



DOI: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2017.4.3>

УДК 519.6

ББК 22.19 + 20.1

## ОПТИМИЗАЦИЯ И СЦЕНАРНО-ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ СТРУКТУРЫ МАЛЫХ ИСКУССТВЕННЫХ РУСЕЛ ПОЙМЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ<sup>1</sup>

**Владислав Сергеевич Бакулин**

Студент кафедры фундаментальной информатики и оптимального управления,  
Волгоградский государственный университет  
gitara\_93@mail.ru, 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

**Александр Александрович Воронин**

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

**Михаил Алексеевич Харитонов**

Младший научный сотрудник кафедры фундаментальной информатики  
и оптимального управления,  
Волгоградский государственный университет  
kharitonov.mihail@gmail.com, fiou@volsu.ru  
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

**Аннотация.** Целью настоящей работы является исследование свойств оптимальности локальных искусственных русловых систем пойменных территорий. Предложен метод поиска топологической структуры и площади поперечных сечений искусственных русел, максимизирующих суммарную взвешенную площадь затапливаемой территории. Для адекватности постановки и

решения задачи управления проведено адаптивное зонирование цифровой модели территории поймы на участки с незначительным эффектом межзонального затопления при малых и средних паводках. Оптимальная пропускная способность малых русел разыскивалась с помощью многошагового рекурсивного метода динамического программирования. Представлены результаты численной реализации алгоритма с использованием компьютерных гидродинамических имитаций паводковой динамики и геоинформационным моделированием пространственно распределенных параметров рельефа нескольких участков территории северной части Волго-Ахтубинской поймы с искусственными локальными русловыми системами.

Построен взвешенный ориентированный граф межфакторных взаимодействий, определяющих паводковую динамику северной части Волго-Ахтубинской поймы, при помощи которого проведена формализация сценариев развития ситуации и динамики параметров, непосредственно определяющих оптимальную локальную русловую структуру. Приведены субъективные оценки вероятности сценариев и нечеткие оценки динамики параметров русловой структуры.

**Ключевые слова:** структурная оптимизация, динамическое программирование, производственная функция, геоинформационное моделирование, гидродинамическое моделирование, системы с потоками.

## Введение

Волго-Ахтубинская пойма (ВАП), расположенная в нижнем течении р. Волги, имеет протяженность около 450 км, площадь ее территории превышает 20 тыс. кв. км. На ее территории расположено несколько тысяч малых русел, через которые происходит весеннее паводковое затопление. В северной части ВАП расположены природный парк с ценными представителями флоры и фауны, значительное число населенных пунктов, ведется сельскохозяйственный, лесной и рекреационный бизнес. Жизнь экосистемы ВАП полностью определяется весенним паводковым режимом р. Волги, который с 1959 г. регулируется Волжской ГЭС (ВГЭС) и поэтому существенно отличается от природного. В последние десятилетия наблюдается деградация пойменной экосистемы ВАП вследствие прогрессирующего снижения уровня паводкового затопления [2; 5].

Одной из мер противодействия природной деградации ВАП является повышение эффективности территориального распределения паводковых вод путем строительства каналов с управляемой структурой и поперечным сечением русел. В данной работе предложен метод оптимизации структуры локальных искусственных русловых систем пойменных территорий, а также представлены результаты его численной реализации для нескольких участков территории ВАП при использовании компьютерных гидродинамических имитаций паводковой динамики с геоинформационным моделированием пространственно распределенных параметров русловой системы. Проанализированы варианты динамики оптимальной структуры русел при различных сценариях изменения системных параметров. Используемая в работе цифровая модель рельефа (ЦМР) ВАП и численная гидродинамическая модель (программно-алгоритмический комплекс «Web-ЭКОГИС») описаны в [3; 6–9].

## 1. Системный анализ и имитационное моделирование динамики паводковых вод на территории северной части ВАП

Анализ космических снимков и результатов гидродинамических расчетов [6; 7] показал, что площадь затопления территории определяется величиной постоянного расхода  $Q$  и длительностью  $t$  первой фазы паводка, средние значения которых за последние 30 лет равны соответственно  $25\,000\text{ м}^3/\text{с}$  и 10 суток. Карта территории паводкового затопления северной части ВАП при  $Q = 25\,000\text{ м}^3/\text{с}$  и  $t = 10$  суток представлена на рисунке 1.

