

2. Беллман Р. Прикладные задачи динамического программирования / Р. Беллман, С. Дрейфус. – Москва : Наука, 1965.
3. Самаров К. Л. Задачи с решениями по высшей математике и математическим методам в экономике : учеб. пос. / К. Л. Самаров, А. С. Шапкин. – Москва : Дашков и Ко, 2007.
4. Экономико-математическое моделирование: учеб. / под общ. ред. И. Н. Дрогобыцкого. – Москва : Экзамен, 2004.

References

1. Akulich I. L. Matematicheskoe programmirovaniye v primerah i zadachah [Mathematical programming in examples and tasks]. Moscow: Vysshaya shkola, 1986.
2. Bellman R., Dreyfus S. Prikladnyye zadachi dinamicheskogo programmirovaniya [Applied problems of dynamic programming]. Moscow: Nauka, 1965.
3. Samarov K. L., Shapkin A. S. Zadachi s resheniyami po vysshej matematike i matematicheskim metodam v jekonomike: ucheb. pos. [Tasks with decisions on higher mathematics and mathematical methods in economics: manual]. Moscow: Dashkov i Ko, 2007.
4. Jekonomiko-matematicheskoe modelirovaniye [Economic-mathematical modeling]: ucheb. Moscow: Jekzamen, 2004.

УДК 519.63

ИМИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ: ВЛИЯНИЕ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ

Воронин Александр Александрович, доктор физико-математических наук
Елисеева Мария Владимировна, аспирант
Писарев Андрей Владимирович, старший преподаватель
Хоперсков Александр Валентинович, доктор физико-математических наук
Храпов Сергей Сергеевич, кандидат физико-математических наук

Волгоградский государственный университет
400062, Россия, г. Волгоград, проспект Университетский, 100
E-mail: voronin@volsu.ru, kwilks@yandex.ru, andrew_pisarev@mail.ru, khoperskov@gmail.com, xss-ip@gmail.com

Построено семейство цифровых моделей рельефа (ЦМР) северной части территории Волго-Ахтубинской поймы для изучения чувствительности численной модели, описывающей динамику поверхностных вод в период весеннего паводка. В основе цифрового рельефа местности лежат данные дистанционного зондирования Земли. В качестве базовой матрицы высот использовались спутниковые данные SRTM и ASTER. Была проведена актуализация ЦМР с помощью измерений в пойме с применением геоинформационных технологий обработки пространственных данных. ЦМР различаются масштабами изменений рельефа, включающих систематическую и хаотические составляющие. По результатам численного гидродинамического моделирования построены зависимости площадей затопления от времени для заданного гидрографа Волжской плотины ГЭС, включающего две основные фазы весеннего паводка – в интересах сельского хозяйства (сельскохозяйственная полка) и специальный пуск воды в интересах рыбного хозяйства (рыбохозяйственная полка). Помимо прямого гидродинамического моделирования предложен численно-аналитический подход, позволяющий упростить решение задач оптимизации и управления

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

гидрологическим режимом. Исследована зависимость динамики затопления поймы от структуры гидросистемы, степени ветвления русел ериков и протоков. Предложены механизмы увеличения площади затопления Волго-Ахтубинской поймы в период весеннего половодья за счет дополнения природной гидросистемы искусственными каналами.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, гидрологический режим, гидрограф, уравнения Сен-Венана, цифровая модель рельефа, Волго-Ахтубинская пойма, геоинформационные технологии.

SIMULATION MODELS OF SURFACE WATER DYNAMICS USING REMOTE SENSING DATA: EFFECT OF TERRAIN

Voronin Aleksandr A., D.Sc. (Physics and Mathematics)

Eliseeva Maria V., post-graduate student

Pisarev Andrey V., Senior Lecturer

Khoperskov Aleksandr V., D.Sc. (Physics and Mathematics)

Khrapov Sergey S., Ph.D. (Physics and Mathematics)

Volgograd State University

100 Universitetsky av., Volgograd, 400062, Russia

E-mail: voronin@volsu.ru, kwilks@yandex.ru, andrew_pisarev@mail.ru,
khoperskov@gmail.com, xss-ip@gmail.com

