

УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ ПОЙМЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ ЗАРЕГУЛИРОВАННЫХ РЕК.

Ч. 1. Моделирование динамики комплексной структуры пойменных территорий¹

И.И. Исаева, М.А. Харитонов, А.А. Васильченко, А.А. Воронин,
А.В. Хоперсков, Е.О. Агафонникова

Аннотация. Представлен подход к проектированию системы управления устойчивым развитием пойменных социоприродохозяйственных систем (СПХС) на основе моделей динамики структуры пойменной территории и гидротехнических проектов ее стабилизации. Целью управления является достижение и поддержание оптимальной стационарной комплексной структуры пойменной территории, характеризуемой наилучшим проектно достижимым соответствием функционального назначения ее фрагментов характеру их весеннего паводкового затопления. Основой представленного подхода служит модель динамики комплексной структуры пойменной территории, объединяющей в себе изменяющиеся гидрологические и постоянные функциональные свойства. Эта динамическая модель, дополненная экспертной моделью социоприродохозяйственных потенциалов состояния пойменной территории, позволяет найти оптимальные значения параметров гидротехнических и социохозяйственных проектов. Реализация развитого подхода для конкретных пойменных СПХС опирается на методы оптимизации, экспертного оценивания, геоинформационного, численного гидродинамического моделирования, высокопроизводительные вычисления, методы статистического анализа данных природных наблюдений и результатов вычислительных экспериментов. Представлены результаты численного построения ретроспективной, современной и прогнозной комплексных структур территории северной части Волго-Ахтубинской поймы с учетом пространственной неоднородности эффекта русловой деградации р. Волги. Эти результаты являются основой алгоритма поиска параметров гидротехнических проектов обеспечения оптимальной устойчивой комплексной структуры пойменной территории. Данный алгоритм и результаты его численной реализации будут представлены во второй части статьи.

Ключевые слова: устойчивое развитие, управление территориальной структурой, гидротехнические проекты, Волго-Ахтубинская пойма.

ВВЕДЕНИЕ

Пойменные социоприродохозяйственные системы (СПХС) характеризуются повышенной зависимостью своего состояния от гидрологического режима. Сложная структура русловой системы и зон паводкового затопления определяют мозаичность расположения функциональных зон пойменных территорий. В основе эффективности хозяй-

ствования пойменных СПХС лежит мера оптимальности соответствия территориального распределения водного ресурса функциональному распределению фрагментов пойменной территории.

Территориальное распределение водного ресурса в пойменных СПХС формируется главным образом динамикой их паводкового затопления, определяемой объемом весеннего паводка, русловой структурой и рельефом территории. Возведение гидрокаскадов на крупных реках, помимо систем гидроэлектрогенерации, создает возможность регулирования весенних паводков, превращаемых

¹Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-00176, <https://rscf.ru/project/23-21-00176/>.



в весенние попуски ГЭС. Это регулирование создает благоприятные условия для функционирования пойменных СПХС. Однако постепенное размывание (депрессия) речного дна в значительных по размеру (более ста километров) русловых зонах ниже ГЭС из-за нарушения динамического равновесия между вымыванием и осаждением частиц донного грунта является причиной медленного понижения уровня рек. Так, понижение уровней рек за годы работы ГЭС составляет: для р. Камы у Воткинской ГЭС –1,1 м, для р. Волги у Нижегородской ГЭС –1,3 м, для р. Волги у Волжской ГЭС (ВГЭС) в меженных условиях –1,7–1,8 м, в период весенних половодий – 1,25–1,35 м [1–7]. Это является причиной снижения объема паводковых вод, поступающих в поймы [1–8].

Результатом этого снижения является прогрессирующее сужение устойчиво затопляемой пойменной территории, являющейся биотопом ее природной системы, и расширение наименее ценной в социоприродохозяйственном отношении неустойчиво затопляемой территории. Таким образом, в отличие от пойм нерегулируемых рек, страдающих от наводнений, поймы зарегулированных рек страдают от техногенной аридизации. Поэтому актуальной проблемой управления их водными ресурсами является обеспечение устойчивости экосистем и устойчивого социально-экономического развития в условиях дефицита воды.

В последние десятилетия проблема достижения рационального баланса между социально-экономическими и экологическими потребностями в речных системах является предметом интенсивных исследований [7–26]. Обширный перечень публикаций последних лет можно разделить на исследования по мониторингу, диагностике и моделированию экологических и социально-экономических проблем и рисков (например, работы [7–18]) и исследования по проектированию систем принятия решений [19–25], управлению риском [26–29]. Следует отметить, что если первая группа исследований опирается на относительно точные количественные (геоинформационные, гидродинамические, статистические) методы и технологии, то вторая – главным образом на качественные методы менеджмента и экспертного оценивания. Объективной причиной этого является многомерная неопределенность задачи управления развитием пойменных СПХС.

Проблема устойчивого развития речных систем и близкая к ней проблема эколого-экономического управления региональными СПХС также является предметом многих исследований [30–35]. В центре

внимания авторов [30–33] находится проблема снижения качества жизни и эффективности хозяйствования в условиях антропогенной деградации пойменных ландшафтов и экосистем. Тематики исследований являются методы и технологии идентификации параметров устойчивого развития, обеспечения их достижения и сохранения. В работе [33] основой анализа проблемы устойчивого развития служат «индексы совместимости системы», рассчитываемые на основе целевых функций ее акторов и критериев устойчивости экосистем. Устанавливаемая таким образом область допустимых значений параметров эквивалентна лежащей в основе системы эколого-экономического управления СПХС области нормативных безубыточных действий ее хозяйствующих субъектов [34]. Отметим, что эти подходы, адекватные для устойчивых систем, теряют свою эффективность при анализе пойменных СПХС зарегулированных рек, находящихся в условиях развивающейся природно-техногенной деградации. Отсутствие долгосрочной детерминированной обусловленности карт затопления территории речным гидрографом (зависимостью расхода воды, проходящей через сечение речного русла, от времени) существенно затрудняет идентификацию и управление такими параметрами. Поэтому главной основой устойчивого развития пойменных территорий является долгосрочная стабилизация их гидрологического режима.

В настоящей работе развивается подход к созданию системы управления устойчивым развитием пойменных СПХС на основе оптимизации гидротехнических и социохозяйственных проектов. Целью управления является достижение и поддержание определяющей эффективности СПХС оптимальной стационарной комплексной (К) структуры пойменной территории, характеризуемой наилучшим проектно достижимым соответствием функционального назначения ее фрагментов характеру их весеннего паводкового затопления. При решении задачи управления применяются методы геоинформационного, численного гидродинамического моделирования, динамического программирования, высокопроизводительные вычисления, эвристические методы оптимизации и экспертного оценивания, методы статистического анализа данных природных наблюдений и результатов вычислительных экспериментов.

Объектом реализации предлагаемого подхода является расположенная в пределах Волгоградской области северная часть Волго-Ахтубинской поймы (ВАП), занимающая территорию 867 км² с общей

протяженностью больших и малых русел около 800 км. Волго-Ахтубинская пойма обладает высоким природным разнообразием, благоприятными условиями для сельского хозяйства, ограниченного жилищного строительства, экологического туризма. Создание Волжского гидрокаскада и в особенности ВГЭС в 1961 г. стало главным фактором формирования, функционирования и последующей деградации ВАП [9, 10]. Во время весеннего половодья более 70 % территории ВАП затопляется из р. Ахтубы, которая является рукавом р. Волги. За период функционирования ВГЭС средняя доля вод, поступающих в р. Ахтубу из р. Волги во время весеннего паводка, снизилась в три раза [35, 36]. Особенностью ВАП является наличие значительной части территории (37 %) с неопределенным кадастровым видом землепользования.

Некоторые части развитого подхода и результаты их реализации представлены в ранее опубликованных работах. Так, в статье [37] описана концепция К-структуры пойменной территории как инструмента анализа ее территориального потенциала. Сформулирована задача стратегического управления территорией как задача достижения ее К-структуры, максимизирующей значение агрегированного территориального социоприродохозяйственного (СПХ) потенциала. В данном исследовании исследовании СПХ-потенциалом некоторого вида называется взвешенная сумма произведений площади территориальных фрагментов, отнесенных к этому СПХ-виду, на значение функции, характеризующей меру соответствия функционального назначения этих фрагментов характеру их весеннего паводкового затопления. Представлены результаты численного исследования этой задачи для современного рельефа территории ВАП с управлением в виде комплекса плотин с переменным поперечным сечением в больших и малых пойменных руслах.

В статье [38] описана модель долгосрочной природно-техногенной динамики К-структуры пойменной территории, разработанная на основе упрощенной пространственно однородной регрессионной модели техногенной депрессии пойменного русла. Представлены результаты прогнозирования динамики агрегированной 12-элементной К-структуры и трех СПХ-потенциалов территории ВАП до 2050 г.

