

Численная гидрологическая модель весеннего затопления для территории Волго- Ахтубинской поймы: анализ эффективности двухступенчатого гидрографа

Т. А. Дьяконова

Аннотация—Состояние уникальной территории Волго-Ахтубинской поймы (ВАП) определяется режимом работы плотины Волжской ГЭС. Целью работы является исследование гидрологического режима в пойме для различных гидрографов плотины. Мы использовали пакеты программ для численного моделирования динамики поверхностных вод с учетом основных физических факторов на основе модели мелкой воды и численного алгоритма cSPH-TVD. Используя методы численного гидродинамического моделирования, для двухступенчатого весеннего гидрографа построены динамические модели затопления территории ВАП. Для серии гидрографов рассчитана эффективность гидрологического режима поймы в период затопления, учитывающая как долго тот или иной участок местности находится под водой. Для принятых моделей гидрографа эффективность затопления поймы с целью сохранения природной среды слабо зависит от формы гидрографа и выбор оптимальных для состояния поймы режимов работы ГЭС определяется экологическими и биологическими факторами.

Ключевые слова—компьютерное моделирование, гидрологический режим, эффективность затопления, модель мелкой воды, параллельные вычисления.

I. ВВЕДЕНИЕ

Переход на регулируемый гидрологический режим реки Волга, основанный на каскаде плотин гидроэлектростанций, помимо положительных результатов, связанных с производством электроэнергии и снижения риска весенних затоплений в отдельных прибрежных зонах, привел к ряду негативных последствий. Укажем на:

- Постепенное разрушение речной экосистемы [1].

Статья получена 27 октября 2017. Работа выполнена в рамках Госзадания министерства науки и образования РФ (проект № 2.852.2017/4.6) и, частично, при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Волгоградской области в рамках научных проектов № 15-45-02655, № 16-07-01037, а также «Пакета социальной поддержки на 2017 год молодых ученых ВолГУ». Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова

Т. А. Дьяконова – старший преподаватель кафедры информационных систем и компьютерного моделирования, ВолГУ (e-mail: dyakonova@volsu.ru).

Комплексные экологические исследования для Нижней Волги указывают на крайне неудовлетворительное состояние природной системы [2, 3].

- Угнетающее влияние на рыбные запасы самой крупной европейской реки, в частности, естественное существование волжской популяции осетровых прекращается из-за исчезновения 85% нерестилищ [1], причем состояние среды обитания осетровых ежегодно ухудшается [4]. Например, доля воспроизводства белуги за счет заводов составляет 98%.

- Уменьшение суммарного стока в Каспийское море за счет увеличения потерь на испарение из-за увеличения площади водного зеркала водохранилищ, общее число которых равно 13.

- Ухудшение состояния пойменных экосистем. По-видимому, наиболее сильные изменения происходят с Волго-Ахтубинской поймой (ВАП) [5].

- Вывод больших площадей ценной земли из оборота при строительстве водохранилищ. Суммарная площадь, занятая волжскими водохранилищами, около 20 тыс. км². Из-за сильного уменьшения скорости течения, происходит заиливание, деградация дна и береговой линии, зарастание водохранилищ [6, 7]. Наблюдается накопление тяжелых элементов [8, 9].

- Определяющим фактором водного питания ВАП является режим стока Волги, временной анализ которого за последние 25 лет указывает на уменьшение общего объема стока воды половодий за период 1990-2015 гг. и в среднем уменьшение продолжительности весеннего половодья [10].

II. ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ НИЖНЕЙ ВОЛГИ

Регулирование стока воды вниз по течению от плотины характеризуется гидрографом $Q(t)$, определяющим объем воды через створ плотины за 1 секунду $Q(t) = dV / dt$. Для Волжской ГЭС форма гидрографа на рубеже XX-XXI веков претерпела изменения (рис. 1). В последние годы произошел переход на так называемый двухступенчатый гидрограф с ярко выраженными двумя особенностями, наличием сельскохозяйственной полки с $Q = Q_{agr}$ длительностью τ_{agr} и рыбной полки $Q = Q_{fish}$ с длительностью

τ_{fish} при выполнении $Q_{agr} > Q_{fish}$ и $\tau_{agr} < \tau_{fish}$.

Такой двухступенчатый гидрограф предназначен для улучшения гидрологического режима ВАП весной, обеспечивая экологическую безопасность территории, при сохранении запасов воды в водохранилище для выработки электроэнергии.