The family of digital terrain models (DTM) of the northern part of the Volga-Akhtuba floodplain is constructed to study the sensitivity of numerical model describing surface water dynamics during spring floods. Earth remote sensing data are the basis of digital terrain. We used satellite SRTM and ASTER data as a basic height matrix. DTM actualization was carried out by measuring the floodplain with the use of GIS technologies for processing spatial data. DTMs differ in the scales of terrain changes, including the systematic and random components. According to the results of numerical hydrodynamical modeling we have constructed the time dependencies of flood areas for the given hydrograph of the Volga hydroelectric dam. It includes two main phases of spring flood: in the interests of agriculture (agricultural shelf) and special water releases for fisheries (fishery shelf). In addition to the direct hydrodynamical modeling, we proposed a numerical-analytical approach, which allows to simplify the solution of optimization and hydrological regime control problems. The dependence of flooding on the structure of hydraulic system, the degree of branching shallow channels and ducts is studied. We have proposed the mechanism to increase the area of flooding of the Volga-Akhtuba floodplain during the spring flood at the expense of the natural extension of the hydraulic system by artificial canals.

Keywords: Computer modeling, Hydrological mode, Hydrograph, Saint-Venant equations, Digital terrain model, The Volga-Akhtuba floodplain, GIS technologies.

Сложившийся гидрологический режим в Волго-Ахтубинской пойме (ВАП) привел к существенным и во многом необратимым негативным изменениям природы ВАП [1, 2]. Негативное воздействие на гидрологический режим ВАП оказывает также изменение рельефа ее поверхности вследствие мелиорации и активной урбанизации, в частности, строительства дорог и дамб. Практической задачей является проведение экспертизы застроек на территории ВАП и единственным подходом является проведение имитационного моделирования.

Важнейшим инструментом управления гидрологическим режимом ВАП представляется построение оптимального гидрографа. Метод построения оптимального гидрографа должен обеспечивать баланс интересов основных акторов и центров влияния.

В рамках развиваемого подхода в основе имитационных моделей лежит численное интегрирование уравнений динамики поверхностных вод [3, 5, 6]. Проведены серии расчетов площади затопления и объема воды в пойме для различных рельефов местности $b(x, y)$, отличающихся в пределах неопределенности $\Delta b(x, y)$ для исходных данных дистанционного зондирования по высоте, положенных в основу построения цифровой модели рельефа (ЦМР).

