эвристический метод оптимизации, методы экспертного оценивания, геоинформационного, численного гидродинамического моделирования, высокопроизводительные вычисления, методы статистического анализа данных природных наблюдений и результатов вычислительных экспериментов.



Представлены результаты реализации развитого подхода для поиска оптимальных гидротехнических проектов обеспечения устойчивого оптимального безопасного весеннего затопления территории Волго-Ахтубинской поймы с учетом пространственной неоднородности эффекта русловой деградации р. Волги. Полученные результаты показывают, что оптимальное размещение на р. Ахтубе одной переливной плотины, функционирующей в период весеннего попуска ВГЭС, позволяет увеличить общую площадь устойчиво затопляемой территории ВАП в период 2038–2068 гг. на 25 %, а оптимальное размещение на р. Волге одной плотины, функционирующей в период весеннего попуска ВГЭС, вблизи начала Волго-Ахтубинского канала с оптимальной адаптивной шириной пропускных ворот – на 79 %. При этом доля дополнительного перебрасываемого объема вод из р. Волги в р. Ахтубу в период весеннего попуска составляет в среднем около 5 %. Следует отметить, что использование линейной по времени функции депрессии, завышающей оценку негативного эффекта, позволяет использовать найденные оптимальные режимы функционирования паводковых плотин в качестве их гарантированных верхних оценок. Уточнение модели русловой депрессии является предметом будущих исследований.

В настоящем исследовании при обсуждении вариантов расположения паводковой плотины на р. Волге не учитывались условия судоходства, а также специальные аспекты гидротехнического проектирования. Авторы полагают, что результаты настоящего исследования могут послужить поводом для детальной проработки данного и подобных ему гидропроектов как составной части стратегий устойчивого развития СПХС пойм зарегулированных рек.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Векслер А.Б., Доненберг В.М. Переформирование русла в нижних бьефах крупных электростанций. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 217 с. [Veksler, A.B., Donenberg, V.M. Reshaping the Channel in the Development of Large Power Plants. – М.: Energoatomizdat, 1983. – 217 s. (In Russian)]
2. Иванов В.В., Коротаев В.Н. Влияние гидроузлов на деформации пойменных берегов и русловых форм в низовьях реки Волги и Кубани // Эрозия почв и русловые процессы. – 2008. – Вып. 16. – С. 224–242. [Ivanov, V.V., Korotayev, V.N. Vliyaniye gidrouzlov na deformatsii poymennykh beregov i ruslovykh form v nizov'yakh reki Volgi i Kubani // Eroziya pochv i ruslovyye protsessy. – 2008. – Iss. 16. – P. 224–242. (In Russian)]
3. Александровский А.Ю., Силаев Б.И., Чуканов В.В. Влияние русловых деформаций в нижнем бьефе на условия работы энергетического оборудования ГЭС // Гидротехническое строительство. – 2002. – № 11. – С. 20–23. [Aleksandrovskiy, A.Yu., Silayev, B.I., Chukanov, V.V. Vliyaniye ruslovykh deformatsiy v nizhnem b'yefe na usloviya raboty energeticheskogo oborudovaniya GES // Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo. – 2002. – No. 11. – P. 20–23. (In Russian)]
4. Асарин А.Е., Ткачев К.В. Русловые деформации в нижнем бьефе волгоградского гидроузла и возможности их ограничения // Гидротехническое строительство. – 2014. – № 12. – С. 54–58. [Asarin, A.Ye., Tkachov, K.V. Ruslovyye deformatsii v nizhnem b'yefe volgogradskogo gidrouzla i vozmozhnosti ikh ogranicheniya // Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo. – 2014. – No. 12. – P. 54–58. (In Russian)]
5. Исаева И.И., Харитонов М.А., Васильченко А.А., и др. Устойчивое развитие пойменных территорий зарегулированных рек. Ч. 1. Моделирование динамики комплексной структуры пойменных территорий // Проблемы управления. – 2023. – № 6. – С. 42–55. – DOI: <http://doi.org/10.25728/pu.2023.6.4>. [Isaeva, I.I., Khari-tonov, M.A., Vasilchenko, A.A., et al. Sustainable Development of Floodplain Territories of Regulated Rivers. Part I: Modeling Complex Structure Dynamics // Control Sciences. – 2023. – No. 6. – P. 35–47. – DOI: <http://doi.org/10.25728/cs.2023.6.4>.]
6. Горелиц О.В., Землянов И.В. Современный механизм заливания территорий Волго-Ахтубинской поймы в период половодья (в пределах Волгоградской области) // Научный потенциал регионов на службу модернизации. – Астрахань. – 2013. – № 2 (5). – С. 9–18. [Gorelits, O.V., Zemlyanov, I.V. Sovremennyy mekhanizm zalivaniya territoriy Volgo-Akhtubinskoy poymy v period polovod'ya (v predelakh Volgogradskoy oblasti) // Nauchnyy potentsial regionov na sluzhbu modernizatsii. Astrakhan'. – 2013. – No. 2 (5). – P. 9–18. (In Russian)]
7. Преснякова А.Н., Писарев А.В., Храпов С.С. Исследование динамики затопления территории Волго-Ахтубинской поймы по данным космического мониторинга // Математическая физика и компьютерное моделирование. – 2017. – № 1 (38). – С. 66–74. [Presnyakova, A.N., Pisarev, A.V., Khrapov, S.S. Issledovaniye dinamiki zatopeniya territorii Volgo-Akhtubinskoy poymy po dannym kosmicheskogo monitoringa // Matematicheskaya fizika i komp'yuternoye modelirovaniye. – 2017. – No. 1 (38). – P. 66–74. (In Russian)]
8. Болгов М.В., Шаталова К.Ю., Горелиц О.В. и др. Водно-экологические проблемы Волго-Ахтубинской поймы // Экосистемы: экология и динамика. – 2017. – Т. 1, № 3. – С. 15–37. [Bolgov, M.V., Shatalova, K.Yu., Gorelits, O.V., et al. Vodno-ekologicheskiye problemy Volgo-Akhtubinskoy poymy // Ekosistemy: ekologiya i dinamika. – 2017. – Vol. 1, no. 3. – P. 15–37. (In Russian)].
9. Землянов И.В., Горелиц О.В., Павловский А.Е. и др. Анализ экологических последствий эксплуатации Волгоградского водохранилища для сохранения биоразнообразия основных водно-болотных территорий Нижней Волги. Отчет о НИР. – М.: ФГУ «ГОИН», 2010. – 675 с. [Zemlyanov, I.V., Gorelits, O.V., Pavlovskiy, A.Ye., et al. Analiz ekologicheskikh posledstviy ekspluatatsii Volgogradskogo vodokhranilishcha dlya sokhraneniya bioraz-noobraziya osnovnykh vodno-bolotnykh territoriy Nizhney Volgi. Otchet o NIR. – М.: FGU «GOIN», 2010. – 675 s. (In Russian)]
10. Ryan, R., Kira, S., Ryan, A., et al. Degradation of Floodplain Integrity within the Contiguous United States // Communications Earth and Environment. – 2023. – Vol. 4, no. 1. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00877-4>.



