

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МАКСИМАЛЬНОГО УРОВНЯ ПОВОДОДЬЯ НА РЕЧНЫХ БАССЕЙНАХ

**Зиновьев А.А.**

НИИ труда Министерства труда и социальной защиты Республики Беларусь,  
г. Минск, Республика Беларусь, 375@mail.ru

*Made the development of a software for automated forecasting highs flood. Presented information technology, based on the creation of a mathematical model of the formation of the maximum water levels during the spring flood, which makes it possible to increase the lead time of the forecast. The model uses meteorological stations and hydrological stations data. The developed software processes the data automatically.*

### **Введение**

Наводнения – стихия, с которой человечество сталкивалось во все времена и едва ли не на любой обитаемой территории. Наводнения принадлежат к числу наиболее опасных для человека природных гидрологических явлений. По числу жертв и причиняемым ущербам, наводнения занимают одно из первых мест среди стихийных бедствий. В последние годы наблюдаются заметные изменения водности рек, которые связывают с глобальным потеплением и увеличением антропогенной нагрузки, а так же вовлечением в хозяйственный оборот земель, находящихся в паводкоопасных зонах. К паводкоопасным бассейнам в Республике Беларусь относятся практически все бассейны крупных рек. Наводнения на реках Беларуси наблюдаются как в период прохождения весенних половодий, так и летне-осенних паводков. В результате наводнений затапливаются обширные территории и многочисленные народно-хозяйственные объекты. За последние десятилетия в нашей стране, как и во всем мире, потери от наводнений имеют устойчивую тенденцию к росту. Проблема наводнений, поиск путей снижения ущерба от них в этой связи является на территории Беларуси весьма актуальной. Для уменьшения ущерба от наводнений у объектов, не имеющих защитных сооружений, решающая роль принадлежит гидрологическому прогнозу, задача которого – предсказать размеры ожидаемых затоплений, величину максимального уровня, время начала подъема уровня воды в реке, скорость его подъема и ожидаемую длительность стояния уровней высоких вод. Опасность наводнений зависит, прежде всего, от высоты подъема уровня воды в реке. При этом важнейшей характеристикой является максимальный уровень воды, который характеризует площадь, слой и продолжительность затопления местности.

Прогнозирование опасных гидрологических явлений заключается в определении вероятности их возникновения и развития в определенном месте и в определенное время, а также оценке возможных последствий их проявлений. На современном этапе программно-математических средств и информационных технологий сбора, обработки анализа отображения пространственных данных создаст предпосылки 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.

Мировая практика позволяет утверждать, что затраты на прогнозирование и обеспечение готовности к стихийным бедствиям в 15 раз ниже затрат на предотвращение причиненного ущерба. К сожалению, пока прогнозирование природных чрезвычайных ситуаций представляет собой весьма сложную и слабо разработанную проблему. Использование современных моделей требует полной автоматизации процесса получения данных, их контроля, объективного анализа и расчета.

### **Разработка программного модуля автоматизации прогнозирования максимального уровня половодья**

Математическая модель формирования максимального уровня воды рек разработана на основе уравнения множественной регрессии. 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.

Теоретическое 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 (3);

$Y = [y_1, y_2, \dots, y_n]'$  -  $n$ –мерный вектор – столбец отклонений выборочных значений  $y_i$  от значений  $\hat{y}_i$ .

Для удобства записи столбцы записаны как строки и поэтому снабжены штрихом для обозначения операции транспонирования.

Значения независимых переменных запишем 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 этой 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 таким 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 МНК 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  $X'X$

### **Построение гидролого-математической модели прогноза максимального уровня половодья для гидрообъекта «Полоцк»**

В настоящее время в гидрометеорологическом центре для прогнозирования максимального уровня половодья и построения математической модели используются 3 переменные: общие снегозапасы, высота снега, зимний сток.

При построении такой модели для гидрообъекта «Полоцк» по данным 1966-1993 годов средняя ошибка аппроксимации составляет 10,32 %.

Для повышения качества и точности модели был проведен анализ факторов, обуславливающих максимальный уровень половодья. Выявлены наиболее влияющие факторы формирования пика половодья: осадки до наступления максимального уровня, общие снегозапасы, высота снега, зимний сток, талодождевой сток (общий), талодождевой сток (поверхностный), талодождевой сток (групповой), осадки во время прохождения половодья, глубина промерзания почвы.

