

УДК 519.216.3: 627.8

ПРИЧИНЫ АКТИВИЗАЦИИ АБРАЗИОННОГО РИСКА НА ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ БЕЛАРУСИ И КРИТЕРИИ ЕГО РАЙОНИРОВАНИЯ

Левкевич В.Е.

Показаны причины активизации риск-процессов на территории Республики Беларусь, вызванные строительством новых водохранилищ энергетического назначения. Протяженность берегов новых водохранилищ, подверженных абразионной переработке, увеличится более чем на 30 км, что окажет влияние на объекты экономики прилегающих территорий. Приведены результаты районирования территории республики по развитию абразионных риск-процессов на берегах водохранилищ с учетом новых данных. Теоретически обоснованы, уточнены и дополнены критерии районирования территории Беларуси по абразионному риску.

Ключевые слова: водохранилище, абразия, абразионный риск, переработка, берег, районирование, коэффициент развития, критерий устойчивости.

(Поступила в редакцию 3 марта 2018 г.)

Введение. В настоящее время в Республике Беларусь насчитывается свыше 150 водохранилищ различного типа общей площадью около 2500 км² и полным объемом 10 км³. Водоохранилища широко используются в целях мелиорации, рекреации, регулирования поверхностного и речного стока, рыбного хозяйства, технического и питьевого водоснабжения, а также для энергетических нужд. Протяженность береговой линии водохранилищ республики составляет более 1500 км, из них около 320 км (более 20 %) подвержено активным процессам абразии (разрушения) (рис. 1).



Рисунок 1. – Переработка берегов Лепельского и Заславского водохранилищ

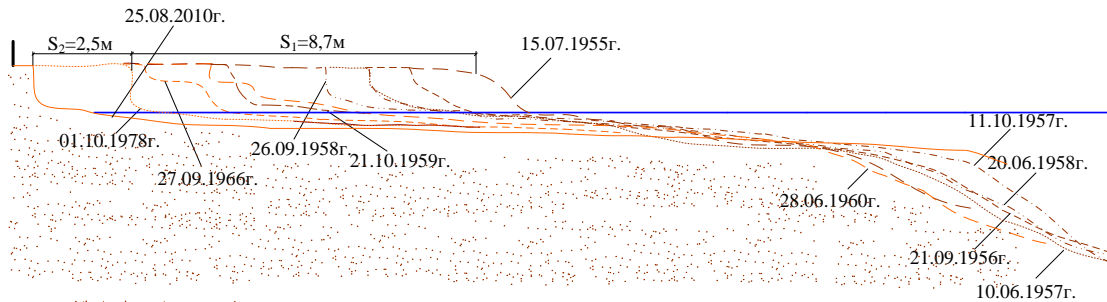
Процессы, происходящие в береговой зоне водохранилищ, оказывают значительное отрицательное воздействие на функционирование многих отраслей промышленности и сельского хозяйства, результатом чего является отторжение земель, возникает необходимость в переносе жилых и производственных зданий. В связи с этим актуально отображение береговых процессов на оперативных картах районирования с указанием масштабов возможных рисков для принятия управленческих и инженерных мероприятий по их локализации и уменьшению убытков от разрушения объектов экономики.

Основная часть. Анализ материалов наблюдений за развитием процесса переработки (абразии) берегов водохранилищ показал, что разрушение береговых склонов происходит на всех типах водохранилищ практически во всех геоморфологических районах страны (Центральная часть, Поозерье и Полесье) и бассейнах основных рек (Западная Двина, Неман, Припять, Днепр) [1–4]. Обследовано более 110 водохранилищ. По результатам натурных наблюдений строились поперечные профили береговых склонов (рис. 2) [3–5].

Основными параметрами, характеризующими процесс переработки береговых склонов, являются:

- величина линейной переработки берега S_t , м;
- объем переработки Q_t , м³/мп;
- скорость линейной переработки q_{St} , м/год;

- скорость объемной переработки q_{Qr} , м³/год;
- протяженность абразионного берега L_s , м.



Отметки, м		1,58	0,25	0,35	0,45	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,75	0,8	0,95
Расстояние, м /		1,4	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	
Угол, град /		10,8	2,34										

Рисунок 2. – Поперечный профиль створа № 3 Осиповичского водохранилища

При изучении рисков от абразии на искусственных водных объектах республики решались следующие задачи:

- обозначались районы республики, искусственные водные объекты которых наиболее подвержены процессам переработки берегов;
- проводилась оценка масштабов и динамики процесса абразии;
- производилась разработка вероятностных показателей процесса абразии;
- выполнялся расчет показателей (основных и дополнительных), необходимых для районирования территории страны.

