

## ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЕМ ПОЙМЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

**Исаева И. И.<sup>1</sup>**

(ФГАОУ ВО Волгоградский государственный  
университет, Волгоград)

*На примере Волго-Ахтубинской поймы исследована проблема экологической и социохозяйственной деградации слабоустойчивых социоприродохозяйственных систем, которая вызвана потерей устойчивости ее системообразующего фактора – паводкового гидрологического режима, а также неуправляемым характером социохозяйственного развития. Представлен подход к анализу ее состояния на основе статистического анализа данных природных наблюдений, гидродинамического и геоинформационного имитационного моделирования с использованием высокопроизводительных вычислений. Предложены модели гидрологической и функциональной структуры, описывающие состояние пойменных территорий. Определены основные акторы и возможность их вовлечения в систему эколого-экономического управления. Теоретическую основу этой системы составляет система математических моделей, в которую входят модели гидротехнических проектов, стабилизирующих гидрологический режим поймы, и теоретико-игровые модели управления социохозяйственным развитием территории.*

Ключевые слова: социоприродохозяйственные системы, Волго-Ахтубинская пойма, геоинформационное моделирование, анализ рисков, иерархические теоретико-игровые модели, устойчивое развитие.

### **1. Введение**

Основой системы эколого-экономического управления социоприродохозяйственными системами (СПХС) [5] является их устойчивость, обеспечивающая, в частности, наличие нормативного множества действий хозяйствующих субъектов, отвечающего допустимому уровню экологического ущерба. Однако в слабоустойчивых СПХС такое множество либо не существует, либо слишком мало для эффективного хозяйствования. Поэтому такие системы достаточно быстро теряют устойчивость в процессе своего функционирования. Типичным представителем

---

<sup>1</sup> Инесса Игоревна Исаева, аспирант (isaeva-inessa@mail.ru).

слабоустойчивых СПХС являются речные и в особенности пойменные системы, созданные в результате строительства гидроэлектростанций на крупных реках, регулирующих их природные паводки. Волго-Ахтубинская пойма (ВАП) является ярким примером слабоустойчивых СПХС. Последствиями деятельности Волжской ГЭС (ВГЭС), установленной на реке Волге в 60-х годах XX века, повлекла за собой необратимые изменения в паводковом гидрологическом режиме (ППР) пойменных территорий, который характеризуется объемом весеннего паводка, русловой структурой и рельефом территории. Была отмечена деградация русловой структуры, а именно размыв дна в нижнем бьефе реки Волги, который повлек за собой понижение уровня воды в магистральных руслах на 1,3–1,4 м (к 1998 г.) по сравнению с 1962 г. [4].

Бесконтрольные процессы урбанизации и определение земель под сельскохозяйственную деятельность без учета установленного порядка затопления ВАП также привели к необходимости ввода ограничений на объемы паводковых вод, поступающих на пойменные территории.

Последствием такой антропогенной деятельности явилось обезвоживание и, соответственно, экологическая деградация ВАП. Необходимо создать систему эколого-экономического управления, которая бы позволила определить пути развития пойменных территорий в направлении устойчивого состояния, а также поддержания такого состояния в будущем с учетом интересов акторов рассматриваемой системы.

Основой построения системы эколого-экономического управления являются карты паводкового затопления территорий. Для построения цифровой модели рельефа и численного гидродинамического моделирования паводковой динамики применялся программный комплекс «ЭКОГИС» [5]. Используемая в нем численная модель динамики поверхностных вод [7] учитывает все основные факторы затопления территории: поверхностные и подземные источники воды – плотины, осадки, ключи, выход грунтовых вод на поверхность суши; рельеф местности с учетом антропогенной застройки территорий и рельефа дна водоемов; свойства подстилающей поверхности –

придонное трение, инфильтрация (новая многослойная нелинейная модель); внутреннее вязкое трение; ветровое воздействие – нагонные волны; вращение Земли – сила Кориолиса; испарение. Реализованы параллельные OpenMP-, CUDA-, OpenMP-CUDA-версии расчетного модуля метода CSPH-TVD, позволившие провести большое число имитационных экспериментов по паводковому затоплению территории.

