

УДК 627.8

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕРАБОТКИ БЕРЕГОВЫХ СКЛОНОВ ВОДОХРАНИЛИЩ МЕЛИОРАТИВНОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

**В.В.Кобяк**, адъюнкт

ГУО «Командно-инженерный институт» МЧС Республики Беларусь

**Ключевые слова:** абразия, переработка коренных берегов, риск-процесс, водохранилище

### **Введение**

При создании водохранилищ в их прибрежной зоне происходит ряд негативных процессов, связанных в основном с переформированием береговой линии и отступанием ее вглубь материка, которое приносит значительный ущерб сельскому и народному хозяйству. Первые оценки прогноза абразионных процессов были рассмотрены в работах различных советских исследователей и касались главным образом крупных водохранилищ. Изучению процессов абразии в условиях малых равнинных водохранилищ Беларуси посвящены работы Е.М.Левкевича, В.Е.Левкевича, О.С.Ленартович. Однако прогноз и описание процесса переформирования коренных берегов осуществлялся в основном для водохранилищ руслового типа, так как на территории республики их насчитывается более 100 единиц. В данной работе на основании анализа берегоформирующих факторов разработаны зависимости, которые будут использоваться при составлении математической модели развития абразионных процессов для водохранилищ, созданных на базе озер, где произошли изменения в их гидрологическом и внутриводоемном режиме.

### **Моделирование процесса**

В Республике Беларусь в последнее время отмечается рост создания искусственных водных объектов – водохранилищ, используемых в целях мелиорации, орошения, водоснабжения, рекреации и т.д. Большинство из них – водоемы руслового и наливного типа, но в связи с ограниченной возможностью регулирования малых водотоков возросла роль водохранилищ озерного типа. Они создавались главным образом для выработки дешевой электроэнергии путем строительства малых гидроэлектростанций и мелиорации [1,2]. В основном водохранилища озерного типа (на сегодняшний день их более 15) расположены в бассейне Западной Двины [2].

Создание новых искусственных водных объектов на базе существующих озер характеризуется резким поднятием уровня воды 1-2 м, что приводит к изменению гидрологического режима, волнения, течений и т.д., а в береговой зоне – к активизации и регенерации процессов берегоформирования (рис.1), в частности к переработке естественных береговых склонов, которой подвержено более 300 км (общая протяженность бере-

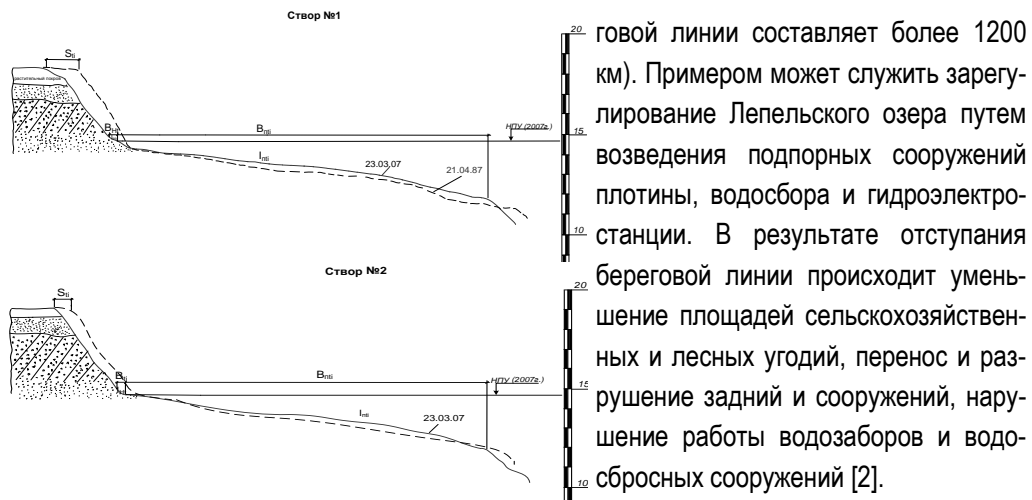


Рис. 1 – Типичный профиль переработки береговых склонов (Лепельское водохранилище)

В настоящее время актуальны вопросы разработки и обоснования математической модели, необходимой при прогнозировании переработки береговых склонов в условиях малых водохранилищ, созданных на базе озер и существующих искусственных водоемов, где произошли изменения в их гидрологическом режиме (повышение уровня воды, увеличение обеспеченности «активных» уровней и т.д.).

