



УДК 532.5 + 519.6

## ЭЛЕКТРОННАЯ МОДЕЛЬ ЗАТОПЛЕНИЯ ВОЛГО-АХТУБИНСКОЙ ПОЙМЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ГИДРОГРАФАХ СПЕЦИАЛЬНОГО ВЕСЕННЕГО ПОПУСКА ВОЛЖСКОЙ ГЭС И ВОДОСНАБЖЕНИИ РУКАВА АХТУБА НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ \*

*С.С. Храпов, А.В. Хоперсков, М.А. Еремин, Д.В. Гусаров,  
А.В. Плякин, О.В. Филиппов, Д.В. Золотарев, Н.М. Кузьмин*

Создана информационная система для моделирования динамики и областей затопления участка Волго-Ахтубинской поймы. На основе проведенного численного гидродинамического моделирования и статистической обработки данных гидрологического мониторинга за период 2001–2006 гг. определены параметры, влияющие на затопление Волго-Ахтубинской поймы (ВАП) и водообеспеченность рукава Ахтуба. Разработаны две математические модели, входящие в состав программного комплекса Геоинформационной системы ВАП и обеспечивающие возможность построения карты затопления в зависимости от формы гидрографа и параметров, влияющих на затопление.

### Введение

Экологическое положение с Волго-Ахтубинской поймой очень сложное. В последние годы в результате несоблюдения экологического режима сброса воды Волжским гидроузлом имеются основания говорить о катастрофической ситуации. В 2006 г. из-за маловодья без влаги остались 90 % озер и ериков, уровень подземных вод существенно снизился. Вместо необходимых 120 миллионов кубометров воды в паводок через плотину сбросили почти в два раза меньше. Половина из трехсот водных объектов поймы (озера, ерики, прораны, ильмени, култуки, полои) высохли. Пойма как целостная экологическая система может повторить судьбу Аральского моря.

Задача описания динамики поверхностных вод относится к числу классических проблем гидродинамики [1]. Отметим успехи в построении гидродинамических моделей Каспийского [2], Черного, Балтийского [3], Азовского морей [4], ряда водохранилищ [5]. Имеются важные отли-

\* Работа выполнена в рамках гранта ВолГУ (№ 34-2007-а/ВолГУ) и ГК № 2.1-1/07 от 17.09 2007 г.

чия при моделировании крупных водоемов (моря и озера) и речных систем. Отметим, что в водоемах речного типа структура течения, особенно в нестационарных режимах, формируется, прежде всего, под влиянием сложного рельефа дна. Особая сложность при описании нестационарного течения из-за изменения объема стока обусловлена наличием границы «вода – сухое дно», которая перемещается по мере изменения высоты жидкости.

