



УДК 556.53  
ББК 26.222.5

## ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ЗАТОПЛЕНИЯ ВОЛГО-АХТУБИНСКОЙ ПОЙМЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РЕЖИМОВ ИСПАРЕНИЯ И ИНФИЛЬТРАЦИИ<sup>1</sup>

*А.В. Писарев, С.С. Храпов, А.А. Воронин, Т.А. Дьяконова, Е.А. Циркова*

Представлены результаты компьютерного моделирования динамики поверхностных вод в Волго-Ахтубинской пойме с учетом потери воды на испарение и инфильтрацию. Проведено сравнение расчетов с данными дистанционного спутникового зондирования (LandSat 7) о площади затопления во время весеннего паводка в пойме в 2011 году.

**Ключевые слова:** *Волго-Ахтубинская пойма, уравнения мелкой воды, испарение воды, геоинформационные системы, дистанционное зондирование Земли.*

### Введение

Территория Волго-Ахтубинской поймы (ВАП), ограниченная рекой Волга и ее рукавом Ахтубой, имеет протяженность более 450 км, в ширине достигая 40 километров. Между Волгой и Ахтубой имеется большое число водных каналов (ериков), которые, соединяясь друг с другом, образуют сложную гидрологическую сеть [3]. Русло Ахтубы находится выше русла Волги, поэтому вода стекает по ерикам, наполняя озера и протоки (микроерики) водой, определяя гидрологический режим ВАП [5; 11]. Основным системообразующим фактором ландшафтов Волго-Ахтубинской поймы является гидрологический режим ее водотоков и водоемов [1].

Динамика поступления воды в пойму (гидрограф  $Q(t)$ ) через плотину Волжской ГЭС характеризуется меженными периодами (обычно с июля по март) и периодом весеннего половодья (апрель — июнь). Паводковый характер обусловлен таянием снега в верховьях Волги и, соответственно, повышенным количеством талой воды. Именно в это время происходит наполнение большинства водных объектов поймы. С сооружением каскада гидроэлектростанций на Волге и, в особенности, Волжской ГЭС, сток стал зарегулированным, и зависит от работы гидротехнических сооружений [2].

Главная проблема выбора режима попуска воды  $Q(t)$  обусловлена необходимостью согласовать требования различных сторон. Энергетикам выгоден ранний сброс, не превышающий 16 тыс. м<sup>3</sup>/с, экологи заинтересованы в позднем сбросе, достигающем 30 тыс. м<sup>3</sup>/с. МЧС заинтересовано в сбросе, не превышающем 27 тыс. м<sup>3</sup>/с. Для

решения задачи построения оптимального гидрографа необходим инструмент для моделирования динамики затопления ВАП в зависимости от внешних условий [6; 9]. В данной работе рассмотрено влияние испарения и инфильтрации на гидрологический режим ВАП.

### 1. Математическая модель и ее численная реализация

Уравнения мелкой воды активно используются для решения самых различных задач динамики поверхностных вод [10]. Уравнения движения мелкой воды в дифференциальной форме (уравнения Сен-Венана) представлены ниже:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \vec{\nabla}_{\perp} (H\vec{U}) = q, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(H\vec{U})}{\partial t} + \vec{\nabla}_{\perp} (H\vec{U} \otimes \vec{U}) = -gH\vec{\nabla}_{\perp}\eta + H\vec{F}, \quad (2)$$

где  $H = H(x, y, t)$  — расстояние от дна  $z = b(x, y)$  до возмущенной поверхности жидкости  $\eta(x, y, t) = b(x, y) + H(x, y, t)$ . Функция источников и стоков жидкости  $q$  складывается из гидрографа  $Q(t)$  и потерь на испарение и инфильтрацию  $\sigma(t)$ ,  $\vec{F}$  — сила придонного трения,  $\vec{U} = (u_x, u_y, u_z)$  — скорость «жидких частиц»,  $g$  — ускорение свободного падения. Численное решение уравнений Сен-Венана проверялось с использованием схемы cSPH-TVD (combined SPH-TVD). Подробное изложение численного метода интегрирования системы уравнений (1)–(2) приведено в работах [4; 7; 8].

### 2. Моделирование паводковых явлений в Волго-Ахтубинской пойме

Была проведена серия экспериментов для условий паводка 2011 года (рис. 1). Модельный гидрограф описывает все характерные особенности паводка. В течение 16 суток наблюдалось увеличение попуска воды вплоть до 25 тыс. м<sup>3</sup>/с. Далее величина попуска не изменялась на протяжении 5 суток (пик половодья или сельскохозяйственная полка). После уменьшения сброса в течение 10 суток до стационарного значения  $Q = 14$  тыс. м<sup>3</sup>/с в течение 6 суток моделировалась рыбохозяйственная полка. Завершающим этапом паводка ВАП являлось плавное уменьшение попуска в течение 13 суток до 5000 м<sup>3</sup>/с (летний межень).