Для оценки риска на искусственных водных объектах территории района был предложен показатель абразии γ_A , значение которого определяется по формуле вида [3, 4]

$$\gamma_A = \frac{1}{S_{p-на}} \sum S_{в-щ}, \quad (1)$$

где $S_{в-щ}$ – суммарная площадь зеркала водохранилищ административного района, км², $S_{p-на}$ – площадь района, км². В таблице 1 приведено распределение значений показателя γ_A по районам Минской области.

Таблица 1. – Распределение значений коэффициента территориального абразионного риска в разрезе района (Минская область)

Район расположения водохранилища	Средняя величина линейной переработки S_r , км	Общая протяженность абразионных берегов $L_{абр}$, км	Общая площадь переработки, км ²	Площадь района расположения водохранилищ	Показатель абразии γ_A
Минский	0,002	20,1	0,402	2221,0	$18,2 \cdot 10^{-6}$
Червенский	0,002	1,5	0,003	1620,0	$1,85 \cdot 10^{-6}$
Смолевичский	0,002	4,3	0,0086	1423,0	$6,04 \cdot 10^{-6}$
Логойский	0,002	1,2	0,0024	2318,0	$1,03 \cdot 10^{-6}$
Березинский	0,002	2,7	0,0054	1928,0	$2,8 \cdot 10^{-6}$
Узденский	0,002	1,1	0,0022	1133,0	$1,94 \cdot 10^{-6}$
Копыльский	0,002	1,1	0,0022	1612,0	$1,37 \cdot 10^{-6}$
Любанский	0,002	1,2	0,0024	1875,0	$1,28 \cdot 10^{-6}$
Стародорожский	0,002	1,1	0,0022	1396,0	$1,58 \cdot 10^{-6}$
Дзержинский	0,002	1,2	0,0024	1212,0	$1,98 \cdot 10^{-6}$
Пуховичский	0,002	1,2	0,0024	2457,0	$0,98 \cdot 10^{-6}$
Вилейский	0,002	2,0	0,004	2423,0	$1,65 \cdot 10^{-6}$
Крупский	0,0035	1,2	0,0042	2134,0	$1,97 \cdot 10^{-6}$
Воложинский	0,002	1,1	0,0022	1919,0	$1,15 \cdot 10^{-6}$
Солигорский	0,002	2,3	0,0046	2476,0	$1,86 \cdot 10^{-6}$

Под термином «абразионный риск» в данной работе понимается вероятность наступления процесса абразии на определенном водоеме, умноженная на возможный

ущерб от данного процесса за промежуток времени, равный 1 году, либо за период наблюдений. В общем виде абразионный риск определяется, как:

$$R = \sum_{i=1}^n P_{\phi i} U, \quad (2)$$

где $P_{\phi i}$ – вероятность возникновения i -го рискообразующего фактора на рассматриваемом водном объекте, 1/год; n – количество рискообразующих факторов; U – возможный ущерб от процесса абразии, определяемый по известным методикам [6, 7], тыс. руб.

Применительно к процессу абразии на искусственных водных объектах понятие «риск» относится к возможным воздействиям на объект и его реакции на эти воздействия [6]. В качестве объекта в данном случае принимается береговой склон водохранилища либо незащищенные верховые откосы дамб и плотин. Под воздействиями понимаются основные факторы, приводящие к абразии: ветровое и волновое воздействие, колебание уровней воды в водохранилище, течения и др. Воздействие на объект вызывает определенную «опасность», которая численно оценивается через вероятность возникновения. На рисунке 3 представлена схема формирования риска от процесса абразии [6].

