

УДК + 519.6–519.8

# ПРОЕКТЫ И МЕХАНИЗМЫ ЭКОЛОГО- ЭКОНОМИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОЙМЕННЫМИ ТЕРРИТОРИЯМИ

**А.А. Воронин**

*Волгоградский государственный университет*  
Россия, 400062, Волгоград, пр-т Университетский, 100  
E-mail: [voronin.prof@gmail.com](mailto:voronin.prof@gmail.com)

**И.И. Исаева**

*Волгоградский государственный университет*  
Россия, 400062, Волгоград, пр-т Университетский, 100  
E-mail: [isaeva-inessa@mail.ru](mailto:isaeva-inessa@mail.ru)

**Ключевые слова:** эколого-экономическое управление, слабоустойчивые системы, Волго-Ахтубинская пойма, иерархические игры, гидродинамическое и геоинформационное моделирование.

**Аннотация:** Предложен подход к синтезу системы эколого-экономического управления слабоустойчивыми территориями, сочетающий проекты и механизмы стабилизации их экосистем. Представлены результаты моделирования основных элементов эколого-экономического управления территорией северной части Волго-Ахтубинской поймы.

## 1. Введение

Традиционно проблема эколого-экономического управления (ЭЭУ) социоприродо-хозяйственными системами (СПХС) подразумевает их устойчивость, т.е. наличие экономически допустимого множества безубыточных действий хозяйствующих субъектов [1]. Однако функционирование слабоустойчивых СПХС, связанное с систематическим изъятием или перераспределением значимой части системообразующего природного ресурса, запускает механизмы деградации их экосистем. Типичным представителем таких систем являются пойменные СПХС, инициированные строительством гидроэлектростанций на крупных реках вблизи урбанизированных территорий. Антропогенное изменение природного механизма воспроизводства гидрологического режима пойменных экосистем, постепенно разрушая механизмы их воспроизводства, в конечном счете уничтожает хозяйственную базу и среду комфортного проживания таких СПХС.

Целью ЭЭУ слабоустойчивыми СПХС является в первую очередь стабилизация их экосистем и во вторую – обеспечение ее устойчивого существования соответствующими механизмами управления. Для достижения этой цели необходимо решение следующих задач:

- создание когнитивной модели функционального взаимодействия основных подсистем и факторов социоприродохозяйственной динамики слабоустойчивых СПХС;
- создание количественной модели динамики факторов воспроизводства слабоустойчивых СПХС и прогноза их будущего состояния;
- анализ условий стабильного существования экосистем слабоустойчивых СПХС;

- создание моделей экологических проектов и механизмов, стабилизирующих состояние слабоустойчивых СПХС;
- создание механизмов управления, обеспечивающих устойчивость и социально-экономическое развитие СПХС.

Важной особенностью этих задач является взаимозависимость параметров устойчивого состояния, проектов и механизмов его поддержки.

## 2. Модель эколого-экономического управления СПХС северной части Волго-Ахтубинской поймы

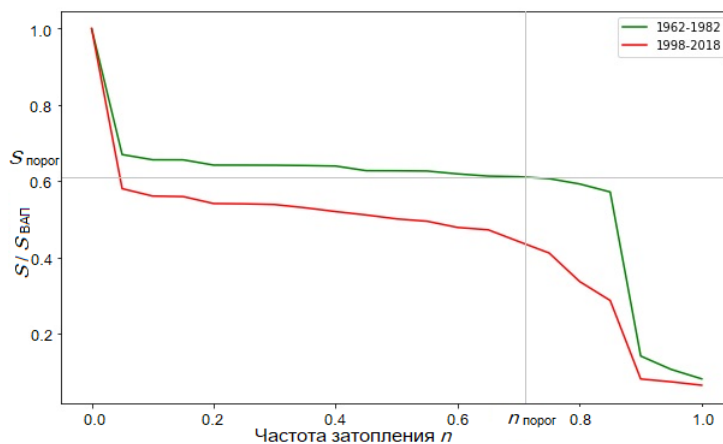
Представим результаты синтеза основных составляющих системы ЭЭУ СПХС северной части Волго-Ахтубинской поймы (ВАП). Анализ когнитивной модели функционального взаимодействия основных подсистем и факторов социоприродохозяйственной динамики ВАП показал, что главными факторами ее прогрессирующего природно-техногенного обезвоживания и, соответственно, деградации ее пойменной экосистемы являются снижение объема весенних паводков и прогрессирующее понижение уровня вод р. Волги вследствие углубления и расширения ее русла, обусловленного функционированием Волжской ГЭС (ВГЭС) [2]. Обезвоживание ВАП, наряду с деградацией пойменной экосистемы, является также самостоятельной причиной снижения эффективности хозяйствования и качества жизни на ее территории.