В настоящей статье представлен метод моделирования долгосрочной динамики К-структуры пойменных территорий зарегулированных рек, включающий в себя алгоритм построения корпуса карт моделирования затоплений (ККМЗ), регрес-

сионную модель пространственно неоднородной депрессии главного пойменного русла, алгоритм приближенного построения ретроспективных и прогнозных карт затопления, модель 24-элементной К-структуры пойменной территории, алгоритм построения ретроспективных и прогнозных К-структур. Представлены результаты численной реализации этого метода для территории северной части Волго-Ахтубинской поймы. Представленный метод и результаты его численной реализации составляют основу алгоритмов поиска параметров гидротехнических проектов, обеспечивающих устойчивость оптимальной К-структуры пойменной территории. Данный алгоритм и результаты его численной реализации будут представлены во второй части статьи.

1. МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Инструменты моделирования водной динамики

Расчеты динамики воды в речных руслах и в междуречье р. Волги и р. Ахтубы основаны на уравнениях мелкой воды, учитывающих гидравлическое сопротивление в модели Маннинга [39, 40]. Для численного моделирования движения поверхностных вод [41, 42], одним из модулей которого является цифровая модель рельефа (ЦМР) Северной части Волго-Ахтубинской поймы [43, 44], используется программный комплекс EcoGIS-Simulation. В основе вычислительного ядра EcoGIS-Simulation лежит численный алгоритм интегрирования уравнений гидродинамики CSPH-TVD, двухшаговый метод, объединяющий лагранжев (Smoothed-ParticleHydrodynamics) и эйлеров (TotalVariationDiminishing) подходы [45, 46]. Параллельные вычисления проводятся на графических процессорах NVIDIA Tesla [39, 47].

1.2. Корпус карт моделирования затоплений пойменной территории

Результатом описанных в п. 1.1 расчетов водной динамики в период весеннего попуска ГЭС года τ является серия карт затопления пойменной территории $K_{\tau}^3(t_k) = K^3(Q_{\tau}(t), t_k)$, $t \in [t_0, t_k]$, $k = 1, \dots, k_{\max}$ (t_0 – момент начала попуска; $Q_{\tau}(t)$ – гидрограф весеннего попуска ГЭС года τ ; Q_{τ} – величина расхода; t – время, ч). Цифровая карта затопления территории представляет собой двумерный массив, каждому элементу которого (i, j) , $i = 1, \dots, N$, $j = 1, \dots, M$, в каждый момент t_k постав-



лены в соответствие высота воды $h_{ij}(t_k)$ и вектор ее скорости $v_{ij}(t_k)$. Наличие погрешности геоинформационного и гидродинамического моделирования ε_r требует расчета минимальной высоты затопления h^{\min} , гарантирующей факт «затопления» ячейки цифровой карты в момент t_k при выполнении неравенства $h_{ij}(t_k) \geq h^{\min}$. (Происхождение, алгоритм и результаты расчета значений ε_r и h^{\min} описаны в работе [48].) Каждой карте $K^3(Q(t), t_k)$ ставится в соответствие карта $K(Q(t), t_k)$, каждой ячейке которой соответствует переменная $m_{ij} = \{0, 1\}$, $i = 1, \dots, N$, $j = 1, \dots, M$, $m_{ij} = 0$, $h_{ij}(t_k) < h^{\min}$, $m_{ij} = 1$, $h_{ij}(t_k) \geq h^{\min}$. В каждом из проведенных многочисленных вычислительных экспериментов с реальными и модельными гидрографами $Q(t)$ отмечено наличие момента времени t^{\max} , которому соответствует карта $K(Q(t), t^{\max})$ с наибольшим числом «затопленных» ячеек. В данной работе используются именно такие карты.

Снижение вычислительной сложности построения большого числа цифровых карт $K^3(Q(t), t^{\max}, u)$ и соответствующих им карт $K(Q(t), t^{\max}, u)$ при варьировании $Q(t)$ и вектора управлений u , изменяющего рельеф затопляемой территории или условия безопасного затопления, основано на возможности замены с погрешностью $\varepsilon_c \leq \varepsilon_r$ каждого многоступенчатого гидрографа $Q(t)$ постоянным гидрографом $G^c = (Q^c, t^{\max})$, характеризующимся величинами постоянного расхода Q^c и длительности t^{\max} . Здесь $\varepsilon_c = \max(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_L)$, где погрешности $\varepsilon_l (l = 1, \dots, L)$, характеризующие относительные различия между картами $K_l^{(1)}(Q(t))$ и $K_l^{(2)}(Q^c, t)$, вычисляются по формуле

$$\varepsilon_l = \left(\min \left(\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N m_{ij}^{(1)}, \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N m_{ij}^{(2)} \right) \right)^{-1} \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N |m_{ij}^{(1)} - m_{ij}^{(2)}|,$$

в которой $m_{ij}^{(p)} = 0$, если ячейка (i, j) , $i = 1, \dots, N$, $j = 1, \dots, M$, цифровой карты $K_l^{(p)}$ ($p = 1, 2$) не «затоплена», в противном случае $m_{ij}^{(p)} = 1$. Замена гидрографов осуществляется эвристическим алгоритмом, согласно которому на каждом отрезке времени $[t_0; \tilde{t}]$ ступенчатый гидрограф $Q(t)$ заме-

няется постоянным гидрографом равного объема с соответствующим расходом Q_i^c . Предварительной оценкой момента максимального затопления считается величина $t^{(1)} = \arg \max_i [Q_i^c]$, которая уточняется путем расчета функции относительных различий $\varepsilon(\eta)$ между картами $K^{(1)}(Q(t))$ и $K_{\eta}^{(2)}(Q_{\eta}^c, t_{\eta}^{\max})$. Здесь $t_{\eta}^{\max} = t^{(1)} (1 + \eta(t_1 - t_0)) \times (t^{(1)} - t_0)^{-1}$, t_1 является корнем уравнения $Q_{i^{(1)}}^c = Q(t_1)$. Наиболее точная оценка равна $t_{\eta^*}^{\max}$, где $\eta^* = \arg \min_{\eta} \varepsilon(\eta)$. Далее обозначим $t_{\eta^*}^{\max} \equiv t^{\max}$.

Для построения карт $K(Q^c, t^{\max})$ используется корпус карт моделирования затоплений (ККМЗ), содержащий массив карт пойменных затоплений с постоянными гидрографами $G_{ij}^c = (Q_i^c, t_j)$ и современными рельефами дна русел и затапливаемой территории. Этот корпус формируется так, чтобы относительные различия между картами $K(G_{ij}^c)$ и $K(G_{i+1, j}^c)$, а также картами $K(G_{ij}^c)$ и $K(G_{i, j+1}^c)$ не превышали ε_r . Картой $K(Q^c, t^{\max})$, используемой для расчетов целевых затоплений и условий экологической безопасности, считается карта $K(G_{ij}^c)$ ($Q_i^c \leq Q^c \leq Q_{i+1}^c, t_j \leq t^{\max} \leq t_{j+1}$). Для расчета условий социохозяйственной безопасности картой $K(Q^c, t^{\max})$ считается карта $K(G_{i+1, j+1}^c)$.

1.3. Регрессионная модель депрессии главного русла и алгоритм приближенного построения карт затопления пойменной территории

Эффект прогрессирующей природно-техногенной депрессии главного русла моделируется регрессионной зависимостью $h(Q^c, \tau, L)$, ($\tau \in [\tau_0, \tau_0 + N]$ – годы) уровня вод h от гидрографа Q^c на расстоянии L от нижнего бьефа ГЭС по данным многолетних замеров уровней вод $h_i(Q(t_j), \tau, L_i)$, $i = 1, \dots, I$, $j = 1, \dots, J$, $\tau \in [\tau_0, \tau_0 + N]$ на I гидропостах, расположенных на расстояниях L_i от нижнего бьефа ГЭС. Уравнение регрессии, описывающее пространственную неоднородность эффекта русловой депрессии, имеет вид

$$h(w) = (a, w) + w^T A w + b, \quad w = (Q^c, \tau, L)^T, \quad (1)$$

$$a = (a_1, a_2, a_3), \quad A = \| \| a_{ij} \| \|_{i, j=1}^3.$$

Выражение (1) позволяет найти виртуальный переменный по L гидрограф $Q_2^c = \varphi(Q_1^c, \tau_1, \tau_2, L)$, являющийся решением уравнения $h(Q_1^c, \tau_1, L) = h(Q_2^c, \tau_2, L)$. Для любого t^{\max} виртуальный гидрограф $(\varphi(Q_1^c, \tau_1, \tau_2, L), t^{\max})$ обеспечивает затопление территории при состоянии русла в год τ_2 , эквивалентное затоплению территории постоянным гидрографом (Q_1^c, t^{\max}) при состоянии русла в год τ_1 .