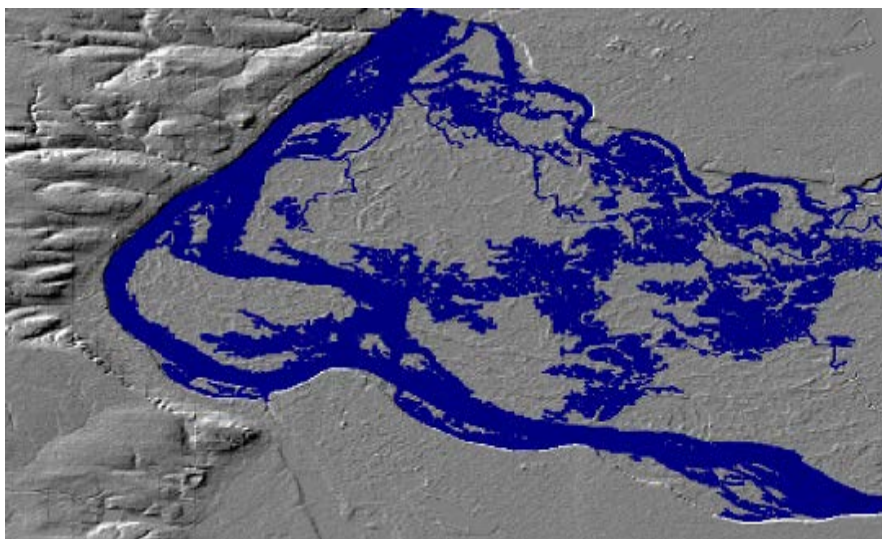


Рис. 1. Распределение воды на территории ВАП при  $Q = 25\,000\text{ м}^3/\text{с}$  и  $t = 10$  суток

Топологическая структура русел северной части ВАП представима в виде бинарного дерева с многими десятками уровней ветвления. Однако существенное различие в величине и характере расходов воды в ветвях этого дерева обуславливают представление структуры с учетом способа ее функционирования и существа решаемой задачи управления. С учетом этого будем считать, что первый (высший) уровень иерархической гидрологической структуры территории северной части ВАП образуют три магистральных водотока (р. Волга, р. Ахтуба и ерик «Пахотный»). Второй — связанные с ними 58 русел глубиной 2–2,5 м, образующих локальные русловые системы. Третий уровень образуют русла глубиной 1,5–2 м, связанные с руслами второго уровня. Русла четвертого уровня меньшей глубины имеют небольшое число локальных русловых систем.

Такая гидрологическая структура создает возможность разбиения территории на зоны преимущественно независимого затопления локальными русловыми системами или даже отдельными ее руслами при малых паводках или в их начальных фазах. Мера погрешности такого затопления, растущая вместе с ростом числа зон, характеризует потенциальную управляемость процесса паводкового затопления, ставит тем самым предел сложности системе пространственно распределенного управления.

Границы зон, минимизирующие погрешности межзонного затопления при заданных параметрах паводка, находились в ходе гидродинамического и геоинформационного моделирования. Для построения нулевого приближения границ зон на основе иерархиче-

ской цифровой модели русловой структуры использовался модифицированный алгоритм Вороного [10]. Последующее адаптивное «квазинепрерывное» изменение границ проводилось в ходе анализа временного ряда матриц цифровых карт высот водного слоя при  $Q = 25\,000\text{ м}^3/\text{с}$ . В случае превышения предельно допустимой объемной доли трансграничных водных потоков производилось объединение соответствующих зон. Результат моделирования представлен в таблице 1.

Таблица 1

**Зависимость параметров зон территории ВАП от величины предельно допустимой объемной доли трансграничных потоков при  $Q = 25000\text{ м}^3/\text{с}$ ,  $t = 5 \cdot 10^5\text{ с}$**

Предельно допустимая объемная доля межзонных расходов паводковых вод (%)	Число зон ( $n$ )	Средняя площадь зоны ( $\text{км}^2$ )	Средний расход воды через главное русло зоны ( $\text{м}^3/\text{с}$ )
20	54	16,1	55,6
15	41	21,1	73,2
10	32	27,1	93,8
5	28	30,1	107,1
2	17	51,0	176,5

Зависимость числа зон от времени затопления при предельно допустимой объемной доле трансграничных водных потоков 5% представлена в таблице 2.

