

УДК 627.222.23

## РАСЧЕТ НА ОДНОМЕРНОЙ МОДЕЛИ РЕЧНОЙ СЕТИ ЗОН ЗАТОПЛЕНИЯ ПО МАКСИМАЛЬНЫМ УРОВНЯМ ВОДПОСТОВ ИЗ ОПЫТА СКИОВО Р. СУРА

© 2010 г. Н.П. Сидоров

*ГОУ ВПО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет», г. Нижний Новгород.*

**Ключевые слова:** одномерная гидродинамическая модель, разветвленная речная сеть, бассейн реки, численное моделирование, зона затопления, максимальные уровни воды, расчетная обеспеченность, ГИС, цифровая топографическая карта.

Представлена методика расчета зон затопления на одномерной модели разветвленной речной сети по известным на водомерных постах максимальным уровням воды различных расчетных обеспеченностей. Показано применение этой методики при выполнении Схемы комплексного использования и охраны водных объектов бассейна р. Сура с использованием в проекте ГИС-технологий и цифровых топографических карт масштабом 1:100 000 для построения модели рельефа и гидродинамической модели речной сети бассейна реки, определения зон затопления и защищаемых площадей на территории бассейна.

### **Введение**

Прогнозное выявление зон затопления при половодьях является важной составляющей в обеспечении безопасности урбанизированных территорий, необходимой для устойчивого развития регионов и создания благоприятных условий жизнедеятельности населения. Функции обеспечения безопасности этих территорий выполняют многие государственные учреждения, работающие в области водного хозяйства, которые в настоящее время в своей деятельности при управлении и контроле территориями переходят на географическую информационную основу. В связи с этим, а также для повышения качества и достоверности прогнозов в современных условиях, особенно актуальным становится развитие методов и методик численного моделирования гидродинамики водотоков и происходящих в них процессов с

использованием географической информационной основы и ГИС-инструментов. В целом в водном хозяйстве численные модели могут применяться для обеспечения проектных решений, научных исследований, моделирования чрезвычайных ситуаций и улучшения эксплуатационных условий.

Потребность в использовании численной гидродинамической модели возникла при выполнении пунктов технического задания проекта Схемы комплексного использования и охраны водных объектов (СКИОВО) бассейна р. Сура. Необходимо было определить зоны затопления на территории бассейна при максимальных уровнях различных расчетных обеспеченностей для последующего определения защищаемых площадей и ущерба. Такая задача была выполнена по описанной в статье методике – использования ГИС и цифровых топографических карт, а также по специально разработанной и описанной в данной статье методике расчета на одномерной модели разветвленной речной сети зон затопления по известным максимальным уровням воды различных расчетных обеспеченностей.

### **Картографическая основа**

Картографической основой для выполнения разделов СКИОВО, относящихся к исследованию затопляемых территорий, послужили цифровые топографические карты М 1:100 000 в количестве 78 номенклатурных листов. Эти карты созданы предприятиями Роскартографии в формате sxf, на базе ГИС «Карта 2008», являющейся разработкой ЗАО КБ «Панорама».

В целом, такие разработки, в связи с наличием развитых классификаторов типов объектов, обладают уникальной возможностью выполнять ГИС-анализ карты с учетом одновременно всех типов имеющихся на ней данных, который по своей полноте, качеству и возможностям близок к аналитическому. Также для всего района работ можно проводить анализ объединением исходных номенклатурных карт в одну общую. Для р. Сура были объединены 78 имеющихся номенклатурных листов и дальнейшая работа велась для всего бассейна реки.

При моделировании зон затопления с использованием ГИС независимо от того, каким образом определяются эти зоны, первым этапом работы является построение цифровой модели рельефа (ЦМР) местности либо в виде высотного растра, либо триангуляционной сети. Такая модель для бассейна р. Сура построена в виде матрицы

высот с шагом 50 м, покрывающей площадь 295,65×483,80 км (рис. 1), на которой ЦМР изображена в виде подложки оранжевых тонов.

**Рис. 1.** Зоны затопления в бассейне р. Сура.

Построение матрицы выполнено с использованием встроенных в «Карта 2008» средств методом средневзвешенной интерполяции с построением лучей влияния высоты и поиском по 8 направлениям [1]. Исходными данными для построения матрицы высот явились все объекты на карте, имеющие значения абсолютной высоты (горизонталы, отдельные высотные точки, урезы водохранилищ и озер), а также использовались объекты гидрографии с вычисленными для них высотами, составляющими продольный профиль речной системы по картографическим данным. Такой продольный профиль близок и, соответственно, принят равным меженным условиям реки.

