

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В АНАЛИЗЕ СТРАТЕГИЙ РАЗВИТИЯ СОЦИОПРИРОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ СИСТЕМ РЕЧНЫХ ДОЛИН

Воронин А. А.¹, Исаева И. И.²

(ФГАОУ ВО Волгоградский
государственный университет, Волгоград)

Исследована проблема обоснования выбора стратегии развития социоприродохозяйственной системы северной части Волго-Ахтубинской поймы, состояние которой характеризуется высоким уровнем природной и социохозяйственной неустойчивости в условиях деградации ее системообразующего фактора – паводкового гидрологического режима. На основе гидродинамического и геоинформационного имитационного моделирования проведен сравнительный анализ эффективности реализации трех групп стратегий управления ее развитием – стратегий локальных улучшений и стратегий, реализующих концепции слабой и сильной устойчивости. Каждой из групп стратегий в исследовании соответствует комплекс имитационных изменений, включающих в себя обводной канал из Волгоградского водохранилища в р. Ахтуба, углубление малых русел и установку в них паводковых дамб с регулируемым сечением, управляемую паводковую дамбу на реке Волге, безопасное расширение социохозяйственных территорий. Эффективность изменений оценена по проектным изменениям социального, природного и хозяйственного критериев и рисков (ожидаемых относительных изменений этих критериев) функционирования системы. Целевая направленность каждой из групп стратегий в созданной математической модели определила выбор главного критерия условной многокритериальной оптимизации паводкового гидрологического режима поймы и допустимые пределы изменения остальных критериев.

Ключевые слова: социоприродохозяйственные системы, эколого-экономическое управление, управление рисками, Волго-Ахтубинская пойма.

1. Введение

Стратегии управления развитием региональных социоприродохозяйственных систем (далее – СПХС) можно разделить на три группы. Первая (реактивная) – стратегии локальных улучшений

¹ Александр Александрович Воронин, д.ф.-м.н., профессор (voronin.prof@gmail.com).

² Инесса Игоревна Исаева, аспирант (isaeva-inessa@mail.ru).

их состояния или замедления деградации. Вторая (проактивная) – реализация концепции слабой устойчивости – не�меньшения суммы природного, технического и человеческого капитала при допустимости контролируемой природной деградации. Третья (проактивная) – реализация концепции устойчивого развития (устойчивого социохозяйственного развития при устойчивой экосистеме). Эффективность реактивных стратегий, как правило, чувствительная к изменению системных параметров, может сохраняться относительно долго только в стабильных СПХС. Реализация концепции слабой устойчивости может привести к экологической катастрофе. Целевые показатели устойчивого развития сложно обосновать, поэтому обычно реализуются малоэффективные стратегии локальных улучшений. Однако наличие системообразующего ресурса СПХС, истощение или нарушение воспроизводства которого является главным фактором их деградации, делает возможным проектирование всех трех типов стратегий развития и оценку потенциальных эффектов их реализации. Одним из классов региональных СПХС с системообразующим ресурсом являются пойменные системы, ярчайшим представителем которых является СПХС Волго-Ахтубинской поймы (далее – ВАП).

Волго-Ахтубинская пойма – уникальная территория с высоким природным разнообразием, благоприятными условиями развития сельского хозяйства, ограниченного жилищного строительства, экологического туризма. В то же время она характеризуется высоким уровнем социохозяйственной и экологической неустойчивости. Системообразующий фактор воспроизводства СПХС ВАП – паводковый гидрологический режим (далее – ПГР) – определяется объемом весеннего паводка, русловой структурой и рельефом ее территории. Его изменение в результате создания Волжского гидрокаскада и, в частности, Волжской ГЭС (ВГЭС) стало главной причиной прогрессирующей комплексной деградации СПХС ВАП.

2. Методологии, инструменты и технологии исследования

Одним из эффективных инструментов анализа слабоустойчивых эколого-экономических систем является оценка их рисков. Прогрессирующий рост риска – их естественное динамическое свойство, потому управление развитием таких СПХС есть управление их риском.

Методология управления риском хорошо разработана в процедурном плане. Однако при этом не существует единой теории экологического риска. Существующие подходы допускают значительную неопределенность в оценке последствий природных изменений и управляющих воздействий. Одна группа исследователей [12] развивает детерминированный, другая [2, 6, 13] – стохастический подход к анализу риска, третья группа [5] использует оба эти подхода. Среди вероятностных методов применяются метод Монте-Карло, анализ чувствительности, интервальный анализ, качественное моделирование, байесовские сети доверия, информационный критерий Акаике, вероятностный анализ границ [6, 14].