11. *Naseer, A., Xiangzhou, X., Manuel, E., et al.* The Use of Check Dams in Watershed Management Projects Examples from Around the World // *Science of the Total Environment*. – 2019. – Vol. 676. – P. 683–691. – DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.04.249
12. *Lucas-Borja, M.E., Piton, G., Nichols, M., Castillo, C., Yang, Y., Zema, D.A.* The Use of Check Dams for Soil Restoration at Watershed Level: A Century of History and Perspectives // *Science of the Total Environment*. – 2019. – Vol. 692. – P. 37–38. – DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.07.248.
13. *Yi, Z., Xiangdong, M., Bing, W., et al.* Effects of Soil and Water Conservation Measures on Sediment Delivery Processes in a Hilly and Gully Watershed // *Journal of Hydrology*. – 2023. – Vol. 616. – Art. no. 128804. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128804>
14. *Polyakov, V.O., Nichols, M.H., McClaran, M.P., et al.* Effect of Check Dams on Runoff, Sediment Yield, and Retention on Small Semiarid Watersheds // *Journal of Soil and Water Conservation*. – 2014 – Vol. 69, No. 5. – P. 414–421. – DOI: doi:10.2489/jswc.69.5.414.
15. *Norman, L. M., Brinkerhoff, F., Gwilliam, E., et al.* Hydrologic Response of Streams Restored with Check Dams in the Chiricahua Mountains // *River Research and Applications*. – 2015. – Vol. 32, no. 4. – P. 519–527. – DOI: 10.1002/tra.2895.
16. *Etefa, G., Amaury, F., Amanuel, Z., et al.* Effects of Check Dams on Runoff Characteristics Along Gully Reaches, the Case of Northern Ethiopia // *Journal of Hydrology*. – 2017. – Vol. 545. – P. 299–309. – DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.12.019.
17. *Djuma, H., Bruggeman A., Camera, C., Eliades, M., Kostarelos, K.* The Impact of a Check Dam on Groundwater Recharge and Sedimentation in an Ephemeral Stream // *Water*. – 2017. – Vol. 9, no. 11. – Art. no. 813. – DOI: 10.3390/w9100813.
18. *Yuan, S., Li, Z., Chen, L., Li, P., Zhang, Z.* Influence of Check Dams on Flood Hydrology Across Varying Stages of Their Lifespan in a Highly Erodible Catchment Loess Plateau of China. – *CATENA*. – 2022. – Vol. 210. – Art. no. 105864. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105864>.
19. *Ran, Q., Tang, H., Wang, F., Gao, J.* Numerical Modelling Shows an Old Check-Dam still Attenuates Flooding and Sediment Transport // *Earth Surface Processes and Landforms*. – 2021. – Vol. 46, no. 4. – P. 1–19. – DOI: 10.1002/esp.5123.
20. *Tang, H., Pan, H., Ran, Q.* Impacts of Filled Check Dams with Different Deployment Strategies on the Flood and Sediment Transport Processes in a Loess Plateau Catchment // *Water*. – 2020. – Vol. 12, no. 5. – Art. no. 1319. – DOI: 10.3390/w12051319.
21. *Наумова Т.В., Кушер А.М., Пикалова И.Ф.* Повышение эффективности эксплуатационных мероприятий по снижению захвата наносов в водозаборы оросительных систем // *Вестник МГСУ*. – 2019. – Т. 14. – № 9 (132). – С. 1167–1179. [*Naumova, T.V., Kusher, A.M., Pikalova, I.F.* Improving the Efficiency of Operational Measures to Reduce Sediment Uptake into Irrigation System Intakes // *Bulletin of the MGSU*. – 2019. – Vol. 14, no. 9 (132). – P. 1167–1179. (In Russian)]
22. *Gil-García, L., Gonz'alez-L'opez, H., Dionisio P'erez-Blanco, C.* To Dam or not to Dam? Actionable Socio-Hydrology Modeling to Inform Robust Adaptation to Water Scarcity and Water Extremes // *Environmental Science and Policy*. – 2023. – Vol. 144. – P. 74–87. – DOI: 10.1016/j.envsci.2023.03.012.
