



DOI: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2018.2.5>

УДК 519.6

ББК 22.19+20.1

## ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ ПРОЕКТОВ НА ПОЙМЕННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

**Анна Анатольевна Васильченко**

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

**Константин Евгеньевич Дубинко**

Студент кафедры фундаментальной информатики и оптимального управления,  
Волгоградский государственный университет  
horseunnamed@gmail.com, fiou@volsu.ru  
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

**Инеcса Игоревна Исаева**

Студентка кафедры фундаментальной информатики и оптимального управления,  
Волгоградский государственный университет  
isaeva-inessa@mail.ru, fiou@volsu.ru  
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

**Аннотация.** Программный комплекс предназначен для исследования возможностей и эффективности реализации гидротехнических проектов пойменных территорий с использованием технологий геоинформационного и гидродинамического моделирования. Структура описана как совокупность трех комплексных моделей: состояния, проектов и исследований. Проведена серия

вычислительных экспериментов: моделирование реализации проектов по восстановлению малых русел ВАП, установление оптимальной глубины русел ВАП, установление характеристик динамики воды в руслах, проверка адекватности алгоритмов модулей программного комплекса.

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, пойменные территории, Волго-Ахтубинская пойма, гидротехнические проекты, оптимизация.

### **Введение**

Пойменные территории — затапливаемые во время паводков участки речных долин — имеются у многих крупных рек. Экосистемы пойменных территорий имеют разнообразный, а иногда уникальный растительный и животный мир. Главная причина современной деградации экосистем пойменных территорий — деятельность человека. Населенные пункты, хозяйственные объекты и их инфраструктура нарушают естественный характер распространения паводковых вод, что приводит к изменению состояния экосистемы поймы. Для сохранения и восстановления их состояния необходима реализация природовосстановительных проектов, одновременно способствующих безопасному развитию социально-хозяйственных территорий.

Неопределенность и пространственная распределенность паводковых процессов требует анализа ситуации и проектных работ в широком диапазоне параметров, а эффективность рассматриваемых проектов должна сохраняться в столь же широком их диапазоне. Ограниченность проектных ресурсов требует анализа большого числа самих проектов и альтернатив территориального распределения проектных работ в рамках каждого из них. Планирование и реализация таких проектов на уникальных в экологическом отношении слабоустойчивых пойменных территориях особенно проблематичны как в связи со сложностью динамики паводковых вод в условиях разветвленной системы малых русел, так и в связи с многокритериальностью задачи управления, обусловленной значимостью социального, экономического и экологического критериев.

Практически единственным адекватным способом исследования возможности реализации и эффективности таких проектов является имитационное моделирование с системным использованием многослойных цифровых карт, вычислительных гидродинамических моделей, методов оптимизации. Вычислительная, алгоритмическая и методологическая сложность исследования таких проектов, возможность поэтапной многолетней параллельной реализации нескольких из них в условиях социоэкономического развития территорий требуют создания системы имитационного моделирования (СИМ) со свойствами расширяемости данных, алгоритмов и задач, реализуемых посредством расширяемых баз данных, модульности и каркасности структуры компьютерных программ.

Ниже приведено структурно-функциональное описание СИМ территориально распределенных гидротехнических проектов, направленных на улучшение паводкового гидрологического режима пойменных территорий и некоторые результаты ее реализации в северной части Волго-Ахтубинской поймы (ВАП). Актуальная версия СИМ предназначена для исследования двух видов проектов: установка/ликвидация дамб в малых руслах и изменение их геометрических характеристик с экологической и социоэкономической целевыми функциями.

## 1. Структура и функции системы имитационного моделирования гидротехнических проектов

Укрупненно структуру СИМ можно представить в виде совокупности двух основных и одной вспомогательной комплексных расширяемых моделей и соответствующих им комплексных модулей. Каждая из них, в свою очередь, является системой моделей, представленных в СИМ соответствующими модулями, состоящими из алгоритмов, входных и выходных данных. В структуру этих комплексных модулей входят три внешних модуля, предназначенных для моделирования природной и социохозяйственной динамики пойменных территорий.

### 1.1. Комплексный модуль состояния

Первую комплексную модель состояния пойменной территории образуют несколько моделей состояния и критериев состояния с сосредоточенными, территориально распределенными и агрегированными параметрами. Структура соответствующего комплексного модуля представлена на диаграмме (рис. 1). Внешние модули: ВМ1 — построение базовой ЦМР (ЦМР реальной пойменной территории) и ВМ2 — гидродинамика паводковых вод (эти модули являются частью программно-математического комплекса ЭКОГИС [4; 5]), модуль ВМ3 — построение цифровой кадастровой карты территории [2; 8].