Проблемы распределения водных ресурсов речных систем являются предметом интенсивных исследований. Их главными проблемами являются проблема дефицита речных водных ресурсов для социально-экономических нужд [3, 4], рациональный баланс между социально-экономическими и экологическими потребностями [9, 10, 11]. В отношении используемых методов и технологий эти исследования объединяет с нашим междисциплинарное моделирование, ГИС-технологии, многокритериальность задач оптимизации.

Наиболее близким к концепции настоящего исследования является подход [12] к оценке экологического риска регионального масштаба. Он ориентирован на большую территорию со значительным числом источников и объектов воздействия. Его информационной основой является обобщенная карта региона с учетом биоресурсов и зон социохозяйственного развития, а основой управления риском – концептуальная модель региона.

В наиболее агрегированном виде состояние СПХС ВАП оценивается нами тремя критериями – социальным, экономическим и экологическим. Первый считается пропорциональным произведению взвешенной площади территорий, отнесенных к социальному типу использования, на среднюю величину площади территории паводкового затопления. Второй пропорционален взвешенной сумме величин площади устойчиво затапливаемых паводком сельхозугодий (ресурс скотоводства) и площади не затапливаемых паводком хозяйственных территорий (ресурс земледелия). Третий пропорционален взвешенной сумме величин средней площади территории паводкового затопления и площади территории с устойчивым паводковым затоплением (биотопом пойменной экосистемы). Коэффициент пропорциональности во всех критериях зависит уровня обводненности малых русел и озер ВАП.

Целевые параметры ПГР ВАП являются результатом компромисса при выборе стратегии развития СПХС ВАП. Этот компромисс в нашей математической модели выражается в выборе главного критерия условной многокритериальной оптимизации ее ПГР (уровень обводненности водоемов ВАП, сумма площадей незатапливаемых и устойчиво затапливаемых весенним паводком ее территорий и, наконец, пороговые значения площади территории, устойчиво затапливаемой паводком) и установлением допустимых пределов изменения остальных критериев.

ПГР ВАП определяет агрегированную и распределенную гидрологические структуры ее территории. Первая задается долями незатапливаемой, неустойчиво и устойчиво затапливаемой ее территории, вторая – соответствующими цифровыми картами паводковых затоплений. Наряду с этой структурой величины критериев состояния СПХС ВАП определяются агрегированной и распределенной социоприродохозяйственными структурами ее территории, задаваемыми соответственно долями площадей территорий социального, хозяйственного и экологического типов и их цифровыми картами.

Для имитационного моделирования и оптимизации этих проектов использовался программно-математический комплекс [1],

включающий в себя многослойную цифровую модель территории, модули обработки данных, расчета динамики паводковых вод [8], прогноза и многокритериальной оптимизации гидрологического режима и гидротехнических проектов ВАП [7, 15]. Для расчета критериев состояния СПХС проводилось наложение цифровых слоев паводковых затоплений на слой социопродухозяйственных индексов, полученный в результате экспертного анализа соответствующего цифрового кадастрового слоя. Во всех расчетах использовалась современная кадастровая карта ВАП, особенностью которой является наличие значительной по площади территории с неопределенным кадастровым типом. Эта территория в нашем исследовании считалась ресурсом социохозяйственного развития.

В состав моделируемого комплекса гидротехнических проектов первой группы стратегий включались обводной канал из Волгоградского водохранилища в р. Ахтуба с расходом $100 \text{ м}^3/\text{с}$, углубление малых русел ВАП и установка в них паводковых дамб с регулируемым сечением для перераспределения паводковых вод с целью расширения территории ожидаемого паводкового затопления. Второй комплекс проектов отличался от первого целью управления паводковыми дамбами – уменьшением площади территории с неустойчивым паводковым затоплением. В третьем гидротехническом комплексе предельный расход обводного канала увеличивался до $2000 \text{ м}^3/\text{с}$, а также исследовалась его альтернатива – управляемая паводковая дамба на р. Волге, расположенная ниже основания Волго-Ахтубинского канала. Во всех случаях проводилось имитационное расширение социохозяйственных территорий в пределах гидрологической безопасности.

