

УДК 519.6 + 519.8

ББК 22.19+20.1.

**АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ПРИРОДОВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ ПРОЕКТОВ  
В ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ  
«ВОЛЖСКАЯ ГЭС – ВОЛГО-АХТУБИНСКАЯ  
ПОЙМА»**

**Воронин А. А.<sup>1</sup>, Васильченко А. А.,<sup>2</sup>**

**Храпов С. С.,<sup>3</sup> Агафонникова Е. О.<sup>4</sup>**

*(Волгоградский государственный университет, Волгоград)*

*На основе цифровой модели рельефа и гидродинамической модели наводкового затопления проведено численное исследование эффективности проекта расчистки русел Волго-Ахтубинской поймы с целью увеличения площади территории наводкового затопления. В рамках эмпирически обоснованной стратегии пространственного распределения работ найдены оптимальные значения параметров проекта и наводкового гидрографа Волжской ГЭС.*

Ключевые слова: эколого-экономическая система, гидрологический режим, цифровая модель рельефа, Волго-Ахтубинская пойма.

---

<sup>1</sup> Александр Александрович Воронин, доктор физико-математических наук (voronin@volsu.ru).

<sup>2</sup> Анна Анатольевна Васильченко, старший преподаватель (aavasilchenko@mail.ru).

<sup>3</sup> Сергей Сергеевич Храпов, кандидат физико-математических наук, доцент (xss-ip@mail.ru).

<sup>4</sup> Екатерина Олеговна Агафонникова, аспирант (kate.agafonnikova@yandex.ru).

## 1. Введение

В экосистеме Нижнего Поволжья особое место занимает Волго-Ахтубинская пойма (ВАП) – уникальное природное образование, жизнь которого полностью определяется гидрологическим режимом рек Волги и Ахтубы. Сложившийся в последние десятилетия гидрологический режим ВАП ведет к деградации ее экосистемы [1, 4]. Уменьшение среднего объема весеннего паводка (в 2–3 раза) инициировало процесс деградации нескольких тысяч малых (шириной 10–50 м. и глубиной 2–4 м.) русел ВАП (песчаные заносы, заиливание, зарастание) и, как следствие, прогрессирующее обезвоживание ее территории. Замедление деградации русловой системы ВАП в условиях технического сглаживания пиков многоводности, обеспечивавших ее естественную регенерацию, требует значительных ежегодных затрат на проведение гидротехнических работ, которые в конечном счете могут превысить дополнительную прибыль от нарушения экологического оптимального режима эксплуатации Волжской ГЭС (ВГЭС). По расчетам экологов [4] первоочередные затраты на расчистку русел ВАП составляют 645 млн. руб., а совокупные – несколько миллиардов.

В настоящей работе проводится анализ эффективности проекта расчистки русел ВАП, зависящей от пространственного распределения работ, глубины расчистки, совокупной длины восстановленных русел, параметров паводкового гидрографа Волжской ГЭС. Основным методом получения необходимых для анализа данных является имитационное моделирование паводковых затоплений, основанное на численном интегрировании уравнений динамики поверхностных вод для серии цифровых рельефов местности северной части ВАП, отличающихся высотами дна ее русел.

Функция цифровой модели рельефа (ЦМР)  $b(x, y)$  задает координаты местности и соответствующие абсолютные высоты и хранится в виде матрицы высот в файле *grd*-формата. Используемые в настоящей работе ЦМР и гидродинамическая модель паводковых затоплений подробно описаны в [2, 5–8].

## **2. Когнитивный анализ проблемы улучшения гидрологической ситуации в Волго-Ахтубинской пойме**

Важнейшей характеристикой природной гидросистемы поймы является зависимость состояния русел от средних, максимальных и минимальных значений объема паводка. Действительно, малая глубина в сочетании с большой длиной и разветвленностью пойменных русел является причиной их слабой устойчивости к процессам деградации, усиливающимся в периоды малых и замедляющимся в периоды больших паводков. В то же время сверхбольшие паводки, обусловленные значительным объемом снежного покрова и коротким периодом снеготаяния, обеспечивают регенерацию русловой системы. Таким образом, сложная природная динамика паводковых процессов, придавая неустойчивость пространственной структуре русловой системы поймы, обеспечивает сохранение ее главного агрегированного параметра – средней пропускной способности.