Для моделирования медленной (многолетней) динамики параметров паводкового гидрологического режима ВАП на основе данных наблюдений и результатов имитационного гидродинамического и геоинформационного моделирования построена зависимость изменения уровня паводковых вод  $\Delta H(Q, t)$  ( $Q$  – величина паводкового гидрографа ВГЭС,  $t$  – годы паводков) в основании Волго-Ахтубинского канала, являющегося главной водной магистралью, определяющей паводковую динамику ВАП. С использованием этой зависимости и результатов прямого численного гидродинамического моделирования динамики паводковых вод, полученных с использованием программно-математического комплекса ЭКОГИС [3], произведена реконструкция карт паводкового затопления (на пике паводков) первых и последних 20 лет функционирования Волжской ГЭС. Результаты моделирования представлены на рис. 1 соответствующими кривыми интегральных функций частотного распределения площади территории паводкового затопления  $S(n)$ , главным образом определяющих состояние пойменной экосистемы. На рис.2 представлены результаты порогового агрегирования соответствующих карт паводковых затоплений.

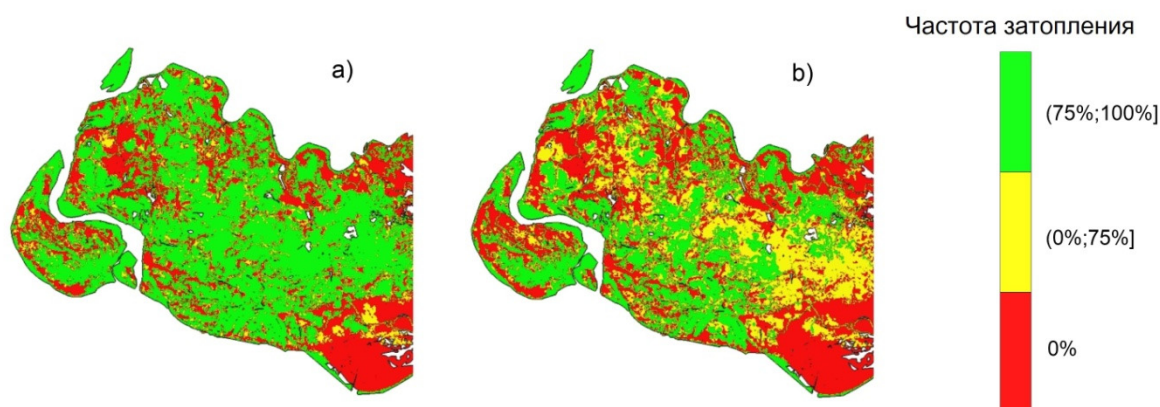
Упрощенная модель устойчивости пойменной экосистемы может быть представлена условным дискретным набором пороговых значений параметров  $S$  и  $n$ , определяющих устойчивое воспроизводство ее подсистем (нерестилищ, водно-болотных, луговых, лесных угодий и др.). Таким образом, в рамках моделирования системы ЭЭУ основной задачей стабилизации пойменной экосистемы ВАП является достижение и поддержание определенных экспертным образом пороговых значений максимально возможного числа этих параметров в условиях негативной природной динамики.

