



DOI: <http://dx.doi.org/10.15688/jvolsu1.2015.6.2>

УДК 519.6

ББК 22.19+20.1

## КОГНИТИВНЫЙ АНАЛИЗ И СЦЕНАРНО-ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИТУАЦИИ В СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ВОЛГО-АХТУБИНСКОЙ ПОЙМЫ<sup>1</sup>

**Александр Александрович Воронин**

Доктор физико-математических наук, профессор кафедры фундаментальной информатики и оптимального управления, Волгоградский государственный университет  
voronin.prof@gmail.com, fiou@volsu.ru  
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

**Анна Анатольевна Васильченко**

Старший преподаватель кафедры фундаментальной информатики и оптимального управления, Волгоградский государственный университет  
aa-vasilchenko@mail.ru, fiou@volsu.ru  
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

**Ольга Сергеевна Якушкина**

Студентка Института математики и информационных технологий, Волгоградский государственный университет  
islandolushka@gmail.com, fiou@volsu.ru  
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

**Аннотация.** На основе гидродинамического, геоинформационного и когнитивного анализа проведено сценарно-имитационное моделирование зависимости паводкового гидрологического режима северной части Волго-Ахтубинской поймы от глубины русел и объема паводков. Выявлены зоны наибольшей и наименьшей чувствительности площади паводковых затоплений к глубине русел. Показано, что состояние русел оказывает значительное воздействие на паводковую динамику лишь при малых объемах паводков.

**Ключевые слова:** когнитивный анализ, сценарно-имитационное моделирование, цифровая модель рельефа, гидродинамическое моделирование, Волго-Ахтубинская пойма, гидрологический режим.

## Введение

Сохранение экосистемы Волго-Ахтубинской поймы (ВАП) в условиях подчиняющегося потребностям гидроэнергетики зарегулированного переменного годового стока р. Волги и активного социально-экономического освоения ее территории возможно только при максимизации эффективности использования паводковых вод для затопления ее территории. Решение этой задачи требует создания комплексной системы управления гидрологическим режимом ВАП на основе геоинформационного, гидродинамического имитационного моделирования, решения задач оптимизации, построения механизмов эколого-экономического управления в [2; 5; 6; 8; 9]. Прежде всего необходимо выявить общую структуру межфакторного взаимодействия в исследуемой социоприродохозяйственной системе (СПХС) ВАП и оценить количественную меру влияния факторов на агрегированные и распределенные параметры паводковых затоплений ее территории. В условиях неточного прогнозирования объема годового и паводкового стоков [7], практического отсутствия мониторинга состояния природы и системы социально-экономической статистики практически единственным аппаратом исследования является сценарно-имитационное моделирование социоприродохозяйственной динамики территории ВАП в широком диапазоне параметров паводкового гидрографа Волжской ГЭС (ВГЭС) и природно-антропогенных изменений ее рельефа.

### 1. Структура и сценарии социоприродохозяйственной динамики Волго-Ахтубинской поймы

После сооружения Волжской ГЭС (ВГЭС) в 1959 г. произошло значительное увеличение доли зимне-летнего стоков, существенно снизились максимальные и средние значения паводковых пиков, уровень воды р. Волги ниже ВГЭС снизился к настоящему времени на 1,3 м [4]. В последние десятилетия эта тенденция усугубляется зимним потеплением на 1,5–3,0 °С с увеличением числа оттепелей и суммы положительных значений температуры, следствием чего стал рост доли дождевых осадков, уровня грунтовых вод, поверхностного зимнего притока в реки. Эти явления усилили перераспределение годового стока в пользу зимне-летне-осеннего, еще сильнее снизив средний объем весеннего паводка. Эти явления крайне негативно сказались на поступлении паводковых вод в ВАП. Климатические прогнозы говорят о сохранении этой тенденции в ближайшие десятилетия [1]. Факторами обезвоживания поймы являются также «срезание» пиков многоводности требованиями гидрологической безопасности расширяющихся урбанизированных территорий, уменьшение паводковой самоочистки ее русел вследствие распашки берегов, сокращения площади прирусловых лесных массивов, строительства на них плотин и дамб.

На территории ВАП расположены особо ценные экологические объекты [3; 7], значительное число населенных пунктов с общей численностью жителей более 35 000, сельскохозяйственных и садоводческих хозяйств. Ограничение паводков требованиями гидрологической безопасности расширяющихся урбанизированных территорий ведет к прогрессирующему остепнению пойменных земель.

Таким образом, главными факторами обезвоживания ВАП и является взаимодействие природно-техногенного снижения объема весенних паводков, деградации речных русел, неуправляемого социохозяйственного освоения ее территории, деградации пойменной природы.

Выявление динамической структуры ВАП проводилось методом когнитивного анализа: экспертным построением и анализом когнитивной карты (знакового ориентированного графа) межфакторных взаимодействий. Таблица 1 описывает матрицу смежности этого графа, вершинами которого являются: (1) уровень жизни населения; (2) численность населения; (3) уровень водопотребления населением; (4) уровень гидрологической безопасности; (5) валовый объем рекреационных услуг; (6) площадь урбанизированной территории; (7) обобщенный показатель состояния природы; (8) площадь водоемов; (9) площадь сельскохозяйственных территорий; (10) протяженность транспортной сети; (11) уровень водопотребления сельского хозяйства; (12) удельный влагозапас территории; (13) площадь паводкового затопления; (14) состояние рельефа территории; (15) глубина русел; (16) объем внешних инвестиций; (17) объем паводка; (18) объем вырабатываемой ВГЭС электроэнергии; (19) уровень рекреационной активности населения региона.

