

УДК 519.6 + 519.8

ББК 22.19+20.1

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭКОЛОГО-
ЭКОНОМИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕРРИТОРИЕЙ
ВОЛГО-АХТУБИНСКОЙ ПОЙМЫ НА ОСНОВЕ
ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО И
ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**Воронин А. А.¹, Васильченко А. А.², Писарева М. В.³,
Писарев А. В.⁴, Хоперсков А. В.⁵, Храпов С. С.⁶,
Подщипкова Ю. Е.⁷**

(Волгоградский государственный университет, Волгоград)

Описана система эколого-экономического управления территорией Волго-Ахтубинской поймы, построенная на основе гидродинамического и геоинформационного моделирования. Приведены результаты оптимизации паводкового гидрографа Волжской ГЭС, пространственного распределения работ по проекту восстановления русел Волго-Ахтубинской поймы, механизмов управления хозяйствующими субъектами территории.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, гидрологический режим, гидрограф, цифровая модель рельефа, Волго-Ахтубинская пойма, эколого-экономическое управление.

¹ Александр Александрович Воронин, доктор физико-математических наук, профессор (voronin.prof@gmail.com).

² Анна Анатольевна Васильченко, старший преподаватель (aa-vasilchenko@mail.ru).

³ Мария Владимировна Писарева, аспирант (m.eliseeva.vlg@gmail.com).

⁴ Андрей Владимирович Писарев, кандидат физико-математических наук, доцент (andrew.pisarev@gmail.com).

⁵ Александр Валентинович Хоперсков, доктор физико-математических наук, профессор (ahoperskov@gmail.com).

⁶ Сергей Сергеевич Храпов, кандидат физико-математических наук, доцент (xss-ip@mail.ru).

⁷ Юлия Евгеньевна Подщипкова, студент (podschipkova1993@mail.ru).

1. Введение

Волго-Ахтубинская пойма (ВАП) – уникальное природное образование (протяженность около 450 км, территория – свыше 20 тыс. кв. км), жизнь которого полностью определяется весенним паводком р. Волги. Волжская ГЭС (ВГЭС) регулирует подчиненный интересам гидроэнергетики гидрологический режим р. Волги, характеризуемый увеличенным объемом ее меженного стока и значительно сокращенным объемом паводкового, что служит причиной прогрессирующей деградации русел и обезвоживания ВАП [5]. Факторами обезвоживания являются также дополнительное ограничение переменных паводков требованиями гидрологической безопасности выходящих из зоны затопления осваиваемых территорий, а также расширение и углубление русла р. Волги. Результатом предпринимаемых в последние годы усилий по улучшению гидрологического режима северной части ВАП (далее – ВАП), находящейся на грани экологической катастрофы, является лишь замедление деградационных процессов [6]. Для коренного изменения ситуации необходима разработка и реализация научно обоснованной комплексной системы эколого-экономического управления, создание которой на территории ВАП – пространственно распределенной высокодинамичной многоагентной слабоустойчивой социоприродохозяйственной системы с высоким уровнем техногенной опасности, социальной и экологической значимости – возможно только на основе междисциплинарного подхода, интегрирующего методы и результаты геоинформационного, гидродинамического, оптимизационного, теоретико-игрового и сценарно-имитационного моделирования.

Главной целью проектируемой комплексной системы эколого-экономического управления ВАП является создание математической модели ее устойчивого развития на основе достижения и поддержки устойчивости ее экосистемы в условиях оптимального гидрологического режима. Она включает в себя несколько постоянно актуализируемых модулей – математических моделей и отвечающих им программных комплексов, реализующих основной функционал: когнитивный анализ проблемной ситуации; многокритериальную оптимизацию паводкового гид-

рографа ВГЭС и природовосстановительных проектов; проектирование механизмов эколого-экономического управления; сценарно-имитационное моделирование социоприрохозяйственной динамики и развития.

Функционирование главной части комплекса обеспечивается вспомогательным функционалом, реализуемым программным комплексом «ЭКОГИС», включающим в себя построение и актуализацию цифровой модели рельефа (ЦМР) на основе ГИС-технологий, численное гидродинамическое моделирование динамики поверхностных вод. Первые версии основных моделей и результатов моделирования описаны в [4, 5, 7–9, 11].

2. Геоинформационное моделирование рельефа

Разработка цифровой модели рельефа (ЦМР) ВАП $b(x, y)$ была начата в 2007 г. Ее основой служат спутниковые данные ASTER [14] и SRTM [12] с разрешением до 20 м в плоскости Земли и до 0,5 м по вертикали. Программа Landsat [13] позволяет получить актуальные данные высокого разрешения (15–30 метров/пиксель). Для добавления объектам атрибутивной информации использовалась топографическая карта 1:50000 открытого пользования. Цифровая карта пойменных русел и речного дна строилась совместной векторизацией топографических и лоцманских карт русел ВАП, Волги и Ахтубы [1] с использованием результатов экспедиционных исследований [2]. Актуализация ЦМР производится ежегодно с использованием регулярно обновляемых космических снимков, размещенных на сайте геологической службы США [15] в открытом режиме (спутник ДЗЗ Landsat 8), а также с помощью GPS-измерений границ паводковых затоплений. Векторная карта ВАП 2014 года включает в себя слой гидросистемы, состоящий из 1542 русловых объектов общей протяженностью 887 км, слой инфраструктуры, включающий в себя 118 населенных пунктов, и слой рельефа местности, включающий более 15 тыс. рельефных объектов.