3. Результаты

Функция зависимости расхода от времени $Q(t)$ в первой фазе паводка (паводковый гидрограф) определяет карту максимального затопления пойменной территории. Для упрощения анализа в серии вычислительных экспериментов нами были подобраны величины постоянного расхода Q и длительности t

первой ступени паводкового гидрографа ВГЭС, определяющие карты максимального затопления территории ВАП, отвечающие реальным гидрографам ВГЭС 1962–2020 гг. (рис. 1)

Для построения гидрологической структуры (Г-структуры) территории ВАП были проведены численные эксперименты по определению минимально допустимого размера выборки (число T взятых подряд паводков) параметров первой ступени паводковых гидрографов ВГЭС $Q_i, t_i, i = 1, \dots, T$) за 1962–2020 гг. и построены соответствующих функции распределения. Для аналитической аппроксимация использовалось логнормальное распределение. Результаты расчетов представлены на рис. 2, 3.

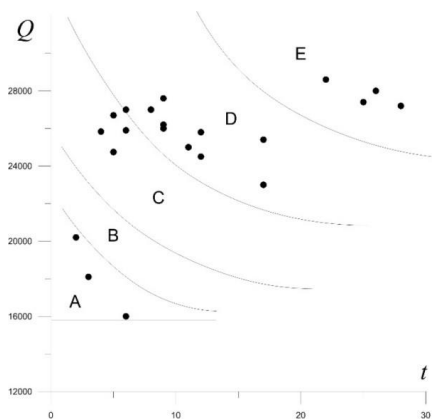


Рис. 1. Значения постоянного расхода Q и длительности t первой ступени паводкового гидрографа ВГЭС, отвечающие реальным гидрографам ВГЭС 1998–2018 гг.

На основе результатов статистической обработки данных о весенних попусках ВГЭС и серии расчетов затоплений территории ВАП за период 1962–2018 гг. построены модельные ретроспективная, современная и прогнозная функции распределения площади территории паводкового затопления (соответственно кривые 1–3 на рис. 4). Для каждой из них рассчитаны распределенные и агрегированные гидрологические структуры территории.

Рисунок 5 иллюстрирует реконструированную в ходе вычислительных экспериментов динамику комплексной структуры территории ВАП. Анализ этих рисунков показывает устойчивую тенденцию и перспективу дальнейшего сокращения доли устойчиво затапливаемых и роста доли неустойчиво затапливаемых территорий всех типов, определяющую прогрессирующую системную деградацию СПХС ВАП.

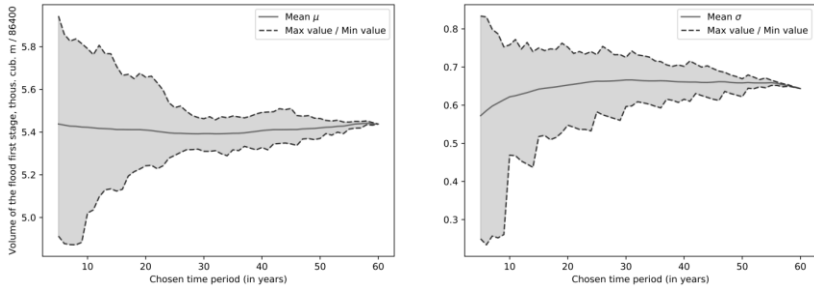


Рис. 2. Зависимость средних значений и разбросов параметров логнормальных распределений, аппроксимирующих частотные распределения объемов паводковых гидрографов ВГЭС для различных размеров выборки за 1962–2020 гг.

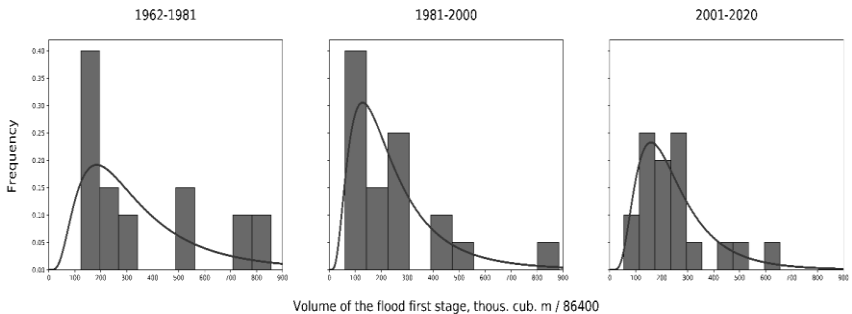


Рис. 3. Частотные распределения объема паводкового гидрографа ВГЭС за различные 20-летние периоды 1962–2020 гг. и их аппроксимация логнормальным распределением

