

3 Патент України № 115332 . Універсальний гідравлічний сифон / В. В. Онищук, О. Г. Ободовський. – Бюл. № 7, 2017.

4 Справочник по гидравлике / Под редакцией В. А. Большакова – К.: «Вища школа», 1977. – 280 с.

5 Богомоллов А. И., Михайлов К. А. Гидравлика / А. И. Богомоллов, К. А. Михайлов. – М.: Стройиздат, 1972. – 648 с.

УДК 004.42:632.123.1

А. А. Зиновьев, магистр техн. наук  
НИИ труда Министерства труда социальной защиты  
Республики Беларусь, г. Минск

### **РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МАКСИМАЛЬНЫХ УРОВНЕЙ НАВОДНЕНИЙ ДЛЯ ГИДРООБЪЕКТА «ПОЛОЦК»**

С древних времен человек селился вблизи рек, источника жизни, и на всем протяжении истории вынужден был бороться с их коварством. В результате наводнений затопляются обширные территории и многочисленные народно-хозяйственные объекты. Наводнения принадлежат к числу наиболее опасных для человека природных гидрологических явлений. Проблема наводнений, поиск путей снижения ущерба от них в этой связи является на территории Республики Беларусь весьма актуальной.

Разработка методов, дающих возможность рассчитывать подъемы уровня воды в бассейне рек с большой заблаговременностью, остается одной из важнейших задач. Определение вероятности возникновения и развития наводнений в определенном месте и в определенное время, а также оценке возможных последствий их проявлений решается путем прогнозирования. Развитие программно-математических средств и информационных технологий сбора, обработки, анализа и отображения пространственных данных открывает пути для создания новых технологий по прогнозированию и оценке масштабов наводнений, определению зон затопления для своевременного проведения комплекса неотложных мероприятий, направленных на снижение опасности наводнений и уменьшение негативного воздействия на условия проживания населения и функционирование хозяйственных объектов.

Для расчета максимального уровня наводнения и притока воды в водохранилища и в бассейны рек разработана математическая модель прогноза формирования максимальных расходов и уровней воды рек на основе уравнения множественной регрессии [1]. Уравнение множественной регрессии может быть представлено в виде:

$$Y = f(\beta, X) + \varepsilon, \quad (1)$$

где  $X = X(X_1, X_2, \dots, X_m)$  – вектор независимых (объясняющих) переменных;  $\beta$  – вектор параметров (подлежащих определению);  $\varepsilon$  – случайная ошибка (отклонение);  $Y$  – зависимая (объясняемая) переменная.

Линейное уравнение множественной регрессии имеет вид:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_m X_m + \varepsilon, \quad (2)$$

где  $\beta_0$  – свободный член, определяющий значение  $Y$ , в случае, когда все объясняющие переменные  $X_j$  равны 0.

Данные наблюдений и параметры модели должны быть представлены в матричной форме.

$Y = [y_1, y_2, \dots, y_n]'$  –  $n$ -мерный вектор – столбец наблюдений зависимой переменной;

$B = [a, b_1, b_2, \dots, b_p]'$  –  $(p + 1)$ -мерный вектор – столбец параметров уравнения регрессии;  
 $Y = [y_1, y_2, \dots, y_n]'$  –  $n$ -мерный вектор – столбец отклонений выборочных значений  $y_i$  от значений  $\hat{y}_i$ .

Для удобства записи столбцы записываются как строки и снабжаются штрихом для обозначения операции транспонирования.

Значения независимых переменных записываются в виде прямоугольной матрицы размерности  $n \times (p + 1)$ :

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1p} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2p} \\ \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{np} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Каждому столбцу построенной матрицы отвечает набор из  $n$  значений одного из факторов, а первый столбец состоит из единиц, которые соответствуют значениям переменной при свободном члене.

В этих обозначениях эмпирическое уравнение регрессии имеет следующий вид:

$$Y = XB + e. \quad (4)$$

Отсюда вектор остатков регрессии можно выразить следующим образом:

$$e = Y - XB. \quad (5)$$

Таким образом, функционал  $Q = \sum e_i^2$ , который минимизируется по методу наименьших квадратов, можно записать как произведение вектора – строки  $e'$  на вектор – столбец  $e$ :

$$Q = e'e = (Y - XB)'(Y - XB). \quad (6)$$

В соответствии с методом наименьших квадратов дифференцирование  $Q$  по вектору  $B$  приводит к выражению:

$$\frac{\partial Q}{\partial B} = -2X'Y + 2(X'X)B, \quad (7)$$

которое для нахождения экстремума следует приравнять к нулю.