Существующие методы прогноза переработки коренных берегов водохранилищ основываются на результатах обработки данных многолетних натурных и полевых исследований. Для их анализа и обоснования применяются различные методы математического, физического, лабораторного и натурного моделирования [3-6]. Предлагаемые модели касались преимущественно крупных водохранилищ. Цель данной работы – описание процесса переформирования берегов малых равнинных водохранилищ Беларуси, созданных на базе озер, на основе использования ранее разработанных критериев подобия.

Как известно, процесс абразии является многофакторным процессом, протекающим под действием ряда внешних воздействий [5]. Оценка значимости берегоформирующих факторов и условий для условий малых равнинных водохранилищ с использованием метода экспертных оценок (метод Delfi) и корреляционного анализа изложена в работе [7]. В результате обобщения натурных данных было установлено, что первый из вышеуказанных методов позволял оценить качественные стороны процесса и не давал полной оценки влияния факторов на переработку береговых склонов. Вследствие этого был применен второй метод – парного корреляционного анализа, который учитывал тесноту взаимодействия характеристик профиля берегового склона с основными факторами и условиями. Проведенные на тестовых водоемах в безледный период 2004-2010 гг. исследования позволили дополнить известные характеристики данными о степени воздей-

говой линии составляет более 1200 км). Примером может служить зарегулирование Лепельского озера путем возведения подпорных сооружений плотины, водосбора и гидроэлектростанции. В результате отступления береговой линии происходит уменьшение площадей сельскохозяйственных и лесных угодий, перенос и разрушение зданий и сооружений, нарушение работы водозаборов и водосбросных сооружений [2].

В настоящее время актуальны вопросы разработки и обоснования математической модели, необходимой при прогнозировании переработки береговых склонов в условиях малых водохранилищ, созданных на базе озер и существующих искусственных водоемов, где произошли изменения в их гидрологическом режиме (повышение уровня воды, увеличение обеспеченности «активных» уровней и т.д.).

**Таблица 1 – Морфометрические характеристики объектов стационарных наблюдений на водохранилищах Беларуси (тестовые объекты-стационары)**

Наименование водохранилища	Площадь зеркала, км <sup>2</sup>	Полный объем, млн.м <sup>3</sup>	Максимальная глубина, м	Длина, км	Средняя глубина, м	Срок наблюдений, лет
Осиповичское*	11,87	17,5	5,3	24	1,47	52
Заславское*	26,86	103	8,0	9,2	3,8	51
Вилейское	77,0	260	15,0	26,5	3,18	28
Чигиринское	21,19	60,0	5,0	17,4	2,83	17
Тетеринское	4,61	13,8	5,2	9,0	3,0	17
Лепельское	10,18	74,67	33,7	7,3	7,57	47
Погост	16,16	54,48	9,9	6,1	3,4	18
Обстерно	9,89	50	12	5,5	5,1	14
Дривяты	36,14	223,52	12	9,86	6,1	8

\* Вторичное развитие процесса берегоформирования в связи с вводом в эксплуатацию Вилейско-Минской водной системы.

ствия на коренной береговой склон. В табл. 1 приведены морфометрические характеристики некоторых водохранилищ, где заложена сеть контрольных поперечников и реперов, которые используются для наблюдения за развитием абразионных процессов.

В работе [7] корреляционный анализ производился только для водохранилищ руслового типа. Нами корреляционный анализ выполнен для условий водохранилищ, созданных на базе озер. За основу были взяты результаты стационарных наблюдений за абразионными процессами на водохранилищах озерного типа или озеровидной формы в плане, находящихся в различных геоморфологических областях Беларуси: Северная зона страны – Лепельское (7 створов протяженностью более 350 м); Центральная часть – Заславское (6 створов протяженностью более 300 м); зона Полесья – Краснослободское водохранилище (3 створа протяженностью более 150 м). Указанные величины определялись по уравнению (1) [7]:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sqrt{\left( \sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2 \right) \left( \sum_{i=1}^n y_i^2 - n \bar{y}^2 \right)}}, \quad (1)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

где  $y_i$  – функции, значения которых являются параметры профиля абразии ( $y_1$  – величина линейной переработки); аргументы, значения характеристик берегоформирующих факторов и условий  $x_i$ : длина разгона волны –  $x_1$ , высота волны 1%-ной обеспеченности –  $x_2$ ; амплитуда колебаний в безледный период –  $x_3$ ; высота берегового склона –  $x_4$ ; уклон разрушаемого берегового склона –  $x_5$ ; глубина водоема на внешнем краю отме-

Таблица 2 – Коэффициенты корреляций линейной переработки водохранилищ руслового и озерного типа