Таблица 2

**Зависимость числа зон от времени затопления при предельно допустимой объемной доле трансграничных водных потоков 5%**

$t \times 10^5\text{ с}$	2	4	6	8	10	12
Число зон	58	49	27	24	19	11

Как показало компьютерное гидродинамическое имитационное моделирование динамики паводковых вод на территории северной части ВАП, непосредственное затопление большей части зон при малых паводках осуществляется из русел третьего иерархического уровня при несущественных трансграничных эффектах. С другой стороны, характер затопления территории при больших паводках характеризуется низкой чувствительностью к структурным параметрам русел. Поэтому управление пропускной способностью русел для максимизации общей площади затопляемой территории актуально и потенциально осуществимо в большей части зон при значениях параметров первой фазы паводка  $Q$ ,  $t$  и меньших, чем их средние величине. При этом общая площадь затопленной территории является суммой (взвешенной суммой) площадей независимых зонных затоплений, рассчитываемых по результатам численного гидродинамического моделирования.

Расчет расходов паводковых вод на элементах локальных русловых структур показал примерно равное их распределение между боковыми руслами третьего уровня при их числе от 2 до 4.

## 2. Задача оптимизации структуры искусственных малых русел пойменной территории с управляемым поперечным сечением

Представленные в п. 1 результаты имитационного моделирования динамики паводковых вод в ВАП позволяют сделать вывод о потенциальной возможности управления их пространственным распределением в некоторой области параметров паводка при адаптивном зонировании территории с учетом локальных особенностей рельефа и русловой структуры. Однако структура локальных русловых систем ВАП, сформированная в условиях природных паводков, может быть неоптимальной в изменившихся за последние десятилетия паводковых условиях. Поэтому представляет интерес поиск зависимости оптимальной структуры локальных русловых систем от параметров паводка и рельефа территории. Для исследования этой проблемы представим следующую формальную задачу оптимизации структуры искусственных малых русел пойменной территории с управляемым поперечным сечением.

Модель пойменной территории (квадрат со стороной  $L$ ) описывается цифровой моделью рельефа, представленной сеточной функцией  $b(i, j)_1^N$  высот. На территории задана серия  $(m, n)$ -разбиений:  $n$ -кратных рекурсивных дроблений на  $m$  равных частей, дающих в результате  $m^n$  одинаковых участков (зон). Каждому  $(m, n)$ -разбиению территории соответствует структура (дерево) искусственных русел, схематично представленная для нескольких случаев на рисунке 2.

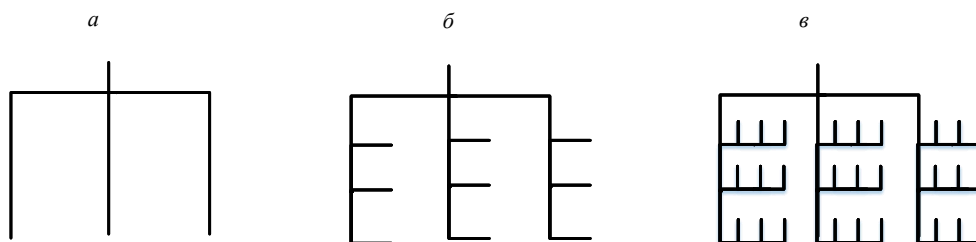


Рис. 2: а — (3,1)-дерево; б — (3,2)-дерево; в — (3,3)-дерево

Объем паводковых вод  $V_0$ , поступивших на территорию за время  $t$ , определяется формулой  $V_0 = Q_0 t$ , где  $Q_0$  — расход воды через входное русло территории. Обозначим  $\bar{V}$  объем вод, локализованных в руслах. Для объемов вод в зонах справедливы балансовые соотношения

$$V_0 = V_{i_0} - \bar{V}, V_{i_{q-k}} = \sum_{j=1}^m V_{i_{q-kj}}, q = \overline{1, n}, k = \overline{1, q}.$$

Здесь и далее комплексный индекс  $i_1 i_2 \dots i_n$  ( $i_k = \overline{1, m}, k = \overline{1, n}$ ) для краткости записывается как  $i_n$ . Площадь затопленной территории каждой из зон описывается вогнутыми функциями  $S_{i_n}^{zat} = \varphi_{i_n}(V_{i_n})$ , полученными путем кусочно-линейных аппроксимаций временных рядов  $S_{i_n}^{zat}(t_k), V_{i_n}^{zat}(t_k)$ , полученных агрегированием соответствующих участков массива карт затоплений  $K(t_k), t_k = 10^3 k, k = \overline{1, 500}$ , полученных в ходе численного гидродинамического моделирования (см. п. 1). С учетом результатов п. 1 расходы воды в русловой системе можно задать формулами  $Q_{i_{n-k}, j} = \frac{Q_{i_{n-k}}}{m}$  ( $j = \overline{1, m}, k = \overline{1, n}$ ). Управлениями пропускной способностью русла с площадью сечения  $S_0^{sech}$

будем считать доли открытых русел  $u \in [0; 1]$ , так что  $S^{sech} = uS_0^{sech}$ . Тогда

$$Q_{i_{n-k},j} = \frac{Q_{in}u_j}{U} = \frac{V_{in-k}}{T} \cdot \frac{u_j}{U}, \quad U = \sum_{i=1}^m u_i.$$

В каждой зоне задан коэффициент относительной экологической ценности  $\alpha_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i,j=1,N} a_{ij}}$ , ( $a_{ij} = 0, a_{max}$ ).