## **2. Модели структур пойменных территорий**

### **2.1. ГИДРОЛОГИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА**

Гидрологические структуры (Г-структуры) пойменных территорий – это связанные иерархически-сетевым способом совокупности ее частей, характеризующиеся некоторыми постоянными параметрами паводкового (меженного) гидрологического режима. Перечень параметров определяется целями моделирования. Основами существования всех видов гидрологических структур являются паводковые (меженные) гидрографы, русловые структуры и рельеф территории. Для разных целей исследования представляют интерес как краткосрочные, так и долгосрочные характеристики пойменных территорий, для изучения которых требуется исследование как краткосрочных, так и долгосрочных Г-структур.

Г<sub>1</sub>-структура: иерархически-сетевая структура «русло – территория» (участки территории, затапливаемые из определенных русел). Основой Г<sub>1</sub>-структуры является иерархически-сетевая структура малых русел пойменной территории, обладающая высокой чувствительностью к величине объема паводковых вод и изменяющаяся по мере развития затоплений: одна часть иерархической русловой структуры превращается в сетевую, другая ее часть исчезает в территориях сплошных затоплений. Поэтому Г<sub>1</sub>-структура обладает высокой динамичностью. Устойчивость ее структурных уровней растет от низших к высшим.

Г<sub>2</sub>-структура: совокупность частей пойменной территории, характеризуемых постоянными частотами паводкового затопления. Ее существование обусловлено существованием функции

распределения случайной величины – объема ежегодного паводкового гидрографа, неизменностью рельефа и русловой структуры пойменной территории. Существование такой структуры требует подтверждения построением соответствующего распределения. Природные или антропогенные изменения любой из основ существования  $\Gamma_2$ -структуры являются причиной ее изменения. Так, например, долгосрочная динамика магистрального русла пойменной территории вызывает соответствующую динамику ее  $\Gamma_2$ -структуры.

На основе статистической обработки результатов вычислительных гидродинамических имитаций реальных паводковых затоплений территории поймы за 1962–2020 гг. был определен период существования  $\Gamma_2$ -структуры  $T$  для расчета плотности распределения параметров первой ступени паводкового гидрографа ВГЭС (см. рис. 1).

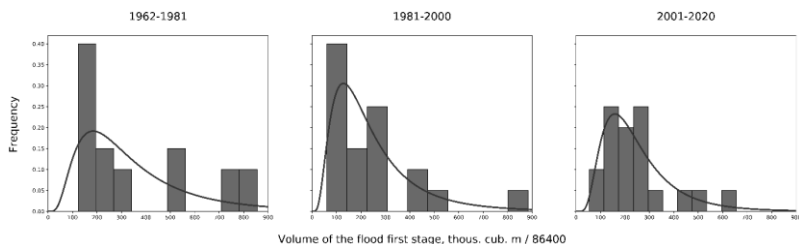


Рис. 1. Частотные распределения объема первой фазы паводкового гидрографа ВГЭС и их аналитические аппроксимации логнормальным распределением за три 20-летних периода

В зависимости от целей моделирования  $\Gamma_2$ -структура может быть описана как в виде агрегированных величин, так и представлена территориально-распределенной в виде карт. Так, на рис. 2а  $\Gamma_2$ -структура представлена в виде точки на двумерном симплексе, где координаты этой точки ( $\mu_1, \mu_2, \mu_3$ ) представляют собой относительные площади устойчиво затапливаемых ( $S_{st}$ ), неустойчиво затапливаемых ( $S_{un}$ ) и незатапливаемых территорий ( $S_{not}$ ). Порядок деления территорий определяется пороговыми величинами, задаваемыми экспертно. На рис. 2б к устойчиво

затапливаемым территориям отнесены те, частота затопления которых не менее  $n_{threshold} = 0,85$ .