Таблица 1

Матрица связности орграфа межфакторных взаимодействий

№	1	2	4	21	7	8	12	13	14	15	17	18	20	3	5	6	9	10	11	16	19	
1																+						
2			?		?									+					+			
4	+																					
21					?																	
7	+			+						+												
8					+																	
12					+											+						
13						+	+															
14								+														
15								+														
17								+														
18													+									
20											+											
3	+						?															
5	+																	+				
6		+	?					?														
9								?	?						+				+			
10			+	+											+							
11							?										+					
16				+								+				+		+				+
19												+										

Исследуемый граф содержит большое число циклов, приведенных в таблице 2. Циклы 1–3 описывают определяемую переменными паводками р. Волги неустойчивую динамику пойменной природы; циклы 4–6 — неустойчивое взаимодействие социоэкономической и природной подсистем; циклы 7–40 — устойчивую социоэкономическую динамику.

Таблица 2 показывает, в частности, вовлеченность большей части вершин графа в множественные циклические взаимодействия. Так, например, вершины (1) и (6) участвуют в 27 устойчивых (у) и 5 неустойчивых (н) циклах; вершина (2) — в 22 (у) и 5 (н) циклах; вершина 5 — в 17 (у) и 5 (н) циклах и т. п.

Циклы межфакторных взаимодействий

№	Циклы взаимодействий вершин графа
1	7 → 15 → 13 → 12 → 7
2	7 → 15 → 13 → 8 → 7
3	13 → 12 → 7 → 15 → 13
4	3 → 1 → 6 → 2 → 3
5	1 → 6 → 2 → 11 → 9 → 5 → 10 → 4 → 1
6	1 → 6 → 2 → 11 → 9 → 5 → 1
7	13 → 12 → 5 → 10 → 14 → 13
8	7 → 21 → 7
9	7 → 15 → 13 → 12 → 5 → 10 → 21 → 7
10	7 → 1 → 6 → 2 → 11 → 9 → 14 → 13 → 12 → 7
11	1 → 6 → 2 → 7 → 1
12	7 → 1 → 6 → 2 → 11 → 9 → 15 → 13 → 8 → 7
13	7 → 1 → 6 → 2 → 11 → 9 → 14 → 13 → 8 → 7
14	5 → 1 → 6 → 2 → 3 → 12 → 5
15	7 → 1 → 6 → 2 → 3 → 12 → 7
16	15 → 13 → 12 → 5 → 10 → 21 → 7 → 15
17	14 → 13 → 12 → 5 → 10 → 14
18	4 → 1 → 6 → 13 → 12 → 5 → 10 → 4
19	5 → 1 → 6 → 2 → 11 → 12 → 5
20	7 → 1 → 6 → 2 → 11 → 12 → 7
21	7 → 1 → 6 → 2 → 11 → 9 → 5 → 10 → 21 → 7
22	7 → 1 → 6 → 2 → 11 → 9 → 5 → 10 → 14 → 13 → 12 → 7
23	7 → 1 → 6 → 2 → 11 → 9 → 5 → 10 → 14 → 13 → 8 → 7
24	7 → 1 → 6 → 13 → 8 → 7
25	7 → 1 → 6 → 13 → 12 → 7
26	5 → 1 → 6 → 13 → 12 → 5
27	5 → 1 → 6 → 2 → 11 → 9 → 13 → 12 → 5
28	7 → 1 → 6 → 2 → 11 → 9 → 15 → 13 → 12 → 7
29	7 → 1 → 6 → 2 → 11 → 9 → 13 → 8 → 7
30	4 → 1 → 6 → 2 → 11 → 9 → 15 → 13 → 12 → 5 → 10 → 4
31	4 → 1 → 6 → 2 → 11 → 12 → 5 → 10 → 4
32	5 → 1 → 6 → 2 → 11 → 9 → 14 → 13 → 12 → 5
33	4 → 1 → 6 → 2 → 3 → 12 → 5 → 10 → 4
34	5 → 1 → 6 → 2 → 11 → 9 → 15 → 13 → 12 → 5
35	4 → 1 → 6 → 2 → 11 → 9 → 5 → 10 → 4
36	2 → 3 → 12 → 5 → 10 → 14 → 13 → 8 → 7 → 1 → 6 → 2
37	1 → 6 → 2 → 4 → 1
38	2 → 3 → 12 → 5 → 10 → 21 → 7 → 1 → 6 → 2
39	4 → 1 → 6 → 4
40	7 → 1 → 6 → 2 → 11 → 9 → 13 → 12 → 7

Анализ таблиц 1 и 2 позволяет заключить, что главной группой взаимоусиливающих друг друга факторов обезвоживания ВАП и являются природно-техногенное снижение объема весенних паводков, деградация речных русел, неуправляемое социохозяйственное освоение ее территории, деградация пойменной природы. Формальной моделью сценария развития ситуации будем считать следующий кортеж: начальное состояние, внешнее воздействие, тенденция развития. Тенденция развития системы с известным начальным состоянием (ситуации) определяется, очевидно, характером внешнего воздействия. Проведенный когнитивный анализ позволяет провести упрощенное сценарно-имитационное моделирование развития ситуации в ВАП на качественном уровне. В составе факторов-вершин орграфа выделим вектор состояния ВАП, характеризующий доли площадей (социальной, экономической, природной пойменной, природной степной) ее территориальных зон. Тенденцией изменения состояния будем считать вектор лингвистических оценок направлений изменения координат вектора состояния — рост/сохранение/сокращение (р/сх/ск). Исключив 6 несовместных и маловероятных векторных оценок (с/(р,с)/с/с, (р,с)/(р,с)/р/р), можно выделить 75 потенциально допустимых тенденций.

