

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ БЕРЕГОФОРМИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ НА ДИНАМИКУ ПРОЦЕССА АБРАЗИИ БЕРЕГОВ ВОДОХРАНИЛИЩ

В.Е. Левкевич, доктор технических наук
Белорусский национальный технический университет
г. Минск, Беларусь

Аннотация

В статье приведены результаты анализа влияющих на переработку береговых склонов водохранилищ факторов гидрологического характера, а также состава грунтов, образующих береговой склон, формы и размеров склона. С течением времени процесс переработки начинает развиваться под воздействием не гидрологических факторов. Это подтверждают результаты статистического анализа материалов натурных наблюдений и, в частности, коэффициент множественной детерминации, показывающий, как отдельные факторы влияют на процесс. Все характеристики берега, подверженного переработке, складываются из средней величины – тренда и стохастического шума – знакопеременных флюктуаций, которые рекомендуется учитывать при выполнении прогнозных расчетов переработки береговых склонов.

Ключевые слова: берег водохранилища, переработка, склон, берегообразующие факторы, распределение, параметры, гидрологический режим водохранилища, ветровое волнение, колебание уровней, механический состав грунтов

Abstract

V.E. Levkevich
COAST-FORMING FACTORS AFFECTING DYNAMIC OF ABRASION ON THE COAST OF RESERVOIR AND EVALUATION OF THEIR IMPACT

The article presents main hydrological factors, ground composition of coastal slope, forms and sizes of the slope which affect processing of coastal slopes of reservoirs. Further the processing develops under the influence of non-hydrological factors. This fact is proved by statistical analysis of natural observing, actually by coefficient of multiple determination what shows how are definite factors affect the process. All characteristics of coast are summarize according average value of trend and stochastic noise – alternating fluctuations, which are recommended to be taken into account when performing predictive calculations for processing coastal slopes.

Keywords: coast water reservoir, processing, slope, coast-forming factors, spreading, parameters, hydrological regime of water reservoir, wind waves, fluctuation of levels, mechanical composition of ground

Введение

Изменение условий и режимов эксплуатации водохранилищ вызывает активизацию разрушения берегов. Для решения задачи по оценке значимости отдельных берегоформирующих факторов и условий в процессе переработки коренных берегов водохранилищ страны (рисунок 1) использовались методы экспертных оценок (метод *Delfi*) и корреляционного анализа [1, 2]. Исходным расчетным материалом служили данные и материалы многолетних стационарных наблюдений за динамикой берегов на опорных водохранилищах и исследований отдельных берегообразующих факторов. Всего были использованы данные наблюдений более чем по 40 водохранилищам страны.

Основная часть

Как известно, на водохранилище после ввода в эксплуатацию в береговой зоне происходит активизация береговых процессов под воздействием волнения, колебания уровней и обводнения территорий, что ведет к развитию переработки склонов. Наибольшая интенсивность переработки происходит в при-

плотинной плессовой, наиболее широкой части водоема руслового типа (рисунок 1, 2). Средняя протяженность разрушаемых склонов в условиях русловых водохранилищ Беларуси составляет приблизительно 25–40 % всей береговой длины русловых водоемов. В верховьях водохранилищ наблюдается русловая эрозия. В средней зоне разрушение береговых склонов происходит за счет ветро-волнового воздействия и стоковых течений (Петровичское, Заславское и другие водохранилища страны [1-4]). В условиях озерных водоемов переработке подвергаются в основном берега, находящиеся в подветренной части (глубоководной зоне) водоемов. Общая протяженность их составляет от 40 до 55 % всей длины береговой линии (водохранилища Лепельское, Селявское, Езерищенское). При создании водохранилищ озерного типа с поднятием уровня воды в верхнем бьефе (озере) увеличивается площадь водоема, что сказывается на изменениях гидрологического режима, которые приводят к активизации, переработки, а точнее – к так называемому процессу ее «регенерации» на участках, где абразия происхо-