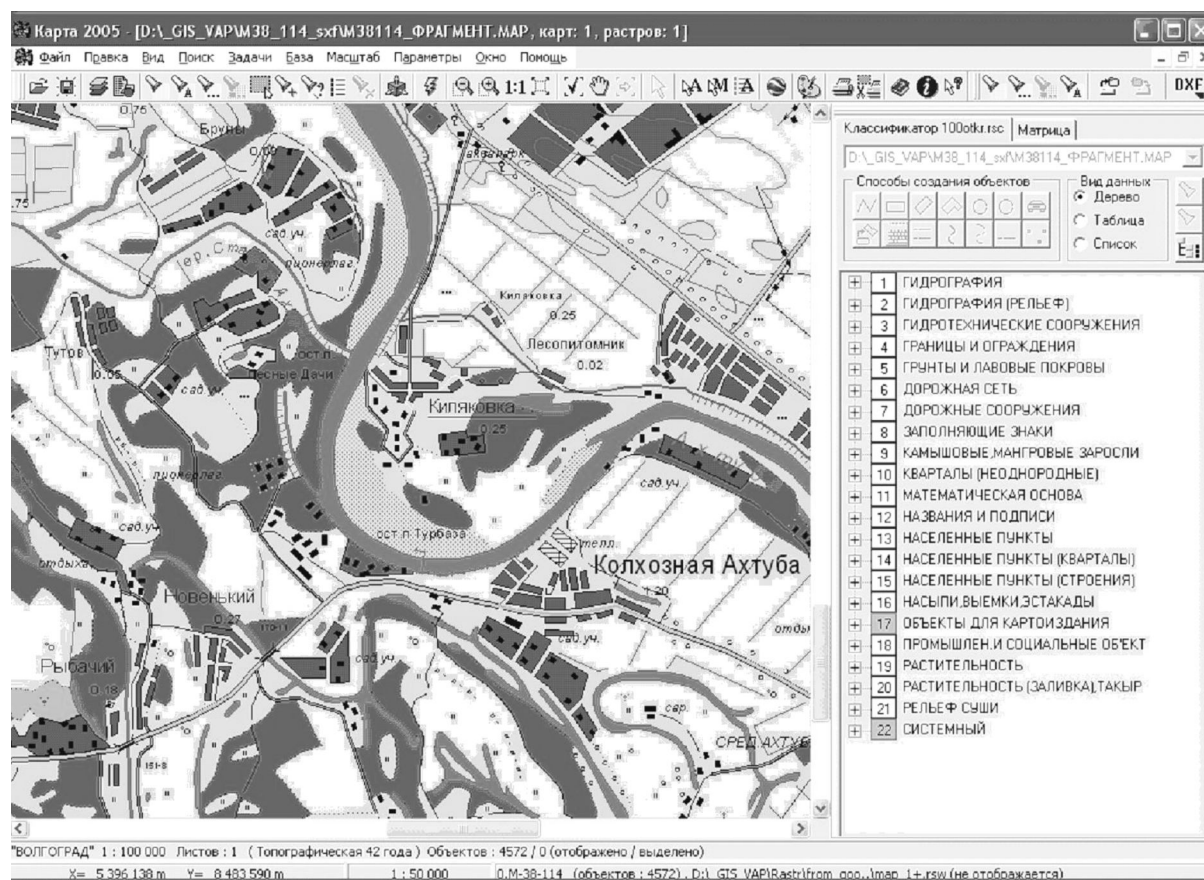


Рис. 1. Фрагмент электронной карты топографической основы масштаба 1 : 100 000 (лист М-38-114)

**Целью работы** является создание электронной (математической) модели для прогноза динамики затопления Волго-Ахтубинской поймы на основе технологий геоинформационных систем (далее – программный комплекс ГИС ВАП), в зависимости от режима прохождения воды через створ Волжской ГЭС. Определение экологически наиболее эффективных режимов сброса воды Волжской ГЭС, обеспечивающих сохранение и восстановление водных объектов и природных комплексов Волго-Ахтубинской поймы (ВАП). В основе модели лежат данные гидрологического мониторинга ВАП 2001–2004 гг., полученные в результате многолетних исследований [6; 7].

#### **Разработка макета картографической основы моделируемого участка Волго-Ахтубинской поймы в масштабе 1 : 100 000 для нанесения границ затопления**

В качестве картографической основы моделируемого участка ВАП используются: топографическая основа в масштабе 1 : 100 000, цифровая модель рельефа, растровые карты, тема-

тические карты, созданные средствами ГИС «Карта 2005» и «ArcGIS». Пример отображения электронной топографической карты формата SXF в ГИС «Карта 2005» и стандартный состав ее слоев приведены на рисунке 1.