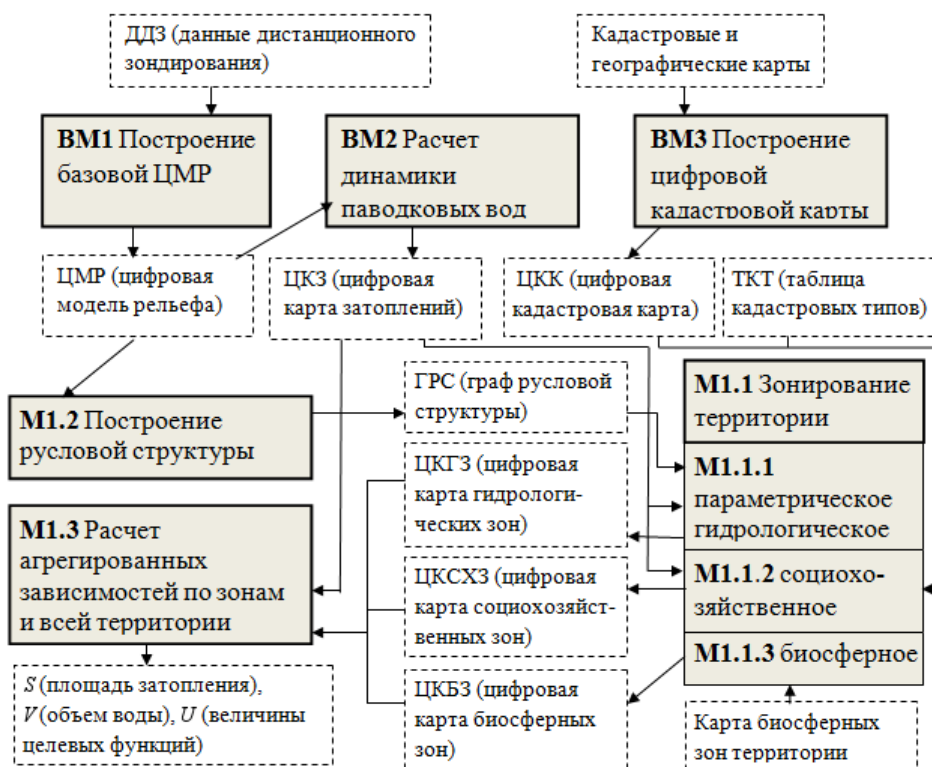


Рис. 1. Диаграмма модуля состояний

Модуль М1.1 «Зонирование территории» реализует деление пойменной территории на части для достижения нескольких целей. Первая (М1.1.1) — снижение на два или три порядка вычислительной сложности задачи оптимизации проектов путем выделения независимо затопляемых (гидрологических) зон.

Критерием оценки независимости затопления зон является погрешность  $\varepsilon = \min(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$ , где  $\varepsilon_1$  — оценка прошедшего через границу зоны относительного объема вод,  $\varepsilon_2$  — оценка доли ее затопленных границ. Формирование гидрологических зон, зависящее от параметров гидрографа и рельефа местности, выполняется поэтапно. Первый этап — получение первичных зон как окрестностей соответствующих русел без учета особенностей рельефа территории и динамики паводковых вод (рис. 2). Эти зоны в общем случае не удовлетворяют требованию независимого затопления, поэтому на следующем этапе реализуется алгоритм их частичного объединения (рис. 3)

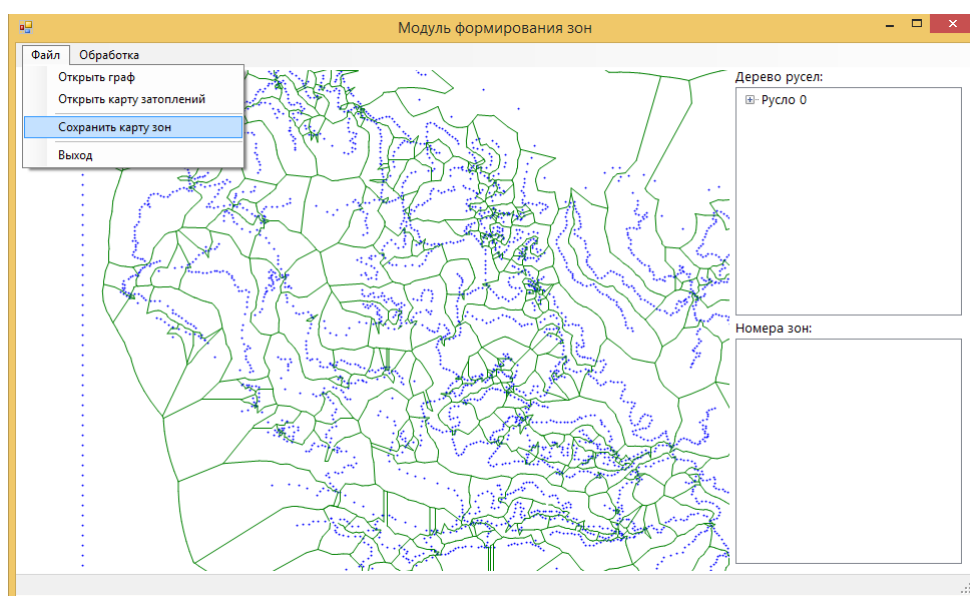


Рис. 2. Экранная форма модуля зонирования с первичными зонами

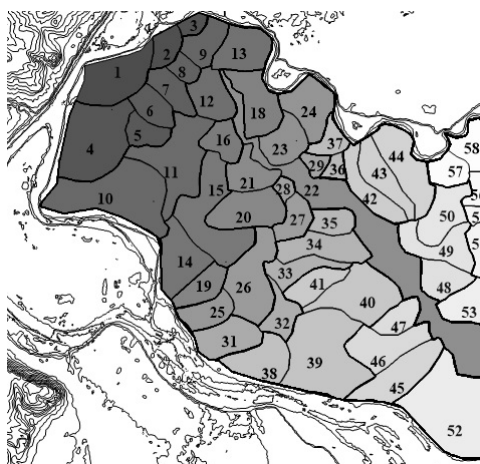


Рис. 3. Окончательный результат зонирования северной части ВАП для  $Q = 17 \div 19$  тыс. м<sup>3</sup>/с,  $t = 1 \div 4$  суток,  $\varepsilon = 0,15 \div 0,2$

В действующей версии СИМ построено множество гидрологических зон ВАП для актуального диапазона параметров первой ступени паводкового гидрографа ВГЭС  $Q = 17 \div 27$  тыс. м<sup>3</sup>/с и  $t = 1 \div 10$  суток и серии значений погрешности зонирования  $\varepsilon$ . Каждому узлу сетки и значению  $\varepsilon \in [0,05; 0,25]$ ,  $\Delta\varepsilon = 0,05$  соответствует ЦКГЗ (всего  $11 \cdot 10 \cdot 5 = 550$  карт). В некотором диапазоне  $Q_i, i = 1, \dots, n_1; t_j, j = 1, \dots, n_2; \varepsilon_k, k = 1, \dots, n_3$  точкам плоскости  $(Q, t)$  соответствуют одинаковые карты ГЗ (рис. 4). Общее число различных карт гидрологических зон равно 48.

