

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК574;504;576

РЕЗУЛЬТАТЫ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ ПО МАСШТАБАМ АБРАЗИОННОГО РИСКА НА ВОДОХРАНИЛИЩАХ В КОНТЕКСТЕ ПРОЦЕССА ГЛОБАЛЬНОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

© 2019 г. В. Е. Левкевич

*Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, корп.1, Минск, 220013 Республика Беларусь
E-mail: eco2014@tut.by*

Поступила в редакцию: 09.01.2019 г.

После исправления: 24.03.2019 г.

Показаны причины активизации рискообразующих процессов на водных объектах страны, вызванные «старением» существующих и строительством новых водохранилищ. Берега новых водохранилищ, расположенных на территории Беларуси, интенсивно используемой в народном хозяйстве и плотно заселенной, подвержены активной переработке – абразии, ведущей к развитию абразионного риска. Протяженность абразионных берегов в последние годы увеличилась более чем на 20 км, что, несомненно, оказывает влияние на прилегающие территории, потерю земель и объекты экономики.

Цель работы – уточнение ранее выполненного автором районирования территории страны по абразионному риску [3–5], которое следует учитывать в прогнозных расчетах устойчивого развития регионов на совершенно новых принципах и допущениях.

В работе использованы данные натурных более чем 40-летних наблюдений автора за процессом абразии и результаты научно-обоснованного анализа, позволившего предложить (используя дерево отказов) модель развития абразионного риска и показатели, характеризующие абразионный риск с учетом глобального изменения климата и сопутствующего потепления, влияющего на динамику и масштабы процесса разрушения и деформации берегов.

На основе теоретического изучения механизма формирования профиля динамического равновесия абразионных берегов и равновесной береговой линии предложен критерий, характеризующий устойчивость и развитие профиля равновесия берегового склона, необходимого при районировании регионов Беларуси по абразионному риску.

На основе обобщения результатов наблюдений, выполненных на водохранилищах Беларуси, и использовании предложенных показателей произведено районирование территории страны и Минской области по абразионному риску, имеющее практическое значение при принятии управленческих решений и назначении инженерных мероприятий по предупреждению возникновения рисков на водных объектах, а также минимизации их последствий.

Ключевые слова: водохранилище, абразия, абразионный риск, переработка, берег, районирование, показатель устойчивости, профиль динамического равновесия.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019418-29>

ВВЕДЕНИЕ

Водоохранилища – сложные природно-технические комплексы, создаваемые на базе рек, озер и других водных объектов, оказывают отрицательное воздействие на окружающую природную среду. К числу наиболее опасных явлений следует отнести абразию – переработку естественных берегов и незакрепленных верховых грунтовых

откосов дамб и плотин. В результате переработки происходит изъятие сельскохозяйственных земель и лесных угодий из оборота, разрушение селитебных территорий, нарушение условий жизнедеятельности населения, что приносит значительный ущерб народному хозяйству государства. Основа безопасной жизнедеятельности населения, проживающего непосредственно рядом с водохранилищами, – достоверный прогноз

абразионных процессов и определение современных эффективных инженерных мероприятий по берегоукреплению.

Бурное строительство в последние годы водохранилищ и реконструкция существующих гидроузлов в Беларуси стимулировали развитие целого научного направления и создание ряда научных школ береговой гидротехники. В Республике Беларусь велись и ведутся исследования в этом направлении. Во главе исследований с 1956 г. стоял Белорусский политехнический институт (ныне БНТУ – Белорусский национальный технический университет), который продолжает исследования и в настоящее время. Позже присоединились к изучению береговых процессов БелНИИ Мелиорации и водного хозяйства, Центральный НИИ комплексного использования водных ресурсов (ЦНИИКИВР), а также БелГУ и Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь.

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Актуальность темы обоснована активной реконструкцией, модернизацией и строительством гидроузлов и водохранилищ различного назначения. В Беларуси эксплуатируется более 150 водохранилищ (водоемов, имеющих полный объем более 1.0 млн м³), протяженность берегов которых свыше 1500 км [1-4].

Впервые оценка водохранилищного фонда республики была осуществлена Институтом водных проблем АН БССР в конце 1950-х годов. В последующем аналогичная работа по созданию справочника водохранилищ Беларуси была выполнена в Белорусском государственном университете под руководством В.М. Широкова. В начале XXI века очередное уточнение было проведено в ЦНИИКИВР. Первые материалы по формированию их берегов были получены в 1950-1960-х годах [5].

Размещение водохранилищ по территории Республики Беларусь крайне неравномерное и определяется особенностями рельефа и гидрографии страны.

Большинство водохранилищ сконцентрировано в районе бассейнов рек Припять и Днепр [4, 5, 10, 11]. Зарегулированность территорий водохранилищами (отношение площади водного объекта к площади района) по административным районам в основном находится в пределах 0.014–4.37%, в 33 районах показатель зарегулированности 0.11–1.0%.

Одна из основных морфометрических характеристик водохранилищ – их полный объем. Практически все водохранилища Беларуси имеют полный объем до 250 млн м³.

В зависимости от развития гидрологической сети и особенностей рельефа местности на территории страны выделяется ряд геоморфологических районов: Поозерский (Белорусское Поозерье) – северная часть страны; область Центральных водораздельных возвышенностей (Белорусская гряда) – центральная часть; Полесский – южная часть Беларуси. Соответственно, все водохранилища Беларуси по расположению условно разделены на группы:

- **поозерского типа** (Лепельское, Дружба народов, Езерище, Селявское и др.);
- **центральных водораздельных возвышенностей** (Вилейское, Заславское, Дрозды, Чижовское, Осиповичское и др.);
- **полесского типа** (Любанское, Краснослободское, Солигорское).

Водоохранилища страны были классифицированы по проявлению процесса переработки берегов на естественных берегах и незакрепленных грунтовых верховых откосах дамб и плотин. Была выделена группа водохранилищ, на которых получили активное развитие процессы переработки в плессовой приплотинной (расширенной) части: к ней относятся *водохранилища руслового типа* – Вилейское, Осиповичское, Чигиринское Чижовское, Солигорское, Петровичское, Дубровское, Гродненской ГЭС и др. Данный тип водоемов расположен преимущественно в центральной и западной частях страны (рис. 1).

