

ТЕХНОЛОГИЯ ОЦЕНКИ С ПОМОЩЬЮ ГИС ЗОН ЗАТОПЛЕНИЯ ВЕСЕННИМИ ПАВОДКАМИ МАЛОЙ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ

И. С. ПОСТНОВА, С. Г. ЯКОВЧЕНКО, В. О. ДМИТРИЕВ
Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия
e-mail: postnova@iwep.asu.ru, spartak@iwep.asu.ru

A GIS technology for calculation of flooded areas which ignores the propagation of flood wave is presented in the paper. A simplified method for estimation of floodplains capable to account for the slope of water surface relative to low water is considered. Elevation range is calculated from the stream gauge data, discharge in the closing cross-section of which is close to that of the flooded area opening cross-section. It also contains a technique to calculate flooded areas for floodplain parts with uneven morphology using level curves. A method to calculate flooded area patterns by GIS assumes that the data on flooded area during observation dates is given, along with the data on hydrology and morphometry of the floodplain structure. The comparison of the calculations of the flooded areas of various probability with the data of field observations for the Kondoma floodplain is given on digital maps at scales 1:5000, 1:50 000.

Введение

В данной статье приводится методология расчета зон затопления паводками в пойме рек. Развитие ГИС-технологий с использованием цифровых моделей рельефа местности (ЦМР) позволило значительно автоматизировать этот процесс. Предложены некоторые подходы, позволяющие провести более точные оценки границ затопления в зависимости от степени подробности исходных данных.

В большинстве проводимых исследований по оценке затопления участка речной сети считается, что водная поверхность имеет постоянную высоту [1–3]. В работе рассмотрен более общий случай, предложенный авторами в [4, 5], когда учитывается перепад водного уровня вдоль исследуемого участка по сравнению с величиной поднятия воды в ходе затопления. При таком подходе необходимо моделирование поведения уровня водной поверхности Z при затоплении или какая-либо его физически обоснованная интерполяция между створами наблюдений.

Введем ряд обозначений:

Z_0 — картографическая высота водной поверхности, получаемая линейной интерполяцией по урезам воды, приведенным на картографическом материале на исследуемую территорию и отражающим уровень высоты воды в данной точке обычно в межень;

$dZ = Z - Z_0$ — подъем уровня воды при затоплении над картографическим.

1. Особенности создания модели рельефа и расчета высоты водной поверхности для оценки затопления

Прежде всего при построении ЦМР на исследуемую территорию необходимо обосновать выбор масштаба исходных картографических данных, который зависит от величины максимального превышения уровня dZ_{\max} . Ошибка в определении высоты порядка 10 % от превышения уровня не приводит к существенным искажениям контуров зон затопления. С другой стороны, согласно общим требованиям к качеству картографических материалов, смещение горизонталей для низкогорных, среднегорных и высокогорных районов не должно превышать одной трети высоты сечения горизонталей h . Таким образом, ошибка в определении высоты по карте для таких районов может достигать одной трети сечения горизонталей. Из этого следует, что масштаб картоосновы должен подбираться таким, чтобы сечение горизонталей было меньше или равно по порядку величины одной трети превышения уровня для зон затопления.

Цифровая модель рельефа, создаваемая для оценки зоны затопления, имеет ряд особенностей. Во-первых, для ее создания используются относительно крупномасштабные исходные топографические данные. Во-вторых, для построения ЦМР достаточно рассматривать лишь область, непосредственно примыкающую к реке, тем самым значительно сокращая объемы ресурсов, необходимых при решении задачи. Для корректного определения границы такой области достаточно, чтобы перепад высот от уреза водной поверхности превышал величину $dH_{\max} = dZ_{\max} + h$, где h — величина сечения горизонталей, а dZ_{\max} — перепад высот относительно Z_0 при максимальном уровне затопления. В-третьих, в создаваемой модели рельефа обязателен учет обрывов в границах полосы, представляющих естественный барьер при затоплении территории (одно из решений данной задачи предложено нами в [4]).