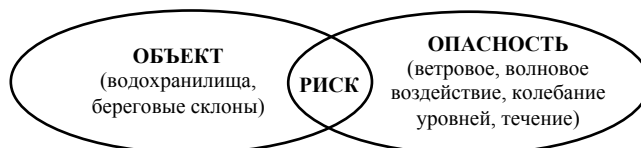
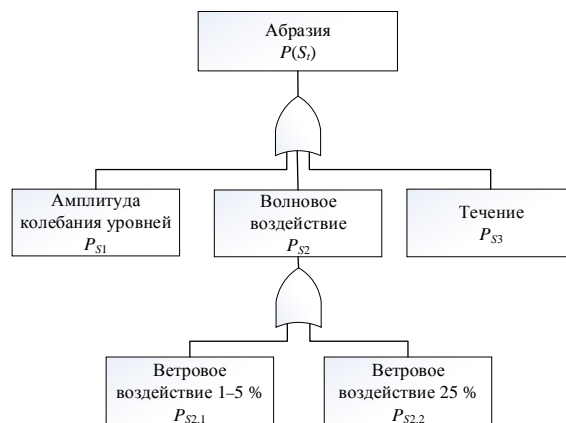


Рисунок 3. – Схема формирования абразионного риска

Для определения вероятности возникновения абразионного риска строилось так называемое «дерево отказов» процесса по схеме, представленной на рисунке 4, с учетом сценариев развития события – абразии (переработки) берегов $P(S_i)$ [7].



– логический знак «ИЛИ», означающий, что выходное событие происходит в том случае, если случается любое из входных событий

Рисунок 4. – Схема «дерева отказов» для оценки вероятности возникновения переработки

Конечная вероятность возникновения рассматриваемого процесса переработки определяется по формуле

$$P(S_i) = P_{S1} + P_{S2} + P_{S3} - P_{S1}P_{S2} - P_{S2}P_{S3} - P_{S1}P_{S3} + P_{S1}P_{S2}P_{S3}, \quad (3)$$

где $P(S_i)$ – вероятность возникновения процесса абразии берега, 1/год; P_{S1} – вероятность амплитуды колебания уровней, 1/год; P_{S2} – вероятность возникновения ветрового воздействия ($P_{S2} = P_{S2.1} + P_{S2.2} - P_{S2.1}P_{S2.2}$), 1/год; P_{S3} – вероятность возникновения стоковых течений в водохранилище, 1/год; $P_{S2.1}$ – вероятность возникновения высот волн 1 %-ной обеспеченности, 1/год; $P_{S2.2}$ – вероятность возникновения высот волн 25 %-ной обеспеченности, 1/год.

Обобщение данных многолетних наблюдений с привлечением материалов аэро-, фото- и спутниковой информации позволило разработать, а затем уточнить карту территории Беларуси по развитию процесса переработки берегов.

Активизация абразионного риска наблюдается в последние 5 лет в связи со строительством и вводом в эксплуатацию ряда водохранилищ энергетического назначения, а

также реконструкции существующих водных объектов для целей гидроэнергетики. Были построены Гродненская ГЭС на р. Неман, Витебская и Полоцкая ГЭС на р. Западная Двина (рис. 5–7). С вводом их в эксплуатацию протяженность берегов, подверженных активной переработке, значительно возрастает (рис. 5). По оценочным расчетам автора на водохранилище Гродненской ГЭС переработке будет подвержено до 9,6 км, а Витебской ГЭС – около 12,4 км. Учитывая вероятностную природу процесса переработки, можно предположить, что эти цифры могут быть значительно большими.

Прошедший незначительный период времени с момента ввода в эксплуатацию вышеуказанных объектов показал, что уже имеются места проявления абразионных процессов – переработки склона в виде оползней, размывов и т. д. (рис. 5). В итоге протяженность абразионных берегов увеличится в стране более чем на 22 км. Аналогичные явления будут наблюдаться и на водохранилище Полоцкой ГЭС.



а) левый берег водохранилища Гродненской ГЭС – 800 м выше створа плотины



б) левый берег водохранилища Витебской ГЭС в районе карьера «Руба» ОАО «Доломит»

Рисунок 5. – Развитие процесса переработки на водохранилищах ГЭС (2017 г.)

При районировании территории по абразионному риску, проведенном в конце XX века [2–4], основным количественным критерием служила величина наибольшей линейной переработки надводной части естественного берегового склона или верхового незакрепленного откоса дамбы (плотины) в случае наливного водохранилища. Схема раннего районирования территории республики по развитию абразии представлена на рисунке 9. Использование системного подхода при изучении количественных характеристик абразии берегов водных объектов позволило установить, что в пределах трех областей (Поозерье, Центральная часть и Полесье) выделяются шесть районов, которые характеризуются различной интенсивностью процессов [1–4]. При оценке деформаций береговых склонов наиболее четко выделяются следующие пределы максимальных размывов: до 2,0; до 5,0; до 20,0; до 35,0 м. Наибольшие размывы по данным натурных исследований возможны в области Поозерья в районе I и Центральной части в районах II, III, т. е. на участках территорий с четко выраженным ледниковым рельефом, наличием моренных грунтов, крутых и высоких береговых склонов водохранилищ. В Полесье, имеющем спокойный равнинный рельеф, выделяются районы с небольшой активностью береговых процессов (районы V, VI) (табл. 2) [2–4].

