



УДК 556.53
ББК 26.222.5

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ЗАТОПЛЕНИЯ ВОЛГО-АХТУБИНСКОЙ ПОЙМЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РЕЖИМОВ ИСПАРЕНИЯ И ИНФИЛЬТРАЦИИ¹

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. м³/с, экологи заинтересованы в позднем сбросе, достигающем 30 тыс. м³/с. МЧС заинтересовано в сбросе, не превышающем 27 тыс. м³/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. м³/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. м³/с в течение 6 суток моделировалась рыбохозяйственная полка. Завершающим этапом паводка ВАП являлось плавное уменьшение попуска в течение 13 суток до 5000 м³/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.

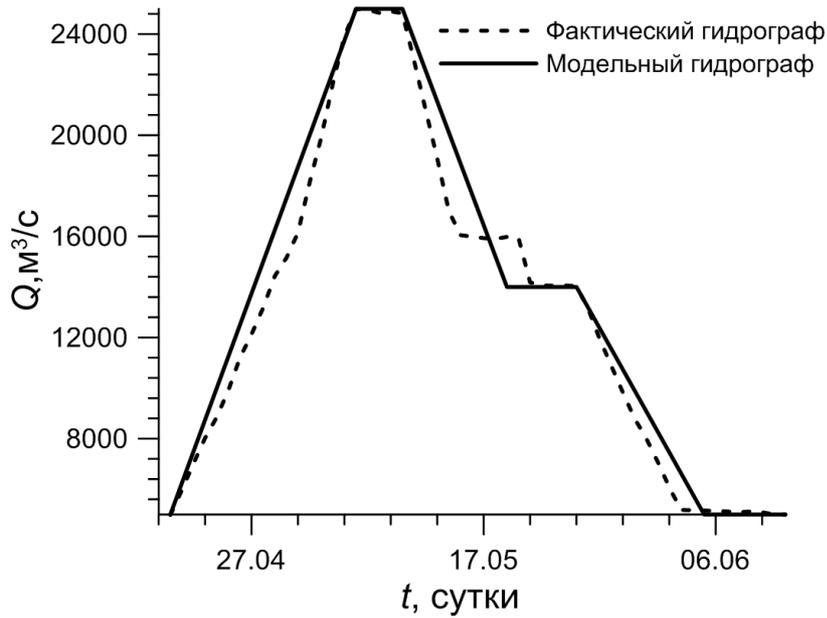


Рис. 1. Гидрографы 2011 года

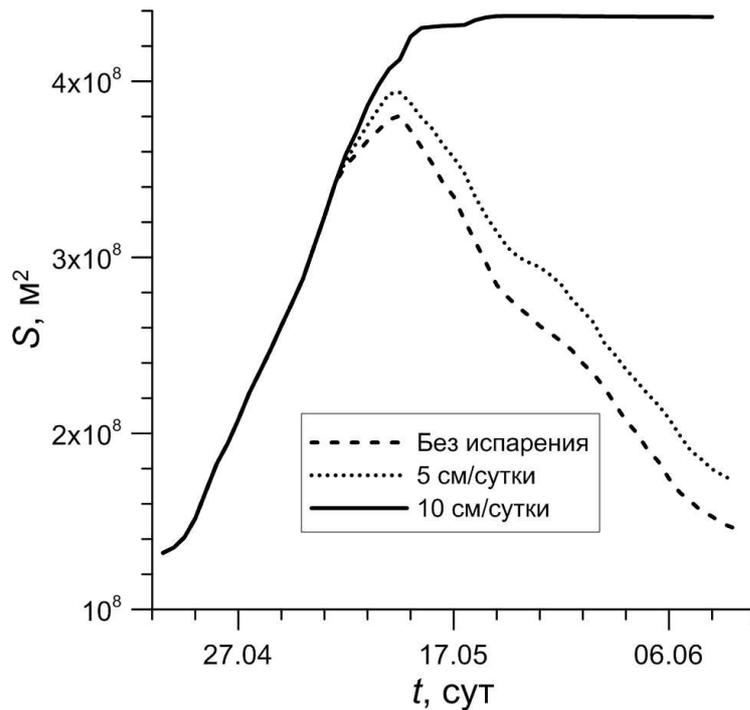


Рис. 2. Динамика изменения площади затопления северного участка Волго-Ахтубинской поймы во время паводка 2011 г. для случаев $\sigma = 0, 5 \text{ см/сут}, 10 \text{ см/сут}$

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).

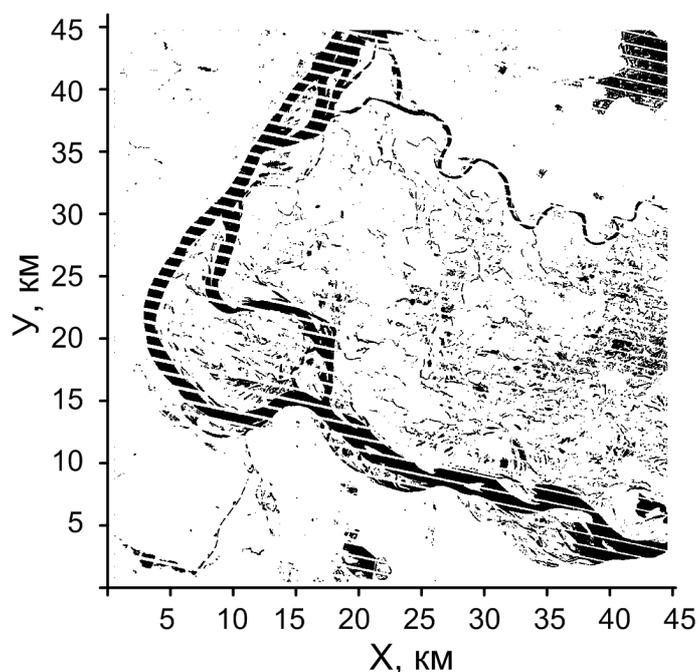


Рис. 3. Обработанный растр спутникового снимка с выделенными водными объектами на 31 мая 2011 года

Площадь затопления северного участка ВАП, км²

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.

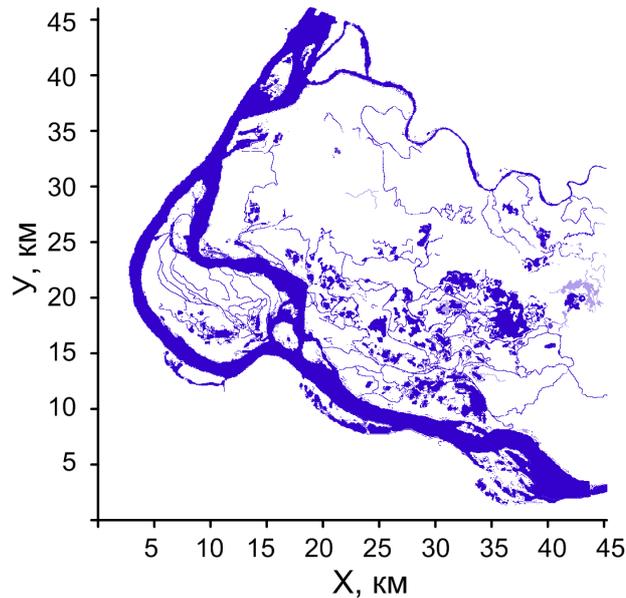


Рис. 4. Результат компьютерного моделирования, соответствующий паводковой ситуации 31 мая 2011 года

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

¹ 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. Рябинина, 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.*