И, наконец, корректная ЦМР должна иметь постоянное понижение вдоль русла реки. Простое включение высот урезов воды при построении поверхности не позволяет решить проблему учета продольного уклона реки, поскольку в процессе интерполяции принимают участие и данные о рельефе вне русла реки. Для выхода из этого положения в [4] предложен подход, когда для построения гидрологически корректной модели используются дополнительные точки высот вдоль речной сети. Эти точки лежат на поверхности, построенной интерполяцией только точек урезов, при этом надо учитывать некоторые особенности. Во-первых, при интерполяции используются только урезы, принадлежащие реке, на которой расположен пункт гидрологических наблюдений. Урезы, принадлежащие притокам, в процессе интерполяции не используются. Во-вторых, если река имеет несколько русел, то для интерполяции используются урезы на всех руслах. Причина такого разделения информации достаточно проста. В приведенной выше постановке задачи о затоплении в качестве источника затопления рассматривается только водный поток, проходящий через русло реки, на которой расположен гидрологический пост.

Кроме того, при малой извилистости русла водной поверхности для процесса интерполяции удобно использовать створы в виде точек, расположенных на фарватере реки. При большой извилистости русла, как мы нашли, наиболее оптимальны проведение вручную отрезков, перпендикулярных к направлению течения реки проходящих через местоположения створов, и присвоение им значения уровней.

2. Метод, использующий кривые $H(Q)$

В общем случае для расчета высот водной поверхности необходимо иметь информацию о превышении уровня воды в опорных створах зоны затопления. Расчетные створы при этом располагаются друг от друга на расстоянии, обеспечивающем адекватную аппроксимацию морфометрических свойств долины: в точках перегиба уклона водной поверхности, на поворотах русла, при сужении или расширении долины. Превышение уровня можно получить по следующим величинам:

1. Кривая уровней $H_{\Pi}(Q)$ для гидропункта. H_{Π} — абсолютная высота водной поверхности у гидропункта. Основным критерием при выборе гидропункта является требование, что расход исследуемой в створе гидропункта реки близок к расходу в начальном створе зоны затопления.

2. Кривые уровней $H_i(Q)$ для опорных створов i в зоне затопления (H_i — абсолютная высота водной поверхности у опорного створа i).

3. Величина расхода Q на момент затопления, по которой рассчитывается уровень.

Кривые уровней могут быть рассчитаны по данным наблюдений или теоретически по известному поперечному профилю русла и коэффициенту шероховатости [4]. Если на участке между пунктом гидрологических наблюдений и расчетным створом реки имеются крупные притоки, необходимо учесть поправку в расходе Q .

3. Метод превышений

Ввиду сложности расчета кривых уровней на практике применяется более простой способ, корректно работающий при морфологически подобных условиях в створе пункта и в створах зоны затопления (т. е. при одинаковой форме кривых уровней во всех створах). Уклоны водной поверхности при подъеме уровней предполагаются тождественными уклонам водной поверхности, получаемым по картографической информации об урезах воды на главном русле реки.

Таким образом, высота водной поверхности в любой точке рассчитывается по формуле [5]

$$Z = Z_0 + dZ,$$

где dZ — постоянная величина, не зависящая от координат подъема уровня воды над картографическим.

3.1. Определение превышения уровня

Оценка опасности наводнений для территории включает расчет возможных зон затопления паводками различной повторяемости. Соответственно, используемый при оценке затопления различной обеспеченности P подъем уровня $dZ_{P\%}$ вычисляется с использованием соответствующих данных по уровням $h_{P\%}$ гидрологического пункта: высота водной поверхности $Z_{P\%}$ определяется в любой точке согласно нашим результатам [5]:

$$Z_{P\%} = Z_0 + dZ_{P\%}.$$

Для расчета $dZ_{P\%}$ по материалам гидрологических наблюдений необходимо знать следующие величины:

- уровни различной обеспеченности $h_{P\%}$ по материалам наблюдений гидрологического пункта;

— высоту отметки нуля в Балтийской системе высот (BHS) h_{BHS} ;
 — картографическую высоту водной поверхности в створе гидрологических наблюдений $h_{\text{П}}$, $dZ_{P\%}$ выражается через них как

$$dZ_{P\%} = h_{\text{BHS}} + h_{P\%} - h_{\text{П}}.$$

3.2. Особенности расчета зоны затопления

При учете непостоянной высоты водной поверхности на первом этапе методом интерполяции по точкам урезов воды и пересечений горизонталей с водными объектами рассчитывается грид начальной “водной поверхности” [WTable] (выше для обозначения поля высот водной поверхности использовалось обозначение Z_0). Согласно предыдущим примечаниям, при создании [WTable] учитываются только урезы и пересечения горизонталей с речной сетью, расположенные на основной реке. Для расчета [WTable] может быть использован метод ОВР по двум соседям с показателем степени 1 для линейности интерполяции.

На следующем этапе задается значение относительного превышения уровня воды dZ , которое преобразуется в грид [DH] $\rightarrow (dZ).AsGrid$. Далее вычисляется грид [Z] $\rightarrow [WTable] + [DH]$. Последующие расчеты ведутся так же, как и в случае постоянной высоты водной поверхности.

Собственно модель рельефа может строиться как триангуляционным путем, так и с помощью ТороGrid. Для сравнения на рис. 1 приведены результаты наших расчетов [5] по ЦМР, полученной с использованием функции Topogrid ArcInfo [6] (а) и по модели рельефа, построенной триангуляционным способом (б). Использование ТороGrid позволяет получать более плавное и “реалистическое” поведение рельефа между горизонталями и является предпочтительным, если используется картооснова относительно мелкого масштаба, как в продемонстрированном примере.

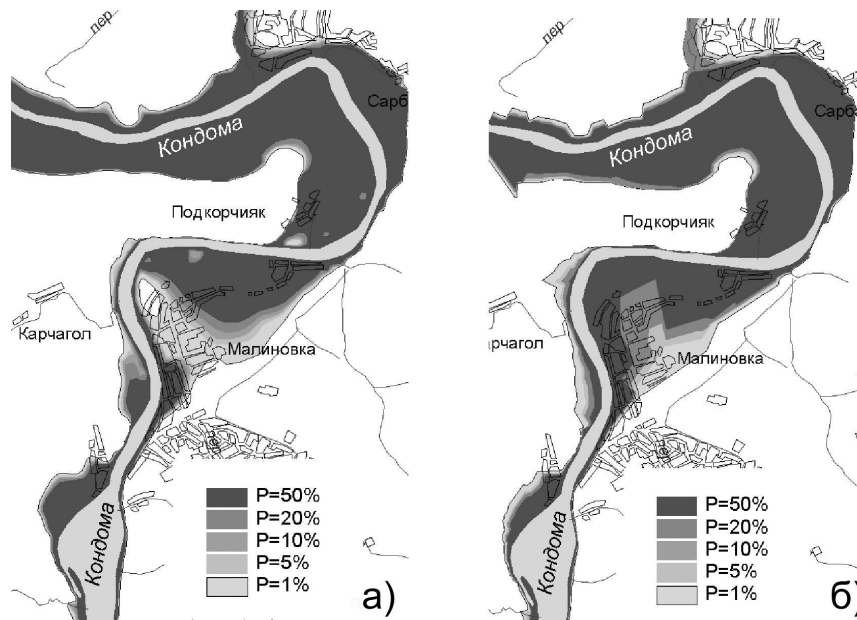


Рис. 1. Зоны затопления п. Малиновка р. Кондома (исходный масштаб картоосновы М 1 : 50 000) по ЦМР, рассчитанной с помощью ТороGrid (а); по TIN (б).

Территория, высоты которой меньше, чем водная поверхность Z , и гидрологически связанная с рекой, считается затопленной.