Рисунок 1. – Переработка берегов Вилейского и Лепельского водохранилищ

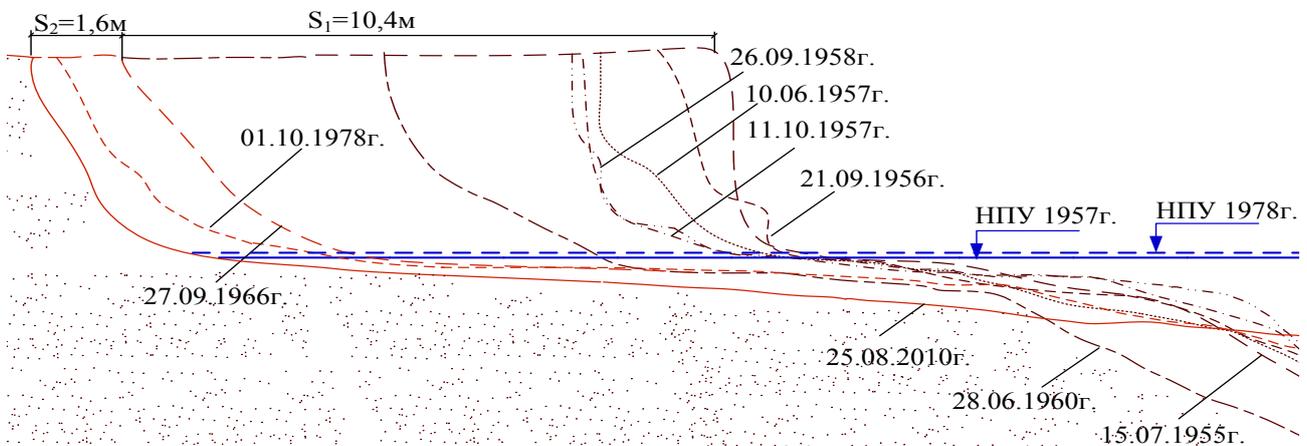


Рисунок 2. – Типичный профиль переработки. Осиповичское водохранилище. Створ № 7

дила ранее. Так данные, полученные автором в результате натурных наблюдений на Лепельском водохранилище позволили зафиксировать величину линейной переработки за весь период эксплуатации Лепельского водохранилища (с 1956 г. по настоящее время), которая составила более 35 м при высоте коренного берега от 2 до 5 м, сложенного несвязными грунтами.

В условиях Беларуси наиболее распространены несвязные, песчаные грунты. Среди показателей, характеризующих механический состав несвязных грунтов (Э.И. Михневич, А.А. Печеркин, Ю.А. Соболевский, Ф.В. Саплюков и др.), практическое значение при оценке динамики переработки берегов и формировании профиля равновесия имеют средний диаметр частиц грунта d_{50} и коэффициент неоднородности.

Гидрологические и морфометрические характеристики водохранилища определяют динами-

ку процесса переработки берегов наряду со структурой грунтов. Результаты стационарных наблюдений за ветровым волнением, полученные на Заславском водохранилище, показали, что рост волны и затухание ветрового волнения происходят в течение 20-30 мин. Для водоемов Беларуси характерна частая повторяемость волн высотой 0,1–0,3 м при длине разгона волны до 2500 м и средней скорости ветра 0,5 м/с. Максимальная зарегистрированная автором высота волны в Беларуси составила 1,2 м при длине разгона волны около 5000 м. В отличие от крупных водоемов высота волны $h_{1\%}$ есть функция скорости ветра w_{10} и длины разгона L_p (Е.М. Левкевич, В.Н. Юхновец, С.А. Двинских). Установлено, что разрушение и переработку надводной части берега формируют волны $h_{1\%}$, а подводную часть профиля переработки – волны высотой $h_{25\%}$.