Вектор внешнего воздействия определяют четыре внешних фактора (16)–(19). Потенциальное число различных воздействий при, например, трехуровневой лингвистической оценке факторов (высокий/средний/низкий) и исключении 27 отвечающих маловероятному низкому уровню фактора (18) сочетаний равно 54. Задача экспертного отбора реальных из множества 1458 гипотетических 8-мерных сценариев (внешнее воздействие, тенденция) при высокой взаимообусловленности межфакторных взаимодействий мотивировало необходимость упрощения модели. Объединение двух первых типов зон и исключение оценки «сохранения» дает 5 гипотетических тенденций развития ситуации. Фиксация среднего уровня фактора (18), агрегирование факторов (17)–(19) в макрофактор «уровень экономической конъюнктуры» и введение двухуровневых оценок (высокий/низкий — в/н) двух полученных внешних факторов дает 4 вероятных вектора внешнего воздействия и, таким образом, 20 гипотетических сценариев, из которых с помощью таблиц 1, 2 экспертами было выбрано 6 реальных сценариев развития ситуации (табл. 3).

Таблица 3

**Сценарии развития ситуации**

Объем паводка	Уровень экономической конъюнктуры	Площадь социально-экономической зоны	Площадь степной зоны	Площадь пойменной зоны
н	н	с	р	с
н	в	с	р	с
в	н	р	р/с	с
в	в	р	р/с	с

Каждый из сценариев допускает сокращение площади паводкового затопления, причиной чего является урбанизация и деградация рельефа территории и речных русел. Полученный на основе анализа таблицы 1 схематический характер долгосрочной зависимости площади паводкового затопления от объема паводка показан на рисунке 1. Гистерезисный характер зависимости обусловлен цикличностью колебаний годового стока р. Волги динамическими свойствами русловой системы ВАП.

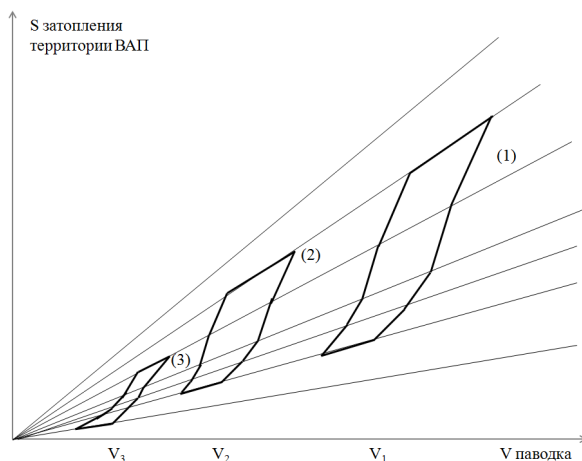


Рис. 1. Зависимость площади затопления территории Волго-Ахтубинской поймы от объема паводка: (1) — прошлое; (2) — настоящее; (3) — будущее

## 2. Уравнения социоприродохозяйственной динамики Волго-Ахтубинской поймы

В функциях расхода (гидрографах)  $Q(t)$  паводкового попуска ВГЭС последнего десятилетия выделяются две ступени с почти постоянными значениями  $Q_1$  и  $Q_2$  [8]. Площадь затопления территории определяется величиной  $Q_1$  и длительностью  $t_1$  его первой ступени. При  $Q_1 \leq 16\,000\text{ м}^3/\text{с}$  затопления территории не происходит, а  $Q_1 \geq 30\,000\text{ м}^3/\text{с}$  и  $t_1 \geq 5$  суток соответствуют катастрофическому затоплению.

Высокая чувствительность пространственного распределения паводковых вод к величине гидрографа, русловой структуре и свойствам рельефа территории ВАП, а также пространственная локализация антропогенных изменений рельефа и потенциальных проектов руслосоставления мотивируют иерархическое двухуровневое пространственное агрегирование параметров при построении уравнений динамики. Гидрологическая структура территории ВАП определяется ее рельефом и многочисленными руслами. На территории северной части поймы существуют три магистральных водотока: р. Волга, р. Ахтуба и ерик Гнилой (Пахотный). Из них берут начало практически равномерно распределенные вдоль русел магистральных водотоков соответственно 14, 15 и 57 территориальных русел (ериков), бассейны которых образуют естественные локальные гидрологические зоны (см. рис. 2). Гидродинамическое моделирование паводковых явлений показало перекрестное затопление нескольких гидрологических зон, что обусловило их объединение. Поэтому для моделирования было выбрано 58 зон с относительно независимым характером затопления.

В количественной модели динамики состояние СПХС описывается кортежем [8]  $S(x, y, l, t) = [A(l, t), B(x, y, l, t), C(A, B, Ext), U(A, B, Ext), F(A, B, U), Ext(l, t)] \in S_{дон}$ , где  $l = 1, 2, \dots$  — «медленное» время (шаг по  $l$  равен одному году),  $A(l, t) = (A_0(l, t), A_{ij}(l))$  ( $i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, k_i$ ),  $A_0 = \{f_0, w_0\}$  — модель агента ВГЭС:  $f_0$  — целевая функция;  $w_0(l) = (G_\phi; r_0(l))$  — действие,  $G_\phi = Q_\phi(l, t)$  — фактический паводковый гидрограф;  $t$  — «быстрое» время паводка;  $r_0$  — объем софинансирования агентами (хозяйствующими субъектами) ВАП проектов Центра;  $A_{ij} = f_{ij}, w_{ij}(l)$  — модели агентов ВАП:  $f_{ij}$  — целевые функции;  $w_{ij}$  — действия;  $w_{ij}(l) = (d_{ij}(l), r_{ij}(l))$ ;