В результате преобразований получаем выражение для вектора параметров регрессии:

$$B = (X'X)^{-1} X'Y, \quad (8)$$

где  $(X'X)^{-1}$  – матрица, обратная к  $X'X$ .

Основными исходными материалами при построении модели для гидрообъекта «Полоцк» послужили данные наблюдений за максимальными расходами и уровнями воды рек Беларуси за период 1966–1986 годов государственного учреждения «Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды». Для прогнозирования максимального уровня наводнений и построения математической модели в гидрометеорологическом центре использовались 3 переменные: общие снегозапасы, высота снега, зимний сток. Средняя ошибка аппроксимации по выбранному ряду наблюдений составила 11,08 %. 1986 год, как год окончания используемого ряда наблюдений, был выбран в связи с последующими существенными изменениями климата, вызванного глобальным потеплением [2].

Для повышения качества и точности модели проведен анализ факторов, обуславливающих максимальный уровень наводнения. Наиболее влиятельными факторами формирования пика наводнения являются: осадки до наступления максимального уровня, общие снегозапасы, высота снега, зимний сток, талодождевой сток (общий), талодождевой сток (поверхностный), талодождевой сток (групповой), осадки во время прохождения наводнения, глубина промерзания почвы.

Дальнейший анализ полученной математической модели прогноза показал следующее влияние каждой переменной на прогнозируемый максимальный уровень наводнения [4]:

1) Изменение переменной «Осадки до наступления максимального уровня» на 1 % приводит к изменению рассчитываемой переменной на 0.0285 %.

2) Изменение переменной «Общие снегозапасы» на 1 % приводит к изменению рассчитываемой переменной на 0.0747 %.

3) Изменение переменной «Высота снега» на 1 % приводит к изменению рассчитываемой переменной на 0.1834 %.

4) Изменение переменной «Зимний сток» на 1 % приводит к изменению рассчитываемой переменной на 0.0307 %.

5) Изменение переменной «Талодождевой сток (общий)» на 1 % приводит к изменению рассчитываемой переменной на 1.3732 %.

6) Изменение переменной «Талодождевой сток (поверхностный)» на 1 % приводит к изменению рассчитываемой переменной на 1.2994 %.

7) Изменение переменной «Талодождевой сток (групповой)» на 1 % приводит к изменению рассчитываемой переменной на 1.3774 %.

8) Изменение переменной «Осадки во время прохождения наводнения» на 1 % приводит к изменению рассчитываемой переменной на 0.0056 %.

9) Изменение переменной «Глубина промерзания почвы» на 1 % приводит к изменению рассчитываемой переменной на 0.0456 %.

Модель использует как метеорологические параметры так и гидрологические [4].  
Ход снеготаяния и осадков рассчитывается по данным станций [1].

Построенная гидролого-математическая модель прогноза максимального уровня наводнения для гидрообъекта «Полоцк» имеет следующий вид [5]:

$$Q_{\max} = 386,7562 \times (-0,9082) \times Od + 0,4614 \times Os + 3,382 \times Hs + \\ + 5,8549 \times Wf + 20,8571 \times To + (-17,382) \times Tp + (-27,0877) \times Tg + \\ + (-0,0215) \times Op + 0,238 \times G,$$

где  $Q_{\max}$  – максимальная высота наводнения, мм;  $Od$  – осадки до наступления максимального уровня, мм;  $Os$  – общие снегозапасы, мм;  $Hs$  – высота снега, мм;  $Wf$  – зимний сток;  $To$  – талодождевой сток (общий);  $Tp$  – талодождевой сток (поверхностный);  $Tg$  – талодождевой сток (групповой);  $Op$  – осадки во время прохождения наводнения, мм;  $G$  – глубина промерзания почвы, мм.

Фактические и расчетные максимальные уровни наводнения представлены на рис. 1.

