



DOI: <http://dx.doi.org/10.15688/jvolsu1.2016.1.3>

УДК 519.6

ББК 22.19+20.1

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ УПРАВЛЕНИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКИМ РЕЖИМОМ ВОЛГО-АХТУБИНСКОЙ ПОЙМЫ НА ОСНОВЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО И ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ¹

Александр Александрович Воронин

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

Анна Анатольевна Васильченко

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

Андрей Владимирович Писарев

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информационных систем и компьютерного моделирования,
Волгоградский государственный университет
andrew.pisarev@gmail.com, infomod@volsu.ru
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Сергей Сергеевич Храпов

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информационных систем и компьютерного моделирования,
Волгоградский государственный университет
xss-ip@mail.ru, infomod@volsu.ru
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Юлия Евгеньевна Радченко

Студентка кафедры фундаментальной информатики и оптимального управления,
Волгоградский государственный университет
podschipkova1993@mail.ru, fiou@volsu.ru
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Аннотация. В настоящей работе описаны структура и теоретико-игровые и гидротехнические механизмы управления гидрологическим режимом ВАП, целью которых является повышение эффективности использования паводковых вод для затопления ее территории. Основой исследования являются созданные ранее цифровая модель рельефа и гидродинамическая модель динамики паводковых вод.

Ключевые слова: гидрологический режим, механизмы управления, цифровая модель рельефа, гидродинамическая модель, Волго-Ахтубинская пойма.

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 (по сравнению с природным) объемом ее меженного и значительно сокращенным объемом паводкового стока. Факторами обезвоживания являются также расширение и углубление русла р. Волги ниже ВГЭС, ограничение паводковых пиков требованиями гидрологической безопасности расширяющихся сельскохозяйственных и урбанизированных территорий, уменьшение паводковой самоочистки ее русел, строительство на них плотин и дамб [6]. В последние десятилетия эта тенденция усугубляется зимним потеплением, усиливающим перераспределение годового стока в пользу зимне-летне-осеннего. Значительным недостатком существующей системы управления паводковым гидрологическим режимом ВАП является отсутствие планирования агрегированных и распределенных параметров затопления ее территории (планируется только паводковый гидрограф ВГЭС). Это обстоятельство не позволяет проводить оценку и оптимизацию его эффективности и, главное, практически выводит из сферы управления влияющих на него хозяйствующих субъектов (агентов) территории ВАП. Для устранения этого недостатка и проектирования комплексной системы эколого-экономического управления гидрологическим режимом ВАП на основе междисциплинарного подхода, интегрирующего методы и результаты геоинформационного, гидродинамического, оптимизационного, теоретико-игрового и сценарно-имитационного моделирования в Волгоградском государственном университете создан программно-вычислительный комплекс, включающий в себя несколько постоянно актуализируемых модулей, реализующих основной функционал: когнитивный анализ ситуации, многокритериальную оптимизацию паводкового гидрографа ВГЭС и природовосстановительных проектов, проектирование механизмов эколого-экономического управления, сценарно-имитационное моделирование социоприродохозяйственной динамики и развития. Функционирование основного комплекса обеспечивается программным комплексом «ЭКОГИС», включающим в себя построение и актуализацию цифровой модели рельефа (ЦМР) на основе ГИС-технологий, численное гидродинамическое моделирование динамики поверхностных вод. Базовые версии основных моделей и результаты моделирования описаны в [1; 8; 10]. В настоящей работе рассмотрены структура и механизмы управления гидрологическим режимом ВАП, в частности, приведены результаты экспертизы ряда гидротехнических проектов обводнения ее территории.

1. Геоинформационное моделирование рельефа

Основой цифровой модели рельефа (ЦМР) ВАП $b(x, y)$ послужили спутниковые данные ASTER и SRTM с разрешением до 20 м в плоскости Земли и до 0,5 м по вертикали. Использование программы Landsat позволило получить актуальные данные высокого разрешения (15–30 м/пиксель). Добавление объектам атрибутивной информации проводилось с использованием топографической карты 1 : 50 000 открытого пользования. Цифровая карта пойменных русел и речного дна строилась совместной векторизацией топографических и лоцманских карт русел ВАП, Волги и Ахтубы с использованием результатов экспедиционных исследований. Актуализация ЦМР производится ежегодно с использованием регулярно обновляемых космических снимков, размещенных на сайте геологической службы США в открытом режиме (спутник ДЗЗ Landsat 8), а также с помощью GPS-измерений границ паводковых затоплений. Векторная карта ВАП 2015 г. 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. Для решения задач управления проведена гидрологическая структуризация территории ВАП с учетом ее рельефа русловой структуры, которую образуют три магистральных водотока (р. Волга, р. Ахтуба и ерик Гнилой) и берущие из них начало практически равномерно распределенные территориальные русла, бассейны которых образуют естественные гидрологические зоны (рис. 1).