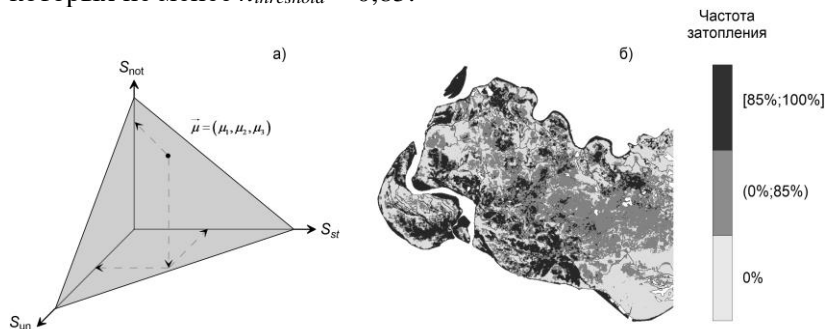


Рис. 2.  $G_2$ -структуры со стратификацией по 3 уровням в виде:  
 а) агрегированных величин; б) карты

## 2.2. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СТРУКТУРА

Функциональная, или социоприродохозяйственная, структура (СПХН-структура) (см. рис. 3) определяется на основе цифровой социоприродохозяйственной кадастровой карты [1], которая разделяет всю территорию на локализованные фрагменты территорий по функциональному признаку на основании видов разрешенного использования. Экспертным подходом выделяется перечень видов разрешенного использования, которые можно отнести к экологическим, экономическим и социальным территориям. Особое значение имеют некадастрированные территории, которые также могут служить ресурсом для развития пойменных территорий.

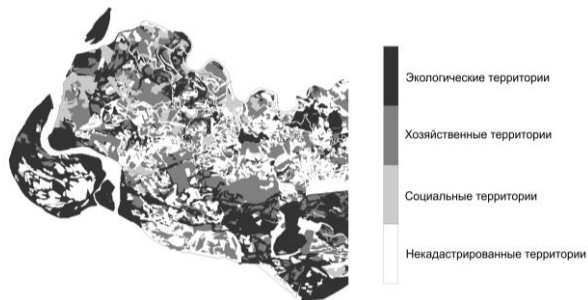


Рис. 3. СПХН-структура пойменных территорий

### **3. Механизмы управления пойменными территориями**

#### **3.1. ОСНОВНЫЕ АКТОРЫ СИСТЕМЫ**

В ходе анализа хозяйственной системы ВАП были выделены следующие субъекты:

- региональный центр (Администрация Волгоградской области) – определяет общую стратегию развития пойменных территорий, контролирует деятельность муниципальных центров, осуществляет институциональное регулирование;
- муниципальные центры (администрации Светлоярского, Ленинского и Среднеахтубинского районов) – реализуют локальные проекты и взаимодействуют с экономическими агентами;
- ВГЭС – имеет важное экономическое значение, вырабатывая электроэнергию, содействуя интересам водного транспорта и осуществляя водоснабжение населенных пунктов;
- экономические агенты – выражают готовность к покупке жилья и земель для хозяйственного освоения в ВАП.

#### **3.2. ТЕОРЕТИКО-ИГРОВЫЕ МОДЕЛИ**

Результатом действия механизмов управления СПХС ВАП, описанных в рамках теоретико-игровых моделей [6], является гидрологическая и социально-экономическая реструктуризация ее территории, превращающая одну ее часть в биотоп стабильной пойменной экосистемы, а другую – в территорию устойчивого социально-экономического развития.

Группируя субъекты, перечисленные в п.3.1, и учитывая их интересы, можно определить целевые функции и порядок взаимодействия в следующих моделях:

- модель управления процессами социохозяйственного освоения – муниципальные центры осуществляют продажу пойменных территорий экономическим агентам в рамках социохозяйственного развития. При этом региональный центр регулирует деятельность муниципальных центров, определяя ставку штрафа для сдерживания темпов урбанизации и социохо-

зыйственного освоения, которые оказывают негативный экологический эффект:

$$(1) \quad \begin{aligned} f_R &= \sigma f_R^0(\Phi) + (1 - \sigma)R(\Phi) \rightarrow \max_R, & f_M &= Sp - R(\Phi) \rightarrow \max_p, \\ f_A &= f_A^0(\Phi(S_f), S) - Sp \rightarrow \max_S, & 0 \leq S &\leq S_0, \quad p \geq 0, R(\Phi) \geq 0, \end{aligned}$$

где  $f_R, f_M, f_A$  – значения целевых функций регионального, муниципального центров и экономического агента;  $f_R^0, f_A^0$  – функции полезности регионального центра и экономического агента;  $\Phi$  – показатель состояния пойменной экосистемы,  $R$  – величина штрафа,  $\sigma \in [0; 1]$  – весовой «экологический» коэффициент,  $S$  – площадь приобретаемой территории;  $p$  – цена продаваемых земель;  $S_f$  – средняя площадь паводкового затопления;  $S_0$  – вся площадь ВАП;

