

почва // Сб. трудов всеросс. конф. «Математики – Алтайскому краю», 2018.

4. Хворова Л.А., Гавриловская Н.В. Адаптивная идентификация структуры динамических моделей продукционного процесса сельскохозяйственных растений // Известия АлтГУ, 2010. № 1-2(65).

## УДК 004.942

### Моделирование зон затопления в 2D модели

*Е.П. Жданов<sup>1</sup>, Е.М. Жданова<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>АГМУ, г.Барнаул; <sup>2</sup>Финансовый университет при  
Правительстве РФ (Алтайский филиал), г. Барнаул*

Моделирование паводковых вод рек актуально в связи с необходимостью научного обоснования принятия решений на региональном уровне по защите территорий от затопления. Для расчетов зон затопления в работе используется двумерная модель и исходные данные для моделирования - наблюдения за паводками реки Кан и ее притока - реки Илань, впадающей в р. Кан на территории г. Канска. Работа выполнена авторами в рамках государственного контракта № 245 в Центре инженерных технологий (г. Барнаул). Картометрической основой для проведения моделирования служит цифровая модель рельефа [1]. Исходная гидрологическая информация по величинам расходов воды рек для подлежащих моделированию режимов со стандартной повторяемостью 1, 3, 5, 10, 25 и 50 раз в 100 лет подготовлена сотрудниками центра. Для обеспечения приемлемой точности модели рассмотрены наиболее существенные участки рек и поймы, заливаемой паводковыми водами, без ухудшения качества модели. Размер ячеек расчетной сетки модели после оптимизации конфигурации удалось минимизировать до 7,4 м при их общем количестве 1 млн. ячеек. Для расчетов уровней воды в западной части города использовалась двумерная плановая программа TUFLOW в среде моделирования SMS (Surface-waterModelingSystem), строящая плановые двумерные модели потоков.

Данная среда моделирования имеет графический интерфейс и позволяет манипулировать данными, визуализировать их и разработана для моделирования неустановившихся двумерных потоков. Модель дополнительно включает вязкость на масштабе ячеек сетки. Программа TUFLOW строит решение осредненных по глубине уравнений, выражающих законы сохранения массы и количества движения в двумерной прямоугольной системе координат:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} = 0,$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - c_f v + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + gv \left( \frac{n^2}{H^3} + \frac{f_1}{2g\Delta x} \right) \sqrt{u^2 + v^2} - \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = F_x$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} - c_f u + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + gu \left( \frac{n^2}{H^3} + \frac{f_1}{2g\Delta y} \right) \sqrt{u^2 + v^2} - \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = F_y$$

где  $u$  и  $v$  – осредненные по глубине  $x$  и  $y$ -составляющие вектора скорости;  $\zeta$  – уровень свободной поверхности потока воды;  $H$  – его глубина;  $\Delta x$  и  $\Delta y$  – шаг расчетной сетки вдоль направлений  $x$  и  $y$ ;  $c_f$  – коэффициент силы Кориолиса (не учитывается);  $n$  – коэффициент Маннинга;  $f_1$  – коэффициент потери энергии;  $\mu$  – горизонтальный коэффициент диффузии момента импульса;  $p$  – атмосферное давление;  $\rho$  – плотность воды;  $F_x$  и  $F_y$  – компоненты суммы внешних сил (в модели не учитываются).

Для решения этой системы уравнений используется неявная схема численного метода переменных направлений для конечно-разностной схемы с использованием четырех дробных шагов по времени и решением трехдиагональной матрицы на каждом шаге [2-3].

В системе SMS используется так называемый подход «концептуального моделирования», который наиболее эффективен для создания реалистичных моделей большой сложности. Согласно этому подходу, на основе топографической карты или плана местности с использованием цифровой модели рельефа и ГИС-объектов (точки, линии, полигоны) создается концептуальная модель. Она строится независимо от расчетной сетки и представляет собой описание исследуемой территории, включающее такие геометрические характеристики, как русла и берега, границу моделируемой территории, расходы и уровни воды как граничные условия, а также зоны с разными значениями коэффициентов шероховатости, показателей турбулентности и других характеристик русла и потока в нем.

После создания концептуальной модели автоматически строится соответствующая ей расчетная сетка и необходимые для расчетов данные конвертируются из концептуальной модели в элементы и узлы сетки. Это позволяет автоматически назначать граничные условия и расчетные параметры. SMS включает инструменты для управления, редактирова-

ния и визуализации геометрических и гидравлических данных, создания и редактирования данных расчетной сетки для использования их в численном анализе.

В области моделирования подобраны соответствующие шкале уровней коэффициенты шероховатости.