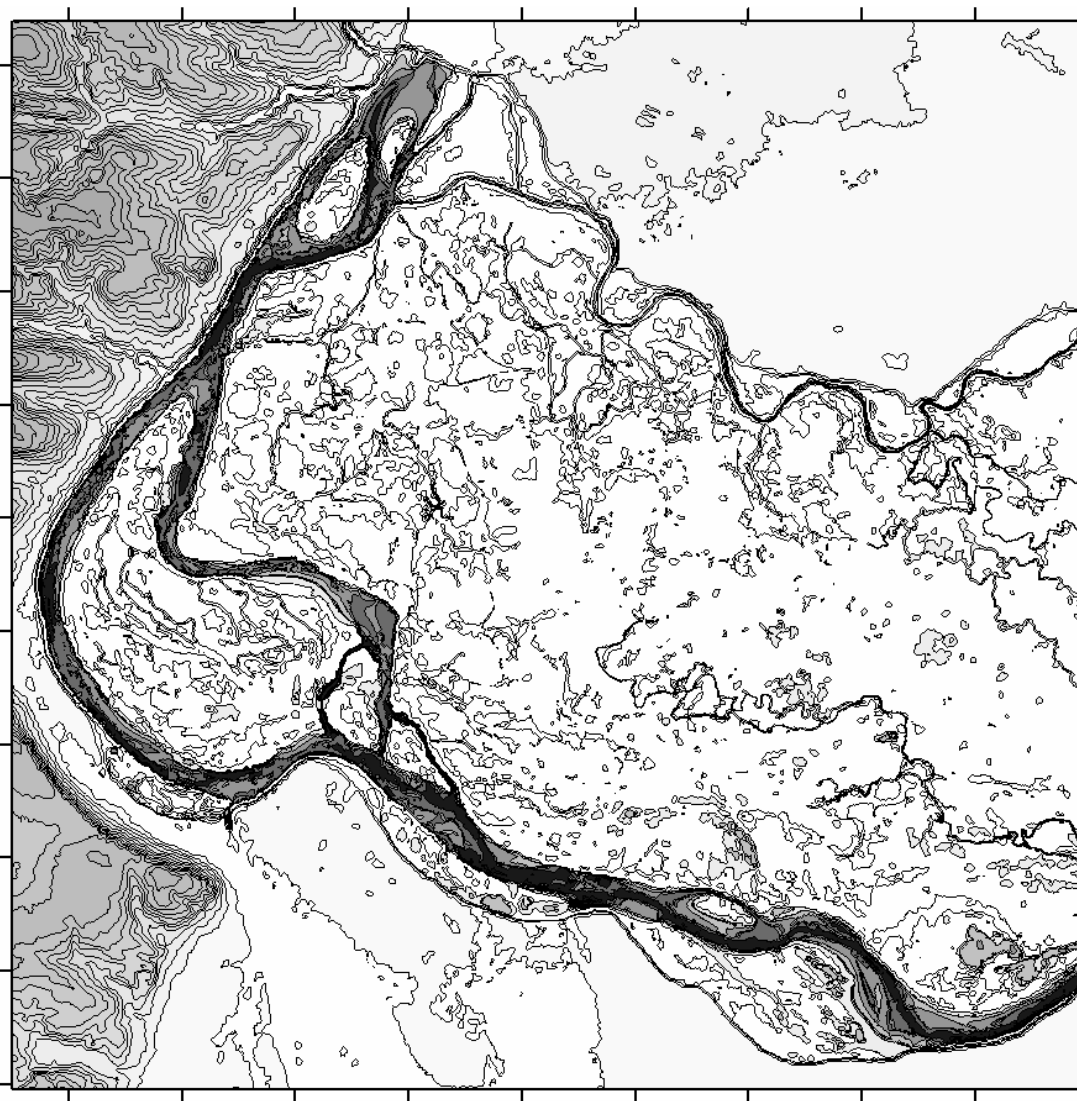


Рис. 1. Цифровая модель рельефа $B^{(0)}$ (область $45 \text{ км} \times 45 \text{ км}$)

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

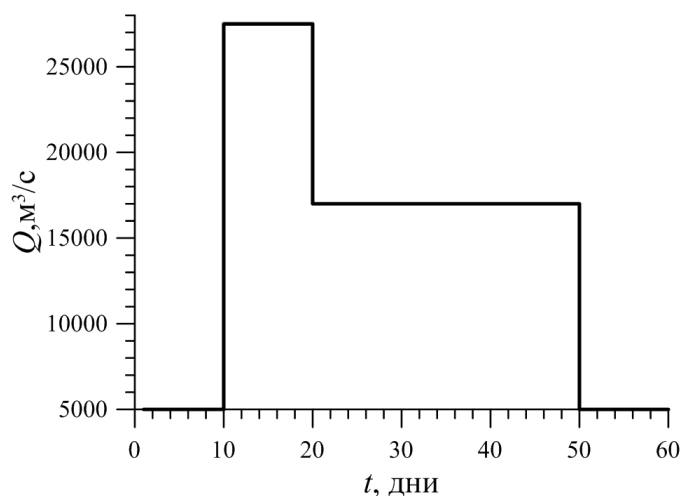


Рис. 2. Модельный гидрограф, определяющий мощность потока воды через плотину Волжской ГЭС

Гидрограф описывает две основные стадии весеннего попуска воды: сельскохозяйственную полку с $Q = 27.5$ тыс. м³/с и рыбную полку с $Q = 17$ тыс. м³/с.

Численная модель. Ограничимся рассмотрением динамики жидкости в приближении мелкой воды:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu_x}{\partial x} + \frac{\partial hu_y}{\partial y} = q, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} = -g_0 \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{2} \lambda u_x \sqrt{u_x^2 + u_y^2} - 2\Omega_z u_y, \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} = -g_0 \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{2} \lambda u_y \sqrt{u_x^2 + u_y^2} + 2\Omega_z u_x, \quad (3)$$

где $h(x, y, t)$ – толщина слоя воды, $u_x(x, y, t)$, $u_y(x, y, t)$ – компоненты скорости, $b(x, y)$ – функция рельефа, $\lambda = 2g_0 m^2 / h^{4/3}$ – коэффициент гидравлического трения, m – коэффициент шероховатости по Манингу, Ω_z – проекция угловой скорости вращения Земли, $\eta(x, y, t) = h(x, y, t) + b(x, y)$ – уровень свободной поверхности жидкости, $q(x, y, t)$ – функция источников и стоков, g_0 – ускорение свободного падения.