2. Гидродинамическое моделирование паводков

Актуальная численная модель динамики поверхностных вод 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 [4; 9]. 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. Анализ космических снимков и результатов гидродинамических расчетов показал, что площадь затопления территории определяется параметрами (величиной постоянного расхода Q и длительностью t) первой фазы паводка — «сельскохозяйственной полки», при $Q \leq 17\,000 \text{ м}^3/\text{с}$ затопления территории не происходит, а при $Q \leq 30\,000 \text{ м}^3/\text{с}$ и $t \geq 5$ суток происходит катастрофическое затопление. Результаты гидродинамического моделирования в виде зависимости агрегированных и территориально распределенных параметров паводкового затопления от параметров паводкового гидрографа и рельефа территории приведены в [1; 3; 4; 7–11].

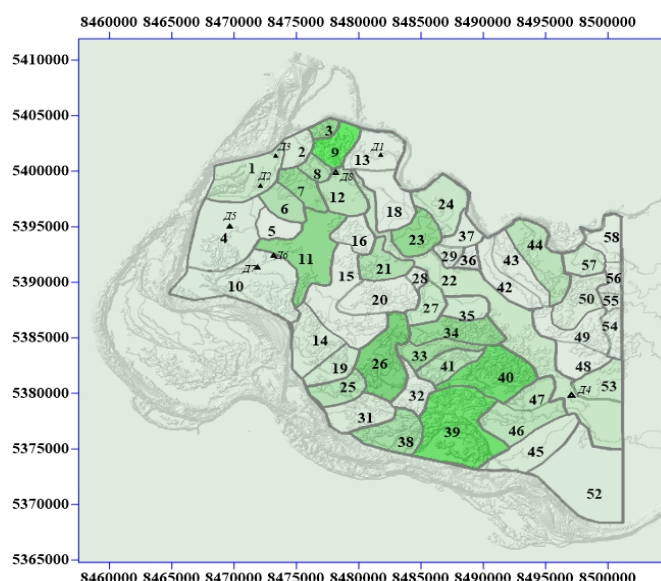


Рис. 1. Карта гидрологических зон северной части ВАП. Выделены места расположения дамб (Д) и зоны с их заметным влиянием на затопление территории

3. Структура и механизмы управления

Главными задачами проектирования системы управления гидрологическим режимом ВАП является создание алгоритмов адаптивного планирования его агрегированных и распределенных параметров, а также комплекса механизмов, обеспечивающих выполнение планов в условиях конфликта интересов. Оптимальный гидрологический режим ВАП является результатом экспертного анализа ситуации и установления баланса между экологическим, социальным и экономическим краткосрочным и долгосрочным приоритетами различных групп агентов в условиях переменных деградирующих паводков, гидротехнических ограничений, неоднородности рельефа, требований безопасности, пространственной распределенности управляемых параметров. Эти свойства управляемой системы мотивируют использование трехуровневой структуры управления гидрологическим режимом: федеральный (региональный) центр — муниципальные органы управления — юридические и/или физические лица. Институциональной основой механизмов децентрализованного управления в сфере водных отношений является статья 11 Водного кодекса РФ, предоставляющая право пользования водными объектами и их частями юридическим и физическим лицам на основании договоров водопользования и решений о предоставлении водных объектов в пользование, в частности, для строительства гидротехнических сооружений (дамб, мостов, трубопроводов), проведения дноуглубительных работ, забора водных ресурсов, организованного отдыха. Закон предусматривает, в частности, нормирование объемов забора водных ресурсов и сброса сточных вод, выполнение водохозяйственных и водоохраных мероприятий, платность водопользования. Внешним регулятором гидрологического режима ВАП является паводковый режим Волжского гидрокаскада, управляемый специальной правительственной рабочей группой с участием представителей регионов. Субъекты реализации гидротехнических проектов и функций, распределенных по территории ВАП, могут располагаться на любом уровне управлен-

ческой иерархии. Так, например, Федеральный центр может планировать долгосрочную (прогрессирующую в случае реализации федеральных гидротехнических проектов) зависимость между объемом паводка и площадью (а также картами) паводкового затопления экологически значимой территории ВАП. Аналогичное планирование затопления остальной части ВАП может осуществлять региональный центр. Согласованное с этими планами проектирование функциональной структуры территории ВАП могут осуществлять муниципальные власти. Хозяйствующие субъекты планируют свою деятельность и участие в гидротехнических проектах. Комплексная оптимизация использования паводковых вод для безопасного затопления территории ВАП в условиях высокой взаимозависимости и потенциальной конфликтности акторов требует реализации механизмов согласования интересов. Основными механизмами регулирования социоэкономического водопотребления и изменения рельефа, землеотведения, стимулирования внедрения водосберегающих технологий являются штрафы за нанесение гидрологического ущерба, плата за ущерб, механизмы стимулирования снижения ожидаемого ущерба. Целью их оптимизации является достижение максимального эффекта субъекта управления.