Таблица 2. – Распределение величины линейной переработки береговой линии S_t в соответствии с районированием 2016 г.

Геоморфологическая область	Район	Преобладающие грунты	Максимальные значения S_t , м
Поозерье	I	Пески различного состава, моренные супеси, суглинки, глины, включения гравия, валунов	25,0
Центральная часть	II	Пески различной крупности с включением гравия, моренные суглинки, супеси, лессовидные грунты	40,0
	III		20,0
	IV		5,0
Полесье	V	Пески аллювиального происхождения, лессовидные супеси, торфяники	7,0
	VI		2,0

Анализ уточненных данных о переработке береговых склонов большего количества обследованных водохранилищ позволил автору в период 2014–2016 гг. [3, 4, 7] детализировать и уточнить ранее полученную карту абразионного риска (рис. 6), которая может быть

использована при прогнозировании потенциальных разрушений склонов и проектировании водохозяйственных объектов, а также мероприятий по берегозащите.

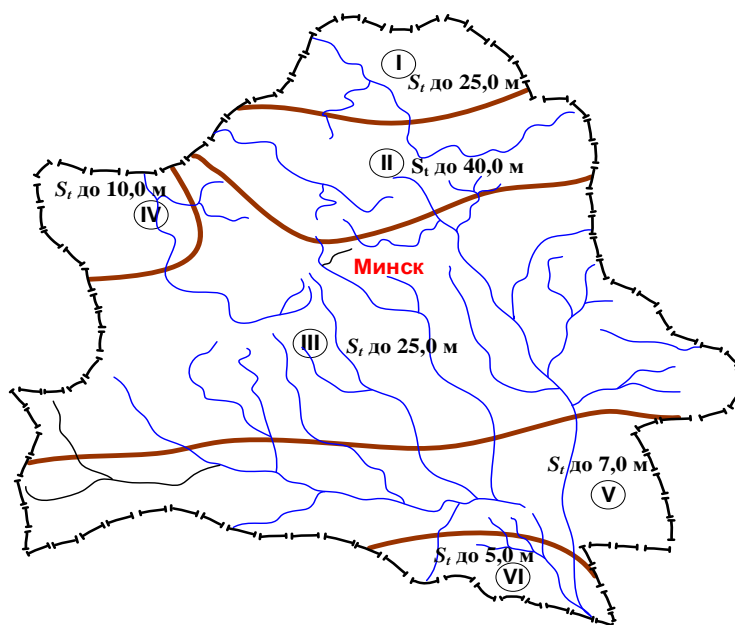


Рисунок 6. – Уточненная схема районирования территории Беларуси по величине максимальной линейной переработки берегов (2014–2016 гг.)

Дальнейшие исследования в области районирования территории по абразионному риску позволили уточнить методика районирования, которая стала включать расчет дополнительных характеристик районов (табл. 3).

Таблица 3. – Предлагаемые дополнительные характеристики, которые необходимо учитывать при районировании территории

Геоморфологическая область	Площадь переработки F_s , м ²	Критерий устойчивости абразионного берега Π_2	Кoeff. развития берега k_p	Вероятность риска абразии $P(S_i)$	Протяжен. абраз. берега $L_{абр}$, м
Название области	35000	1,14	1,2	$1,28 \cdot 10^{-6}$	1200

В таблице 3 приведены показатели, которые рекомендуется применять в дальнейшем при построении карт районирования по абразионному риску по мере уточнения фактических данных. Площадь F_s прибрежной территории водохранилищ, подверженной переработке, может быть представлена в виде [7]:

$$F_s = \sum_{i=1}^n (S_{тоз} + S_{тодхр}) L_{абр,i}, \quad (4)$$

где $S_{тоз}$, $S_{тодхр}$ – линейная переработка берега при различных состояниях водоема: озера и водохранилища, м; n – количество створов наблюдений, определяемое протяженностью участка переработки, (не более 50 единиц); $L_{абр,i}$ – длина береговой линии, подверженной переработке, на i -том участке, 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 30 000 м² (Осиповичское водохранилище) до 87 500 м² (Лепельское водохранилище).