Функционирование гидрокаскадов на пойменных территориях приводит к резкому сокращению среднего и максимального значений объема паводков, вызывающему долговременную прогрессирующую деградацию пойменных русел и снижение средней площади паводковых затоплений, итогом которых становится уничтожение уникальных пойменных экосистем. Побочным следствием зарегулированности паводковых процессов является активное социохозяйственное развитие пойменных территорий, сопровождающееся мелиорацией земель, урбанизацией, развитием транспортной инфраструктуры, и, таким образом, вносящее антропогенный вклад в деградацию их русловых систем.

Для смягчения (или прекращения) тенденции природной деградации, сопровождающей социоприродохозяйственное развитие пойменных территорий, необходима разработка комплексной системы эколого-экономического управления, включающей в себя мониторинг и моделирование паводковых затоплений и среднесрочной природной динамики, оптимизацию

паводковых гидрографов, механизмы управления экономическими субъектами и природовосстановительными проектами.

В [3] описаны основные составные части комплексной модели эколого-экономического управления территорией Волго-Ахтубинской поймы: модели рельефа, паводковых затоплений, оптимизации паводкового гидрографа ВГЭС, механизмов управления экономическим субъектом (ВГЭС). Важной частью этого комплекса являются модели управления проектами расчистки природных русел ВАП, позволяющими замедлить тенденцию снижения объема паводковых вод, проходящих вглубь ее территории во время весенних паводков.



*Рис. 1. Карта северной части Волго-Ахтубинской поймы с отмеченными русловыми входами на территорию*

На рис. 1 приведена карта северной части ВАП с отмеченными русловыми входами на ее территорию, распределенными

практически равномерно вдоль рек Волги (16 входов), Ахтубы (13 входов) и магистрального ерика «Гнилой» (52 входа).

Площадь паводкового затопления ВАП определяется, с одной стороны, паводковым гидрографом ВГЭС – расходом паводковой воды через ее створы  $Q(t)$ , с другой – характеристиками рельефа территории, описываемыми в ЦМР функцией  $b(x, y)$ .

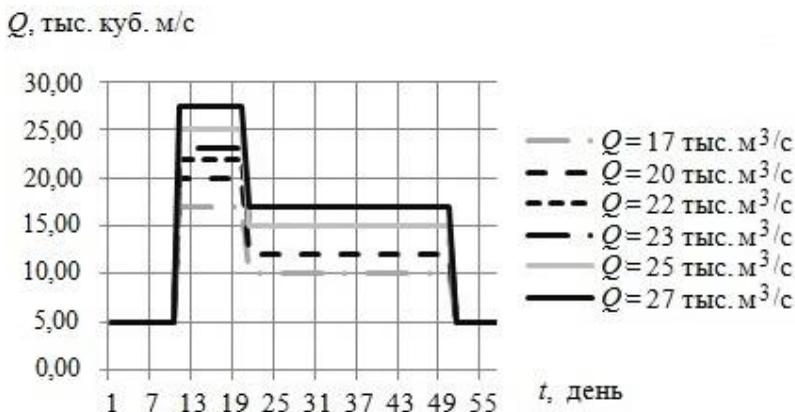


Рис. 2. Набор модельных гидрографов, используемых в расчетах

Современный паводковый гидрограф ВГЭС состоит из двух постоянных участков, обеспечивающих соответственно затопление территории («сельскохозяйственная полка»,  $Q = 20–27$  тыс. м<sup>3</sup>/с,  $t = 3–10$  дней) и удержание в затопленном состоянии территории нерестилищ («рыбохозяйственная полка»,  $Q = 10–15$  тыс. м<sup>3</sup>/с,  $t = 10–30$  дней) (рис. 2).

Таким образом, площадь паводкового затопления территории ВАП определяется величиной гидрографа  $Q$ , моментом времени  $t$  и функцией рельефа  $b(x, y)$ :  $S_{зат}(t, Q, b(x, y))$ .