Для формального описания задачи согласно подходу [1] будем предполагать, что целью i -го агента является максимизация прибыли, которую в отсутствие механизмов управления можно представить в виде: $f_i = c_i u_i - z_i(u_i) - v_i$, где $u_i \geq 0$ — объем продукции; c_i — цена продукции; $z_i(u_i)$, v_i — затраты соответственно на выпуск продукции в объеме u_i и снижение ущерба. Обозначим через y_i уровень негативного действия i -го агента. Пусть χ_i — размер штрафа за превышение заданного уровня ущерба x_i , тогда прибыль агента имеет вид $f_i = c_i u_i - z_i(u_i) - \chi_i(x_i, y_i)$, где

$$\chi_i(x_i, y_i) = \begin{cases} 0, & y_i < x_i \\ \chi_i(y_i), & y_i \geq x_i. \end{cases}$$

При действии механизма платы за ущерб имеем: $\chi_i(x_i, y_i) = \lambda_i(y_i - x_i)$, $x_i \leq y_i$, где λ_i — цена ущерба для i -го агента. При использовании механизма налогообложения как средства побуждения к снижению уровня ущерба имеем: $\chi_i = [\rho_0 - \rho(y_i)][c_i u_i - z_i(u_i)]$, где ρ_0 — базовая ставка налогообложения; $\rho(y_i)$ — величина снижения базовой ставки в зависимости от уровня ущерба. В дальнейшем будем считать, что $y_i = y_i(u_i, v_i)$, то есть уровень создаваемого i -м агентом ущерба зависит от объема выпускаемой им продукции u_i и объема средств v_i , направляемых на внедрение природосберегающих технологий и мероприятий. При этом считаем выполненными следующие неравенства:

$$y_i(0, v_i) = 0, \quad \frac{\partial y_i(u_i, v_i)}{\partial u_i} \geq 0, \quad \frac{\partial y_i(u_i, v_i)}{\partial v_i} \leq 0.$$

При становлении максимально допустимого уровня ущерба x целевая функция агента имеет вид:

$$f = c u - z(u) - \chi(x, y); \quad \chi(x, y) = \begin{cases} \chi(y), & \text{если } y > x \\ 0, & \text{если } y \leq x \end{cases}.$$

Функция штрафа подбирается так, что для агента превышение допустимого уровня ущерба всегда оказывается невыгодным. Пусть u^* — решение задачи

$$\begin{cases} c u - z(u) - v \rightarrow \max_{(u,v)} \\ y(u, v) \leq x \end{cases}.$$

Если $y(u^*, 0) \leq x$, то агент не тратит средства на снижение уровня ущерба. Если же $y(u^*, 0) \geq x$, то он должен либо сократить объем выпуска, либо потратить часть своих средств на снижение уровня риска, либо комбинировать эти подходы. Специфическими проблемами проектирования и реализации этого механизма в условиях ВАП являются объективная и субъективная неопределенность в определении практически всех его параметров.

Пример механизма штрафов для хозяйствующего субъекта ВГЭС, обеспечивающего плановые параметры паводкового гидрографа, приведен в [5]. Причиняемый действием агента экологический ущерб пропорционален отклонению площади затопленной территории от плановой, которая при малых нарушениях плана пропорциональна дефициту объема гидрографа. Действием по снижению ущерба является углубление русел, повышающее эффективность затопления территории. Механизм софинансирования агентами ВАП гидротехнических проектов на ее территории описан в [10].