Группа *водохранилищ озерного типа* представлена объектами, созданными на базе естественных озер, и расположена в северной и восточной частях страны. На таких водохранилищах, как Езерищенское, Хоробровка, Селявское, Лепельское и др., процессы переработки и формирования береговой линии наиболее активно происходят на фоне существующих, так называемых реликтовых абразионных образований. В большинстве случаев процессы на таких водоемах, находящиеся в стадии статического равновесия, активизируются при изменении гидрологического режима водного объекта (рис. 2).

Третья группа представлена *водохранилищами наливного типа*, где процессы берегоформирования имеют свою специфику – малую протяженность естественных берегов (менее 50% общей протяженности береговой линии). Поэтому переработке подвергаются преимущественно верховые откосы ограждающих напорных сооружений – дамб и плотин. Объектов наливного типа достаточно много, особенно в южной части страны: Судково, Зельва, Красная Слобода, Ельское, Малые Автюки, Погост и др. (рис. 3).

От физико-механических свойств грунтов, слагающих берега и ложе водохранилищ, зависят

скорость и масштабы переработки. По данным Э.И. Михневича, в условиях Беларуси основные берегообразующие грунты – четвертичные отложения, представленные песками различной крупности, песчано-гравийно-галечным материалом.

Водохранилища Белорусской гряды и Среднерусской возвышенности в геологическом отношении существенно отличаются от полесских. Более узкие, хорошо врезанные долины рек определяют их морфометрические особенности. Водохранилища в плане имеют вытянутую форму с одним или двумя расширениями в приплотинной части, высота берегов изменяется в пределах



Рис. 1. Переработка берегов русловых водохранилищ: а – Солигорское, б – Вилейское водохранилища (фото В.Е. Левкевича, 2017 г.)

1-10 м. Аналогичное строение имеют берега водохранилища Витебской ГЭС. Водохранилища полесского типа (Солигорское, Любанское, Краснослободское и ряд др.) расположены в пределах задровых равнин и имеют преимущественно низкие и пологие берега, требующие дополнительных обвалований.

Анализ фондовых материалов и материалов натуральных полевых исследований показал, что процессы формирования береговой линии склонов наиболее активно проявляются на коренных берегах, на участках побережья приплотинных плессов, а также непосредственно на самой плотине. В зависимости от состава грунтов выделены подтипы абразионных береговых склонов (рис. 4):

а) *абразионно-осыпной* – формируется в несвязных песчаных грунтах, встречается в центральной и южной части республики (водохранилища Заславское, Вяча, Дрозды, Солигорское, Осиповичское, Петровичи, Вилейское и др.);



Рис. 2. Переработка берегов Лепельского водохранилища озерного типа (фото В.Е. Левкевича, 2016 г.)



Рис. 3. Переработка берегов Ельского водохранилища наливного типа (фото В.Е. Левкевича, 2016 г.)

б) *абразионно-обвальный* – образуется в супесях (на берегах Лепельского, Осиповичского водохранилищ и др.);

в) *абразионно-оползневой* – возникает при наличии суглинков и глин (Чижовское, Дубровское, Лепельское и некоторые другие водохранилища).

Районирование территории страны производилось по значению максимальной величины линейной переработки S , зафиксированной во время эксплуатации конкретного объекта (табл. 1). Полученные значения линейной переработки наносились на карту, на которой затем производилось выделение районов и их границ (рис. 5).

Анализ уточненных данных о переработке береговых склонов большого количества обследованных водохранилищ (более 100) позволил автору уточнить, детализировать и конкретизировать ранее полученную карту абразионного районирования [2].

На интенсивность развития абразионных процессов на водохранилищах в значительной степени влияют климатические и метеофакторы, в частности продолжительность безледного периода и периода ледостава. Длительность периода ледостава для условий Белоруссии до 2010 г. в среднем составляла около 4.5 месяцев. В настоящее время этот период сократился до 2.5–3 месяцев. Вскрытие водоемов обычно происходит во второй половине марта, а полностью водная поверхность освобождается ото льда в первой половине апреля. Наименьшие толщины льда приурочены к верховьям (0.20–0.35 м), наибольшая мощность ледового покрова – к приплотинной части водоема (0.55–0.70 м). В соответствии с тенденциями глобального потепления климата, установленными Институтом глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, наблюдаются изменения температурного режима Европейского континента и Белорусского региона (рис. 6), которые ведут к уменьшению периода ледостава и, следова-

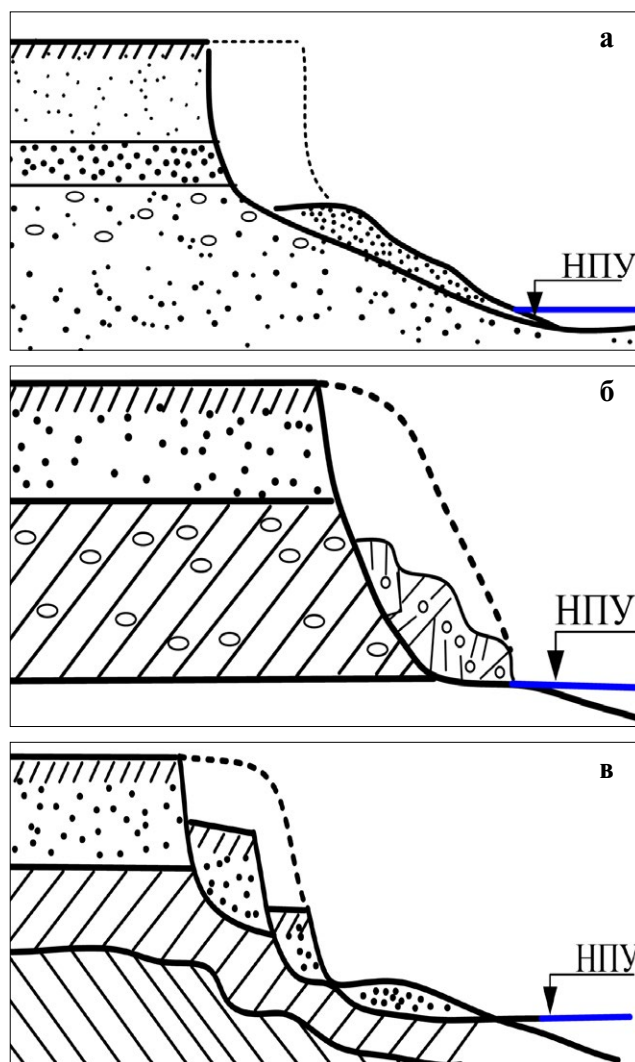


Рис. 4. Подтипы абразионных берегов: а – абразионно-осыпной; б – абразионно-обвальный; в – абразионно-оползневой.