Невозможность расчистки всех русел ВАП требует разработки стратегии пространственного распределения проектных работ, при этом практически единственным способом систематического поиска и анализа альтернатив является гидродинамическое моделирование. Численные эксперименты показали, что

функция  $S_{\text{зат}}$  обладает наибольшей чувствительностью к состоянию русел в отмеченных на рис. 1 местах соединения русловой системы ВАП с магистральными руслами (реки Волга и Ахтуба, магистральный ерик «Гнилой»). При этом наибольшая территория паводкового затопления обеспечивается руслами, соединенными с р. Ахтуба. Поэтому в условиях огромной вычислительной сложности задачи выбора альтернатив пространственного распределения работ естественно предположить, что наиболее эффективной стратегией является равномерная расчистка всех русловых входов на территорию северной части ВАП из р. Ахтуба. Общая длина восстановленных русел определяется глубиной расчистки и объемом вынутого грунта, пропорциональным финансовому ресурсу проекта.

### 3. Постановка задачи

В настоящей работе рассматривается задача максимизации приращения относительной площади территории паводкового затопления  $\Delta S = (S_{\text{расч}} - S_{\text{без\_расч}}) / S_{\text{расч}}$  (где  $S_{\text{расч}}$  – площадь затопленной территории после расчистки русел;  $S_{\text{без\_расч}}$  – до расчистки) в результате расчистки 13 русел – входов на территорию ВАП из р. Ахтуба с параметрами  $R$ ,  $Q$  и  $t$  ( $R$  – величина финансового ресурса проекта,  $Q$  – величина «сельскохозяйственной полки»,  $t$  – время затопления). Величина  $R$  считается пропорциональной объему вынутого из русел грунта  $V_{\text{гр}}$ . Вследствие пространственной однородности рельефа ВАП справедливо равенство  $V_{\text{гр}} = l \cdot z \cdot L$ , где  $l$  – ширина русла;  $z$  – глубина расчистки;  $L$  – суммарная длина расчищенных русел. В ЦМР ВАП русла являются линейными объектами, поэтому с учетом шага сетки  $(x, y)$  принимается  $l = 20$  м (что соответствует реальности), а варьируемыми параметрами являются  $z$  и  $L$ . Критерием финансовой эффективности проекта считается отношение  $\Delta S/R$ .

#### 4. Имитационное моделирование расчистки русел

##### 4.1. ОРГАНИЗАЦИЯ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Моделирование расчистки русел проводилось в несколько этапов. Сначала на основе визуального и программного анализа функции  $b(x, y)$  были определены точки  $(x, y)$ , принадлежащие подлежащим расчистке руслам. Затем для точек каждого русла выполнялась процедура «углубления» – изменения значения  $b(x, y)$  на определенную величину. На рис. 3 показаны фрагменты цифровой карты с отмеченными точками, подлежащими процедуре «углубления».

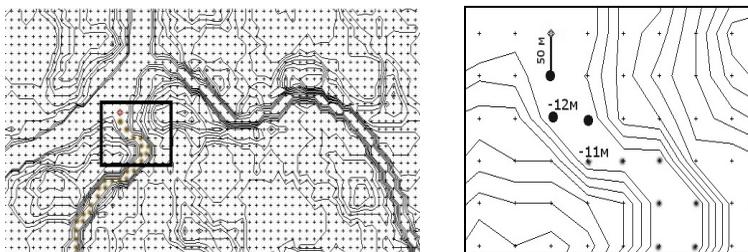


Рис. 3. Выбор участка расчистки русла

Параметры, косвенно задающие объем финансирования проекта  $R$  и напрямую – глубину и длину расчищаемой зоны, определялись из набора соотношений  $z:L = 100; 250; 500; 750; 1000; 2000; z = 0,250; 0,500; 0,625; 1,000; 1,250; 2,000; 2,500$  (м).

Полученные серии цифровых карт использовались в гидродинамических расчетах со следующими параметрами «сельскохозяйственной полки»:  $t = 3; 6; 9; 10$  (дней);  $Q = 17; 20; 22; 23; 25; 27$  (тыс. м<sup>3</sup>/с).