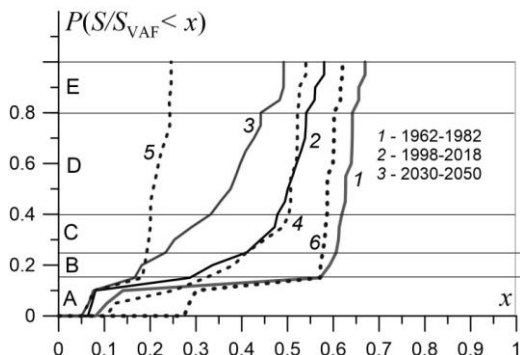


Рис. 4. Модельные ретроспективная (кривая 1), современная (кривая 2), прогнозная (кривая 3) и проектные (кривые 4–6) интегральные функции распределения площади территории паводкового затопления за соответствующие 20-летние периоды

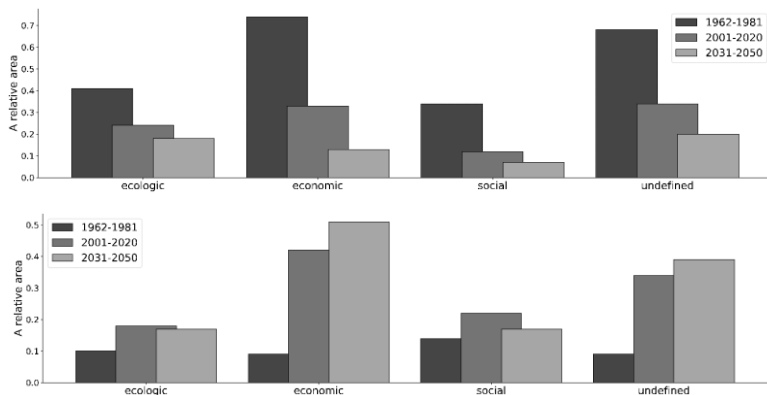


Рис. 5. Динамика долей устойчиво (вверху) и неустойчиво (внизу) затопляемых территорий различного функционального назначения ВАП

Анализ оптимальных проектных изменений в результате реализации первого комплекса проектов (кривая 4 на рис. 5) показывает возможность двукратного увеличения уровня обводнения

водоемов ВАП и примерно на 8% – площади затопляемой территории при средних паводках (зона С на рис. 1). При малых и больших паводках это увеличение незначительно. Потенциальное безопасное расширение социохозяйственной территории при этом составляет примерно 20%. Однако эта группа стратегий ненамного снижает уровень рисков (см. таблицы 1 и 2). По прогнозу, кривая 4 на рис. 4 к 2050 г. вплотную приблизится к кривой 3.

Таблица 1. Структуры гидрологического риска СПХС ВАП – при неуправляемом развитии (индекс 0) и в результате модельных реализаций трех групп стратегий развития (индексы 1–3)

Ущерб/ вероятность	низкая	средняя	высокая
отсутствует	$E_0 - E_3$	D_2, D_3	B_2, B_3, C_2, C_3
малый		D_0, D_1, A_2, A_3	B_1, C_1
средний		A_1	B_0, C_0
высокий		A_0	
катастрофический			

Таблица 2. Оценки относительного изменения социального K_{soc}^i/K_{soc}^0 , экономического K_{econ}^i/K_{econ}^0 и экологического критериев K_{ecol}^i/K_{ecol}^0 и относительных рисков $R_{soc}^i = \Delta K_{soc}^i/K_{soc}^i$, $R_{econ}^i = \Delta K_{econ}^i/K_{econ}^i$, $R_{ecol}^i = \Delta K_{ecol}^i/K_{ecol}^i$ в результате реализации трех стратегий. Неуправляемое развитие отмечено индексом 0

	K_{soc}^i/K_{soc}^0	K_{econ}^i/K_{econ}^0	K_{ecol}^i/K_{ecol}^0	R_{soc}^i	R_{econ}^i	R_{ecol}^i
Неуправляемое развитие	1	1	1	0,52	0,54	0,57
Стратегия 1	1,3	1,34	1,31	0,42	0,44	0,45
Стратегия 2	1,73	2,10	0,28	менее 0,05	менее 0,05	менее 0,05
Стратегия 3	2,1	1,75	2,4	менее 0,05	менее 0,05	менее 0,05

Моделирование и оптимизация второго комплекса проектов (кривая 5 на рис. 4) показало потенциальную возможность почти пятикратного увеличения незатопляемой социохозяй-

ственной территории и десятикратного сокращения уровня рисков.

Побочным результатом этой группы стратегий является ликвидация пойменного биотопа вследствие существенного сокращения территории устойчивого затопления.