Опишем механизм снижения уровня ущерба от действий агентов. Пусть функция дохода агентов монотонно зависит как от количества критического ресурса, так и от затрат на ресурсосберегающие технологии. Прямое или косвенное ограничение Центром объема потребляемого агентом ресурса, очевидно, может привести к нежелательному как для агентов, так и для Центра сокращению выпуска продукции. Поэтому, стимулируя агентов к внедрению ресурсосберегающей технологии, Центр одновременно должен участвовать в софинансировании их затрат, используя полученные им средства от платы за ресурс. Дадим формальное описание задачи синтеза соответствующего оптимального механизма. Пусть $f = \lambda v - q_0 V - C$ — функция прибыли агента (доход пропорционален объему выпущенной продукции $v = k_0 V^\alpha$ ($0 \leq \alpha \leq 1$); k_0 — коэффициент эффективности используемой технологии; V — величина потребляемого ресурса), q_0 — удельные затраты на использование ресурса; C — иные затраты. Целью проектируемого механизма является минимизация потребления агентом природного ресурса при условии неуменьшения объема выпуска и положительного значения функции прибыли. Механизмом управления является вектор $u = (\mu, q_1)$, где μ — ставка софинансирования Центром затрат агента η на внедрение ресурсосберегающей технологии; q_1 — ставка вводимой Центром платы за потребляемый ресурс. Целью агента является максимизация прибыли выбором объема потребления ресурса в условиях действия механизма. Таким образом, задача синтеза оптимального механизма имеет вид:

$$V \rightarrow \min, \quad f = (\lambda + \mu)[(k_0 + k_1 \eta)V]^\alpha - (q_0 - q_1)V - \eta \rightarrow \max_V, \quad V(u) \geq V(0),$$

$$f(v, \eta, u) > 0, \quad \mu[(k_0 + k_1 \eta)V]^\alpha \leq q_1 V, \quad v(\eta, V) \geq v(0, V), \quad f(v, 0, u) < 0.$$

Решение задачи существует не при всех значениях коэффициентов в приведенных выше функциях. Значения параметров управления, обеспечивающие предельно низкий уровень потребления ресурса V_{min} , достигаются при $f = 0$, поэтому неравенство $f(v, 0, u) > 0$ выполняется в рамках концепции ϵ -оптимальности. Если агентов несколько, то значения V_{min} и q_1 определяются по наименьшему уровню рентабельности. В случае нескольких агентов оптимизация механизма может проводиться в предположении использования агентами равновесных по Нэшу оптимальных значений затрат и выпуска. В описанном примере использована модельная целевая функция агента. В отсутствие открытых статистических данных о деятельности хозяйствующих субъектов ВАП и, следовательно, возможности практической оптимизации механизма Центр может использовать конкурсные или иные механизмы распределения ресурса. В частности, фи-

нансирование Центра может определяться пропорционально доле агентов в суммарном выпуске, что стимулирует их к росту затрат на ресурсосбережение.

4. Оптимизация гидротехнических проектов

Для исследования эффективности гидротехнических проектов обводнения территории ВАП проведена серия гидродинамических расчетов паводковой динамики для различных ЦМР, учитывающих эффекты создания и/или ликвидации дамб в руслах рек Волги и Ахтубы, а также в руслах ВАП. Одновременно производилась имитация изменения глубины русел ВАП, что позволяет учитывать как их деградацию, так и их углубление.

В настоящее время в исследуемой части ВАП (см. рис. 1) расположено 9 оросительных дамб, характеристики которых приведены в таблице. Представленные на рисунках 2–3 результаты моделирования затоплений с различными параметрами гидрографа Q и глубины русел h показывают отрицательное суммарное влияние дамб на величину общей площади затопленной территории, которое, однако, становится ощутимым лишь при достаточно большой длительности периода затопления.

Характеристики гидротехнических сооружений ВАП. Дамбы. Тип: А — переливная; В — узкопроточная; С — гибридная; l — длина (м); d — ширина (м)

| № п/п | Широта, ° | Долгота, ° | Номер гидрологической зоны | Высота, м | Тип; l ; d |
|-------|-----------|------------|----------------------------|-----------|----------------|
| 1 | 48,74 | 44,74 | 13 | -7 | А; 160; 6 |
| 2 | 48,71 | 44,60 | 1 | -4 | А; 174; 9 |
| 3 | 48,74 | 44,63 | 1 | -6 | А; 92; 9 |
| 4 | 48,55 | 44,95 | 22 | -11 | В; 119; 34 |
| 5 | 48,67 | 44,58 | 4 | -4 | В; 81; 8 |
| 6 | 48,66 | 44,63 | 10 | -3 | В; 129; 11 |
| 7 | 48,65 | 44,61 | 10 | -5 | А; 63; 4 |
| 8 | 48,73 | 44,70 | 12 | -6 | В; 89; 6 |
| 9 | 48,55 | 44,79 | 32 | -8 | В; 120; 11 |

Рисунки 4–6 показывают, что влияние каждой дамбы в отдельности на затопление территории невелико и, как правило, локализовано ее ближайшей окрестностью. В ряде случаев наблюдаются удаленные и разнонаправленные эффекты. Так, для $Q \leq 17\,000 \text{ м}^3/\text{с}$ (рис. 4) сколько-нибудь заметное изменение площади затопления наблюдается в зоне 18 для дамбы № 1 и в зонах 18, 46 для дамбы № 3. Для $Q \leq 23\,000 \text{ м}^3/\text{с}$ (рис. 5) заметное влияние оказывают дамбы 2, 5, 7. При этом дамба 5 вносит положительный, дамба 7 — отрицательный эффект, а дамба 2 дает оба эффекта в различных зонах.