Аппроксимация переменного по L гидрографа ступенчатым (по L) гидрографом, позволяет построить приближенную ретроспективную или прогнозную карту затопления территории в год τ_2 в виде композиции («склейки») отдельных фрагментов совокупности карт ККМЗ (построенного по рельефу года $\tau_1 = 2022$) с различными значениями постоянного расхода Q_j^c с погрешностью моделирования $\varepsilon_c = \max(\bar{A}, \varepsilon_r)$, где \bar{A} – средняя ошибка аппроксимации (1). Фрагментами карт, аппроксимирующими фрагменты карты затопления $\tilde{K}_k(\varphi(Q_1^c, \tau_1, \tau_2, L), t^{\max})$: $\tilde{K}(\varphi(Q_1^c, \tau_1, \tau_2, L), t^{\max})$, $L_k \leq L \leq L_k + \Delta L$, $k = 1, \dots, K-1$, $L_1 = 0$, считаются фрагменты $K_k(G_{ij}^c)$ карт $K(G_{ij}^c)$ из ККМЗ: $Q_i^c \leq \varphi(Q_1^c, \tau_1, \tau_2, L) \leq Q_{i+1}^c$, $t_j \leq t^{\max} \leq t_{j+1}$, $L_k \leq L \leq L_k + \Delta L$. Здесь L_{\max} – длина моделируемой части русла; ΔL_k являются корнями уравнений $\varphi(Q_1^c, \tau_1, \tau_2, L_k + \Delta L_k) - \varphi(Q_1^c, \tau_1, \tau_2, L_k) = Q_{i+1}^c - Q_i^c$, обеспечивающих нужную точность; величины K , ΔL определяются соотношениями $\sum_{k=1}^K \Delta L_k = L_{\max} = K \Delta L$.

1.4. Модель комплексной структуры пойменной территории

Элементами первичной функциональной (Ф) структуры являются совокупности территориально локализованных фрагментов территории, за каждой из которых закреплен одинаковый кадастровый вид землепользования (Ф-вид). Элементами агрегированных Ф-структур являются их объединения в группы (Ф-типы) по различным основаниям. Основой построения Ф-структуры пойменной территории является ее цифровая кадастровая карта.

Элементами гидрологической (Γ_1) структуры являются совокупности территориально локализо-

ванных фрагментов территории с одинаковыми диапазонами частот их паводковых затоплений (Γ_1 -видом). Число частотных диапазонов и их границы определяются, с одной стороны, целями исследования, с другой – возможностью их идентификации с заданной точностью. Укрупненные диапазоны частот образуют Γ_1 -типы. Комплексная структура пойменной территории является суперпозицией ее Γ_1 - и Ф-структур. Элементами К-структуры являются совокупности ее территориально локализованных фрагментов, имеющих одинаковые Γ_1 -вид (тип) и Ф-вид (тип). Существование структуры $\Gamma_1(\tau)$ определяется стабильностью рельефа, русловой структуры и функции распределения объема ежегодного паводкового гидрографа, рассчитываемой для выборок, размер которых Θ (число взятых подряд лет наблюдений, отвечающих отрезку $[\tau - \frac{\Theta}{2}, \tau + \frac{\Theta}{2} - 1]$), определяется исходя из требований к точности ее идентификации. Алгоритм расчета минимальной величины Θ описан в работе [37]. В настоящем исследовании используются укрупненные частотные диапазоны (Γ_1 -типы), характеризующие устойчиво затапливаемые (с частотой, не меньшей некоторого порогового значения n^{\lim}), неустойчиво затапливаемые (с частотой, меньшей n^{\lim}) и незатапливаемые (ни разу не затопленные за период наблюдений) территории. СПХ-потенциалы элементов Ф-структуры оцениваются с помощью экспертно конструируемых характеристических функций (ХФ), отражающих меру соответствия их Ф-вида (типа) Γ_1 -виду (типу).

Если Γ_1 -структура содержит n элементов, а Ф-структура – m элементов, то образуемая ими К-структура будет содержать nm элементов. Алгоритм и результат построения 12-элементной К-структуры на основе трехэлементной Γ_1 -структуры и четырехэлементной Ф-структуры (социальные, природные, хозяйственные, неопределенные территории) подробно описан в работе [37]. Недостатком этой Ф-структуры является то, что она не является классификацией территориальных фрагментов пойм. Поэтому в настоящей работе используется агрегированная функциональная структура Φ_1 в виде совокупности восьми типовых элементов, каждый из которых характеризуется одной из трех типовых ХФ: социального (C, φ_3), природного (Π, φ_1), хозяйственного (X, φ_3), природохозяйственного ($\Pi X, \varphi_1$), социопри-



родного (СП, φ_1), социохозяйственного (СХ, φ_3), социоприродохозяйственного (СПХ, φ_1) и неопределенного (Н, φ_2). Последний тип означает отсутствие закрепленного вида землепользования. Характеристические функции $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ имеют следующий вид:

$$\varphi_1(n) = \begin{cases} 0, & 0 \leq n < n^{\text{lim}}, \\ 1, & n^{\text{lim}} \leq n \leq 1, \end{cases} \quad \varphi_2(n) = 1,$$

$$\varphi_3(n) = \begin{cases} 0, & 0 < n \leq 1, \\ 1, & n = 0. \end{cases}$$

Суперпозиция Φ_1 -структуры и трехэлементной Γ_1 -структуры образует 24-элементную K -структуру $K_{24}(\tau)$, используемую в настоящей работе для решения задачи управления.

1.5. Модель динамики Γ_1 -структуры

Как было сказано выше, эффект русловой депрессии приводит к изменению Γ_1 -структуры с течением времени. Модель динамики этой структуры представляет собой совокупность алгоритмов построения последовательности $\Gamma_1(\tau)$, $\tau = \tau_0, \dots, \tau_0 + N, \dots, T$. Эта последовательность состоит из реальных ($\Gamma_1^r(\tau)$) и модельных ($\Gamma_1^{\text{mod}}(\tau)$) структур. Реальные структуры $\Gamma_1^r(\tau)$, отвечающие случаю $\tau_0 + \frac{\Theta}{2} \leq \tau \leq \tau_0 + N - \frac{\Theta}{2} + 1$, конструируются при помощи совокупности карт затоплений за период наблюдений с гидрографами G_θ^c , $\theta \in \left[\tau - \frac{\Theta}{2}, \tau + \frac{\Theta}{2} - 1 \right]$, построенных алгоритмом, описанном в п. 1.3. («Затопленной» на карте устойчивого затопления $K_\tau^{n^{\text{lim}}}$ структуры $\Gamma_1^r(\tau)$ считается ячейка, «затопленная» не менее, чем на $n^{\text{lim}}\Theta$ картах совокупности, включающей Θ карт.)

Модельные структуры $\Gamma_1^{\text{mod}}(\tau)$ формируются для случаев, в которых интервал выборки полностью или частично выходит за границы периода наблюдений ($\tau < \tau_0 + \frac{\Theta}{2}$ или $\tau > \tau_0 + N - \frac{\Theta}{2} + 1$).

В работе [37] эти структуры строятся при помощи карт затоплений, рассчитанных с учетом эффекта пространственно однородной депрессии главного русла в год τ с виртуальными модельными гидрографами $G_i^c, i = 1, \dots, \Theta$, параметры которых подо-

браны случайными выборками из генеральной совокупности.

Применение описанного в работе [37] алгоритма для построения большого числа модельных структур $\Gamma_1^{\text{mod}}(\tau)$, соответствующих различным вариантам ГТ-проектов, с учетом эффекта пространственной неоднородности русловой депрессии значительно повышает вычислительную сложность алгоритма решения задачи управления. Поэтому в настоящем исследовании для этой цели используется менее трудоемкий алгоритм их приближенного построения. Этот алгоритм сводится к поиску обобщенного гидрографа $\hat{G}_o^c = (\hat{Q}_o^c, \hat{t}_o)$ и ближайшего к нему гидрографа из ККМЗ $G_{ij}^c = (Q_i^c, t_j)$, $Q_i \leq \hat{Q}_o \leq Q_{i+1}$, $t_j \leq \hat{t}_o \leq t_{j+1}$, карта затопления которого с наименьшей погрешностью приближает совокупность карт устойчивого затопления $K_\tau^{n^{\text{lim}}}$ в виртуальных структурах $\Gamma_1^v(\tau)$, сформированных для всего периода наблюдений $\tau_0 + \frac{\Theta}{2} \leq \tau \leq \tau_0 + N - \frac{\Theta}{2} + 1$ при помощи карт затоплений, построенных на основе современного рельефа главного русла с гидрографами G_θ^c , $\theta \in \left[\tau - \frac{\Theta}{2}, \tau + \frac{\Theta}{2} - 1 \right]$. (Эти структуры совпадали бы с реальными при отсутствии русловой депрессии.)

