

УДК 631.459.31+627.8

РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ И НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ БЕРЕГОВЫХ ПРОЦЕССОВ ВОДОХРАНИЛИЩ БЕЛАРУСИ

Кобяк В.В.

Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь

e-mail: mail@kii.gov.by

Представлены результаты лабораторных исследований моделирования абразионных процессов, возникающих на берегах малых равнинных водохранилищ Беларуси при изменении режима их эксплуатации (реконструкции, увеличении полезного объема, изменении диспетчерских графиков и др.). На основе рекогносцировочных и стационарных натурных исследований, проведенных на тестовых искусственных водных объектах в период с 2004 по 2010 г., проанализированы интенсивность и масштабы процессов переработки коренных берегов на современном этапе их эксплуатации.

The results of plain reservoir's banks abrasion process laboratory modeling for Belarus are presented. These processes are found in connection with changing of exploitation regime (e. g. reconstruction, conservation zone increment, change of operations schedule, etc.). Reconnaissance and stationary field observation traced at testing water objects from 2004 till 2010 allowed to analyze marginal erosion intensity and scale.

(Поступила в редакцию 15 апреля 2010 г.)

ВВЕДЕНИЕ

По расчетным оценкам специалистов [1–3] на водохранилищах Республики Беларусь на современном этапе эксплуатации должно происходить балансирование протяженности абразионных и аккумулятивных берегов и выработки их устойчивого профиля. Проведенные натурные и лабораторные исследования позволили установить, что в настоящее время абразионные процессы продолжают интенсивно развиваться, нанося значительный ущерб народному и сельскому хозяйству, лесному фонду и т. п.

МОДЕЛИРОВАНИЕ АБРАЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ВОДОХРАНИЛИЩ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Моделирование процессов взаимодействия волн с коренными берегами широко освещено в работах [4, 5], результаты которых применимы только для условий крупных водохранилищ. Однако лабораторные исследования абразионных процессов при изменении гидрологических характеристик и воздействии волн различной высоты в условиях малых равнинных водохранилищ Беларуси не производились.

Целями настоящих исследований были:

- определение совместного воздействия уровня режима и волнения на интенсивность и масштабы деформации склона;
- установление характеристик профиля равновесия при изменении высоты волны и уровня воды;
- разработка предложений по прогнозированию деформации тела (откоса) модели при плавном повышении уровня воды с последующим изменением высоты волны.

В задачи лабораторных исследований входило моделирование процесса деформации откоса модели при различных параметрах волнения и колебаний уровня для водохранилищ на базе существующих озер при изменении их гидрологического режима.

Экспериментальные исследования производились в волновом лотке прямоугольного сечения с размерами 12,0×0,7×0,32 м. Модель откоса соответствовала наиболее распростра-

ненным абразионным берегам существующих водохранилищ, на которых производились натурные полевые исследования. Тело модели было отсыпано из среднезернистого несвязанного грунта с коэффициентом неоднородности $\eta = 2,5 \div 2,8$. Опыты производились при глубине воды $H = 0,3 \div 0,5$ м, высоте волны $h = 0,04 \div 0,08$ м и длине волны $L = 1,02$ м. Волны воспроизводились с помощью волнопродуктора. Результаты фиксировались графическим способом на бумажном носителе – кальке, расположенной на стенке лотка. Время промежутка фиксации контура модели составляло 1, 3, 5, 15, 30, 45, 60 мин и далее через 20 мин до стабилизации процесса. Обработка результатов измерений производилась по величине линейной деформации тела модели (S_k). Ветровое волнение моделировалось без искажения линейного масштаба [4] с учетом законов подобия. Масштабный коэффициент волновых показателей в натуральных условиях по отношению к соответствующим величинам на модели, учитывая геометрические характеристики установки, был равен 1:10. Для выполнения критерия динамического подобия и обеспечения условия автомодельности водного потока использовались рекомендации [4, 6].

Для решения поставленных задач были произведены следующие серии опытов.

Первая серия опытов была направлена на определение влияния изменения уровня режима при различных высотах волн на интенсивность и масштабы деформации тела модели. В этих целях производился размыв профиля откоса сложенного из среднезернистого песка заложением 1:3. Высота волны в опытах составляла 4, 6 и 8 см. После достижения статического равновесия, происходило плавное поднятие (без остановки волнопродуктора) уровня воды в лотке на 5 см. Опыт прекращался после выработки профиля равновесия.