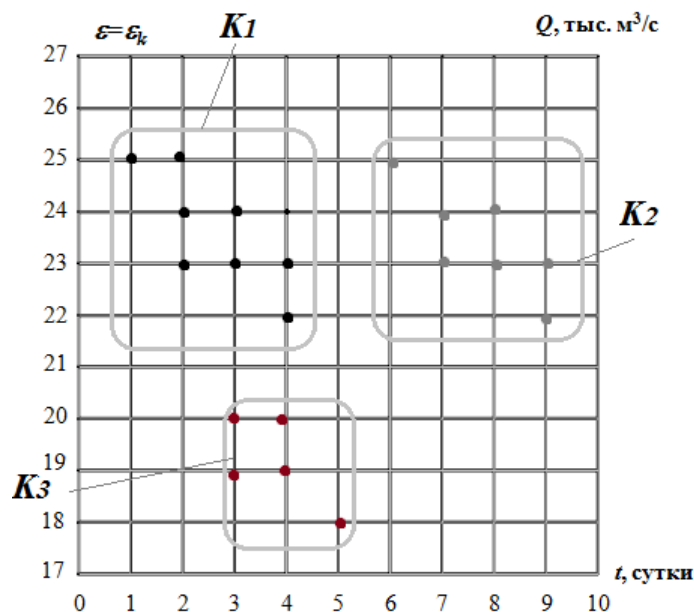


Рис. 4. ЦКГЗ для диапазона значений  $Q, t$  и  $\varepsilon = \varepsilon_k$ .  $K_1(Q_i, t_j, \varepsilon_k)$  – ЦКГЗ для  $Q = 22, \dots, 25; t = 1, \dots, 4$ .  $K_2(Q_i, t_j, \varepsilon_k)$  – ЦКГЗ для  $Q = 22, \dots, 25; t = 6, \dots, 9$ .  $K_3(Q_i, t_j, \varepsilon_k)$  – ЦКГЗ для  $Q = 18, \dots, 20; t = 3, \dots, 5$

Модули М1.1.2 и М1.1.3 соответственно делят территорию на социохозяйственные (с использованием модуля ВМЗ) и биосферные зоны для вычисления проектных целевых функций и ограничений в модуле М1.3.

Модуль «Русловая структура» (М1.2) позволяет строить в виде сетевых и иерархических графов, визуализировать и редактировать общую и актуальные (с учетом величин расходов и направлений течения) топологические модели русловой структуры пойменной территории.

## 1.2. Комплексный модуль проектов

Структура комплексного модуля проектов описана диаграммой, представленной на рисунке 5. Модуль М2.1 предназначен для задания параметров проекта: вид проекта (восстановление русел или установка дамб); выбор целевой функции (алгоритм расчета); задание допустимых значений социального и экономического ущербов ( $U_{soc} \leq \varepsilon_{soc}, U_{ec} \leq \varepsilon_{ec}$ ); объем работ (количество дамб или общая длина восстанавливаемых русел); задание пространственных ограничений на проведение работ; погрешность решения оптимизационной задачи.

Модуль М2.2 состоит из двух подмодулей: М2.2.1 предназначен для поиска опти-

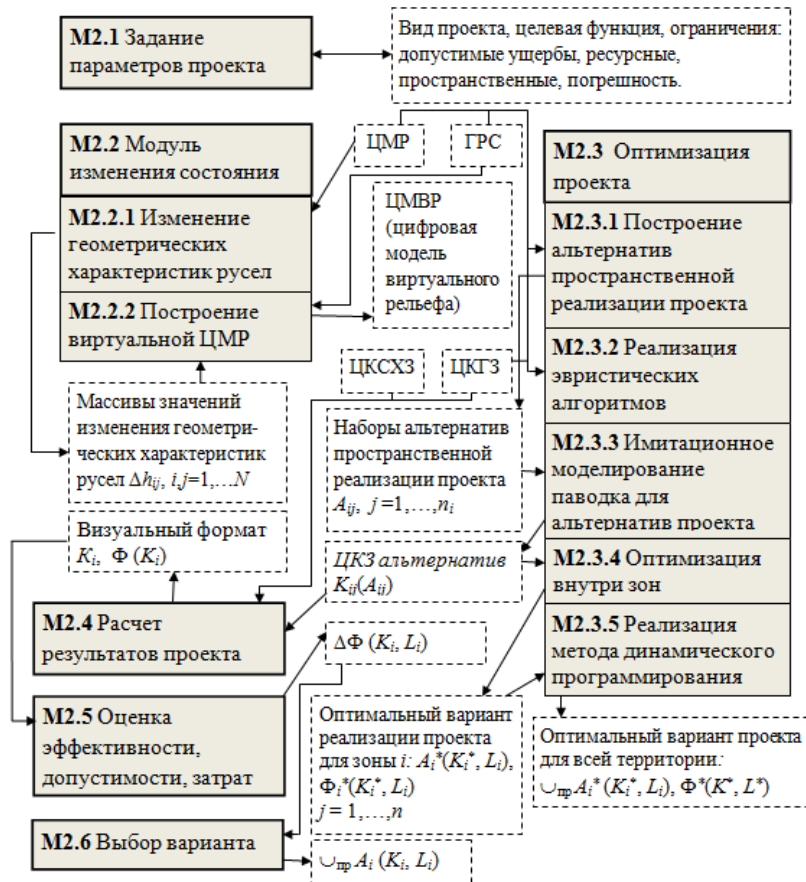


Рис. 5. Диаграмма модуля проектов

мальных геометрических характеристик русловой структуры (глубины и ширины русел либо их участков в зависимости от их места в иерархии или пространственного расположения); M2.2.2 содержит алгоритмы изменения ЦМР (значений высоты в ячейках с заданными координатами) (рис. 6).