Поиск гидрографа $\hat{G}^c = (\hat{Q}^c, \hat{t})$ производится следующим образом. Для множества параметров $Q_\tau^c, t_\tau^{\text{max}}$ совокупности гидрографов $G_\tau^c (\tau = \tau_0, \dots, \tau_0 + N)$ вычисляется линейная регрессия $Q^c = at^{\text{max}} + b$. При каждом фиксированном $\tau = \tau_0 + \frac{\Theta}{2}, \dots, \tau_0 + N - \frac{\Theta}{2} + 1$ для каждого гидрографа $G_\theta^c, \theta \in \left[\tau - \frac{\Theta}{2}, \tau + \frac{\Theta}{2} - 1 \right]$ вычисляется виртуальный гидрограф $\tilde{G}_\theta^c(\tau)$ объема $V_\theta = Q_\theta^c t_\theta^{\text{max}}$, параметры которого $\tilde{Q}_\theta^c, \tilde{t}_\theta^{\text{max}}$ лежат на линии этой регрессии. Эти гидрографы упорядочиваются по величине объема. В качестве приближенной карты устойчивого затопления $\tilde{K}_\tau^{n^{\text{lim}}}$ выбирается карта затопления гидрографа $\tilde{G}_\tau^c = (\tilde{Q}_\tau^c, \tilde{t}_\tau^{\text{max}})$, имеющего порядковый номер равный величине $\left[n^{\text{lim}}\Theta \right] + 1$. Погрешность ε_τ определения карты $\tilde{K}_\tau^{n^{\text{lim}}}$ определяется согласно алгоритму, описанному в п. 1.2,

как относительная доля ячеек, характер затопления которых различен на картах $\tilde{K}_\tau^{n\text{lim}}$ и $K_\tau^{n\text{lim}}$. Если средняя величина этих погрешностей не превосходит ε_m , то средневзвешенные значения параметров \hat{Q}_o^c, \hat{t}_o обобщенного гидрографа \hat{G}_o^c определяются на основании построенной линейной регрессии и уравнения $\hat{Q}^c \hat{t} = (N - \Theta)^{-1} \sum_\tau \tilde{Q}_\tau^c \tilde{t}_\tau^{\text{max}}$. Ближайший к \hat{G}_o^c гидрограф из ККМЗ $G_\tau^{\text{уст}} = (Q^{\text{уст}}, t^{\text{уст}}) = (Q_i^c, t_j)$, $Q_i \leq \hat{Q}_o^c \leq Q_{i+1}$, $t_j \leq \hat{t}_o \leq t_{j+1}$ является результатом поиска. Погрешность такого приближения равна $\varepsilon_s = (N - \Theta)^{-1} \sum_\tau \varepsilon_\tau$. Использование ККМЗ при построении ретроспективных и прогнозных структур $\Gamma_1^{\text{mod}}(\tau)$ требует расчета переменного гидрографа $G_\tau^{\text{уст}}(L) = (\varphi(Q^{\text{уст}}, 2022, \tau, L), t^{\text{уст}})$ и формирования карт затоплений из фрагментов карт этого корпуса в соответствии с алгоритмом из п. 1.3. На основе построенных таким образом приближенных структур $\Gamma_1^v(\tau)$, $\Gamma_1^r(\tau)$, $\Gamma_1^{\text{mod}}(\tau)$ строятся соответствующие им приближенные 24-элементные комплексные структуры $K_{24}^v(\tau)$, $K_{24}^r(\tau)$, $K_{24}^{\text{mod}}(\tau)$. Гидрологические структуры, построенные по картам затоплений, рассчитанных для рельефов дна русел поймы, включающих в себя проектируемые плотины, называются проектными $K_{24}^{pr}(\tau)$.

Помимо структуры Γ_1 в алгоритме оптимизации гидротехнических проектов, который будет представлен во второй части статьи, используется иерархическая гидрологическая структура пойменной территории Γ_2 , представляющая собой совокупность ее фрагментов – зон, затапливаемых из русловых систем, образуемых ответвлениями от главного магистрального русла. Одна часть зон образуется тупиковыми ответвлениями, другая часть – средними магистральными руслами (СМР). Фрагменты территории, затапливаемые из отдельных русел, образуют микрзоны. Погрешность определения границы зоны, равная отношению объема трансграничных водных потоков к объему вод, поступивших в эту зону из образующих ее русел, может превышать ε_r . В таком случае зона присоединяется к соседней, образуя макрзону. Алгоритм и результаты численного построения структуры Γ_2 для ВАП описаны в работе [49].

2. ЧИСЛЕННОЕ ПОСТРОЕНИЕ РЕТРОСПЕКТИВНОЙ, СОВРЕМЕННОЙ И ПРОГНОЗНОЙ К-СТРУКТУР СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ВОЛГО-АХТУБИНСКОЙ ПОЙМЫ

Обработка результатов вычислительных экспериментов позволила установить, что погрешность открытых данных спутниковых измерений высот рельефа ВАП, абсолютная величина которой равна 0,5 м, вызывает погрешность гидродинамического моделирования цифровых карт затопления, относительная величина которой, рассчитанная с помощью описанного в п. 1.2 алгоритма, не превосходит $\varepsilon_r = 0,05$ [48]. Для реализации описанных выше алгоритмов создан ККМЗ с гидрографами ВГЭС $G_{ij}^c = (Q_i^c, t_j)$, $13\,000 \leq Q_i^c \leq 28\,000 \text{ м}^3/\text{с}$, $0 \leq t_j \leq 960 \text{ ч}$, содержащий более 3500 карт, построенных с относительной погрешностью, не превышающей $\varepsilon_r = 0,05$.

Вычисление коэффициентов регрессии (1) для уровней р. Волги ниже ВГЭС производилось на основе опубликованных на сайте ПАО «РусГидро» гидрологических данных о динамике уровней воды на четырех гидропостах: Нижний Бьеф ВГЭС, г. Волгоград (Речной порт), пос. Светлый Яр, пос. Черный Яр. На рис. 1 показаны результаты анализа динамики уровней вод на этих гидропостах при меженных значениях стока воды. Приведены линейные тренды изменения уровня вод для $Q^c = 4\,000, 5\,000, 6\,000 \text{ м}^3/\text{с}$ и средние годовые понижения уровня воды $\delta\eta$. Для Нижнего Бьефа ВГЭС $\delta\eta = -0,0201 \text{ м}$, для пос. Светлый Яр (65 км от ВГЭС) $\delta\eta = -0,0108 \text{ м}$. Вблизи пос. Черный Яр депрессия дна практически исчезает. Полученные оценки дают суммарное понижение для Нижнего Бьефа ВГЭС на интервале 1961–2023 гг. примерно на 1,25 м.

Статистически значимые коэффициенты регрессии (1), описывающей депрессию русла р. Волги ниже ВГЭС, равны: $a_1 = 3,00 \cdot 10^{-4}$; $a_2 = -2,25 \cdot 10^{-2}$; $a_3 = -5,35 \cdot 10^{-4}$; $a_{23} = a_{32} = 1,17 \cdot 10^{-7}$; $b = 32,54$. Средняя ошибка аппроксимации составляет $\bar{A} = 0,097$.

Таким образом, регрессия (1), описывающая депрессию русла р. Волги ниже Волжской ГЭС, имеет вид