Система уравнений Сен-Венана интегрировалась с использованием численного алгоритма с SPH-TVD [9] на декартовой сетке с $\Delta x = 20$ м, $\Delta y = 20$ м с учетом цифровой модели рельефа (ЦМР), построенной с использованием специализированной геоинформационной системы EcoGIS-Simulation и ГИС Карта 2008. Программный пакет для интегрирования системы уравнений (1) – (3) является параллельной версией модели, описанной в [8]. Важнейшим фактором, определяющим адекватность результатов моделирования является качество ЦМР $b_{ij} = b(x_i, y_j)$, $i = 1, 2, \dots, N_x$, $j = 1, 2, \dots, N_y$.

В основе построения ЦМР лежат данные дистанционного зондирования SRTM, ASTER, методы их актуализации с использованием GPS-навигации и геоинформационные технологии обработки пространственных данных [10]. Поскольку точность вертикальной коор-

динаты местности из данных ДЗЗ не превышает 0,5 м, то представляет интерес рассмотрение влияния неопределенности Δb при использовании ЦМР на результаты динамики поверхностных вод. С этой целью была построена серия цифровых моделей рельефа $B^{(m)} = \{b_{ij}^m\}$, различающихся в пределах 0,5 м на территории северной части ВАП. Был выбран базовый вариант ЦМР $B^{(0)}$, который за счет дополнительной обработки изменялся тем или иным способом $b_{ij}^m = b_{ij}^0 + \Delta b_{ij}^m$, $|\Delta b_{ij}^m| \leq 0.5$ м. В частности, расчеты проводились на различных сериях ЦМР, отличающихся от базового $B^{(0)}$:

I. Методом сглаживания горизонталей рельефа с использованием аппроксимации кривой Безье ($B^{(1)}$) [4].

II. С использованием аппроксимации огибающим сплайном горизонталей рельефа ($B^{(2)}$).

III. Применением сглаживающего сплайна с различной степенью «спиливания» углов горизонталей 15 % ($B^{(3)}$), 30 % ($B^{(4)}$), 50 % ($B^{(5)}$).

IV. Величины Δb_{ij}^m являются последовательностью равномерно распределенных псевдослучайных чисел на интервале $-\Delta b_{\max}^m \leq \Delta b_{ij}^m \leq \Delta b_{\max}^m$ (метод Random). Построено 6 ЦМР с $\Delta b_{\max} = 0.1, 0.45, 0.55$ (м) соответственно с неизменным рельефом русел гидросистемы ($B^{(6)} - B^{(8)}$) и с изменением русел ($B^{(9)} - B^{(11)}$) по методу Random.

V. Серия рельефов со смещением среднего уровня относительно базового рельефа $B^{(0)}$, построенная аналогично серии IV, но псевдослучайные числа располагаются на интервалах $\Delta b_{\min}^m \leq \Delta b_{ij}^m \leq \Delta b_{\max}^m$ и $|\Delta b_{\min}^m| \neq |\Delta b_{\max}^m|$. В частности, расчеты велись на рельефах $B^{(12)}$ с $\Delta b_{\min}^{(12)} = -0,5$ м, $\Delta b_{\max}^{(12)} = 0,25$ м; $B^{(13)}$ с $\Delta b_{\min}^{(13)} = -0,25$ м, $\Delta b_{\max}^{(13)} = 0,5$ м.

Результаты численного моделирования. Для сравнения результатов моделирования (рис. 3) на различных ЦМР расчеты проводились при тождественных условиях для гидрографа, изображенного на рис. 2, ограничившись заданием постоянного значения стока воды, обусловленного испарением и фильтрацией на уровне 5 см/сут [7].

Сравним площади затопления в пойме $S^{(m)}$ для различных ЦМР $B^{(m)}$. На рис. 4, 5 приведены зависимости относительной площади затопления для различных рельефов $s(t) = S^{(m)}(t)/S_{\text{вап}}$ ($S_{\text{вап}}$ – площадь северной части ВАП). При любых методах сглаживания ЦМР ($B^{(1)} - B^{(5)}$) интенсивность проникновения воды в пойму заметно усиливается и площадь затопления в модели может увеличиваться на 20 %.