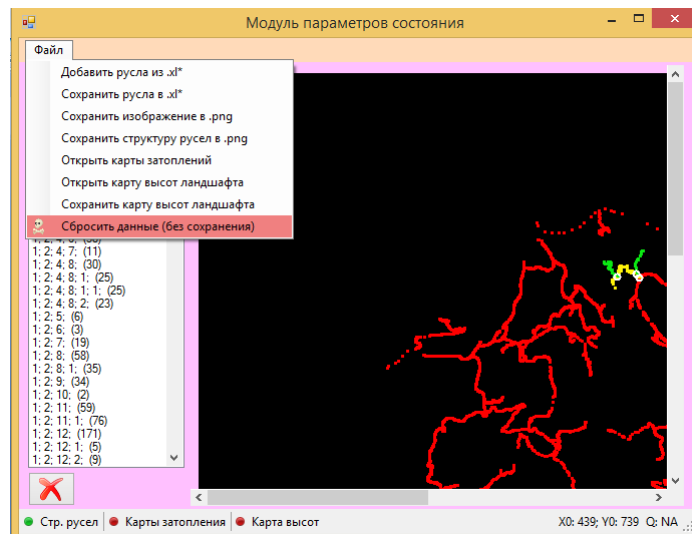


Рис. 6. Экранная форма программного модуля «Русловая структура». Выбор входных данных (меню)

Модуль М2.3 состоит из пяти подмодулей, которые задействуются все или выборочно в зависимости от режима распределения проектных работ. Алгоритмы построения альтернатив пространственной реализации проектных работ реализованы в модуле М2.3.1. Результатом работы этого модуля являются наборы локальных участков русел  $A_{ij}$ , где  $i = 1, \dots, n_z$  — номер ГЗ,  $n_z$  — количество ГЗ,  $j = 1, \dots, n_i$  — номер набора альтернатив в каждой зоне. Модуль М2.3.2 предназначен для реализации эвристических алгоритмов построения альтернатив проектных работ. Задача модуля М2.3.3 — подготовка данных, планирование и проведение вычислительных экспериментов, моделирующих реализацию проектных работ (получение наборов ЦМВР) и паводковое затопление пойменной территории (получение ЦКЗ). М2.3.4 — модуль оптимизации внутри зоны, в результате работы которого определяется наилучший вариант реализации проекта в каждой зоне (максимум целевой функции). М2.3.5 реализует алгоритмы метода динамического программирования для проведения оптимизации по всем зонам.

Возможны три варианта пространственного распределения проектных работ. В случае выбора ручного варианта пользователь выбирает нужные ему участки русел в интерактивном режиме. Полуавтоматический вариант использует модуль М2.3.2 для реализации эвристических алгоритмов пространственного распределения проектных работ. Автоматический вариант использует все модули М2.3. При этом возможно функционирование модуля в адаптивном или неадаптивном режиме. Параметрами моделирования в этом случае являются величины критерия независимого затопления зон ( $\epsilon$ ), объема паводка ( $\Omega$ ) и объема работ ( $L$ ).

Для решения оптимизационной задачи могут применяться как точные (в частности, алгоритм динамического программирования), так и эвристические алгоритмы с полным или частичным перебором альтернатив. Число альтернатив реализации проекта в обоих случаях определяется ограничением вычислительной сложности. Необходимое для реализации точных алгоритмов выполнение условия независимого затопления зон зависит как от объема паводка, так и от допустимой погрешности (рис. 7).

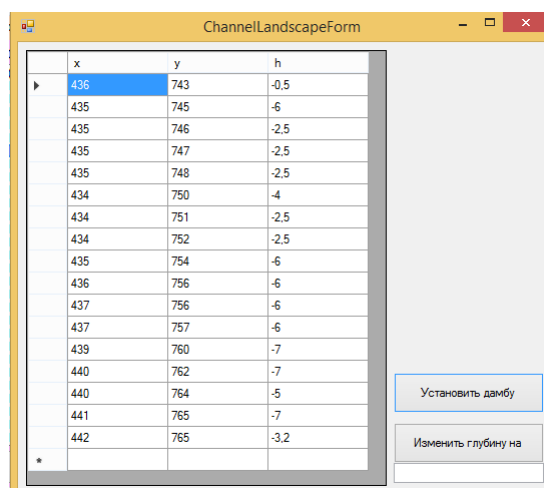


Рис. 7. Задание параметров проекта в ручном режиме

Результатами проектов (М2.4) в пространствах состояний и критериев состояния системы являются карты затоплений и агрегированные зависимости, полученные на основе этих карт. Визуализация карт затоплений может быть выполнена в программе Surfer, которая позволяет получать наглядное изображение изменения состояний систе-

мы. Для получения агрегированных зависимостей используется модуль расчета целевых функций (M1.3) в режиме вычисления прироста значения соответствующей целевой функции для оценки эффекта проекта.

Оценки допустимости, затрат и эффективности проектов выполняются в M2.5. Допустимость определяется предельными значениями социоэкономического и экологического критериев и тем самым формирует множество альтернатив пространственных работ по проекту. Затраты проектов оцениваются по объему произведенных работ (длина восстанавливаемых русел, количество устанавливаемых дамб). Оценка эффективности проекта происходит путем подсчета изменения значения целевой функции в результате реализации проекта.

Модуль выбора варианта (M2.6) реализует выбор итогового пространственного распределения работ — набор локальных русловых участков, включенных в проект.

Схема работы комплексного модуля проектов представлена на UML-диаграмме целей использования (рис. 8).

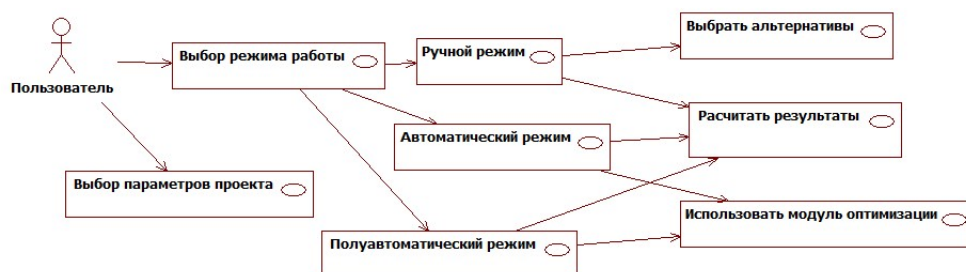


Рис. 8. Схема работы СИМ в разных режимах

Для оптимизации проектов могут применяться как точные (в частности, алгоритм динамического программирования), так и эвристические алгоритмы с полным или частичным перебором альтернатив их пространственной реализации. Число альтернатив реализации проекта определяется пределом вычислительной сложности. Существенное снижение вычислительной сложности оптимизационной задачи достигается ее декомпозицией на совокупность независимых подзадач с определенной погрешностью. Особенностью паводковой динамики на пойменных территориях является независимое затопление их участков на начальной и средней стадиях процесса. Границы независимо затопляемых зон определяются параметрами гидрографа и допустимой погрешностью. Для заданных параметров оптимизационной задачи можно найти оптимальное многоуровневое иерархическое гидрологическое зонирование территории. В актуальной версии СИМ реализовано итоговое одноуровневое зонирование, служащее основой двухуровневого алгоритма оптимизации проектов [9]: на первом этапе реализуется оптимизация проектов в гидрологических зонах, на втором — оптимизация на всей заданной территории.