$d_{ij}$  — изменение рельефа (число созданных агентами дамб на руслах ВАП);  $r_{ij}$  — объем софинансирования проектов Центра;  $n$  — число зон;  $k_i$  — число агентов зоны  $i$ ;  $B(x, y, l) = (b_1, \dots, b_3, b_4, \dots, b_6)$  — пространственная сеточная вектор-функция с координатами:  $b_1(x, y, l)$  — ЦМР;  $b_2 = \varphi(G_\phi, b_1(x, y, l))$  — определяемая гидродинамическими расчетами максимальная (по  $t$ ) высота паводкового затопления,  $b_3(x, y, l) = \text{sgn}(b_2(x, y, l))$  — индикатор затопления территории;  $b_4(x, y, l)$ ,  $b_5(x, y, l)$ ,  $b_6(x, y, l)$  — векторные коэффициенты соответственно экологической, социальной и экономической значимости, рассчитываемые на основе данных мониторинга, статистики и экспертных оценок (число координат каждого вектора определяется наличием данных и целями моделирования);  $C(A, B, Ext) = \{U(A, B, Ext), F(A, B, U)\}$  — модель Центра (органа власти);  $F$  — целевая функция;  $U = (G_{nl}, W, P, M)$  — действие (управление):  $G(l) = \{Q_{1nl}, t_{1nl}, Q_{2nl}, t_{2nl}\}$  — плановый двухступенчатый паводковый гидрограф;  $W = (W_1, \dots, W_n)$  — проекты русловосстановления в зонах ВАП;  $P$  — штрафы за сверхнормативные действия;  $M$  — стимулирование участия в проектах;  $S_{don}$  — множество допустимых состояний системы  $S$ , определяемое природными, техническими, социально-экономическими и финансовыми ограничениями.

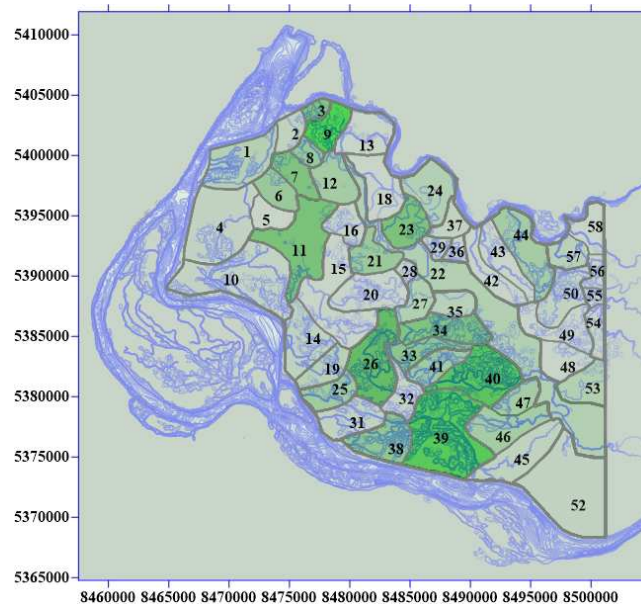


Рис. 2. Карта русловых зон северной части ВАП

В рамках построенной модели различные задачи эколого-экономического управления территорией ВАП описываются следующими соотношениями:

$$B_i(l + 1) = f_i(B_i, Q_\phi, w_i, W_i, Ext), \tag{1}$$

$$F \rightarrow \max_U, F = \sum_{(l,k,i) \in \Omega} (\mu_k(l) B_{ik}(l) - (r, U(l))), \tag{2}$$

$$f_0 = a_0(V_{nl} - V_\phi) - P(G_{nl} - Q_\phi) \rightarrow \max_{(Q_D, r_0)}, \tag{3}$$

$$f_{ij} = a_{ij} S_{i3} - P(w_{ij}) - r_{ij}(M) \rightarrow \max_{w_{ij}}, \tag{4}$$

$$S(x, y, T) \in S_s(g_2, g_3, g_4), \tag{5}$$



$$S(x, y, l) \in S_s(g_2, g_3), \quad 1 \leq l \leq T, \quad (6)$$

$$V(l) \leq V_0(l), \quad V(l) = \sum_{\Omega} \mu_i(l) B_{ij}, \quad 1 \leq l \leq T, \quad i = 1, \dots, n; \quad j = 1, \dots, k_i, \quad (7)$$

$$\Omega = \{l = 1, \dots, T; \quad i = 1, \dots, n; \quad k = 1, \dots, 6\}, \quad 1 \leq n \leq 58,$$

где  $B_i = (B_{i1}, \dots, B_{i6})$ ,  $f_i = (f_{i1}, \dots, f_{i6})$ ,  $V_{\phi} = \int Q_{\phi}(l, t) dt$ ,  $S_{is(l)} = \max_t B_{is}(l)$ ,  $B_{ik(l)} = \int b_k(x, y, l) dx_i dy_i$  — интегральные функции зоны  $i$ ;  $a_0, a_i, j$  — коэффициенты экономической эффективности агентов;  $w_i = \{w_{ij}\}$  — вектор действий агентов зоны  $i$ ,  $Ext$  — вектор-функция сценариев состояния внешней среды;  $V = Q_{1nl} t_{1nl} + Q_{2nl} t_{2nl}$ ;  $V$  — экологический ущерб ( $V_0$  — его нормативное значение);  $S_s$  — состояние стабильности системы  $S$ ;  $r = (r_1, \dots, r_4)$ ,  $r_1$  — стоимость упущенной гидроэнергетической полезности от реализации  $G_{nl}$ ;  $r_2$  — затраты на реализацию проектов;  $r_3, r_4$  — затраты на мониторинг;  $T$  — горизонт планирования;  $\mu_k (k = 1, \dots, 6)$  — весовые коэффициенты. В зависимости от степени адекватности соотношений (1)–(7) и целей управления можно строить следующие модели:

- (1)–(4) — оптимальное управление гидрологическим режимом;
- (1)–(5) — оптимальная стабилизация экосистемы;
- (1), (3), (4), (5) — поддержание стабильности экосистемы;
- (1), (3), (4), (7) — управление гидрологическим риском;
- (1)–(6) ((1)–(7)) — устойчивое развитие (с экологическим императивом).

