

**ГИС ДЛЯ ПОДГОТОВКИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ И ОЦЕНКИ ЗОНЫ ЗАТОПЛЕНИЯ ВОЛНОЙ ПРОРЫВА ПЛОТИНЫ**

Использование ГИС для оценки зон затопления, а также параметров затопления (объем, площадь и т. д.) имеет достаточно давнюю историю. Сводная методология такой оценки по известному уровню водной поверхности с использованием цифровой модели рельефа (ЦМР) для случая постоянной высоты водной поверхности приведена в фундаментальном обзоре [9], а для случая переменной высоты, например, в [7]. В настоящее время существует ряд методик расчета уровня при прорыве плотины и других гидротехнических сооружений (ГТС), использующих, в основном, решение одномерных уравнений гидравлики [6]. Подавляющее большинство ГТС составляют небольшие, с емкостью водохранилищ менее десятков млн. куб.м, с земляной отсыпкой плотины. Для таких ГТС разработано большое количество методик, различающихся, прежде всего, подходом к рассмотрению образования прорана: мгновенное образование вертикальной бреши в плотине в результате террористического акта или накопления усталостных деформаций в основании плотины [1], [2], или же постепенный размыв земляной отсыпки при переполнении плотины [3], [5]. При проведении массовых расчетов характеристик зон затопления волной прорыва возникает проблема их автоматизации. По ряду причин, среди которых не последнее место занимают закрытость тематики и авторский характер большинства методик, в настоящее время слабо распространены компьютерные программы для расчета волны прорыва, осуществляющие полный цикл вычислений. Одним из исключений является программный продукт для расчета волн прорыва «BOR», разработанный ОАО «НИИЭС» ([http://www.niies.ru/chisl\\_metod.htm](http://www.niies.ru/chisl_metod.htm)). Это программное обеспечение, судя по документации, не требует внешних ГИС средств для обработки исходной картографической информации по рельефу долины. Примером другой распространенной программы является используемая при расчетах МЧС программа "Волна 2" [1]. Эта программа не имеет ГИС интерфейса и использует большой массив информации, определяемой пользователем обычно вручную. К картографической части информации относятся поперечники долины реки, на которой расположено ГТС, вводимые в виде набора высот береговых горизонталей рельефа и их расстояний от русла реки, а также информация о высоте бровки берега и ширине поймы реки. Среди зарубежных программных продуктов отметим программный комплекс MIKE 11 (<http://www.dhisoftware.com/mike11/>). Этот комплекс требует для расчета значительного объема исходных данных, в частности, плана участка с координатами динамической оси, притоками, поперечниками в характерных створах и местоположением ГТС. Подготовка массива морфометрических параметров долины возлагается на пользователя.

Таким образом, для ряда расчетных программ существует проблема автоматизированной подготовки исходных данных по морфометрии долины в нижнем бьефе ГТС. Решение этой проблемы в рамках стандартных ГИС, по нашему мнению, включает создание ЦМР по исходным данным о рельефе долины, последующий расчет поперечников и средних уклонов дна в створах долины ниже ГТС и экспорт рассчитанных данных в формат, необходимый для программного обеспечения (ПО) расчета прорыва плотины. При этом необходима предварительная оценка верхнего уровня затопления, поскольку поперечники в ряде программ аппроксимируются ограниченным количеством горизонталей (обычно 3-10) так, что верхняя горизонталь должна быть заведомо выше уровня максимального затопления, но не слишком значительно, для сохранения точности аппроксимации. Такая оценка, по нашему мнению, может быть проведена для каждого створа по какой-либо достаточно простой по расчетным алгоритмам и нетребовательной к объему исходных данных методике, реализованной непосредственно средствами ГИС. В качестве такой оценочной методики может быть использована методика В.В. Лебедева [4]. Её особенностью является систематическое завышение прогнозируемых уровней, обусловленное занижением скорости течения и, соответственно, завышением живого сечения при данном расходе прорыва. Поэтому зоны затопления, рассчитанные по этой методике, можно рассматривать как оценку сверху, что и требуется для решения задачи.

Авторами настоящей работы было создано ГИС-приложение ArcView, позволяющее провести расчет зоны затопления и уровней по методике В.В. Лебедева и вычислить по ЦМР поперечники и основные параметры реки в выбранных створах с использованием результатов расчета. Изложим краткую методологию расчета с помощью средств модулей Spatial Analyst и 3D Analyst ГИС ArcView 3.2a. Максимальный расчётный трансформированный расход волны прорыва по ходу её продвижения  $Q_L$  определяется в зависимости от объёма водохранилища  $W_0$  (при наивысшем уровне воды), уклона и сечения долины, прорывного расхода и удалённости от плотины  $L$  согласно рекомендациям, изложенным в [4] по формуле:

$$Q_L = \frac{Q_i \cdot W_0}{W_0 + Q_i \cdot L \cdot \tau}, \quad (1)$$

где  $Q_n$  – прорывной расход через проран в теле плотины, м<sup>3</sup>/с – определяется по формуле расхода для неподтопленного водослива с широким порогом [4] и зависит от отношения площадей сечения по створу плотины и прорана, ширины прорана и напора на пороге водослива;  $L$  – расстояние от плотины до расчётного створа;  $\tau$  – бытовой коэффициент водотока, отражающий условия прохождения волны прорыва в нижнем бьефе (НБ), определяемый по специальной таблице [4] и зависящий от типа водотока и уклона водного потока. Отметки уровней воды в расчётных створах определяются по кривым  $Q = f(H)$ , рассчитываемых по формуле:  $Q_L = \omega(H)/\tau$ , где зависимость живого сечения  $\omega$  от уровня затопления  $H$  определяется средствами ГИС, а расходы считаются по формуле (1).