Все построенные гидрологические зоны могут делиться на «малые» и «большие». В первых возможен полный перебор альтернатив пространственной реализации проекта, во вторых полный перебор невозможен из-за большой вычислительной сложности, поэтому для оптимизации проекта в них используются эвристические алгоритмы. С увеличением  $\epsilon$  растет доля «малых» зон, что потенциально увеличивает значение целевой функции, но одновременно снижает величину ее гарантированного значения. Поэтому для максимизации гарантированного результата оптимизации проекта необходима адаптация алгоритма, то есть подбор оптимального значения погрешности зонирования  $\epsilon$ .



Приведем схему работы модуля оптимизации на диаграмме последовательности (рис. 9).

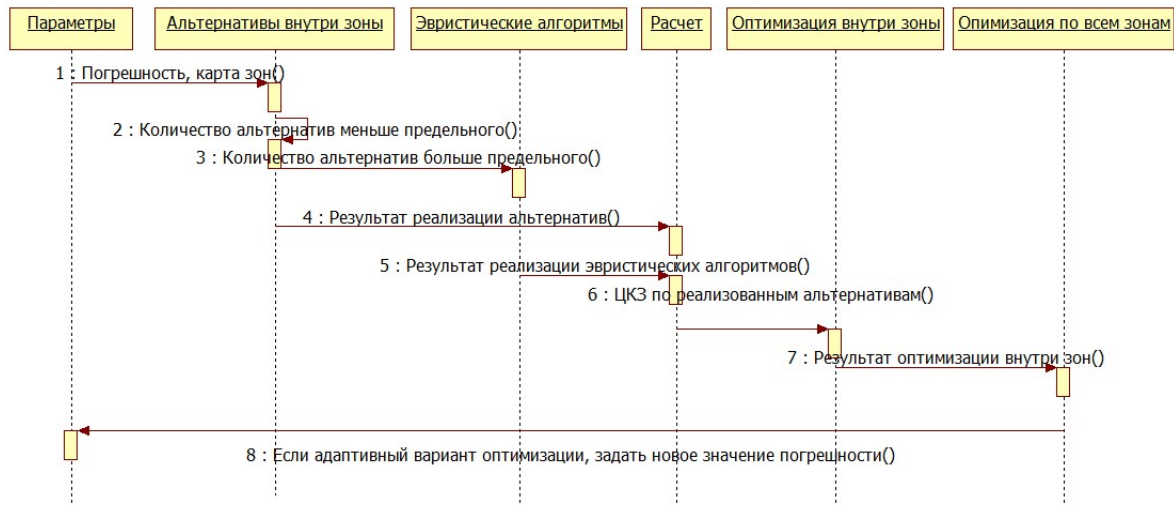


Рис. 9. Схема работы модуля оптимизации

### 1.3. Комплексный исследовательский модуль

Комплексный исследовательский (вспомогательный) модуль предназначен для организации вычислительных экспериментов по проверке лежащих в основе проектов гипотез о гидрологических свойствах системы и исследования адекватности используемых моделей СИМ и реализует модели состояния виртуальных систем (М3.1-2) и модели виртуальных проектов различной сложности (М3.3). Структура этого комплексного модуля представлена диаграммой (рис. 10).

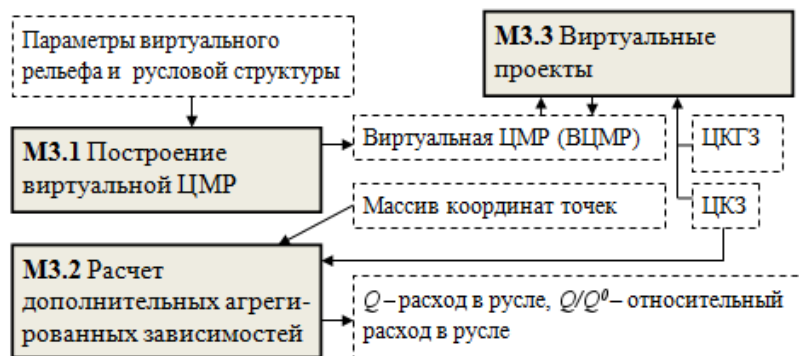


Рис. 10. Диаграмма исследовательского (вспомогательного) модуля

Цифровые виртуальные карты рельефов задаются алгоритмически. Для моделирования динамики паводковых вод и обработки цифровых карт с результатами расчетов используются ВМ2 и М1.3, входящие в основные комплексные модули.

### **1.4. Свойство расширяемости СИМ**

Расширяемость СИМ достигается модульностью и каркасностью ее структуры [3]. Каркас — основная программа, неизменная часть структуры, содержащая в своем составе гнезда — точки подключения относительно независимых частей программы — модулей. Свойством расширяемости обладают все иерархические слои СИМ: слой данных организован как база данных с расширяемой структурой, слой алгоритмов организован в виде набора каркасов и сменных модулей. В частности, в каркас модуля оптимизации входят сменные модули вычисления целевой функции, формирования альтернатив (полный или ограниченный перебор), оптимизации (точные или эвристические алгоритмы). Каждый из этих модулей реализован как каркас из нескольких алгоритмов.