Оптимизация третьего комплекса проектов приводит к достижению пороговых значений частоты и величины площади устойчивого затопления. Обеспечение безопасности социально-экономических территорий, потенциально занимающих 36% территории ВАП (рост на 9%) в условиях устойчивого затопления 57% (рост вдвое) ее территории требует большого числа адаптивно управляемых паводковых дамб в ее малых руслах.

Литература

1. ВАСИЛЬЧЕНКО А.А., ВОРОНИН 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.
2. BIEDA B. *Stochastic Analysis in Production Process and Ecology Under Uncertainty*. – Berlin: Springer, 2012. – 189 p.
3. FERNANDES L.F.S., MARQUES M.J., OLIVEIRA P.C., MOURA J.P. *Decision support systems in water resources in the demarcated region of Douro – case study in Pinhao river basin, Portugal* // Water and Environment Journal. – 2013. – Vol. 28, Iss. 3. – P. 350–357.
4. 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.
5. GILLMAN M. *An introduction to mathematical models in ecology and evolution: time and space*. – Chichester: A John Wiley & Sons, Ltd., 2009. – 167 p.
6. HAYES K.R. *Uncertainty and Uncertainty Analysis Methods. Final report for the Australian Centre of Excellence for Risk*

- Analysis (ACERA)* / CSIRO Division of Mathematics, Informatics and Statistics. – Hobart, Australia. 2011. – 130 p.
7. 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.
 8. KHRAPOV S.S., PISAREV A.V., KOBEL'EV I.A., ZHUMALIEV A.G. et al. *The Numerical Simulation of Shallow Water: Estimation of the Roughness Coefficient on the Flood Stage* // *Advances in Mechanical Engineering*. – 2013. – Vol. 2013. – P. 787016.
 9. LAMY F., BOLTE J., SANTELMANN M., SMITH C. *Development and evaluation of multiple objective decision making methods for watershed management planning* // *Journal of the American Water Resources Association*. – 2002. – Vol. 38. – P. 517–529.
 10. MCCORD J., CARRON J.C., LIU B., RHOTON S. et al. *Pecos River Decision Support System: Application for Adjudication Settlement and River Operations EIS* // Southern Illinois University Carbondale OpenSIUC. – 2004. – P. 1–14.
 11. 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*. – 1999. – 56 p.
 12. 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*. – Vol. 38, No. 2. – 2012. – P. 153–165.
 13. PASTOROK R. et al. *Role of Ecological Modeling in Risk Assessment* // *Human and Ecological Risk Assessment*. – 2003. – Vol. 9, No. 4. – P. 939–972.
 14. SCHLEIER III J., SHARLENE E., SING S., PETERSON R. *Regional ecological risk assessment for the introduction of *Gambusia affinis* (western mosquitofish) into Montana watersheds* // *Biol. Invasions*. – 2008. – Vol. 10. – P. 1277–1287.
 15. 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, 012064. – P. 1–10. – DOI: 10.1088/1742-6596/973/1/012064.

DIGITAL TECHNOLOGIES IN THE ANALYSIS OF DEVELOPMENT STRATEGIES FOR RIVER VALLEYS' SOCIO-ECONOMIC SYSTEMS

Alexander Voronin, Volgograd State University, Volgograd, Doctor of Science, professor (voronin.prof@gmail.com).

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

Abstract: The paper focuses on the problem of strategy development selection for the ecologic and socio-economic system of the northern part of the Volga-Akhtuba floodplain. Its state is characterized by a high level of ecologic and socio-economic instability in the context of its system-forming factor – a flood hydrological regime – degradation. On the basis of geoinformation and hydrodynamic imitation modeling we conducted a comparative effectiveness analysis between three groups of development management strategies. These groups include strategies of local improvements and strategies within the framework of weak and strong sustainable development concepts. A set of imitation changes corresponds to each group and includes a bypass channel from the Volgograd reservoir to the Akhtuba river, small channels deepening and installation of flood dams with variable area, a controlled flood dam on the Volga river, safe expansion of socio-economic territories. The effectiveness of such changes is estimated by social, ecologic and economic criteria and risks (expected relative changes in these criteria) of the system functioning. The aim of each group of strategies in the created mathematical model determined the main criterion choice for conditional multicriteria optimization of the flood hydrological regime and the permissible limits of changes in the remaining criteria.

Keywords: ecologic and socio-economic systems, ecologic and economic management, risk management, Volga-Akhtuba floodplain.

УДК 519.6 + 519.8 + 332.14

ББК 22.19 + 20.1