

На правах рукописи

Писарев Андрей Владимирович

**ДИНАМИКА ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД
НА ТЕРРИТОРИИ ВОЛГО-АХТУБИНСКОЙ
ПОЙМЫ
НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Специальность 01.02.05 — Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Волгоград — 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Волгоградский государственный университет».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Хоперсков Александр Валентинович.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Чикин Алексей Львович,
главный научный сотрудник отдела гидрологии
и гидрохимии, ФГБУН Институт аридных зон
Южного научного центра РАН;

доктор технических наук, доцент
Афанасьев Анатолий Михайлович,
профессор кафедры информационной
безопасности ФГАОУ ВПО «Волгоградский
государственный университет».

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный
университет»(НИУ), г. Челябинск.

Защита состоится *17 мая* 2013 г. в *14⁰⁰* часов на заседании диссертационного совета Д 212.029.08 при ФГАОУ ВПО «Волгоградский государственный университет»: 400062, г. Волгоград, пр-т Университетский, 100, ауд. 2-05В.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГАОУ ВПО «Волгоградский государственный университет».

Автореферат разослан « ____ » _____ 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук

В.А. Михайлова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Современный уровень развития вычислительной гидродинамики, вычислительных технологий, параллельных технологий, методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) позволяет ставить и успешно решать задачи исследования динамики поверхностных вод с учетом реалистичного рельефа и наиболее существенных физических факторов для больших территорий.

Для решения широкого круга практически важных проблем, связанных с гидрологией суши, актуальной задачей является создание инструментов для моделирования динамики поверхностных вод с учетом реальных физических условий [5]. Разработка таких моделей актуальна для исследований формирования поверхностных волн и цунами под действием оползней, особенностей распространения волн цунами и наката длинных волн на берег, прогноза динамики волн прорыва плотин, формирования стока под влиянием осадков на водосборах, особенностей взаимодействия руслового и пойменного потоков, взаимодействия грунтовых и поверхностных вод [9].

Модели, основанные на уравнениях мелкой воды, активно используются для решения самых различных задач динамики поверхностных вод. Предложены их различные модификации, связанные с учетом адвективного переноса, многослойными моделями, обобщениями без приближения гидростатического равновесия, допускающие эффективную численную реализацию [2]. Строго говоря, при переходе от полной трехмерной системы уравнений гидродинамики к уравнениям мелкой воды следует ограничиваться достаточно длинноволновыми движениями. Однако в ряде случаев даже боры и гидравлические прыжки удовлетворительно описываются условиями на разрыве, вытекающими из модели мелкой воды, что отмечалось еще в [10]. Этот вывод подкрепляется сравнительным анализом результатов численных расчетов в модели мелкой воды с данными натурных экспериментов [3].

В рамках крупномасштабных моделей изучаются различного рода глобальные циркуляции, изменчивость уровня поверхности воды, динамика солености и ледяных заторов, структура течений в водохранилищах и равнинных реках.

Использование уравнений Сен-Венана не ограничивается описанием тонкого слоя несжимаемой жидкости. С большим успехом модель мелкой воды применяется для изучения динамики вихревых структур в атмосферах планет, движения в вязкоэластичной трубке, астрофизических дисков. Уравнения мелкой воды лежат в основе ряда моделей при изучении адвекции и диффузии загрязняющих веществ на мелководье [8]. В рамках модифицированных моделей мелкой воды рассматриваются многофазные течения и

вращающаяся жидкость. Популярными остаются модели динамики тайфунов.

Существование природного ландшафта Волго-Ахтубинской поймы (ВАП) обусловлено весенним паводком (май — июнь). За счет увеличения объема воды, поступающего из Волги в Ахтубу, а затем через систему ериков и протоков вода заливает существенную часть низменных областей ВАП. Приток воды в пойму непосредственно из Волги незначителен. А роль таяния снегов в формировании поверхностных вод к началу поступления воды в пойму пренебрежимо мала. В условиях зарегулированности Волги весенний паводок в ВАП полностью определяется попуском воды через створ плотины Волжской ГЭС, объем воды, проходящий за единицу времени, принято называть гидрографом $Q(t)$ [1]. Отметим экологическую катастрофу 2006 г. в ВАП, сильное сокращение объема и продолжительности паводка (вместо 120 млн. кубометров воды в паводок через плотину прошло в два раза меньше) привело к осушению 90 % водных объектов.

Важнейшей проблемой на пути сохранения уникального ландшафта ВАП и разумного использования этой территории представляется построение оптимального гидрографа, обеспечивающего баланс интересов большого числа заинтересованных сторон. Для решения задачи оптимизации и управления гидрологическим режимом поймы необходимы модели динамики поверхностных вод на территории ВАП. Такого рода модели являются достаточно сложными, включают свободные параметры при описании физических и метеорологических факторов.

Для адекватного описания динамики поверхностных вод необходима модель рельефа территории, включающая речное дно и систему ериков-протоков. К числу важнейших факторов, влияющих на характер течения, следует отнести различного рода гидротехнические сооружения и режимы их работы. Для многих крупных зарубежных водотоков, являющихся во многом уникальными объектами, имеются многочисленные исследования гидродинамических режимов на основе численных моделей, разработанных разными авторами. Отметим, в качестве примеров модели рек или их участков: Янцзы, Хуанхэ, Миссисипи, Рейна [4]. Модели водных и, в частности, речных систем на территории РФ немногочисленны. Для Нижней Волги опубликована 1D-модель [1], известны также результаты расчетов для Чебоксарского водохранилища [6], для ВАП такого рода исследования проводились только в одномерном приближении [7].

Цель работы — исследование особенностей динамики поверхностных вод на территории Волго-Ахтубинской поймы с использованием методов численного гидродинамического моделирования и создание инструмента для прогноза и управления гидрологическим режимом в пойме.

Достижение поставленной цели предусматривает решение следующих основных задач:

1. Построить численную нестационарную гидродинамическую модель течения воды с учетом следующих основных факторов: реалистичного рельефа земной поверхности для северной части ВАП, нестационарного гидрографа через плотину Волжской ГЭС, вращения Земли, взаимодействия потока воды с подстилающей поверхностью, испарения, инфильтрации.
2. Провести тестирование новой численной схемы cSPH-TVD (combined SPH-TVD) для решения уравнений мелкой воды.
3. Построить актуализированный цифровой рельеф местности высокой точности.
4. Рассчитать значения коэффициента шероховатости для русла Волги в условиях весеннего паводка.
5. Изучить особенности прохождения воды по пойме во время сезонных затоплений в зависимости от физических факторов.
6. Разработать метод построения оптимального гидрографа.

Научная новизна работы.

1. Впервые построены численные модели нестационарных двумерных гидродинамических течений для Волго-Ахтубинской поймы с учетом основных физических факторов.
2. Создана актуальная цифровая модель рельефа северной части Волго-Ахтубинской поймы с применением геоинформационных технологий, данных спутникового дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ); выполнена актуализация береговых линий водоемов по данным GPS-измерений.
3. Проведена параметризация коэффициента шероховатости, объясняющая данные наблюдений за гидрологическим режимом Волги в период весеннего попуска воды, что позволило получить оценки коэффициента Маннинга. Показано, что модель с постоянным значением коэффициента шероховатости в русле Волги не может быть согласована с данными наблюдений за уровнем воды на гидропостах.
4. Продемонстрирована возможность решения задачи оптимизации гидрографа для Волжской ГЭС на основе численных расчетов и приближенных аналитических решений.