23. *Karakatsanis, D., Patsialis, T., Kalaitzidou, K., et al.* Optimization of Dam Operation and Interaction with Groundwater: An Overview Focusing on Greece Citation // *Water*. – 2023. – Vol. 15. – Art. no. 3852. – DOI: <https://doi.org/10.3390/w15213852>.
24. *Gao, Y., Yang, L., Song, Y., Tian, J., Yang, M.* Designing Water-Saving-Ecological Check Dam Sites by a System Optimization Model in a Region of the Loess Plateau, Northwest China // *Ecological Informatics*. – 2022. – Vol. 72. – Art. no. 101887. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101887>.
25. *Plateau, L., Huang, J., Hinokidani, O., Yasud, H., Chandra S., et al.* Effects of the Check Dam System on Water Redistribution in the Chinese // *Journal of Hydrologic Engineering ASCE*. – 2013. – Vol. 18, no. 18. – P. 929–940. – DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000689.
26. *Huang, J., Fu, Q., Osamu, H., Wang, B.* Numerical Analysis of Water Budget Process of Check Dam System in Small Basin on Loess Plateau // *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. – 2011. – Vol. 27, no. 7. P. 51–57. – DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2011.07.009.
27. *Любимова Т.В., Латыш А.А.* Динамика изменения уровня подземных вод в зоне грунтовых плотин // *Геология, география и глобальная энергия*. – 2020. – № 4 (79). – С. 84–88. [*Lyubimova, T., Latysh, A.* Dynamics of Changes in the Ground Water Level in the Area of Underground Dams // *Geology, Geography and Global Energy*. – 2020. – No. 4 (79). – P. 84–88. (In Russian)]
28. *Tang, R., Dai, Z., Mei, X., Lou, Y.* Joint Impacts of Dams and Floodplain on the Rainfall-Induced Extreme Flood in the Changjiang (Yangtze) River // *Journal of Hydrology*. – 2023. – Vol. 627. – Art. no. 130428. – DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.130428.
29. *Yazdi1, J., Sabbaghian Moghaddam, M., Saghafian, B.* Optimal Design of Check Dams in Mountainous Watersheds for Flood Mitigation // *Water Resources Management*. – 2018. – Vol. 32. – P. 4793–4811. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-018-2084-4>.
30. *Стефанишин Д.В.* Управление рисками от паводков на плотинах и затапливаемых территориях при стохастической неопределенности максимального речного стока // *Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева*. – 2007. – Т. 249. – С. 78–85. [*Stefanishin, D.* Flood Risk Management in Dams and Flooded Areas with Stochastic Uncertainty of Maximum River Flow // *Proceedings of the All-Russian Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering Named after B.E. Vedeneev*. – 2007. – Vol. 249 – P. 78–85. (In Russian)]
31. *Яценко Е.С., Анисимова Д.А.* Оценка последствий гидродинамической аварии на склюихинском водохранилище по имитационным параметрам волны прорыва плотины // *Известия Алтайского государственного университета*. – 2014. – № 3–2 (83). – С. 140–143. [*Yatsenko, E., Anisimova, D.* Assessment of the Consequences of the Hydrodynamic Accident at the Sklyukhinsky Reservoir by Simulation Parameters of the Dam Breakout Wave // *Proceedings of the Altai State University*. – 2014. – No. 3–2 (83). – P. 140–143. (In Russian)]
32. *Веремеюк В.В., Ивашечкин В.В., Немеровец О.В.* Моделирование процесса изменения уровней в каскаде из двух русловых водохранилищ при пропуске половодья // *Наука и техника*. – 2019. – Т. 18. – № 2. – С. 146–154. [*Veremenyuk, V., Ivashchkin, V., Nemerovets, O.* Modeling of the Pro-