По величине амплитуды колебания уровней в безледный период $\Delta H_{бл}$ все водохранилища Белару-

си автором были сгруппированы в 2 группы водных объектов: 1-я группа – $\Delta H_{\text{бл}} > 0,5$ м; 2-я – $\Delta H_{\text{бл}} \leq 0,5$ м. Кроме уровня режима изучалось и оценивалось влияние на процесс переработки берегов стоковых и вдольбереговых течений, ледовых явлений, подпора грунтовых вод и фильтрации, различных видов эрозии (термоэрозии, поверхностной, овражной, русловой), зарастаемости склонов, состава размываемых грунтов, формы склона, линейных размеров водохранилища. Все факторы были сгруппированы по схеме, изображенной на рисунке 3. На основе метода экспертных оценок и корреляционного анализа автором определена значимость отдельных факторов, определяющих процесс деформации склона, характеризуемой величиной линейной переработки берега S_i , (м), что позволило выделить доминирующие условия [4]. При использовании метода экспертных оценок (метод *Delfi*) анализировались сведения о влиянии 18 различных факторов на процесс переработки.

Данные по оценке факторов были представлены 12 экспертами по специально разработанной анкете. Количество циклов анкетирования составляло – 5.

Проведенный корреляционный анализ характеристик профиля переработки величины линейной переработки – S_i , (м), объемов переработки Q_i , (м³/м. пог) и др. позволил оценить и выявить степень влияния отдельных факторов и условий на процесс формирования профиля равновесия и разрушение коренного берега. При анализе в расчетах под функцией y_i понимались линейная переработка S_i берега. Рассматривались взаимосвязь величины S_i с берегообразующими факторами, определенными ранее на основе факторного анализа [1, 2]. В качестве аргумента принимались характеристики берегообразующих факторов, а также условий. Результаты расчетов коэффициентов корреляции выполнялись с использованием программы STATISTIKA для водохранилищ руслового и озерного типа (таблица 1).



Рисунок 3. – Классификация берегоформирующих факторов и условий

Таблица 1. – Значение коэффициентов корреляций между линейной переработкой S_i и берегоформирующими факторами и условиями x_i

НАЗВАНИЕ ФАКТОРА ИЛИ УСЛОВИЯ	Значение коэффициента корреляции	
	Русловый тип	Озерный тип
Высота берегового склона, м (x_4)	-0,92	-0,90
Уклон берегового склона, град. (x_5)	-0,76	0,85
Средний диаметр частиц грунта, м (x_7)	0,72	0,72
Коэффициент неоднородности грунта (x_8)	0,72	0,72
Амплитуда колебания уровня, м (x_3)	0,72	0,71
Длина водохранилища, км (x_1)	0,69	0,69
Высота волны, м (x_2)	0,69	0,69
Глубина водохранилища, м (x_6)	0,68	0,69

Исследования, проведенные автором, показали, что количество берегоформирующих факторов и условий на водохранилищах Беларуси ограничено по сравнению с крупными равнинными водохранилищами в силу масштаба явления абразии [5-8], в связи с чем, величина линейной переработки S_t (а также любого элемента профиля) в общем виде будет зависеть