Текущее состояние береговой линии может характеризоваться предложенным автором коэффициентом развития k_p береговой линии, равным отношению протяженности аккумулятивных берегов $L_{ак}$ к длине абразионных $L_{абр}$.

Немаловажным параметром, определяющим состояние абразионного берега, является так называемый критерий устойчивости Π_2 , предложенный автором для оценки устойчивости берегов, сложенных несвязными грунтами [7, 8].

Рассмотрим элемент грунта объемом W и площадью F , находящийся в предельном равновесии под воздействием ветрового волнения на береговой отмели ниже зоны разрушения волн (рис. 7) [8]. Основное воздействие на массив грунта оказывает гидродинамическое давление волнового потока P_e , которое ведет к перемещению материала переработки склона по профилю с углом заложения α .

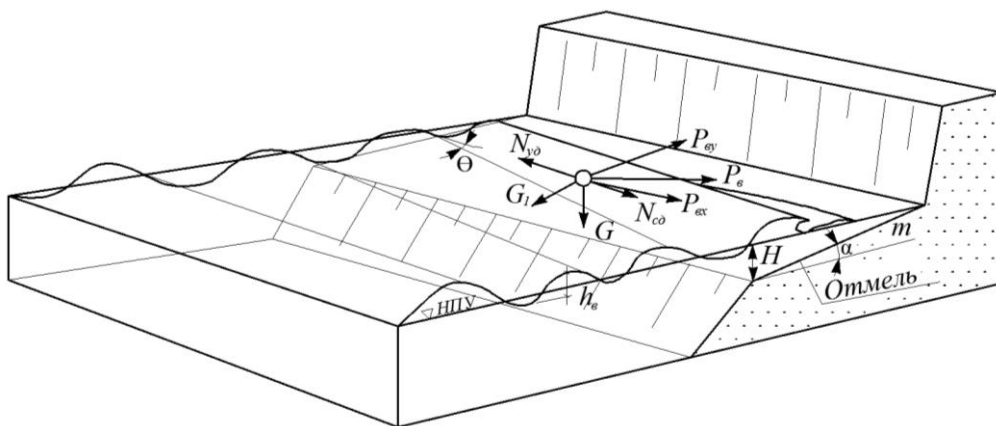


Рисунок 7. – Схема действия сил на элемент грунта на береговой отмели

Перенос частиц грунта вдоль берега в виде потока наносов вызван наличием двух условий: развитой широкой подводной частью береговой отмели и косоподходящего к урзу фронта ветрового волнения под углом Θ . Это позволяет представить P_e в виде двух компонент: поперечной P_{ey} и продольной P_{ex} , т. е. вдольбереговой. Кроме того, присутствует и влияет на устойчивость массива грунта вертикальная взвешивающая составляющая (P_{ez}). Эта составляющая, уравновешиваемая силой тяжести (G) и компонентой скатывающей силы, далее не учитывается. Основное усилие, оказываемое на элемент грунта, – это гидравлическое давление, создаваемое волновым потоком при его перемещении по береговой отмели (рис. 7). Продольная P_{ex} и поперечная P_{ey} составляющие давления волнового потока P_e на частицу наносов, создаваемого придонной скоростью v_{max} , равны [7, 8]:

$$P_{ex} = a_x F_y \gamma_e v_{max}^2 / 2g; \quad P_{ey} = a_y F_x \gamma_e v_{max}^2 / 2g, \quad (5)$$

где a_x, a_y – коэффициенты лобового и подъемного усилий продольной и поперечной составляющей воздействия давления волнового потока P_e [8]; F_x и F_y – площади проекций элемента грунта на горизонтальную и перпендикулярную волновому потоку вертикальную плоскости, m^2 ; γ_e – удельный вес воды, H/m^3 .

При этом воздействие волнового потока P_e может быть вычислено по формуле

$$P_e = \sqrt{P_{ex}^2 + P_{ey}^2}. \quad (6)$$

Натурные и лабораторные исследования ряда авторов по изучению режима донных волновых скоростей, а также сопоставление их с расчетными, показали, что они практически совпадают со скоростями руслового потока ($v_{л. max} = v_{max}$). Это подтверждают работы В.В. Лонгинова, З.А. Генина и И.Я. Попова, В.З. Аверина, Д.В. Джонсона, Д. Путнама, В. Мунка, М. Трейлора, Н.А. Айбулатова [9–11]. Следовательно,

$$v_{max} = \frac{\pi h_e k_{uu}}{\sqrt{\frac{\pi \lambda}{g} \operatorname{sh}\left(\frac{4\pi H}{\lambda}\right)}}, \quad (7)$$

где h_e – расчетная высота волны, м; λ – длина волны, м; g – ускорение свободного падения, m/c^2 ; H – глубина на внешнем краю отмели, м; k_{uu} – коэффициент шероховатости в соответствии с работами [10–13].