тельно, к увеличению времени воздействия ветрового волнения на берег, тем самым повышая вероятность развития абразионного риска на прилегающих территориях.

Таблица 1. Районирование территории Беларуси по масштабам абразии береговых склонов на водохранилищах [3–5]

Геоморфологическая область	Район	Преобладающие грунты	Максимальное значение линейной переработки, S , м
Поозерье	I	Пески различного состава, моренные супеси, суглинки, глины, включения гравия, валунов	25.0
Центральная	II	Пески различной крупности с включением гравия, моренные суглинки, супеси, лессовидные грунты	40.0
	III		25.0
	IV		10.0
Полесье	V	Пески аллювиального происхождения, лессовидные супеси, торфяники	7.0
	VI		5.0

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА РИСКА ОТ ПЕРЕРАБОТКИ (АБРАЗИИ) БЕРЕГОВ

Под термином “*абразионный риск*” понимается произведение вероятности развития процесса абразии на конкретном водохранилище и возможного ущерба от данного процесса за промежуток времени равный 1 году, либо за период наблюдений. В общем виде абразионный риск определяется по формуле

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

где P_{ϕ_i} – вероятность возникновения i -го рискообразующего фактора на рассматриваемом водном объекте, 1/год; n – количество рискообразующих факторов; U – возможный ущерб от процесса абразии, тыс. руб.

Применительно к процессу абразии или переработки береговых склонов на водохранилищах поня-

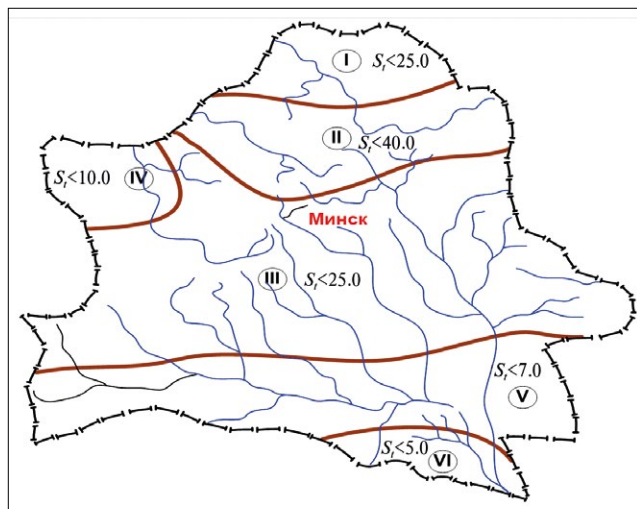


Рис. 5. Районирование территории Беларуси по величине линейной переработки берегов и деформаций грунтовых откосов дамб и плотин [4].

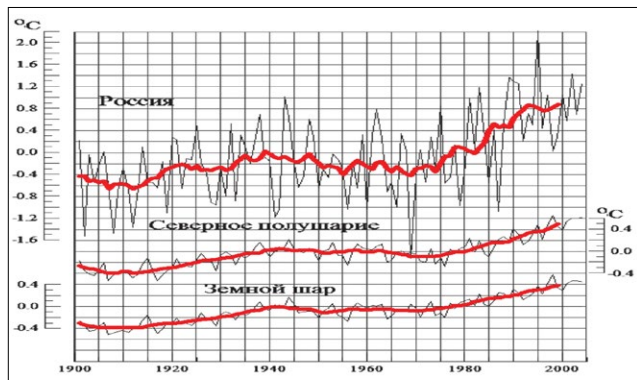


Рис. 6. Осредненные аномалии среднегодовой температуры приземного воздуха для территории России, Северного полушария и земного шара [3, 5].

тие “*риск*” относится к возможным воздействиям на объект и его реакции на эти воздействия. В качестве объекта принимается береговой склон водохранилища либо верховой незакрепленный откос дамбы или земляной плотины. Под воздействиями при этом понимаются основные факторы и условия, приводящие к переработке (абразии) берега.

Согласно разработанному алгоритму [1-5], предварительно определяются основные критерии абразионной опасности, к ним относятся величина линейной переработки S_r , интенсивность переработки Q_r и скорость переработки берега V_{sr} . В случае когда значения параметров процесса абразии меньше порогового, то для них оценка риска не требуется, а определяется лишь время стабилизации процесса.

Для большинства искусственных водных объектов на территории Беларуси значения критериев абразионной опасности превышают минимальные пределы, поэтому для таких водоемов необходимо проводить анализ и оценку риска и ущерба с проведением долгосрочного прогноза переработки берегов на конечный срок эксплуатации водоема и разработкой предложений по берегозащите.

Определение вероятности (частоты) возникновения абразии производится на основании статистических данных о рискообразующих факторах. Согласно разработанному алгоритму, на *I этапе определяют критерии абразионной опасности*, т.е. значения параметров, характеризующих профиль переработки, при котором процесс абразии приобретает рискообразующие масштабы.

На проектируемых водоемах и водоемах, находящихся в стадии ввода в эксплуатацию, необходимо разрабатывать предложения по недопущению возникновения абразионных процессов с учетом предварительного прогноза переработки, оценки риска и только потом принимать управленческие решения по берегозащите.

Ко *II этапу оценки риска* относится определение вероятности (частоты) возникновения абразии на основании статистических данных о рискообразующих факторах, а также определение возможного ущерба от рассматриваемого процесса. По результатам выполненного этапа проводится типизация процесса абразии по полученным значениям вероятности возникновения, а также разрабатывается комплекс мероприятий и предложений, направленных на снижение абразионного риска.

Одновременно с оценкой вероятности процесса абразии выполняется долгосрочный прогноз переработки берегов на конечный срок эксплуатации водоемов. На основе оценки статистической информации определяется вероятность

возникновения рискообразующих факторов: ветрового воздействия, ветрового волнения, колебания уровней воды, перемещения наносов, воздействия течений.

При наличии данных строится графоаналитическая зависимость (“дерево отказов”) по расчету вероятности в зависимости от причин, вызывающих процесс абразии. Построение схемы по оценке вероятности представлено на рис. 7. Из схемы видно, что основополагающий фактор в формировании берегов абразионного типа – ветровое воздействие, которое генерирует возникновение волновых колебаний различной обеспеченности. Процесс переработки берега в зависимости от сочетания факторов может развиваться по трем сценариям.