- для исходного берега пологой формы

$$S_t = f(L_p, h_L, h_{1\%}, \Delta H_{\text{бл}}, i_{\text{б}}, \eta);$$

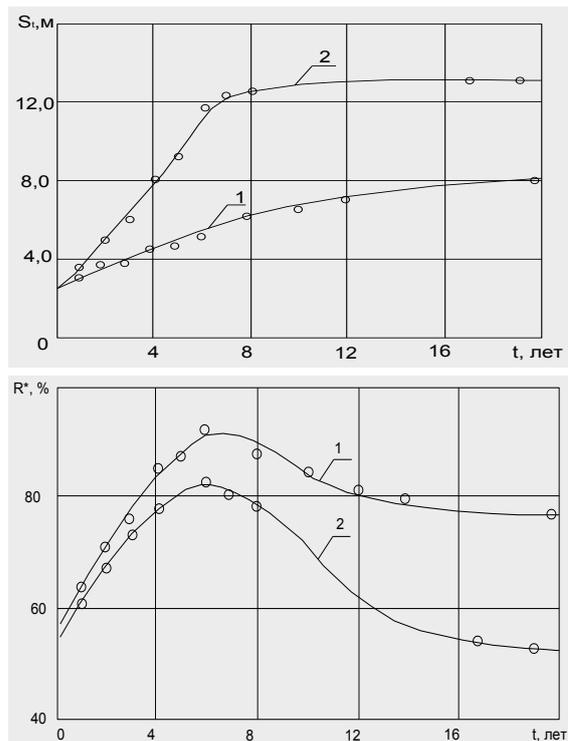
- для профиля обрывистой формы

$$S_t = f(L_p, h_L, h_{1\%}, \Delta H_{\text{бл}}, H_{\text{б}}, d_{50}),$$

где L_p – разгон волны, м; $h_{1\%}$ – высота волны 1-й обеспеченности, м; $\Delta H_{\text{бл}}$ – амплитуда колебаний уровней в безледный период, м; $H_{\text{б}}$ – высота берегового склона, м; $i_{\text{б}}$ – уклон разрушаемого берегового склона; h_L – средняя глубина водоема по длине разгона волны, м; d_{50} – средний диаметр частиц размываемого грунта, м; η – коэффициент неоднородности грунта.

Было установлено, что на различных стадиях развития переработки и соответственно формирования профиля равновесия происходит изменение значимости отдельных факторов, что подтверждается изменением коэффициента множественной детерминации R^* – показателя, характеризующего изменение значимости факторов во времени. Ниже на рисунке 4 приведены графики вида $S_t = f(t)$ и $R^* = f(t)$ [1–2]. На первой и второй стадиях преобладают гидродинамические факторы: волновой, уровенный режимы, а также режим течений. На третьей стадии при наличии профиля, близкого к профилю динамического равновесия, имеющего развитую сформированную береговую отмель, начинают доминировать не волновые факторы, а условия: механический состав грунтов, морфометрические характеристики водоема, морфология склона, сортировка материала переработки на отмели и т.д.

Изменение во времени влияния берегообразующих факторов на динамику процесса переработки отображается графиком зависимости коэффициента множественной детерминации R^* от времени применительно к условиям наиболее характерных водохранилищ Беларуси – Заславского и Осиповичского (рисунок 4). Характер кривых вида $R^* = f(t)$ аналогич-



1 – Заславское водохранилище (1-я группа),
2 – Осиповичское водохранилище (2-я группа)
Рисунок 4. – Изменение во времени

$$R^* = f(t) \text{ и } S_t = f(t)$$

ны и полностью подтверждает результаты, полученные ранее для условий крупным водохранилищ [7–10], и иллюстрируют изменчивость влияния берегообразующих факторов на динамику процесса абразии во времени.

Для определения функциональной зависимости коэффициента детерминации от времени пользовались методами линеаризации. Процедура линеаризации заключалась в следующем:

1) определить формы графика изменения коэффициента R^* во времени на выбранном участке береговой линии водохранилищ;

2) выбрать в зависимости от формы графика шкалы преобразований зависимой (коэффициент детерминации) и независимой (время) переменных.

Для масштабирования зависимой и независимой переменных использовалась элементарная лестница преобразований: $Y^3, Y^2, Y, 1/Y, 1/Y^2, Y^3$.

Выбор коэффициентов линеаризованной регрессии осуществлялся методом наименьших квадратов. Для каждого водохранилища функция зависимости величины коэффициента множественной детерминации от времени индивидуальна и имеет следующий вид:

$$R^*(t) = \varphi(t) f_1^{f(t)} + k,$$

где $\varphi(t)$, $f(t)$ – некоторая функция, зависящая от времени (t) , k – комплексный эмпирический коэффициент.