Название фактора или условия		Значение коэффициента корреляции показателя линейной переработки водохранилища	
		руслевое	озерное
Высота берегового склона, м	X <sub>4</sub>	-0,92	-0,9
Уклон берегового склона, град	X <sub>5</sub>	-0,76	-0,85
Средний диаметр частиц грунта, м	X <sub>7</sub>	0,72	0,72
Коэффициент неоднородности грунта	X <sub>8</sub>	0,72	0,72
Амплитуда колебания уровня в безледный период, м	X <sub>3</sub>	0,72	0,71
Длина разгона волны, м	X <sub>1</sub>	0,69	0,69
Высота волны по длине разгона волны, м	X <sub>2</sub>	0,69	0,69
Глубина водохранилища на внешнем краю отмели, м	X <sub>6</sub>	0,68	0,69
Ширина подводной части отмели, м	X <sub>9</sub>	0,64	0,67
Угол наклона подводной части отмели, град	X <sub>10</sub>	0,63	0,65

ли – X<sub>6</sub>; средний диаметр частиц грунта – X<sub>7</sub>; неоднородность грунта – X<sub>8</sub>; ширина подводной части отмели – X<sub>9</sub>; угол наклона подводной части отмели – X<sub>10</sub>; средние значения функций и аргументов –  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ ; количество наблюдений – n.

Результаты расчетов показали, что характеристики переработки береговой линии хорошо коррелируют с факторами и условиями, указанными в табл.2.

Полученные значения величины  $r$  свидетельствуют о правильности выбора основных доминирующих факторов и условий (рис. 2), влияющих на устойчивое состояние береговых склонов водоемов различного типа. Как оказалось, что является принципиально важным, структура и количество берегоформирующих факторов и условий, избранных для анализа, очень близки, что позволяет в дальнейшем говорить о подобии абразионных процессов на водохранилищах руслового и озерного типов.

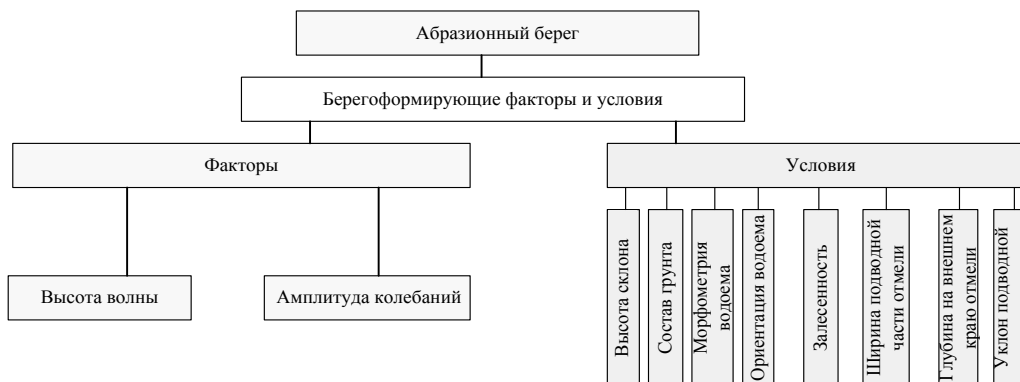


Рис. 2 – Основные берегоформирующие факторы и условия

Таблица 3 – Представительные показатели процесса переработки береговых склонов

Представительные характеристики	Наименование фактора	Обозначение
Геологические характеристики размываемых грунтов	Средний диаметр частиц грунта, м	$d_{50}$
	Коэффициент неоднородности грунта	$\eta$
Гидрологические характеристики водоема	Амплитуда колебания уровня воды в безледный период, м	$\Delta_A$
	Обеспеченность активных уровней в безледный период, %	$P_A$
	Повторяемость максимальной высоты волны, %	$P_V$
	Высота волны, м	$h_{1-5\%}$
	Средняя глубина по длине разгона волны, м	$\overline{h_D}$
	Высота поднятия уровня воды, м	$\Delta_A'$
Морфологические характеристики береговой линии и склона	Ширина подводной части отмели, м	$B_{nd}$
	Высота берегового склона, м	$H_{ск}$
	Угол наклона подводной части отмели, град	$i_{nd}$
Морфометрические Характеристики водоема	Длина разгона волны, м	$D_p$
	Глубина на внешнем краю отмели, м	$H_{гп}$

Приведенная выше оценка и структуризация факторов и условий позволила выделить основные морфологические, гидрологические, геоморфологические характеристики. А на основании изменения гидрологических характеристик водоема (увеличения уровней воды, продолжительности их стояния и др.) в табл.3 приведены их характерные показатели, которые будут использоваться в дальнейшем при моделировании переработки незакрепленных коренных берегов.