В данной работе проведены количественные оценки эффективности такого двухступенчатого гидрографа на основе технологии прямого гидродинамического моделирования динамики поверхностных вод для заданной цифровой модели рельефа местности (ЦМР) Волго-Ахтубинской поймы.

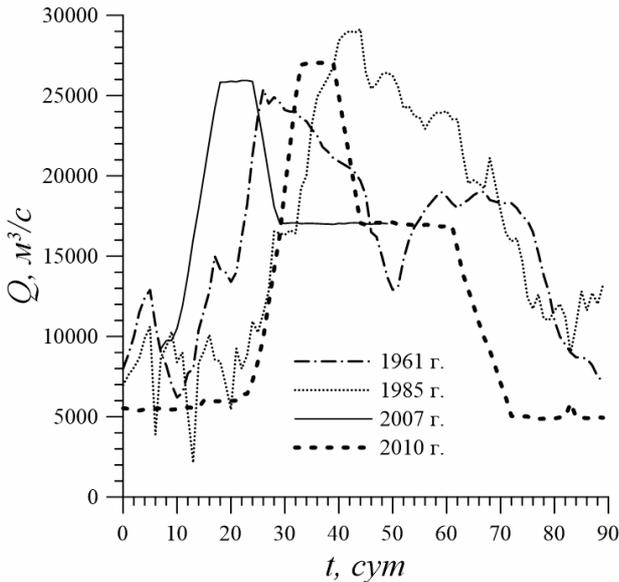


Рис. 1. Примеры типичных весенних гидрографов в различные годы

III. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ И ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛИ

Задача управления речными водными ресурсами решается на основе различных подходов [11, 12]. Оценку параметров затопления можно провести на основе геоинформационных технологий, вычисляя распределение уровня воды с учетом формы рельефа местности с использованием специального сервиса. Такой подход имеется у многих полнофункциональных геоинформационных системах (ГИС), укажем, например, на ArcGIS и отечественную ГИС «Карта 20xx». Такой метод дает хороший результат в случае затопления в результате осадков или таяния снежного покрова. Затопление территории в результате разлива крупной реки требует гидродинамического расчета. Часто используют одномерные гидродинамические модели в приближении мелкой воды, которые, однако, не учитывают ряд важных физических эффектов. Наиболее адекватной с физической точки зрения является нестационарная двумерная гидродинамическая модель, основанная на системе уравнений Сен-Венана с учетом неоднородности дна, взаимодействия потока с дном, внутреннего трения между слоями жидкости,двигающегося с различной скоростью, инфильтрации воды в грунт, испарение, силы взаимодействия между водным потоком и ветром в приводном слое атмосферы:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial Hu_x}{\partial x} + \frac{\partial Hu_y}{\partial y} = q \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + f_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + f_y \quad (3)$$

где H – глубина жидкости, u_x, u_y – горизонтальные компоненты вектора скорости \vec{u} , усредненные по вертикальной координате, g – ускорение свободного падения, $\eta = H + b$ – уровень свободной поверхности жидкости, $b(x, y)$ – функция рельефа местности, f_x, f_y – горизонтальные компоненты вектора $\vec{f} = \vec{f}^{frict} + \vec{f}^{Cor} + \vec{f}^{wind} + \vec{f}^{visc}$ внешних и внутренних сил, действующих на слой жидкости, $\vec{f}^{frict} = -\frac{\lambda}{2} \vec{u} |\vec{u}|$

– сила придонного трения, $\lambda = \frac{2g n_M^2}{H^{4/3}}$ – коэффициент

гидравлического сопротивления, n_M – шероховатость

по Маннингу ($n_M \approx 0.01 \div 0.1$), $\vec{f}^{Cor} = 2[\vec{u} \times \vec{\Omega}]$ – сила Кориолиса, $\vec{\Omega}$ – угловая скорость вращения Земли,

$\vec{f}^{wind} = C_a \frac{\rho_a}{\rho H} (\vec{w} - \vec{u}) |\vec{w} - \vec{u}|$ – сила ветра, C_a – параметр характеризующий состояние водной поверхности, ρ_a и ρ – плотность воздуха и воды соответственно, \vec{w} – вектор скорости ветра в

горизонтальном направлении, $\vec{f}^{visc} = \nu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} \right)$

– сила внутреннего (вязкого) трения, ν – коэффициент кинематической турбулентной вязкости ($\nu \leq 100 \text{ м}^2/\text{с}^2$),

$q^{(s)} = \frac{\partial Q}{\partial S}$ – приток воды через плотину, $Q(t)$ – гидрограф ппуска или зависимость скорости сброса воды ($\text{м}^3/\text{с}$) от времени, S – площадь источника сброса, q – функция источников/стоков воды, $q^{(r)}(t)$ – приток воды, обусловленный осадками, $q^{(inf)}(t)$ – скорость инфильтрации в почву, $q^{(ev)}(t)$ – скорость испарения.