Эта задача может быть в определенной мере решена реализацией проектов увеличения поступления паводковых вод на территорию поймы и управления их распределением. Характер расположения пороговых точек на плоскости  $(S, n)$  и сопоставление их с кривыми на рис.1 позволяет существенно снизить параметрическую неопределенность и ограничить территорию проектных работ в рамках экологических гидротехни-

ческих проектов углубления русел и размещения управляемых паводковых дамб. Результаты оптимизации распределения проектных работ в форме зависимости их эффективности от величины проектного ресурса [4,5] дают возможность оценивать необходимые затраты на стабилизацию экосистемы ВАП. Экстраполяция зависимости  $\Delta H(Q, t)$ , позволяющая строить прогнозные кривые будущих лет на рис. 1, дает возможность разработки проектов, нацеленных на превентивную нейтрализацию будущих экологических угроз.



**Рис. 1.** Интегральные функции распределения относительной площади затопления северной части ВАП первых и последних 20 лет функционирования Волжской ГЭС.



**Рис. 2.** Характер затопления ВАП в период а) 1962-1982 г.г., б) 1998-2018 гг.

Рост величины проектного ресурса возможен за счет софинансирования проектов заинтересованными в увеличении объема социохозяйственных водных ресурсов хозяйствующими субъектами, которое, повышая общую проектную результативность, изменяет оптимальное территориальное распределение проектных работ [6,7].

Формулировка задачи управления проектами установки управляемых паводковых дамб в системе с активными агентами имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 & W_{\text{эк}}(v(r^*(R))) \rightarrow \min_v, \quad \sum_{i=1}^n (p_i - q_i)v_i \leq R, \quad v = (v_1, \dots, v_n), v_i = \{0; 1\}, \\
 (1) \quad & F_i = (f_i - q_i)v_i \rightarrow \max_{q_i}, \quad 0 \leq q_i \leq f_i, \quad i = \overline{1, n}, \\
 & r^*(R) = R + \sum_{i=1}^n q_i^*(R), \quad q_i^*(R) = \arg \max_{q_i} F_i,
 \end{aligned}$$

где  $n$  – число русел и потенциальных агентов,  $v = (v_1, \dots, v_n)$  – вектор конфигурации дамб, управление Центра ( $v_i = 1/0$  – дамба устанавливается / не устанавливается),  $R$  – совокупный ресурс Центра (параметр задачи),  $W_{\text{эк}}(v)$  – экологический ущерб при реализации вектора  $v$ ,  $n$ -мерные векторы  $p, f, q$  означают соответственно стоимость проектов, доходы агентов и величины заявленного софинансирования (фактическое софинансирование агентов, чьи заявки не реализовались в оптимальном решении, равно нулю).

Важной характеристикой задачи (1) является несоизмеримость экологического и экономического эффектов, что отражается вхождением стратегий агентов только в условие ресурсного ограничения. Построено несколько моделей механизмов управления, решающих задачу (1) на основе игр  $\Gamma_0, \Gamma_1$  и  $\Gamma_2$ , различающихся информированностью Центра и агентов и порядком их действий. Исследована эффективность информационного манипулирования со стороны Центра в условиях его слабой информированности. Фактическая потенциальная эффективность механизмов задачи (1) оценена путем сопоставления в условиях задачи территориального распределения потенциальных источников софинансирования и экологических результатов имитационного гидродинамического моделирования проекта. Для этой цели построена упрощенная модель состояния социохозяйственной системы ВАП в виде цифровой карты социохозяйственных индексов, созданной на основе цифровой кадастровой карты и оценок хозяйственной эффективности.

Важной характеристикой ВАП является наличие территории с неопределенным кадастровым типом, сценарии перспективного освоения которой составляют модель ее социохозяйственной динамики. Часть этой территории затопляется большими паводками и, таким образом, ее социохозяйственное освоение фактически запрещает их реализацию.