Сценарий 1. На развитие абразии влияет *только амплитуда колебания уровней воды* в водохранилище, остальные факторы незначительны. Данный сценарий развития абразии наиболее характерен для средних водохранилищ сезонного и суточно-регулируемого стока.

Сценарий 2. На развитие процесса в первую очередь оказывает влияние *ветровое воздействие, обуславливающее возникновение волн* различной обеспеченности, которые в свою очередь способствуют размыву подводной и надводной частей береговой отмели и верховых откосов дамб и плотин. Вследствие размыва грунта, образующего берег (откос), происходит движение наносов в продольном и поперечном направлении, в результате чего возможно образование аккумулятивных береговых форм (пересыпей, фестонов, кос и т.д.). Данный сценарий наиболее характерен для большинства водохранилищ Республики Беларусь.

Сценарий 3. На процесс абразии оказывает влияние *только вдольбереговое и стоковое течение*, остальные факторы несут незначительную роль. Данный сценарий характерен для водохранилищ преимущественно руслового типа, в которых течения играют основную берегоформирующую роль.

Конечная вероятность возникновения рассматриваемого процесса переработки в общем виде определяется по формуле:

$$P(S_1) = P_{S1} + P_{S2} + P_{S3} - P_{S1}P_{S2} - P_{S2}P_{S3} - P_{S1}P_{S3} + P_{S1}P_{S2}P_{S3} \quad (2)$$

где $P(S)$ – вероятность возникновения процесса абразии берега, 1/год; P_{S1} – частота (обеспеченность) амплитуды колебания уровней, 1/год; P_{S2} – вероятность возникновения (обеспеченность) ветрового воздействия ($P_{S2} = P_{2.1} + P_{2.2} - P_{S1.2}P_{S2.2}$), 1/год; P_{S3} – вероятность возникновения (обеспеченность) стоковых течений в водохранилище, 1/год; $P_{S2.1}$ – вероятность возникновения (обеспе-

ченность) волн 1% обеспеченности, 1/год; $P_{S2.2}$ – вероятность (обеспеченность) волн 25% обеспеченности, 1/год.

Для качественной оценки развития абразионного риска был проведен анализ фактических данных по каждому рискообразующему фактору, установленному для условий водохранилищ Минской области. Для этого были введены показатели, которые учитывают влияние гидрометеорологических явлений, оказывающих активное воздействие на развитие берегов водохранилищ [4, 5].

По результатам данных различных авторов и исследователей установлено, что основные параметры процесса переработки [1, 6-10, 12] – это:

- величина линейной переработки берега – S_l , м;
- объем переработки – Q_l , м³/пог. м;
- скорость линейной переработки – v_{Sl} , м/год;
- скорость объемной переработки – v_Q , м³/год;
- протяженность абразионного берега – L_s , м.

Параметры процесса абразии получают путем проведения натурных полевых наблюдений с использованием различных приборов и оборудования. Основные показатели процесса абразии отражают влияние на абразионный процесс таких природных процессов, как ветровое и волновое воздействие, колебание воды в верхнем бьефе водохранилищ, вдольбереговые течения и др.

При изучении абразионных процессов на искусственных водных объектах республики ставились следующие задачи:

- выделение районов, в пределах которых искусственные водные объекты наиболее подвержены процессам переработки берегов;

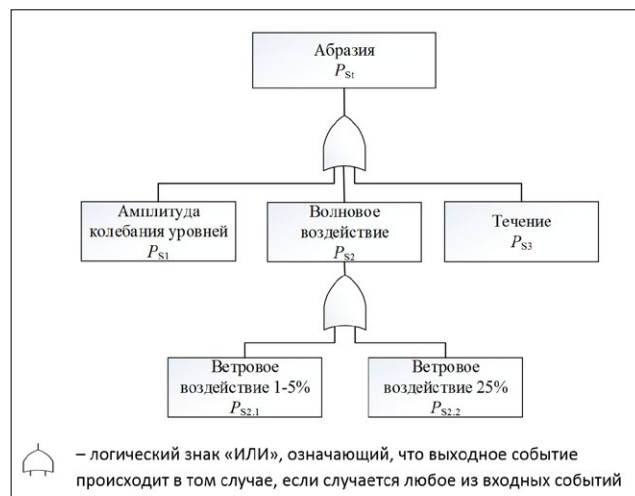


Рис. 7. Схема “дерева отказов” для оценки вероятности возникновения абразии-переработки береговых склонов [5].

- оценка частоты (вероятности) возникновения процесса абразии на искусственных водных объектах;
- изучение масштабов и динамики основных факторов, способствующих процессу абразии;
- расчет вероятностных показателей процесса абразии.

Для оценки масштабов и динамики процесса абразии по указанным водоемам были предложены показатели, учитывающие влияние природных гидрометеорологических явлений, оказывающих воздействие на развитие процесса переработки-абразии берегового склона водохранилища.

1. Показатель ветрового воздействия – γ_{ω} :

$$\gamma_{\omega} = \frac{\omega_{\max}}{\omega_{25}}, \quad (3)$$

где ω_{\max} – максимальная скорость ветра, рассчитанная по результатам натуральных наблюдений и обработки статистической информации, м/с; ω_{25} – минимальная скорость ветра, при которой возникает метеорологическая ЧС природного характера, м/с [1].

В дальнейшем при проведении исследований планируется также учитывать скорость ветра, равную 12 м/с, так как при ее превышении метеорологические станции посылают заинтересованным организациям информацию о штормовом предупреждении.

Значение показателя γ_{ω} указывает на возможные сценарии протекания процесса абразии:

$\gamma_{\omega} < 1$, т.е. фактическая скорость ветра не превышает скорости, соответствующей ЧС природного характера. Такая скорость ветра относится к большой повторяемости, ее обеспеченность составляет более 75% от всех происходящих ветров, включая штили;

$\gamma_{\omega} \geq 1$, т.е. фактическая скорость ветра равна либо превышает значение скорости, при которой регистрируется ЧС метеорологического характера. Происходящие ветра характеризуются наименьшей обеспеченностью, однако оказывают большее разрушающее воздействие. При оценке параметров процесса абразии при таких скоростях необходимо вводить дополнительные коэффициенты, учитывающие силу ветра (высоту волны).

2. Комплексный показатель – γ_L :

$$\gamma_L = \frac{\omega_{\max} \cdot t_{\omega}}{L_p}, \quad (4)$$

где t_{ω} – время ветрового воздействия (ω) на акваторию водоема на высоте 10 м над поверхностью, часы; L_p – расчетная длина разгона волны (м), определяемая по СНиП 2.06.04.