##### 3.2. ПОИСК ОПТИМАЛЬНОЙ ГЛУБИНЫ РАСЧИСТКИ РУСЕЛ

Первой задачей исследования стал поиск оптимальной глубины расчистки русел  $z^*$ , доставляющей максимум функции  $\Delta S$  при фиксированных значениях  $R, Q, t$ .

Результаты расчетов показали качественно одинаковый характер зависимости максимальных значений  $\Delta S$  от  $z$  при изме-

нении параметров  $R$  и  $t$ . Результаты расчетов для  $z \cdot L = 1000$ ,  $t = 10$  и серии значений  $Q$  представлены на рис. 4.

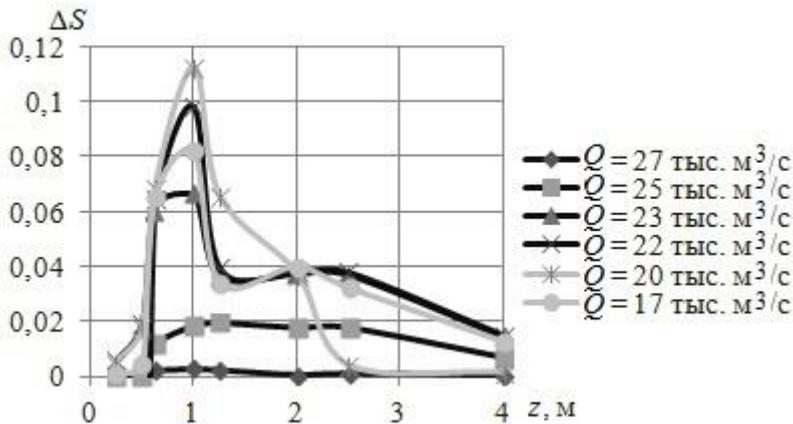


Рис. 4. Зависимость результативности проекта от глубины расчистки русел для различных гидрографов

На рис. 5 приведены графики, характеризующие влияние глубины расчистки русел на динамику затопления территории. Как видно из представленных рисунков, оптимальной глубиной является значение  $z^* = 1$  м, которое использовалось в дальнейших экспериментах.

### 3.2. ПОИСК ОПТИМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ПАВОДКОВОГО ГИДРОГРАФА

Результаты численных экспериментов по построению зависимости  $\Delta S(Q, t)$  для  $L = 1000$  м приведены на рис. 6. Для остальных значений  $L$  из ряда, приведенного в п. 3.1, зависимость  $\Delta S(Q, t)$  имеет аналогичный вид. Как видно из представленного рисунка, функция  $\Delta S(Q, t)$  обладает большой чувствительностью по отношению к каждому аргументу.

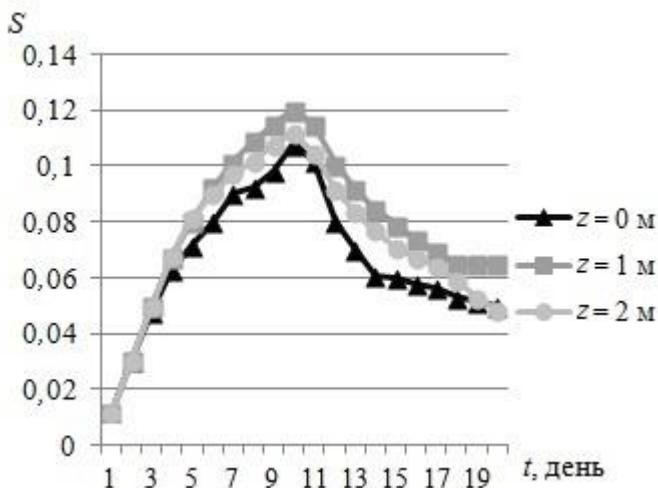


Рис. 5. Динамика затопления территории ВАП при различных глубинах расчистки русел для  $Q = 20$  тыс.  $\text{м}^3/\text{с}$  (1–10 – дни паводка) и  $Q = 12$  тыс.  $\text{м}^3/\text{с}$  (11–20 дни паводка)