- модель финансирования гидротехнических экологических и социохозяйственных проектов – муниципальные центры стимулируют хозяйствующие субъекты софинансировать гидротехнические проекты, которые несут в себе как экологический (перераспределение паводковых вод в экологические зоны), так и экономический эффект (задержка паводковых вод в руслах для орошения близлежащих хозяйственных территорий):

$$(2) \quad \Phi(R) = \sum_{i=1}^n \varphi_i u_i \rightarrow \max_u, \quad \sum_{i=1}^n (p_i - q_i) u_i \leq R, \quad u_i = \{0; 1\},$$

$$(3) \quad F_i = (f_i - q_i) u_i \rightarrow \max_{q_i}, \quad i = \overline{1, n}, \quad 0 \leq q_i \leq f_i,$$

где  $n$  – число проектов и агентов;  $u = (u_1, \dots, u_n)$  – управление центра ( $u_i = 1$  – проект реализуется,  $u_i = 0$  – проект не реализуется);  $R$  – совокупный ресурс центра;  $n$ -мерные векторы  $p, \varphi, f, q$  означают соответственно стоимость проектов, доходы центра, доходы агентов и величины софинансирования.

Результаты аналитического и численного исследования описанных выше моделей приведены в работах [3, 8, 10].

## 4. Анализ критериев и рисков

### 4.1. ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ МОДЕЛИРУЕМОЙ СИСТЕМЫ

Для определения критериев и рисков, оценивающих состояние пойменных территорий, используется модель комплексной структуры территорий, которая является объединением Г-структуры и СПХН-структуры [9].

Экспертный анализ гидрологических условий эффективно функционирования различных типов элементов территориальной структуры ВАП позволил выделить основные группы таких типов и задать для них характеристические функции критериев состояния, которые определяют степень благоприятствования Г-типа СПХН-типу.

Экологический, экономический и социальный критерии по состоянию на год  $t$  ( $K_t^{ecol}$ ,  $K_t^{econ}$ ,  $K_t^{soc}$ ) вычисляются суммированием значений соответствующих характеристических функций, определенных для всех ячеек цифровой карты, которые имеют подходящий тип рационального использования.

Риск (экологический, экономический, социальный) определяется как относительное изменение соответствующего критерия состояния через период времени  $\theta$ :  $R_{t+\theta} = (K_t - K_{t+\theta}) / K_t$ .

Задача управления состоянием пойменных территорий сводится к следующей задаче оптимизации:

$$(4) R_{t+\theta}(u) \rightarrow \min_{u \in U, Z_{t+\theta}^{(C)} \in \Omega_Z}, \quad \theta = 1, 2, \dots, \Theta,$$

где  $\Omega_Z$  – набор допустимых вариантов комплексной структуры территорий;  $Z_{t+\theta}^{(C)}$  – комплексная структура пойменных территорий в соответствующий год;  $U$  – набор всех возможных вариантов реализации комплексных гидротехнических проектов;  $\Theta$  – горизонт планирования.

### 4.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СЦЕНАРИЕВ РАЗВИТИЯ

Сценарии развития пойменных территорий определяются исходя из концепций слабой и сильной устойчивости, которые включают следующие составляющие: социальное развитие, экономическое развитие, природную стабилизацию.



Основной задачей при реализации данных концепций является недопущение потери суммарного капитала, который выражается ростом территорий неустойчивого затопления.

Так, концепция слабой устойчивости характеризуется устойчивыми затоплениями малой части территорий и включает два вектора развития: урбанизацию оставшейся части территорий или ее хозяйственное освоение с умеренной урбанизацией. Увеличивающимся территориям неустойчивого затопления назначаются соответствующие социохозяйственные типы разрешенного использования.

Концепция сильной устойчивости характеризуется устойчивыми затоплениями большей части территорий и умеренным социохозяйственным освоением. Основной доле неустойчиво затапливаемых территорий возвращается статус устойчиво затапливаемых в результате реализации гидротехнических проектов, а оставшаяся часть переводится в территории для проживания и ведения хозяйственной деятельности.