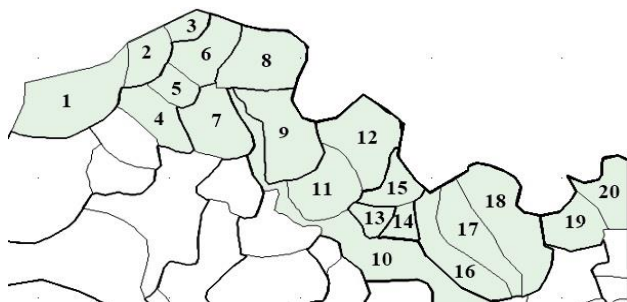


Рис. 1. Карта русловых зон северной части ВАП

Естественной основой структуризации пойменной территории, необходимой для проектирования системы управления, служит ее гидрологическая сеть. Магистральную гидросистему ВАП образуют три водотока: р. Волга, р. Ахтуба и ерик «Гнилой» («Пахотный»), из которых берут начало соответственно 14, 15 и 57 русел – входов на ее территорию. Эти русла, практически равномерно (с интервалом в 1,5–2 км) распределенные вдоль магистральных водотоков, разветвляются на территории поймы, образуя (в версии 2014 г.) 86 гидросистем второго уровня и соответствующих им территориальных зон (рис. 1) с функциями рельефа $b(x_j, y_j)$ ($j = 1, \dots, 86$).

3. Гидродинамическое моделирование паводков

Численная модель динамики поверхностных вод в версии 2014 г. учитывает все основные факторы затопления территории: поверхностные и подземные источники воды – плотины, осадки, ключи, выход грунтовых вод на поверхность суши; рельеф местности с учетом антропогенной застройки территорий и рельефа дна водоемов; свойства подстилающей поверхности – придонное трение, инфильтрация (новая многослойная нелинейная модель); внутреннее вязкое трение; ветровое воздействие – нагонные волны; вращение Земли – сила Кориолиса; испарение. Адекватность модели подтверждается результатами сравнения с данными наблюдений уровня воды на четырех гидропостах в северной части ВАП и площади водной поверхности в различные годы с использованием данных спутника Landsat-7.

Реализованы параллельные OpenMP, CUDA-, OpenMP-CUDA-версии расчетного модуля метода CSPH-TVD, снизившие в 700 раз вычислительную сложность задачи и позволившие довести время расчета 100-суточного паводка до 2 часов.

Вид функций расхода (гидрографа) $Q(t)$ паводкового попуска ВГЭС разных лет (рис. 2) демонстрирует его относительную хаотичность в 1962–1996 гг., обусловленную следованием требованиям безопасности ВГЭС и переменному спросу на электроэнергию. В 2003–2015 гг. в нем выделяются две ступени с почти постоянными значениями Q_1 и Q_2 , а меженный гидрограф характеризуется меньшей суточной изменчивостью. Анализ космических снимков и результатов гидродинамических расчетов показал, что перед весенним попуском воды относительная площадь занятой водой территории не превышает 1%, площадь затопления территории двухступенчатым гидрографом определяется величиной Q_1 и длительностью t_1 его первой ступени, при $Q_1 \leq 20\,000 \text{ м}^3/\text{с}$ затопления территории не происходит, а при $Q_1 \geq 30\,000 \text{ м}^3/\text{с}$ и $t_1 \geq 5$ суток соответствуют катастрофическому затоплению.

На рис. 3 показана расчетная динамика площади территории паводкового затопления $S_0(t)$ с плановыми гидрографами 2006–2011 гг.

На рис. 4, 5 показана расчетная динамика затопления всей территории ВАП и указанных на рис. 1 ее зон модельными ($Q_1 = \text{const}$) паводковыми гидрографами. Различия в динамике зон связаны с характеристиками их рельефа и гидросистемы.

Используемая в настоящее время гидродинамическая модель не учитывает прогрессирующей деградации русел ВАП и рек Волги и Ахтубы, снижающей эффективность паводков. По данным гидропоста в г. Волгограде снижение высоты паводка вследствие изменений в русле р. Волги составляет 1 м (рис. 6). Деградация русла р. Ахтубы и русел территории ВАП добавляет к этой величине значительную долю, для учета которой необходимы широкомасштабные полевые исследования.

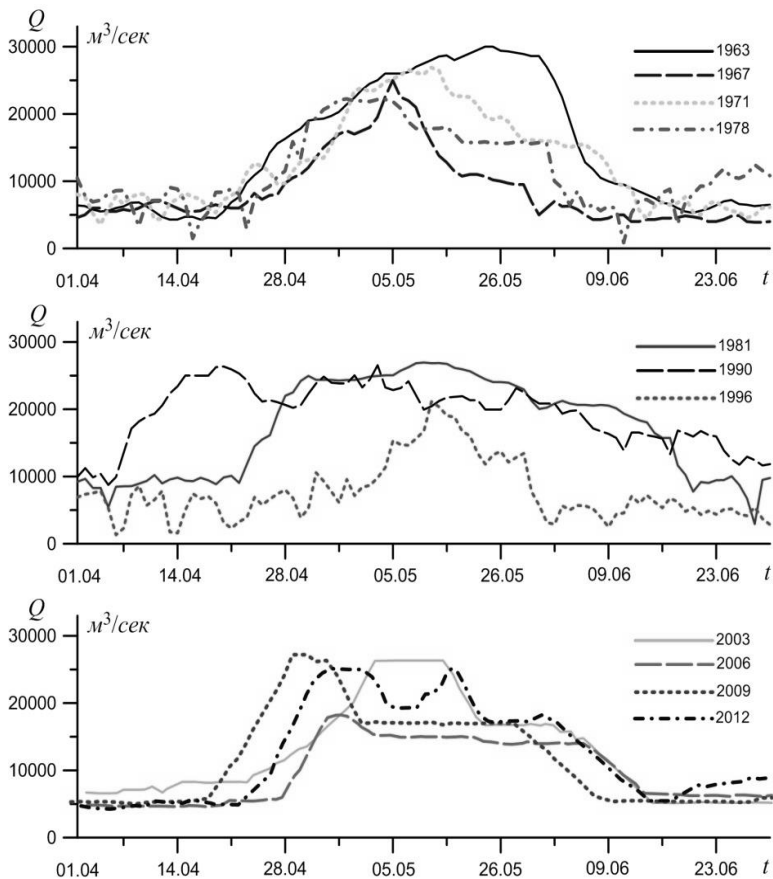


Рис. 2. Паводковые гидрографы ВГЭС разных лет

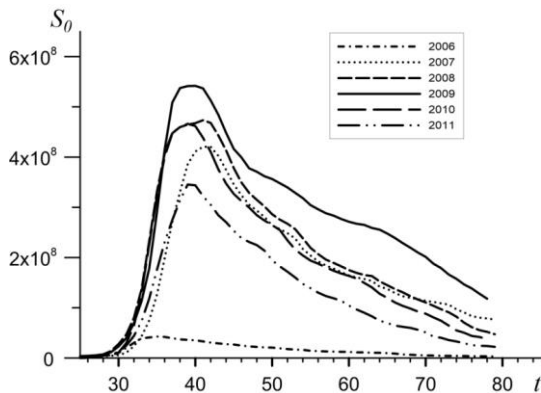


Рис. 3. Динамика площади затопления S_0 (м^2) для гидрографов за 2006–2011 гг. ($[t] = \text{сутки}$)