Обсудим характер зависимости площади затопления от потери воды, связанной с испарением и инфильтрацией (рис. 2). Видно, что без учета испарения и инфильтрации проводить расчеты некорректно, поскольку площадь затопления сохраняется, несмотря на уменьшение  $Q(t)$ . Указанный эффект обусловлен наполнением всех низменностей в ВАП и сохранением объема воды в них без изменений.

Учет потерь воды на испарение/инфильтрацию  $\sigma > 0$  качественно изменяет характер затопления, быстро уменьшая площадь, занятую водой, после снижения величины  $Q(t)$ . Полученные оценки сделаны в предположении  $\sigma = \text{const}$ . Такой подход не позволяет выявить особенности поведения жидкости на локальных участках местности, показывая лишь общую картину. Для уточнения результатов необходимо использовать модели, учитывающие свойства подстилающей поверхности и метеорологический режим.

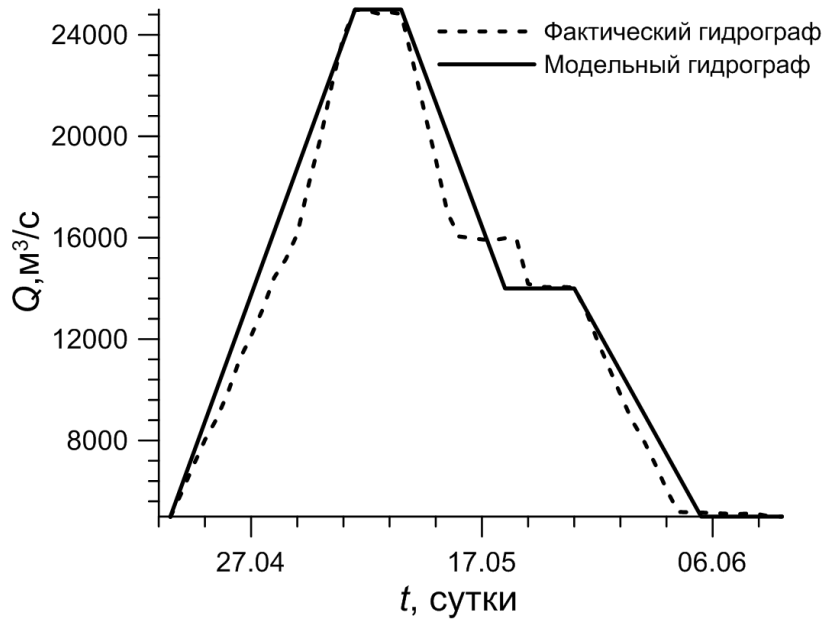


Рис. 1. Гидрографы 2011 года

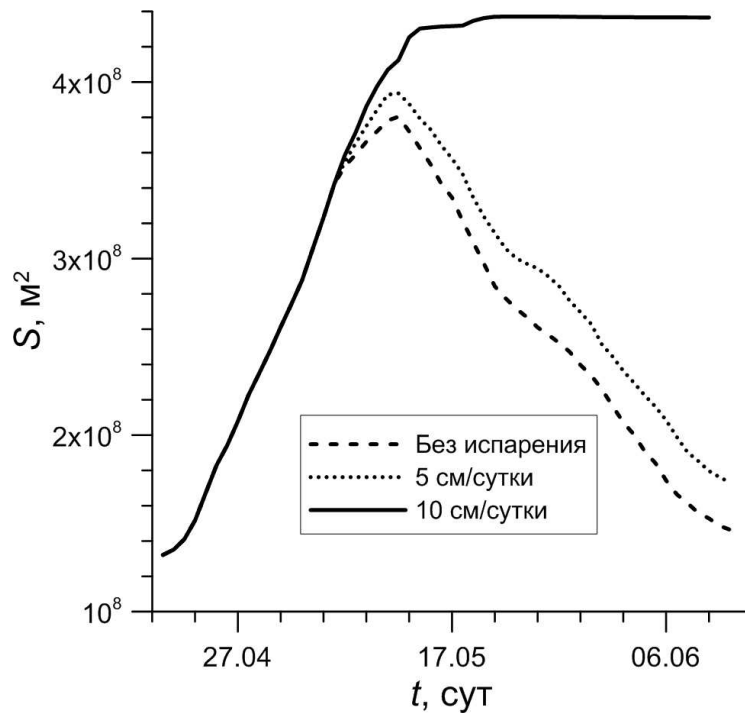


Рис. 2. Динамика изменения площади затопления северного участка Волго-Ахтубинской поймы во время паводка 2011 г. для случаев  $\sigma = 0, 5 \text{ см/сут}, 10 \text{ см/сут}$