Достоверность результатов и выводов работы определяется применением численных методов, обеспечивающих выполнение основных физических законов сохранения, совпадением результатов расчетов с имеющимся аналитическим решениями. Математические модели, лежащие в основе диссертационной работы, широко используются в научной практике. На достоверность численных результатов указывает согласие с многолетними данными гидрологических наблюдений.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Гидродинамическая модель сезонных затоплений Волго-Ахтубинской поймы в зависимости от гидрографа и физических условий.

2. Метод построения цифровой модели рельефа местности на основе синтеза данных дистанционного зондирования Земли, топографических данных и актуализации с использованием гидрологического мониторинга, основанного на GPS-измерениях береговых линий во время затоплений. Цифровая модель северной части Волго-Ахтубинской поймы как основа гидродинамической модели.

3. Модель для коэффициента шероховатости Маннинга и оценки коэффициента Маннинга для русла Волги, основанные на сравнении результатов гидродинамических расчетов с данными наблюдений на гидропостах. Модель с постоянным коэффициентом шероховатости не дает количественного согласия с наблюдаемыми паводковыми событиями. Учет зависимости параметра Маннинга от глубины воды позволяет объяснить наблюдаемые уровни воды.

4. Метод построения оптимального гидрографа для плотины Волжской ГЭС. Решение оптимизационной задачи на множестве безопасных рыбохозяйственных гидрографов и аналитической аппроксимации площадей затопления.

Научно-практическая ценность работы заключена в разработке модели динамики поверхностных вод, позволяющей решать широкий круг различных гидродинамических задач для произвольной территории. Модель дает возможность строить прогноз затопления территории Волго-Ахтубинской поймы для заданного гидрографа в конкретных условиях данного года, связанных с физико-метеорологическими особенностями, решать задачу об оптимальном гидрографе, обеспечивающем баланс интересов различных субъектов природопользования (энергетика, рыбное хозяйство, природоохранные организации, сельхозпроизводители, рекреационная деятельность, безопасность территории и др.), проводить техническую экспертизу изменений гидрологического режима при проектировании гидросооружений (насыпи, дамбы, шлюзы, мосты, каналы) и других изменений поверхности местности (дороги, трубопроводы, выравнивание и распашка земли и др.), прогнозировать последствия развития аварийных или катастрофических событий (разрушение технических сооружений, сильные осадки, быстрое таяние снежного покрова).

Представленные к защите положения диссертации поддержаны грантами РФФИ 11-07-97025-р_поволжье а, 10-07-97017-р_поволжье а. Материалы диссертационного исследования включены в отчеты по Государственным

контрактам Министерства образования и науки РФ (Федеральная целевая программа «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009 – 2013 гг.» № 14.В37.21.028, Федеральная целевая программа «Старт» № 11-3-Н1.4-0566), Госзадания высшим учебным заведениям № 8.2419.2011 «Системы мониторинга, диагностики и управления в экологии и медицине на основе информационных технологий и компьютерного моделирования».

В учебном процессе результаты работы используются в курсовом и дипломном проектировании студентов ВолГУ, в дисциплинах «Вычислительные системы», «Компьютерные технологии в экологии и природопользовании», «Моделирование пространственных данных».

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались на XXV Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» (Волгоград, Саратов, Харьков, 28 – 30 мая 2012 г.), X Международной научно-практической конференции «Современные сложные системы управления» (НТCS'2012) (Старый Оскол, 9 – 10 апреля 2012 г.), Международной конференции ИнтерКарто/ИнтерГИС 18 (Смоленск, Сен-Дье-Вож (Франция), 26 июня – 4 июля 2012 г.), Международной конференции Интеркарто/ИнтерГИС 17 (Барнаул, Денпасар (Индонезия), 14 – 19 декабря 2011 г.), Международной конференции ИнтерКарто/ИнтерГИС 16 (Ростов-на-Дону, Зальцбург (Австрия), 3 – 4 июля 2010 г.), XVII Всероссийской научно-методической конференции «Телематика'2010» (Санкт-Петербург, 21 – 24 июня 2010 г.), Региональной научно-практической конференции «Экономическая модернизация: макро-, мезо- и микроуровни. Проблемы и перспективы устойчивого развития региона» (Волжский, 9 ноября 2010 г.), II научно-практической конференции «Актуальные проблемы современной физики» (Элиста, 2010 г.), Международной конференции ИнтерКарто/ИнтерГИС 15 (Пермь, Гент (Бельгия), 29 июня – 5 июля 2009 г.).

Публикации и личный вклад автора. По теме диссертации опубликована 21 работа. Из них 6 — в рецензируемых научных журналах из списка ВАК РФ. Имеется 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ по теме исследования. Во всех работах автор проводил численные расчеты и их обработку. Диссертанту принадлежит построение цифровой модели рельефа и его актуализация. Автор принимал непосредственное участие в разработке и тестировании математических моделей динамики поверхностных вод, а также обсуждениях полученных результатов. Была проведена статистическая обработка данных гидрологического мониторинга в период 2006 — 2012 гг., определены параметры, влияющие на затопление Волго-Ахтубинской поймы и водообеспеченность рукава Ахтуба.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав,

заклучения, списка литературы. Общий объем диссертации составляет 144 страницы, включая 58 рисунков. Общий список литературы содержит 194 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность выбранной темы, указаны цели работы, изложено краткое содержание диссертации, отмечена научная новизна и сформулированы положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** построена модель динамики поверхностных вод на основе укороченных уравнений гидродинамики.

В § 1.1 описана математическая модель динамики мелкой воды, основанная на системе уравнений:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} = \sigma, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(Hu)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(Hu^2 + g_0 \frac{H^2}{2} \right) + \frac{\partial(Huv)}{\partial y} = -\lambda \frac{H}{2} u \sqrt{u^2 + v^2} - g_0 H \frac{\partial b}{\partial x} + f_x^{(Cor)}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(Hv)}{\partial t} + \frac{\partial(Hvu)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(Hv^2 + g_0 \frac{H^2}{2} \right) = -\lambda \frac{H}{2} v \sqrt{u^2 + v^2} - g_0 H \frac{\partial b}{\partial y} + f_y^{(Cor)}, \quad (3)$$

где u , v — компоненты вектора скорости \mathbf{v} , H — толщина слоя жидкости, $\sigma(x, y, t) = \sigma^{(+)} - \sigma^{(-)}$ — функция источников/стоков, $g_0 = 9.8 \text{ м/с}^2$, $\eta = H + b$ — уровень свободной поверхности воды, $b(x, y)$ — функция дна, $f_x^{(Cor)} = -2\Omega_z v$ и $f_y^{(Cor)} = 2\Omega_z u$ — компоненты силы Кориолиса, Ω_z — вертикальная компонента угловой скорости вращения Земли на соответствующей широте, величина гидравлического трения $\lambda = 2g_0 n_M^2 / H^{4/3}$ зависит от коэффициента трения по Маннингу n_M . Потери воды с единицы поверхности $\sigma^{(-)} = \sigma^{(e)} + \sigma^{(in)}$ определяются скоростями испарения $\sigma^{(e)}$ и инфильтрации $\sigma^{(in)}$. Величина $\sigma^{(e)}$ в общем случае зависит от температурного и ветрового режимов, влажности воздуха, конвективного состояния атмосферы.