Выделим основные особенности численной модели, лежащей в основе наших исследований.

1) Численное интегрирование дифференциальных уравнений в частных производных (1) – (3) проводится с использованием оригинального алгоритма на основе смешанного Лагранжево-Эйлера подхода, описанного в работе [13] с учетом уточнений [14].

2) Для создания и применения цифровой модели рельефа $b(x, y)$, построения других пространственно распределенных параметров [15] (например, коэффициента шероховатости n_M , коэффициент

инфильтрации [14]), а также представления результатов моделирования, наиболее эффективным является использование геоинформационных технологий.

Точность моделирования в существенной мере определяется качеством ЦМР, которая построена с использованием спутниковых данных, аэрофотосъемки, GPS/ГЛОНАСС измерений, данных лоций [16, 17]. Математическая модель численно решается с использованием алгоритма cSPH-TVD (combined Smooth Particle Hydrodynamics – Total Variation Diminishing) с применением технологий распараллеливания OpenMP-CUDA [13, 18, 19, 20].

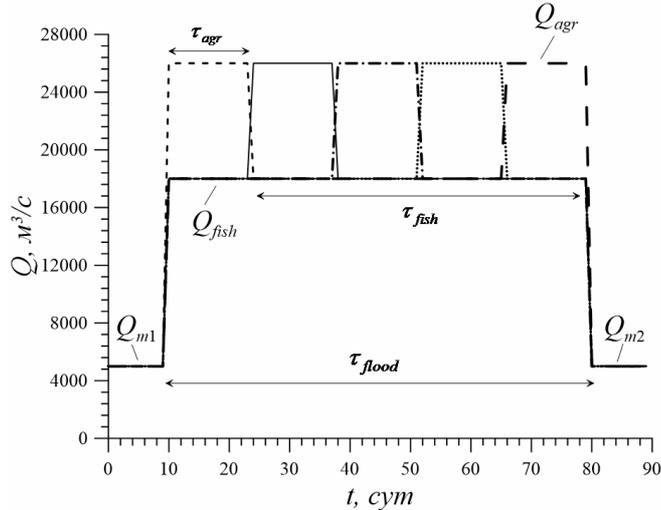


Рис. 2. Серия двухступенчатых гидрографов с фиксированным объемом воды в период паводка $Q^{(k)}(t)$ $k = (1, 2, \dots, 5)$ для моделирования.

Величина $Q_{m1}^{(1)}$ определяет меженное значение до начала пускa воды, а $Q_{m1}^{(2)}$ летний межень – гидрограф после окончания весеннего затопления.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассмотрим результаты моделирования затопления в численной модели для серии гидрографов $Q^{(k)}(t)$ $k = (1, 2, \dots, K)$ (рис. 2). В качестве базовой модели ($k=1$) примем набор параметров: $Q_{m1}^{(1)} = 5000 \text{ м}^3/\text{с}$; $Q_{agr}^{(1)} = 26000 \text{ м}^3/\text{с}$; $Q_{fish}^{(1)} = 18000 \text{ м}^3/\text{с}$; $Q_{m2}^{(1)} = 5000 \text{ м}^3/\text{с}$; $\tau_{agr} = 14 \text{ сут}$; $\tau_{fish} = 56 \text{ сут}$. За период $\tau_{flood} = \tau_{agr} + \tau_{fish} = 70 \text{ сут}$. Дополнительно к меженному значению через створ плотины проходит один и тот же объем воды $V_{flood} = 89 \text{ км}^3$, и потери ГЭС остаются на одном уровне. Зафиксируем значения τ_{flood} , V_{flood} , $Q_{agr}^{(1)}$, $Q_{fish}^{(1)}$, и будем смещать на более поздний период времени сельскохозяйственную полку (см. рис. 2). Эта серия гидрографов имеет одинаковые интегральные характеристики: объем воды, полная длительность τ_{flood} , максимальное значение пускa воды $Q_{agr}^{(1)}$, и различается формой, фактически

моментом перехода на сельскохозяйственную полку от начала весеннего пускa. В результате, за исключением гидрографов с $k=1$ и $k=K$, имеется две рыбных полки – до и после сельскохозяйственной.