$$h(Q^c, \tau, L) = a_1 Q^c + a_2 \tau + a_3 L + 2a_{23} \tau L + b. \quad (2)$$

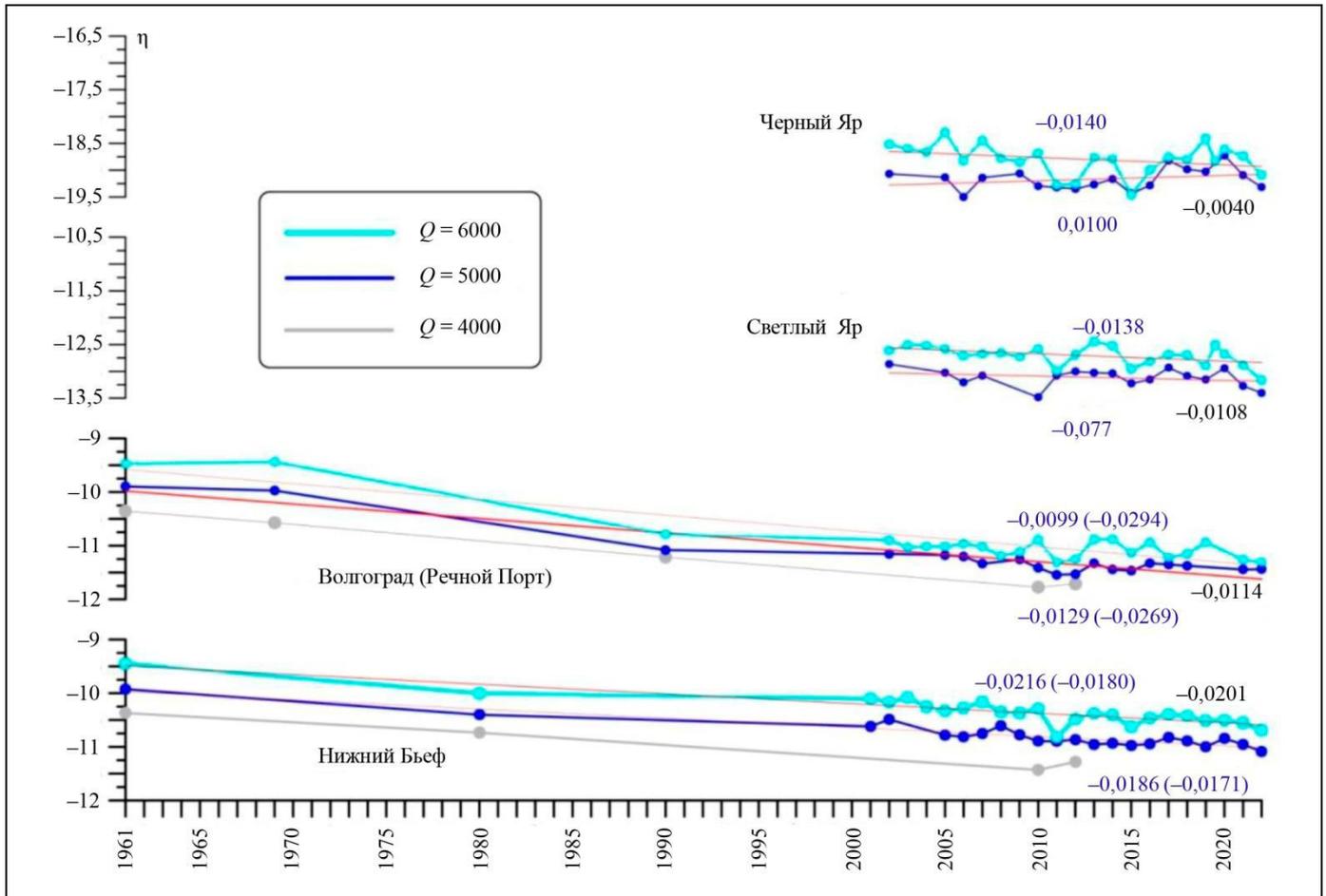


Рис. 1. Данные измерений на четырех гидропостах ниже плотины Волжской ГЭС. Синим цветом приведены значения среднего годового понижения уровней воды на соответствующем гидропосту с учетом всех данных. В круглых скобках указаны аналогичные значения только за период с 2001 г. Черным цветом даны значения, усредненные по Q

Функция $\varphi(Q_1^c, \tau_1, \tau_2, L)$ (см. п. 1.3), построенная на основании формулы (2), имеет вид

$$\varphi(Q_1^c, \tau_1, \tau_2, L) = Q_1^c - \frac{(a_2 + 2a_{23}L)}{a_1}(\tau_2 - \tau_1). \quad (3)$$

Построенные с использованием выражения (3) формулы для расчета виртуальных расходов, лежащих в основе описанных в п. 1.3–1.5 алгоритмов построения ретроспективной $K_{24}^r(1975)$, современной $K_{24}^r(2005)$ и прогнозной $K_{24}^{\text{mod}}(2052)$ К-структур, имеют вид

$$\begin{aligned} Q_{1975}^c(Q_{2022}^c, L) &= Q_{2022}^c - 3525 - 0,0367L, \\ Q_{2005}^c(Q_{2022}^c, L) &= Q_{2022}^c - 1275 - 0,0133L, \\ Q_{2052}^c(Q_{2022}^c, L) &= Q_{2022}^c + 2250 - 0,0235L. \end{aligned} \quad (4)$$

При реализации описанного в п. 1.3 алгоритма «склейки» карт затопления из ККМЗ для обеспечения необходимой точности $\varepsilon_c = \max(0,05; 0,097) = 0,097$ каждая из них в пределах моделируемой территории конструировалась

из девяти фрагментов карт ККМЗ, параметры которых найдены при помощи формул (4). Протяженность каждого фрагмента карты вдоль русла р. Волги составила $\Delta L = 7500$ м. Разность значений расходов р. Волги для соседних фрагментов карт составила $\Delta Q = 250$ м³/с.

При построении всех К-структур использовался размер выборки $\Theta = 30$ и $n^{\text{lim}} = 0,85$. Уравнение регрессии, используемое в описанном в п. 1.5 алгоритме поиска гидрографа $\hat{G}^c = (\hat{Q}^c, \hat{t}_c)$, используемого при построении приближенных проектных структур $\Gamma_1^{\text{mod}}(2052)$ ВАП, имеет вид $Q = 237t + 23117$. Найденные с его помощью параметры $\tilde{Q}_\tau^c, \tilde{t}_\tau^{\text{max}}$ приближенных гидрографов \tilde{G}_τ Волжской ГЭС, используемые при построении обобщенного гидрографа \hat{G}_o^c и ближайшего к нему гидрографа из ККМЗ G^c , а также относительные погрешности приближения $\varepsilon_\tau, \tau = 1975, \dots, 2005$ представлены в таблице. Рассчитанные на основе

этих данных значения параметров гидрографов равны $\hat{G}_o^c = (24\ 302,5)$ и $G^{уст} = (24\ 250,5)$. Устойчивое снижение значения ε_τ по мере роста τ можно объяснить переходом Волжской ГЭС в последние десятилетия к относительно постоянному плановому двухступенчатому гидрографу весенних пусков.

Значение $Q^{уст} = 24\ 250\ \text{м}^3/\text{с}$ использовалось в формулах (4) для поиска фрагментов карт ККМЗ при построении карт и расчете площадей элементов ретроспективной $K_{24}^r(1975)$, современной $K_{24}^r(2005)$ и прогнозной $K_{24}^{mod}(2052)$ К-структур ВАП (рис. 2, 3). На рис. 3 также выделены границы 12-ти зон структуры Γ_2 (очерчены сплошными линиями). Цветами отмечены устойчиво затапливаемые (зеленый и желтый), неустойчиво затапливаемые (голубой и оранжевый) и незатапливаемые (фиолетовый и красный) структурные элементы. На рис. 4 показаны соответствующие этим структурам карты устойчиво затапливаемой территории. Анализ этих рисунков показывает, что основную часть территории ВАП занимают природные, социоприродные, природохозяйственные и некадастрированные территории. Сравнение структур $K_{24}^r(1975)$, $K_{24}^r(2005)$ и $K_{24}^{mod}(2052)$ на рис. 2–4 позволяет наблюдать прогрессирующую природно-техногенную деградацию устойчиво затапливаемой территории ВАП, служащей биотопом ее пойменной экосистемы, и К-структуры, определяющей эффективность ее социохозяйственной системы. Так, прогнозируемое снижение величины площади устойчиво затапливаемой территории за 77 лет составляет 62 %, в том числе природной – 44 %, природохозяйственной – 78 %, некадастрированной – 60 %.

Параметры приближенных гидрографов Волжской ГЭС, используемые при построении обобщенного гидрографа, и ошибки приближения

τ	\tilde{Q}_τ^c	\tilde{t}_τ^{\max}	ε_τ
1975	24539	6	0,0837
1976	24539	6	0,0835
1977	24539	6	0,0705
1978	24302	5	0,0644
1979	24302	5	0,0641
1980	24302	5	0,0640
1981	24302	5	0,0640
1982	24302	5	0,0637
1983	24302	5	0,0554
1984	24302	5	0,0552
1985	24539	6	0,0552
1986	24302	5	0,0548
1987	24302	5	0,0528
1988	24302	5	0,0522
1989	24539	6	0,0511
1990	24539	6	0,0508
1991	24302	5	0,0458
1992	24302	5	0,0457
1993	24302	5	0,0457
1994	24302	5	0,0455
1995	24302	5	0,0408
1996	24302	5	0,0408
1997	24302	5	0,0405
1998	24302	5	0,0377
1999	24302	5	0,0375
2000	24302	5	0,0375
2001	24302	5	0,0371
2002	24302	5	0,0327
2003	24302	5	0,0325
2004	24302	5	0,0316
2005	24302	5	0,0307