В § 1.2 представлена численная реализация уравнений Сен-Венана (1)–(3). Особые требования к численным моделям предъявляют задачи, связанные с гидродинамикой существенно нестационарных поверхностных вод (паводковые воды, разливы рек, различного рода затопления), поскольку они требуют детального учета рельефа как на крупных масштабах (десятки километров), так и на мелких, с разрешением существенно лучше километра (до $\sim 20 \text{ м}$ с учетом точности рельефа местности по данным дистанционного зондирования). Основная проблема при проведении такого рода расчетов связана с необходимостью корректного описания динамики многочисленных

движущихся фронтов раздела между жидкостью и сухим дном на сложном нерегулярном рельефе.

Для эффективного решения системы уравнений (1)–(3) построена численная схема cSPH–TVD (combined SPH–TVD), обладающая следующими свойствами: консервативность; хорошая сбалансированность (well-balanced); второй порядок аппроксимации по временной и пространственным координатам; сквозной устойчивый расчет динамической границы «жидкость – сухое дно» при наличии неструктурированных мелкомасштабных неоднородностей у функции дна $b(x, y)$.

В § 1.3 предъявлены результаты тестовых численных расчетов. Эти тесты можно разделить на три группы: 1) одномерные расчеты на плоском дне ($b = const$); 2) одномерные модели на гладком неоднородном дне и на дне, содержащем разрывы и изломы; 3) двумерная модель на сложном нерегулярном дне.

В § 1.4 обсуждается возможность применения алгоритма cSPH-TVD для моделирования течений с большим числом нестационарных границ раздела типа «вода – сухое дно». Рассматривается распад циркулярной дамбы на нерегулярном рельефе, где в качестве модели дна $b(x, y)$ используется участок рельефа местности Волго-Ахтубинской поймы. Результаты численных расчетов с использованием описанных методов, основанных на использовании SPH и TVD подходов свидетельствуют о его эффективности и адекватности при моделировании сложных течений на неоднородном рельефе дна.

Во **второй главе** описаны методы построения цифровой модели (ЦМР) Волго-Ахтубинской поймы с использованием различных источников высотных данных и актуализации ЦМР на основе гидрологического мониторинга.

Ключевым фактором, оказывающим влияние на качество гидродинамического расчета, является функция рельефа $b(x, y)$, играющая ту же роль, что и потенциал для динамики газа при наличии внешних сил (см. слагаемые вида $\partial b/\partial x$, $\partial b/\partial y$ в (2), (3)). В численной модели для построения сеточной функции $b_{i,j} = b(x_i, y_j)$ использовались данные дистанционного зондирования Земли, лоции и собственные данные GPS-измерений. Основой функции рельефа служат спутниковые данные ASTER и SRTM, способные обеспечить разрешение до 20 м в плоскости Земли и до 0.5 м по вертикали. Модель речного дна строилась по данным лоций. На основе GPS-измерений береговых линий во время затопления, в ВАП был актуализирован рельеф в критических зонах — протоках и прилегающих областях, через которые происходит поступление воды в равнинную часть поймы во время весеннего пуща. Ерики непосредственно соединены с Волгой и Ахтубой, а под протоками будем понимать русловые выходы из ериков.

Выделим основные этапы, необходимые для построения цифровой модели



Рис. 1. Общий вид гидросистемы Волго-Ахтубинской поймы на территории Волгоградской области

рельефа северной части ВАП (рис. 1): 1) Создание векторной карты рельефа ВАП по спутниковым данным ДЗ SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) и ASTER GDEM (Global Digital Elevation Model) в качестве топоосновы (§ 2.1). 2) Векторизация данных космических снимков Земли очень высокого разрешения. Нанесение точечных, линейных и площадных объектов (ерики, протоки, озера, населенные пункты, дороги, леса и др.) (§ 2.2). 3) Присвоение векторизованным пространственным объектам высотных характеристик. 4) Построение векторной карты гидрологической системы крупных водотоков (Волга и Ахтуба) с использованием топографических и лоцманских карт (§ 2.3). 5) Построение цифровой модели рельефа (ЦМР) посредством объединения всех имеющихся векторных карт (рельефа, объектов, русел) в единую карту (§ 2.4). 6) Актуализация ЦМР местности ВАП с использованием гидрологического мониторинга и GPS/ГЛОНАСС измерений (§ 2.5). Уточнения координат береговых линий при помощи GPS-измерений и аэрофотосъемки позволили по границе «вода—суша» построить дополнительные изолинии рельефа. Во время паводкового периода с гидрографом $Q(t)$ изменения областей затопления происходят достаточно медленно, позволяя принимать для линий $b(x, y) = const$ границы воды.

Созданная цифровая модель северного участка Волго-Ахтубинской пой-

мы включает 16420 объектов. Для построения гидрологической сети ВАП использовалось 1735 объектов (из них 250 объектов общей протяженностью 885 км соответствуют ерикам).

В **третьей главе** описаны результаты расчетов затопления ВАП в реальных условиях.

В § 3.1 описаны особенности гидрологического режима ВАП, зависящие от режима попуска воды через Волжскую ГЭС. Для гидрографов $Q(t)$ ряда лет (рис. 2) показано наличие двух критических значений параметра Q_{\max} , согласующихся с данными наблюдений за гидрологическим режимом поймы. Уровень $Q_{\max} < 20$ тыс. м³/с при современном состоянии рельефа не позволяет проникнуть воде в пойму (заполняются только основные ерики). При значениях $Q_{\max} > 30$ тыс. м³/с имеем чрезвычайно сильное затопление, существенно ограничивающее хозяйственную деятельность (сельское и дачное хозяйство, строительство, проживание). В § 3.2 проводится исследование влияния начальных и граничных условий на результаты численных расчетов.

Используя данные дистанционного зондирования Земли о распределении вегетативного индекса растительности NDVI в § 3.3 рассмотрено влияние инфильтрации и испарения σ на паводковые явления, происходящие в Волго-Ахтубинской пойме. Учет потерь воды качественно изменяет характер затопления, быстро уменьшая площадь, занятую водой, после снижения величины $Q(t)$. Результаты согласования расчетов затопления при различных σ с данными по индексу NDVI дают оценки потерь воды в пойме $\sigma \simeq 3 \div 7$ см/сут.