- cess of Changing Levels in a Cascade of Two Channel Reservoirs during High Water // *Science and Technology*. – 2019. – Vol. 18, no. 2. – P. 146–154. (In Russian)]
33. *Квасов П.А.* Новые подходы к стратегии строительства противопаводковых сооружений // *Символ науки: международный научный журнал*. – 2015. – № 12-1. – С. 49–53. [Kvasov, P. New Approaches to the Strategy for the Construction of Flood Defences // *Symbol of Science: An International Scientific Journal*. – 2015. – No. 12-1. – P. 49–53. (In Russian)]
34. *Фалеев М.И., Черных Г.С., Старостин А.С.* Оценка опасностей и угроз, обусловленных катастрофическими наводнениями, и предложения по защите населения и территорий от них // *Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования*. – 2014. – Т. 4. – № 2 (7). – С. 18–32. [Faleev, M., Chernykh, G., Starostin, A. Assessment of Hazards and Threats Caused by Catastrophic Floods and Proposals for Protecting the Population and Territories from Them // *Civil Protection Strategy: Problems and Research*. – 2014. – Vol. 4, no. 2(7). – P. 18–32. (In Russian)]
35. *Conesa-García, C., López-Bermúdez, F., García-Lorenzo, R.* Bed Stability Variations after Check Dam Construction in Torrential Channels (South-East Spain) // *Earth Surface Processes and Landforms*. – 2007. – Vol. 32 (14). – P. 2165–2184. – DOI: 10.1002/esp.1521.
36. *Zema, D., Bombino, G., Denisi, P., Lucas-Borja, M., Zimbone, S.* Evaluating the Effects of Check Dams on Channel Geometry, Bed Sediment Size and Riparian Vegetation in Mediterranean Mountain Torrents // *Science of the Total Environment*. – 2018. – Vol. 642. – P. 327–340. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.035>.
37. *Mulat, K., Tegegne, A.* Future Hydrology of the Upper Blue Nile River Basin and Its Impact on the Grand Ethiopian Renaissance Dam Water Resource System: A Review // *Hydrological Sciences Journal*. – 2023. – Vol. 68, iss. 5. – P. 734–744. – DOI: 10.1080/02626667.2023.2179878.
38. *Болгов М.В., Беляев А.И.* Водные проблемы нижней Волги: основные факторы и компенсирующие мероприятия // *Известия РАН. Серия географическая*. – 2023. – Т. 87. – № 6. – С. 862–874. [Bolgov, M.V., Belyaev, A.I. Water Problems of the Lower Volga: The Main Factors and Compensating Measures // *News of the Russian Academy of Sciences. The Series is Geographical*. – 2023. – Vol. 87, no. 6. – P. 862–874. (In Russian)]
39. *Costachea, R., Abdoe, H., Mishraf, A., et al.* Using Fuzzy and Machine Learning Iterative Optimized Models to Generate the Flood Susceptibility Maps: Case Study of Prahova River Basin, Romania // *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. – 2023. – Vol. 14. – No. 1. – DOI: <https://doi.org/10.1080/19475705.2023.2281241>.
40. *Voronin, A., Vasilchenko, A., Khoperskov, A.* Project Optimization for Small Watercourses Restoration in the Northern Part of the Volga-Akhtuba Floodplain by the Geoinformation and Hydrodynamic Modeling // *Journal of Physics: Conf. Series*. – 2018. – Vol. 973. – P. 1–10. – URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/973/1/012064/pdf>.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии В.В. Кульбой.*