Построение продольного профиля речной системы в меженных условиях выполнялось на этапе подготовки карты, содержащей объекты гидрографии, урезы, рельеф суши, узловые точки площадной гидрографии и рельефа, к моделированию встроенным приложением «Формирование координаты высоты у объектов гидрографии». Это приложение предназначено для обработки объектов электронной карты, имеющих значения характеристики «абсолютная высота», с целью формирования у объектов гидрографии третьей координаты ( $H$ ). В результате выполнения такой задачи, формируется пользовательская карта на весь район работ, содержащая объекты гидрографии с координатным описанием  $X$ ,  $Y$ ,  $H$ . Объекты, которым присваивается координата  $H$ , – это все виды рек, кроме подземных (площадные, линейные, пересыхающие), озера, водохранилища и микроформы (промоины, лощины, овраги) [1].

### **Расчет зон затопления**

«Карта 2008» предоставляет две стандартные возможности для построения зон затопления: первая – вдоль указанного линейного участка гидрографии по значениям уровня подъема воды только на концах участка; вторая – по известным плановым точкам отметок уровня воды путем выстраивания поверхности воды, которая затем сравнивается с поверхностью рельефа местности. Но при рассмотрении целого

бассейна реки эти методы не подходят из-за недостаточной полноты данных по уровням затоплений вдоль рек, кроме того, первый метод требует ручной обработки каждого участка реки. Недостаточность данных по уровням проявляется следующим образом. Первый метод линейно связывает между собой глубины затоплений вдоль отдельного участка, в то время как в бассейне реки глубины затопления могут резко изменяться из-за изменения поперечного сечения реки и других особенностей гидродинамики речного потока. Во втором методе строится поверхность воды между ближайшими точками независимо от того, к какому притоку эта точка относится, что дает качественно неверный результат. В свете описанных недостатков при расчете зон затопления в бассейне реки требуется применение иных методов.

Для бассейна р. Сура прогнозирование зон затопления при половодьях различной обеспеченности выполнено с использованием одномерной численной гидродинамической модели разветвленной речной системы основных рек бассейна в условиях половодья. Наблюдения за уровнями воды и максимальные уровни воды имеются только на 16 водпостах, а на остальном протяжении реки уровни неизвестны, поэтому модель была использована для решения задачи получения на протяжении исследуемых участков реки уровней поверхности воды, соответствующих расчетным паводкам. Такой подход с использованием гидродинамической модели особенно актуален для р. Сура, поскольку эта река, в силу своих средних размеров, имеет изменчивую форму русла с продольным профилем воды вогнутого типа, а также вследствие наличия притоков существенного размера, что не позволяет линейно описывать продольный профиль.

Описание гидродинамики движения воды в модели выполняется на основе общих уравнений Сен-Венана [2]:

$$\frac{\partial(VA)}{\partial t} + \frac{\partial(V^2 A)}{\partial S} = -gA \frac{\partial H}{\partial S} + \frac{\partial}{\partial S} \left( \nu A \frac{\partial V}{\partial S} \right) - \frac{gA}{C^2 R} V|V|;$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial(VA)}{\partial S} = F,$$

где  $V$  – осредненная по сечению продольная компонента скорости потока, м/с;

$A=A(H)$  – площадь живого сечения, м<sup>2</sup>;

$H$  – уровень свободной поверхности воды, м;

$t$  – время, с;

$S$  – координата вдоль направления течения, м;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$F$  – удельный приток воды на единицу длины русла, м<sup>3</sup>/м;

$C$  – коэффициент Шези, определяемый по формуле Манинга;

$R$  – гидравлический радиус, м;

$\nu$  – коэффициент вязкости воды, м<sup>2</sup>/с.

Уравнения Сен-Венана описывают движение воды в одномерной постановке, достаточной для данной задачи, поскольку основная цель – это интерполяция уровней воды в промежутках между водпостами более точная по сравнению с используемой обычно на практике линейной интерполяцией. Одномерная же постановка задачи вполне адекватно описывает гидродинамику реки в условиях половодья, потому что вода движется потоком по всей ширине поймы и имеет минимум поворотов в плане, что соответствует условию уравнений Сен-Венана – малости кривизны линий тока. Основное предположение одномерной постановки состоит в том, что скорость по поперечному сечению одинакова и уровень воды в поперечном направлении горизонтален [3], т. е. рассматриваются гидравлические характеристики поперечного сечения в целом.