В § 3.4 исследуется устойчивость гидрологического режима в ВАП по отношению к мелкомасштабным изменениям высотных характеристик ЦМР. Построены серии ЦМР, содержащие небольшие отклонения от базовой функции $b(x, y)$. Анализ результатов расчетов с различными ЦМР показал, что изменения рельефа в равнинной части ВАП, не затрагивающие русел ериков и протоков, не способны существенно повлиять на характер весеннего затопления (рис. 3). Если при построении ЦМР случайным образом изменять и русла гидросистемы (метод Random), то площадь затопления изменяется

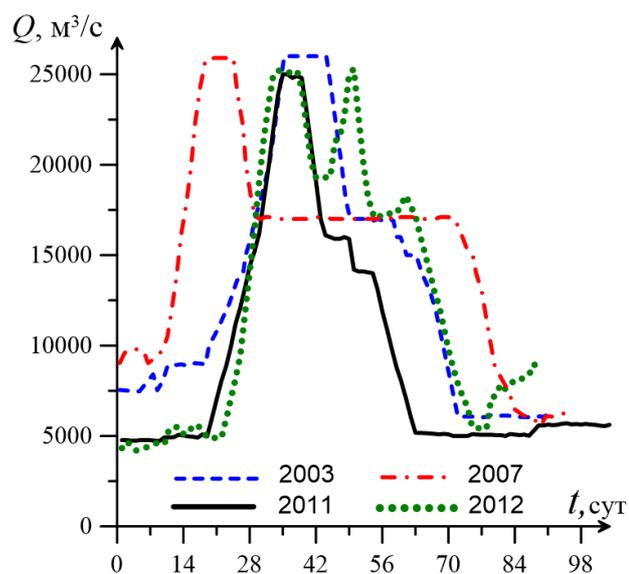


Рис. 2. Примеры гидрографов Волжского гидроузла для ряда лет

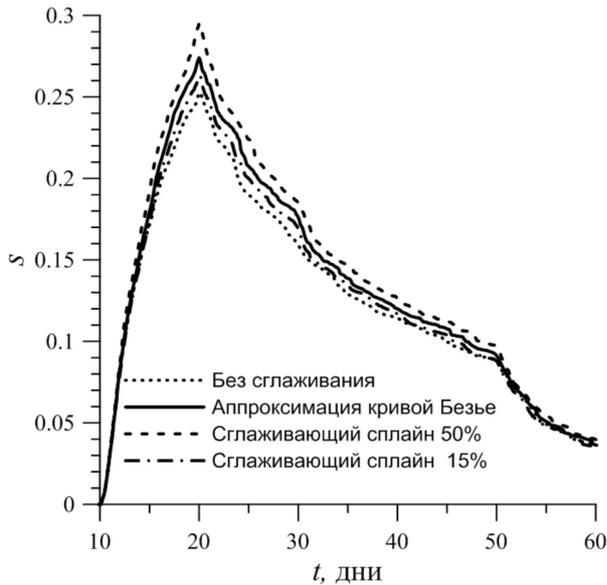


Рис. 3. Зависимости $S(t)$ для серий ЦМР, построенных на основе сглаживания

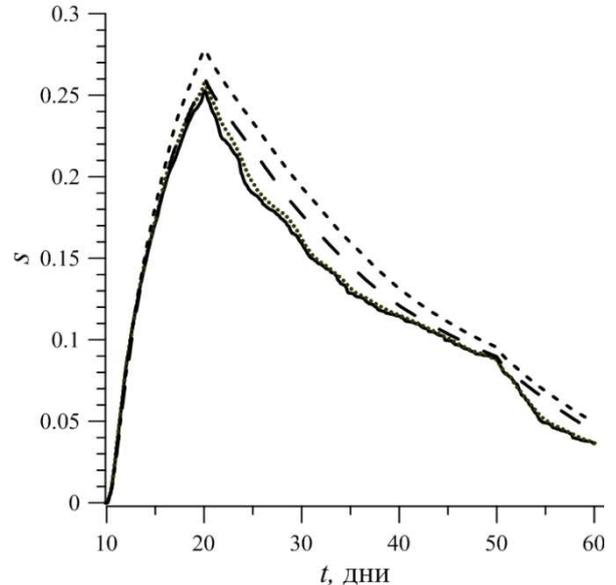


Рис. 4. Зависимости $S(t)$ для серий ЦМР с использованием метода Random

сильнее(рис. 4), увеличиваясь за счет появления большого числа дополнительных протоков и увеличения степени ветвления русел гидросистемы.

Более точным методом сравнения расчетных результатов с данными наблюдений является использование динамики уровней воды на стационарных гидропостах во время весеннего попуска воды $\eta^{(m)}(t)$, $m = 1, 2, 3$. В настоящее время на Нижней Волге действует наблюдательная сеть Росгидромета, включающая 3 гидрологических поста (ГП) в пределах территории северного участка ВАП (рис. 1), для которых имеются многолетние данные наблюдений: 1) ГП Нижний Бьеф Волгоградского гидроузла ($m = 1$); 2) ГП Волгоград в районе Речного порта ($m = 2$); 3) ГП Светлый Яр ($m = 3$).

В § 3.5 получены оценки коэффициента шероховатости в модели Маннинга посредством количественного согласования расчетов уровня воды $\eta^{(m)}(t)$ с рядами наблюдений на гидропостах $\eta^{(m)}(t)$ для гидрографа $Q(t)$ различных сезонов. Использование моделей с постоянным коэффициентом n_M не позволило объяснить наблюдаемые зависимости уровней воды на гидропостах $\eta^{(m)}(t)$ одновременно в межень и паводок. В межень коэффициент шероховатости оказывается близким к $n_M(t) \simeq 0.02$.

Вывод о неприменимости модели с $n_M = \text{const}$ во время паводка поставил задачу параметризации модели коэффициента шероховатости $n_M(t)$. В работе ограничились предположением о зависимости n_M от глубины воды. Такой подход эффективно учитывает увеличение гидрологического сопротивления из-за расширения русла (появление пойменных участков), перестройки донной структуры во время паводка, усиления турбулентности течения на существенно нестационарной стадии попуска воды через плотину ГЭС. Построена зависимость $n_M(x, y, t) = n_M^{\min} + \gamma \Delta\eta$, где $\Delta\eta(x, y, t)$ — превышение уровня