*Поступила в редакцию 11.07.2023,  
после доработки 06.12.2023.  
Принята к публикации 07.12.2023.*

**Исаева Инесса Игоревна** – мл. науч. сотрудник,  
✉ [isaeva-inessa@mail.ru](mailto:isaeva-inessa@mail.ru)  
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-3045-6757>

**Харитонов Михаил Алексеевич** – канд. техн. наук,  
✉ [kharitonov@volsu.ru](mailto:kharitonov@volsu.ru)  
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-2115-1591>

**Васильченко Анна Анатольевна** – канд. техн. наук,  
✉ [aa-vasilchenko@mail.ru](mailto:aa-vasilchenko@mail.ru)  
ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0008-5638-912X>

**Воронин Александр Александрович** – д-р физ.-мат. наук,  
✉ [voronin.prof@gmail.com](mailto:voronin.prof@gmail.com)  
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-7912-9963>

**Хоперсков Александр Валентинович** – д-р физ.-мат. наук,  
✉ [khoperskov@volsu.ru](mailto:khoperskov@volsu.ru)  
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-0149-7947>

**Кликунова Анна Юрьевна** – ст. преподаватель,  
✉ [klikunova@volsu.ru](mailto:klikunova@volsu.ru)  
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-4055-4601>

Волгоградский государственный университет, г. Волгоград

© 2024 г. Исаева И.И., Харитонов М.А., Васильченко А.А., Воронин А.А., Хоперсков А.В., Кликунова А.Ю.



Эта статья доступна по [лицензии Creative Commons «Attribution» \(«Атрибуция»\) 4.0 Всемирная](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

# SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF FLOODPLAIN TERRITORIES OF REGULATED RIVERS.

## PART II: Designing an Effective Territory Structure Management System

I. I. Isaeva\*, M. A. Kharitonov\*\*, A. A. Vasilchenko\*\*\*, A. A. Voronin\*\*\*\*,  
A. V. Khoperskov\*\*\*\*\*, and A. Yu. Klikunova\*\*\*\*\*

Volgograd State University, Volgograd, Russia

\*✉ isaeva-inessa@mail.ru, \*\*✉ kharitonov@volsu.ru, \*\*\*✉ aa-vasilchenko@mail.ru, \*\*\*\*✉ voronin.prof@gmail.com,  
\*\*\*\*\*✉ khoperskov@volsu.ru, \*\*\*\*\*✉ klikunova@volsu.ru

**Abstract.** Part II of the study presents an approach to designing a sustainable management system for the environmental socio-economic systems (ESESs) of floodplain territories based on hydro-technical projects on their hydrological regime stabilization. The general strategic development task of a floodplain ESES is formulated as a long-term constrained optimization problem of its environmental socio-economic potentials. To reduce parametric uncertainty, this problem is transformed into that of finding optimal locations for installing flood dams in floodplain channels and their adaptive operation modes during the spring releases of hydroelectric power stations (HPSs) in order to implement the target stable design-achievable complex structure of the floodplain territory that ensures socio-economic safety and the sustainable flooding of the floodplain ecosystem's biotope. The problem is solved using an original empirical “donor-acceptor” optimization method in combination with other exact methods of optimization, expert assessment, geoinformation and numerical hydrodynamic modeling, as well as high-performance computing, the statistical analysis of natural observation data, and the results of computational experiments. The approach is applied to find the optimal locations and operation modes of flood dams that ensure the sustainable safe spring flooding of the Volga–Akhtuba floodplain territory considering the spatially heterogeneous depression effect of the Volga riverbed. This study neglects the conditions of navigation on the Volga during the spring release of the Volzhsk HPS and other hydro-technical design aspects.

**Keywords:** sustainable development, territorial structure control, hydrotechnical projects, high-performance computing, hydrodynamic modeling, Volga–Akhtuba floodplain.

**Acknowledgments.** This work was supported by the Russian Science Foundation, project no. 23-21-00176, <https://rscf.ru/project/23-21-00176/>.