Конкретный вид указанных выше функций определяется на основе данных мониторинга и статистики, экспертных оценок и результатов численного имитационного моделирования паводковых явлений.

Для решения задач управления гидрологическим режимом необходимо, в частности, уметь разделять эффекты природного и антропогенного влияния на динамику рельефа территории и русел. Анализ приведенного выше графа факторных взаимодействий позволяет записать уравнения динамики средней глубины русел ВАП в виде:

$$h^{t+1} = (1 - \lambda(N^t)) h^t + \phi_h(Q_n^t - Q_{кр}(h^t)) + \frac{L_{np}^t}{L} \Delta z, \quad (8)$$

где член  $(1 - \lambda(N^t)) h^t$  описывает обмеление русел вследствие роста донных отложений со скоростью, зависящей от оценки уровня состояния природы  $N$  (прибрежных лесов);  $\phi_h(Q_n^t - Q_{кр}(h^t))$  — определенная в области положительного аргумента возрастающая функция паводковой самоочистки русел;  $\frac{L_{np}^t}{L} \Delta z$  — проектное восстановление глубины русел на величину  $\Delta z$ ;  $L_{np}^t$  — общая длина восстанавливаемых русел в момент времени (год)  $t$ ;  $L$  — общая длина русел;  $\lambda(x) = k_h e^{-\alpha_h x}$ ;  $\lambda(0) = 0,05$ ;  $\lambda(x_{max}) = 0,01$ ;  $Q(h^t) = 16000 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $\phi_h(x) = \begin{cases} kx, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}$ ,  $k = 3\lambda(N^t)$ ,  $a_h = k_3 h^t$ ,  $k_3 \sim 10^{-5}$  — эмпирические коэффициенты.

Арегированная природная динамика описывается дискретным логистическим уравнением Рикера

$$N^{t+1} = N^t e^{-r(1 - \frac{N^t}{N_{max}(S_3^t/S)})}, \quad (9)$$

где  $r \sim 0,03$  — скорость воспроизводства пойменных прибрежных лесных зон;  $N_{max}(x) = k_N x$ , где  $k_N$  — масштаб шкалы,  $0 \leq x \leq 1$ ;  $S$  — площадь северной части ВАП,  $S_3^t(Q_n^t, h^t)$  — площадь паводковых затоплений. Построение зависимости  $S_3^t(Q_n^t, h^t)$  проводилось на основе гидродинамического и геоинформационного моделирования.



### 3. Исследование влияния глубины русел на площадь территории паводковых затоплений ВАП

Приведем результаты гидродинамического и геоинформационного исследования чувствительности площади паводкового затопления к изменению параметров расхода первой ступени гидрографа и глубины русел для всей территории северной части ВАП и для ее отдельных гидрологических зон.

На рисунках 3–10 представлено изменение площади паводкового затопления всей территории и нескольких зон в результате отклонения глубины их русел  $\Delta h$  от значения  $h_0 = 2$  м. (Во всех расчетах время затопления было равно 10 суткам. Положительные значения  $\Delta h$  отвечают углублению русел.) Анализ рисунков 3–10 позволяет сделать выводы о незначительном влиянии на общую площадь затопления ВАП глубины русел  $h$  по сравнению с величиной паводкового гидрографа  $Q$ , об убывании с ростом  $Q$  средней относительной чувствительности функции  $S_{зат}$  к средней глубине русел  $h$ , об определяющей роли рельефа территории и параметров гидрографа в формировании зависимости площади затопления зон ВАП от глубины русел. Это говорит, в частности, о заметной потенциальной эффективности проекта русловосстановления только в некоторых зонах (выделенных серым оттенком на рис. 2).

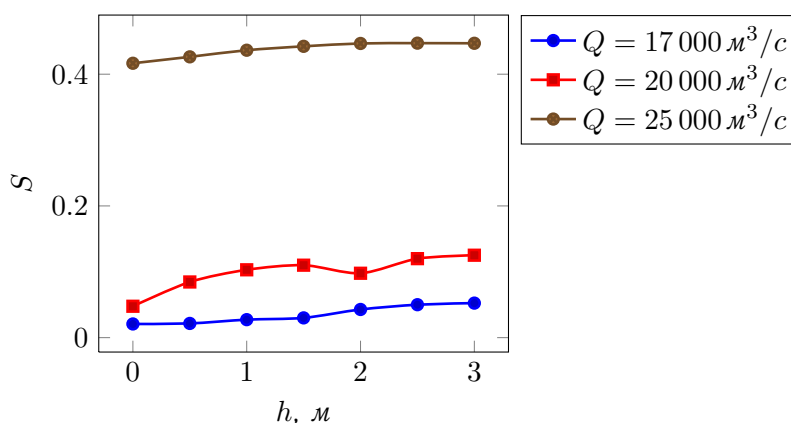


Рис. 3. Зависимость приращения относительной площади паводкового затопления ВАП ( $\text{км}^2$ ) от глубины русел  $h$  при значениях  $Q = 17\,000, 20\,000, 25\,000\text{ м}^3/\text{с}$

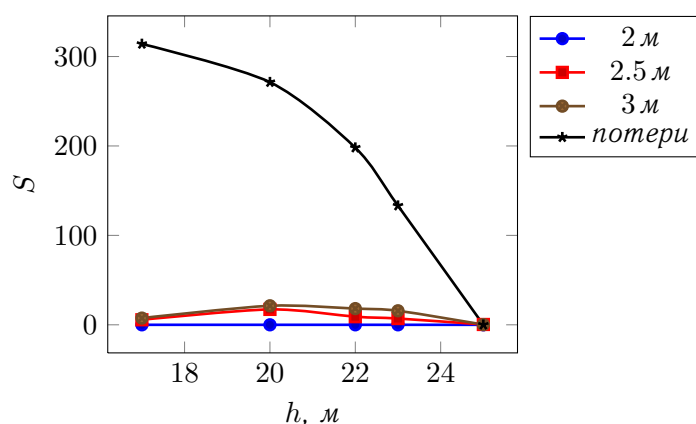


Рис. 4. Прирост  $S_{зат}$  в результате углубления русел и ее потери при снижении гидрографа ниже уровня  $Q = 25\,000\text{ м}^3/\text{с}$