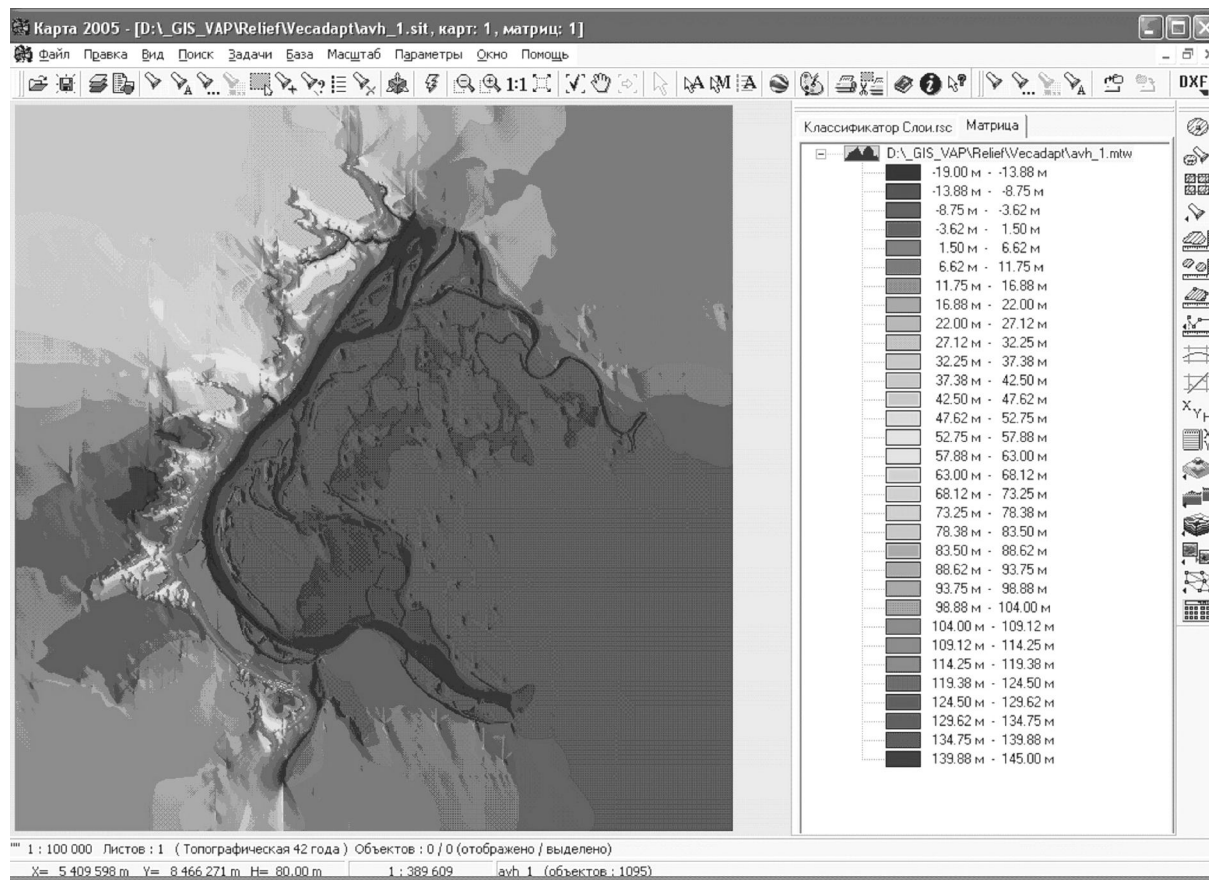


Рис. 2. Матрица высот, построенная на основе векторной карты рельефа участка ВАП  
вблизи Волжской ГЭС

Динамика поверхностных вод должна полностью определяться особенностями рельефа конкретной местности. Для адекватного описания течения необходимо построить качественную актуальную модель рельефа. При создании математической модели рельефа использовались системы оцифровки растровых изображений GeoMapBuilder [8] и Easy Trace PRO, с помощью которых подготовлены данные для построения рельефа местности. На основе полученных данных средствами ГИС «Карта 2005» построены векторные карты рельефа моделируемого участка ВАП с нанесенными горизонталями и отметками высот. Все объекты имеют 3D-метрику – координаты ( $X$ ,  $Y$ ) и абсолютную высоту ( $H$ ). По данным векторных карт рельефа средствами ГИС «Карта 2005» построены цифровые модели рельефа (матрицы высот MTW), используемые при расчетах зон затопления с разрешением (размером элемента) 20 м (рис. 2).