Проверка расчетов показала высокую точность предлагаемых методов. Построение математической модели по 9 переменным повысит точность прогноза и снизит среднюю ошибку аппроксимации с 11,08 % до 6,33 % [4].

С целью автоматизации расчетов параметров максимального уровня наводнения произведена разработка программного модуля, предназначенного для выполнения следующих функций [5]:

1) Внесение и хранение гидрометеорологической информации.

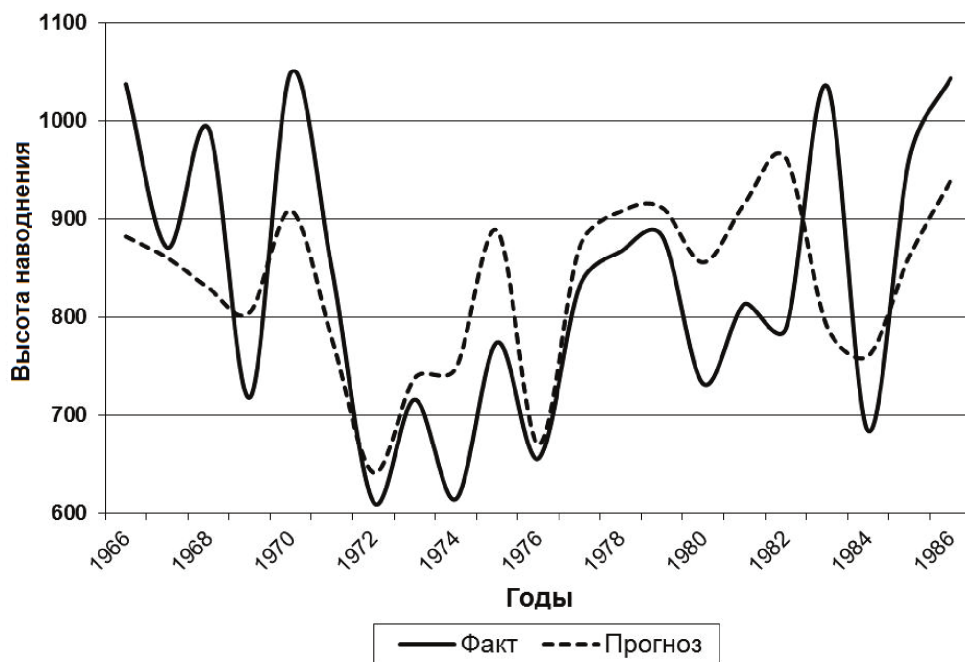
2) Построение математической модели, прогнозирующей максимальный уровень наводнения, используя уравнение множественной регрессии.

3) Выполнение расчетов средней ошибки аппроксимации, оценки дисперсии, несмещенной оценки дисперсии, оценки среднеквадратичного отклонения, множественного коэффициента корреляции (индекс множественной корреляции), коэффициента детерминации, коэффициента вариации, а так же других показателей, характеризующих точность модели и качество прогноза.

4) Создание отчета, содержащего рассчитанную модель и ее параметры.

5) Построение различных графиков.

6) Импорт/экспорт данных в другое программное обеспечение.



**Рисунок 1 – Отклонение фактических значений максимальной высоты наводнения от рассчитанных**

Для решения поставленной задачи, алгоритм разрабатываемого программного модуля следующий:

1. Выбор ранее внесенной информации или внесение новой.
2. Выбор зависимой переменной.
3. Указание переменных, участвующих в построении модели.
4. Исключение аномальных данных (при необходимости).
5. Вывод рассчитанных значений на экран.
6. Формирование отчета, содержащего рассчитанную модель и ее параметры.

Для реализации программного модуля выбрана система программирования Delphi фирмы Borland, так как она предоставляет наиболее широкие возможности для программирования приложений ОС Windows. В качестве основного критерия выбора операционной системы выбран критерий ее распространенности – операционная система Windows используется более чем на 90 % персональных компьютеров. Операционная система Windows не требует специальных знаний и навыков работы с компьютером. Таким образом, можно сделать вывод, что разработку программного модуля следует производить для операционной системы Windows [5].

Вид основных рабочих окон программы представлен на рисунках 2, 3.

Создан программный модуль для расчета и построения математической модели прогнозирования формирования максимальных уровней наводнений и автоматизации прогнозирования максимальных уровней половодья для гидрообъекта «Полоцк».