Дальнейший этап (построение гидродинамической модели) выполнялся в программе ArcGIS, поскольку она обладает большим набором инструментов пространственного анализа отдельных картографических и связанных табличных данных, что позволяет гибко приспосабливаться к различным потребностям, возникающим при моделировании и представлении его результатов. Импорт общей карты района работ по бассейну р. Сура из формата sxf в формат mxd проекта ArcGis и отдельных векторных слоев в его шейп-файлы выполнен с помощью утилиты SxfTools, формирование гидродинамической модели – с помощью специально разработанных инструментов в среде ArcView.

Геометрия гидродинамической модели речной системы бассейна р. Сура состоит из 18 участков общей протяженностью по расчетной оси водотоков модели 1474 км: 9 участков по притокам и 9 по р. Сура. Участки расположены между гидравлическими разрывами, находящимися в местах впадения притоков и у гидроузлов. Расчетные оси водотоков модели проведены по центру водного потока в условиях половодья, когда речной поток затапливает пойму. Участки описаны 1479 створами с шагом около 1 км по расчетной оси. Створы содержат поперечные сечения поймы и русла реки.

Пойменная часть поперечных сечений построена по ЦМР. Форму поперечного профиля в русловой части можно определять по данным натуральных измерений, которые для некоторых рек имеются в Гидрологических ежегодниках в разделе измеренных

расходов. Но форма поперечного профиля русловой части при расчетах половодий не так существенна, поскольку она составляет незначительную часть живого сечения потока, особенно с учетом того, что глубина затопления над бровкой русловой части часто больше максимальной глубины реки в меженных условиях.

Русловая часть поперечных профилей построена по данным о ширине и глубине рек, имеющимся на цифровых картах. При этом форма поперечного профиля русловой части задавалась следующим образом: от оси реки в меженных условиях отступалась половина картографической ширины реки, в этой точке отметка принималась равной отметке, полученной по картам путем ГИС-анализа продольного профиля уровней воды речной системы; на отметке половины глубины реки от уреза, с заложением 1:4, находилась точка подошвы подводного берега; поперечное сечение смыкалось на картографической глубине реки по центру оси реки в меженных условиях. Картографические ширина и глубина реки определялись по соответствующим данным, имеющимся на картах, эти данные присваивались ближайшему створу, а в промежуточных створах линейно интерполировались по длине реки. Также каждому створу была присвоена площадь водосбора, определенная картографическим способом, всего для 69 ключевых створов, находящихся в местах впадения более или менее крупных притоков, Для промежуточных створов площади водосбора  $F_i$  рассчитаны из соображения, что площадь водосбора по протяжению  $L$  участка реки изменяется по квадратичному закону и, соответственно, использовалась интерполяция с применением квадратного уравнения по двум ближайшим площадям  $F_{up}$ ,  $F_{down}$  и третьей нулевой  $F=0$ , находящейся на расчетном начале участка реки  $l = 0$ . Схема интерполяции представлена на рис. 2.

**Рис. 2.** Схема интерполяции площадей водосбора и расходов воды в промежуточных створах гидродинамической модели.

Интерполяция площадей водосбора выполнена по следующим зависимостям:

$$F_{i,j} = k_j \cdot l_{i,j}^2;$$

$$k_j = F_{up,j} / l_{up,j}^2; l_{i,j} = l_{up,j} + (L_i - L_{up,j}); l_{up,j} = \frac{-b_j \pm \sqrt{b_j^2 - 4a_j c_j}}{2a_j};$$

$$a_j = F_{up,j} - F_{down,j}; b_j = 2 \cdot F_{up,j} (L_{down,j} - L_{up,j}); c_j = F_{up,j} (L_{down,j} - L_{up,j})^2,$$

где  $F$  – площадь водосбора, км<sup>2</sup>;

$i$  – порядковый номер створа по участку реки;

$j$  – номер участка интерполяции в интервале между верхним  $\{up\}$  и нижним  $\{down\}$  по течению створами с известными значениями площади водосбора;

$L$  – положение створа по участку реки сверху по течению от начала участка, м;

$l$  – положение створа по участку реки сверху по течению от расчетного начала участка с нулевой площадью водосбора, м;

$a, b, c, k$  – промежуточные величины.