3.3. Расчет затопления паводком различной обеспеченности при наличии полевых наблюдений за уровнями

В ряде случаев при оценке зон затопления паводками имеется возможность использования дополнительной информации о реальных контурах затопления на местности. Это могут быть: а) материалы полевых обследований, включающие границу затопления; б) контура затопления местности, полученные по материалам космического мониторинга на конкретную дату.

Ценность знания контуров затопления на какой-либо момент времени состоит в возможности приближенной оценки параметров кривой уровней $H(Q)$ по ней и в использовании этих параметров для экстраполяции уровней для разных обеспеченностей. Известная зависимость кривой для гидропоста и какого-либо створа русла позволяет установить связь между превышениями уровня на гидропосту и в рассматриваемом створе.

4. Аналитическое решение задачи при использовании степенной зависимости поперечного профиля поймы

Существует возможность аналитической оценки параметров кривых уровней с использованием результатов единственного полевого обследования территории (или снимка зоны затопления) на известную дату и цифровой карты местности, обсуждаемая ниже. Весьма распространено в гидрологических расчетах [7] использование степенной связи между расходом и живым сечением в выбранном створе. При таком подходе, если принять, что профиль поймы также имеет степенную зависимость вида (см., например, [10])

$$z = z_0(y/B_0)^n,$$

где z — высота над дном; y — плановое расстояние до фарватера; z_0 — высота при $y = B_0$ — полуширине реки в межень; n — показатель степени, то можно вычислить высоту превышения уровня в явном виде. Проведем, следуя Р.А. Нежиховскому, анализ взаимосвязи гидравлических параметров в русле реки для степенного профиля поймы с целью получить возможность пересчета уровней на гидропосту в уровни на других створах.

Для живого сечения используется формула

$$\omega = \omega_0(z/z_0)^{1+1/n}.$$

Зависимость средней скорости течения при использовании формулы Шези — Маннинга для коэффициента Шези и при использовании приближения мелкой и глубокой реки $B \gg z$ есть

$$u = i^{1/2} n^{2/3} z^{2/3} / n_r,$$

где n_r — коэффициент шероховатости; i — уклон водной поверхности.

Комбинируя формулы, можно получить

$$Q = u\omega = (\omega_0 n^{2/3} / (n_r z_0^{1+1/n})) i^{1/2} z^{5/3+1/n}.$$

Используя формулу (1), рассмотрим три значения уровней в створе.

1. Уровень на момент картографической съемки, как правило в межень, обозначаемый далее индексом m : $z = z_0 = z_m$, $Q = Q_m$, $i = i_m$. Этот уровень нечувствителен к погрешностям определения даты съемки и Q_m .

2. Уровень на момент полевого измерения границы затопления, как правило, в паводок, обозначаемый далее индексом f : $z = z_f = z_m + dz_f$, $Q = Q_f$, $i = i_f$. Величина dz_f совпадает с dZ_f — превышением высоты водной поверхности в момент измерения над уровнем межени. Уклоны могут быть легко определены в ГИС по измеренному распределению высот водной поверхности в момент измерения, как уже было описано.

3. Уровень, подлежащий определению, обозначаемый далее индексом t : $z = z_t = z_m + dz_t$, $Q = Q_t$, $i = i_t$. Величина dz_t совпадает с dZ_t — превышением высоты водной поверхности над уровнем межени в подлежащий определению момент измерения.