3. Вероятностный показатель – γ_P :

$$\gamma_P = \frac{N_{\omega}}{N} \quad (5)$$

где N_{ω} – число случаев ветра различной обеспеченности за период наблюдений; N – период наблюдений (годы, дни).

4. Площадной районный показатель риска абразии – γ_R :

$$\gamma_R = \frac{N_{\omega} \cdot \sum S_{\text{в.з.}}}{N \cdot S_{\text{р-н}}}, \quad (6)$$

где $\sum S_{\text{в.з.}}$ – суммарная площадь водного зеркала водохранилищ в отдельном районе, км²; $S_{\text{р-н}}$ – площадь района, км².

5. Показатель территориального риска абразии – γ_A :

$$\gamma_A = \frac{\sum S_{\text{абр.}}^{\text{в-шт}}}{S_{\text{р-н}}}, \quad (7)$$

где $\sum S_{\text{абр.}}^{\text{в-шт}}$ – суммарная площадь водного зеркала водохранилищ района, подверженных абразии, км².

Значения приведенных параметров для некоторых водохранилищ представлены в табл. 2.

Рассчитанные выше показатели в дальнейшем использовались при построении карт абразионного риска на основе геоинформационной системы ГИС *MapInfo*.

РАЙОНИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ ПО АБРАЗИОННОМУ РИСКУ

С целью оценки масштабов и динамики развития процесса абразии во времени был проведен анализ инженерно-геологических условий. Установлено, что морфология рельефа территории водосборов, водоемов отражает особенности формирования берегов водохранилищ. Наличие общих черт природных условий на территории той или иной рассмотренной области республики определяет общие закономерности как в морфометрии, так и динамике береговых процессов водохранилищ. В качестве тестового региона, где отрабатывался механизм районирования, была выбрана Минская область.

Минская обл. была районирована по величине территориального риска абразии-переработки береговых склонов на водохранилищах (рис. 8). Численное значение показателя абразионного риска приведено в табл. 2.

В период 1960-2000 гг. в связи с комплексной мелиорацией территории Беларуси было построено большое количество различных народохозяйственных объектов, в том числе водохранилищ и прудов, что привело к созданию сети водных объектов различного масштаба [7]. По истечении проектного срока службы эксплуатации указанных водоемов (а он уже практически везде завершается, принятый нормативный срок 50 лет) необходимы замена технологического оборудования либо капитальный ремонт основных сооружений. Но в настоящее время средств не всегда хватает даже на текущий ремонт. По современным оценкам, в аварийном состоянии находятся около 50% гидротехнических сооружений страны, изношенность металлоконструкций и водосбросных сооружений достигает 80%. Все это ведет к повышению вероятности возникновения риск-ситуаций природно-техногенных и техногенных аварий в зоне водохранилищ. Обеспечение нормального функционирования территориальной инфраструктуры Беларуси возможно лишь при решении комплекса экономических, политических, социальных, технических, а также экологических проблем.

В результате наших исследований была проведена оценка природных рисков на берегах ряда водохранилищ республики с учетом сложности и многофакторности учитываемых процессов и региональных особенностей объектов. В качестве исходной информации в исследованиях использовались фондовые и опубликованные материалы, данные аэрофото- и космосъемок, а также собственные материалы автора, полученные при полевых обследованиях ряда объектов.

В настоящее время отсутствует какая-либо единая методика оценки экономических последствий возможных риск-ситуаций на водоемах [4]. В зависимости от решаемых задач и от специфических особенностей источника и объекта опасности показателями риска опасных природных и техногенных процессов могут выступать, как уже отмечалось выше, вероятность (повторяемость) негативных событий, возможный ущерб или комбинированная (интегральная характеристика) ущерба и повторяемости риск-ситуаций.

В Республике Беларусь процесс переноса зданий и сооружений, хозяйственных и жилых зданий из зоны разрушения береговых склонов, а также зон подтопления достаточно распространен. Например, мероприятия по переносу строений осуществлялись на водохранилищах Погост (1985 г.), Заславское (1956-1978 гг.), Криницы (1976 г.), Осиповичское (1965-1978 гг.), Краснослободское,

Таблица 2. Характеристики берегов водохранилищ Минской области, подверженных переработке, и значения коэффициента территориального риска абразии для различных районов региона

Район расположения водохранилища	Средняя величина линейной переработки, S_p , км	Общая протяженность абразионных берегов, $L_{абр}$, км	Общая площадь территории абразии, км ²	Площадь района расположения водохранилищ, км ²	Показатель территориального риска абразии γ_A , $n \cdot 10^{-6}$
Минский	0.002	20.1	0.402	2221.0	18.2
Червенский	Та же	1.5	0.003	1620.0	1.85
Смолевичский	- « -	4.3	0.0086	1423.0	6.04
Логойский	- « -	1.2	0.0024	2318.0	1.03
Березинский	- « -	2.7	0.0054	1928.0	2.8
Узденский	- « -	1.1	0.0022	1133.0	1.94
Копыльский	- « -	1.1	0.0022	1612.0	1.37
Любанский	- « -	1.2	0.0024	1875.0	1.28
Стародорожский	- « -	1.1	0.0022	1396.0	1.58
Дзержинский	- « -	1.2	0.0024	1212.0	1.98
Пуховичский	- « -	1.2	0.0024	2457.0	0.98
Вилейский	- « -	2.0	0.004	2423.0	1.65
Крупский	0.0035	1.2	0.0042	2134.0	1.97
Воложинский	0.002	1.1	0.0022	1919.0	1.15
Солигорский	- « -	2.3	0.0046	2476.0	1.86