Изменение величины $R^*(t)$ во времени имеет общую тенденцию, при которой значение коэффициента множественной детерминации возрастает на первых двух стадиях развития процесса переработки до максимального значения и затем убывает на стадии затухания (рисунок 3).

Таким образом, коэффициент множественной детерминации может быть использован в качестве индикатора стадийности процесса переработки. Согласно свойствам возрастающих и убывающих функций, при $R^*(t) - R^*(t+1) > 0$ идентифицируется стадия затухания процесса переработки и перехода профиля в состояние динамического равновесия, в противном случае идентифицируется дальнейшее развитие абразионного процесса на водохранилище.

Характеристики профиля переработки имеют две составляющие: случайную (стохастический шум) и неслучайную (тренд) [11-13]. Для анализа составляющих также использовались ряды, образованные значениями параметров линейной переработки S_t и объемов переработки Q_t , полученные по створам стационарных наблюдений. Были подготовлены две выборки: первая – для водохранилищ группы 1, вторая – для водохранилищ группы 2. Объем выборок состоял из 120-150 контрольных поперечников. Полученные вероятности (обеспеченности) распределения характеристик профиля представлены в таблице 2.

Принимая во внимание, что процесс переработки является стохастическим (вероятностным) [1, 2, 5], автором были проанализированы неслучайные \bar{S} и случайные S_t составляющие рядов наблюдений. Неслучайная составляющая линейной переработки берега является средневзвешенным значением характеристики S_t по j -му участку берега, т.е.

$$\bar{S} = S_{tj} / n,$$

где n – количество створов.

$$S_t = \bar{S} + S_t^*$$

Величина S_t^* равна

$$S_t^* = k_s^* S_{tj},$$

где k_s^* – модульный коэффициент, зависящий от величины обеспеченности характеристики профиля переработки (P) по i -му створу

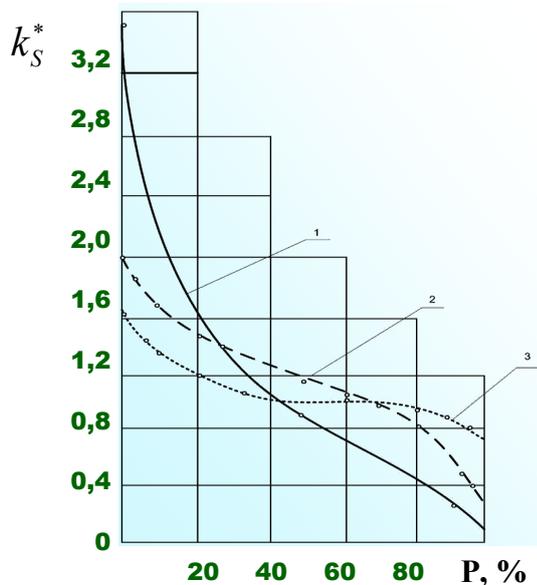
$$k_s^* = \frac{S_i}{\bar{S}}.$$

По данным натурных наблюдений, по графикам зависимости $k_s^* = f(P)$ (рисунок 5) для водохранилищ с различным уровнем режимом и сработкой уровней в безледный период можно определять величину неслучайной компоненты и учитывать ее в прогнозных расчетах в зависимости от вероятности (обеспеченности) P проявления абразии.

Обобщение и анализ данных натурных наблюдений, выполненных автором, показали, что удельная часть случайной составляющей S^* (флюктуации) в характеристике профиля равновесия – линейной переработке склона S_t – в условиях водных объектов

Таблица 2. – Вероятность (обеспеченность) величин S_t , м и Q_t , м³/м пог.