При моделировании влияния паводковых дамб в руслах рек Волги и Ахтубы варьировались места их расположения и типы плотин (рис. 6). Дамба № 1 в русле р. Волги расположена выше, а в русле р. Ахтубы — ниже дамбы № 2. Приведенные на рисунках 7–9 результаты численного моделирования для $Q \leq 25\,000 \text{ м}^3/\text{с}$ демонстрируют практическое отсутствие позитивного влияния всех дамб на увеличение интегральных характеристик паводковых затоплений.

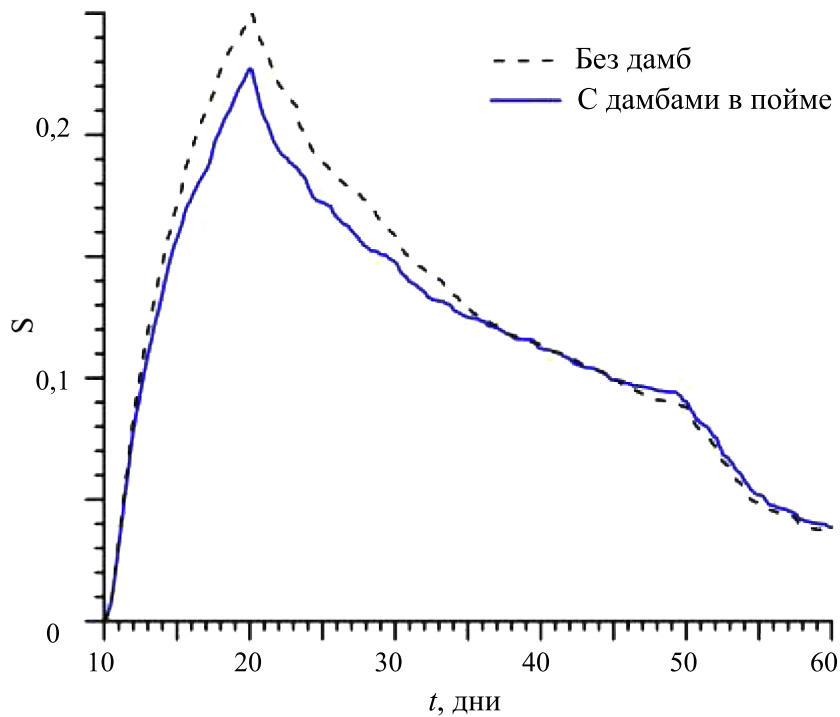


Рис. 2. Влияние всех дамб на динамику паводкового затопления для $h = 2$ м и $Q = 25\,000$ м³/с

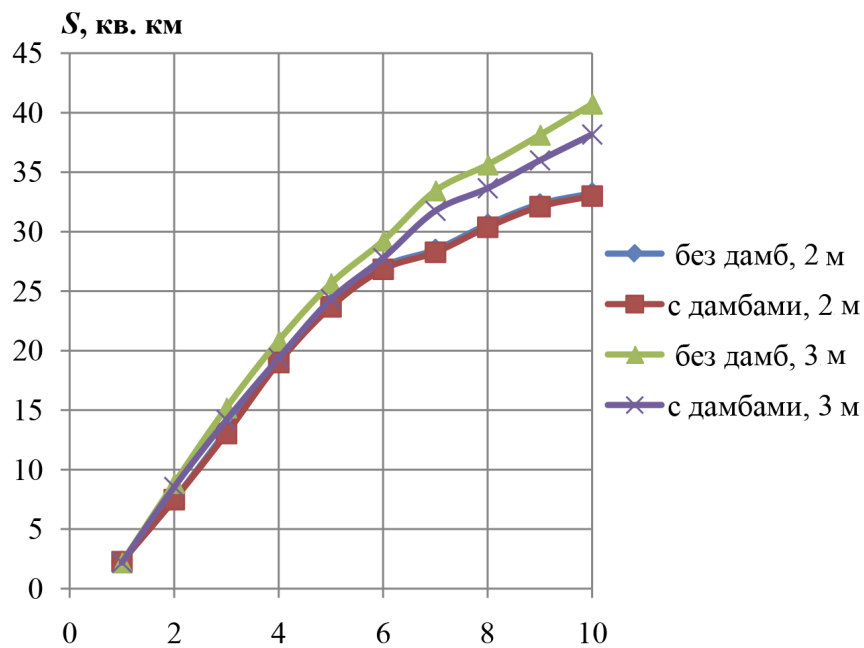


Рис. 3. Влияние всех дамб на динамику площади паводкового затопления для глубин русел $h = 2$ м; 3 м и расхода гидрографа $Q = 17\,000$ м³/с