Вторая и третья серии опытов различались высотой поднятия уровня воды, который составлял 7 и 10 см. Высота волн и состав грунта не изменялись.

Четвертая серия опытов была направлена на изучение влияния понижения уровня воды в водоеме на динамику и масштабы деформации тела модели.

Результаты опытов, представленные в табл. 1, показывают, что на характер интенсивности и масштабов деформации оказывают влияние изменения уровня режима. При этом уменьшение времени достижения равновесия зависит от величины уровня поднятия воды, а масштабы деформации при различных высотах волн в пределах одного уровня режима практически не отличаются.

Таблица 1 – Деформация модели при различной высоте волны и изменении уровня воды

Номер опыта	Количество опытов	Высота волны, см	Изменение уровня воды, см	Величина деформации, см	Время наступления равновесия, мин
1.1	3	4	5	24,6	80
1.2		6		23,2	
1.3		8		24,9	
2.1		4	7	34,1	100
2.2		6		37,5	80
2.3		8		37,7	35
3.1		4	10	43,2	100
3.2		6		46,9	
3.3		8		46,3	

На основании лабораторных исследований была установлена зависимость переработки тела модели S_k от изменения уровня воды:

$$S_k = \left(\frac{h_B}{\Delta A} \right) b, \quad (1)$$

где h_B – высота волны, м;

ΔA – амплитуда колебания, м;

b – коэффициент, зависящий от изменения уровня воды (изменяется в пределах от 0,2 до 0,75 для лабораторных условий).

Величина верхнего и нижнего пределов размывающего действия волны на песчаный склон по результатам экспериментов представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Пределы верхнего и нижнего размывающего действия волны на откос

Предел размыва	Высота волны h_B , см		
	4	6	8
Верхний предел, a_1	$(1,13 \div 1,23) h_B$	$(0,78 \div 0,92) h_B$	$(0,56 \div 0,68) h_B$
Нижний предел, a_2	$(1,24 \div 1,8) h_B$	$(1,4 \div 2,3) h_B$	$(0,96 \div 1,5) h_B$

Ширина подводной части отмели B_{Π} составила:

$$B_{\Pi} = h_B / (0,5 \div 0,7). \quad (2)$$

Четвертая серия опытов рассматривала влияние сработки уровня воды и воздействие волн высотой так же, как в предыдущих опытах, на откос с фиксацией характеристик профиля. Изначально на тело модели с заложением 1:3 пропускались волны заданной величины. После стабилизации деформации тела модели для каждой группы волн производилось сработка уровня воды на 5 см без остановки волнопродуктора. В результате анализа опытных данных было установлено, что на величину линейной переработки сработка уровней не влияет. Изменения происходят только в подводной части отмели с увеличением ее ширины и уменьшением уклона.

Оценка сходимости результатов лабораторных экспериментов с данными натуральных исследований производилась на примере Осиповичского водохранилища. Так как явление разрушения откоса в природе и на модели происходит в квадратичной зоне обтекания [4], то перенос данных с модели на природу происходил без искажения масштаба моделирования:

$$M_h = M_\lambda = M_H = M_L, \quad (3)$$

где M_h – масштаб высоты волны;

M_λ – масштаб длины волны;

M_H – масштаб глубины и вертикальный масштаб модели;

M_L – горизонтальный масштаб модели.

Морфологические и гидрологические характеристики исследуемых объектов указаны в табл. 3.

Таблица 3 – Морфологические и гидрологические характеристики тела модели и берегового склона

Условия проведения исследования	Высота склона/ тела модели, $H_{ск}$, м	Высота волны, h_B , м	Характер изменения		Ширина подводной части отмели, B_{Π} , м	Коэффициент b
			уровня воды, ΔA , м	обеспеченности активных уровней, P_A , %		
Лабораторные	0,16	0,06	0,05	–	0,56	0,2
Натурные	1,8	0,6	–	75	7,8	2,25

Величина линейной переработки в лабораторных условиях составила 0,24 м для натуре – около 2,7 м (отклонение составляет 9 %). Это подтверждает сходимость результатов измерений в лабораторных и натуральных условиях и возможного применения формулы 1 для натуральных объектов (с условием сохранения коэффициента масштабности, который в наших условиях равен 10).

АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ АБРАЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Исходя из существующих прогнозов [1–3, 6], переработка береговых склонов стабилизируется через 10–15 лет эксплуатации водохранилища при условии, что основные берегоформирующие факторы не изменятся. Проведенные натурные исследования на малых равнинных водохранилищах Беларуси за береговыми процессами в безледный период с 2004 по 2010 г. подтвердили гипотезу о развитии абразионных процессов и в наше время. Наблюдения за переработкой коренных берегов проводились на всех типах водохранилищ, расположенных в различных геоморфологических районах Беларуси.

Исследования абразионных процессов проводились по методике, составленной автором. Общее количество водохранилищ, расположенных в различных геоморфологических зонах республики, составило 20 (16 – руслового типа, 4 – озерного). Из них на 11 водных объектах наблюдались процессы переработки береговых склонов. Количество участков и створов, а также протяженность береговой линии, подверженной деформациям (разрушениям), показаны в табл. 4. По результатам натурных наблюдений строились профили береговых склонов с их морфологическим и морфометрическим описанием. Их характеристики заносились в разработанный автором альбом природных аналогов, который будет в дальнейшем использоваться для прогнозирования переформирования берегов водоемов методом аналогий с использованием критериев подобия.

Таблица 4 – Данные натурных исследований о состоянии абразионных береговых склонов

Название водохранилища	Количество участков	Количество створов	Протяженность абразионного берега, км	Максимальная линейная переработка S , м
Вилейское	4	10	1,5	до 3,5
Волма	1	1	0,1	до 2
Вяча	1	2	0,12	до 1
Петровичское	1	1	0,21	до 3
Осиповичское	1	7	1,5	до 2
Заславское	1	3	0,25	до 1,5
	2	4	0,45	до 2
Дубровское	1	2	0,45	
Чигиринское	1	3	0,18	до 1
Краснослободское	1	2	0,17	до 3
Лепельское	3	4	1,5	до 2
Селявское	1	4	1,2	до 5

В результате обработки данных натурных наблюдений было установлено, что основными источниками регенерации (повторного развития) процессов переработки береговых склонов в условиях малых равнинных водохранилищах Беларуси являются:

1. *Изменение уровня режима с его повышением и дальнейшее ветроволновое воздействие на береговой склон* (при новом положении уровня воды в водоеме). Установлены следующие причины изменения уровня воды и его режима:

1.1. В результате введения в эксплуатацию Вилейско-Минской водной системы (ВМВС) в 1976 г. на ряде водохранилищ (Осиповичском, Заславском, Дроздах и т. д.), расположенных

в каскаде, повысилась и стабилизировалась обеспеченность активных уровней воды, что вызвало регенерацию проявлявшихся ранее процессов переработки коренных берегов (рис. 1). Исследования производились на Осиповичском водохранилище на одном участке по 7 створам протяженностью более 1 км на котором ранее стационарные наблюдения велись Е.М. Левкевичем и В.Е. Левкевичем. Величина линейной переработки за 30 лет составила более 3,5 м.

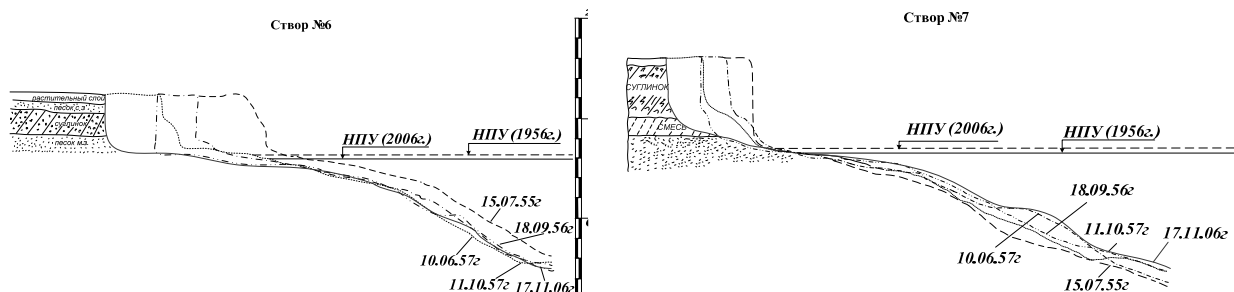


Рисунок 1 – Створы № 6 и № 7 Осиповичского водохранилища

1.2. Зарегулирование естественных водоемов – озер. Создание малой гидроэлектростанции на Лепельском озере (строительство гидроэлектростанции на р. Улла) повлекло поднятие уровня воды более чем на 2 м. Данные натурных наблюдений, проведенные на 3 участках по 9 створам, установили, что переработка береговой линии наблюдается и в настоящее время, на что указывают материалы профилирования береговых склонов (рис. 2). За период эксплуатации Лепельского водохранилища линейная переработка составляет от 1 до 4 м, а объемная – более 80 м³.