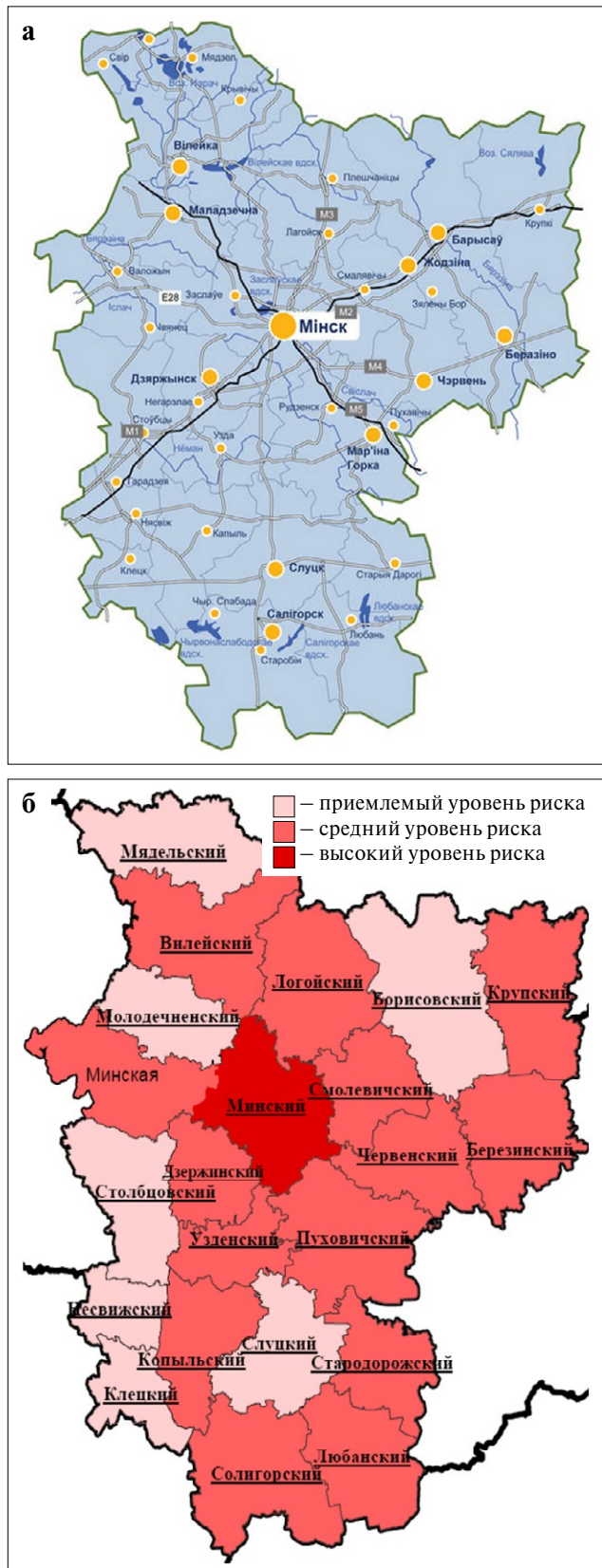


Рис. 8. Районирование территории Минской обл. по величине территориального риска абразии: а – административная карта Минской обл.; б – электронная карта абразийного риска.

Солигорское, Вилейское (1972-1989 гг.), Чижовское (1956 г.), Лепельское (1955-1960 гг.), Гродненской ГЭС (2011-2013 гг.), Витебской ГЭС (2014-2015 гг.) и др.

Материалы природных исследований показывают, что общая площадь земель, теряемых в результате развития и протекания абразийных процессов, в настоящее время составила приблизительно 400 га. С учетом ввода водохранилищ Гродненской ГЭС (на р. Неман), каскада водохранилищ Витебской, Полоцкой и Бешенковичской ГЭС (на р. Западная Двина) общая площадь теряемых площадей составит порядка 1200-1600 га. При этом на долю пахотных земель приходится 2/3 от указанной площади, а остальная часть – на лесные угодья, приусадебные участки, кустарники и т.д.

КРИТЕРИЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОФИЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЙ УСЛОВИЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ПЕРЕРАБОТКИ И АБРАЗИОННОГО РИСКА

Наряду с оценкой риска возникновения и развития процесса абразии (переработки берегов) важно установить условия и сроки стабилизации этого сложного многофакторного процесса, развитие которого определяется составом размываемых грунтов, формой профиля равновесия разрушаемого склона и условиями его динамической устойчивости.

Как известно, процесс развития берегов, сложенных несвязными грунтами, завершается формированием профиля *динамического равновесия*, который вырабатывается фронтальным ветровым волнением, при котором частицы грунта на поверхности откоса хоть и совершают колебательные движения относительно условного среднего положения, однако суммарный объем перемещающихся наносов остается равным нулю [6, 7, 10-12]. Известно, что устойчивость подводной части профиля берега (откоса) формируется под действием гидродинамических нагрузок, вызванных ветровым волнением, прямыми и обратными течениями волнового потока и определяется допускаемыми скоростями [6-10]. Основной причиной разрушения берегового склона, находящегося в зоне действия волнового потока, является создание им гидродинамического давления (P_d) и грунтового потока (P_ϕ) в подстилающем слое, которые вызывают *знакопеременное* сдвигающее усилие (в дальнейших расчетах величина (P_ϕ) не учитывалась в связи с ее незначительностью). Учет соотношения сил, действующих на элемент грунта объемом (W) дает возможность решить прикладную задачу по определению *критерия устойчивости профиля динамического равновесия*, соответствующего окончанию процесса абразии [3-5].

Принимается, что практический интерес в условиях водохранилищ Беларуси представляют лишь III и IV зоны волнения, в которых волновой поток непосредственно взаимодействует с дном и поверхностью подводной части береговой отмели [3, 6, 8, 10].

Рассмотрим элемент грунта объемом W и площадью F , находящийся в предельном равновесии под воздействием ветрового волнения на береговой отмели ниже зоны разрушения волн (рис. 9). Основное воздействие на массив грунта оказывает гидравлическое давление волнового потока P_B , которое ведет к перемещению материала по профилю склона.

Вдольбереговой перенос частиц грунта в виде потока наносов вызван наличием двух условий: развитой подводной частью береговой отмели и косопадающего к урезу фронта ветрового волнения под углом Θ . Это позволяет представить P_B в виде двух компонент: поперечной P_{By} и продольной P_{Bx} , т.е. вдольбереговой. Кроме того, присутствует и влияет на устойчивость массива грунта вертикальная взвешивающая составляющая (P_{Bz}). Эта составляющая, уравновешиваемая силой тяжести (G) и компонентой скатывающей силы, далее не учитывалась.