Принимая площади F_x и F_y проекций элемента грунта в виде шара объемом W , равными $F_x = F_y = F$ [7, 8, 12], на основании (6) и (7) из (5) получим:

$$P_6 = \frac{a_0 F \gamma_6 v_{\max}^2}{2g} = \frac{0,5 \pi a_0 F \gamma_6 h_6^2 k_{u2}^2}{\lambda \operatorname{sh} \left(\frac{4\pi H}{\lambda} \right)}, \quad (8)$$

где $a_0 = \sqrt{a_x^2 + a_y^2}$ – суммарный коэффициент лобового и подъемного усилий продольной и поперечной составляющей воздействия давления волнового потока P_6 [8].

Величину сдвигающей силы определим по формуле

$$N_{cd} = \sqrt{\gamma_0^2 W^2 \sin^2 \alpha + \frac{0,25 (\pi a_0 F \gamma_6)^2 (h_6 k_{u2})^4 \cos^2 \Theta}{\lambda^2 \operatorname{sh}^2 \left(\frac{4\pi H}{\lambda} \right)}}, \quad (9)$$

где γ_0 – удельный вес элемента грунта во взвешенном состоянии, Н/м³; α – угол наклона отмели.

Удерживающая сила $N_{уд}$ определяется суммой сил трения и сцепления грунта в воде. Принимая во внимание, что вдольбереговая составляющая движения материала переработки в виде наносов может возникать только лишь при наличии береговой отмели достаточной ширины, а также косоподходящего ветрового волнения к урезу воды под углом Θ (рис. 7), в зависимости от N_{cd} и $N_{уд}$ введена поправка, учитывающая угол подхода волны к берегу:

$$N_{y0} = \gamma_0 W f \cos \alpha \cos \Theta, \quad (10)$$

где f – коэффициент внутреннего трения для несвязных грунтов [8]. Отношение величин N_{cd} и $N_{уд}$ является критерием устойчивости продольного профиля равновесия. Уравнение равновесия может быть записано так: $N_{y0} = N_{cd}$, откуда:

$$\gamma_0 W f \cos \alpha \cos \Theta = \sqrt{\gamma_0^2 W^2 \sin^2 \alpha + \frac{0,25 (\pi a_0 F \gamma_6)^2 (h_6 k_{u2})^4 \cos^2 \Theta}{\lambda^2 \operatorname{sh}^2 \left(\frac{4\pi H}{\lambda} \right)}}. \quad (11)$$

Разделив обе части (11) на $\frac{2}{3} F \sin \alpha \cos \Theta$ и учитывая, что $\frac{1}{\sin^2 \alpha} = 1 + m^2$, где $m = \operatorname{ctg} \alpha$ – коэффициент заложения откоса, имеем:

$$\gamma_0 d f m = \sqrt{\frac{\gamma_0^2 d^2}{\cos^2 \Theta} + \frac{0,25 (\pi a_0 \gamma_6)^2 (h_6 k_{u2})^4 (1 + m^2)}{\left(\frac{2}{3} \right)^2 \lambda^2 \operatorname{sh}^2 \frac{4\pi H}{\lambda}}}, \quad (12)$$

где d – диаметр элемента грунта (шарообразной формы) объемом W .

Обозначим $\frac{\gamma_0 d}{\cos \Theta} = \xi_1$, а $\frac{\pi a_0 \gamma_6 (h_6 k_{u2})^2 \sqrt{1 + m^2}}{\lambda \operatorname{sh} \frac{4\pi H}{\lambda}} = \xi_2$, тогда критерий устойчивости

профиля берега и береговой линии Π_2 равен:

$$\Pi_2 = \frac{\gamma_0 d f m}{\sqrt{\xi_1^2 + (0,75 \xi_2)^2}}. \quad (13)$$

При значении $\Pi_2 \geq 1$ профиль берега и береговая линия соответствуют равновесной форме профиля динамического равновесия. В противном случае, когда величина Π_2 менее 1, берег находится в стадии интенсивной переработки. (При построении карты районирования учитываются водные объекты со сроком эксплуатации не менее 15 лет.)