Для верификации модели проведены расчеты для расхода воды 50%-й обеспеченности. Полученные в модели уровни воды сопоставлялись с наблюдениями, приведенными в отчете об инженерно-гидрометеорологических изысканиях.

Сопоставление гидрологических данных и расчетных показывает приемлемую точность используемой модели.

Проведены расчеты по моделированию режима течения в реке Кан и затоплению г. Канск при расходах 50%, 25%, 10%, 5%, 3% и 1%-й обеспеченности в р. Кан, р. Илань.

В качестве примера результатов проведенных расчетов на рисунке 1 представлена зона затопления в г. Канск и глубины воды при прохождении наиболее редкого паводка 1%-й обеспеченности на р. Кан и ее притоке.

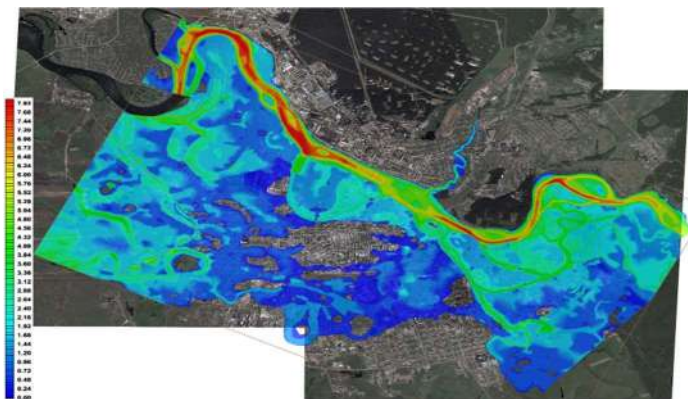


Рисунок 1 – Глубины паводковой воды в зоне затопления г. Канск при прохождении паводка 1% обеспеченности в реках Кан, Илань

На рисунке 2 приведены графики уровней воды в р. Кан в зависимости от расстояния от начала расчетной области (створ 6 в 4 км ниже поста) вверх против течения. Вертикальными линиями отмечены местонахождения мостов. Цвета линии соответствуют различным обеспеченностям. Уровни взяты вдоль линии наибольшего удельного расхода при 50%-й обеспеченности.

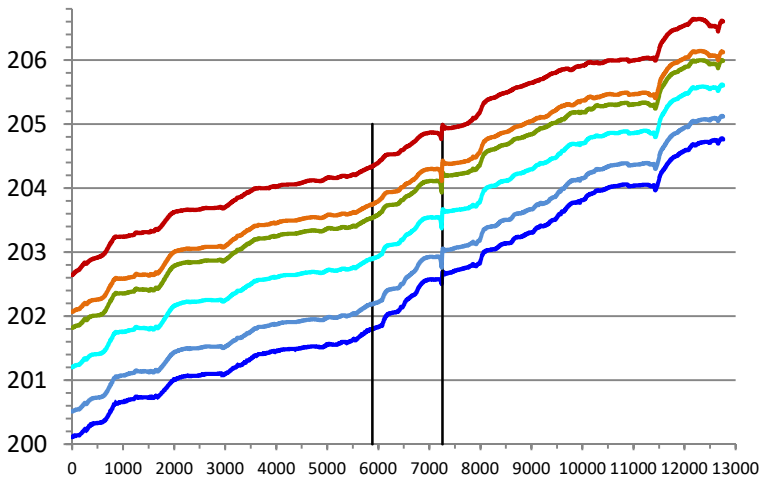


Рисунок 2 – Уровни свободной поверхности в р. Кан вверх против течения от створа 6 в 4 км ниже гидрологического поста на условной линии наибольшего расхода в реке при расходах 50%, 25%, 10%, 5%, 3% и 1% обеспеченности

### Библиографический список

1. Создание и использование цифровых моделей рельефа в гидрологических и геоморфологических исследованиях / С.Г. Яковченко, В.А. Жоров, И.С. Постнова; Рос. акад. наук, Сиб. отдние, Ин-т вод. и экол. проблем. - Кемерово: 2004. – 89 с.
2. Задача о распределении температуры в глубоководном озере, окруженном горным массивом с теплым притоком / Жданов Е.П., Жданова Е.М., Каракулова И.В. // В сборнике: Сборник трудов семнадцатой региональной конференции по математике Алтайский государственный университет. – Барнаул, 2014. – С. 50–54.
3. Моделирование паводковых вод для обоснования мероприятий по защите территорий от затопления/ Жданова Е.М., Жданов Е.П. // В сборнике Социально-экономическая политика России при переходе на инновационный путь развития: материалы 9-ой международной научно-практической конференции, Барнаул, 22-23 июня 2017 г. / под общ. ред. В.А. Ивановой, Т.Е. Фасенко, Д.В. Коханенко. – Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2017. – 232 с. – С. 239–244.