Приведем перечень созданных тематических блоков и состав тематических слоев пользовательской карты: Гидрографическая сеть (Ерики. Водотоки. Реки. Озера); Гидрологический мониторинг (Максимальная и средняя глубина. Ширина водного объекта. Общая площадь сечения и площадь живого сечения. Температура воды на поверхности. Скорость течения. Сток. Уровень воды. Точки мониторинга); Административное деление (Населен-

ные пункты. Поселковые черты населенных пунктов. Сельскохозяйственные предприятия. Границы районов. Граница. Сельские администрации. Охотхозяйства); Транспортная (Дороги. Трансекты); Рекреационная (Проектируемые объекты рекреационной инфраструктуры. Садоводческие товарищества. Турмаршруты. Существующие объекты рекреационной инфраструктуры); Инженерная (Точечные объекты инженерной инфраструктуры. Линейные объекты инженерной инфраструктуры).

На основе проведенного численного гидродинамического моделирования и статистической обработки данных гидрологического мониторинга определены параметры, влияющие на затопление Волго-Ахтубинской поймы и водообеспеченность рукава Ахтуба: 1) график пусков Волжской ГЭС (объем, характер, длительность и фаза сброса) – гидрограф Волги в створе плотины Волжской ГЭС; 2) рельеф моделируемого участка ВАП; 3) особенности подстилающей поверхности – шероховатость поверхности (придонное трение), свойства почвогрунтов (влажность, температура, эффективность впитывания); 4) гидрологическое и метеорологическое состояние поймы на момент моделирования зон затопления – наполнение водных объектов ВАП, температура окружающей среды, наличие/отсутствие ледовых и снежных образований, температура сбрасываемой воды через створ плотины Волжской ГЭС.

#### Разработка математической модели для построения карты затопления в зависимости от формы гидрографа и других параметров

Динамика поверхностного слоя жидкости описывается системой уравнений Буссинеска – Сен-Венана:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = Q, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - fv + g \frac{u\sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 h} - \frac{\tau_x}{\rho h} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + fu + g \frac{v\sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 h} - \frac{\tau_y}{\rho h} = 0, \quad (3)$$

где  $h(x, y, t)$  – глубина жидкости;  $u(x, y, t)$ ,  $v(x, y, t)$  – горизонтальные компоненты вектора скорости, усредненные по вертикальной координате;  $b = b(x, y)$  – уровень дна водоема;  $\zeta(x, y, t) = h + b$  – уровень свободной поверхности жидкости;  $g$  – ускорение свободного падения;  $f = 2\Omega \sin \Theta$  – параметр Кориолиса;  $\Omega$  – угловая скорость вращения Земли,  $\Theta = \Theta(x, y)$  – географическая широта;  $\rho$  – плотность воды;  $C$  – коэффициент Шези;  $\tau_x$ ,  $\tau_y$  – компоненты вектора напряжения трения ветра, для которых можно принять  $\vec{\tau} = C_t \rho_a |\vec{W}| \vec{W}$ , где  $\vec{W}$  – скорость ветра;  $\rho_a$  – плотность атмосферы;  $\tilde{N}_\tau$  – параметр, зависящий от состояния водной поверхности,  $Q(x, y, t, h)$  – функция источников и стоков жидкости. Функция  $b(x, y)$  определяет рельеф местности.

Для численного интегрирования системы уравнений использовали метод, описанный в работе [9], который основан на подходе, изложенном в [10].

Для анализа построенной математической модели были проведены следующие расчеты: 1) медленный процесс подтопления; 2) аварийный (интенсивный) режим затопления. В первом

случае задавалось незначительное превышение темпа прохода воды через створ плотины над стационарным темпом  $\dot{V}_0$ ,  $\dot{V}_{\max} = \dot{V}_0 + \Delta\dot{V}_{\max}$ ,  $\Delta\dot{V}_{\max} \ll \dot{V}_0$ . Отметим, что значение  $\Delta\dot{V}_{\max}$  соответствует увеличению уровня воды в Волге вблизи плотины на  $\Delta h_{\max}$  относительно уровня воды при стационарном плановом проходе через плотину. Для стационарного уровня воды в Волге вблизи плотины принято значение -10 м в Балтийской системе высот. Расчеты проводились при следующих значениях параметров: 1)  $\Delta\dot{V}_{\max} = 2 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{с}$  или  $\Delta h_{\max} = 0,5 \text{ м}$ ; 2)  $\Delta\dot{V}_{\max} = 4 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{с}$  или  $\Delta h_{\max} = 1 \text{ м}$ ; 3)  $\Delta\dot{V}_{\max} = 6 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{с}$  или  $\Delta h_{\max} = 1,5 \text{ м}$  (рис. 3). В случае аварийного сброса задавалось существенное превышение темпа прохода воды через створ плотины над стационарным темпом  $\dot{V}_0$ , то есть  $\dot{V}_{\max} \gg \dot{V}_0$ . Рассмотренный аварийный режим соответствует частичному или полному разрушению плотины [11].