### 3. Данные дистанционного зондирования Земли

Построим зоны затопления с использованием материалов дистанционного зондирования, полученных космическим аппаратом LandSat 7 [12]. Основным его инструментом является многоспектральный оптико-механический сканирующий радиометр ETM+,

позволяющий получать снимки с разрешением 30 м в 8 спектральных диапазонах (оптическом, ближнем инфракрасном (VNIR), коротковолновом инфракрасном (SWIR) и тепловом инфракрасном диапазонах (TIR)). Спутниковые данные Landsat 7 ETM+ находятся в свободном доступе на сервере геологической службы США [13]. За 2011 г. имеется 32 спутниковых снимка территории Волго-Ахтубинской поймы, один из которых (31 мая) приходится на период окончания паводка.

Данные ДЗЗ были автоматически дешифрованы при помощи векторизатора EasyTrace. В результате из спутникового изображения была получена маска гидрографической сети — двухцветный растровый снимок северной части Волго-Ахтубинской поймы (рис. 3). На изображении видны параллельные светлые полосы — результат механической поломки прибора, отвечающего за компенсацию продольного движения спутника Landsat 7. Это привело к тому, что некоторые участки земной поверхности снимались дважды, а некоторые пропускались [12].

Обработка гистограммы растрового изображения (рис. 3) позволила рассчитать площадь затопления Волго-Ахтубинской поймы (см. таблицу).

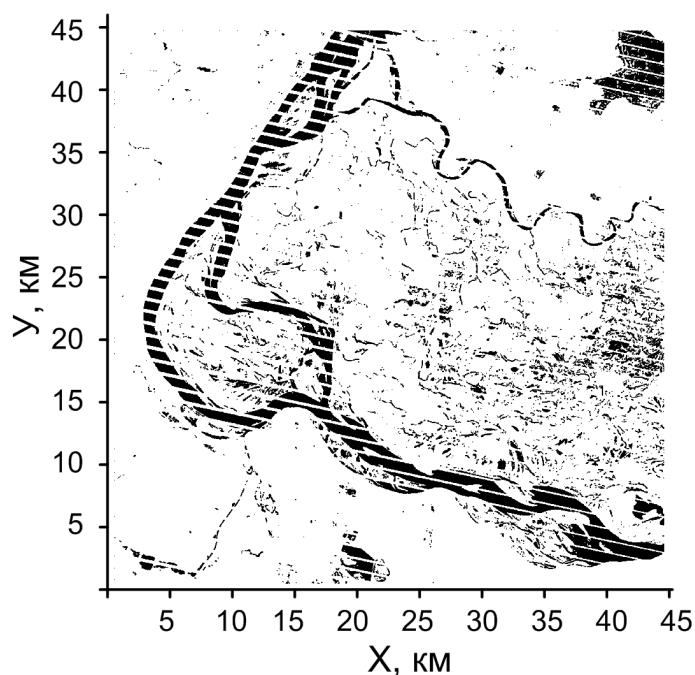


Рис. 3. Обработанный растр спутникового снимка с выделенными водными объектами на 31 мая 2011 года

**Площадь затопления северного участка ВАП, км<sup>2</sup>**

Данные ДЗЗ	Данные компьютерного моделирования		
	$\sigma = 10$ см/сут	$\sigma = 5$ см/сут	$\sigma = 0$
262,0	228,0	265,6	436,9

Для сравнения на рисунке 4 показано распределение воды в ВАП по результатам нашего численного моделирования по состоянию на 31 мая 2011 года. В таблице приведены площади затопления по результатам расчетов. Для используемой цифровой модели рельефа наилучшее согласие с данными ДЗЗ достигается при значении  $\sigma = 5$  см/сутки.

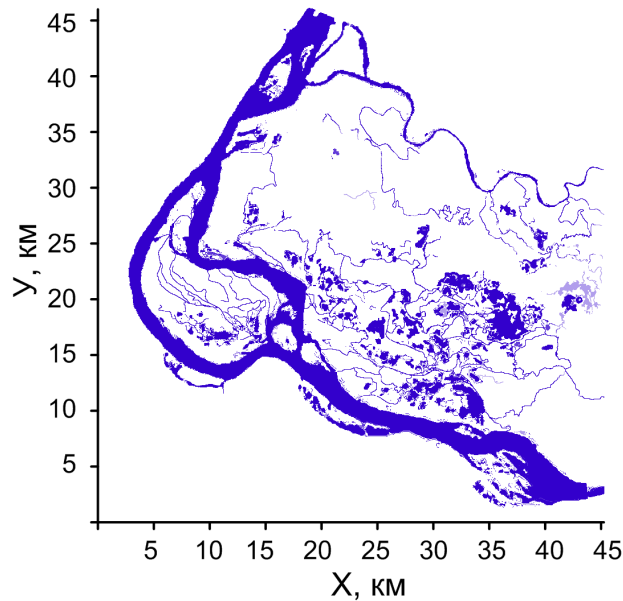


Рис. 4. Результат компьютерного моделирования, соответствующий паводковой ситуации 31 мая 2011 года

### Заключение

Проведенные численные эксперименты показывают важную роль испарения и инфильтрации при изучении динамики поверхностных вод в пойме. С использованием данных дистанционного зондирования получены ограничения на среднее значение потери воды в ВАП  $\sigma \simeq 3 \div 7$  см/сут.