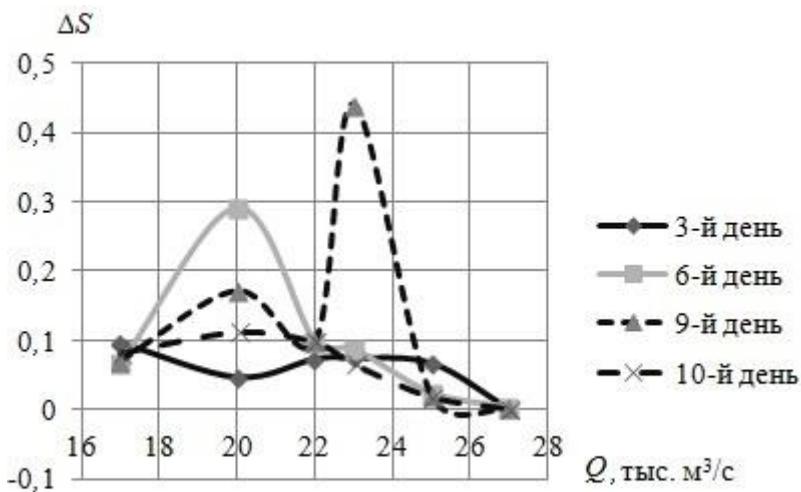


Рис. 6. Зависимость  $\Delta S(Q, t)$  при  $L = 1000$  м

### 3.4. ПОИСК ЭФФЕКТИВНОГО ОБЪЕМА ФИНАНСИРОВАНИЯ ПРОЕКТА

Для анализа финансовой эффективности проекта были проведены расчеты затоплений для серии величин  $R$  (что с учетом сделанных выше замечаний эквивалентно серии значений длин расчищаемых русел  $L$ , приведенной в п. 3.1). Результативность и эффективность проекта оценивались соответственно величинами  $\Delta S$  и  $\Delta S/R$ .

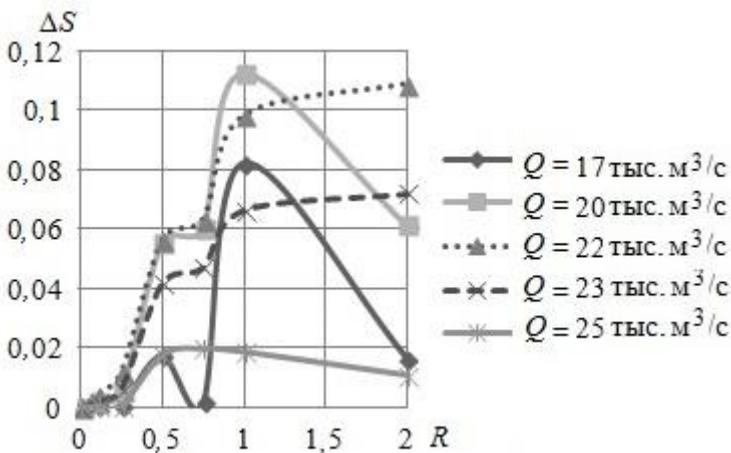
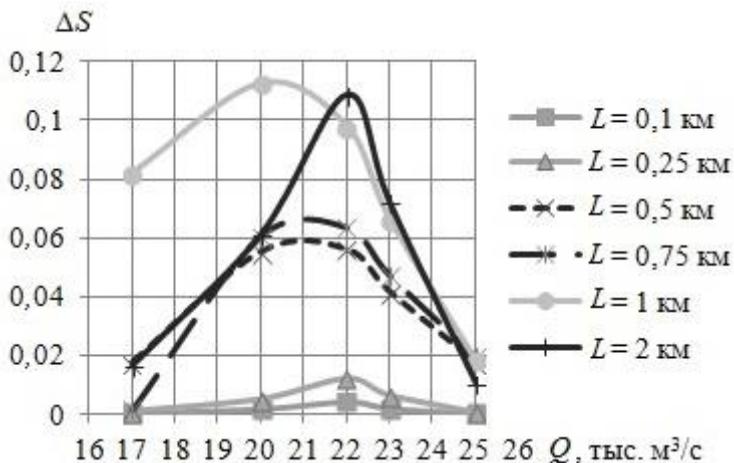