## **2. Проведение вычислительных экспериментов с использованием СИМ**

### **2.1. Режимы работы СИМ**

1. Исследование проекта. Данный режим является главным пользовательским режимом. В данном режиме для заданного вида проекта задаются параметры его реализации, моделируется проект и выполняется оценка эффекта.
2. Изменение СИМ (расширение/сужение/изменение моделей пространства состояний и критериев системы, добавление/ликвидация/изменение моделей проектов). Данный режим реализует возможности расширения системы. Включает добавление новых моделей, изменение имеющихся моделей, добавление новых данных или удаление данных, ставших неактуальными.
3. Исследование адекватности СИМ. Режим предназначен для оценки адекватности работы алгоритмов СИМ и выявления общих зависимостей для характеристик динамики русловой структуры. Предусмотрено проведение вычислительных экспериментов для проверки адекватности работы модулей управляемой системы (построение виртуальных рельефов, расчет целевых функций) и проектов (реализация простых вариантов проектов на виртуальных ЦМР).

### **2.2. Результаты вычислительных экспериментов**

При помощи СИМ проведены серии вычислительных экспериментов для исследования управляемой паводковой динамики в северной части ВАП и на виртуальных упрощенных ЦМР. Их целью являлось моделирование и оптимизация гидротехнических проектов установки/ликвидация дамб в малых руслах ВАП и их углубление. Результаты экспериментов подробно изложены в работах [1; 6; 7; 9]. В экспериментах использовались следующие оптимизационные алгоритмы: полный или ограниченный (в рамках нескольких эвристик на основе иерархической структуры малых русел территории ВАП) перебор альтернатив, метод динамического программирования. Проверка адекватности эвристик осуществлялась выборочным сравнением их результатов с результатами точной оптимизации и полных переборов. Результаты экспериментов показали практическую эффективность эвристических алгоритмов оптимизации.

Как показали результаты имитационного моделирования, эффективность проекта углубления русел существенно зависит от параметров паводкового гидрографа Волжской

ГЭС: при средних паводках она является наибольшей (около 12 %), а при малых и больших паводках ее величина сравнима с погрешностью моделирования.

Результаты исследования адекватности точных алгоритмов оптимизации проектов улучшения гидрологического режима ВАП путем установки паводковых дамб оказались неудовлетворительными. Причиной этого является сложная многостадийная динамика заполнения иерархической системы русел в период паводка (рис. 11). Наличие дамб в этой русловой системе существенно влияет на характер многостадийной динамики (рис. 12).

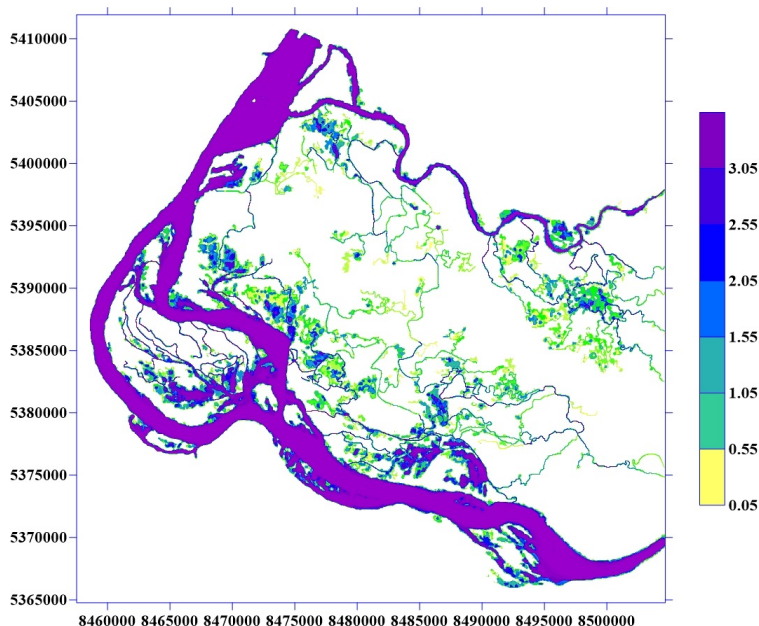


Рис. 11. Глубины русел ВАП для параметров паводкового затопления:  
 $Q = 23$  тыс.  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $t = 15$  суток

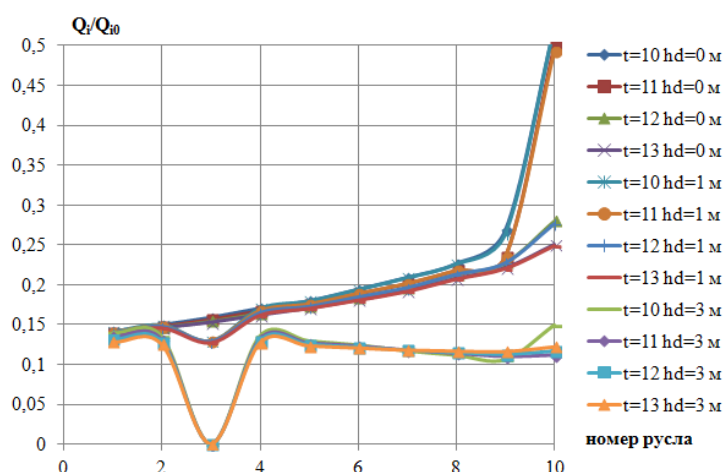


Рис. 12. Графики зависимости  $Q_i/Q_{i0}$  от номера русла, где  $Q_i$  — расход в русле с номером  $i$ ,  $Q_{i0}$  — расход в основном русле напротив русла с номером  $i0$ .  $t = 10 \div 13$  суток, высота дамб ( $hd$ ) 1 м и 3 м. Гидрограф  $Q = 18$  тыс.  $\text{м}^3/\text{с}$

Исследование влияния русловой структуры на динамику паводкового затопления, проведенное на базе исследовательского модуля (МЗ.1–4), показало зависимость оптимального числа ее иерархических уровней от величины паводкового гидрографа магистрального русла. Так, например, из рисунков 13, 14, 15 видно, что максимальная площадь затопления пойменной территории при гидрографе с параметрами:  $t = 1$  сутки  $Q = 120 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $t = 2$  суток  $Q = 140 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $t = 3$  суток  $Q = 160 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $t = 4 \div 16$  суток  $Q = 400 \text{ м}^3/\text{с}$ , достигается для двухуровневой, а максимальный объем паводковых вод на ней — для трехуровневой структуры.