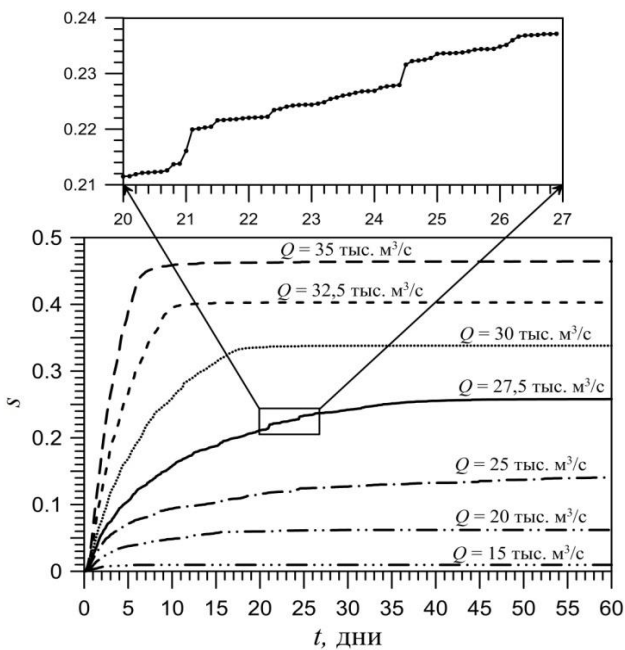


Рис. 4. Динамика относительной площади затопления S (м^2) для постоянных модельных гидрографов ($[t] = \text{сутки}$)

4. Моделирование системы управления

4.1. ОБЩАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ

Постановка задачи управления, с одной стороны, является результатом когнитивного анализа ситуации и экспертного поиска баланса между экологическим, социальным и экономическим краткосрочным и долгосрочным приоритетами различных групп акторов в условиях требований безопасности, деградиционной природной динамики, изменчивой гидрологии волжского бассейна, гидротехнических ограничений, с другой – определяется возможностью построения соответствующей математической модели.

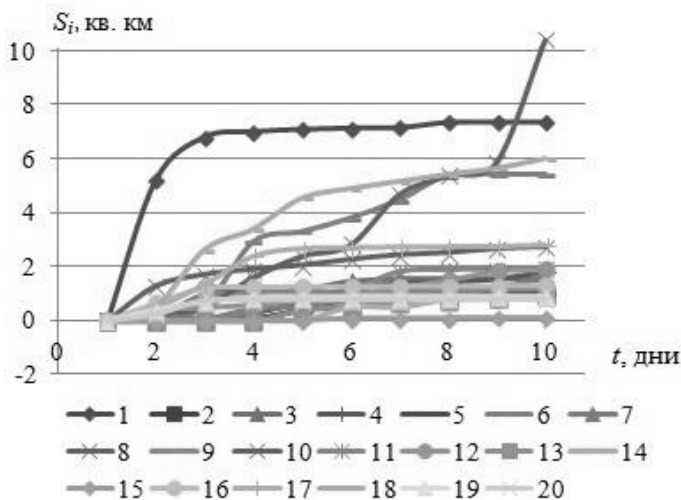


Рис. 5. Динамика затопления зон ВАП для $Q_1 = 23000 \text{ м}^3/\text{с}$

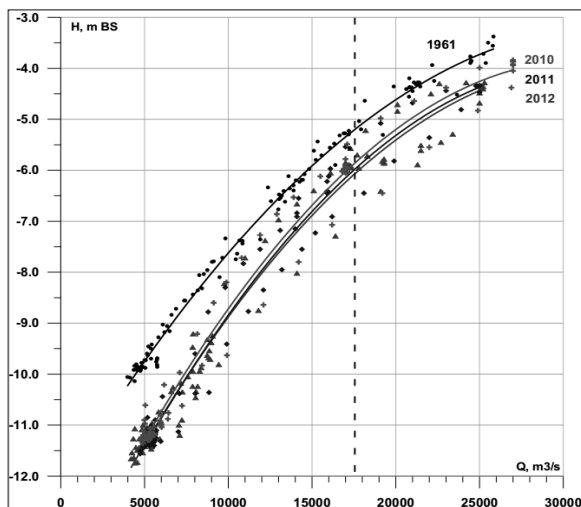


Рис. 6. Зависимость уровня воды от паводкового гидрографа ВГЭС в разные годы (по гидропосту г. Волгограда)

В проектируемой модели управления состояние системы описывается кортежем $S(x, y, l, t) = [A(l, t), B(x, y, l, t), C(A, B, Ext), U(A, B, Ext), F(A, B, U), (Ext(l, t))] \in S_{don}$, 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 финансирования проектов Центра; $A_{ij} = \{f_{ij}, w_{ij}(l)\}$ – модели агентов (хозяйствующих субъектов) зон 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, удерживающих после окончания паводка необходимую для орошения воду в руслах зон), r_{ij} – объем финансирования проектов Центра, n – число зон ($1 \leq n \leq 86$), k_i – число агентов зоны i ; $B(x, y, l) = (b_1, \dots, b_6)$ – пространственная сеточная вектор-функция с координатами: $b_1(x, y, l)$ – ЦМР; $b_2 = \varphi(G_\phi, b_1(x, y, l))$ – максимальная (по t) высота паводкового затопления, определяемая гидродинамическими расчетами, $b_3(x, y, l) = \text{sgn}(b_2(x, y, l))$ – индикатор затопления территории;

$b_4(x, y, l)$, $b_5(x, y, l)$, $b_6(x, y, l)$ – векторные коэффициенты соответственно экологической (гидрологической, ихтиологической, орнитологической и др.), социальной (урбанистической, рекреационной и др.) и экономической (сельское, лесное хозяйство, рекреационный бизнес и пр.) значимости, рассчитываемые на основе данных мониторинга 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 федеральной власти), F – целевая функция Центра, $U = (G_{nl}, W, P, M)$ – действие Центра (управление): $G_{nl}(l) = \{Q_{1nl}, t_{1nl}, Q_{2nl}, t_{2nl}\}$, – 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; $S_{доп}$ – множество допустимых состояний системы S , определяемое природными, техническими, социально–экономическими и финансовыми ограничениями.