Задача управления водными потоками в русловой  $(m, n)$ -структуре имеет вид

$$\begin{aligned} \varphi_{i_{n-1}}(V_{i_{n-1}}) &= \sum_{j=1}^m \alpha_{i_{n-1}j} \varphi_{i_{n-1}j}(V_{i_{n-1}j}) \rightarrow \\ &\rightarrow \max_{\{V_{i_{n-1}j}\}_{j=1}^m} \sum_{j=1}^m V_{i_{n-1}j} = V_{i_{n-1}}, V_{i_{n-1}j} \in \left[0, \frac{2V_{i_0}}{m^n}\right], \forall i_{n-1}. \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \varphi_{i_{n-k}}(V_{i_{n-k}}) &= \sum_{j=1}^m \alpha_{i_{n-k}j} \varphi_{i_{n-k}j}(V_{i_{n-k}j}) \rightarrow \\ &\rightarrow \max_{V_{i_{n-k}j}} \sum_{j=1}^m V_{i_{n-k}j} = V_{i_{n-k}}, V_{i_{n-k}j} \in \left[0, \frac{2V_{i_0}}{m^{n-k+1}}\right], \forall i_{n-k}, k = \overline{2, n}. \end{aligned} \quad (2)$$

Решение задачи (1)–(2), которое далее находится рекурсивным (по глубине  $(m, n)$ -дерева) численным многошаговым (дискретизацией величин объема паводковых вод) методом динамического программирования (рекурсией по ширине  $(m, n)$ -дерева), обозначим функциями

$\{V_{i_{q-k}j}^*(V_{i_{q-k-1}})\}$ ,  $\{\varphi_{i_{q-k}j}^*(V_{i_{q-k-1}})\}$ ,  $\varphi_{i_{q-k}}^*(V_{i_{q-k}}) = \max_{(V_{i_{q-k}j})} \varphi_{i_{q-k}j}^*(V_{i_{q-k}j})$ . Оптимальное управление  $u_{i_{q-k}j}^*(V_{i_{q-k-1}})$  определяется следующими формулами:

$$\begin{aligned} j^* &= \arg \max V_{i_{q-k}j}^*, V_{i_{n-1}j}^* = V_{i_{n-1}} \cdot \frac{u_{n-1,j}^*}{\sum_{j=1}^m u_{n-1,j}^*}, \\ u_{i_{n-1},j^*}^* &= 1, u_{n-1,j}^* = \frac{V_{i_{n-1},j}^*}{V_{i_{n-1},j^*}^*}, j = \overline{1, m}. \end{aligned} \quad (3)$$

Оптимальные значения  $m^*$  и  $n^*$  находятся методом полного перебора.

Численное решение этой задачи проводилось в рамках серии численных гидродинамических имитаций паводкового затопления пяти ВАП с искусственными  $(m, n)$ -системами русел при  $m = 2, 3, 4$  и  $m = 1, 2, 3$  и следующими выбранными на основании результатов п. 1 характеристиками параметров паводка и территории: размера (квадрат со стороной  $L = 5 \text{ км}$ ),  $Q_0 = 100 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $t = (0 - 100) \times 10^4 \text{ с}$  при уклоне русел  $0,03^\circ$ , и следующих значениях диаметров ( $d(n)$ ) и глубин ( $h(n)$ ) русел:  $d(1) = 50 \text{ м}$ ,  $h(1) = 3 \text{ м}$ ,  $d(2) = 30 \text{ м}$ ,  $h(2) = 2 \text{ м}$ ,  $d(3) = 10 \text{ м}$ ,  $h(3) = 1,5 \text{ м}$ . Коэффициенты паводковой неоднородности каждой из  $m^n$  зон выбирались случайно в диапазоне  $\overline{1, a_{max}}$ .