До расчета пользователь ГИС ставит точки на цифровой карте, обозначающие местоположение нижнего бьефа (начало потока при прорыве) и замыкающего створа, а также ограничивает рамкой территорию, на которую будет создаваться ЦМР для оценки зоны затопления, вводит необходимые для расчета прорывного расхода  $Q_n$  в нижнем бьефе плотины данные (см. рис. 1) в программу.

Рис. 1. Интерфейс ввода данных

Рис. 2. Окно результата

На первом этапе на основе данных по горизонталям и урезам воды, с учетом речной сети, создается триангуляционная модель рельефа, а по ней растровая ЦМР [Dem<sub>0</sub>] (см. [8]). Далее проводится операция заливки депрессий растровой модели рельефа, результатом чего является ЦМР [Dem<sub>1</sub>]. Также определяется грид дренажа [River] (см. [8]). Дренаж (линия стока от нижнего бьефа) делится на равные отрезки длины  $\Delta L$  с уникальными идентификаторами с помощью операции [FlowLength], причем точки середин отрезков экспортируются в отдельное покрытие [Centres].

На следующем этапе проводится разбиение территории на отсеки. Грид деления территории на отсеки [Segments] рассчитывается интерполяцией методом IDW (1 сосед, степень 1) по покрытию точек [Centres]. Этим способом производится деление затапливаемой территории прямыми, равноудаленными друг от друга вдоль водотока и ортогональными направлению его течения.

Для расчета среднего уклона потока в отсеке рассчитываются гриды максимальной и минимальной высот вдоль потоковой линии, для чего используется операция зональной статистики ZonalStats (причем в качестве зон используется грид [Segments], а в качестве источника, по которому рассчитывается статистика, грид [Dem<sub>1</sub>]•[River]). По уклонам рассчитывается

параметр  $\tau_i$  в пределах каждого отсека  $i$ . Также для каждого отсека  $i$  вычисляется среднее расстояние до нижнего бьефа  $L_i$ , а по нему и  $\tau_i$  средний расход в отсеке  $Q_i$ , живое сечение  $\omega_i = Q_i \tau_i$  и количество воды в отсеке  $W_i = \omega_i \Delta L$ .

Задаваясь для каждого отсека  $i$  высотой подъема  $z_i$  над уровнем межени, можно рассчитать объем затопления для каждого отсека в отдельности  $W_3(L_i, z_i)$ . Возможность расчета зависимости  $W_3(L_i, z_i)$  позволяет вычислить методом последовательных приближений высоту затопления каждого отсека из уравнения  $W_i = W_3(L_i, z_i)$ . Для расчетов  $z_i$  нами использовался упрощенный метод Ньютона, в котором производная  $W_3$  по  $z_i$  оценивается как разность между  $W_3$  при  $z_i$  равном начальному приближению и этому же значению плюс 1 метр.

Расчетные значения  $z_i$  присваиваются створам [Centres], и на последнем этапе по ним вычисляется одним из методов интерполяции результирующее поле уровней, которое после добавления его к меженным уровням позволяет рассчитать зону затопления. Далее производится разделение зоны затопления на правобережную и левобережную части (см. [7]). Идентификация частей может быть произведена с учетом их расположения к направлению главного потока. Основная идея состоит в использовании грида направлений потоков на рельефе [FlowDirections] для расчета величины  $\sin(\alpha_p - \alpha_б)$  ( $\alpha_p$  – угол, характеризующий направление основного потока [River],  $\alpha_б$  – угол, характеризующий направление притока). Данная величина, рассчитанная в ArcView, отрицательна для левого берега и положительна для правого. Расчет может быть осуществлен следующим образом.

Во-первых, вычисляется грид углов направления стока в радианах:

$$[\text{Angle}] = (8 \cdot \text{AsGrid} - (([\text{FlowDirections}]. \text{Log}2))) \cdot (\text{Number}. \text{GetPi} / 4) \cdot \text{AsGrid}.$$

Во-вторых, с помощью операции Expand значения грида [Angle]•[River] распространяются на одну ячейку в зону берега, результатом чего является грид [Angle<sub>p</sub>]. Далее вычисляются зональные статистики средних значений грида  $(([\text{Angle}_p]. \text{Sin}) \cdot ([\text{Angle}]. \text{Cos})) - (([\text{Angle}_p]. \text{Cos}) \cdot ([\text{Angle}]. \text{Sin}))$ , и по знаку статистик производится идентификация правобережной и левобережной зон.