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

- (1) $B_i(l+1) = f_i(B_i, Q_\phi, w_i, W_i, Ext)$,
- (2) $F \rightarrow \max_U, F = \sum_{(l,k,i) \in \Omega} (\mu_k(l) B_{ik}(l) - (r, U(l)))$,
- (3) $f_0 = a_0(V_{nl} - V_\phi) - P(G_{nl} - Q_\phi) \rightarrow \max_{(Q_\phi, r_0)}$,
- (4) $f_{ij} = a_{ij} S_{i3} - P(w_{ij}) - r_{ij}(M) \rightarrow \max_{w_{ij}}$,
- (5) $S(x, y, T) \in S_s(g_2, g_3, g_4)$,
- (6) $S(x, y, l) \in S_s(g_2, g_3)$ при всех l ,
- (7) $V(l) \leq V_0(l)$, $V(l) = \sum_{\Omega} \mu_i(l) B_{ij}$ при всех l ,

($i = 1, \dots, n$; $j = 1, \dots, k_i$), $\Omega = \{l = 1, \dots, T$; $i = 1, \dots, n$; $k = 1, \dots, 6\}$, $1 \leq n \leq 86$, где $B_i = (B_{i1}, \dots, B_{i6})$, $f_i = (f_{i1}, \dots, f_{i6})$, $V_\phi = \int Q_\phi(l, t) dt$, $S_{i3}(l) = \max_x B_{i3}(l)$, $B_{ik}(l) = \int b_k(x, y, l) dx dy$ – интегральные функции зоны i ; a_0 , a_{ij} – коэффициенты экономической эффективности агентов, $w_i = \{w_{ij}\}$ – вектор действий агентов зоны i , Ext – вектор-функция сценариев состояния внешней среды (уровень наполненности Волгоградского водохранилища, социохозяйственные воздействия и ограничения), $V_{nl} = Q_{1nl} t_{1nl} + Q_{2nl} t_{2nl}$;

V – экологический ущерб (V_0 – его нормативное значение); S_S – состояние стабильности системы S (в котором действия Центра компенсируют природную и антропогенную деградацию, и средние значения показателей паводкового затопления и пойменных популяций определяются средним значением паводкового гидрографа, т.е. существуют однозначные функции g_k ($k = 2, 3, 4$), определяемые соотношениями $b_k(x, y, l) = g_k(G_{пл}(l), x, y)$); $r = (r_1, \dots, r_4)$, r_1 – стоимость упущенной гидроэнергетической полезности от реализации $G_{пл}$, r_2 – цена работ по проектам; r_3, r_4 – затраты на мониторинг, необходимый для синтеза механизмов, T – горизонт планирования, μ_k ($k = 1, \dots, 6$) – весовые коэффициенты.

В зависимости от степени адекватности каждого из соотношений (1)–(7) и целей управления Центр может решать следующие задачи:

– (1)–(4) – задача оптимального управления и ее частные случаи (см. далее);

– (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 нормативом).

На каждом шаге l динамической оптимизации поиск решения производится на множестве решений соответствующих иерархических игр и условной параметрической оптимизации, что требует численного построения функций $B_{ik}(l, A, U)$ в широком диапазоне параметров. Функции g_k определяются в ходе решения соответствующих задач. Ниже приведены результаты исследования некоторых частных случаев задачи (1)–(4) – параметрической оптимизации паводкового гидрографа и проекта расчистки русел с пассивными (уравнения (2)) и активными (система (2),(3)) агентами.

4.2. МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ ПАВОДКОВОГО ГИДРОГРАФА ВГЭС

Оптимизация паводкового гидрографа ВГЭС может исследоваться и реализовываться как в составе комплексной задачи управления, так и в виде самостоятельной задачи. Она состоит в

поиске функции G_{nl} как решения задачи оптимизации с несколькими критериями: площадь нерестилищ ($S_{px} \geq S_{onn}$), длительность их затопления ($T_{px} \geq T_{onn}$), максимальная площадь затопления

$$(S_3 = \sum_{i=1}^n S_{i3}) \rightarrow S_{onn} ,$$

объем гидрографа ($V_{nl} \rightarrow \min$) в условиях гидрологической безопасности ($Q_1 \leq Q_m$).

Когнитивный анализ ситуации показывает, что фактическая иерархия критериев

$$S_3 \prec V \prec S_{px} \prec T_{px}$$

сводит многокритериальную задачу к параметрической однокритериальной с параметром S_1 и заданными величинами Q_m , T_{px} :

$$(8) \quad V_{план} \rightarrow \min_{G_{nl}}, S_{px} = S_1,$$

решение которой существует при $S_1 \leq S_{max}$, $S_{max} = \lim(t) S_3(Q_m, t)$. Ее решением на множестве одно- и двухступенчатых гидрографов является двухступенчатый гидрограф $G^* = \{Q^*_1(=Q_m), t^*_1(S_1), Q^*_2(S_1), t^*_2(S_1)\}$ [5]. График функции $S_{min}(S_1) = S_3(S_1, G_{onn})$ проведен жирной линией на рис. 7.