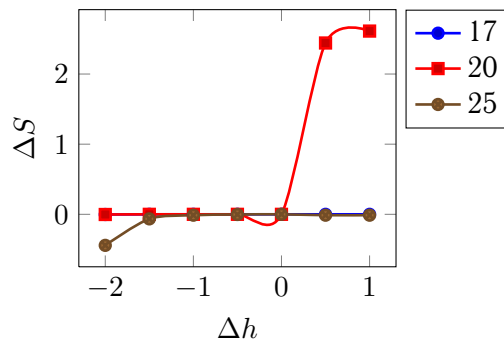


Рис. 5. Влияние изменения рельефа на прирост площади затопления. Зона 9

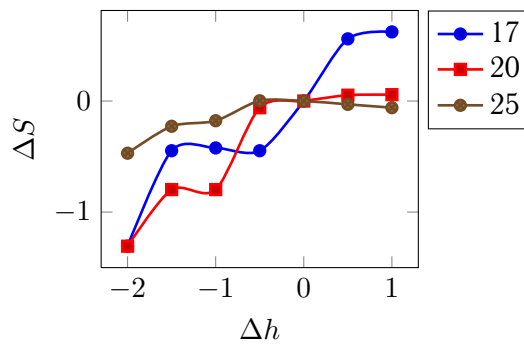


Рис. 6. Влияние изменения рельефа на прирост площади затопления. Зона 10

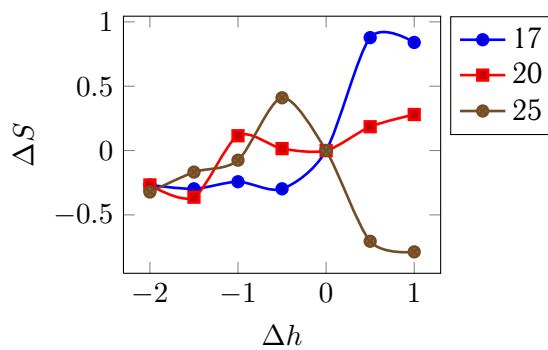


Рис. 7. Влияние изменения рельефа на прирост площади затопления. Зона 22

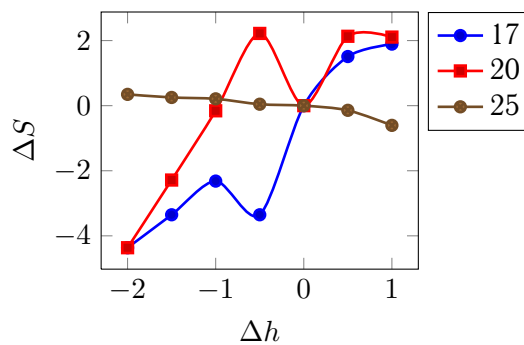


Рис. 8. Влияние изменения рельефа на прирост площади затопления. Зона 39

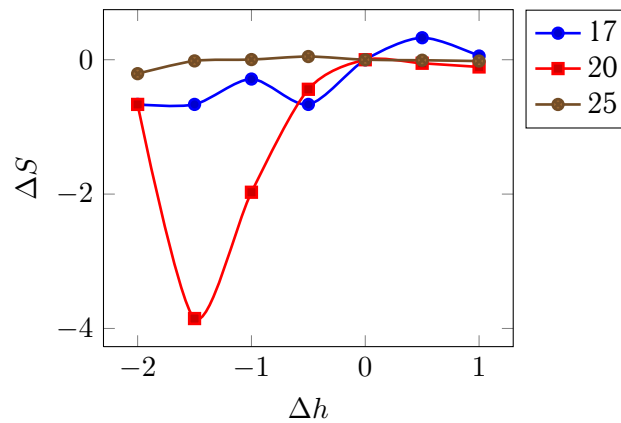


Рис. 9. Влияние изменения рельефа на прирост площади затопления. Зона 49

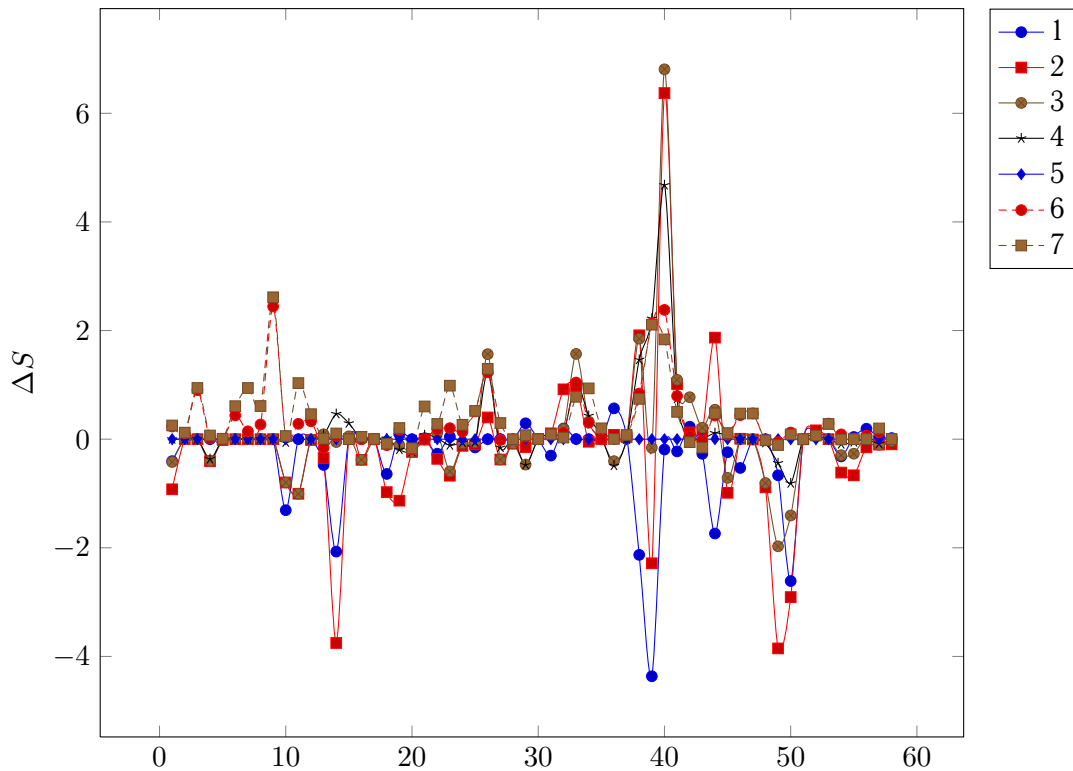


Рис. 10. Изменение площади паводкового затопления зон ВАП при различных значениях глубины русел для  $Q = 20\,000\text{ м}^3/\text{с}$ ,  $t = 10$  суток (на оси абсцисс указан номер зоны)

Численное интегрирование уравнений (8)–(9) для всей территории ВАП и ее отдельных зон с использованием построенных зависимостей  $S_{зат}(Q, h)$  показывает определяющее непосредственное (самоочищение) и опосредованное (лесной ландшафт) влияние тенденции изменения паводкового гидрографа на динамику глубины русел. Глубина русел оказывает значительное интегральное воздействие на относительную площадь территории паводкового затопления лишь при малых паводках.

**ПРИМЕЧАНИЕ**

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке гранта РГНФ «Поволжье» (проект № 14-12-34019).

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Георгиевский, В. Ю. Гидрологический режим и водные ресурсы / В. Ю. Георгиевский, А. Л. Шалыгин // Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. — М. : Росгидромет, 2012. — С. 53–86.
2. Задача управления гидрологическим режимом в эколого-экономической системе «Волжская ГЭС — Волго-Ахтубинская пойма». Ч. 1. Моделирование динамики поверхностных вод в период весеннего паводка / А. В. Хоперсков, С. С. Храпов, А. В. Писарев, А. А. Воронин, М. В. Елисеева, И. А. Кобелев // Проблемы управления. — 2012. — № 5. — С. 18–25.