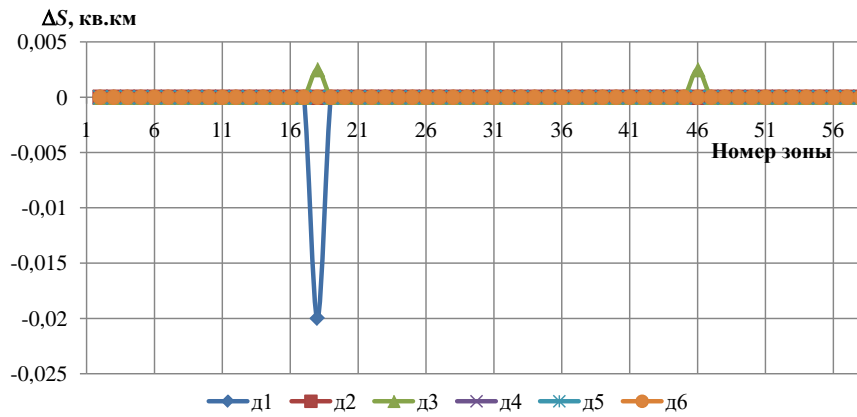


Рис. 4. Прирост/убыль площади затопления при установке дамб для $Q = 17000 \text{ м}^3/\text{с}$ и $t = 10$ суток

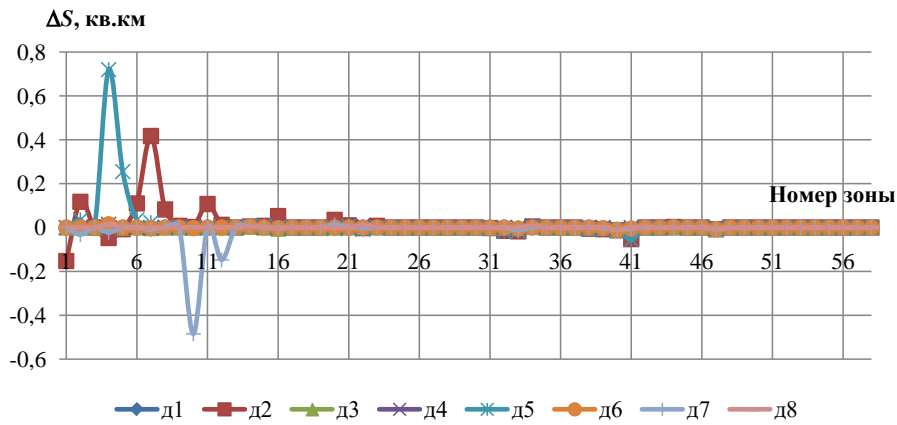


Рис. 5. Прирост/убыль площади затопления при установке дамб для $Q = 23000 \text{ м}^3/\text{с}$ и $t = 10$ суток