Рис. 7-8. Зависимость  $\Delta S(Q, R)$  при  $t = 10$  дней

Графики, определяющие зависимость этих величин от параметров  $Q$ ,  $R$ ,  $t$ , представлены на рис. 7–9

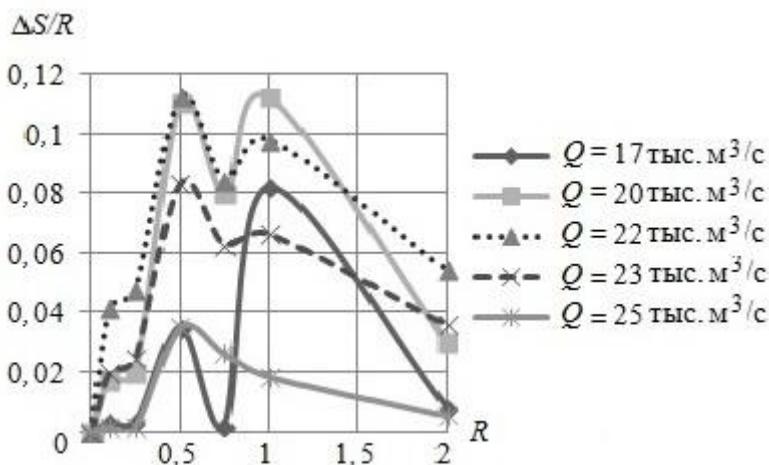
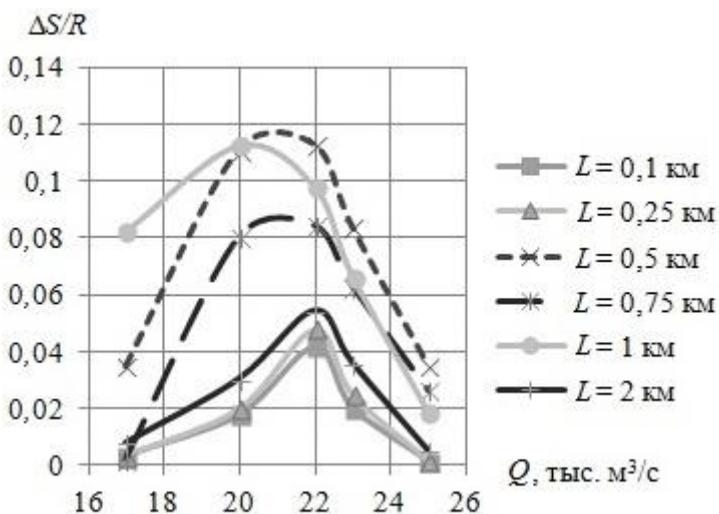


Рис. 9-10. Зависимость финансовой эффективности проекта от  $Q$  и  $R$  для  $t = 10$  дней