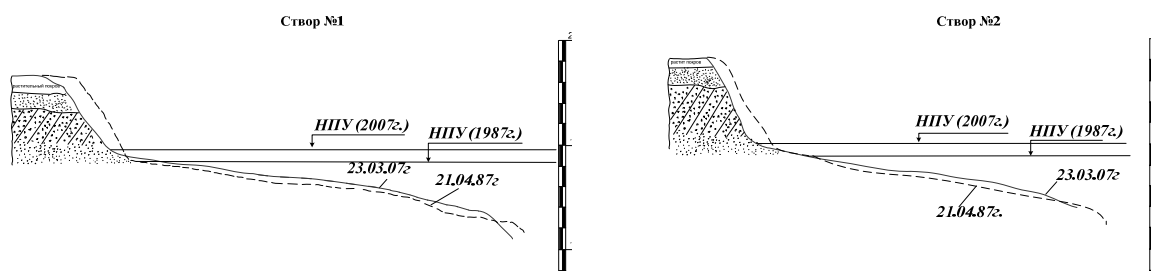


Рисунок 2 – Створы № 1 и № 2 Лепельского водохранилища

1.3. Нарушение норм эксплуатации гидротехнических сооружений. В результате отсутствия контроля над организацией регулирования пропуска воды на Краснослабодском водохранилище произошло поднятие уровня воды выше проектных отметок, что привело к разрушению берегового склона более чем на 3,5 м в течение одного сезона (рис. 3). Протяженность участков составила более 150 м.

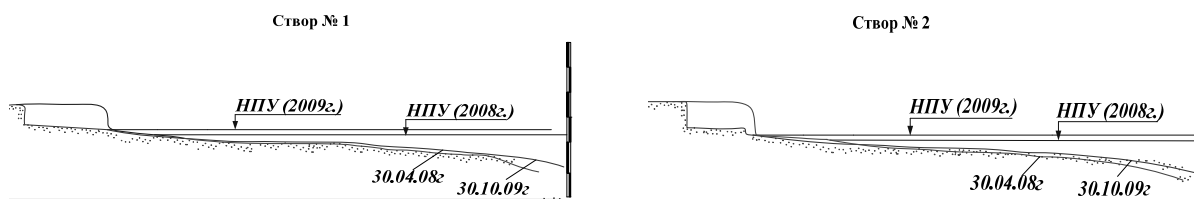
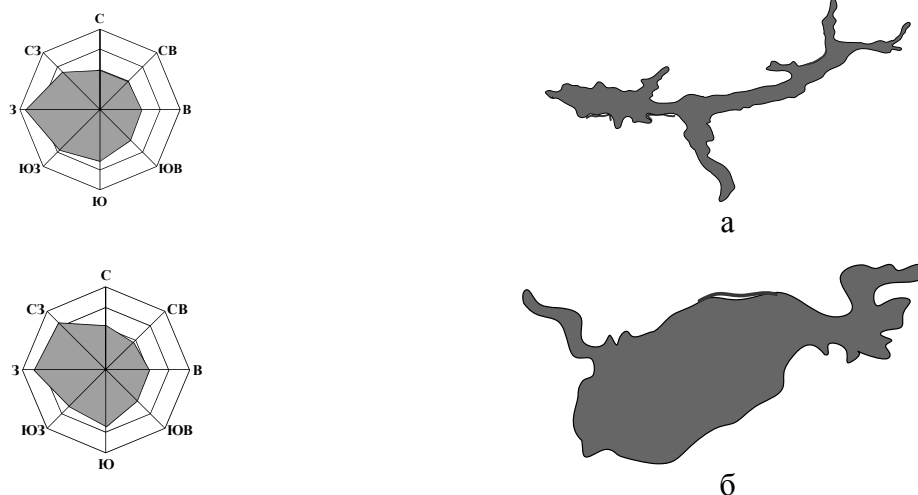


Рисунок 3 – Створы № 1 и № 2 Краснослабодского водохранилища

2. Форма и расположение водоема в плане.