Давление волнового потока на частицу наносов, создаваемое придонными скоростями v_{max} и его составляющими – продольной P_{Bx} и поперечной P_{By} , равны [8]:

$$P_{Bx} = a_x F_y \gamma_a v_{max}^2 / 2g, \quad (8)$$

$$P_{By} = a_y F_x \gamma_a v_{max}^2 / 2g.$$

где a_x, a_y – расстояние от центра тяжести элемента грунта W до плоскостей проекции x и y ; $F_{x,y}$ – площади проекции элемента грунта на плос-

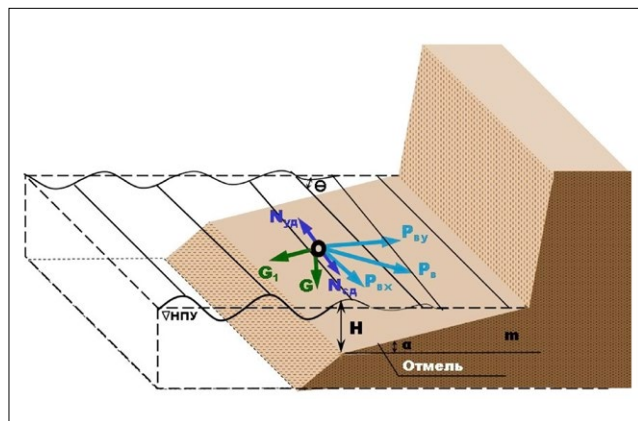


Рис. 9. Схема действующих сил на элемент грунта в подводной части отмели.

кости x и y ; γ_a – удельный вес грунта во взвешенном водой состоянии, H/m^3 .

Тогда равнодействующая сила P_B поперечной и вдольбереговой составляющих имеет вид:

$$P_B = \sqrt{P_{Bx}^2 + P_{By}^2}. \quad (9)$$

Натурные и лабораторные исследования ряда авторов по изучению режима донных волновых скоростей показали, что они практически совпадают со скоростями руслового потока (v_{max}). Следовательно,

$$v_{max} = \frac{\pi h_b n}{\sqrt{\frac{\pi \lambda s h \left(\frac{4\pi H}{\lambda} \right)}{g}}}, \quad (10)$$

где h_b – расчетная высота волны, м; λ – длина волны, м; g – ускорение свободного падения, m/c^2 ; H – глубина на внешнем краю отмели, м; n – коэффициент шероховатости в соответствии с [8, 9].

Принимая площади проекции элемента грунта объемом W на горизонтальную, вертикальную и перпендикулярную к равнодействующей P_B плоскости соответственно равными $F_x = F_y = F$ [8], и подставляя значение v_{max} по (10), получаем:

$$P_2 = \frac{a_0 F \gamma_a v_{max}^2}{2g} = \frac{0,5 a_0 F \gamma_a \pi h_b^2 n^2}{\lambda s h \left(\frac{4\pi H}{\lambda} \right)}. \quad (11)$$

Величину сдвигающей силы определим по выражению

$$N_{сд} = \sqrt{\gamma_0^2 W^2 \sin^2 \alpha + \frac{0,25 (a_0 F \gamma_a \pi)^2 (h_b n)^4 \cos^2 \Theta}{\lambda^2 s h^2 \left(\frac{4\pi H}{\lambda} \right)}}. \quad (12)$$

Удерживающая сила ($N_{уд}$) определяется суммой сил трения и сцепления грунта в воде. Учитывая, что вдольбереговая составляющая движения материала переработки в виде наносов может возникать только лишь при наличии береговой отмели достаточной ширины, а также косопадающего ветрового волнения к урезу воды под углом θ (см. рис. 9), в зависимости $N_{сд}$ и $N_{уд}$ была введена поправка, учитывающая угол подхода волны к берегу:

$$N_{уд} = \gamma_0 W f \cos \alpha \cos \Theta, \quad (13)$$

где f – коэффициент внутреннего трения для несвязных грунтов [8]. Уравнение равновесия мо-

жет быть записано как $N_{уд} = N_{сд}$. Отношение величин $N_{сд}$ и $N_{уд}$ является критерием устойчивости продольного профиля равновесия.

$$\gamma_0 W f \cos \alpha \cos \Theta = \sqrt{\gamma_0^2 W^2 \sin^2 \alpha + \frac{0,25(a_0 F \gamma_b \pi)^2 (h_b n)^4 \cos^2 \Theta}{\lambda^2 s h^2 \left(\frac{4\pi H}{\lambda}\right)}}. \quad (14)$$

Разделив (14) на $F \sin \alpha \cos \Theta$, приняв

$$(1 + m^2) = \frac{1}{\sin^2 \alpha} \text{ и обозначив}$$

$$\frac{\gamma_0 d}{\cos \Theta} = \xi_1, \text{ и } \frac{a_0 \gamma_b \pi (h_b n)^2 \sqrt{1 + m^2}}{\lambda s h \frac{4\pi H}{\lambda}} = \xi_2,$$

получаем критерий устойчивости P_y :

$$P_y = \frac{\gamma_0 d f m}{\sqrt{\xi_1^2 + 0,25 \xi_2^2}}. \quad (15)$$

При значении $P_y \geq 1$ профиль берега и береговая линия соответствуют равновесной форме профиля динамического равновесия, при которой протяженность берегов, подверженных абразии, равна протяженности аккумулятивных береговых склонов; в противном случае берег находится в стадии интенсивной переработки [3, 8].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения комплексных натурных и теоретических исследований по развитию абразионных процессов на водохранилищах Беларуси решены следующие задачи:

- научно обоснованы и разработаны показатели абразионного риска по основным факторам, определяющим процесс абразии, которые рекомендуется учитывать при районировании территории страны по абразионному риску;

- уточнена и детализирована карта районирования территории Беларуси по развитию абразионного риска и переработки берегов;

- предложен критерий устойчивости поперечного и продольного профилей берега водохранилища, подверженного волновой переработке, который позволяет учитывать комплекс нагрузок, действующих на отдельные частицы и элементы несвязного грунта на поверхности отмели (откоса), необходимые для расчета формы профиля динамического равновесия и масштабов переработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Касперов Г.И., Левкевич В.Е., Пастухов С.М., Кукушкинов М.С. Методические рекомендации по оценке рисков на искусственных водных объектах Республики Беларусь. Минск: Право и экономика, 2007. 63 с.
2. Кобяк В.В. Прогноз абразионных процессов на водохранилищах с трансформированным урновым режимом: автореф. ... дис. канд. техн. н. Минск: Белорус. нац. техн. ун-т, 2013. 22 с.
3. Левкевич В.Е. Гидро-морфодинамика прибрежной зоны водохранилищ ГЭС Беларуси. Минск: Право и экономика, 2018. 149 с.
4. Левкевич В.Е. Динамическая устойчивость берегов водохранилищ Беларуси. Минск: Право и экономика, 2015. 307 с.
5. Левкевич В.Е. Динамика берегов русловых, наливных и озерных водохранилищ Беларуси. Минск: Право и экономика, 2015. 202 с.
6. Лонгинов В.В. Динамика береговой зоны бесприливных морей. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 379 с.
7. Максимчук В.Л. Рациональное использование и охрана берегов водохранилищ. Киев: Будівельник, 1981. 112 с.
8. Михневич Э.И., Левкевич В.Е. Устойчивость берегов водохранилищ при формировании профиля динамического равновесия в несвязных грунтах // Мелиорация. 2016. № 4 (78). С. 18–23.
9. Михневич Э.И. Новые типы креплений мелиоративных каналов. Минск: Ураджай, 1978. 128 с.
10. Пышкин Б.А. Динамика берегов водохранилищ. Киев: Наукова думка, 1973. 416 с.
11. Широков В.М., Лопух П. С., Левкевич В.Е. Формирование берегов малых водохранилищ лесной зоны. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 160 с.
12. Шайтан В.С. Проектирование креплений земляных откосов на водохранилищах. М.: Госстройиздат, 1962. 215 с.