Эколого-экономическая иерархия критериев

$$V \prec S_3 \prec S_{px} \prec T_{px}$$

переводит (8) в задачу:

$$(9) \quad V_{план} \rightarrow \min_{G_{nl}}, S_{px} = S_1, S_3 = S_2,$$

решение которой существует при выполнении неравенств $S_1 \leq S_2 \leq S_{max}$. На рис. 7 штриховкой и цифрами выделены области решения задачи (9) в виде одноступенчатого (1) и двухступенчатого (2) гидрографов. (Вопрос о свойствах гидрографа с большим числом ступеней остается открытым.) Сравнение рис. 2 и рис. 7 показывает, что фактический переход от одноступенчатого к двухступенчатому гидрографу можно объяснить целевым уменьшением отношения S_2 / S_1 .

4.3. МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЕКТА ВОССТАНОВЛЕНИЯ РУСЕЛ

Задача параметрической оптимизации проекта восстановления русел имеет вид

$$\Delta S(Q_1, t_1, R_{Ц}, \Delta z, b(x, y)) \rightarrow \max_{b(x, y)},$$

$$\Delta S = \sum_{i=1}^n \Delta S_i(Q_1, t_1, R_{Ц}, \Delta z, b(x_i, y_i)),$$

где ΔS_i – проектное приращение площади паводкового затопления зоны i ; $R_{Ц}$ – затраты Центра на реализацию проекта, $L = \sum_{i=1}^n L_i$, где L_i – общая длина восстановленных русел в зоне i ; Δz – проектное приращение глубины z русел.

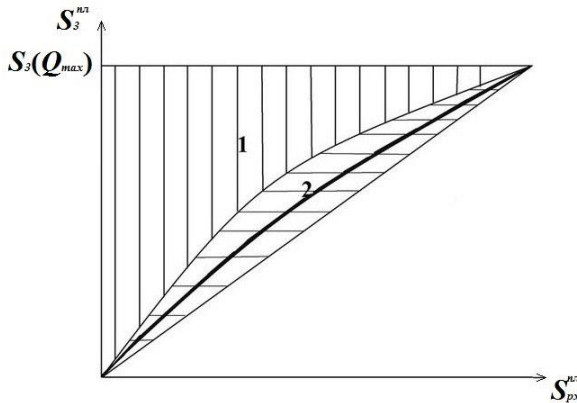


Рис. 7. График $S_{min}(S_{px})$ и области решений задачи (9), отвечающие одноступенчатому (1) и двухступенчатому (2) гидрографам

В созданной ЦМР ширина всех русел ВАП равна 20 м, глубина – $z = 2$ м. Расчеты [3] показали, что для $i = 1, \dots, 20$ при различных $Q_1, R_{Ц}, t_1$ решением задачи $\Delta S_i \rightarrow \max_{\Delta z}$, ($\Delta z = 0; 0,5; 1; \dots$), $\Delta z L = const$, является значение $\Delta z^* = 1$ м, которое использовалось в дальнейшем. (Далее считаем, что $R_{Ц} = r_2 \cdot L$). Предположение о независимом затоплении гидрологических зон ВАП позволяет свести оптимизацию по простран-

ственно распределенной переменной $b(x, y)$ к двухуровневой векторной оптимизации с параметрами Q_1, t_1, L :

$$(10) \Delta S(Q_1, t_1, L) \rightarrow \max_L, \mathbf{L} = (L_1, \dots, L_n),$$

$$\Delta S = \sum_{i=1}^n \Delta S_i(Q_1, t_1, r_2, L_i).$$

Функции ΔS_i в (10) являются решением задач оптимизации работ внутри каждой зоны с параметром L_i (общей длиной восстановленных русел в зоне i) и числом альтернатив $j(L_i)$ в соответствии с числом русловых разветвлений. В связи с большой трудоемкостью построения виртуальных ЦМР с различными глубинами русел ($L_{ВАП} = 887$ км) ниже приведены результаты решения частной задачи (10): $n = 20$, $L_i = 1$ км и $L_i = 2$ км ($i = 1, \dots, 20$). Зависимости $\Delta S_i(Q_1, t_1, L_i)$ ($i = 1, \dots, 20$) строились численно для серии параметров Q_1, t_1 и различных цифровых рельефов ВАП, отличающихся высотами дна русел выбранных зон. На рис. 9–12 представлены результаты расчета динамики $\Delta S_i(L_i)$ и $\Delta S_i(t)$ ($i = 1, \dots, 20$) для нескольких значений параметров Q_1 и t_1 . Представленные рисунки демонстрируют общую тенденцию начального роста с последующей стабилизацией или падением значений функций $\Delta S_i(t)$ с различиями в амплитудах и временной локализации. При $Q_1 = 17$ тыс. м³/с в отдельных зонах наблюдаются отрицательные значения ΔS_i , растущие по абсолютной величине с ростом L , что показывает доминирование эффекта накопления вод в углубленных руслах над их разливом по территории. С ростом Q_1 это доминирование исчезает. Нерегулярный характер зависимости $\Delta S_i(t_1)$ для некоторых зон связан с нерегулярностью рельефа. Путем упорядочения зон ВАП по ΔS_i были построены приведенные на рис. 13–16 решения частной задачи (10) $\Delta S(L)$ для $L_i = 1$ км; 2 км ($i = 1, \dots, 20$) и различных Q_1, t_1 .

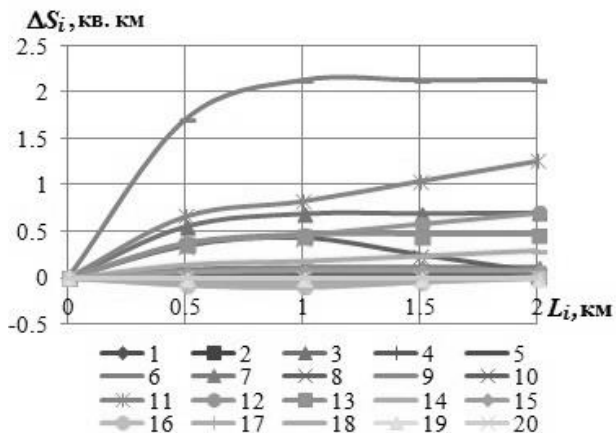


Рис. 8. Зависимость $\Delta S_i(L_i)$ ($i = 1, \dots, 20$) при $Q_1 = 20\,000$ м³/с, $t_1 = 6$ дней