Дальнейший анализ полученной математической модели показал следующее влияние каждой переменной на прогнозируемый максимальный уровень половодья:

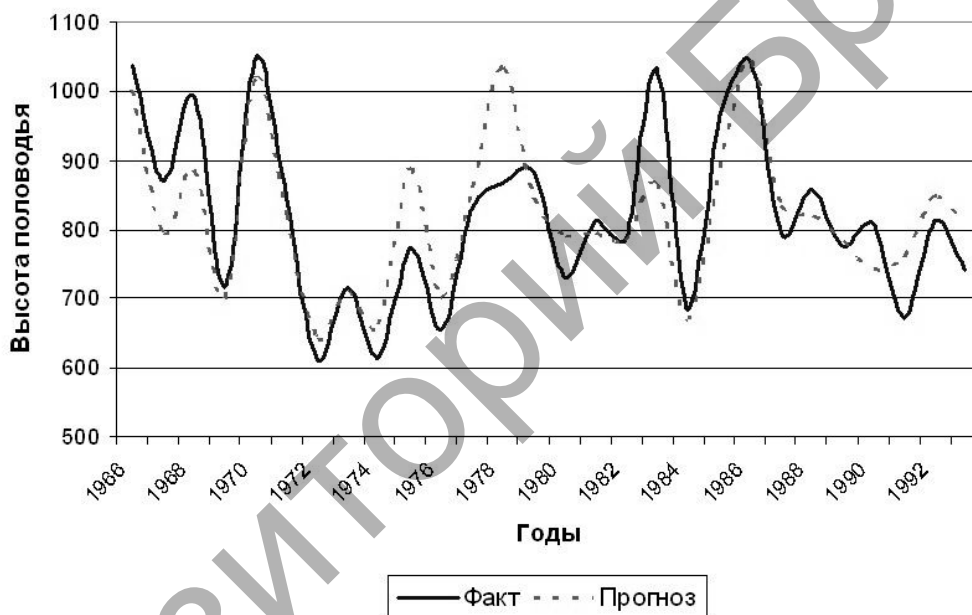
- 1) Изменение переменной “Осадки до наступления максимального уровня” на 1 % приводит к изменению рассчитываемой переменной на 0.02852028345 %.
- 2) Изменение переменной “Общие снегозапасы” на 1 % приводит к изменению рассчитываемой переменной на 0.07473739389 %.
- 3) Изменение переменной “Высота снега” на 1 % приводит к изменению рассчитываемой переменной на 0.1834334224 %.
- 4) Изменение переменной “Зимний сток” на 1 % приводит к изменению рассчитываемой переменной на 0.03071300397 %.
- 5) Изменение переменной “Талодождевой сток (общий)” на 1 % приводит к изменению рассчитываемой переменной на 1.373195673 %.
- 6) Изменение переменной “Талодождевой сток (поверхностный)” на 1% приводит к изменению рассчитываемой переменной на 1.299378673%.
- 7) Изменение переменной “Талодождевой сток (групповой)” на 1 % приводит к изменению рассчитываемой переменной на 1.377409039%.
- 8) Изменение переменной “Осадки во время прохождения половодья” на 1% приводит к изменению рассчитываемой переменной на 0.005581964813%.
- 9) Изменение переменной “Глубина промерзания почвы” на 1% приводит к изменению рассчитываемой переменной на 0.0456107749%.

Модель использует как метеорологические параметры так и гидрологические. Ход снеготаяния и осадков рассчитывается по данным станций. Построенная гидролого-математическая модель прогноза максимального уровня половодья для гидрообъекта «Полоцк» имеет следующий вид:

$$Q_{\max} = 559,967625952162 \times (-0,813915243456561) \times Od + (-1,17322366891023) \times Os + 3,47624666322296 \times Hs + 0,917641834666004 \times Wf + 46,1732462234686 \times To + (-42,2788789507418) \times Tr + (-45,5960967386425) \times Tg + (-0,269096252810764) \times Or + (-0,7699017233955) \times G$$

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

Фактические и расчётные максимальные уровни половодья представлены на рисунке 1.



**Рисунок 1** – Отклонение фактических значений максимальной высоты половодья от рассчитанных.

Проверка расчетов показала высокую точность предлагаемых методов. Построение математической модели по 9 переменным повысит точность прогноза и снизит среднюю ошибку аппроксимации с 10,32 % до 6,27 %.