Заключение. В результате выполнения комплексных работ по исследованию абразионных процессов на водохранилищах Беларуси были решены следующие задачи:

- разработаны показатели абразионного риска по основным факторам, определяющим процесс абразии;
- уточнена карта районирования территории страны по развитию абразионного риска и переработки берегов;
- даны предложения по проведению районирования с учетом вводимых в эксплуатацию водохранилищ ГЭС на реках Беларуси;
- разработаны показатели, характеризующие риск-ситуации процесса переработки берегов, которые рекомендуется учитывать при районировании территории страны по абразионному риску;
- разработан критерий устойчивости для профиля берега и береговой линии $П_2$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Широков, В.М. Водохранилища Белоруссии: природные особенности взаимодействия с окружающей средой / В.М. Широков, П.С. Лопух [и др.]. – Минск: Университетское, 1991. – 207 с.
2. Широков, В.М. Формирование берегов малых водохранилищ лесной зоны / В.М. Широков, П.С. Лопух, В.Е. Левкевич. – СПб.: Гидрометеоздат, 1992. – 160 с.
3. Левкевич, В.Е. Динамика берегов русловых, наливных и озерных водохранилищ Беларуси / В.Е. Левкевич. – Минск: Право и экономика, 2015. – 202 с.
4. Левкевич, В.Е. Динамическая устойчивость берегов водохранилищ Беларуси / В. Е. Левкевич. – Минск: Право и экономика, 2015. – 307 с.
5. Кобяк, В.В. Прогноз абразионных процессов на водохранилищах с трансформированным уровнем режимом: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.07 / В.В. Кобяк; Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2013. – 22 с.
6. Касперов, Г.И. Методические рекомендации по оценке рисков на искусственных водных объектах Республики Беларусь / Г.И. Касперов, В.Е. Левкевич, С.М. Пастухов, М.С. Кукшинов. – Минск: Право и экономика, 2007. – 63 с.
7. Левкевич, В.Е. Динамическая устойчивость берегов водохранилищ Беларуси: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.23.07 / В.Е. Левкевич; Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2017. – 51 с.
8. Михневич, Э.И. Устойчивость берегов водохранилищ при формировании профиля динамического равновесия в несвязных грунтах / Э.И. Михневич, В.Е. Левкевич // Мелиорация. – 2016. – № 4 (78). – С.18–23.
9. Лонгинов, В.В. Динамика береговой зоны бесприливных морей / В.В. Лонгинов. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 379 с.
10. Пышкин, Б.А. Динамика берегов водохранилищ / Б.А. Пышкин – Киев: Наукова думка, 1973. – 416 с.
11. Максимчук, В.Л. Рациональное использование и охрана берегов водохранилищ / В.Л. Максимчук. – Киев: Будівельник, 1981. – 112 с.
12. Михневич, Э.И. Новые типы креплений мелиоративных каналов / Э.И. Михневич. – Минск: Ураджай, 1978. – 128 с.
13. Шайтан, В.С. Проектирование креплений земляных откосов на водохранилищах / В.С. Шайтан. – М.: Госстройиздат, 1962. – 215 с.

REASONS FOR ACTIVATION OF ABRASION RISK AT WATER OBJECTS OF BELARUS AND CRITERIA OF ITS ZONING

Victor Levkevich, Grand PhD in Technical Sciences, Associate Professor

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Purpose. The reasons for the intensification of the risk of processes in the country, caused by the construction of a number of new reservoirs of the energy purpose, are shown. The shores of new reservoirs will be subject to active processing leading to the development of abrasion risk. The length of the abrasion coasts will increase by more than 20 km, which will have an impact on the adjacent territories and economic objects. The goal of the work is to refine the indicators that allow objectively to conduct zoning of the country's territory in terms of abrasion risk, which must be taken into account in future forecast calculations.

Methods. The paper uses data from field-based multi-year observations of the author for abrasion risk processes and the results of their statistical processing, as well as theoretical studies on the development of indicators of the sustainability of territories.

Findings. Based on the theoretical study of the formation of the profile of the dynamic equilibrium of abrasion shores and the equilibrium shoreline, new criteria for the regionalization of the territory of Belarus by abrasion risk have been developed and supplemented.