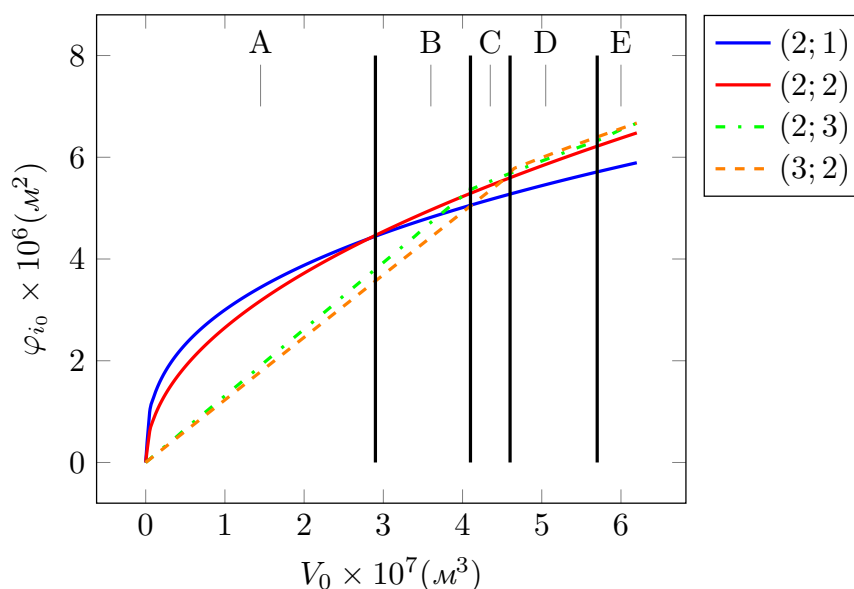


Рис. 3. Динамика затопления одного из участков территории ВАП при различных параметрах русловой структуры. Указан вид оптимальных структур и области их оптимальности  
 $(A : (m^*, n^*) = (2; 1), B : (m^*, n^*) = (2; 2), C : (m^*, n^*) = (2; 3),$   
 $D : (m^*, n^*) = (3; 2), E : (m^*, n^*) = (2 - 3; 2 - 3))$

При расчете зависимостей площади затопления зон от объема поступивших в них паводковых вод  $S_{in}^{zat} = \varphi_{in}(V_{in})$  проводился контроль эффекта межзонального затопления. Если при значении  $t$  максимальный (по зонам) относительный эффект превышал 5%, то при  $V_0 \geq Q_0 t$  процесс затопления считался неуправляемым.

Результаты численного решения задачи (1)–(3) и поиска оптимальных значений структурных параметров для всех пяти участков территории ВАП незначительно отличаются друг от друга. Типичная динамика затопления одной из территорий при различных параметрах русловой структуры представлена на рисунке 3. Участки  $A$ – $D$  соответствуют управляемым, участок  $E$  — неуправляемым сечениям русел и весьма слабой зависимости площади затопленной территории от русловой структуры. Реальной структуре русел данного участка территории ВАП отвечает участок  $B$ .

Результаты численного решения задачи (1)–(3) для серии значений объема паводковых вод  $1,0 \times 10^7 \leq V_0(\text{м}^3) \leq 7,5 \times 10^7$  и переменного параметра паводковой неоднородности рельефа представлены в таблице 3. Ее строки помечены значениями оптимальных параметров структуры  $m^*, n^*$ , столбцы — значениями  $a_{max} = \bar{3}, \bar{6}$ . Данные ее первого столбца соответствуют кривым на рисунке 3. Последняя строка таблицы 3 отвечает случаю неуправляемого затопления.

### 3. Когнитивный анализ факторов и сценарное моделирование долгосрочной динамики оптимальной структуры искусственных малых русел ВАП

Продолжающаяся деградация природных весенних паводков вместе с социоэкономическим освоением и экологической деградацией территории ВАП актуализируют исследование зависимости оптимальной структуры ее локальных русловых систем от долгосрочных тенденций социоприродохозяйственной динамики.

Таблица 3

Значения объемов паводка  $V_0 \times 10^7 (м^3)$ , отвечающих параметрам оптимальной локальной русловой структуры  $m^*$ ,  $n^*$  и паводковой неоднородности рельефа  $a_{max} = \overline{3,6}$

$m^*; n^* \setminus a_{max}$	3	4	5	6
2;1 (A)	1,0-3,0	1,0-2,6	1,0-2,4	1,0-2,1
2;2 (B)	3,0-3,9	2,7-3,8	2,5-3,7	2,2-3,2
2;3 (C)	3,9-4,5	3,8-4,4	3,7-4,3	3,3-3,8
3;2 (D)	4,5-5,5	4,4-5,0	4,3-4,5	3,8-4,2
3;3	—	5,0-5,5	4,5-5,5	4,3-5,5
2-3;2-3 (E)	5,5-7,5	5,5-7,5	5,5-7,5	5,5-7,5

Результаты п. 1 показывают, что оптимальная структура русел с управляемым сечением определяется объемом паводковых вод  $V_0$  и параметром паводковой неоднородности рельефа  $a_{max}$ , поэтому прогноз ее изменения требует дополнения данных таблицы 3 данными прогноза изменения этих параметров.