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

- 1) Внесение и хранение гидрометеорологической информации.
- 2) Построение математической модели, прогнозирующей максимальный уровень весеннего половодья, используя уравнение множественной регрессии.
- 3) Выполнение расчета, средняя ошибка аппроксимации, оценка дисперсии, несмещенная оценка дисперсии, оценка среднеквадратичного отклонения, множественный коэффициент корреляции (индекс множественной корреляции), коэффициент детерминации, коэффициент вариации, а так же других показателей, характеризующих точность модели и качество прогноза.

- 4) Создание отчета, содержащего рассчитанную модель и её параметры.
- 5) Построение различных графиков.
- 6) Импорт/экспорт данных в другое программное обеспечение.

Для решения поставленной задачи, алгоритм разрабатываемого программного модуля должен быть следующим:

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 её параметры.

Разработан программный модуль по автоматизации прогнозирования и оценки в чрезвычайной ситуации в случае прорыва водного узла.

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

The screenshot shows a software window titled 'Гидроанализ (версия 0.29)'. The menu bar includes 'Файл', 'Правка', 'Расчеты', 'Настройки', and 'Справка'. Below the menu is a dropdown menu for 'Выбор гидрообъекта:' with 'Полоцк' selected. The main area contains a table with the following data:

Номер	Годы	Высота (макс.)	Осадки до наступление максимального уровня	Общие снегозапасы	Высот
1	1966	1037	68	104	17
2	1967	871	77	102	33
3	1968	992	61	84	29
4	1969	718	36	82	30
5	1970	1049	107	84	38
6	1971	847	40	57	23
7	1972	611	55	18	5
8	1973	716	55	48	18
9	1974 *	614	6	63	16
10	1975	774	82	59	20
11	1976	655	77	45	11
12	1977	831	47	94	35
13	1978	867	46	98	36
14	1979	883	59	97	35
15	1980	732	43	87	37
16	1981	813	41	61	23
17	1982	788	30	100	33
18	1983 *	1035	45	30	12
19	1984	684	32	60	19
20	1985	962	58	94	43
21	1986	1043	49	103	37
22	1987	797	108	108	41
23	1988	858	58	38	12
24	1989	776	22	11	2
25	1990	808	17	14	1
26	1991	672	30	25	7
27	1992	812	48	43	13
28	1993	741	64	44	18

Рисунок 2 – Окно ввода и редактирования исходных данных.

**Результаты расчета**

Модель    Расчет    Отклонение    Анализ    Прогноз

Выбор данных для анализа  
 Укажите зависимую переменную:  
 Высота (макс.)

Выберите данные для анализа:

Годы  
 Высота (макс.)  
 Осадки до наступление максимального уровня  
 Общие снегозапасы  
 Высота снега  
 Зимний сток  
 Талодождевой сток за половодье (общий)  
 Талодождевой сток за половодье (поверхностный)

Рассчитывать сразу после выбора

Формула для расчета Высота (макс.):  
 Высота (макс.) = 559,967625952162 +  
 (-0,813915243456561) \* Осадки до наступление  
 максимального уровня + (-1,17322366891023) \* Общие  
 снегозапасы + 3,47624666322296 \* Высота снега +  
 0,917641834666004 \* Зимний сток + 46,1732462234686 \*  
 Талодождевой сток за половодье (общий) +  
 (-42,2788789507418) \* Талодождевой сток за половодье  
 (поверхностный) + (-45,5960967386425) \*  
 Талодождевой сток за половодье (гр.) +  
 (-0,269096252810764) \* osaddok + (-0,7699017233955) \*  
 Глубина промерзания почвы

Средняя ошибка аппроксимации (ед.)  
 51,7886216551318

Средняя ошибка аппроксимации (%)  
 6,27481849789163 %

Оценка дисперсии ( $S^2$ )  
 127390,687945824

Несмещенная оценка дисперсии ( $S^2$ )  
 7077,26044143466

Оценка среднеквадратичного отклонения  
 (стандартная ошибка для оценки Высота  
 (макс.))  
 84,126455062808

Множественный коэффициент корреляции (Индекс  
 множественной корреляции) (R)  
 0,847108932713777

Коэффициент детерминации ( $R^2$ )  
 0,717593543883475

Скорректированный коэффициент детерминации  
 ( $R^2$ )  
 0,576390315825212

Сигма для Высота (макс.)  
 129,255683612102

S / Sigma  
 0,426974844075173124

Коэффициент вариации Высота (макс.)  
 2,97553636456337%

**Рисунок 3 – Окно вывода рассчитанных данных**

### Заключение

Произведена разработка программного модуля по автоматизации прогнозирования максимального уровня воды на реках.