С использованием формулы (1) можно вывести два соотношения между расходами при разных значениях уровней в створе:

$$\frac{Q_f}{Q_m} = \left(\frac{i_f}{i_m} \right)^{1/2} \left[\frac{z_m + dz_f}{z_m} \right]^\kappa, \quad \frac{Q_t}{Q_m} = \left(\frac{i_t}{i_m} \right)^{1/2} \left[\frac{z_m + dz_t}{z_m} \right]^\kappa, \quad (1)$$

где показатель степени $\kappa = 5/3 + 1/n$. Выражая в два и три превышения уровней dz_f и dz_t через расходы и уклоны, можно записать выражение для их частного, не зависящее от z_m :

$$\frac{dz_t}{dz_f} = \frac{\left[\frac{Q_t}{Q_f} \left(\frac{i_t}{i_f} \right)^{1/2} \right]^\kappa \chi - 1}{\chi - 1}, \quad (2)$$

где $\chi = \left[\frac{Q_f}{Q_m} \left(\frac{i_f}{i_m} \right)^{1/2} \right]^\kappa$.

Рассмотрим два створа: створ гидропоста и исследуемый створ. Предположим, что с учетом времени добегания t_D существует линейная связь между расходом на гидропосту и расходом в исследуемом створе с модульным коэффициентом a . Это предположение вполне корректно, если исследуемый створ лежит на той же реке, что и главный. Коэффициент a при этом примерно равен отношению водосборных площадей в исследуемом створе и створе гидропоста. В случае, когда измерения проводятся в весенний паводок, в приближении $\chi \gg 1$ (т. е. при рассмотрении расходов, значительно превышающих межень), можно выписать простую формулу для отношения превышения уровней:

$$\frac{dZ_{P\%}}{dZ_f} = \left[\frac{dZ_{P\%}^0}{dZ_f^0} \right]^{\kappa/\kappa_0}, \quad (3)$$

где величины с индексом “0” относятся к гидропункту. Формула (3) имеет тот же источник, что и кривые связи уровней (см., например [8]), но, в отличие от них, использует только два наблюдения (одно в межень и одно в паводок). Преимущество (3) в простоте оценки ожидаемого уровня, требующей лишь однократного полевого измерения и в силу этого в возможности ее использования в расчетах ожидаемого уровня затопления для большой территории.

Отметим, что показатель степени n , характеризующий морфометрические свойства поймы, может быть оценен по цифровой модели рельефа с использованием методологии

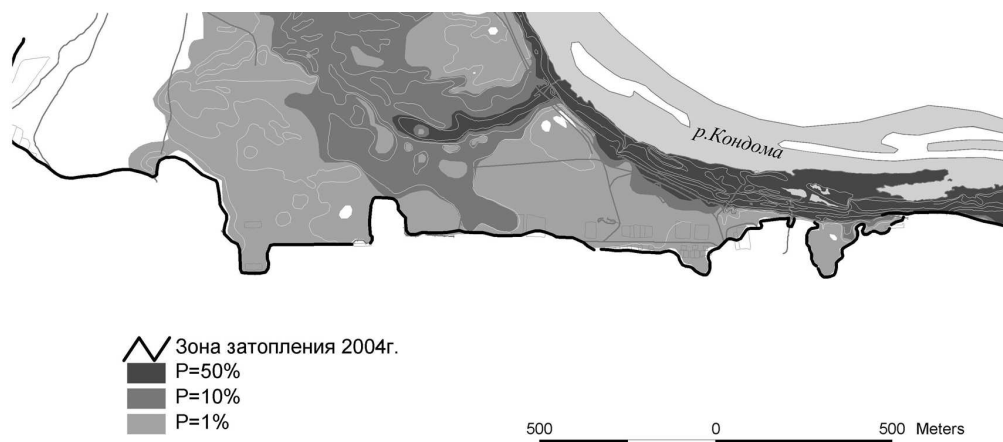


Рис. 2. Зоны затопления п. Куртуково на р. Кондома (исходный масштаб картоосновы М 1 : 5000).

расчета поперечных сечений долины (см., например, [9]). Возможность обойтись без съемки русла, используемой обычно для расчета $H(Q)$, дает тот факт что, показатель степени рассчитывается для диапазона высот водной поверхности, характерного для паводка, когда, как известно, живое сечение и уровни значительно превышают меженные и в основном определяются поймой. Рельеф же поймы может быть снят с крупномасштабного топоплана.