Будем вычислять площадь затопления поймы S_{vap} (за вычетом площади русел Волги и Ахтубы) и объем воды V_{vap} , находящийся на площади S_{vap} (рис. 3). При вычислении S_{vap} будем учитывать только те расчетные ячейки, в которых текущее значение толщины слоя воды H превышает некоторое заданное значение $H_{min} < H$, то считаем, что эта ячейка дает вклад в S_{vap} (для определенности примем $H_{min} = 0.1 \text{ м}$).

На рис. 4 приведены зависимости $S_{vap}(t)$ и $V_{vap}(t)$. Максимумы суммарных площади затопления $\max S_{vap}$ и объема воды в пойме $\max V_{vap}$ практически одинаковы для всей серии рассчитанных гидрографов. Для гидрографов с большим номером k характерное время затопления поймы увеличивается.

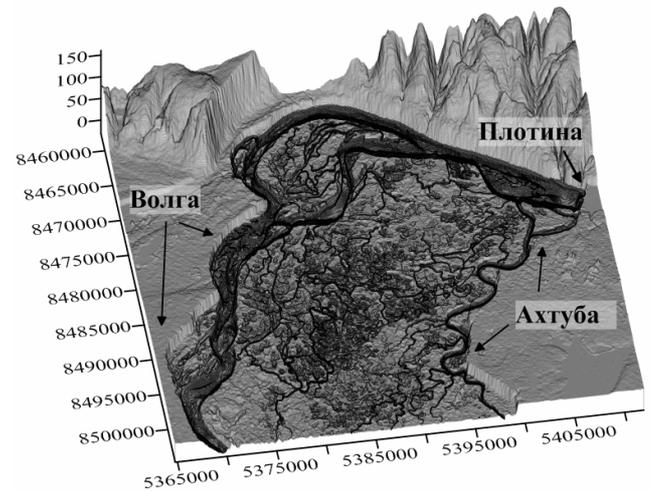


Рис. 3. Области затопления территории ВАП в пик паводка на фоне ЦМР. Более темный цвет соответствует большим уровням воды. Значения координат указаны в метрах, масштаб вдоль вертикальной координаты отличается от масштаба для горизонтальной координаты

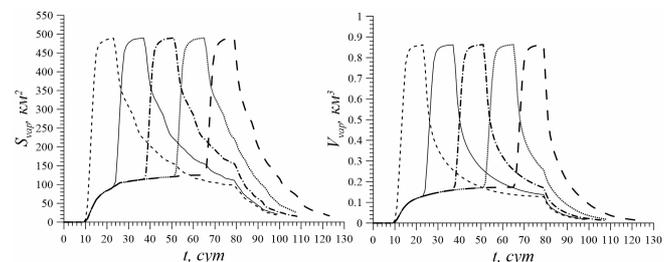


Рис. 4. Временные зависимости $S_{vap}(t)$ и $V_{vap}(t)$. Тип линий соответствует гидрографам, приведенным на рис. 2.

Положительное влияние весеннего затопления на природную систему поймы зависит не только от площади затопления $S(t)$, но от продолжительности

нахождения конкретного участка территории под водой. Определим интегральную количественную оценку эффективности затопления, учитывающую оба эти фактора:

$$\Sigma_{t_*} = \int_0^{t_\infty} S(t) dt, \quad (5)$$

где интегрирование ведется до момента времени t_∞ , при котором $S(t_\infty) = 25 \text{ км}^2$. Величина Σ_{t_*} учитывает время нахождения воды в пойме (рис. 5). Расчеты указывают на несильное увеличение (в пределах 10%) этого параметра при переходе от стандартного гидрографа ($k = 1$, начинается с высокого уровня воды на сельскохозяйственной полке Q_{agr}) к гидрографу, который заканчивается фазой с Q_{agr} ($k = 5$).