3. Землянов, И. В. Анализ экологических последствий эксплуатации Волгоградского водохранилища для сохранения биоразнообразия основных водно-болотных территорий Нижней Волги / И. В. Землянов, О. В. Горелиц, А. Е. Павловский. — М. : Отчет о НИР ФГУ «ГОИН», 2010. — 675 с.
4. Иванов, В. В. Влияние гидроузлов на деформации пойменных берегов и русловых форм в низовьях реки Волги и Кубани / В. В. Иванов, В. Н. Коротаев // Эрозия почв и русловые процессы. — 2008. — № 16. — С. 224–242.
5. Имитационные модели динамики поверхностных вод с использованием данных дистанционного зондирования: влияние рельефа местности / А. А. Воронин, М. В. Елисеева, А. В. Писарев, А. В. Хоперсков, С. С. Храпов // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. — 2012. — № 3. — С. 54–62.
6. Особенности динамики затопления Волго-Ахтубинской поймы в зависимости от режимов испарения и инфильтрации / С. С. Храпов, А. В. Писарев, А. А. Воронин, Т. А. Дьяконова, Е. А. Циркова // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1, Математика. Физика. — 2012. — Т. 16, № 1. — С. 43–47.
7. Особо охраняемые природные территории Волгоградской области / В. А. Брылев, Н. О. Рябина, Е. В. Комиссарова, А. В. Материкин, Н. В. Сергиенко, И. С. Трофимова. — Волгоград : Альянс, 2006. — 256 с.
8. Проектирование системы эколого-экономического управления территорией Волго-Ахтубинской поймы на основе гидродинамического и геоинформационного моделирования / А. А. Воронин, А. А. Васильченко, М. В. Писарева, А. В. Писарев, А. В. Хоперсков, С. С. Храпов, Ю. Е. Подшипкова // Управление большими системами. — 2015. — Вып. 55. — С. 79–102.
9. Численная схема для моделирования динамики поверхностных вод на основе комбинированного SPH-TVD-подхода / С. С. Храпов, А. В. Хоперсков, Н. М. Кузьмин, А. В. Писарев, И. А. Кобелев // Вычислительные методы и программирование. — 2011. — Т. 12, № 1. — С. 282–297.