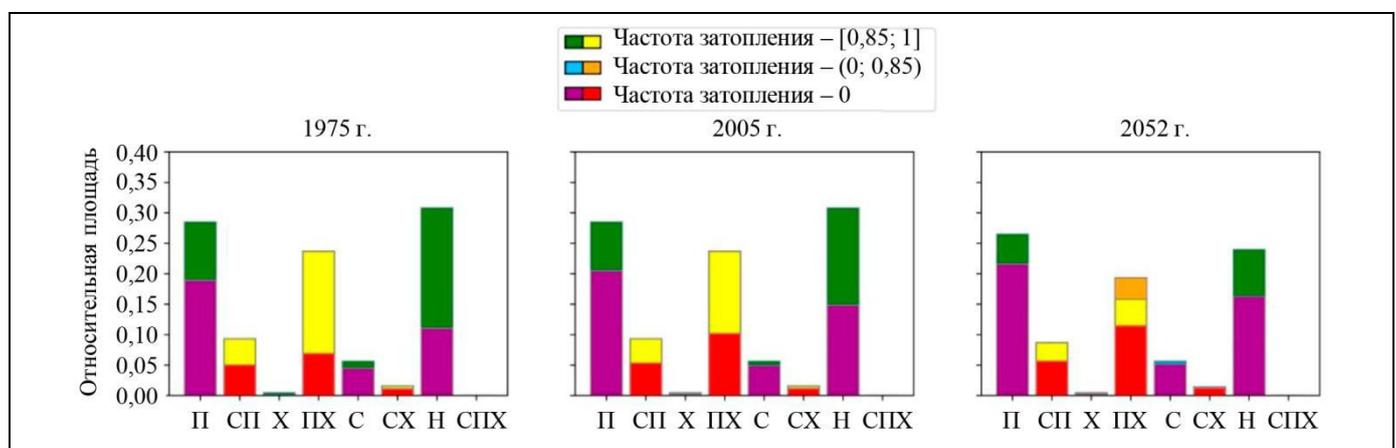


Рис. 2. Диаграммы площадей природных (II), социоприродных (СП), хозяйственных (X), природохозяйственных (ПХ), некадастрированных (Н) и социоприродохозяйственных (СПХ) элементов К-структур $K_{24}^r(1975)$, $K_{24}^r(2005)$ и $K_{24}^{mod}(2052)$ территории ВАП

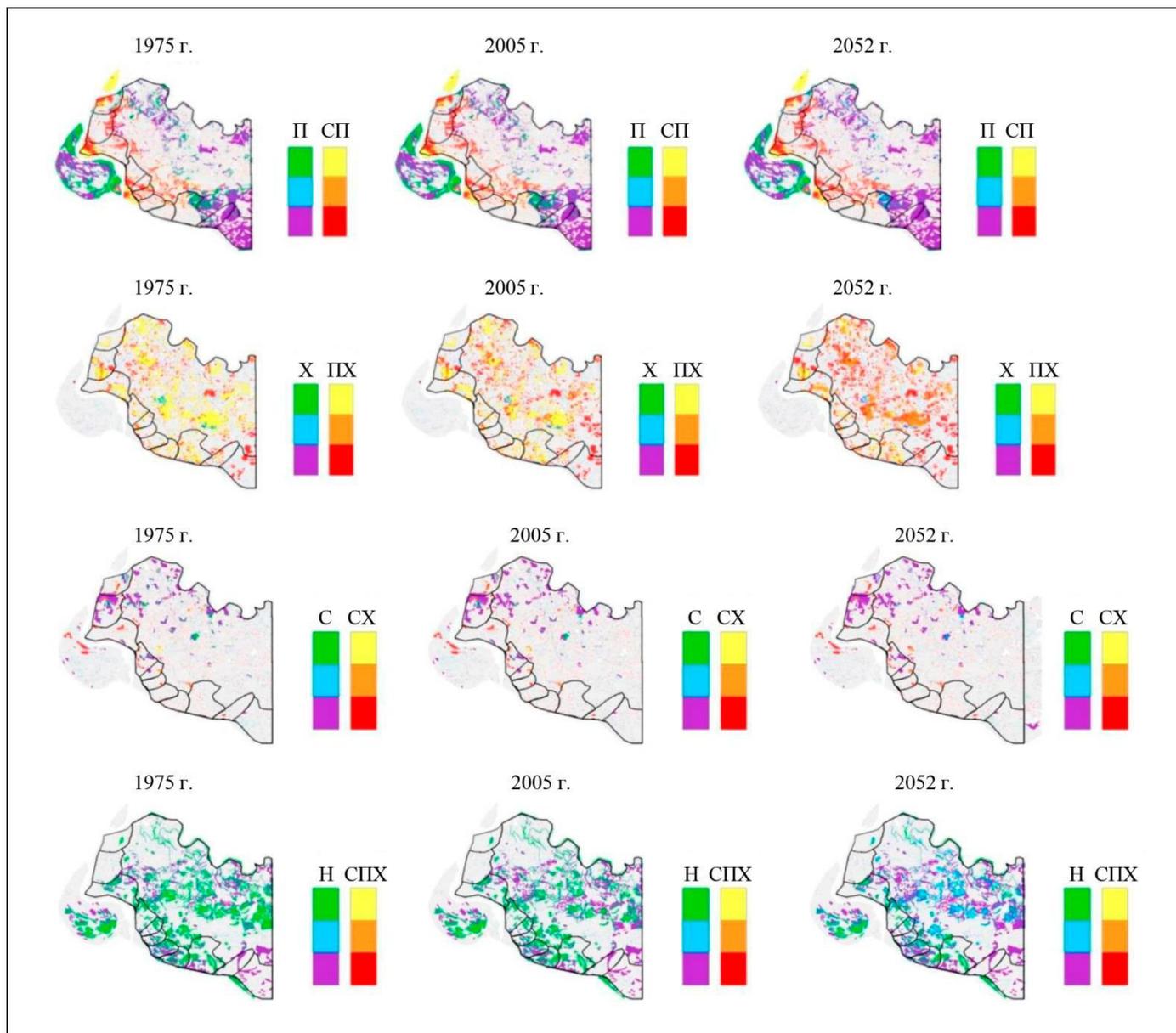


Рис. 3. Карты природных (П), социоприродных (СП), хозяйственных (Х), природохозяйственных (ПХ), некадастрированных (Н) и социоприродохозяйственных (СПХ) элементов К-структур $K_{24}^r(1975)$, $K_{24}^r(2005)$ и $K_{24}^{mod}(2052)$ территории ВАП

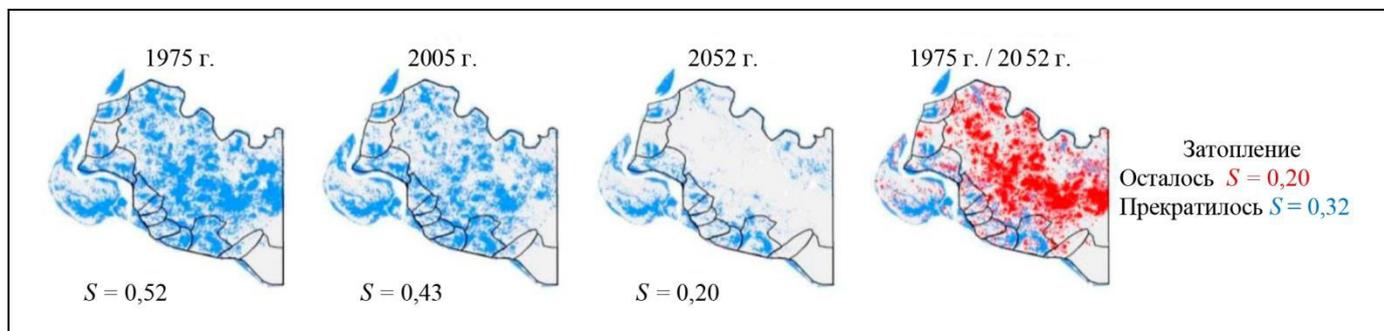


Рис. 4. Карты и относительные площади устойчиво затопляемой территории в К-структурах ВАП: ретроспективной $K_{24}^r(1975)$, современной $K_{24}^r(2005)$ и прогнозной $K_{24}^{mod}(2052)$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье представлен метод моделирования долгосрочной динамики К-структуры пойменных территорий зарегулированных рек, включающий в себя алгоритм построения корпуса карт моделирования затоплений (ККМЗ), регрессионную модель пространственно неоднородной депрессии главного пойменного русла, алгоритм приближенного построения ретроспективных и прогнозных карт затопления, модель 24-элементной К-структуры пойменной территории, алгоритм построения ретроспективных и прогнозных К-структур. Реализация метода для конкретных пойменных территорий опирается на методы экспертного оценивания, геоинформационного, численного гидродинамического моделирования, высокопроизводительные вычисления, методы статистического анализа данных природных наблюдений и результатов вычислительных экспериментов.

Представлены результаты численной реализации этого метода для территории северной части Волго-Ахтубинской поймы, демонстрирующие прогрессирующую природно-техногенную деградацию ее устойчиво затопляемой территории, служащей биотопом пойменной экосистемы, и К-структуры, определяющей эффективность ее социохозяйственной системы. Эти результаты обосновывают актуальность гидротехнических проектов стабилизации гидрологической структуры ВАП. Территориальная распределенность и вариативность параметров гидротехнических проектов актуализируют задачу поиска оптимальной К-структуры.