### ПРИМЕЧАНИЕ

<sup>1</sup> Работа поддержана грантами РФФИ № 11-07-97025, 11-05-97044, ФЦП (тема НИР «Разработка фазометрической информационно-навигационной системы»). Авторы благодарны НИВЦ МГУ за предоставленную возможность проводить расчеты на суперкомпьютере «Ломоносов».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеева, Т. А. Экологическое состояние водоемов Волго-Ахтубинской поймы / Т. А. Алексеева // Вестн. Астрах. гос. техн. ун-та. — 2007. — № 4(39). — С. 121–124.
2. Анализ экологических последствий эксплуатации Волгоградского водохранилища для сохранения биоразнообразия основных водно-болотных территорий Нижней Волги / И. В. Землянов, О. В. Горелиц, А. Е. Павловский [и др.] // Отчет о НИР ФГУ «ГО-ИН». — М., 2010. — 675 с.
3. Держинская, И. С. Анализ состояния биоразнообразия северо-западной части Волго-Ахтубинской поймы / И. С. Держинская, А. И. Комаров, В. Е. Афанасьев // Вестн. Астрах. гос. техн. ун-та. — 2005. — № 3 (26). — С. 179–184.
4. Еремин, М. А. Конечно-объемная схема интегрирования уравнений гидродинамики / М. А. Еремин, А. В. Хоперсков, С. А. Хоперсков // Изв. Волгогр. гос. техн. ун-та.

- Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах». — 2010. — Т. 6, № 8. — С. 24–27.
5. Особо охраняемые природные территории Волгоградской области / А. В. Брылев, Н. О. Рябина, Е. В. Комиссарова [и др.] — Волгоград : Альянс, 2006. — 256 с.
  6. Прямое моделирование динамики поверхностных вод на территории Волго-Ахтубинской поймы / А. В. Хоперсков, С. С. Храпов, А. В. Писарев, И. А. Кобелев, И. Г. Кудина // Суперкомпьютерные технологии в науке, образовании и промышленности / под ред. акад. В. А. Садовниченко, акад. Г. И. Савина, чл.-кор. РАН Вл. В. Воеводина. — М. : Изд-во Моск. ун-та, 2012. — С. 177–181.
  7. Храпов, С. С. Моделирование динамики поверхностных вод: монография / С. С. Храпов, А. В. Хоперсков, М. А. Еремин. — Волгоград : Изд-во ВолГУ, 2010. — 132 с.
  8. 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. — С. 282–297.
  9. 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 // Вестн. ВолГУ. Сер. 1. Мат. Физ. — 2008. — № 11. — С. 201–207.
  10. Mathematical and numerical modelling of shallow water flow / V. I. Agoshkov, D. Ambrosi, V. Pennati, A. Quarteroni, F. Saleri // Computational Mechanics. — 1993. — **11**. — № 5–6. — P. 280–299.
  11. Numerical and empirical study of annual flood dynamics in the Volga-Akhtuba floodplain / L. M. de Bruijn, M. A. Crone, L. V. van den Bosch, O. V. Filippov, H. Middelkoop // NCR-days 2007: a sustainable river system?!, Nov. 15–16, 2007, Oosterbeek, The Netherlands.
  12. The Landsat program. Landsat homepage. — Electronic text data. — Mode of access: <http://landsat.gsfc.nasa.gov>.
  13. U.S. Geological Survey's Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. Earth Explorer Home Page. — Electronic text data. — Mode of access: <http://earthexplorer.usgs.gov>.

### THE ROLE OF INFILTRATION AND EVAPORATION IN THE FLOODING DYNAMICS OF THE VOLGA-AKHTUBA FLOODPLAIN

*A.V. Pisarev, S.S. Khrapov, A.A. Voronin, T.A. Dyakonova, E.A. Tsirkova*

Computer simulation of the surface water dynamics was performed taking into account evaporation and infiltration. Experimental results were compared with data of field observations (LandSat 7) during the spring flood.

**Key words:** *Volga-Akhtuba Floodplain, shallow water equations, evaporation of water, Geographic Information Systems, Remote Sensing.*