**REFERENCES**

1. Georgievskiy V.Yu., Shalygin A.L. *Gidrologicheskiy rezhim i vodnye resursy* [Hydrology and Water Resources]. *Metody otsenki posledstviy izmeneniya klimata dlya fizicheskikh i biologicheskikh sistem* [Methods for assessing the effects of climate change on physical and biological systems]. Moscow, Rosgidromet Publ., 2012, pp. 53-86.
2. Khoperskov A.V., Khrapov S.S., Pisarev A.V., Voronin A.A., Eliseeva M.V., Koblelev I.A. *Zadacha upravleniya gidrologicheskim rezhimom v ekologo-ekonomicheskoy sisteme «Volzhskaya GES — Volgo-Akhtubinskaya poyma»*. Ch. 1. *Modelirovanie dinamiki poverkhnostnykh vod v period vesennego pavodka* [The Hydrologic Regime Control Task in the Eco-Economic System «Volga Hydroelectric Power Station — The Volga-Akhtuba Floodplain». I. Simulation of Dynamics of Surface Water During Spring Floods]. *Problemy upravleniya* [Control sciences], 2012, no. 5, pp. 18-25.
3. Zemlyanov I.V., Gorelits O.V., Pavlovskiy A.E. *Analiz ekologicheskikh posledstviy ekspluatatsii Volgogradskogo vodokhranilishcha dlya sokhraneniya bioraznoobraziya osnovnykh vodno-bolotnykh territoriy Nizhney Volgi* [Analysis of the Environmental Impacts

of Operating the Volgograd Reservoir for Biodiversity Major Wetlands of the Lower Volga]. Moscow, Otchet o NIR FGU «GOIN» Publ., 2010. 675 p.

4. Ivanov V.V., Korotaev V.N. Vliyanie gidrouzlov na deformatsii poymennykh beregov i ruslovykh form v nizovyakh reki Volgi i Kubani [Effect of Hydro Strain on the Shores of the Floodplain and Channel Forms in the Lower Reaches of the Volga and Kuban]. *Eroziya pochv i ruslovye protsessy*, 2008, no. 16, pp. 224-242.

5. Voronin A.A., Eliseeva M.V., Pisarev A.V., Khoperskov A.V., Khrapov S.S. Imitatsionnye modeli dinamiki poverkhnostnykh vod s ispolzovaniem dannykh distantsionnogo zondirovaniya: vliyanie relyefa mestnosti [Simulation Models of Surface Water Dynamics Using Remote Sensing Data]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii*, 2012, no. 3, pp. 54-62.

6. Khrapov S.S., Pisarev A.V., Voronin A.A., Dyakonova T.A., Tsirkova E.A. Osobennosti dinamiki zatopleniya Volgo-Akhtubinskoy poymy v zavisimosti ot rezhimov ispareniya i infiltratsii [The Role of Infiltration and Evaporation in the Flooding Dynamics of the Volga-Akhtuba Floodplain]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 1, Matematika. Fizika* [Science Journal of Volgograd State University. Mathematics. Physics], 2012, vol. 16, no. 1, pp. 43-47.

7. Brylev V.A., Ryabinina N.O., Komissarova E.V., Materikin A.B., Sergienko N.V., Trofimova I.S. *Osobo okhranyaemye prirodnye territorii Volgogradskoy oblasti* [Protected Specially Areas of the Volgograd Region]. Volgograd, Alyans Publ., 2006. 256 p.

8. Voronin A.A., Vasilchenko A.A., Pisareva M.V., Pisarev A.V., Khoperskov A.V., Khrapov S.S., Podshchipkova Yu.E. Proektirovanie sistemy ekologo-ekonomicheskogo upravleniya territoriei Volgo-Akhtubinskoy poymy na osnove gidrodinamicheskogo i geoinformatsionnogo modelirovaniya [Designing a System for Ecological-Economical Management of the Volga-Akhtuba Floodplain on Basis of Hydrodynamic and Geoinformational Simulation]. *Upravlenie bolshimi sistemami*, 2015, iss. 55, pp. 79-102.

9. Khrapov S.S., Khoperskov A.V., Kuzmin N.M., Pisarev A.V., Kobelev I.A. Chislennaya skhema dlya modelirovaniya dinamiki poverkhnostnykh vod na osnove kombinirovannogo SPH-TVD-podkhoda [A Numerical Scheme for Modeling the Dynamics of Surface Water Based on the Combined SPH-TVD-Approach]. *Vychislitelnye metody i programmirovaniye*, 2011, vol. 12, no. 1, pp. 282-297.

## COGNITIVE ANALYSIS AND SCENARIO-SIMULATION MODELING OF THE ECOLOGICAL AND ECONOMIC SITUATION IN NORTHERN PART OF THE VOLGA-AKHTUBA FLOODPLAIN

**Alexander Aleksandrovich Voronin**

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor,  
Department of Fundamental Informatics and Optimal Control,  
Volgograd State University  
voronin.prof@gmail.com, fiou@volsu.ru  
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

**Anna Anatolyevna Vasilchenko**

Senior Lecturer, Department of Fundamental Informatics and Optimal Control,  
Volgograd State University  
aa-vasilchenko@mail.ru, fiou@volsu.ru  
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

**Olga Sergeevna Yakushkina**

Student, Institute of Mathematics and Information Technologies,  
Volgograd State University  
islandolushka@gmail.com, fiou@volsu.ru  
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

**Abstract.** The aim of the present article is cognitive analysis and scenario-simulation modeling of the ecological and economic situation of the northern part of the Volga-Akhtuba floodplain. For the cognitive analysis of the problem the symbolic directed graph of inter-component interactions was built. It was found that the main factors of dehydration of Volga-Akhtuba floodplain are natural and industrial decline in the spring floods, degradation of river beds, socio-economic uncontrolled development of its territory. The authors revealed a large number of stable and unstable cycles of the graph describing the dynamics of the system. An empirical model development scenarios as a tuple of the vectors of the initial state, external action and development trends. Qualitative analysis scenarios showed that the lack of control of the hydrological regime always leads to a decrease in the area of flood inundation as a result of urbanization and the degradation of the relief area.

For the quantitative study of the problem dynamic equation of depth floodplain channels was built, to verify that the methods of geo-information and hydrodynamic simulation investigated the sensitivity of the area of flood inundation to change the depth of the channels and flood volume for the entire territory and its individual sections.

**Key words:** cognitive analysis, scenario-simulation modeling, digital terrain model, hydrological modeling, Volga-Akhtuba floodplain, hydrological mode.