Application field of research. The developed methodical approaches to zoning of territories can be used for regionalization of regions for other risk-processes of a natural nature.

Conclusions. The results of regionalization of abrasion risk processes on the banks of the reservoirs of Belarus, taking into account the updated data, are of practical importance for determining management decisions and engineering measures to prevent the occurrence of risks at water bodies and minimize their consequences.

Keywords: reservoir, abrasion, abrasion risk, processing, coast, zoning, development factor, stability criterion.

(The date of submitting: March 3, 2018)

REFERENCES

1. Shirokov V.M., Lopukh P.S., Grechukhina T.D., Bazylenko G.M., Saplyukov F.V., Emel'yanov Yu.N., Grinevich A.G., Avsievich L.V., Kirilenko L.V., Lomako L.V., Shlyapnikov L.L., Gurina R.G., Spolitak Z.G., Levkevich V.E. *Vodokhranilishcha Belorussii: prirodnye osobennosti vzaimodeystviya s okruzhayushchey sredoy* [Reservoirs of Belarus: natural features of interaction with the environment]. Minsk, Universitetskoe, 1991. 207 p. (rus)
2. Shirokov V.M., Lopukh P.S., Levkevich V.E. *Formirovanie beregov malykh vodokhranilishch lesnoy zony* [Formation of the shores of small reservoirs of the forest zone]. St. Petersburg, Gidrometeoizdat, 1992. 160 p. (rus)
3. Levkevich V.E. *Dinamika beregov ruslovykh, nalivnykh i ozernykh vodokhranilishch Belarusi* [Dynamics of waterside of channel, bulk and lake water reservoirs of Belarus]. Minsk, Pravo i ekonomika, 2015. 202 p. (rus)
4. Levkevich V.E. *Dinamicheskaya ustoychivost' beregov vodokhranilishch Belarusi* [Dynamic stability of waterside reservoirs of Belarus]. Minsk, Pravo i ekonomika, 2015. 307 p. (rus)
5. Kobyak V.V. *Prognoz abraziionnykh protsessov na vodokhranilishchakh s transformirovannym urovnyem rezhimom* [Forecast abrasion processes in reservoirs with a transformed level regime]. PhD. tech. sci. diss. Synopsis: 05.23.07. Minsk, 2013. 22 p. (rus)
6. Kasperov G.I., Levkevich V.E., Pastukhov S.M., Kukshinov M.S. *Metodicheskie rekomendatsii po otsenke riskov na iskusstvennykh vodnykh ob'ektakh Respubliki Belarus'* [Methodical recommendations on risk assessment on artificial water bodies of the Republic of Belarus]. Minsk, Pravo i ekonomika, 2007. 63 p. (rus)
7. Levkevich V.E. *Dinamicheskaya ustoychivost' beregov vodokhranilishch Belarusi* [Dynamic stability of the waterside of the reservoirs of Belarus]. Grand PhD. tech. sci. diss. Synopsis. Minsk, 2009. 51 p. (rus)
8. Mikhnevich E.I., Levkevich V.E. *Ustoychivost' beregov vodokhranilishch pri formirovanii profilya dinamicheskogo ravnovesiya v nesvyaznykh gruntakh* [Stability of the waterside of reservoirs when forming a profile of dynamic equilibrium in disconnected soils]. *Melioratsiya*. 2016. No. 4 (78). Pp. 18–23. (rus)
9. Longinov V.V. *Dinamika beregovoy zony besprilivnykh morey* [Dynamics of the coastal zone of the tidal seas]. Moscow, Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1963. 379 p. (rus)

10. Pyshkin B.A. *Dinamika beregov vodokhranilishch* [Dynamics of the waterside of reservoirs]. Kiev, Naukova dumka, 1973. 416 p. (rus)
11. Maksimchuk V.L. *Ratsional'noe ispol'zovanie i okhrana beregov vodokhranilishch* [Rational use and protection of the waterside of reservoirs]. Kiev, Budivel'nik, 1981. 112 p. (rus)
12. Mikhnevich E.I. *Novye tipy krepleny meliorativnykh kanalov* [New Types of Fixings of Reclamation Channels]. Minsk, Uradzhay, 1978. 128 p. (rus)
13. Shaytan V.S. *Proektirovanie krepleny zemlyanykh otkosov na vodokhranilishchakh* [Designing of anchorages of earthen slopes on reservoirs]. Moscow, Gosstroyizdat, 1962. 215 p. (rus)