Процесс переработки на водохранилищах озерного типа определяют гидрологические (ветро-волновой и уровенный режимы и их повторяемость, средняя глубина по длине разгона волны, высота изменения уровня воды), морфометрические условия водоема (длина разгона волны, глубина на внешнем краю отмели), геоморфологические характеристики коренного берега (высота и крутизна склона, гранулометрический состав и неоднородность грунта).

При моделировании процессов абразии все факторы и условия были сгруппированы в следующем порядке:

– морфометрические характеристики водоема:

$$x_1 = \frac{D_p + kD_p'}{h_D + \Delta A'} \quad (2)$$

где  $D_p$  и  $D_p'$  – расчетная длина разгона волны соответственно до и после изменения уровня режима, м;

$\overline{h_D}$  – средняя глубина по длине разгона волны до изменения уровня режима, м;

$\Delta A'$  – высота поднятия уровня воды после изменения гидрологических условий водоема, м;  $k$  – коэффициент, определяемый как отношения площади водоема после затопления к площади до затопления.

– геоморфологические характеристики берегового склона:

$$x_2 = \frac{H}{d_{50}^{CK} \cdot \eta} \quad (3)$$

где  $H_{CK}$  – высота склона, м;  $d_{50}$  – средневзвешенный диаметр частиц, м;  $\eta$  – коэффициент неоднородности грунта.

$$x_3 = \frac{B_{п}}{H_{гп} + \Delta A'} \quad (4)$$

где  $B_{п}$  – исходная ширина подводной части отмели на начало трансформации водоема, м;  $H_{гп}$  – глубина на внешнем краю отмели, м.

– гидрологические характеристики:

$$x_4 = \frac{P_V \cdot h_{1-5\%}}{P_A \cdot \Delta A} \quad (5)$$

где  $P_V$  – обеспеченность активных уровней, %;  $P_A$  – обеспеченность максимальной высоты волны, %;  $h_{1-5\%}$  – высота волны 1-5%-ной обеспеченности, м;  $\Delta A$  – амплитуда колебания в безледный период, м.

$$x_5 = \left( \frac{h_{1-5\%}}{\Delta A} \right) b \quad (6)$$

где  $b$  – коэффициент, зависящий от характера поднятия уровня воды.

$$x_6 = \frac{\Delta A}{H_{гп} + \Delta A} \quad (7)$$

В нашем случае прогноз переработки береговых склонов выполняется на основе метода природных аналогов, поэтому моделирование осуществляется путем сравнения ранее рассмотренных зависимостей, которые в свою очередь являются критериями модификаций, которая зависит от типа водохранилища, где производится прогнозный расчет переформирования коренных берегов (табл.4).

Таблица 4 – Варианты применения прогнозной модели для водохранилищ различного типа [8]

Объект-прогноза	Объект-аналог	Идентификатор варианта переноса
Естественное озеро	Водоохранилище озерного типа	$O_E - O_O$
	Водоохранилище руслового типа, озеровидное в плане	$O_E - O_O$
	Водоохранилище наливного типа	$O_E - O_H$
Водоохранилище озерного типа	Водоохранилище озерного типа	$O_O - O_O$
	Водоохранилище руслового типа, озеровидное в плане	$O_O - O_R$
	Водоохранилище наливного типа	$O_O - O_H$
Водоохранилище руслового типа, озеровидное в плане	Водоохранилище озерного типа	$O_R - O_O$
	Водоохранилище руслового типа, озеровидное в плане	$O_R - O_R$
	Водоохранилище наливного типа	$O_R - O_H$

В качестве математической модели коренного берегового склона, формируемого под действием и сочетанием вышеописанных факторов и условий, является выражение, представленное ниже и применимое для условий объектов аналогов и объектов прогноза. К сожалению, величина объектов аналогов минимальна, а их поиск будет зависеть от большого количества натуральных моделей, может превышать десятки единиц. Уменьшение интервала точности приведет к расширению границ автомодельных областей, которые приведут к увеличению выборки природных аналогов [6].