Технология метода прогноза оперирует с определенными математическими моделями гидрологических процессов. Для повышения качества и точности прогноза формирования максимального уровня наводнения и построения гидролого-математической модели прогноза, был проведен анализ факторов, обуславливающих максимальный уровень наводнения. Структура базы наблюдаемых данных, предоставляет возможность многократного использования данных различными модулями и приложениями. Для оптимизации параметров блока гидролого-математической модели, а также для текущей корректировки прогноза притока воды на гидрообъекте «Полоцк» используются данные гидрологических измерений и наблюдений. Использование данной технологии прогноза позволит заблаговременно определить зону формирования максимального уровня затопления, обеспечить своевременную эвакуацию населения, материальных ценностей и оборудования

из зоны затопления, повысить уровень защищенности населенных пунктов и хозяйственного комплекса за счет внедрения современной системы прогнозирования паводочных, сократить издержки по ликвидации чрезвычайной ситуации, минимизировать экономический ущерб от наводнений.

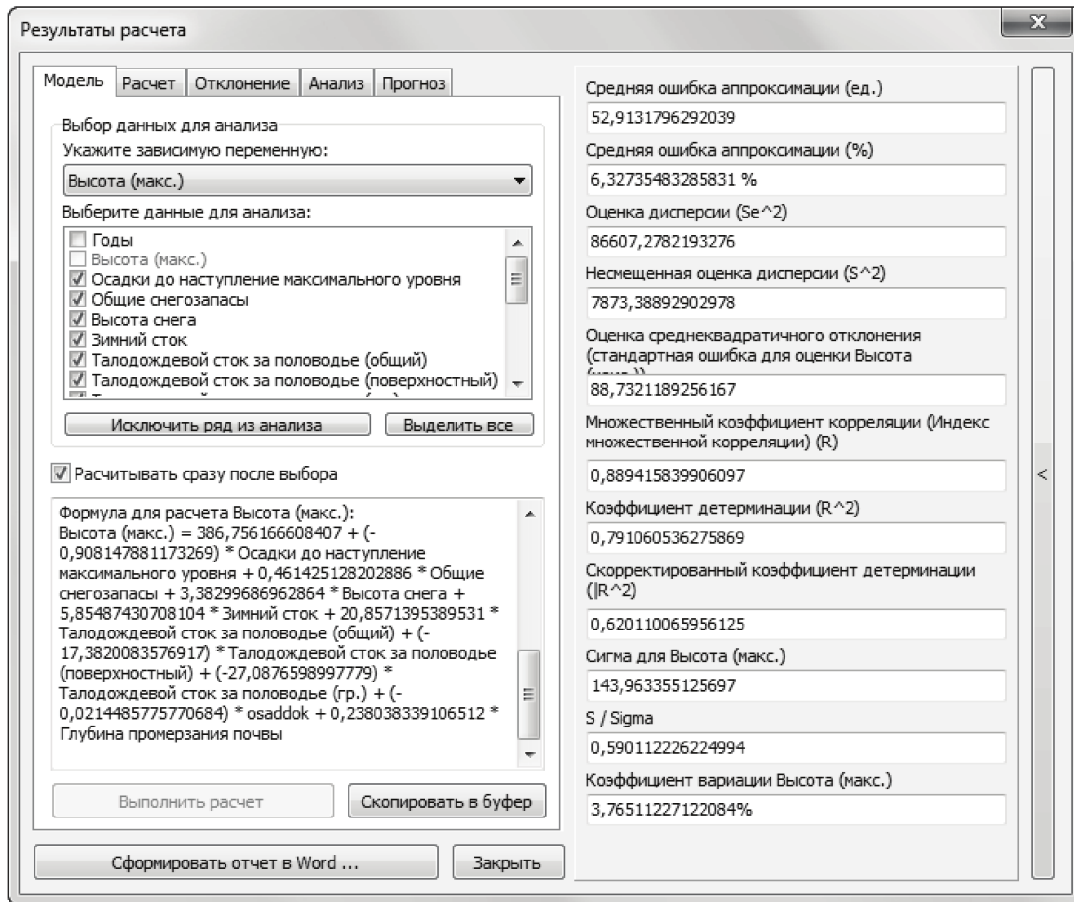


Рисунок 2 – Окно вывода рассчитанных данных

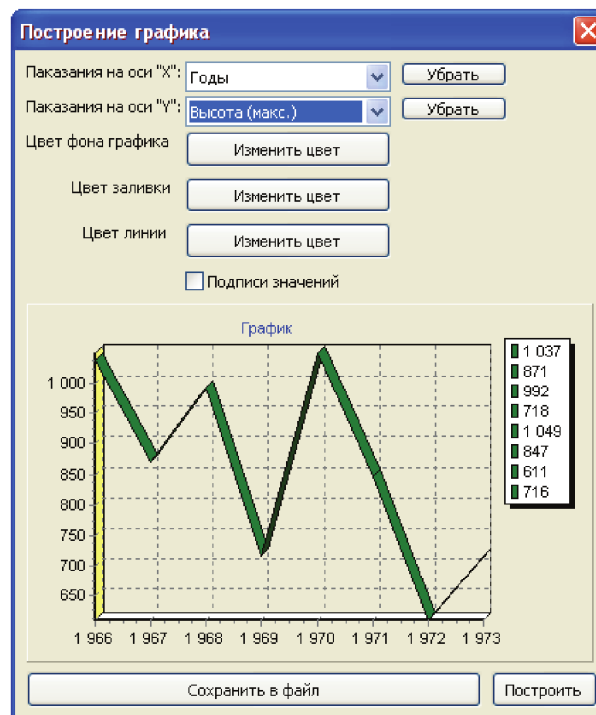


Рисунок 3 – Окно построения отчетов

Разработанная технология прогнозирования максимальных уровней наводнения нашла применения в отделе гидрологических прогнозов государственного учреждения «Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды».

*Список использованных источников:*

1 Корень, В. И. Математические модели гидрологических прогнозов / В. И. Корень // М.: Гидрометеиздат, 1991. – 199 с.

2 Логинов, В. Ф. Глобальные и региональные изменения климата: причины и следствия / В. Ф. Логинов // Минск: ТетраСистемс, 2008. – 495 с.