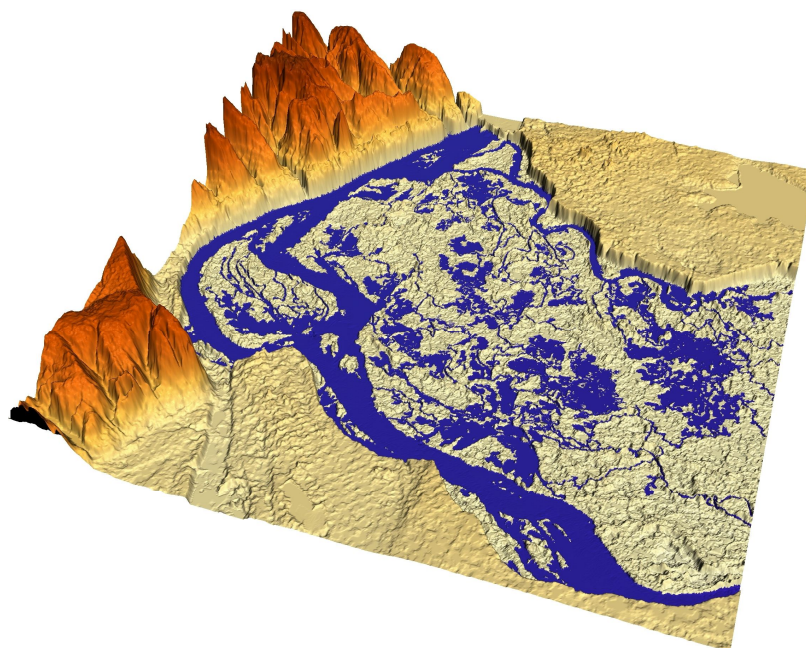


Рис. 3. Характерное распределение воды в пойме во время весеннего паводка

В моделях с $B^{(6)} - B^{(8)}$ динамика поверхностных остается практически неизменной. Таким образом, изменения в равнинной части ВАП, не затрагивающие русел ериков и протоков, не способны повлиять на характер весеннего затопления. Если при построении ЦМР случайным образом менять и русла гидросистемы (модели $B^{(9)} - B^{(13)}$), то картина течения изменяется. Площадь затопления увеличивается за счет появления большого числа дополнительных протоков и увеличения степени ветвления русел гидросистемы. Эти же факторы приводят к сглаживанию зависимости $S(t)$ на малых временных интервалах (рис. 5).