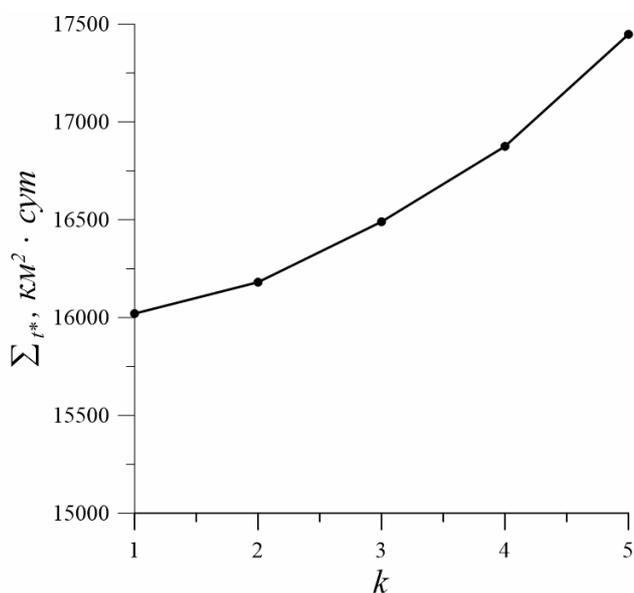


Рис. 5. Значения эффективности затопления Σ_{t_*} для различных моделей гидрографа k (см. рис. 2)

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблемы построения эффективного гидрографа связаны с рядом противоречивых требований со стороны различных агентов. Укажем на интерес ГЭС осуществлять большие зимние пуски воды; различные интересы территорий Волгоградской и Астраханской областей; желание жителей Волгограда в использовании территории северной части ВАП, приводящее к достаточно хаотической и непродуманной застройке поймы (усиление застройки на прибрежных территориях связано, в том числе, с переходом ведения земли в муниципалитеты); интересы ГЭС в максимально равномерном пуске воды с учетом только безопасности водохранилища; практику регулирования пуска воды каскадом водохранилищ на основе решений межведомственной оперативной группы, состоящей из 35 членов – представителей различных ведомств и территорий, показавшую свою неэффективность.

С точки зрения гидрологического режима в пойме, рассмотренные гидрографы, различающиеся моментом наступления сельскохозяйственной полки, приводят в пределах 10% к близким результатам. Поэтому выбор классического гидрографа Q_{agr} обусловлен иными факторами. Этот гидрограф лучше согласуется с природным циклом воспроизводства рыбы, когда после быстрого затопления уже на фазе более продолжительной рыбной полки прогревается вода, и соответствующий температурный режим способствует откладыванию икры и росту мальков. Сдвиг более высокого уровня воды (с/х полки) на поздний период ухудшает также эффективность ведения сельского хозяйства и вегетацию природной растительности [21], поскольку вода в этом случае из поймы уходит только в середине лета.

Отметим также, что фактор, связанный с возможностью сильных потоков на с/х полке улучшать состояние русел ериков и микроериков за счет разрушения наносов и заторов, в рассмотренной нами модели не учитывается. Однако данные наблюдений указывают на слабую возможность такой чистки русел при $Q_{agr} < \text{м}^3/\text{с}$.

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Переварюха Т.Ю., Гераскин П.П., Переварюха Ю.Н., Мельник И.В. Краткая история формирования, современное состояние и предложения по сохранению биоразнообразия осетровых рыб Каспийского моря. // Естественные науки. – 2010. – № 2. – С. 60–69.
- [2] Бармин А.Н., Иолин М.М., Шарова И.С., Старичкова К.А., Сорокин А.Н., Николайчук Л.Ф., Голуб В.Б. Использование шкал Л.Г. Раменского и ДСА-ординации для индикации изменений условий среды в Волго-Ахтубинской пойме. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2010. – Т. 12. – № 1-1. – С. 54–57.
- [3] Филиппов О.В., Кочеткова А.И., Баранова М.С., Брызгалина Е.С., Лунев А.М. Водно-экологическая ситуация на Нижней Волге и в Волго-Ахтубинской пойме. // В сборнике: Проблемы устойчивого развития и эколого-экономической безопасности региона Материалы XI Региональной научно-практической конференции. – 2015. – С. 173–179.
- [4] Ходоревская Р.П., Калмыков В.А. Осетровые Каспийского моря - природное наследие России, современное состояние популяций и рекомендации по их сохранению. // Использование и охрана природных ресурсов в России. – 2015. – № 3 (141). – С. 43–51.
- [5] Сергиенко Л.И. Использование современных технологий в мониторинге состояния природно охраняемых территорий (на примере природного парка «Волго-Ахтубинская пойма»). // Экология урбанизированных территорий. – 2015. – № 4. – С. 16–20.
- [6] Кочеткова А.И., Филиппов О.В., Папченков В.Г., Зимин М.В. Пространственно-временной анализ зарастания Волгоградского водохранилища. // Проблемы региональной экологии. – 2013. – № 6. – С. 260–266.
- [7] Папченков В.Г. Степень зарастания Рыбинского водохранилища и продуктивность его растительного покрова. // Биология внутренних вод. – 2013. – № 1. – С. 24.
- [8] Шашуловская Е.А. О накоплении тяжелых металлов в высшей водной растительности Волгоградского водохранилища. // Поволжский экологический журнал. – 2009. – № 4. – С. 357–360.
- [9] Кочеткова А.И. О некоторых закономерностях накопления тяжелых металлов высшей водной растительностью на Волгоградском водохранилище // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 3: Экономика. Экология. – 2012. – № 1. – С. 305–309.
- [10] Филиппов О.В., Кочеткова А.И., Баранова М.С., Брызгалина Е.С. Современное состояние и проблемы водного питания Волго-