Анализ результатов гидрологических исследований волжского бассейна [1;4] и комплексного обследования северной части ВАП [2;5] позволяет формально описать взаимодействие главных факторов ее паводковой динамики взвешенным ориентированным графом, вершины которого имеют следующий содержательный смысл: средний объем паводковых вод, поступающих на территорию; максимальный объем паводковых вод, поступающих на территорию (2); средний объем природного весеннего паводка (3); средний объем весеннего попуска Волжской ГЭС (4); максимальный объем весеннего попуска Волжской ГЭС (5); доля паводковых вод, поступающих в р. Ахтуба (6); доля паводковых вод, поступающих в малые русла (7); пропускная способность малых русел (8); доля социохозяйственной территории (9); уровень развития дорожной сети (10); уровень гидрологической безопасности (11).

В матрице связности  $||a_{ij}||$   $i, j = \overline{1,11}$  графа 4 обозначим слабые (медленные) взаимодействия элементами  $a_{ij} = \pm 1$ , сильные (быстрые) — элементами  $a_{ij} = \pm 2$ . Тогда ненулевые элементы этой матрицы имеют вид:  $a_{18} = a_{19} = a_{21} = a_{28} = a_{9,10} = +1$ ,  $a_{34} = a_{41} = a_{52} = a_{61} = a_{71} = a_{72} = a_{87} = +2$ ,  $a_{9,11} = -1$ ,  $a_{2,11} = a_{98} = a_{10,8} = -2$ .

Анализ построенного графа позволяет выявить тенденции изменения главных факторов динамики паводковой ситуации в ВАП и субъективные оценки их вероятности (за десятилетний период), представленные в таблице 4. Введем следующую простейшую лингвистическую шкалу силы тенденции каждого фактора и ее цифровое обозначение: «сильно (2)», «слабо (1)», «рост (+1;+2)», «падение (-1;-2)», «стабильность (0)». Используя данные таблицы 4, получим 8 трехмерных векторов — сценариев развития комплексной тенденции изменения факторов паводковой динамики. Каждому сценарию с помощью построенного графа межфакторных взаимодействий поставим в соответствие вектор  $(\Delta V_0, \Delta a_{max})$  сценария развития ситуации, непосредственно определяющей динамику оптимальной локальной структуры русел, и функции принадлежности нечеткого оценивания его относительных изменений (рис. 5).

Результаты анализа, представленные в таблице 5, показывают, что существует 4 сценария развития ситуации, субъективные оценки вероятности которых соответственно равны:  $p(-1; -1) = 0,729$ ;  $p(-2; -1) = 0,089$ ;  $p(-1; -2) = 0,08$ ,  $p(-2; -2) = 0,019$ .



Таблица 4

**Тенденции изменения главных факторов паводковой динамики ВАП**

№ п/п	Фактор	Тенденция (оценка вероятности)
1	Средний объем весеннего паводка	Сильное (0,1) или слабое (0,9) снижение
2	Доля паводковых вод, поступающих в р. Ахтуба	Сильное (0,1) или слабое (0,9) снижение
3	Доля социохозяйственной территории ВАП	Сильное (0,9) или слабое (0,1) повышение