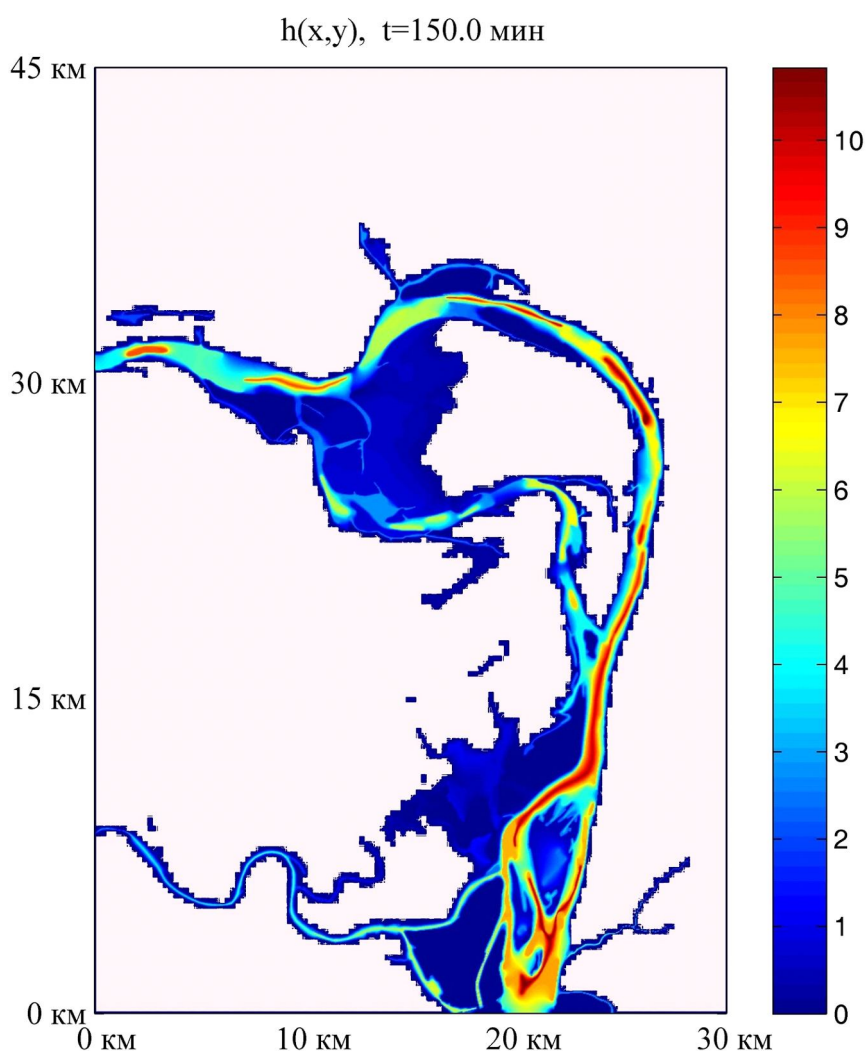


Рис. 3. Распределение  $h$  (глубины воды) в модели затопления в случае  $\Delta h = 1,5 \text{ м}$

В дополнение к гидродинамической нестационарной модели движения жидкости разработана квазистационарная модель зон затопления, основанная на результатах гидрологического мо-

нитинга ВАП. Построение зон затопления в рамках данной модели осуществляется средствами ГИС «Карта 2005» (встроенные приложения). В основе этих приложений лежат сертифицированные методики. В качестве исходных данных для построения зон затопления средствами ГИС «Карта 2005» используются значения уровней воды в контрольных точках гидрологического мониторинга ВАП (гидрологические посты, точки наблюдения). В рамках данной модели возможно построение зон затопления в различные фиксированные моменты времени (квазистационарность) по данным наблюдений, а также посредством задания темпа прохода воды через створ плотины Волжской ГЭС (рис. 4).