Представленные модели и результаты их численной реализации являются основой алгоритма поиска параметров гидротехнических проектов, обеспечивающих устойчивость оптимальной К-структуры пойменных территорий. Этот алгоритм и результаты его численной реализации для территории северной части Волго-Ахтубинской поймы будут представлены во второй части статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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. – Vyp. 16. – P. 224–242 (In Russian)]
2. 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)]
3. Асарин А.Е., Ткачëв 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)]
4. Буланов Е. П. Понижение кривой расходов в нижнем бьефе Волжской ГЭС, связанное с общими размывами русла // XV пленарное межвузовское координационное совещание по проблеме эрозийных, русловых и устьевых процессов. Доклады и краткие сообщения. – Волгоград–Москва: Перемена, 2000. [Bulanov, Ye.P. Poniizheniye krivoy raskhodov v nizhnem b'yefe Volzhskoy GES, svyazannoye s obshchimi razmyvami rusla // XV plenarnoye mezhvuzovskoye koordinatsionnoye soveshchaniye po probleme eroziynykh, ruslovykh i ust'yevykh protsessov. Doklady i kratkiye soobshcheniya. – Volgograd–Moskva: Peremena, 2000. (In Russian)]
5. Мажбиц Г.Л., Буланов Е.П. Изменение положения кривой связи расходов и уровней воды и русловые процессы в нижнем бьефе Волжской ГЭС // Материалы Всесоюзной научно-практической конференции «Водные ресурсы Волги: настоящее и будущее, проблемы управления». – Астрахань, 2007. [Mazhbits, G.L., Bulanov, Ye.P. Izmeneniye polozheniya krivoy svyazi raskhodov i urovney vody i ruslovyye protsessy v nizhnem b'yefe Volzhskoy GES // Materialy Vsesoyuznoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Vodnyye resursy Volgi: nastoyashcheye i budushcheye, problemy upravleniya». – Astrakhan', 2007. (In Russian)]
6. Górski, K., van den Bosch, L.V., van de Wolfshaar, K.E., et al. Post-damming Flow Regime Development in a Large Lowland River (Volga, Russian Federation): Implications for Floodplain Inundation and Fisheries // River Research and Applications. – 2012. – Vol. 28, iss. 8. – P. 1121–1134.
7. Hohensinner, S., Grupe, S., Klasz, G., Payer, T. Long-Term Deposition of Fine Sediments in Vienna's Danube Floodplain before and after Channelization // Geomorphology. – 2022. – Vol. 398. – Art. ID 108038. – DOI: 10.1016/j.geomorph.2021.108038.
8. 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. – M.: Energoatomizdat, 1983. – 217 s. (In Russian)]
9. Jardim, P.F., Melo, M.M.M., Ribeiro, L.D.C. et al. A Modeling Assessment of Large-Scale Hydrologic Alteration in South American Pantanal Due to Upstream Dam Operation // Frontiers in Environmental Science. – 2020. – Vol. 8. – Art. ID 567450. – DOI: 10.3389/fenvs.2020.567450.
10. 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)].
11. 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.E., et al. Analiz ekologicheskikh posledstviy ekspluatatsii Volgogradskogo vodokhranilishcha dlya sokhraneniya bioraz-noobraziya osnovnykh vodno-bolotnykh territoriy Nizhney Volgi. Otchet o NIR. – Moscow: FGU «GOIN», 2010. – 675 s. (In Russian)]
12. Fernandes, M.R., Aguiar, F.C., Martins, M.J., et al. Long-Term Human-Generated Alterations of Tagus River: Effects of Hydrological Regulation and Land-Use Changes in Distinct River Zones // *Catena*. – 2020. – Vol. 188. – Art. ID 104466. – DOI: 10.1016/j.catena.2020.104466.
 13. Li, W.-J., Yu, S.-Y., Pan, J., et al. A 2000-Year Documentary Record of Levee Breaches on the Lower Yellow River and Their Relationship with Climate Changes and Human Activities // *Holocene*. – 2021. – Vol. 31, no. 3. – P. 333–345.
 14. Lu, C., Jia, Y., Jing, L., et al. Shifts in River-Floodplain Relationship Reveal the Impacts of River Regulation: A Case Study of Dongting Lake in China // *Journal of Hydrology*. – 2018. – Vol. 559. – P. 932–941. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.03.004>.
 15. Ablat, X., Wang, Q., Arkin, N., et al. Spatiotemporal Variations and Underlying Mechanism of the Floodplain Wetlands in the Meandering Yellow River in Arid and Semi-arid Regions // *Ecological Indicators*. – 2022. – Vol. 136. – Art. no. 108709. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108709>.
 16. Wu, C., Webb, J.A., Stewardson, M.J. Modelling Impacts of Environmental Water on Vegetation of a Semi-Arid Floodplain–Lakes System Using 30-Year Landsat Data // *Remote Sens.* – 2022. – Vol. 14, no. 3. – Art. no. 708.
 17. Golub, V.B., Chuvashov, A.V., Bondareva, V.V., et al. Results of Long-Term Observations on Stationary Transects in the Volga–Akhtuba Floodplain // *Biology Bulletin*. – 2020. – Vol. 47. – P. 1309–1317.
 18. Shi, L., Wang, Y., Jia, Y., et al. Vegetation Cover Dynamics and Resilience to Climatic and Hydrological Disturbances in Seasonal Floodplain: The Effects of Hydrological Connectivity // *Frontiers in Plant Science*. – 2017. – Vol. 8. – P. 1–11.
 19. Han, B., Benner, S.G., Bolte, J.P. et al. Coupling Biophysical Processes and Water Rights to Simulate Spatially Distributed Water Use in an Intensively Managed Hydrologic System // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* – 2017. – Vol. 21. – P. 3671–3685
 20. Fernandes, L.F.S., Marques, M.J., Oliveira, P.C., Moura, J.P. Decision Support Systems in Water Resources in the Delineated Region of Douro – Case Study in Pinhao River Basin, Portugal. // *Water Environ.* – 2019. – Vol. 33. – P. 350–357.
 21. Weng, S.Q., Huang, G.H., Li, Y.P. An Integrated Scenario-Based Multi-criteria Decision Support System for Water Resources Management and Planning – A Case Study in the Haihe River Basin // *Expert Syst. Appl.* – 2010. – Vol. 37. – P. 8242–8254.
 22. McCord, J., Carron, J.C., Liu, B., Rhoton, S., et al. Pecos River Decision Support System: Application for Adjudication Settlement and River Operations EIS // *OpenSIUC*. – 2004. – URL: http://opensiuc.lib.siu.edu/ucowrconfs_2004/95?utm_source=opensiuc.lib.siu.edu%2Fucowrconfs_2004%2F95&utm_medium=PDF&utm_campaign=PDFCoverPages.
 23. Lam, F., Bolte, J., Santelmann, M., Smith, C. Development and Evaluation of Multiple Objective Decision Making Methods for Watershed Management Planning // *J. Am. Water Resour. Assoc.* – 2002. – Vol. 38. – P. 517–529.
 24. Misganaw, D., Guo, Y., Knapp, H.V., Bhowmik, N.G. The Illinois River Decision Support System (ILRDSS). Report Prepared for the Illinois Department of Natural Resources. – Illinois: Illinois State Water Survey, 1999. – 50 p.
 25. Ge, Y., Li, X., Huang, C., Nan, Z. A Decision Support System for Irrigation Water Allocation along the Middle Reaches of the Heihe River Basin, Northwest China // *Environmental Modelling & Software*. – 2013. – Vol. 47. – P. 182–192.
 26. Wriggers, P., Kultsova, M., Kapysh, A., et al. Intelligent Decision Support System for River Floodplain Management // *Communications in Computer and Information Science*. – 2014. – Vol. 466. – P. 195–213.
 27. O'Brien, G., Wepener, V. Regional-Scale Risk Assessment Methodology Using the Relative Risk Model (RRM) for Surface Freshwater Aquatic Ecosystems in South Africa // *Water SA*. – 2012. – Vol. 38, no. 2. – P. 153–165.
 28. Tariq, M.A.U.R., Rajabi, Z., Muttill, N. An Evaluation of Risk-Based Agricultural Land-Use Adjustments under a Flood Management Strategy in a Floodplain // *Hydrology*. – 2021. – Vol. 8, no. 1. – Art. no. 53. – DOI: 10.3390/hydrology8010053.
 29. Lu, Y., Qin, F., Chang, Z., Bao, S. Regional Ecological Risk Assessment in the Huai River Watershed during 2010–2015 // *Sustainability*. – 2017. – Vol. 9, no. 12. – Art. no. 2231.
 30. Rincón, D., Velandia, J.F., Tsanis, I., Khan, U.T. Stochastic Flood Risk Assessment under Climate Change Scenarios for Toronto, Canada Using CAPRA // *Water*. – 2022. – Vol. 14, no. 2. – Art. no. 227. – DOI: <https://doi.org/10.3390/w14020227>.
 31. Modi, A., Kapoor, V., Tare, V. River Space: A Hydro-Bio-Geomorphic Framework for Sustainable River-Floodplain Management // *Science of the Total Environment*. – 2022. – Vol. 812. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151470>.
 32. Scenarios and Indicators for Sustainable Development – Towards A Critical Assessment of Achievements and Challenges: Printed Edition of the Special Issue Published in Sustainability / Ed. by Joachim, H. Spangenberg. – Basel: Multi-disciplinary Digital Publishing Institute, 2019. – 180 p.
 33. Ougolnitsky, G.A., Anopchenko, T.Yu., Gorbaneva, O.I., et al. Systems Methodology And Model Tools For Territorial Sustainable Management // *Advances in Systems Science and Applications*. – 2018. – Vol. 18, no. 4. – P. 136–150.
 34. Бурков В.Н., Новиков Д.А., Щепкин А.В. Механизмы управления эколого-экономическими системами / под ред. Академика С.Н. Васильева. – М.: Изд-во физико-математической литературы, 2008. – 244с. [Burkov, V.N., Novikov, D.A., Shchepkin, A.V. Mekhanizmy upravleniya ekologo-ekonomicheskimi sistemami / pod red. Akademika S.N. Vasil'yeva. – M.: Izd-vo fiziko-matematicheskoy literatury, 2008. – 244 s. (In Russian)]
 35. 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). [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). (In Russian)]
 36. 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)]