Моделирование гидродинамики выполнялось в программе *hWater*, разработанной автором [4]. При моделировании в контрольных створах водпостов программой итерационным путем подбирался искомый расход воды  $Q_{up,j}$ , при котором в этих створах устанавливались максимальные уровни воды  $H_p$ , известные на водпостах. При этом на каждой итерации в промежуточных створах расход  $Q_{i,j}$  интерполировался по ближайшим расходам в створах водпостов – верхнего по течению заданного на итерации расхода  $Q_{up,j}$  и нижнего уже подобранного расхода  $Q_{down,j}$ . Интерполяция расхода выполнялась из расчета, что изменения расхода происходят из-за боковой приточности, и поэтому расход в промежуточных створах линейно изменяется в зависимости от площади водосбора  $F$  створов по следующим зависимостям:

$$Q_{i,j} = \mu_j (F_{i,j} - F_{down,j}) + Q_{down,j};$$

$$\mu_j = (Q_{up,j} - Q_{down,j}) / (F_{up,j} - F_{down,j}),$$

где  $\mu$  – модуль стока.

Если граница участка интерполяции попадает на одно из граничных условий гидродинамической модели такое, как: нижнее граничное условие, задаваемое уровнем воды; верхнее граничное условие, где в модель поступает неизвестный в данном случае расход приточности; внутреннее граничное условие гидравлического разрыва на водосбросном сооружении гидроузла, на котором регулицией стока происходит изменение модуля стока, то на таких границах при расчете модуля стока соответствующие переменные  $Q$  и  $F$  принимаются равными нулю, а расход в створе вычисляется  $Q_{i,j} = \mu_j F_{i,j}$ .

Начальные условия вычисляются следующим образом: по формуле Шези расходы в створах водпостов по известным уровням; расходы  $Q_i$  в промежуточных

створах по вышеприведенным зависимостям; уровни воды по известным расходам для всех створов уравнениями Сен-Венана, приведенными к стационарному состоянию.

Основной расчет – итерационный подбор уровней воды – выполняется снизу вверх по течению реки. К примеру, как показано на рис. 2, имея уже подобранный  $Q_{down,1}$ , подбираются расходы  $Q_{up,2}$  и  $Q_{up,3}$ , которые на текущей итерации либо увеличиваются, если уровни воды по рассчитанной кривой ниже максимальных уровней, заданных на водпостах, либо уменьшаются. Выполняется прямая прогонка от створа  $\{down, 1\}$  вверх до створов  $\{up, 2\}$  и  $\{up, 3\}$  для записи каждому створу значения  $Q_{down}$ . Разветвленность реки учитывается при прохождении узла слияния участков рек – выполняется разделение расхода приточности на узле в соответствии с площадью водосбора крайних нижних створов по течению, находящихся на двух сливающихся участках рек, по зависимостям:

$$Q_{down,2} = Q_{down,1} \frac{F_{n,2}}{F_{n,2} + F_{n,3}}; F_{down,2} = F_{down,1} \frac{F_{n,2}}{F_{n,2} + F_{n,3}},$$

где  $n$  – количество створов на участке реки;

Далее выполняется обратная прогонка с записью каждому створу расхода  $Q_{up,j}$  и вычислением расходов  $Q_{i,j}$ , учитывающих боковую приточность, а при прохождении узла слияния используются зависимости:

$$Q_{up,1} = Q_{up,2} + Q_{up,3}; F_{up,1} = F_{up,2} + F_{up,3}.$$

После определения расходов текущей итерации на участке выстраивается кривая свободной поверхности с использованием уравнений Сен-Венана, приведенных к условиям стационарного режима, при котором фиксированы расходы. Затем полученный уровень на верхней границе участка сравнивается с заданным уровнем на водпосте и при достижении необходимой точности по уровню расчет переходит к следующему участку, иначе итерация повторяется.

Исходя из представленных принципов, стало возможным распространить расчет на притоки, не имеющие водпостов и наблюдений, и на участки реки, находящиеся по течению выше водпостов.

По рассчитанным в каждом расчетном створе на гидродинамической модели уровням строится свободная поверхность воды для всей исследуемой речной системы. Сравнением поверхности воды с ЦМР получают глубины затоплений при половодьях и оконтуривающие их зоны затопления.



В бассейне р. Сура моделирование зон затопления по описанной методике выполнено для 6 расчетных случаев – при максимальных уровнях воды 1, 3, 5, 10, 25 и 50 % обеспеченностей (рис. 1).