ГРУППА ВОДОХРАНИЛИЩ	ПЕРИОД, (КОЛ-ВО ЛЕТ)	ПАРАМЕТР	Обеспеченность, %					
			3	10	25	50	75	95
I	10	S_t	-	7,2	6,8	4,2	4,2	3,6
		Q_t	-	6,5	5,0	3,6	2,3	0,8
	25	S_t	-	14,0	12,3	10,6	8,5	6,0
		Q_t	-	17,0	15,0	10,4	7,6	5,0
II	5	S_t	7,6	-	5,2	3,9	3,3	2,3
		Q_t	3,9	-	2,5	1,5	1,1	0,6
	10	S_t	30,0	-	18,0	15,5	7,0	3,0
		Q_t	48,0	-	30,0	16,0	6,0	2,0
	25	S_t	30,0	-	18,0	13,0	8,0	6,5
		Q_t	48,0	-	30,0	20,0	14,0	9,0



1 – крупные равнинные водохранилища; 2, 3 – водохранилища Беларуси соответственно групп 1 и 2

Рисунок 5. – Распределение модульных коэффициентов [1, 2]

страны играет значительную роль наряду с неслучайной компонентой S'_t , или трендом. По оценкам автора случайная составляющая (флюктуация) для водоемов страны составляет величину от 5 до 10%. Площадь прибрежной территории водохранилищ Беларуси, подверженной переработке F_s (м²), может быть представлена зависимостью

$$F_s = \sum_{n=1}^{50} (S_{t.оз.} + S_{t.водхр.}) L_{абр.i}$$

где $S_{t.оз.}$, $S_{t.водхр.}$ – линейная переработка берега при различных состояниях водоема, озера и водохранилища, м; n – количество створов наблюдений, определяемое протяженностью участка переработки и методикой наблюдений, шт.; $L_{абр.i}$ – длина береговой линии на i -ом участке, подверженной переработке (абразии), м.

Площадь прибрежной зоны, где происходит развитие процесса переработки по ориентировочным оценкам на существующих водохранилищах, построенных в период до 2005 г., колеблется в широких пределах от 30000 м² (Осиповичское водохранилище) до 87500 м² (Лепельское водохранилище).

С вводом в эксплуатацию гидроэлектростанций (ГЭС) на р. Неман (водохранилище Гродненской ГЭС) и р. Западная Двина (водохранилища Полоцкой и Витебской ГЭС) протяженность берегов, подвер-

женных активной переработке, значительно возрастает (рисунок 6). По оценочным расчетам автора, на водохранилище Гродненской ГЭС переработке будет подвержено до 9,6 км (около 20 % береговой линии), Витебской ГЭС соответственно около 12,4 км. Учитывая вероятностную природу процесса переработки, можно предположить, что эти цифры с учетом настоящей статьи могут быть большими.



а - Левый берег водохранилища Гродненской ГЭС – 800 м выше створа плотины;

б - Левый берег водохранилища Витебской ГЭС в районе карьера «Руба» ОАО «Доломит»

Рисунок 6. – Развитие процесса переработки на водохранилищах ГЭС

Заключение

1. На водохранилищах руслового типа наибольшая интенсивность и масштабы развития переработки наблюдаются на береговых склонах в приплотинной части водоема. Протяженность берегов, подверженных переработке, составляет около 25–40 % всей береговой длины водоема. В условиях наливных и озерных водохранилищ общая протяженность абразионных берегов составляет от 40 до 55 % от всей длины береговой линии (Лепельское водохранилище).

2. В зависимости от амплитуды колебания уровня и обеспеченностей «активных» уровней автором выделены две группы водоемов [1]:

а) водохранилища с амплитудой колебания уровней в безледный период 0,5 м и более и малой обеспеченностью активных уровней (20 %) (группа 1);

б) водохранилища с малыми колебаниями уровней (0,1–0,5 м), но большой обеспеченностью активных уровней (60 %) (группа 2).

2. Значимость отдельных берегоформирующих факторов зависит от стадии развития склона и меняется во времени. Данный факт подтверждается изменением коэффициента множественной детерминации $R(t)$ во времени, характеризующим комплексное воздействие на процесс переработки берега всех факторов.