Для достижения выполнения сходства в протекании абразионных процессов между объектом аналогом и объектом прогноза (для условий водохранилищ озерного типа или на искусственных водных объектах, где изменился их гидрологический режим) необходимо выполнить следующие условия:

$$x_1^a, x_2^a, x_3^a, x_4^a, x_5^a \in x_1^n, x_2^n, x_3^n, x_4^n, x_5^n, \quad (8)$$

где  $a$  – индекс объекта аналога;  $n$  – индекс объекта прогноза;  $x_i$  – характеристики, формирующие переработку берегового склона, а их сочетания являются критериями подобия.

Уравнение (8) с использованием рекомендаций [8] может быть записано следующим образом:

$$\left[ \left( \frac{D_p + kD_p^r}{h_d + \Delta A^r} \right)^a, \left( \frac{H_{CK-П}}{d_{50}} \right)^a, \left( \frac{B_{П}}{H_{ГЛ}} \right)^a, \left( \frac{P_v \cdot h_{1-5\%}}{P_A \cdot \Delta A} \right)^a, \left( \left( \frac{h_{1-5\%}}{\Delta A} \right) b \right)^a, \left( \frac{\Delta A}{H_{ГЛ} + \Delta A^r} \right)^a \right] \in \quad (9)$$

$$\in \left[ \left( \frac{D_p + kD_p^r}{h_d + \Delta A^r} \right)^n, \left( \frac{H_{CK-П}}{d_{50}} \right)^n, \left( \frac{B_{П}}{H_{ГЛ}} \right)^n, \left( \frac{P_v \cdot h_{1-5\%}}{P_A \cdot \Delta A} \right)^n, \left( \left( \frac{h_{1-5\%}}{\Delta A} \right) b \right)^n, \left( \frac{\Delta A}{H_{ГЛ} + \Delta A^r} \right)^n \right]$$

Подставив данные гидрологических и геоморфологических характеристик, полученных в результате обработки натуральных данных, в зависимость (9), можем сравнить безразмерные численные значения и определить величину линейной переработки на конечный срок. Разбежка данных, в соответствии с [8], не должна превышать 15-20%. Рассмотренная модель может иметь различные модификации, в зависимости от типа водохранилища-аналога и объекта прогноза.

#### **Заключение**

Предложенная структура модели, построенная на основании метода природных аналогов с использованием критериев подобия, может использоваться для прогнозирования процессов переработки берегов малых равнинных водохранилищ Беларуси, а также естественных водных объектов, трансформируемых в искусственные водоемы.

#### **Литература**

1. Лопух, П.С. Рекомендации по экологическому обоснованию созданных озерных водохранилищ в равнинных условиях / П.С. Лопух, А.Н. Рачевский. – Минск: БГУ, 2002. – 22 с.
2. Левкевич, В.Е. Рациональное использование и охрана прибрежных ландшафтов на водохранилищах Белоруссии / В.Е. Левкевич, П.С. Лопух – Минск: БелНИИТИ, 1990. – 60 с.
3. Пышкин, Б.П. Динамика берегов водохранилищ / Б.П. Пышкин. – Киев: Наукова думка, 1973. – 414 с.
4. Цайтц, Е.С. Действие волн на откос из несвязанных грунтов: дис. ... канд. техн. наук / Е.С. Цайтц; АН УССР. – Киев, 1958. – 19 с.
5. Финаров, Д.П. Динамика берегов и котловин водохранилищ гидроэлектростанций СССР / Д.П. Финаров. – Л.: Энергия, 1974. – 244 с.
6. Розовский, Л.Б. Инженерно-геологические прогнозы и моделирование / Л.Б. Розовский, И.П. Зелинский. – Одесса: ОГУ, 1975. – 115 с.
7. Левкевич, В.Е. Переработка берегов малых равнинных водохранилищ мелиоративных систем, её прогноз и управления (на примере Белорусской ССР); дис. ... канд. техн. наук: 06.01.02 / В.Е. Левкевич. – Минск: 1986. – 135 с.
8. Широков, В.М. Методические рекомендации по оценке воздействий малых водохранилищ на окружающую среду / В.М. Широков, П.С. Лопух, В.Е. Левкевич; под ред. В.М. Широкова. – Минск: Белгосуниверситет, 1995. – 68 с.

#### **Summary**

##### ***Kobiak V. Model analysis of shoreface processing procedure in water reservoirs designed for reclamation***

Change of hydrological conditions of a reservoir results to a renewal of abrasion processes. To be able to forecast abrasion risks - processes at lake water reservoirs, as well as water with alterations of hydrological order (water level increase), a mathematical model based on criteria of similarity was developed for forecasting of abrasion processes. Deviation of the forecast data from the actual one should not exceed 15-20%.

Поступила 15 апреля 2010 г.