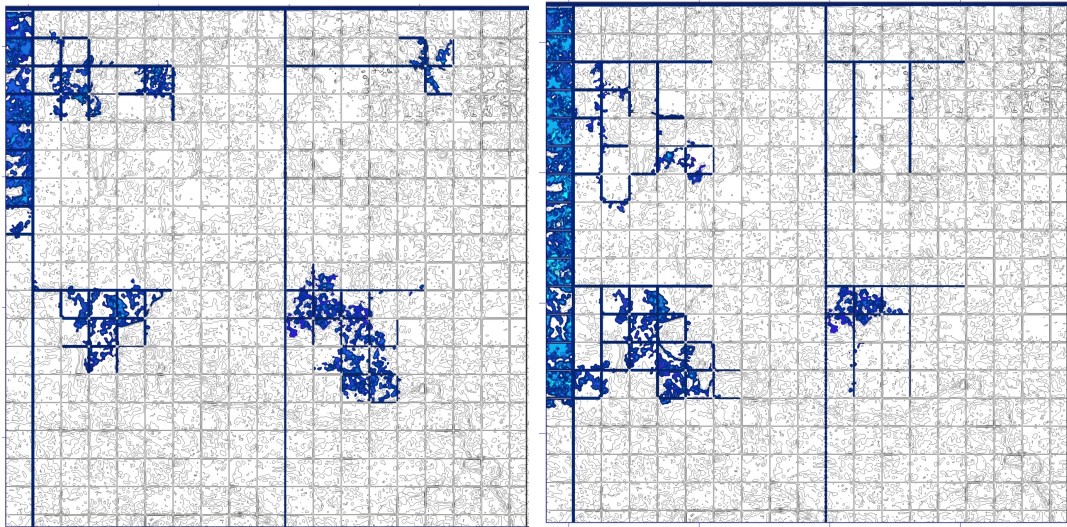


Рис. 13. Карта затопления для ВЦМР со структурой русел (2,2) и (2,3),  $t = 7$  суток

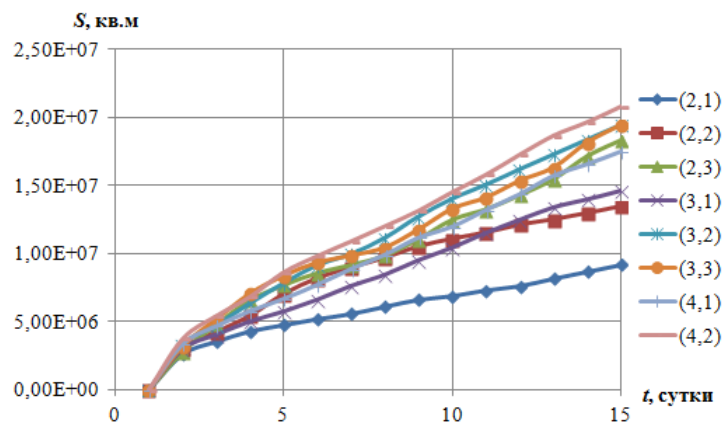


Рис. 14. Зависимость  $S(t)$  для русловой структуры с различными параметрами  $(m, n)$ , где  $m$  — количество русел на каждом уровне,  $n$  — количество уровней

Результат работы СИМ в режиме «исследование проекта» регистрируется в виде протокола проекта, фиксирующего следующее:

1. Вид гидротехнического проекта — непосредственно изменяемые параметры системы. Например: восстановление русел — геометрические размеры русел (углубление, расширение); установка/ликвидация дамб в малых руслах; прокладка ка-

- налов; установка вспомогательных источников; изменение параметров основных источников.
2. Ресурсные параметры проекта — агрегированные величины непосредственно изменяемых параметров системы.
  3. Допустимые варианты (альтернативы) реализации проекта — пространственного распределения изменяемых параметров системы, оценка их результативности (в пространстве состояний и критериев) и всех видов эффективности.
  4. Оптимальные варианты проекта (по всем видам критериев).

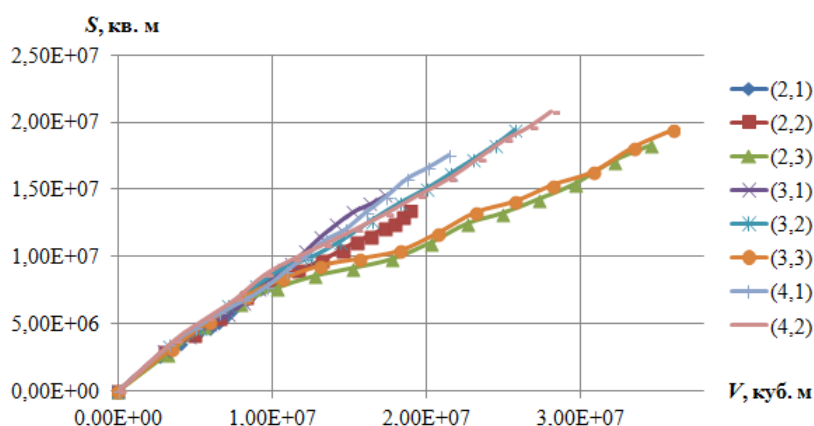


Рис. 15. Зависимость  $S(V)$  для русловой структуры с различными параметрами  $(m, n)$ , где  $m$  — количество русел на каждом уровне,  $n$  — количество уровней

### Заключение

Представлена система имитационного моделирования результатов гидротехнических проектов на пойменных территориях. Структура СИМ состоит из трех комплексных моделей. Описаны функции, состав алгоритмов и данных каждой модели. Приведены результаты: имитационного моделирования проектов ВАП, поиска оптимальной глубины русел и характеристик течения, исследование адекватности эвристических алгоритмов оптимизации проектов восстановления русел.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ эффективности природовосстановительных проектов в эколого-экономической системе «Волжская ГЭС — Волго-Ахтубинская пойма» / А. А. Воронин, А. А. Васильченко, С. С. Храпов, Е. О. Агафонникова // Управление большими системами. — 2014. — Вып. 52. — С. 133–147.
2. Воронин, А. А. Модель оценки ущерба в слабоустойчивых социоприродохозяйственных системах / А. А. Воронин, С. Е. Гребенюк // Материалы XIII Всероссийской школы-конференции молодых ученых (5–9 сентября 2016 г., Самара). — 2016. — С. 300–312.
3. Горбунов-Посадов, М. М. Расширяемые программы / М. М. Горбунов-Посадов. — М. : Полиптих, 1999. — 336 с.
4. 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.