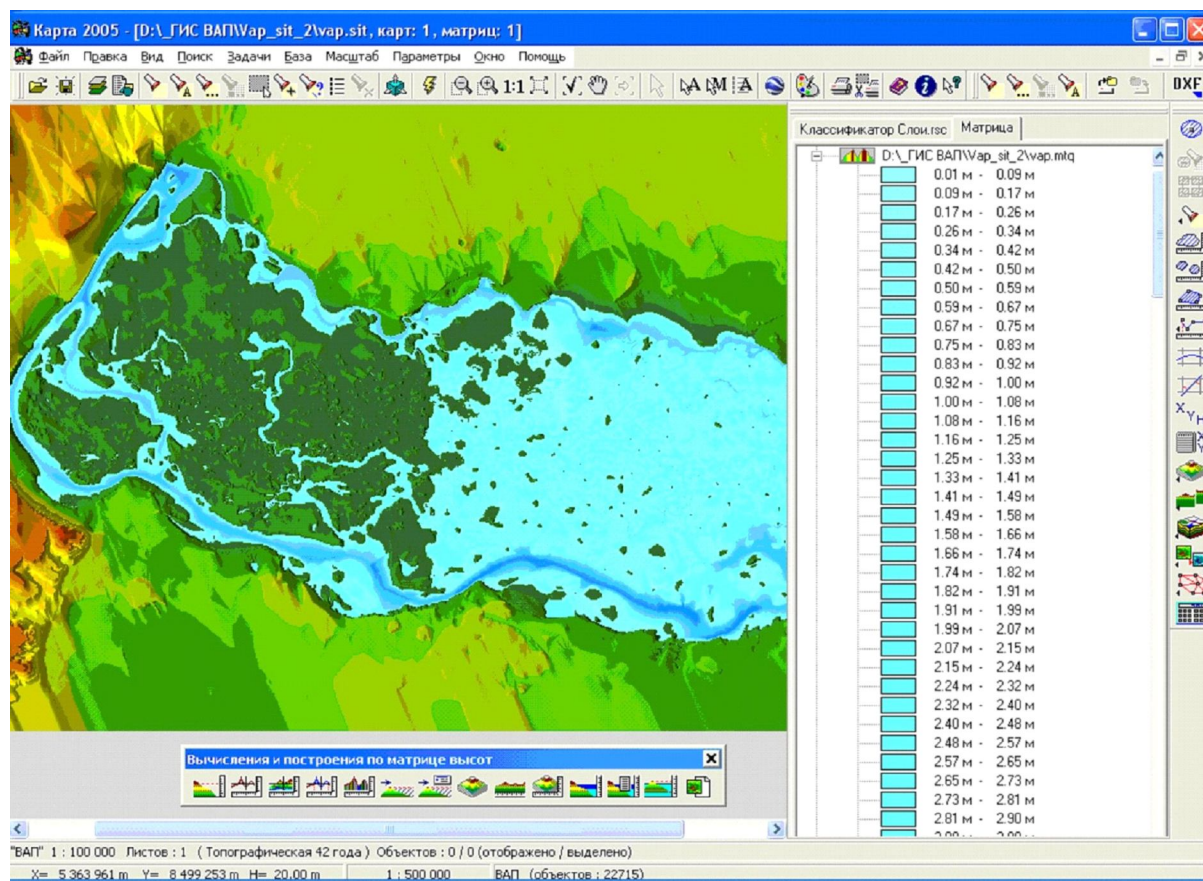


Рис. 4. Распределение воды в квазистационарной модели затопления

Связь между темпом прохода воды через створ плотины и значениями уровней воды в контрольных точках гидрологического мониторинга ВАП определена путем статистической обработки данных гидрологических наблюдений на основе выявленной математической зависимости. Данный подход позволяет построить границы зоны затопления с указанием ширины этой границы и вероятности затопления территорий.