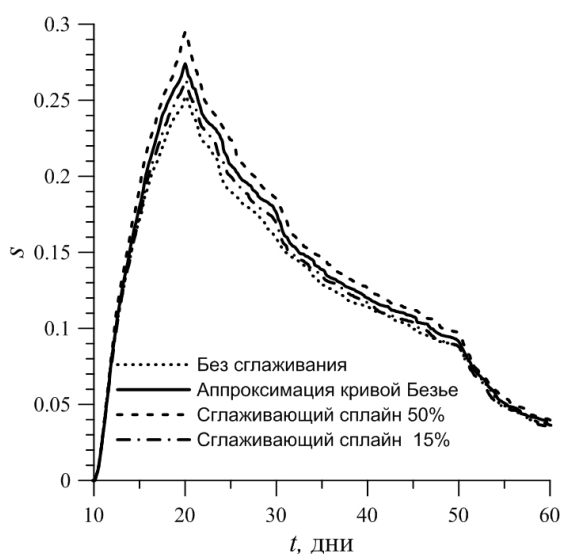


Рис. 4. Зависимости $S(t)$ для серий ЦМР, построенных на основе сглаживания

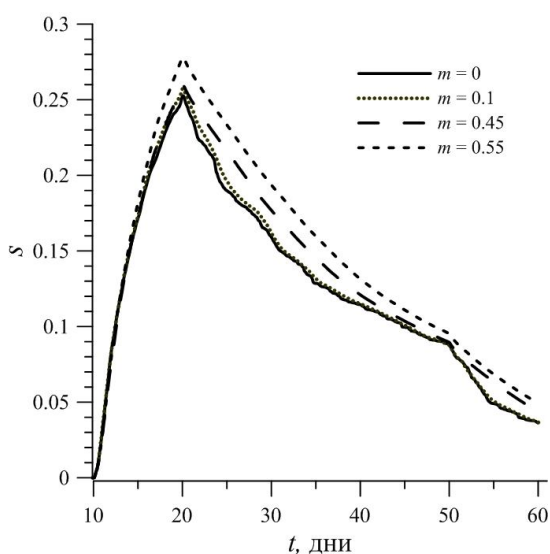


Рис. 5. Зависимости $S(t)$ для серий ЦМР с использованием метода Random

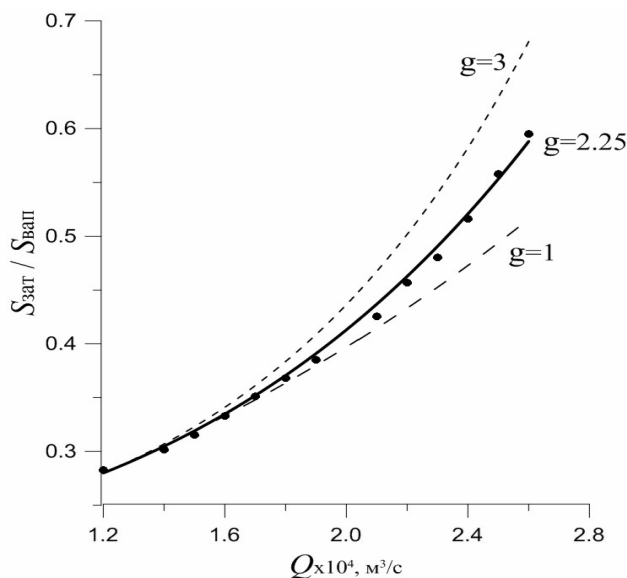
Модель затопления на основе аналитической аппроксимации рельефа. Прямое гидродинамическое моделирование чрезвычайно трудоемко для решения задач оптимизации и управления гидрологическим режимом. Более рациональным представляется численно-аналитический подход, при котором эти задачи сначала решаются в рамках аналитических аппроксимаций, допускающих применение аппарата условной оптимизации и оптимального управления, а затем полученные решения уточняются гидродинамическими расчетами. Корректность аналитических аппроксимаций должна подтверждаться принятой точностью совпадения с результатами гидродинамических расчетов в рабочем диапазоне параметров.

Для моделирования аналитической зависимости $S_{\text{зат}}(Q(t)) = \max_t S(h(Q(t_0, t)))$ на основе визуального анализа картографических данных были созданы двухзональная модель рельефа северной части ВАП (низменности и холмы с весами площадей соответственно μ_1 , и μ_2 и высотой холмов H) и двухуровневая модель ее гидросистемы (магистральная – крупные проточные русла и локальные – ветвящиеся ерики, моделируемые бинарными деревьями со средним числом ветвлений g , длиной каждого русла L и уклоном дна α , N – число локальных гидросистем, l – максимальная дальность разлива вод из каждого звена бинарного дерева; h – высота превышения уровня паводковых вод над меженным в магистральной гидросистеме); $S_{\text{зат}}(0,0)$ – площадь ериков и озер. В рамках этих моделей площадь затопления можно записать в виде легко вычисляемой квадратуры:

$$S_{\text{зам}}(h(Q)) = S_{\text{зам}}(0,0) + \int_0^{h/\alpha} \theta(x) dx, \quad \theta(x) = N e^{\gamma x} (\mu_1 + \mu_2(h - \alpha x)/H), \quad (4)$$

$$\gamma = 0.0001 \cdot g \ln 2, \quad h(Q(t_0, t)) = (Q(t_0, t) - Q_0)/d,$$

где $Q_0 = 12000 \text{ (м}^3/\text{с)}$ соответствует началу затопления территории ВАП, величина $d = 4200 \text{ (с/м}^2)$ отвечает наилучшей аппроксимации функцией $h(Q)$ данных замеров превышения уровня р. Ахтуба над меженным на гидропосту п. Средняя Ахтуба в 2010 г.



$$\begin{aligned} \mu_1 &= 0.7 \\ \mu_2 &= 0.3 \\ S_{\text{зат}}(0,0) &= 2.1 \cdot 10^8 \text{ м}^2 \\ N &= 32 \\ l &= 1000 \text{ м} \\ \alpha &= 0.0006 \\ H &= 4 \text{ м} \\ L &= 6000 \text{ м} \\ N &= 32 \end{aligned}$$

Рис. 6. Затопление территории ВАП стационарным гидрографом при различных значениях параметра g

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Варьирование параметров выражения (4) показало, что наибольшая чувствительность имеет место в отношении величины показателя ветвления ериков локальных гидросистем g . На рис. 6 приведены графики $S_{\text{зат}}(Q)$ для стационарного гидрографа $Q(t)=const$, указанных выше значений параметров и нескольких значений g . Точками отмечены величины, рассчитанные гидродинамическим моделированием. Заметим, что увеличение параметра g напрямую связано с рандомизацией рельефа ВАП, что согласуется с приведенными выше результатами гидродинамического моделирования и указывает путь повышения эффективности затопления территории ВАП за счет дополнения ее природной гидросистемы искусственными каналами.