37. Voronin, A., Khoperskov, A., Isaev, I., Klikunova, A. Model of the Floodplain Territories Structure // *Adv. Syst. Sci. Appl.* – 2020. – Vol. 20. – P. 153–165.
38. Isaeva, I.I., Voronin, A.A., Khoperskov, A.V., Kharitonov, M.A. Modeling the Territorial Structure Dynamics of the Northern Part of the Volga-Akhtuba Floodplain // *Computation.* – 2022. – Vol. 10, iss. 4. – DOI: <https://doi.org/10.3390/computation10040062>.
39. Khrapov, S.S., Khoperskov, A.V. Application of Graphics Processing Units for Self-Consistent Modelling of Shallow Water Dynamics and Sediment Transport // *Lobachevskii Journal of Mathematics.* – 2020. – Vol. 41, no. 8. – P. 1475–1484.
40. Храпов С.С., Агафонникова Е.О., Кликунова А.Ю. и др. Численное моделирование самосогласованной динамики поверхностных вод, влекомых и взвешенных наносов: I. Влияние промышленной добычи песка // *Математическая физика и компьютерное моделирование.* – 2022. – Т. 25, № 3. – С. 31–57. – DOI: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2022.3.3> [Khrapov, S.S., Agafonnikova, Ye.O., Klikunova, A.Yu. i dr. Chislennoye modelirovaniye samosoglasovannoy dinamiki poverkhno-stnykh vod, vlekomykh i vzveshennykh nanosov: I. Vliyaniye promyshlennoy dobychi peska // *Matematicheskaya fizika i komp'yuternoye modelirovaniye.* – 2022. – Vol. 25, no. 3. – P. 31–57. – DOI: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2022.3.3>. (In Russian)]
41. Храпов С.С. Численное моделирование самосогласованной динамики поверхностных и грунтовых вод // *Математическая физика и компьютерное моделирование.* – 2021. – Т. 24, вып. 3. – С. 45–62. – DOI: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2021.3.5>. [Khrapov, S.S. Chislennoye modelirovaniye samosoglasovannoy dinamiki poverkhnostnykh i gruntovykh vod // *Matematicheskaya fizika i komp'yuternoye modelirovaniye.* – 2021. – Vol. 24, vyp. 3. – P. 45–62. – DOI: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2021.3.5>. (In Russian)]
42. Храпов С.С. Численное моделирование гидродинамических аварий: размыв дамб и затопление территорий // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия.* – 2023. – Т. 10, № 2. – С. 357–373. [Khrapov, S.S. Chislennoye modelirovaniye gidrodinamicheskikh avariyy: razmyv damb i zatopleniye territoriy // *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Matematika. Mekhanika. Astronomiya.* – 2023. – Vol. 10, no. 2. – P. 357–373. (In Russian)]
43. Klikunova, A.Yu., Khoperskov, A.V. Creation of Digital Elevation Models for River Floodplains // *CEUR Workshop Proceedings.* – 2019. – Vol. 2391. – P. 275–284.
44. Klikunova, A.Yu., Khoperskov, A.V. Numerical Hydrodynamic Model of the Lower Volga // *Journal of Physics: Conference Series.* – 2018. – Vol. 1128. – Art. no. 012087. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1128/1/012087>.
45. Храпов С.С., Хоперсков А.В., Кузьмин Н.М. Численная схема для моделирования динамики поверхностных вод на основе комбинированного SPH-TVD-подхода // *Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии.* – 2011. – Т. 12, № 1. – С. 282–297. [Khrapov, S.S., Khoperskov, A.V., Kuz'min, N.M. Chislennoyaya skhema dlya modelirovaniya dinamiki poverkhnostnykh vod na osnove kombinirovannogo SPH-TVD-podkhoda // *Vychislitel'nyye metody i programmirovaniye: novyye vychislitel'nyye tekhnologii.* – 2011. – Vol. 12, no. 1. – P. 282–297. (In Russian)]
46. Khrapov, S., Pisarev, A., Kobelev, I., et. al. The Numerical Simulation of Shallow Water: Estimation of the Roughness Coefficient on the Flood Stage // *Advances in Mechanical Engineering.* – 2013. – Vol. 2013. – Art. ID 787016. – 11 p.
47. Dyakonova, T., Khoperskov, A., Khrapov, S. Numerical Model of Shallow Water: The Use of NVIDIA CUDA Graphics Processors // *Communications in Computer and Information Science.* – 2016. – Vol. 687. – P. 132–145.
48. Воронин А.А., Елисеева М.В., Писарев А.В. и др. Имитационные модели динамики поверхностных вод с использованием данных дистанционного зондирования: влияние рельефа местности // *Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии.* – 2012. – № 3 (19). – С. 54–62. [Voronin, A.A., Yeliseyeva, M.V., Pisarev, A.V. i dr. Imitatsionnyye modeli dinamiki poverkhnostnykh vod s ispol'zovaniyem dannykh distantsionnogo zondirovaniya: vliyaniye rel'yefa mestnosti // *Prikaspiyskiy zhurnal: upravleniye i vysokkiye tekhnologii.* – 2012. – No. 3 (19). – P. 54–62. (In Russian)]
49. 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 обработки 06.12.2023.
Принята к публикации 07.12.2023.

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

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

Васильченко Анна Анатольевна – канд. техн. наук,
✉ 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,
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-7912-9963>

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

Агафонникова Екатерина Олеговна – доцент,
✉ agafonnikova@volsu.ru
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-2862-4531>

Волгоградский государственный университет, г. Волгоград.

© 2023 г. Исаева И.И., Харитонов М.А., Васильченко А.А., Воронин А.А., Хоперсков А.В., Агафонникова Е.О.



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 I: Modeling Complex Structure Dynamics

I.I. Isaeva, M.A. Kharitonov, A.A. Vasilchenko,
A.A. Voronin, A.V. Khoperskov, and E.O. Agafonnikova

Volgograd State University, Volgograd, Russia

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

Abstract. This two-part study presents an approach to designing a sustainable management system for the environmental socio-economic systems (ESESs) of floodplain territories based on modeling their structure dynamics and hydrotechnical projects on their hydrological regime stabilization. The objective of management is to achieve and maintain the optimal stationary complex structure of a floodplain territory, which is characterized by the best design-achievable correspondence between the functional purpose of its fragments and the nature of their spring flooding. The approach rests on the complex structure dynamics model of a floodplain territory that combines variable hydrological and permanent functional properties. This dynamic model, supplemented by an expert model of the socio-economic potentials of the floodplain territory state, yields optimal parameters of hydrotechnical and socio-economic projects. Implementing the approach for a particular floodplain ESES involves optimization, expert assessment, geoinformation and numerical hydrodynamic modeling, high-performance computing, and the statistical analysis of natural observation data and the results of computational experiments. The retrospective, modern, and forecasted complex structures of the northern part of the Volga–Akhtuba floodplain are numerically built considering the spatial heterogeneity of the riverbed degradation effect of the Volga. These numerical results are used to develop an algorithm for finding the parameters of hydrotechnical projects to ensure an optimal sustainable complex structure of the floodplain territory. The algorithm and the results of its numerical implementation will be presented in part II of the study.

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

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