REFERENCES

1. Kasperov, G.I., Levkevich, V.E., Pastukhov, S.M., Kukushinov, M.S. *Metodicheskie rekomendatsii po otsenke riskov na isskustvennykh vodnykh ob'ektakh Respubliki Belarus* [Methodical guidelines for risk assessment in artificial water bodies of the Belarus Republic]. Minsk, Pravo i ekonomika, 2007, 63 p. (in Russian)
2. Kobayak, V.V. *Prognoz abraziionnykh protsessov na vodokhranilishchakh s transformirovannym urovennym regimom* [Prediction of abrasion processes in reservoirs with transformed level regime]. Extended abstract of Cand. Sci. (Techn.) Dissertation. Minsk, Belorussk. nats. tekhn. univ., 2013, 22 p. (in Russian)

3. Levkevich, V.E. *Gidromorfodinamika pribrezhnoi zony vodokhranilishch GES Belarusi* [Coastal zone hydromorphodynamics at the reservoirs of Belarus HPPs]. Minsk, Pravo i ekonomika, 2018, 149 p. (in Russian)
4. Levkevich, V.E. *Dinamicheskaya ustoichivost' beregov i vodokhranilishch Belarusi* [Dynamic stability of water reservoir shores in Belarus], Minsk, Pravo i ekonomika, 2015, 307 p. (in Russian)
5. Levkevich, V.E. *Dinamika beregov ruslovykh, nalivnykh i ozernykh vodokhranilishch Belarusi* [Dynamics of the coasts of the river, bulk and lake reservoirs of Belarus] Minsk, Pravo i ekonomika, 2015, 202 p. (in Russian)
6. Longinov, V.V. *Dinamika beregovoï zony besprilivnykh morei* [Dynamics of the coastal zone of no-tidal seas]. Moscow, Izd. AN SSSR, 1963, 379 p. (in Russian)
7. Maksimchuk, V.L. *Ratsional'noe ispol'zovanie i okhrana beregov vodokhranilishch* [Rational use and protection of reservoir banks]. Kiev, Budivel'nik, 1981, 112 p. (in Russian)
8. Mikhnevich, E.I., Levkevich V.E. *Ustoichivost' beregov vodokhranilishch pri formirovanii profilya dinamicheskogo ravnovesiya v nesvyaznykh gruntakh* [Stability of reservoir banks during the formation of dynamic equilibrium profile in incoherent soils]. *Melioratsiya*, 2016, no. 4 (78), pp. 18–23. (in Russian)
9. Mikhnevich, E.I. *Novye tipy kreplenii meliorativnykh kanalov* [New types of strengthening amelioration channels]. Minsk, Uradzhai, 1978, 128 p. (in Russian)
10. Pyshkin, B.A. *Dinamika beregov vodokhranilishch* [Dynamics of water reservoir banks]. Kiev, Naukova dumka, 1973, 416 p. (in Russian)
11. Shirokov, V.M., Lopukh P.S., Levkevich, V.E. *Formirovanie beregov malykh vodokhranilishch lesnoi zony* [Formation of shores at small water reservoirs in the forest zone]. St. Petersburg, Gidrometeoizdat, 1992, 160 p. (in Russian)
12. Shaitan, V.S. *Proektirovanie kreplenii zemlyanykh otkosov na vodokhranilishchakh* [Design of anchorage of earthen reservoir slopes]. Moscow, Gosstroizdat, 1962, 215 p. (in Russian)

RESULTS OF ENGINEERING GEOLOGICAL ZONING OF BELARUS TERRITORY BY THE ABRASION RISK AT WATER RESERVOIRS IN THE CONTEXT OF GLOBAL CLIMATE CHANGE

© 2019 V. E. Levkevich

*Belarus National Technological University,
pr. Nezavisimosti, 65, korp. 1, Minsk, 220013 Republic of Belarus
E-mail: eco2014@tut.by*

The paper shows the reasons for the intensification of risk-forming processes in Belarus caused by "aging" of existing and the arrangement of new water reservoirs. The shores of new reservoirs located in the territory of Belarus, intensively used in the national economy and densely populated, are actively reprocessed by abrasion, leading to the development of abrasion risk. The length of the abrasion coasts has increased by more than 20 km recently, which undoubtedly has an impact on the surrounding areas, causing loss of land and economic facilities. The goal of the work is to update the regional zoning of the country's territory according to abrasive risk, which should be taken into account in the forecast calculations of the sustainable development of regions based on entirely new principles and assumptions.

In this work, we used the data of long-term (covering more than 40-year-long period) field observations of the author over the abrasion process and the results of a science-based analysis. We propose (using the failure tree) an abrasion risk development model and indicators characterizing the abrasion risk, taking into account the global climate change and related warming, affecting the dynamics and extent of the process of destruction and deformation of the coast. Based on a theoretical study of the mechanism for forming the dynamic equilibrium profile of abrasion coasts and the equilibrium coastline, a criterion is suggested that characterizes the stability and development of the equilibrium profile of the coastal slope required for zoning the Belarus territory by abrasion risk.

Based on the generalization of the observation results for Belarus water reservoirs and the use of the proposed indicators, we performed zoning of the country's territory by the abrasion risk, which is of practical importance for making management decisions and designating engineering measures to prevent and mitigate risk in water bodies, as well as minimizing their effects.

Keywords: *Water reservoir, abrasion, abrasion risk, processing, coast, zoning, stability indicator, dynamic equilibrium profile.*

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019418-29>