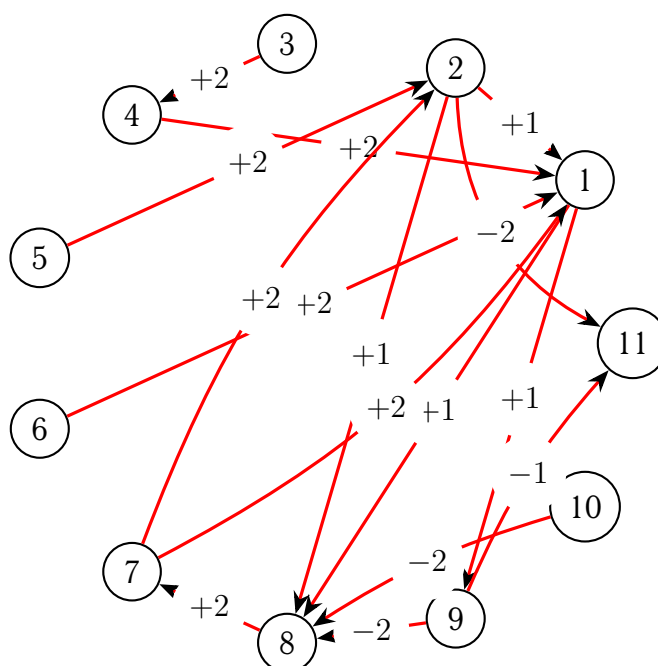


Рис. 4. Взвешенный ориентированный граф межфакторных взаимодействий

Таблица 5

**Сценарии развития паводковой ситуации в ВАП**

Фактор\комплексная тенденция	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-1	-2	-1	-1	-2	-2	-1	-2
2	-1	-1	-2	-1	-2	-1	-2	-2
3	-1	-1	-1	-2	-1	-2	-2	-2
$\Delta V_0$	-1	-2	-2	-1	-2	-2	-2	-2
$\Delta a_{max}$	-1	-1	-1	-2	-1	-2	-2	-2
Субъективная оценка вероятности	0,729	0,08	0,08	0,08	0,009	0,009	0,009	0,001

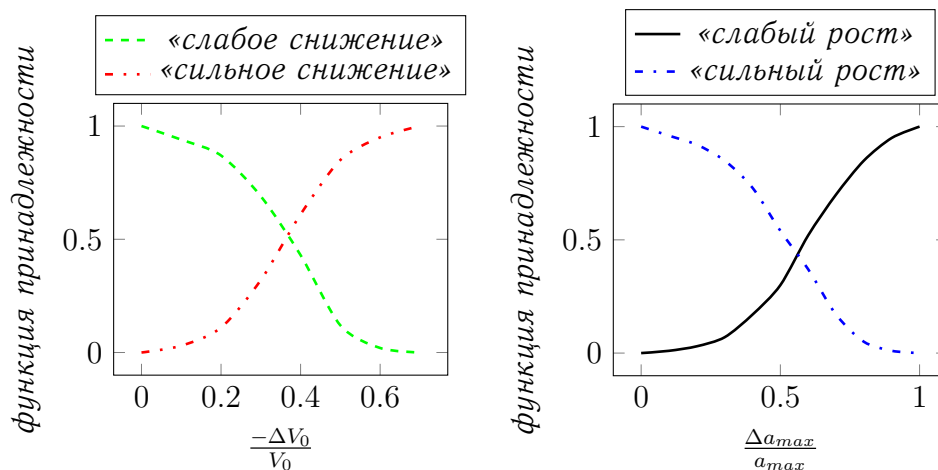


Рис. 5. Функции принадлежности нечеткого оценивания относительных изменений параметров развития ситуации

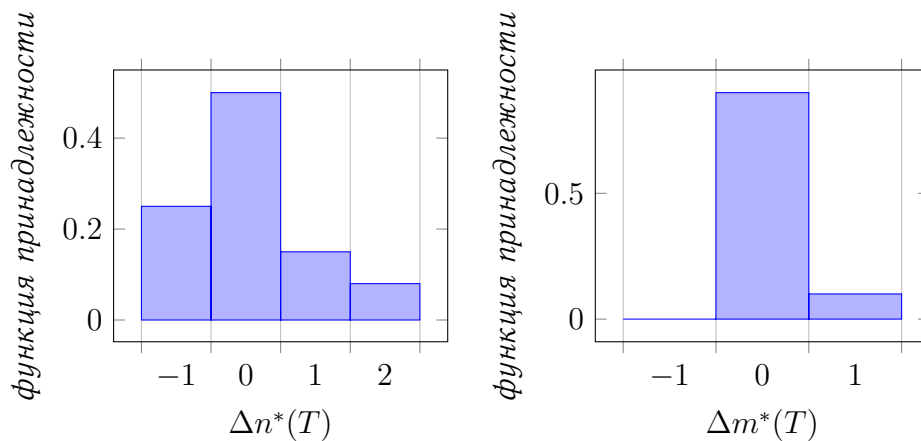


Рис. 6. Нечеткие оценки динамики параметров русловой структуры  $m^*$ ,  $n^*$

С учетом этих данных, функций, представленных на рисунке 5, и данных таблицы 3 были построены нечеткие оценки динамики параметров русловой структуры  $m^*$ ,  $n^*$ , представленные на рисунке 6.