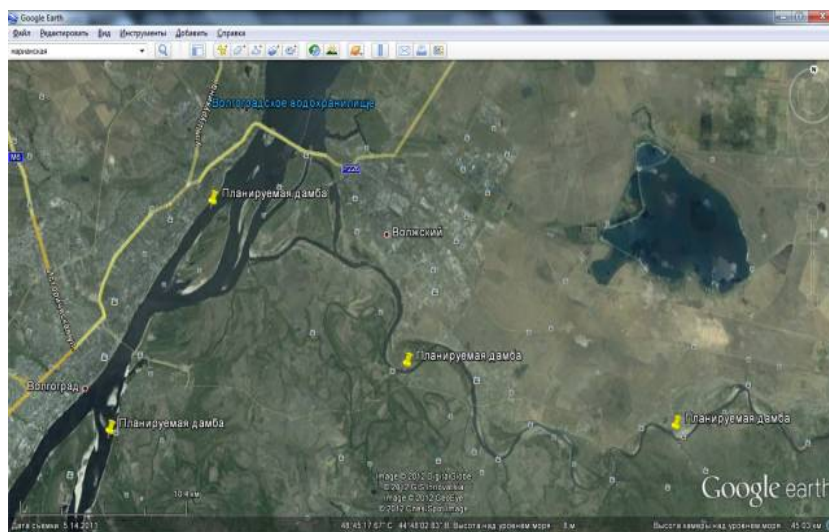


Рис. 6. Возможные места установки плотин в руслах рек Волги и Ахтубы

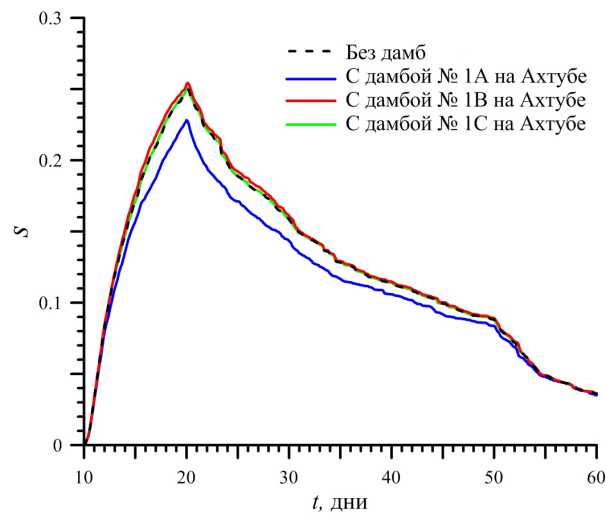


Рис. 7. Влияние типа дамбы № 1 на р. Ахтубе на паводковую динамику ВАП

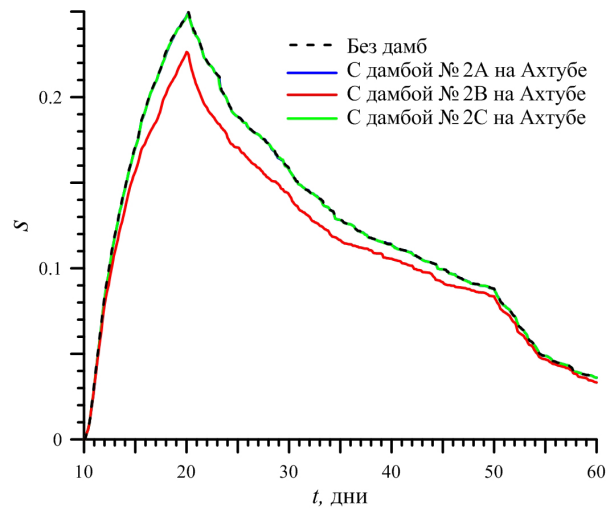


Рис. 8. Влияние типа дамбы № 2 на р. Ахтубе на паводковую динамику ВАП

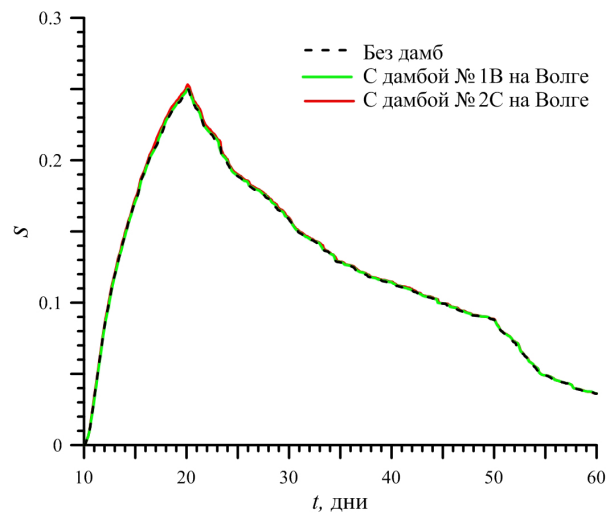


Рис. 9. Влияние дамб на р. Волге на паводковую динамику ВАП

ПРИМЕЧАНИЕ

¹ Работа выполнена при поддержке грантов РГНФ (проекты № 14-12-34019, № 13-01-12015в) и РФФИ (проекты № 14-07-97030, № 15-45-02655, № 14-07-31303, № 16-48-340147).