5. Программный комплекс ЭКОГИС. — Электрон. текстовые дан. — Режим доступа: <http://geomit.ru/ecogis>. — Загл. с экрана.

6. Проектирование системы эколого-экономического управления территориями 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.

7. Assessment of the impact of riverbeds depth in the northern part of the Volga-Akhtuba floodplain on the dynamics of its flooding / A. Vasilchenko, A. Voronin, A. Svetlov, N. Antonyan // International Journal of Pure and Applied Mathematics. — 2017. — Vol. 110, № 1. — P. 183–192.

8. Decision support system for urbanization of the northern part of the Volga-Akhtuba floodplain (Russia) on the basis of interdisciplinary computer modeling / A. Voronin, I. Isaeva, A. Khoperskov, S. Grebenjuk // Communications in computer and information science. — 2017. — Vol. 754. — P. 419–429.

9. Voronin, A. A project optimization for small watercourses restoration in the northern part of the Volga-Akhtuba floodplain by the geoinformation and hydrodynamic modeling / A. Voronin, A. Vasilchenko, A. Khoperskov // Journal of Physics: Conf. Series. — 2018. — Vol. 973. — Article ID: 012064. — DOI: 10.1088/1742-6596/973/1/012064.

### **REFERENCES**

1. Voronin A.A., Vasilchenko A.A., Khrapov S.S., Agafonnikova E.O. Analiz effektivnosti prirodovosstanovitelnykh proektov v ekologo-ekonomicheskoy sisteme «Volzhskaya GES — Volgo-Akhtubinskaya poyma» [Efficiency Analysis for Nature Restoration Projects in Ecologo-Economic System 'Volzhskaya HPP — Volgo-Akhtuba Floodplain']. *Upravlenie bolshimi sistemami*, 2014, iss. 52, pp. 133-147.

2. Voronin A.A., Grebenyuk S.E. Model otsenki ushcherba v slaboustoychivyykh sotsioprirodokhozyaystvennykh sistemakh [Model of Damage Assessment in Weakly Stable Socio-Nature-Management Systems]. *Materialy XIII Vserossiyskoy shkoly-konferentsii molodykh uchenykh (5–9 sentyabrya 2016 g., Samara)*, 2016, pp. 300-312.

3. Gorbunov-Posadov M.M. *Rasshiraemye programmy* [Extensible Programs]. Moscow, Poliptikh Publ., 1999. 336 p.

4. Khoperskov A.V., Khrapov S.S., Pisarev A.V., Voronin A.A., Eliseeva M.V., Kobleev 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'. Part I. Simulation of Dynamics of Surface Water During Spring Floods]. *Problemy upravleniya*, 2012, no. 5, pp. 18-25.

5. *Programmnyy kompleks EKOGIS* [Program Complex ECOGIS]. URL: <http://geomit.ru/ecogis>.

6. 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 the Basis of Hydrodynamic and Geoinformational Simulation]. *Upravlenie bolshimi sistemami*, 2015, iss. 55, pp. 79-102.

7. Vasilchenko A., Voronin A., Svetlov A., Antonyan N. Assessment of the Impact of Riverbeds Depth in the Northern Part of the Volga-Akhtuba Floodplain on the Dynamics of Its Flooding. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, 2017, vol. 110, no. 1, pp. 183-192.

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, pp. 419-429.

9. 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: Conf. Series*, 2018, vol. 973, article ID: 012064. DOI: 10.1088/1742-6596/973/1/012064.

## PROGRAM COMPLEX FOR SIMULATION MODELING OF HYDROTECHNICAL PROJECTS IN FLOODPLAIN TERRAINS

### **Anna Anatolyevna Vasilchenko**

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

### **Konstantin Evgenyevich Dubinko**

Student, Department of Fundamental Informatics and Optimal Control,  
Vologograd State University  
horseunnamed@gmail.com, fiou@volsu.ru  
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

### **Inessa Igorevna Isaeva**

Student, Department of Fundamental Informatics and Optimal Control,  
Vologograd State University  
isaeva-inessa@mail.ru, fiou@volsu.ru  
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

**Abstract.** The software complex is designed to investigate the possibilities and efficiency of hydrotechnical projects in floodplain areas by the geoinformation and hydrodynamic modeling technologies. The complex has the properties of data extensibility, algorithms and tasks implemented through extensible databases, modularity and frame structure of computer programs.

The structure is described as a set of three complex modules: state, projects, and research. The state module includes: a three-species zoning module (hydrological, socioeconomic, biospheric), a channel structure module, a module for calculating aggregated dependencies by zones and the whole territory. The state

module also includes three external modules: the construction of a digital terrain model, the calculation of flood dynamics, the construction of a digital cadastral map. The project module includes 6 submodules: setting parameters, changing the state, optimizing, calculating the results, evaluating the efficiency and costs, selecting the option. The research module consists of: a module for constructing a virtual digital model with a channel structure, a module for calculating additional parameters, a module of virtual projects.

A series of computational experiments has been carried out: modeling the implementation of projects to restore small VAP channels, establishing the optimal depth of VAP channels, determining the dynamics of water in the channels, checking the adequacy of the algorithms of the software modules.

**Key words:** simulation modeling, floodplain terrains, The Volga-Akhtuba floodplain, hydrotechnical projects, optimization.