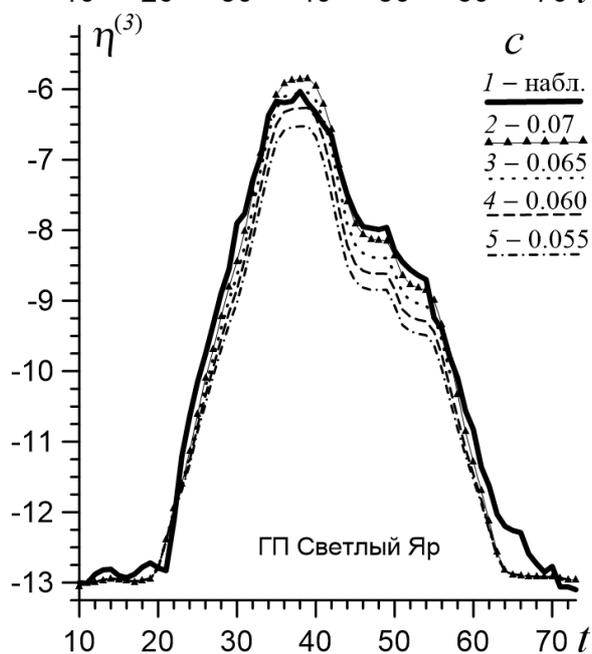
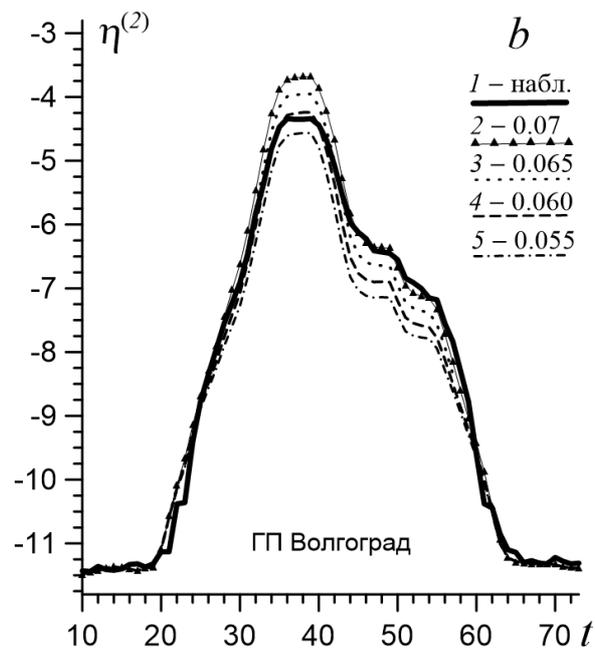
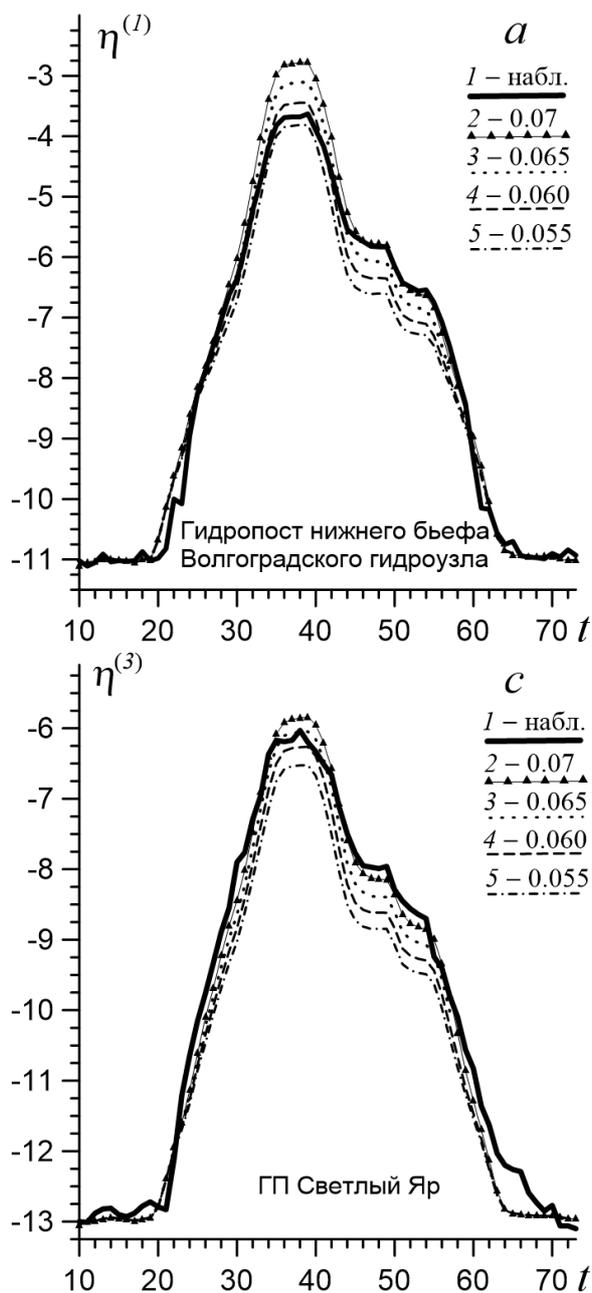


Рис. 5. Сравнение уровней воды по данным наблюдений на гидропостах с расчетами в модели с параметризованным коэффициентом шероховатости $n_M(t)$ для различных значений n_M^{\max} для условий паводка 2011 г. Показаны кривые: 1 – $\eta_{obs}^{(m)}$, 2 – $n_M^{\max} = 0.07$, 3 – $n_M^{\max} = 0.065$, 4 – $n_M^{\max} = 0.06$, 5 – $n_M^{\max} = 0.055$

воды в каждой ячейке расчетной области по сравнению с меженным значением. Коэффициент γ для заданного гидрографа $Q(t)$ определяет значение n_M^{\max} . Получено, что максимальные значения коэффициента шероховатости во время паводка могут достигать значений $n_M^{\max} \simeq 0.07$ (см. рис. 5).

Четвертая глава посвящена решению задачи построения оптимального гидрографа. Рассмотрены практические аспекты использования численной модели для описания паводковых ситуаций в Волго-Ахтубинской пойме. Исследованы подходы к решению экологических проблем Волго-Ахтубинской поймы, связанных с зарегулированностью стока реки Волга в створе плотины Волжской ГЭС. Предложена модель оптимального управления режимом попуска воды через плотину, основанная на гидродинамических расчетах. Разработана методика выбора оптимального гидрографа, удовлетворяюще-

го различным экспертным ограничениям.

В § 4.1 проведены оценки динамики интегральных характеристик затопления поймы:

$$S(t) = \iint I(H) dx dy, \quad I(H) = \begin{cases} 1, & H \geq H_{\min} \\ 0, & H < H_{\min} \end{cases}, \quad V(t) = \iint H(x, y, t) dx dy, \quad (4)$$

где $S(t)$ — затопленная площадь, $V(t)$ — соответствующий объем воды (интегрирование ведется для заданной территории по площади, где $H > H_{\min}$). Основной интерес представляет территория ВАП $\Sigma_{VAP} = 741 \text{ км}^2$ за вычетом русел Волги и Ахтубы. Перед началом весеннего попуска воды без учета талых вод площадь S_{VAP} , занятая водой на территории Σ_{VAP} , не превышает 1 % ($s = S_{VAP}/\Sigma_{VAP} = 0.01$).

В § 4.2 дана переходная характеристика системы для модельного гидрографа. Сделано предположение о существовании сброса Q_{\max} Волжской ГЭС, при котором достигается критическое значение относительной площади затопления s_{\max} , обусловленное безопасностью человеческой деятельности в ВАП. Второе ограничение снизу s_{\min} исходило из экологических требований, связанных с воспроизводством рыбных запасов, заполнением озер, обеспечивающих сохранность ландшафта и биоресурсов. При достижении площади затопления $s = s_{\max}$ необходим переход с сельскохозяйственной полки на рыбохозяйственную: $Q_2 < Q_{\max}$.