## Summary

**THE COMPUTER MODEL OF FLOODING OF VOLGA-AKHTUBA  
BOTTOMLAND AT THE DIFFERENT HYDROGRAPHS SPECIAL SPRING WORK  
BY THE VOLZHSKIY HYDROELECTRIC POWER STATION AND WATER SUPPLY  
OF THE SLEEVE AKHTUBA ON THE BASIS OF GEOINFORMATION  
TECHNOLOGIES AND SYSTEMS**

*S.S. Khrapov, A.V. Khoperskov, M.A. Eremin, D.V. Gusarov,  
A.V. Plyakin, O.V. Filippov, D.V. Zolotarev, N.M. Kuzmin*

The information system for simulations of dynamics and fields of flooding of the Volga-Akhtuba bottomland is created. On the basis by our numerical hydrodynamic modeling and statistical data processing of hydrological monitoring for phase 2001–2006 years the parameters influencing to flooding Volga-Akhtuba area are calculated. Two mathematical models included in a composition of soft of an information systems and providing a possibility of build-up of a flooding maps depending on the shape of the hydrograph and other parameters.

## Список литературы

1. Найденов В.И. Нелинейная динамика поверхностных вод суши. М.: Наука, 2004. 318 с.
2. Будинова Е.В., Носов В.Н., Терехин А.Т. Моделирование течений Северного Каспия. Теоретическая экология. М.: МГУ, 1987. С. 17–31.
3. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М.: Наука, 1982. 564 с.
4. Крукиер Л.А., Чикин А.Л., Шабас И.Н. Трехмерная модель гидродинамики Азовского моря и ее численная реализация // Среда, биота и моделирование экологических процессов в Азовском море / Отв. ред. Г.Г. Матишов. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2001. С. 282–297.
5. Смирнов Е.Д., Хоперсков А.В. Информационно-математическая модель Волгоградского водохранилища с учетом статистического ансамбля реализаций погодных условий // Известия высших учебных заведений. Радиофизика: Спец. вып. журн. 1997. Т. 4. Вып. 1. С. 155–162.
6. Горяйнов В.В., Филиппов О.В., Плякин А.В., Золотарев Д.В. Волго-Ахтубинская пойма: особенности гидрографии и водного режима. Волгоград: Волгогр. науч. изд-во, 2004. 112 с.
7. Горяйнов В.В., Филиппов О.В., Плякин А.В., Золотарев Д.В. Экологическая безопасность природно-хозяйственных систем Волго-Ахтубинской поймы: структура и организация мониторинга водного режима: Монография. Волгоград: Волгогр. науч. изд-во, 2007. 112 с.
8. Белослудцев А.А., Наводченко Н.В., Хоперсков А.В. Информационная система для создания электронных карт с рельефом (GeoMapBuilder): Свидетельство об офиц. регистрации программ для ЭВМ № 2007612682 от 21.06 2007 г. (Информационная система GeoMapBuilder для создания электронных карт с рельефом. См.: [http://www.volsu.ru/s\\_conf/index\\_6.html](http://www.volsu.ru/s_conf/index_6.html)).
9. Noelle S., Pankratz N., Puppo G., Natvig J.R. Well-balanced finite volume schemes of arbitrary order of accuracy for shallow water flows // J. Comput. Phys. 2006. № 213. P. 474–499.
10. Audusse E., Bouchut F., Bristeau M.-O., Klein R., Perthame B. A fast and stable well-balanced schemes with hydrostatic reconstruction for shallow water flows // SIAM J. Sci. Comp. 2004. № 25. P. 2050–2065.
11. Еремин М.А., Хоперсков А.В. Компьютерная модель прорыва Волжской плотины // Вестн. Волгогр. гос. ун-та. Сер. 1, Математика. Физика. 2006. Вып. 10. С. 139–142.