Как показала практика натуральных полевых наблюдений, на исследуемых водоемах процессу переработки подвергаются береговые склоны, расположенные с подветренной стороны, что подтверждает гипотезу о существовании берегов волнового происхождения [4, 7]. По метеоданным [8] определялось преобладающее направление ветров. Полученные графики были приложены к топографическим картам в местах расположения водоемов, где было установлено, что наибольшая интенсивность переработки наблюдается на коренных берегах, расположенных с подветренной стороны, как это происходит на ряде водохранилищ, в том числе и на Вилейском (выделенной линией указан процесс переработки береговой линии (рис. 4, а)). Наблюдения проводились на 3 участках с общей протяженностью более 1,5 км.



а – Вилейское водохранилище; б – Заславское водохранилище

Рисунок 4 – Абразионные процессы на береговых склонах водоемов в зависимости от преобладающих направлений ветров

3. Комплексное влияние изменения уровня режима и расположения водоема.

После введения в эксплуатацию Заславского водохранилища в 1955 г. по данным [6] наблюдения за переработкой коренных берегов производилась по 4 участкам общей протяженностью более 3 км. После 15 лет эксплуатации абразионные процессы стабилизировались. Введение в эксплуатацию ВМВС в 1976 г. повлекло повышение уровня режима во всех водохранилищах, расположенных в каскаде, в результате чего ранее существовавшие берега (нейтральные) перешли в новую генетическую группу – абразионную (рис. 4, б).

Сравнение и анализ морфометрических и морфологических показателей надводной части береговых склонов позволили показать, что процессам переработки наиболее подвержены приглубые берега по сравнению с пологими склонами, высота которых колебалась от 0,7 до 10 м, с уклоном от 70 до 89°. Данные характеристик профиля показаны в табл. 5.

Таблица 5 – Характеристики профиля склонов некоторых водохранилищ

Название водохранилища	Номер участка/створа	Подводная часть отмели			Надводная часть отмели		
		Ширина $B_{П}$, м	Угол $I_{П}$, град	Глубина на внешнем краю отмели $H_{ГЛ}$, м	Высота склона $H_{СК}$, м	Ширина $B_{Н}$, м	Угол $I_{Н}$, °
1	2	3	4	5	6	7	8
Водохранилища 1-й группы							
Вилейское	1/1	16	6,3	1,6	3,1	0,3	8,5
	1/2	14	7,4	1,58	4,85	3,8	6,0

1	2	3	4	5	6	7	8
	1/3	13	6,8	1,64	5,3	3,5	2,1
	2/1	10	8,5	1,7	8	0,1	1,14
	2/2	12	9,1	1,54	7,5		4,96
Красно-слободское	1/1	17	3,6	1,4	0,95	3,3	3
	1/2	18	3,5	1,26	1,14	2,7	2,1
Чигиринское	1/1	19	3,4	1,45	2,3	0,3	10,7
	1/2	11	8,2	1,3	3,25	2,1	15
	1/3	10	10	1,48	2,45	1,9	3,4
Водохранилища 2-й группы							
Дубровское	1/1	12	5,7	1,3	2,2	6,0	2,8
	1/2	14	5,9	1,45	2,1	9,0	3,2
Осиповичское	1/1	14	7,04	1,52	5,1	0,3	10,5
	1/5	15	4,6	1,2	1,3		11,5
	1/7	12	8,73	1,37	4,2		10,1
Лепельское	1/1	13	7,2	1,45	5,7	0,5	11
	1/2	9	8,63	1,3	6,5		13
	1/4	14	4,1	1,56	2,8	0,1	6,14
Волма	1/1	3	22,5	1,25	1,62	0,3	7,1

Из табличных данных видно, что показатель ширины надводной части отмели для водохранилищ различной группы отличается. Для первой группы на отдельных участках он составляет от 0 до 4 м, для второй – до 9 м. При этом соотношения между надводной и подводной частями отмели абразионного берега описываются следующими зависимостями:

– для линейных размеров и уклонов водохранилища 1-й группы:

$$B_H = B_H / (7,0 \div 8,5); \quad (4)$$

– для линейных размеров и уклонов водохранилища 2-й группы:

$$B_H = B_H / (5,5 \div 6,8). \quad (5)$$

По результатам натурных исследований производился гранулометрический анализ проб грунта. Расчеты проводились по формуле 5 [1]:

$$\eta = \frac{d_{60}}{d_{10}}, \quad (6)$$

где d_{60} – диаметр частиц, содержание которых меньше 60 % от общего количества, мм;

d_{10} – диаметр частиц, содержание которых меньше 10 % от общего количества, мм.