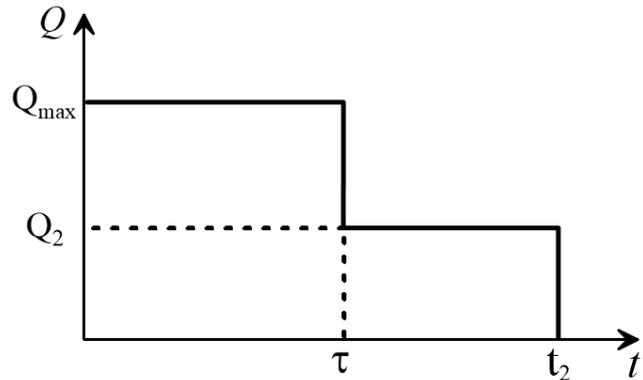


Рис. 6. Двухкаскадная модель гидрографа: этап, продолжительностью $t_2 - \tau$, соответствует «рыбохозяйственной полке» (рх); интервал, продолжительностью τ , соответствует «сельскохозяйственной полке»

В § 4.3 сформулирована задача оптимизации гидрографа. Задачу максимизации экономического критерия (уменьшить расход воды J , не допустив экологической катастрофы) на множестве безопасных рх-гидрографов можно записать в виде:

$$J = \int_{t_0}^{t_0+T} Q(t) dt \rightarrow \min, \quad \max_t Q(t) \leq Q_{\max}, \quad \max S(t) = S_{\max},$$

$$\min_t (S(t)) \geq S_{\text{рх}} (t_1 \leq t \leq t_1 + T_{\text{рх}}), \quad S(t_1) = S(t_0 + T) = S_{\text{рх}}, \quad (5)$$

где $T_{\text{рх}} = t_2 - t_1$, t_1 — время достижения площади затопления $S_{\text{рх}}$. Решение этой задачи прямым гидродинамическим моделированием достаточ-

но трудоемко, требуется большое число расчетов. Поэтому была построена аналитическая аппроксимация затопления ВАП двухкаскадным стационарным гидрографом $Q(t) = Q_1(t_0 \leq t \leq \tau - \text{фаза подъема воды})$ и $Q(t) = Q_2(\tau \leq t \leq t_0 + T - \text{фаза спуска воды})$.

В § 4.4 задача оптимизации гидрографа (5) решалась на множестве безопасных двухкаскадных гидрографов (рис. 6). Задача общей оптимизации состоит из экономически оптимального затопления территории ВАП площадью S_{\max} и экономически оптимального выполнения условий рх-режима (затопление площади $S_{\text{рх}}$ в течение времени $T_{\text{рх}}$). Для решения задачи оптимизации с целью сокращения количества гидродинамических расчетов использовалась аналитическая модель затопления, построенная по результатам гидродинамических расчетов (рис. 7 – 8).

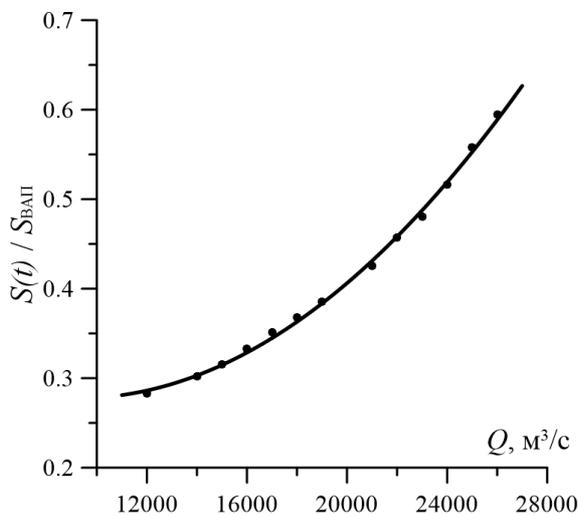


Рис. 7. Аппроксимация площади затопления поймы, построенная по результатам гидродинамического моделирования

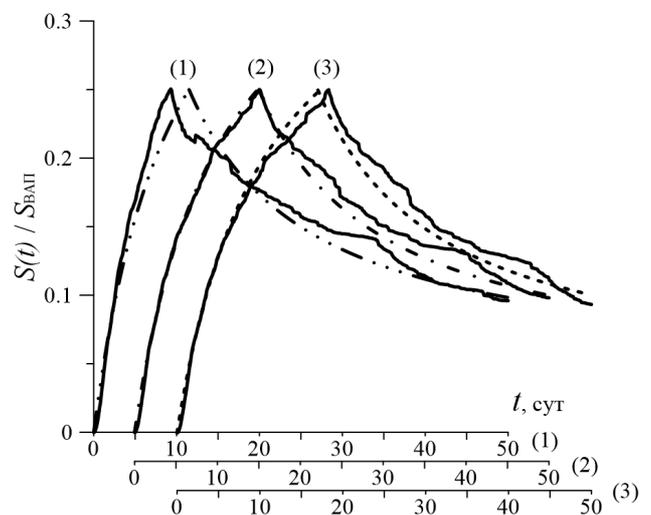


Рис. 8. Зависимость от времени площади затопленной территории ВАП для двухкаскадного гидрографа

Определены время τ , необходимое для затопления территории S_{\max} при заданном сбросе $Q_1(t)$ и значения сброса Q_2^* , необходимые для поддержания площади затопления $S_{\text{рх}}$ в течение рыбохозяйственной полки $t_2 - \tau$. Значение $Q_2^* = Q_2^*(S_{\max})$ находилось численно из краевого условия $S(t_1 + T_{\text{рх}}, Q_2, S_{\max}) = S_{\text{рх}}$.

В § 4.5 приведено решение оптимизационной задачи для параметров ВАП. Для $T_{\text{рх}} = 45$ суток, $S_{\text{рх}}/S_{\text{ВАП}} = 0.1$ и $Q_{\max} = 28$ тыс. м³/с найдены значения $\tau(S_{\max})$ и $Q_2^*(S_{\max})$ (рис. 9). Соответствующие этим функциям зависимости $J(Q_{\max}, \tau(S_{\max}), Q_2^*(S_{\max}))$, построенные численно для $S_{\text{рх}}/S_{\text{ВАП}} = \{0.05; 0.1; 0.15\}$, представлены на рис. 10. Из этих зависимостей численно определялась максимальная площадь затопления при минимальном J : $S_{\max}^* = \arg \min_{S_{\max}} (J(Q_{\max}, \tau(S_{\max}), Q_2^*(S_{\max})))$.

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы.