Метод прогноза оперирует с определенными математическими моделями гидрологических процессов. В разработанной методике прогноза вычисляются параметры модели, и устанавливается связь этих параметров с различными факторами на основании данных гидрометеорологических наблюдений.

По результатам основных данных, программа позволит более точно спрогнозировать максимальный уровень половодья, формирования катастрофических и особо опасных наводнений. Созданная информационная технология, предусматривает оптимизацию параметров математической модели прогноза в ходе ее применения. Для этого используется электронная база многолетних гидрометеорологических данных наблюдений, обеспечивающая автоматизированный перебор и моделирование возможных гидрометеорологических ситуаций. База включает данные наблюдений десятков гидрологических постов и метеорологических станций. Структура базы, наблюдаемых данных, предоставляет возможность многократного использования данных различными модулями и приложениями. Дальнейшая работа по усовершенствованию методики, и технологии должна включать накопление, и обобщение опыта прогноза декадного, месячного и квартального притока в процессе практического использования модели с применением различных способов зада-

ния метеорологической информации за период заблаговременности прогнозов. Таким образом, владея информацией о предстоящем чрезвычайном происшествии, можно существенно снизить ущерб и риск наводнения.

### **Список литературы**

1. Корень, В.И. Математические модели гидрологических прогнозов М.: Гидрометеоздат, 1991. – 199 с.
2. Бураков, Д.А. Математическая модель расчета гидрографа весеннего половодья для равнинных заболоченных бассейнов // Метеорология и гидрология, 1978, № 1. – С. 49-59.
3. Бефани, Н.Ф., Калинин, Г.П. Упражнения и методические разработки по гидрологическим прогнозам Гидрометеоздат, 1983. – 390 с.
4. Шанченко, Н.И., Эконометрика: лабораторный практикум Н.И. Ульяновск: УлГТУ, 2004. – 79 с.

УДК 911.2 : 556.55 (477.82)

## **ЛИМНОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗЕРА ОХНИЧ, УКРАИНСКОЕ ПОЛЕСЬЕ**

**Ильина О. В., Пасичник М. П., Пасичник Н. В.**

Восточноевропейский национальный университет имени Леси Украинки,  
г. Луцк, Украина, [olga-v-ilyina@rambler.ru](mailto:olga-v-ilyina@rambler.ru), [beekeeper.misha@gmail.com](mailto:beekeeper.misha@gmail.com)

*This work analyzes the material of limno-geochemical studies of Ohnych Lake (Ukrainian Polissya). Special attention is paid to the analysis of the chemical composition of ash. Morphometric and hydrological characteristics of water bodies and land catchment structure was calculated as well. The results can be used for hydrochemical studies of the lake and for predicting changes in the water with different degrees of anthropogenic load.*

### **Введение**

Актуальность исследования лимносистем Украинского Полесья обусловлена значительной долей озер в пространственной структуре ландшафтов (0,16 %) [4], усиленной антропогенной и естественной трансформацией водоемов локального уровня, слабой изученностью закономерностей функционирования водоемов, имеющих важное научное и хозяйственное значение.

Осадочные комплексы озёр являются типичной геохимической средой пресноводного осадконакопления в регионе. Знание закономерностей распределения, особенностей состава отложений и факторов, их определяющих, необходимое для научно-обоснованного прогнозирования развития водоемов под влиянием техногенной нагрузки, выявление закономерностей функционирования экосистем водоемов в зависимости от ландшафтных условий, а также разработке рациональных схем использования ресурсов водоемов (воды, донных отложений, макрофитов) в зависимости от состава и свойств [2–3]. В связи с этим, лимнологическо-геохимические исследования природных водоемов Полесья позволят глубже познать теорию генезиса, функционирования, устойчивости и восстанавливаемости водоемов зоны смешанных лесов и спрогнозировать тенденции их дальнейших изменений.