Работа выполнена в рамках темы Минобрнауки «Системы мониторинга, диагностики и управления в экологии и медицине на основе информационных технологий и компьютерного моделирования», гранта РФФИ-11-07-97025-р_поволжье_a, ФЦП по направлению «Рациональное природопользование» (2012-1.1-12-000-2012-1296), авторы благодарны НИВЦ МГУ им. М.В. Ломоносова за возможность использования суперкомпьютера «Ломоносов».

Список литературы

1. Бармин А. Н. Индикация изменений условий среды в северной части ВАП при использовании шкал Л.Г. Раменского и DCA-ординации / А. Н. Бармин, В. Б. Голуб, М. М. Иолин, Г. З. Асанова // Геодезия и аэрофотосъемка. – 2010. – № 5. – С. 21–24.
2. Бармин А. Н. Геоботанический мониторинг луговых экосистем северной части Волго-Ахтубинской поймы / А. Н. Бармин, В. Б. Голуб, М. М. Иолин, И. С. Шарова // Геология, география и глобальная энергия. – 2011. – Т. 40, № 1. – 104–112.
3. Болгов М. В. Оценка водообеспечения района нижней Волги и ее дельты с помощью компьютерных моделей / М. В. Болгов, Г. Ф. Красножон, К. Ю. Шаталова // Современное состояние водных ресурсов Нижней Волги и проблемы их управления : мат-лы науч.-практ. конф. (18–19 ноября 2009, г. Астрахань). – Астрахань : АГУ, КаспНИРХ, АГТУ, 2009. – С. 27–31.
4. Геоинформационная система Карта 2011: руководство пользователя. – Ногинск : Панорама, 2012. – Режим доступа: <http://gistoolkit.ru/download/doc/mapguide.pdf>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
5. Хоперсков А. В. 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 ; под ред. В. А. Садовниченко, Г. И. Савина, Вл. В. Воеводина // Суперкомпьютерные технологии в науке, образовании и промышленности. – Москва : Изд-во Московского ун-та, 2012. – С. 177–181.
6. Храпов С. С. 4D-модели в задачах экологического моделирования: проектирование информационной системы / С. С. Храпов, И. А. Кобелев, А. В. Писарев, А. В. Хоперсков // Вестник ВолГУ. – 2011. – № 5. – С. 119–124. – (Сер. 10. Инновационные технологии).
7. Храпов С. С. Особенности динамики затопления Волго-Ахтубинской поймы в зависимости от режимов испарения и инфильтрации / С. С. Храпов, А. В. Писарев, А. А. Воронин, И. А. Кобелев // Вестник ВолГУ. – 2012. – Т. 15, № 1. – 5 с. – (Сер. 1. Математика. Физика).
8. Храпов С. С. Моделирование динамики поверхностных вод: монография / С. С. Храпов, А. В. Хоперсков, М. А. Еремин. – Волгоград : ВолГУ, 2010. – 132 с.
9. Храпов С. С. 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, № 1. – С. 282–297.
10. Шуваев Н. С. Использование материалов дистанционного зондирования Земли и географических информационных систем при исследовании русловых деформаций / Н. С. Шуваев, А. Н. Бармин, Е. А. Колчин // Геология, география и глобальная энергия. – 2010. – Т. 39, № 4. – С. 119–121.

References

1. Barmin A. N., Golub V. B., Iolin M. M., Asanova G. Z. Indikacija izmenenij uslovij sredy v severnoj chasti VAP pri ispol'zovanii shkal L.G. Ramenskogo i DCA-ordinacii [Indication of changes in

environmental conditions in the northern part of VAP using L.G. Ramensky scales and DCA-ordination]. *Geodezija i ajerofotosemka* [Surveying and Aerial Photography], 2010, no. 5, p. 21–24.