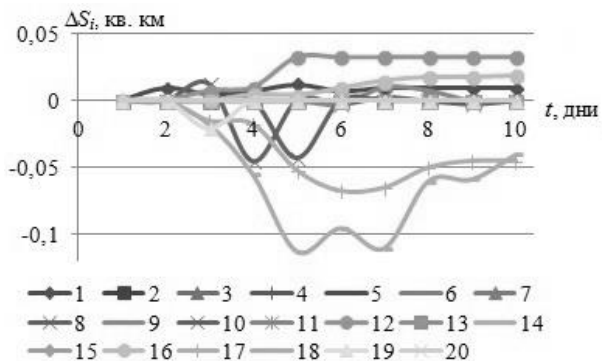


Рис. 9. Зависимость $\Delta S_i(t)$ ($i = 1, \dots, 20$) при $Q_1 = 17\,000$ м³/с, $L_i = 1$ км

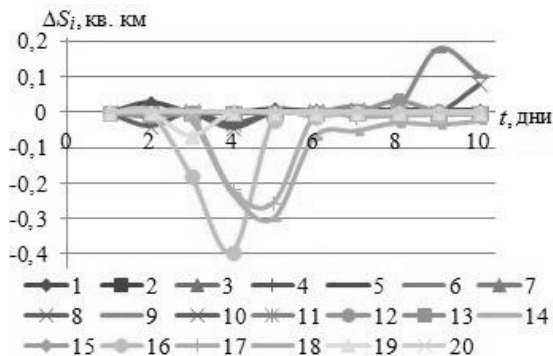


Рис. 10. Зависимость $\Delta S_i(t)$ при $L_i = 2$ км ($i = 1, \dots, 20$)
 $Q_1 = 17\,000$ м³/с

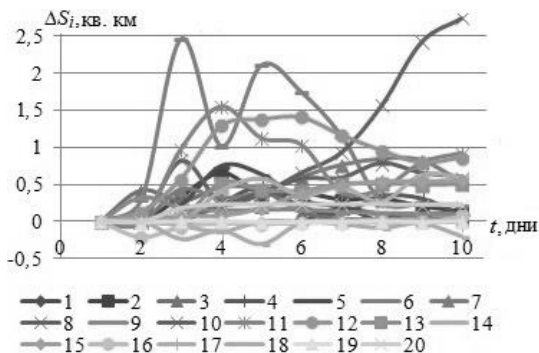


Рис. 11. Зависимость $\Delta S_i(t)$ при $L_i = 1$ км, $Q_1 = 23\,000$ м³/с
 ($i = 1, \dots, 20$)

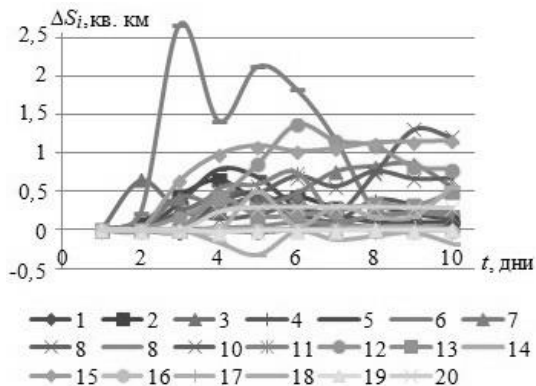


Рис. 12. Зависимость $\Delta S_i(t)$ при $L_i = 2 \text{ км}$, $Q_1 = 23\,000 \text{ м}^3/\text{с}$ ($i = 1, \dots, 20$)

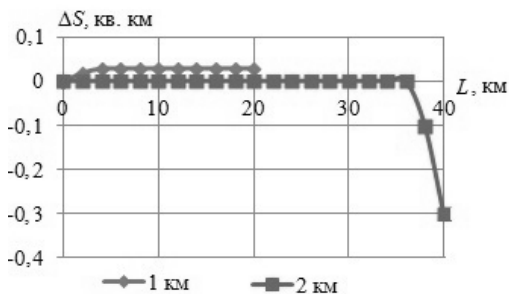


Рис. 13. Зависимость $\Delta S(L)$ при $L_i = 1 \text{ км}; 2 \text{ км}$, $Q_1 = 17\,000 \text{ м}^3/\text{с}$, $t_1 = 3 \text{ дня}$ ($i = 1, \dots, 20$)

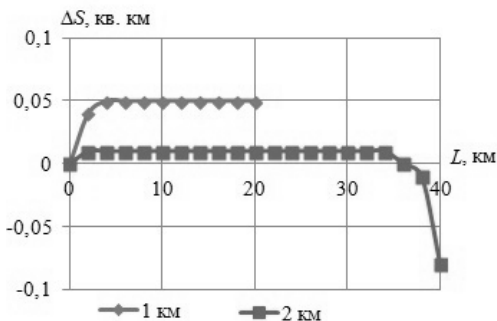


Рис. 14. Зависимость $\Delta S(L)$ при $L_i = 1\text{ км}; 2\text{ км}$, $Q_1 = 17\,000\text{ м}^3/\text{с}$, $t_1 = 6\text{ дней}$ ($i = 1, \dots, 20$)

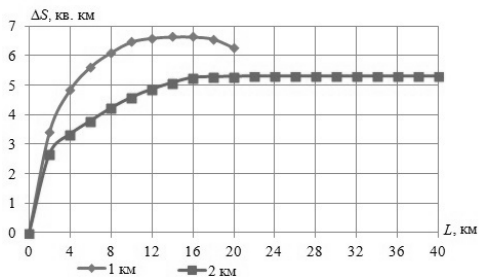


Рис. 15. Зависимость $\Delta S(L)$ при $L_i = 1\text{ км}; 2\text{ км}$, $Q_1 = 23\,000\text{ м}^3/\text{с}$, $t_1 = 3\text{ дня}$ ($i = 1, \dots, 20$)