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. Бурков, В. Н. Механизмы управления эколого-экономическими системами / В. Н. Бурков, Д. А. Новиков, А. В. Щепкин. — М. : Издательство физико-математической литературы, 2008. — 244 с.
3. 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.
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. Задача управления гидрологическим режимом в эколого-экономической системе «Волжская ГЭС — Волго-Ахтубинская пойма». Ч. 2. Синтез системы управления / А. А. Воронин, М. В. Елисеева, С. С. Храпов, А. В. Писарев, А. В. Хоперсков // Проблемы управления. — 2012. — № 6. — С. 19–25.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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. — № 1 (16). — С. 43–47.
10. Проектирование системы эколого-экономического управления территорией Волго-Ахтубинской поймы на основе гидродинамического и геоинформационного моделирования / А. А. Воронин, А. А. Васильченко, М. В. Писарева, А. В. Писарев, А. В. Хоперсков, С. С. Храпов, Ю. Е. Подщипкова // Управление большими системами. — 2015. — Вып. 55. — С. 79–102.
11. Численная схема для моделирования динамики поверхностных вод на основе комбинированного SPH-TVD-подхода / С. С. Храпов, А. В. Хоперсков, Н. М. Кузьмин, А. В. Писарев, И. А. Кобелев // Вычислительные методы и программирование. — 2011. — Т. 12, № 1. — С. 282–297.

REFERENCES

1. 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 Ecological-Economic System of «Volga HPP and Volga-Akhtuba Floodplain»]. *Upravlenie bolshimi sistemami*, 2014, iss. 52, pp. 133-147.

2. Burkov V.N., Novikov D.A., Shchepkin A.V. *Mekhanizmy upravleniya ekologo-ekonomicheskimi sistemami* [Control Mechanisms of Ecological and Economic Systems]. Moscow, Izdatelstvo fiziko-matematicheskoy literatury Publ., 2008. 244 p.

3. 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.

4. 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 Ecological-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.

5. Voronin A.A., Eliseeva M.V., Khrapov S.S., Pisarev A.V., Khoperskov A.V. *Zadacha upravleniya gidrologicheskim rezhimom v ekologo-ekonomicheskoy sisteme «Volzhskaya GES – Volgo-Akhtubinskaya poyma»*. Ch. 2. Sintez sistemy upravleniya [The Regimen Control Task in the Eco-Economic System «Volzhskaya Hydroelectric Power Station – the Volga-Akhtuba Floodplain». II. Synthesis of Control System]. *Problemy upravleniya* [Control sciences], 2012, no. 6, pp. 19-25.

6. 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.

7. 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.

8. 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: Influence of Local Relief]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii*, 2012, no. 3, pp. 54-62.

9. 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, no. 1 (16), pp. 43-47.

10. 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 territoriy Volgo-Akhtubinskoy poymy na osnove gidrodinamicheskogo i geoinformatsionnogo modelirovaniya* [Designing a System for Ecological-Economical Management of the Volga-Akhtuba Floodplain on Basis of Hydrodynamic and Geoinformational Simulation]. *Upravlenie bolshimi sistemami*, 2015, iss. 55, pp. 79-102.

11. 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.

**DESIGNING MECHANISMS OF THE HYDROLOGICAL REGIME MANAGEMENT
OF THE VOLGA-AKHTUBA FLOODPLAIN BASED
ON GEOINFORMATION AND HYDRODYNAMIC MODELING**

Alexander Aleksandrovich Voronin

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

Anna Anatolyevna Vasilchenko

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

Andrey Vladimirovich Pisarev

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,
Department of Information Systems and Computer Modeling,
Volgograd State University
andrew.pisarev@gmail.com, infomod@volsu.ru
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Sergey Sergeevich Khrapov

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,
Department of Information Systems and Computer Modeling,
Volgograd State University
xss-ip@mail.ru, infomod@volsu.ru
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Yuliya Evgenyevna Radchenko

Student, Department of Fundamental Informatics and Optimal Control,
Volgograd State University
podschipkova1993@mail.ru, fiou@volsu.ru
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Abstract. This paper describes the structure and game-theoretic and hydraulic-technical control mechanisms of the hydrological regime of the WPA, which aim to increase the efficiency of flood waters to flood the territory. The basis of the study is a previously created digital elevation model and a hydrodynamic model of the dynamics of flood waters.

There are several mechanisms of ecological and economic management of the territory of the economic entities, reducing their negative impact on the ecosystem of the floodplain. Methods of geoinformation and hydrodynamic modeling are described to study the effect of possible flood of dams on the rivers

Volga and Akhtuba and existing irrigation dams in riverbeds flood levees on the dynamics and size of the area of flooding. It is shown that the construction of flood embankments will not have a significant effect on the dynamics and size of the area of flood inundation, and the total negative contribution of existing irrigation dams is a few percent. The influence of each of the local dam on the flood dynamics is shown. Areas of high and low sensitivity to the dynamics of flood levees existence are found.

Key words: hydrological mode, hydrology, management mechanisms, digital elevation model, hydrodynamic model, Volga-Akhtuba floodplain.