### ***Литература***

1. ВОРОНИН А.А., ГРЕБЕНЮК С.Е. *Модель оценки ущерба в слабоустойчивых социоприродохозяйственных системах* // Управление большими системами (УБС'2016): материалы XIII Всероссийской школы-конференции молодых ученых / Под ред. Новикова Д.А., Засканова В.Г. – Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Самарский университет, 2016. — С. 300–311.
2. ВОРОНИН А.А., ИСАЕВА И.И. *Моделирование долгосрочной паводковой динамики Волго-Ахтубинской поймы* // XXIII Региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области : тез. докл. – Волгоград : Изд-во ВолГУ, 2019. – С. 31–33.
3. ВОРОНИН А.А., ИСАЕВА И.И. *Модели управления эколого-экономическими проектами в активных системах* // IX Московская международная конференция по исследованию операций (ORM 2018). Труды. В 2 т. / Отв. ред. Ф.И. Ерешко. – М.: МАКС Пресс, 2018. – Т. 2. – С. 14–17.

4. ИВАНОВ В.В., КОРОТАЕВ В.Н. *Влияние гидроузлов на деформации пойменных берегов и русловых форм в низовьях Волги и Кубани // Эрозия почв и русловые процессы. – 2008. – Вып. 16. – С. 224–242.*
5. *Модели и механизмы эколого-экономического управления слабоустойчивыми социоприродохозяйственными системами* [Электронное издание] / Под ред. д-ра физ.-мат. наук, проф. А.А. Воронина. – Волгоград : Консалт, 2015. – 489 с.
6. НОВИКОВ Д.А. *Теория управления организационными системами*. 3-е изд. — М.: Изд-во физ.-мат. Лит-ры, 2012. – 604 с.
7. ХРАПОВ С.С., ПИСАРЕВ А.В., ВОРОНИН А.А., ХОПЕРСКОВ А.В. *Программный комплекс для численного моделирования поверхностных вод на основе комбинированного лагранжево-эйлерова метода с SPH-TVD / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012614040 от 03.05.2012 г. Заявка № 2012611795 от 13.03.2012 г.*
8. ISAEVA I., VORONIN A., KHOPERSKOV A., DUBINKO K., KLIKUNOVA A. *Decision Support System for the Socio-Economic Development of the Northern Part of the Volga-Akhtuba Floodplain (Russia) // Communications in Computer and Information Science. – 2019. – Vol. 1083. – P. 63–77.*
9. KHOPERSKOV A., VORONIN A., KLIKUNOVA A., ISAEVA I. *Control model of the floodplain territories structure // Advances in Systems Science and Applications. – 2020. – Vol. 20(3). – P. 153–165.*
10. VORONIN A., ISAEVA I., KHOPERSKOV A., GREBENJUK S. *Decision Support System for Urbanization of the Northern Part of the Volga-Akhtuba Floodplain (Russia) on the Basis of Interdisciplinary Computer Modeling // Communications in Computer and Information Science. – 2017. – Vol. 754. – P. 419-429.*

## **DESIGN BASELINE OF THE SYSTEM OF ECOLOGIC AND ECONOMIC MANAGEMENT OF FLOODPLAIN TERRITORY DEVELOPMENT**

**Inessa Isaeva**, Volgograd State University, post-graduate student (isaeva-inessa@mail.ru).

*Abstract: On the example of the Volga-Akhtuba floodplain the present paper focuses on the problem of ecologic and socio-economic degradation of weakly stable socio-natural systems. The problem is caused by the loss of stability of the system-forming factor - the flooding hydrological regime, as well as the uncontrollable nature of socio-economic development. We present an approach to the analysis of such systems' state based on statistical analysis of data from natural observations, hydrodynamic and geoinformation simulation using high-performance computing. The paper proposes models of hydrological and functional structures that describe the floodplain territories state. We determine the main actors and possibility of their involvement in the system of ecologic and economic management. The theoretical basis of the system is a mathematical models system, which includes models of hydrotechnical projects that stabilize the floodplain hydrological regime and game-theoretical models of managing the socio-economic development of the territory.*

**Keywords:** ecologic and socio-economic systems, Volga-Akhtuba floodplain, geoinformation modeling, risk analysis, hierarchical game-theoretic models, sustainable development.

УДК 519.6 + 519.8

ББК 22.19+20.1