Задача ЭЭУ социохозяйственным освоением свободной территории ВАП может быть представлена в виде следующей иерархической игры  $\Gamma_1$ :

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

где  $f_F, f_M, f_A$  – целевые функции соответственно федерального и муниципального центров и коллективного агента,  $f_F^0$  – экологическая полезность федерального центра,  $\sigma \in [0; 1]$  – весовой «экологический» коэффициент,  $S_f(S)$  – средняя площадь территории паводкового затопления,  $S_f^0 = S_f(0)$ ,  $f_A^0$  – функция полезности агента,  $S_0$  – площадь территории северной части ВАП,  $R$  – величина штрафа,  $\Phi$  – интегральный показатель состояния пойменной экосистемы,  $S$  и  $p$  – площадь и цена приобретаемых земель.

В [8] найдены равновесные значения параметров задачи (2) и оптимальные стратегии социоэкономического освоения свободной территории ВАП. Включение механизма (2) состав ЭЭУ изменяет условия всех задач комплекса: так, например, из сферы реализации механизма (2) исключается территория гидротехнических проектов, потенциальная результативность которых при этом увеличивается с появлением новых агентов – источников их финансирования. Результаты [9] показывают связь эффективности механизма эколого-экономического управления хозяйствующим субъектом Волжской ГЭС с эффективностью исследованных в [5] проектов углубления русел.

### 3. Заключение

Проведенные исследования демонстрируют взаимную обусловленность параметров всех составляющих комплекса моделей ЭЭУ, что свидетельствует о междисциплинарности исследуемой проблемы и актуальности разработки методологии и технологии адаптивного синтеза системы эколого-экономического управления пойменными территориями и слабоустойчивыми СПХС в целом.

Авторы благодарят РФФИ и Администрацию Волгоградской области за финансовую поддержку (проект № 18-41-342001).

### Список литературы

1. Бурков В.Н., Новиков Д.А., Щепкин А.В. Механизмы управления эколого-экономическими системами / Под ред. С.Н. Васильева. М.: Издательство физико-математической литературы, 2008. 244 с.
2. Воронин А.А., Васильченко А.А., Якушкина О.С. Когнитивный анализ и сценарно-имитационное моделирование развития эколого-экономической ситуации в северной части Волго-Ахтубинской поймы // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1: Математика. Физика. 2015. № 6. С. 17-30.
3. Воронин А.А., Васильченко А.А., Дубинко К.Е., Исаева И.И. Программный комплекс для имитационного моделирования гидротехнических проектов на пойменных территориях // Математическая физика и компьютерное моделирование. 2018. Т. 21, № 2. С. 59-74.
4. Agafonnikova E.O., Klikunova A.Yu., Khoperskov A.V. A computer simulation of the Volga river hydrological regime: problem of water-retaining dam optimal location // Vestnik YuUrGU. Ser. Mat. Model. Progr. 2017. Vol. 10, No. 3. P. 148-155.
5. Voronin A., Vasilchenko A., Khoperskov A. 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: Conference Series. 2018. Vol. 973, No. 012064. P. 1-10.
6. Воронин А.А., Васильченко А.А., Писарев А.В., Храпов С.С., Радченко Ю.Е. Проектирование механизмов управления гидрологическим режимом Волго-Ахтубинской поймы на основе геоинформационного и гидродинамического моделирования // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1, Математика. Физика. 2016. № 1 (32). С. 24-37.
7. Воронин А.А., Исаева И.И. Модели управления проектами в системе с активными агентами // Управление большими системами: сборник трудов XV Всероссийской школы-конференции молодых ученых. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2018. Т. 1. С. 165-170.
8. 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.
9. Воронин А.А., Елисеева М.В., Храпов С.С., Писарев А.В., Хоперсков А.В. Задача управления гидрологическим режимом в эколого-экономической системе «Волжская ГЭС – Волго-Ахтубинская пойма». Ч. 2. Синтез системы управления // Проблемы управления. 2012. № 6. С. 19-25.