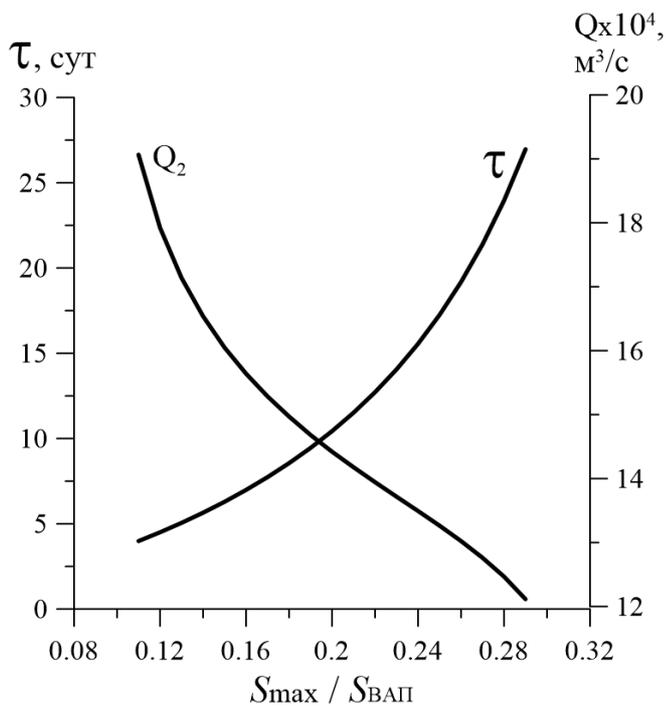


Рис. 9. Зависимости $Q_2^*(S_{\max})$ и $\tau(S_{\max})$ для рх-гидрографа при $Q_{\max} = 28$ тыс. м³/с

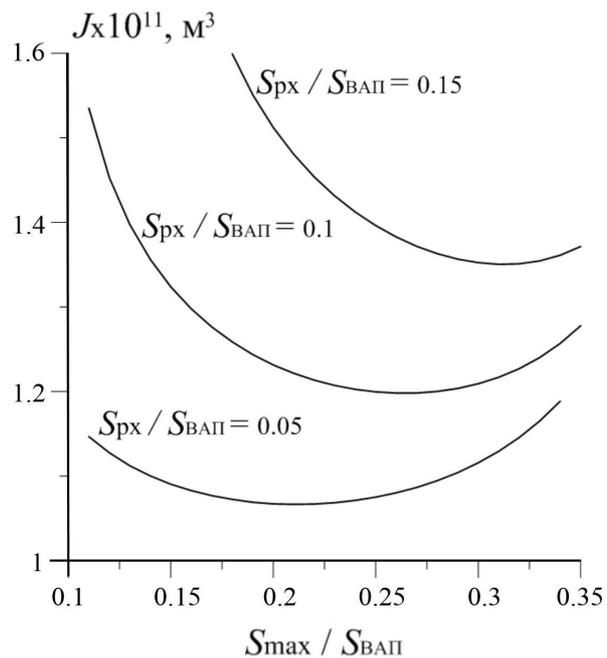


Рис. 10. Зависимость суммарной емкости паводкового рх-гидрографа от максимальной площади затопленной территории ВАП

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Построена численная нестационарная гидродинамическая модель течения воды с учетом следующих основных факторов: неоднородного профиля дна, режима работы гидротехнических сооружений, вращения Земли, взаимодействия потока воды с подстилающей поверхностью, потерь на испарение и инфильтрацию.
2. Протестирована новая численная схема сSPH-TVD для решения уравнений мелкой воды. Результаты численных расчетов с использованием описанного метода, основанного на использовании SPH и TVD подходов, свидетельствуют о его эффективности и адекватности при моделировании сложных гидродинамических течений на неоднородном рельефе дна, содержащем изломы и резкие перепады уровней. Численная схема является хорошо сбалансированной, консервативной и позволяет проводить сквозной устойчивый расчет при наличии нестационарных границ «вода — сухое дно» на нерегулярном рельефе.
3. Построен актуализированный цифровой рельеф местности высокой точности для территории Волго-Ахтубинской поймы в пределах Волгоградской области на основе синтеза различных источников пространственных данных (спутниковые, картографические, полевые измерения).
4. Изучены особенности прохождения воды по пойме во время сезонных затоплений в зависимости от физических факторов. Показана важная роль

испарения и инфильтрации при изучении динамики поверхностных вод в пойме.

5. Небольшие изменения рельефа в равнинной части ВАП, не затрагивающие русел ериков и протоков, не способны существенно повлиять на характер весеннего затопления. При изменениях параметров водотоков гидросистемы площадь затопления увеличивается.

6. Получено количественное согласие результатов численного моделирования паводковых явлений и данных наблюдений на гидрологических постах в период 2006 — 2012 гг. Результаты численных расчетов паводкового режима северной части Волго-Ахтубинской поймы показали, что модели с постоянным значением коэффициента шероховатости n_M не могут объяснить наблюдаемое поведение уровней воды в русле Волги. Для согласования теоретических результатов с данными наблюдений 2006 — 2012 гг. на трех гидропостах необходимо учитывать зависимость n_M от глубины воды. Наилучшее согласие между наблюдениями и моделью достигается при выборе n_M для меженного состояния реки $n_M^{\min} = 0.02$ и максимальных значениях $n_M^{\max} \simeq 0.06$ во время достижения максимального уровня воды в Волге.

7. Разработан метод построения оптимального гидрографа. На основе численных расчетов и аналитических аппроксимаций построена оптимизационная модель паводкового гидрологического режима.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bruijn L.M. de, Crone M.A., Bosch L.V. van den, Filippov O.V., Middelkoop H. Numerical and empirical study of annual flood dynamics in the Volga-Akhtuba floodplain. / In Van Os A (Ed.) // Netherlands Centre for River Studies. 2007. P. 48–51.
2. Bristeau M.-O., Goutal N., Sainte-Marie J. Numerical simulations of a non-hydrostatic shallow water model // Computers & Fluids. 2011. V. 47. P. 51–64.
3. Dewals B.J., Kantoush S.A., Erpicum S., Pirotton M., Schleiss A.J. Experimental and numerical analysis of flow instabilities in rectangular shallow basins // Environmental Fluid Mechanics. 2008. V. 8. P. 31–54.
4. Horritt M.S., Bates P.D. Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation // Journal of Hydrology. 2002. V. 268. P. 87–99.
5. Hervouet J.-M. Hydrodynamics of Free Surface Flows: Modelling with the Finite Element Method. — Chichester: Wiley, 2007. 360 p.
6. Беликов В.В., Глотко А.В. Компьютерное моделирование паводковых и меженных течений в Чебоксарском водохранилище с применением различных численных методов // Природообустройство и рациональное природопользование – необходимые условия социально-экономического развития России. 2005. Т. 1. С. 15–19.