Данная технология была апробирована при определении зон затопления в паводки различной обеспеченности для нескольких населенных пунктов Кемеровской области, расположенных на р. Кондома, наиболее пострадавших в результате наводнения весной 2004 года. По цифровым планшетам 1:5000 были проведены расчеты затапливаемых территорий с использованием результатов координатной GPS-привязки границ зон затопления паводком 2004 года. Особенностью этого паводка была его редкая повторяемость, так что его расходы имели обеспеченность, близкую к 1%. Эта особенность существенно повысила точность расчета зон затопления паводками более частой повторяемости при использовании в качестве исходных данных границ затопления этим паводком, определенных по полевым исследованиям.

На рис. 2 показан один из примеров использования формулы (3) при расчете зоны затопления по результатам полевых измерений границы затопления и оценки меженных уровней по цифровой карте.

При некотором усложнении методики она может быть приспособлена для учета данных дистанционного зондирования по затоплению территории. В частности, использование снимков на разные даты дает возможность более точной оценки параметров (3).

Выводы

Предложена технология расчета зон затопления с помощью ГИС без моделирования движения паводковой волны. Рассмотрены способы расчета для участков пойм с неоднородными и однородными морфометрическими условиями. Предложен способ расчета контуров зон затопления в ГИС при наличии данных по зонам затопления на даты наблюдений, обеспеченные гидрологической информацией, и данных по морфометрической структуре поймы (определяемых по крупномасштабной карте). Данный способ расчета был апроби-

рован при определении зон затопления в паводки различной обеспеченности для нескольких населенных пунктов Кемеровской области, расположенных на р. Кондома, наиболее пострадавших в результате наводнения весной 2004 года.

Список литературы

- [1] WAGNER TH. W. Preparing for Floodplain Mapping and Flood Monitoring With Remote Sensing and GIS. Report of the Workshop on Remote Sensing for Floodplain Mapping and Flood Monitoring, Dhaka, Bangladesh, 1989.
- [2] WU BINGFANG XIA FUXIANG. Flood damage evaluation system design for a pilot area on Bangladesh floodplain using remote sensing and GIS // Europ. Conf. and GIS. 1990.
- [3] MEIJERINK A.M.J., DE BROWER H.A.M., MANNAERTS C.M., VALENZUELA C. Introduction to the use of Geographic Information Systems for practical hydrology, UNESCO-ITC publication, N 23. 273 p.
- [4] ЯКОВЧЕНКО С.Г., ЖОРОВ В.А., ПОСТНОВА И.С. Создание и использование цифровых моделей рельефа в гидрологических и геоморфологических исследованиях. Кемерово: Изд-во ИУУ СО РАН, 2004. 92 с.
- [5] ЯКОВЧЕНКО С.Г., ПОСТНОВА И.С., ЖОРОВ В.А., ЛОВЦКАЯ О.В. Опыт использования ГИС для оценки зон затопления, ГИС для устойчивого развития территорий // Матер. Междунар. конф. Владивосток — Чанчунь, 2004. С. 574–577.
- [6] HUTCHINSON M.F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits // J. of Hydrology. 1989. Vol. 106. P. 211–232.
- [7] КАРАСЕВ И.Ф. Речная гидрометрия и учет водных ресурсов. Л., 1980. 310 с.
- [8] ЛЕБЕДЕВ В.В. Гидрология и гидрометрия в задачах. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 699 с.
- [9] ЯКОВЧЕНКО С.Г., ЖОРОВ В.А., ВАСИЛЬЕВ А.А. ГИС для подготовки пространственных данных и оценки зоны затопления волной прорыва плотины // Сб. Матер. науч. конгресса ГЕО-СИБИРЬ-2005. Т. 4: ГЕОИНФОРМАТИКА. Новосибирск, 2005. С. 78–82.
- [10] НЕЖИХОВСКИЙ Р.А. Русловая сеть бассейна и процесс формирования стока воды. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 475 с.

Поступила в редакцию 2 июня 2005 г.