Было установлено, что в условиях Беларуси наиболее часто встречается средnezернистый однородный грунт с коэффициентом неоднородности $\eta = 2,5 \div 3,5$. Исследованиями различных авторов установлено, что наименьшему разрушению подвергаются береговые склоны, у которых коэффициент неоднородности грунта (η) принимает минимальное значение [4, 6].

Результаты анализа коэффициента неоднородности грунта представлены в табл. 6. На обследуемых водоемах наименьшее значение данного коэффициента имели коренные берега Вилейского и Лепельского водохранилищ.

Таблица 6 – Анализ гранулометрического состава размываемого грунта береговых склонов на тестовых водоемах

Название водохранилища	Значение коэффициента неоднородности грунта по расчетным створам				
	Створ № 1	Створ № 2	Створ № 3	Створ № 4	Створ № 5
Лепельское	1,4	1,35	1,25	-	1,4
Осиповичское	5	3,6	3,8	4,2	3,1
Вилейское	1,7	1,2	2,0	1,5	1,9
Заславское	2,3	5,32	-	-	-

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы настоящей работы могут быть представлены следующим образом:

1. На интенсивность и масштабы деформации тела модели оказывают совместное действие уровенный режим и высота волны. При этом уменьшение времени достижения статического равновесия зависит от величины уровня поднятия воды, а масштабы деформации при различных высотах волн в пределах одного уровенного режима практически не отличаются.

2. Применимость результатов лабораторных исследований к натурным условиям возможна при соблюдении коэффициента пропорциональности и сходства численных значений характеристик профиля равновесия.

3. Сработка уровня воды при разных высотах волн на деформацию модели не влияет.

4. Проведенные в период с 2004 по 2010 г. натурные наблюдения, выполненные автором на тестовых опорных водохранилищах Беларуси, расположенных в различных геолого-морфологических зонах страны с учетом изменения основных берегоформирующих факторов и условий, позволили установить следующее:

– в настоящее время переработка коренных берегов наблюдается более чем на 80 % исследуемых искусственных водных объектов страны;

– основным берегоформирующим фактором при эксплуатации водохранилищ является изменение уровенного режима с совместным ветроволновым воздействием.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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 : БГУ, 1995. – 68 с.

2. Левкевич, В.Е. Рекомендации по прогнозированию переработки абразионных берегов малых равнинных водохранилищ, сложенных несвязанными грунтами / В.Е. Левкевич. – Минск : ЦНИИ-КИВР, 1986. – 39 с.

3. Природные и социально-экономические условия Белорусской ССР : научные сообщения по программе XXV Междунар. геогр.о конгресса / под общ. ред. Н.Т. Романовского, В.М. Широкова. – Минск, 1984. – 118 с.

4. Пышкин, Б.П. Динамика берегов водохранилищ / Б.П. Пышкин. – Киев : Наукова думка, 1973. – 414 с.

5. Цайтц, Е.С. Действие волн на откос из несвязанных грунтов : дис. ... канд. техн. наук / Е.С. Цайтц ; АН УССР. – Киев, 1958. – 19 с.

6. Левкевич, В.Е. Переработка берегов малых равнинных водохранилищ мелиоративных систем, ее прогноз и управления (на примере Белорусской ССР) : дис. ... канд. техн. наук: 06.01.02 / В.Е. Левкевич. – Минск, 1986. – 135 с.

7. Финаров, Д.П. Динамика берегов и котловин водохранилищ гидроэлектростанций СССР / Д.П. Финаров. – Л. : Энергия, 1974. – 244 с.

8. Справочник по климату Беларуси. Ч.4 Ветер. Атмосферное давление / М.А. Гольберг [и др.] ; под общ. ред. М.А. Гольберга. – Минск : «БЕЛНИЦ ЭКОЛОГИЯ», 2003. – 124 с.