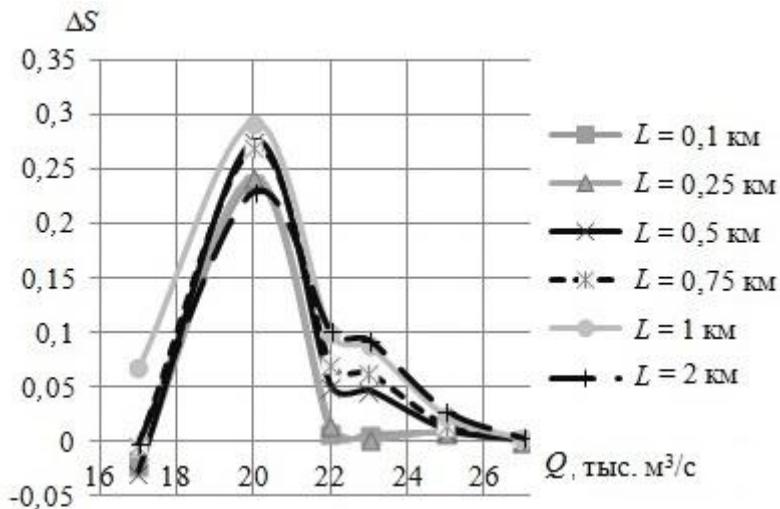


Рис. 11. Зависимость  $\Delta S(Q, R)$  для  $t = 6$  дней

## 5. Анализ результатов.

В результате проведенного исследования для заданной стратегии пространственного распределения работ (расчистки 13 русел – входов на территорию ВАП со стороны р. Ахтубы), функции результативности (относительного приращения площади паводкового затопления территории ВАП) были получены оптимальные значения глубины расчистки ( $z^* = 1$  м), «сельскохозяйственной полки» ( $Q^* = 22$  тыс. м<sup>3</sup>/с) и ее продолжительности ( $t^* = 6$  дней, 9 дней), эффективной длины расчищаемого русла ( $L^* = 500$  м). Нерегулярный характер зависимости функции результативности проекта  $\Delta S(t, Q, R)$  от его параметров объясняется нелинейностью природного динамического процесса, а также свойствами этой функции, не обладающей монотонной зависимостью от аргументов (в отличие от функции площади затопления  $S_{зат}(t, Q, R)$ , монотонно зависящей от всех аргументов). Относительно рассмотренной целевой функции проект заведомо неэффективен для крайне малых и крайне больших паводков. Наличие локальных экстремумов

можно объяснить нерегулярностью рельефа и русловой структуры ВАП.

С другой стороны, можно сделать вывод и о том, что используемая в настоящей работе, очевидная на первый взгляд, целевая функция проекта, скорее всего, не вполне соотносится с целью комплексной системы эколого-экономического управления. Действительно, максимальная эффективность проекта достигается во внутренней точке допустимого множества гидрографов, что ограничивает значение главного критерия управления – увеличение площади паводковых затоплений.

## **6. Заключение.**

Проведенное исследование является составной частью исследования альтернатив пространственного распределения работ по проекту расчистки русел ВАП. Падение эффективности рассмотренной стратегии при увеличении параметров паводковых затоплений свидетельствует о необходимости исследования эффективности работ в глубине ее территории. С другой стороны, в рамках анализа долгосрочной оптимальности паводкового гидрографа ВГЭС полезным представляется сравнительный стоимостной анализ альтернатив природной и антропогенной регенерации русловой системы ВАП.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов РГНФ 14-12-34019 (когнитивный анализ проблемы, постановка и реализация оптимизационных задач), гранта РФФИ 13-01-97062 (разработка усовершенствованной версии математической модели динамики поверхностных вод) гранта РФФИ 13-07-97056 (использование программного комплекса моделирования динамики поверхностных вод).

## ***Литература***

1. БАРМИН 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 ДСА-ординации // Геодезия и аэросъёмка. – 2010. – №5. – С. 21–24.*

2. 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.
3. 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.
4. 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 «ГОИН», 2010. – 675 с.
5. 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.
6. 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.
7. ХРАПОВ С.С., ПИСАРЕВ А.В., ВОРОНИН А.А. *Особенности динамики затопления Волго-Ахтубинской поймы в зависимости от режимов испарения и инфильтрации* // Вестник ВолГУ., Серия 1: Математика. Физика. – 2012. – Т. 15, №1.5. – С. 36–42.
8. КИРАПОВ S., ПИСАРЕВ A., КОБЕЛЕВ 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.

## **EFFICIENCY ANALYSIS FOR NATURE RESTORATION PROJECTS IN ECOLOGO-ECONOMIC SYSTEM OF VOLGA HPP AND VOLGA-AKHTUBA FLOODPLAIN**

**Alexandr 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).

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

**Ekaterina Agafonnikova**, Volgograd State University, Volgograd, postgraduate (kate.agafonnikova@yandex.ru).

*Abstract: The paper presents results of a computer simulation on the effectiveness of the project for rivers' beds clearing in the Volga-Akhtuba floodplain on the basis of a digital terrain model and the hydrodynamic model of flooding. The main purpose of this project is increasing the flooding land area. We found out the optimal parameters of the project and the flood hydrograph of Volga Hydroelectric Power Station under empirically based strategy of spatial distribution of works.*

**Keywords:** ecologo-economic system, computer simulation, hydrological mode, digital terrain model, Volga-Akhtuba floodplain.

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

*Поступила в редакцию 02.09.2014.  
Опубликована 30.11.2014.*