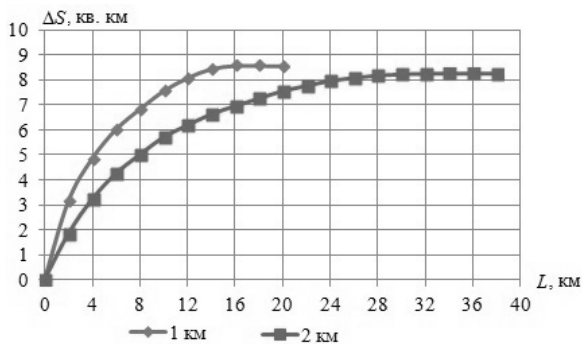


Рис. 16. Зависимость $\Delta S(L)$ при $L_i = 1\text{ км}; 2\text{ км}$, $Q_1 = 23\,000\text{ м}^3/\text{с}$, $t_1 = 6\text{ дней}$ ($i = 1, \dots, 20$)

4.4. МОДЕЛИ СИНТЕЗА ОПТИМАЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ УПРАВЛЕНИЯ

Целями механизмов управления агентами ВАП в проектируемой системе управления являются поддержание планового состояния системы $(S_s, \mathbf{B}_{nl}, S_3(S_{px}, G_{nl}), G_{nl})$, плановой траектории ее управляемой динамики, снижение затрат r на действия Центра. В [5] представлен механизм управления агентом ВГЭС P_0 , поддерживающий равенство $S_3(S_{px}, G_{факт}, P_0) = S_3(S_{px}, G_{nl})$.

Опишем процедуру синтеза механизма софинансирования Агентами ВАП проекта русловосстановления, включение которого в задачу (10) увеличивает общее финансирование $R = R_{Ц} + R_A = r_2 L$, эквивалентное уменьшению для Центра стоимости работ в каждой из зон, потенциально изменяет ее решение. (Горизонт планирования предполагается единым для всех участников проекта.)

Стратегией Центра является выбор величин q_{ij} – долей агентов A_{ij} в финансировании работ по восстановлению русла каждой из зон длиной L_i . Агент A_{ij} , информированный о величине q_{ij} и функции $\Delta S_i(G_{nl}, L_i)$, находит оптимальную для него величину L_{ij}^* восстановленного русла как решение задачи

$$f_{ij} = a_{ij} \Delta S_i(G_{nl}, L_i) - q_{ij} r_2 L_{ij} \rightarrow \max_{L_{ij}} .$$

Оптимальная стратегия агента A_{ij} :

$$L_{ij}^*(q_i) = (\Delta S_i')^{-1}(q_{ij} r_2 / a_{ij}) ,$$

где $L_i^*(q_i) = (\Delta S_i')^{-1}(q_i r_2 / A_i)$ – оптимальная стратегия коллективного агента зоны i – решение задачи

$$F_i = \sum_j f_{ij} = A_i \Delta S_i(L_i) - q_i r_2 L_i \rightarrow \max_{L_i} ,$$

$$A_i = \sum_j a_{ij} ,$$

$q_i > 0$ – определяемая Центром доля участия коллективного Агента зоны i в финансировании работ по расчистке русла длиной L_i . Согласование интересов агентов A_{ij} ($L_{ij}^* = L_i^*$, $j = 1, \dots, k_i$) достигается при выполнении равенств

$$q_{ij}^* = a_{ij} q_i^* / A_i \quad (i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, k_i),$$

где $q_i^*(L_i)$ – оптимальная стратегия Центра, определяемая из уравнения $L_i^*(q_i) = L_i$.

Обозначим

$$q_i^* = \arg \max_{q_i} (q_i r_2 L_i^*(q_i)),$$

тогда $L_i^{**} = (\Delta S_i')^{-1} (q_i^* r_2^* / A_i)$ – максимальное значение желательной для Агентов зоны i величины L_i . Таким образом, оптимальные для Центра цены работ в зонах имеют вид

$$r_{2i}^* = \begin{cases} r_2(1 - q_i^*), L_i \leq L_i^{**}, \\ r_2, L_i > L_i^{**}; \end{cases} \quad (i = 1, \dots, n).$$

Далее Центр решает задачу (10) с условием

$$R_{Ц}(L) = \sum_{i=1}^n r_{2i}^* L_i.$$

5. Анализ результатов

Как показали расчеты, действия Центра образуют единую систему и эффективность каждого из них обусловлена всей системой действий, что доказывает актуальность комплексной задачи эколога-экономического управления. Проектирование адекватной системы управления ограничивается алгоритмической сложностью и неопределенностью задачи. Вычислительная сложность гидродинамических расчетов и оптимизационных задач в значительной мере преодолевается распараллеливанием алгоритмов. Объективную неопределенность комплексной модели управления придает ее зависимость от внешних сценариев *Ext*. Субъективная неопределенность обусловлена недостаточной разработанностью теоретических основ динамики и рисков в слабоустойчивых распределенных социоприродохозяйственных системах, отсутствием данных пространственного мониторинга и социально-экономической статистики в ВАП [6, 10].

В настоящее время обоснована адекватность нескольких (описанных здесь) частных моделей – составных частей проектируемой комплексной системы: моделей рельефа и паводкового затопления, оптимизации гидрографа и восстановления русел. Однако обоснование практической значимости их результатов требует обширных исследований по определению и повышению их точности. Сравнение с данными спутниковых измерений показывает, что относительная погрешность вычисления

величины S_2 для всей территории ВАП равна 4%–6%, тогда как для небольших по размеру равнинных зон и больших гидрографов она может достигать 30%.

6. Заключение

В силу ограниченного объема настоящей статьи в ней не описаны модели когнитивного анализа (SWOT-, PEST-анализ, когнитивные карты) и риска, сценарно-имитационная модель социоприродохозяйственной динамики ВАП. Недостаточная практическая адекватность уравнений (1) является сдерживающим фактором проектирования комплексной модели управления социально-экономической системой, концентрирующей в себе большое число видов методологической и алгоритмической сложности и неопределенности, что актуализирует новые теоретические и практические задачи моделирования динамики и механизмов управления, параллельных вычислений, мониторинга и социально-экономической статистики территорий.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РГНФ 14-12-34019 (комплексная модель эколого-экономического управления, оптимизация гидрографа, проекта русловосстановления, механизмов управления), гранта РФФИ 13-01-97062 (модель динамики поверхностных вод), гранта РФФИ 14-17-97030 (использование ГИС для актуализации цифровой модели рельефа), гранта РФФИ 13-07-97056 (программный комплекс моделирования динамики поверхностных вод). Авторы благодарят суперкомпьютерный комплекс МГУ «Ломоносов» за предоставленные вычислительные ресурсы.