Сопоставление уровней воды, рассчитанных по представленной методике, с традиционным наиболее известным методом на основе уравнения Шези показано на рис. 3. Отмечается, что уровни по Шези сильно зависят от уклона. Если уклон брать по меженному продольному профилю воды, полученному ГИС-анализом, то значения уровня сильно колеблются  $\pm 5$  м, а местами и больше (где уклон получен равным нулю и в расчете принимался равным задаваемому минимальному). В связи с этими колебаниями расходы начальных условий (первой итерации) оказались завышенными и, соответственно, были получены завышенные уровни воды на первой итерации. При использовании в формуле Шези расходов и уклонов воды, полученных расчетом на модели, продольные профили по Шези и данной методике практически совпадают, за исключением отдельных мест, где по Шези проявляется неучет подпора и динамических свойств потока. Применение только уравнения Шези (что видно из графиков) и линейная интерполяция уровней воды по длине реки между водпостами (до 2,5 м ниже расчетного) дают неприемлемый результат.

**Рис. 3.** Продольные профили на участке от Сурского гидроузла до р. Инза для паводка 10 % обеспеченности.

На рис. 3 также представлен график изменения расходов реки, на котором в местах впадения притоков видны резкие изменения расходов, происходящие из-за изменения площади водосбора. Расходы в методике используются лишь во вспомогательных целях, калибровку модели (коэффициентом шероховатости) следует выполнять по соответствию порядка значений расхода реальным, наблюдаемым расходам.

### Оценка ущерба

Оценка ущерба, наносимого паводками  $U_{\text{п}}$ , выполнена в соответствии с утвержденной методикой [5] по следующей расчетной формуле:

$$U_{\text{п}} = \sum Z_i \Pi K_{\text{и}},$$

где  $Z_i$  – затраты, принимаемые по таблицам [5];

$P$  – площадь, подверженная вредному воздействию вод, тыс. га;

$K_{и}$  – индекс дефлятор, переводящий из цен 2005 г., принимаемый по данным региональных властей.

Расчеты площадей, подверженных вредному воздействию вод, в пределах, рассчитанных на гидродинамической модели зон затопления паводком с уровнями 1, 3, 5, 10, 25 и 50 % обеспеченностей, выполнены с использованием ГИС-анализа на цифровых топографических картах М 1:100 000. ГИС-анализ позволил определить защищаемые объекты и их площади. Пример классификации защищаемых объектов для одного из характерных участков (у г. Пенза) приведен на рис. 4. При определении площадей защищаемых объектов: за «жилые дома и объекты инфраструктуры» приняты площади кварталов всех населенных пунктов; «промышленные предприятия, производственные объекты и сооружения» – площади соответствующих предприятий в целом; «склады, фермы, хранилища, предприятия (цеха) и другие производственные здания и сооружения» – площади сельхозпредприятий; «пашня, сады» – площади садов; «прочие сельскохозяйственные угодья» – площади поселков сельского типа за вычетом площади их кварталов.

**Рис. 4.** Результаты прогнозного моделирования зон затопления половодьями рек бассейна р. Сура на участке у г. Пенза.

## **Выводы**

Потребность определения зон затопления на протяженных участках рек при выполнении разного рода исследований в области водного хозяйства возникает часто, и обычно эти расчеты делаются либо очень грубо, назначением фиксированных уровней затопления или рисованием зон затопления на глаз, либо, наоборот, требуются дополнительные трудоемкие гидрологические исследования для задания приточных расходов гидродинамической модели. Данная методика, в отличие от других методов, позволяет при наличии опыта моделирования быстро получать результаты для бассейна реки с высокой точностью в рамках соответствующего масштаба исходных картографических данных и может стать востребованной инновацией в области водного хозяйства.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геоинформационная система «Карта 2008». Подключаемые прикладные задачи : рук. пользователя. Версия 9.0. Ногинск: Панорама, 1991–2008. 149 с. Режим доступа : <http://www.gisinfo.ru/download/doc.htm>.
2. Векслер А.Б., Ивашинов Д.А., Стефанишин Д.В. Надежность, социальная и экологическая безопасность гидротехнических объектов: оценка риска и принятие решений. СПб.: Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2002. 591 с.
3. Кюнж Ж.А., Холи Ф.М., Вервей А. Численные методы в задачах речной гидравлики: практическое применение: пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1985. 255 с.
4. Сидоров Н.П. Математическое моделирование гидродинамической аварии в каскаде грунтовых плотин // Приволжский научный журнал. Н. Новгород: ННГАСУ, 2008. № 4 (8). С. 87–93.
5. Методика оценки вероятности ущерба от вредного воздействия вод и эффективности осуществления превентивных водохозяйственных мероприятий. М.: ФГУП «ВИЭМС», 2005. 149 с.

### Сведения об авторе

Сидоров Николай Павлович, старший преподаватель кафедры гидротехнических сооружений Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65, e-mail: [gs@nngasu.ru](mailto:gs@nngasu.ru).