2. Barmin A. N., Golub V. B., Iolin M. M., Sharova I. S. Geobotanicheskiy monitoring lugovykh je-kosistem severnoj chasti Volgo-Ahtubinskoj pojmy [Geobotanical monitoring of meadow ecosystems of the northern part of the Volga-Akhtuba floodplain]. *Geologija, geografija i global'naja jenergiya* [Geology, Geography and Global Energy], 2011, vol. 40, no. 1, pp. 104–112.

3. Bolgov M. V., Krasnozhon G. F., Shatalova K. Yu. Ocenka vodoobespechenija rajona nizhnej Volgi i ee del'ty s pomow'ju komp'juternyh modelej [Assessment of water supply of the region of the Lower Volga and its delta by means of computer models]. *Sovremennoe sostojanie vodnyh resursov Nizhnej Volgi i problemy ih upravlenija* [The current state of water resources of the Lower Volga and problems of their control]: mat-ly nauch.-prakt. konf. (18–19 nojabrja 2009, g. Astrahan'). Astrakhan: AGU, KaspNIRH, AGTU, 2009, pp. 27–31.

4. Geoinformacionnaja sistema Karta 2011 [Geoinformation system Map 2011]: rukovodstvo pol'zovatelja. Noginsk: Panorama, 2012, Available at: <http://gistoolkit.ru/download/doc/mapguide.pdf>.

5. Hoperskov A. V., Hrapov S. S., Pisarev A. V., Kobelev I. A., Kudina I. G. Prjamoe modelirovanie dinamiki poverhnostnyh vod na territorii Volgo-Ahtubinskoj pojmy [Direct modeling of the dynamics of surface waters in the Volga-Akhtuba floodplain]. *Superkomp'juternye tehnologii v nauke, obrazovanii i promyshlennosti* [Supercomputer Technologies in Science, Education and Industry]. Moscow: Izd-vo Moskovskogo un-ta, 2012, pp. 177–181.

6. Hrapov S. S., Kobelev I. A., Pisarev A. V., Hoperskov A. V. 4D-modeli v zadachah jekologicheskogo modelirovanija: proektirovanie informacionnoj sistemy [4D-models in environmental modeling: design of the information system]. *Vestnik VolGU* [Bulletin of VolSU], 2011, no. 5, p. 119–124, (Ser. 10. Innovacionnye tehnologii).

7. Hrapov S. S., Pisarev A. V., Voronin A. A., Kobelev I. A. Osobennosti dinamiki zatopenija Volgo-Ahtubinskoj pojmy v za-visimosti ot rezhimov isparenija i infil'tracii [Dynamics of flooding of the Volga-Akhtuba floodplain depending on modes of evaporation and infiltration]. *Vestnik VolSU* [Bulletin of VolSU], 2012, vol. 15, no. 1. 5 p., (Ser. 1: Matematika. Fizika).

8. Hrapov S. S., Hoperskov A. V., Eremin M. A. Modelirovanie dinamiki poverhnostnyh vod: monografija [Modeling of surface water dynamics]. Volgograd: VolSU, 2010. 132 p.

9. Hrapov S. S., Hoperskov A. V., Kuz'min N. M., Pisarev A. V., Kobelev I. A. Chislennaja shema dlja modelirovanija dinamiki poverhnostnyh vod na osnove kombinirovannogo SPH-TVD-podhoda [The numerical scheme for modeling of surface water dynamics based on the combined SPH-TVD-approach]. *Vychislitel'nye metody i programmirovanie* [Numerical Methods and Programming], 2011, vol. 12, no. 1, pp. 282–297.

10. Shuvaev N. S., Barmin A. N., Kolchin E. A. Ispol'zovanie materialov distancionnogo zondirovanija Zemli i geograficheskikh informacionnyh sistem pri issledovanii ruslovyh deformatsij [The use of data of Earth remote sensing and geographic information systems in the study of channel deformation]. *Geologija, geografija i global'naja jenergiya* [Geology, Geography and Global Energy], 2010, vol. 39, no. 4, pp. 119–121.

УДК УДК 592: 51-76

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ПЕРЕДАЧИ
ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ НАСЕКОМЫМ С ПРИМЕНЕНИЕМ
МЕТОДА ВНЕШНЕЙ ФИЛЬТРАЦИИ**

Плешкова Юлия Александровна, аспирант

Лихтер Анатолий Михайлович, доктор технических наук, доцент

Астраханский государственный университет
414056, Россия, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а
E-mail: pjulia@pisem.net, Likhter@bk.ru