- Ахтубинской поймы. // Грани познания. – 2015. – № 4 (38). – С. 31–41.
- [11] Левит-Гуревич Л.К. Метод динамического программирования для выбора рационального водораспределения в дельте реки. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2010. – Т. 12. – № 1 (4). – С. 950–956.
- [12] Воронин А.А., Васильченко А.А., Писарева М.В., Писарев А.В., Хоперсков А.В., Храпов С.С., Подщипкова Ю.Е. Проектирование системы эколого-экономического управления территорией Волго–Ахтубинской поймы на основе гидродинамического и геоинформационного моделирования // Управление большими системами. Выпуск 55. М.: ИПУ РАН, 2015. С. 79-102.
- [13] 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. – № 1. – С. 282–297.
- [14] Khrapov S., Pisarev A., Kobelev I., Zhumaliev A., Agafonnikova E., Losev A., Khoperskov A. The Numerical Simulation of Shallow Water: Estimation of the Roughness Coefficient on the Flood Stage. // Advances in Mechanical Engineering. – 2013. – V. 2013. – D 787016. – 11 p.
- [15] Кузьмин Н.М., Храпов С.С., Хоперсков А.В. База данных гидрологического мониторинга Волго-Ахтубинской поймы. – Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2014620449 от 19.03.2014 г.
- [16] Кузьмин Н.М., Храпов С.С., Хоперсков А.В. База данных актуализированной цифровой модели рельефа Волго-Ахтубинской поймы. – Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620448 от 19.03.2014 г.
- [17] Елисеева М.В., Писарев А.В. Веб-ориентированная система подготовки цифровой модели рельефа местности. // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1: Математика. Физика. – 2014. – № 1. – С. 46–51.
- [18] Храпов С.С., Писарев А.В., Воронин А.А., Хоперсков А.В. Программный комплекс для численного моделирования поверхностных вод на основе комбинированного лагранжево-эйлерова метода cSPH-TVD. - Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012614040 от 03.05.2012 г.
- [19] Дьяконова Т.А., Храпов С.С. Параллельная CUDA-версия программы для численного моделирования гидродинамических течений на основе CSPH-TVD метода. - Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016610820 от 19.01.2016 г.
- [20] Шушкевич Т.С., Кузьмин Н.М., Бутенко М.А. Трехмерный параллельный численный газодинамический код на основе смешанного Лагранжево-Эйлерова подхода. // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1: Математика. Физика. – 2015. – № 4 (29). – С. 24–34.
- [21] Иванов А.И., Дудкин Е.А. Озеро Сандерка в Лунинском районе Пензенской области как модельный объект для изучения экосистем пойменных водоемов // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2014. – № 4 (12) – С. 200–207.

Numerical hydrological model for the spring flooding of the Volga-Akhtuba floodplain: an analysis of the effectiveness of the two-stage hydrograph

T. A. Dyakonova

Abstract—State of unique territory of the Volga-Akhtuba floodplain (VAP) is determined by the operating mode of of the dam of the Volga hydroelectric power station. The aim of our work is to study of the hydrological regime in the flood for various hydrographs. We used software packages for numerical simulation of the dynamics of surface water, taking into account the main physical factors on the basis of the shallow water model and numerical algorithm cSPH-TVD. Dynamic flood models over the territory of VAP are built for two-stage spring hydrograph using numerical hydrodynamic modeling methods. The effectiveness of the hydrological regime flood is calculated for the hydrographs series given the time spent underwater land. For our models of hydrographs in order to preserve the natural environment the flood effectiveness depends weakly on the form of hydrograph and the optimal mode of HPP is determined by environmental and biological factors.

Ключевые слова— computer simulation, hydrology, flooding efficiency, shallow water model, parallel computing.