Литература

1. *Атлас единой глубоководной системы Европейской части РФ. Т. 7: Река Волга. От Волгоградского гидроузла до Астрахани.* – СПб.: Б.и., 2009. – 34 л.
2. БАРИН А.Н., ГОЛУБ В.Б., ИОЛИН М.М. и др. *Индикация изменений условий среды в северной части ВАП при использовании шкал Л.Г.Раменского и DCA-*

- ординации // Геодезия и аэросъемка. – 2010. – №5. – С. 21–24.
3. ВОРОНИН А.А., ВАСИЛЬЧЕНКО А.А., ХРАПОВ С.С. и др. *Анализ эффективности природовосстановительных проектов в эколого-экономической системе «Волжская ГЭС – Волго-Ахтубинская пойма»* // Управление большими системами. – 2014. – №52. – С. 133–147.
 4. ВОРОНИН А.А., ЕЛИСЕЕВА М.В., ПИСАРЕВ А.В. и др. *Имитационные модели динамики поверхностных вод с использованием данных дистанционного зондирования: влияние рельефа местности* // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2012. – №3(19). – С. 54–62.
 5. ВОРОНИН А.А., ЕЛИСЕЕВА М.В., ХРАПОВ С.С. и др. *Задача управления гидрологическим режимом в эколого-экономической системе «Волжская ГЭС – Волго-Ахтубинская пойма». Ч 2. Синтез системы управления* // Проблемы управления. – 2012. – №6. – С. 19–25.
 6. ЗЕМЛЯНОВ И.В., ГОРЕЛИЦ О.В., ПАВЛОВСКИЙ А.Е. и др. *Анализ экологических последствий эксплуатации Волгоградского водохранилища для сохранения биоразнообразия основных водно-болотных территорий Нижней Волги* // Отчет о НИР ФГУ «ГОИИ», 2010. – 675 с.
 7. ХОПЕРСКОВ А.В., ХРАПОВ С.С., ПИСАРЕВ А.В. и др. *Задача управления гидрологическим режимом в эколого-экономической системе «Волжская ГЭС – Волго-Ахтубинская пойма». Ч. 1. Моделирование динамики поверхностных вод в период весеннего паводка* // Проблемы управления. – 2012. – №5. – С. 18–25.
 8. ХОПЕРСКОВ А.В., ХРАПОВ С.С., ПИСАРЕВ А.В. *Прямое моделирование динамики поверхностных вод на территории Волго-Ахтубинской поймы* // Суперкомпьютерные технологии в науке, образовании и промышленности. – 2012. – С. 177–181.
 9. ХРАПОВ С.С., ПИСАРЕВ А.В., ВОРОНИН А.А. *Особенности динамики затопления Волго-Ахтубинской поймы в зависимости от режимов испарения и инфильтрации*

- трации // Вестник ВолГУ. Серия 1: Математика. Физика. – 2012. – Т. 15, №1.5. – С. 36–42.
10. ШЕВАНДРИН А.В., ПЕТРОВА Е.А., ВОРОНИН А.А. *Методика мониторинга и оценки уровня социально-экономического развития социохозяйственных слабоустойчивых природных систем (на примере территории Волго-Ахтубинской поймы)* // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 11–10. – С. 2233–2237.
 11. KHRAPOV S., PISAREV A., KOBELLEV I. ETC. *The Numerical Simulation of Shallow Water: Estimation of the Roughness Coefficient on the Flood Stage* // *Advances in Mechanical Engineering*. – 2013. – Vol. 2013. – Article ID 787016. – 11 p.
 12. RABUS B., EINEDER M., ROTH A., ET AL. *The shuttle radar topography mission – a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar* // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. – 2003. – Vol. 57(4). – P. 241–262.
 13. ROY D.P., WULDER M.A., LOVELAND T.R. ETC. *Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research* // *Remote Sens. Environ.* – 2014. – No. 145. – P. 154–172.
 14. SUWANDANA E., KAWAMURA K., SAKUNO Y. ETC. *Thematic information content assessment of the ASTER GDEM: A case study of watershed delineation in West Java, Indonesia* // *Remote Sensing Letters*. – 2012. – Vol. 3(5). – P. 423–432.
 15. [Электронный ресурс] – URL: <http://earthexplorer.usgs.gov> (дата обращения: 20.02.2012).

DESIGNING A SYSTEM FOR ECOLOGICAL– ECONOMICAL MANAGEMENT OF THE VOLGA– AKHTUBA FLOODPLAIN ON BASIS OF HYDRODYNAMIC AND GEOINFORMATIONAL SIMULATION

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

Anna Vasilchenko, Volgograd State University, Volgograd, Senior Lecture (aa-vasilchenko@mail.ru).

Maria Pisareva, Volgograd State University, Volgograd, postgraduate (m.eliseeva.vlg@gmail.com).

Andrei Pisarev, Volgograd State University, Volgograd, cand. of Science, associate professor (andrew.pisarev@gmail.com).

Alexander Khoperskov, Volgograd State University, Volgograd, Doctor of Science, professor (ahoperskov@gmail.com).

Sergey Khrapov, Volgograd State University, Volgograd, cand. of Science, associate professor (xss-ip@mail.ru).

Julia Podschipkova, Volgograd State University, Volgograd, student (podschipkova1993@mail.ru).

Abstract: A system is introduced for ecological-economical management of the territory of the Volga-Akhtuba floodplain. The system is built on the basis of hydrodynamic computer simulations and geoinformational technologies. We optimize the flood hydrograph for the Volga hydroelectric station, suggest the optimal plan of the system of channels for Volga-Akhtuba floodplain recovery, and develop control mechanisms for local economic entities.

Keywords: computer simulation, hydrological mode, hydrograph, digital terrain model, the Volga-Akhtuba floodplain, ecological-economical management.

Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии Д.А. Новиковым

Поступила в редакцию 17.11.2014.

Опубликована 31.05.2015.