### Заключение

Проведенные исследования показали потенциальную возможность управления структурой локальных русловых систем пойменных территорий с целью повышения эффективности использования паводковых вод для их орошения. Главными факторами, определяющими оптимальную структуру этих систем, являются объем паводковых вод и мера неоднородности территории. При малых и средних паводках управление русловой системой может дать существенный эффект. При больших паводках затопление территории определяется главным образом ее рельефом и практически не зависит от структуры ее локальных русловых систем.

## ПРИМЕЧАНИЕ

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Волгоградской области в рамках научного проекта № 16-48-340147.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Асарин, А. Е. Речные наводнения: причины и последствия. Что можно и нужно сделать? / А. Е. Асарин // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. — 2013. — № 1. — С. 416–427.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. The Numerical Simulation of Shallow Water: Estimation of the Roughness Coefficient on the Flood Stage / S. Khrapov, A. Pisarev, I. Koblelev, A. Zhumaliev, E. Agafonnikova, A. Losev, A. Khoperskov // Advances in Mechanical Engineering. — 2013. — Vol. 5. — Article ID: 787016.
10. Karimipour, F. Watershed delineation from the medial axis of river networks / F. Karimipour, M. Ghandehari, H. Ledoux // Computers and Geosciences. — 2013. — Vol. 53. — P. 132–147.

## REFERENCES

1. Asarin A.E. Rechnye navodneniya: prichiny i posledstviya. Chto mozhen i nuzhno sdelat? [River Floods: Causes and Consequences. What Can and Should Be Done?]. *Strategiya grazhdanskoy zashchity: problemy i issledovaniya*, 2013, no. 1, pp. 416-427.
2. 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.

3. 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.

4. 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*. Moscow, Rosgidromet Publ., 2012, pp. 53-86.

5. 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.

6. Khoperskov A.V., Khrapov S.S., Pisarev A.V., Voronin A.A., Eliseeva M.V., Kobelev 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 Regimen Control Task in the Eco-Economic System «Volzhskaya 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.

7. 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.

8. 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.

9. Khrapov S., Pisarev A., Kobelev I., Zhumaliev A., Agafonnikova E., Losev A., Khoperskov A. The Numerical Simulation of Shallow Water: Estimation of the Roughness Coefficient on the Flood Stage. *Advances in Mechanical Engineering*, 2013, vol. 5, article ID: 787016.

10. Karimipour F., Ghandehari M., Ledoux H. Watershed Delineation From the Medial Axis of River Networks. *Computers and Geosciences*, 2013, vol. 53, pp. 132-147.

## OPTIMIZATION AND SCENARIO-SIMULATION MODELLING OF THE DYNAMICS OF THE STRUCTURE OF SMALL ARTIFICIAL CHANNELS IN FLOODPLAIN AREAS

**Vladislav Sergeevich Bakulin**

Student,

Department of Fundamental Informatics and Optimal Control,

Volgograd State University

gitara\_93@mail.ru, 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

**Alexander Aleksandrovich Voronin**

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

**Mikhail Alekseevich Kharitonov**

Junior Researcher, Department of Fundamental Informatics and Optimal Control,  
Volgograd State University  
kharitonov.mihail@gmail.com, fiou@volsu.ru  
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

**Abstract.** The purpose of this paper is to study the properties of optimality of local artificial channel systems of floodplain territories. A method for searching the topological structure and cross-sectional area of artificial channels maximizing the total weighted area of the flooded territory is proposed. For the adequacy of the formulation and solution of the control problem, an adaptive zoning of the digital model of the floodplain territory to areas with an insignificant effect of interband flooding at small and medium floods has been carried out. The optimal throughput of small channels was sought with the help of a multi-step recursive dynamic programming method. The results of numerical realization of the algorithm using computer hydrodynamic imitations of flood dynamics and geoinformation modeling of spatially distributed relief parameters of several sections of the territory of the northern part of the Volga-Akhtuba floodplain with artificial local channel systems are presented.

A weighted oriented graph of interfactor interactions determining the flood dynamics of the northern part of the Volga-Akhtuba floodplain was constructed, with the help of which the scenarios for the development of the situation and the dynamics of parameters directly determining the optimal local channel structure were formalized. Subjective estimates of the probability of scenarios and fuzzy estimates of the dynamics of the channel structure parameters are given.

**Key words:** structural optimization, dynamic programming, production function, geoinformation modeling, hydrodynamic modeling, flow systems.