3. В условиях водохранилищ Беларуси определяющую роль на первой и второй стадиях играют гидрологические факторы: ветровое волнение, колебание уровней, течения, и др. Вторичные факторы, такие как суффозия, фильтрация, зарастаемость

берегов и т.д. не оказывают существенного влияния на переработку берегов. На третьей стадии развития процесса абразии главенствующими в процессе формирования профиля равновесия становятся берегоформирующие условия: морфология склона, физико-механические свойства грунтов, форма и ориентация водоема в плане, а также распределение глубин.

4. Различия в повторяемости активных уровней сказываются непосредственно на интенсивности процесса переработки, форме и размерах подводной части отмели, а также форме профиля динамического равновесия и соотношениях средней величины разрушения (тренда) и флюктуации – случайных отклонениях, которые следует учитывать в прогнозных расчетах при назначении берегоохранных мероприятий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Левкевич, В. Е. Динамика берегов русловых, наливных и озерных водохранилищ Беларуси / В. Е. Левкевич. – Минск : Право и экономика, 2015. – 202 с.
2. Левкевич, В. Е. Динамическая устойчивость берегов водохранилищ Беларуси / В. Е. Левкевич. – Минск : Право и экономика, 2015. – 307 с.
3. Левкевич, В. Е. Синергетика природных риск-процессов на водохранилищах Беларуси / В. Е. Левкевич, Г. И. Касперов // Природные риски : анализ, оценка, картографирование : материалы междунар. науч. конф., Москва, 22-23 мая 2013 г. – М., 2013. – С. 93-97.
4. Левкевич, В. Е. Динамическая устойчивость берегов водохранилищ Беларуси : автореф. дис. ... докт. техн. наук : 05.23.07 / В. Е. Левкевич; Белорус. национальный техн. ун. – Минск, 2017. – 51 с.
5. Печеркин, И. А. Теоретические основы прогнозирования экзогенных геологических процессов на берегах водохранилищ / И. А. Печеркин, А. И. Печеркин, В. И. Каченов. – Пермь : Изд-во Перм. гос. ун-та, 1980. – 85 с.
6. Широков, В. М. Формирование берегов и ложа крупных водохранилищ Сибири / В. М. Широков. – Новосибирск : Наука, 1974. – 172 с.
7. Качугин, Е. Г. Геологическое изучение динамики берегов водохранилищ / Е. Г. Качугин. – М. : Наука, 1975. – 147 с.
8. Водохранилища Белоруссии: природные особенности взаимодействия с окружающей средой / В.М. Широков [и др.]. – Минск, 1991. – 208 с.
9. Бурова, В. Н. Закономерности формирования и оценка опасности переработки берегов водохранилищ : автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук : 04.00.07 / В. Н. Бурова ; Произв. и НИИ по инженер. изысканиям в стр.-ве. – М., 1998. – 25 с.
10. Рагозин, А. Л. Региональный анализ абразионной опасности и риска на морях и водохранилищах России / А. Л. Рагозин, В. Н. Бурова // Современные проблемы изучения берегов. – СПб., 1995. – С. 45-46.
11. Рагозин, А. Л. Закономерности формирования и прогноз переработки берегов водохранилищ, сложенных несвязными породами / А. Л. Рагозин // Прогноз изменений инженерно-геологических условий при строительстве. – М., 1990. – С. 50-58.
12. Назаров, Н. Н. Переработка берегов равнинных водохранилищ России в современную стадию развития (конец XX – начало XXI вв.) / Н. Н. Назаров // География и природные ресурсы. – 2006. – № 4. – С. 12-19.
13. Назаров, Н. Н. Географическое изучение берегов и акваторий камских водохранилищ / Н.Н. Назаров // Географический вестник. – 2006. – № 2. – С. 18-36.

Поступила 3.03.2018