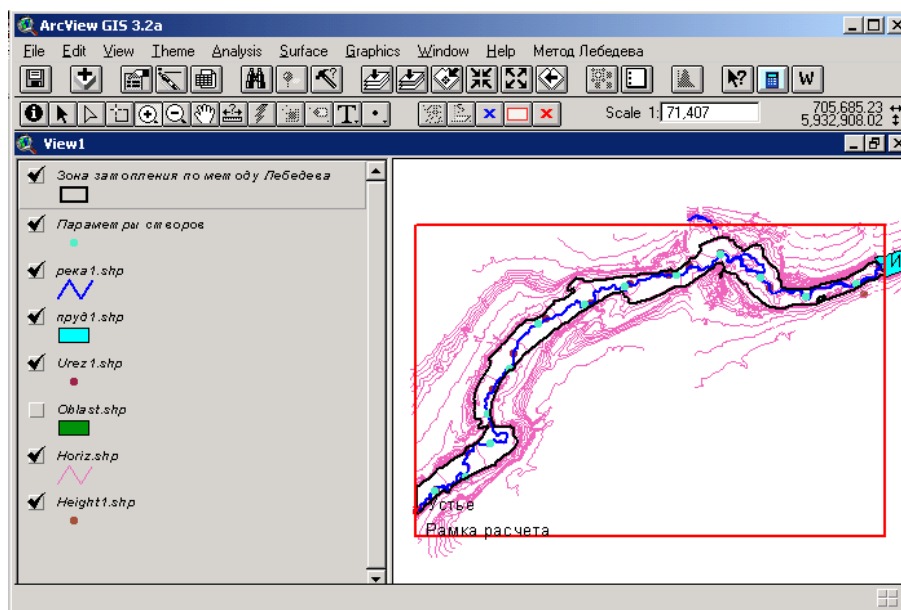


Рис. 3. Пример расчета зоны затопления по методу В.В. Лебедева

Этим завершается расчет по методике (см. рис. 2, 3). При подготовке данных для ПО расчета волны прорыва необходимо вычисление поперечников для каждого отсека, относимых к серединам отрезков. Основная идея расчета удаления горизонтали высоты  $Z_a$  от реки для отсека  $i$  территории заключается в использовании зоны затопления. Пусть рассчитана зона затопления для поля уровней водной поверхности в отсеке  $i$ , вычисляемых как сумма меженного уровня и добавочного уровня  $\Delta z_a$ , такого, что в центре отсека достигается высота водной поверхности равная  $Z_a$ . Тогда среднее удаление границы затопленной лево- или правобережной территорий от первоначального водного потока будет равно эффективному удалению горизонтали высоты  $Z_a$  от реки для отсека  $i$ . Это среднее удаление границы может быть рассчитано как удвоенное среднее от грида [River].Distance, умноженного на грид, описывающий территорию затопления (равен 1 на территории зоны и Nodata вне её). Указанным способом можно рассчитать эффективные поперечники сколь угодно подробно для любого из отсеков. В качестве максимальной высоты горизонталей, входящих в поперечники, используется величина, равная меженному уровню водного потока плюс глубина затопления, рассчитанная по методу В.В.Лебедева и умноженная на некоторый коэффициент безопасности, который мы принимали равным 1.5.

Реализация подхода, подобного вышеприведенному, позволяет автоматизировать работы по расчету зон затопления за счет использования ГИС технологий и цифровых данных по рельефу и гидрографии. Данный подход был использован для прогноза зон затопления при разрушении ряда ГТС в Алтайском крае в период весеннего половодья и паводков.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаврилюк А.В., Нигметов Г.М., Юзбеков Н.С., Программное обеспечение методики прогнозирования последствий разрушения гидротехнических сооружений.,

Труды научной сессии МИФИ, Т.6 Телекоммуникации и новые информационные технологии в системе "Лицей-вуз", М. 1998, С.34-35.

2. Гусев А.А. Комаров А.А., Варламова И.Ю. Методика расчета параметров течения после разрушения плотины, Гидротехническое строительство, 2000 г., № 11, С. 51-55

3. Климович В.И., Прокофьев В.А. Расчет параметров волны прорыва и определение границы зон затопления при аварии на ЗШО, Гидротехническое строительство, 2001 г., № 1, С. 38-44.

4. Лебедев В.В. Гидрология и гидрометрия в задачах. – Л.: Гидрометеиздат, 1961. – 699 с.

5. Пономарчук К.Р. Разработка методики параметров процесса формирования проранов при прорывах грунтовых плотин: Автореферат диссертации. – М., – 2001. – 24 С.

6. Эббот. М. Гидравлика открытого потока. М.: Энергоатомиздат, 1983. 320 с.

7. 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.

8. Яковченко С.Г., Жоров В.А., Постнова И.С., Ловцкая О.В., Воробьев Е.К., "SNIPCALC" – геоинформационное приложение для автоматизированного расчета параметров водосборов"// Материалы Международной конференции «ГИС для устойчивого развития территорий», 2003, С. 216-221.

9. 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.

© С.Г. Яковченко, В.А. Жоров, А.А. Васильев, 2005