3 Виноградов, Ю. Б. Математическое моделирование процессов формирования стока / Ю. Б. Виноградов // Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 312 с.

4 Зиновьев, А. А. Автоматизированная технология прогнозирования максимального уровня половодья на речных бассейнах / А. А. Зиновьев // Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания: материалы Международной научно-практической конференции, Брест, 6–8 апреля 2016 г. / БрГТУ; редкол.: А.А. Волчек [и др.]. – Брест, 2016. – С. 177–183.

5 Зиновьев, А. А. Программное обеспечение расчета параметров волны прорыва / А. А. Зиновьев. Официальное авторское свидетельство № 548 о регистрации компьютерной программы. – 14.10.2013 г.

УДК 626.80

К. С. Титов, Е. И. Громадская  
Республиканское унитарное предприятие «Центральный  
научно-исследовательский институт комплексного использования  
водных ресурсов» (РУП «ЦНИИКИВР»), г. Минск

## **ИНВЕНТАРИЗАЦИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ БРЕСТСКОЙ ОБЛАСТИ**

По общепринятым данным на территории Беларуси находится значительное количество водных объектов: около 20000 рек, более 10000 озер, около 150 водохранилищ и более 150 тыс. км каналов[1]. Несмотря на относительно хорошую обеспеченность республики водными ресурсами, инвентаризация, как процесс сбора оценки и уточнения характеристик водных объектов, так и сведений об их использовании входит в число приоритетных задач рационального использования и охраны вод.

Согласно статье 5 Водного кодекса [2] в Беларуси принято выделять следующие категории поверхностных водных объектов:

1. Водотоки;
  - 1.1. Реки;
    - 1.1.1. Большие реки, протяженностью свыше 500 км;
    - 1.1.2. Средние реки, протяженностью от 200 до 500 км;
    - 1.1.3. Малые реки, протяженностью от 5 до 200 км;
  - 1.2. Ручьи;
  - 1.3. Каналы;
2. Водоемы;
  - 2.1. Озера
  - 2.2. Водоохранилища
  - 2.3. Пруды
  - 2.4. Пруды-копани
  - 2.5. Обводненные карьеры
3. Родники.