7. Болгов М.В., Красножон Г.Ф., Шаталова К.Ю. Компьютерное моделирование изменений уровня воды на Нижней Волге // Природообустройство. 2009, N. 4. С. 68–72.
8. Крукиер Л.А., Чикин А.Л., Чикина Л.Г., Шабас И.Н. Моделирование гидродинамических процессов в водоемах с обширными районами мелководья. — Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2009. 244 с.
9. Хакимянов Г.С., Шокин Ю.И., Барахнин В.Б., Шокина Н.Ю. Численное моделирование течений жидкости с поверхностными волнами. — Новосибирск: Издательство СО РАН, 2001. 394 с.
10. Уизем Дж. Линейные и нелинейные волны. — Москва: Мир, 1977. 638 с.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Храпов С.С., Хоперсков А.В., Кузьмин Н.М., Писарев А.В., Кобелев И.А. Численная схема для моделирования динамики поверхностных вод на основе комбинированного SPH-TVD подхода // Вычислительные методы и программирование. 2011. Т. 12. С. 282–297.
2. Хоперсков А.В., Храпов С.С., Писарев А.В., Воронин А.А., Елисеева М.В., Кобелев И.А. Задача управления гидрологическим режимом в эколого-экономической системе «Волжская ГЭС — Волго-Ахтубинская пойма»: Моделирование динамики поверхностных вод в период весеннего паводка // Проблемы управления. 2012. N. 5. С. 18–25.
3. Воронин А.А., Елисеева М.В., Храпов С.С., Писарев А.В., Хоперсков А.В. Задача управления гидрологическим режимом в эколого-экономической системе «Волжская ГЭС — Волго-Ахтубинская пойма». Ч. 2. Синтез системы управления // Проблемы управления. 2012. N. 6. С. 19–25.
4. Воронин А.А., Елисеева М.В., Писарев А.В., Хоперсков А.В., Храпов С.С. Имитационные модели динамики поверхностных вод с использованием данных дистанционного зондирования: влияние рельефа местности // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2012. N. 3(19). С. 54–62.
5. Писарев А.В., Храпов С.С., Агафонникова Е.О., Хоперсков А.В. Численная модель динамики поверхностных вод в русле Волги: оценка коэффициента шероховатости. // Вестник Удмуртского университета. Серия Математика. Механика. Компьютерные науки. 2013. N. 1. С. 114–130.
6. Семенищев Е.А., Тазетдинова Д.И., Писарев А.В., Жук С.В., Тарасов Д.А. Разработка и исследование методов выделения высокодетализированных объектов на изображениях // Научно-технический вестник Поволжья. 2012. N 6. С. 374–377.
7. Хоперсков А.В., Храпов С.С., Писарев А.В., Кобелев И.А., Кудина И.Г. Прямое моделирование динамики поверхностных вод на территории Волго-Ахтубинской поймы / Под редакцией: академика В.А. Садовниченко, акаде-

- мика Г.И. Савина, чл.-корр. РАН Вл. В. Воеводина // Суперкомпьютерные технологии в науке, образовании и промышленности. 2012. С. 177–181.
8. Храпов С.С., Бутенко М.А., Писарев А.В., Хоперсков А.В. Суперкомпьютерные технологии для моделирования гидродинамических течений: монография. — Волгоград: Изд-во ВолГУ, 2012. 208 с.
9. Храпов С.С., Писарев А.В., Воронин А.А., Дьяконова Т.А., Циркова Е.А. Особенности динамики затопления Волго-Ахтубинской поймы в зависимости от режимов испарения и инфильтрации // Вестник ВолГУ. Сер.1: Математика. Физика. 2012. N. 1(16). С. 43–47.
10. Храпов С.С., Писарев А.В., Воронин А.А., Хоперсков А.В. Программный комплекс для численного моделирования динамики поверхностных вод на основе комбинированного лагранжево-эйлерова метода cSPH-TVD // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012614040. Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 3.05.2012 г.
11. Писарев А.В., Сиволобов С.В. Программный комплекс для верификации гидродинамических моделей природных процессов с использованием данных дистанционного зондирования Земли // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012661317. Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 12.12.2012 г.
12. Храпов С.С., Писарев А.В., Дьяконова Т.А., Хоперсков А.В. Компьютерное моделирование динамики поверхностных вод на территории Волго-Ахтубинской поймы // Математические методы в технике и технологиях // ММТТ–25: сборник трудов XXV Международной научной конференции в 10 томах. Т.2. Секции 3, 4 / под общ. ред. А.А. Большакова. — Волгоград: Волгогр. гос. техн. ун-т, 2012; — Харьков: Национ. техн. ун-т «ХПИ», 2012. — С. 5–7.
13. Писарев А.В. Построение цифровой модели рельефа Волго-Ахтубинской поймы на основе методов дистанционного зондирования Земли // М75 Молодёжь и наука: сборник материалов VIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященная 155-летию со дня рождения К.Э. Циолковского [Электронный ресурс] / отв. ред. О.А.Краев. — Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. С. 18–23.
14. Писарев А.В. Актуализация цифровой модели рельефа Волго-Ахтубинской поймы с использованием гидрологического мониторинга, основанного на GPS-измерениях береговых линий во время затоплений // Вестник ВолГУ. Сер.1: Математика. Физика. 2012. N. 2(17). С. 25–29.
15. Храпов С.С., Хоперсков А.В., Писарев А.В., Кобелев И.А. Геоинформационная система для прогноза сезонных затоплений // Материалы международной конференции «ИнтерКарто-ИнтерГИС 17. Устойчивое развитие территорий: теория ГИС и практический опыт», Барнаул (Россия) — Денпасар

- (Индонезия). 14 – 19 декабря 2011 г. С. 190–198.
16. Храпов С.С., Хоперсков А.В., Писарев А.В. Численная схема на основе комбинированного подхода SPH-TVD: проблема моделирования сдвиговых течений // Вестник ВолГУ. Сер.1: Математика. Физика. 2011. N. 2(15). С. 138–141.
17. Храпов С.С., Кобелев И.А., Писарев А.В., Хоперсков А.В. 4D-модели в задачах экологического моделирования: проектирование информационной системы // Вестник Волгоградского гос. Университета. Сер.10: Инновационные технологии. 2011. N. 5. С. 119–124.
18. Храпов С.С., Писарев А.В., Алейникова И.А., Хоперсков А.В., Еремин М.А., Гусаров Д.В., Кузьмин Н.М. Экспертные системы на основе моделирования сложных технических и экологических объектов // Материалы международной конференции «ИнтерКарто/ИнтерГИС 15», Пермь, Гент. 29 июня – 5 июля 2009 г. Т. 1. С. 267–279.
19. Хоперсков А.В., Храпов С.С., Писарев А.В. Разработка серверной геоинформационной системы для принятия экспертных решений. // Материалы Международной научной конференции «ИнтерКарто/ИнтерГИС-16. Устойчивое развитие территорий: теория ГИС и практический опыт», Ростов-на-Дону (Россия), Зальцбург (Австрия). 3 – 4 июля 2010 г. С. 514–517.
20. Писарев А.В., Хоперсков А.В., Храпов С.С. Разработка серверной геоинформационной системы по моделированию динамики зон затопления на заданном рельефе местности // Сборник статей участников Всероссийского конкурса научных работ студентов и аспирантов «Телематика'2010: телекоммуникации, веб-технологии, суперкомпьютинг», Санкт-Петербург. 21-24 июня 2010 г. С. 80–84.
21. Хоперсков А.В., Храпов С.С., Кудина И.Г., Писарев А.В. Численное моделирование динамики поверхностных вод с использованием параллельных технологий // Материалы 2-й научно-практической конференции «Актуальные проблемы современной физики», Элиста. 2010. С. 34–36.

Подписано в печать Формат 60x84/16.
Бумага типографская № 1. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 1,9.
Тираж 100 экз. Заказ .
Издательство Волгоградского государственного университета.
400062, Волгоград, ул. 2-я Продольная, 30.