

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 519.216.3:551.435.31:627.8

ЛЕВКЕВИЧ
Виктор Евгеньевич

ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ БЕРЕГОВ
ВОДОХРАНИЛИЩ БЕЛАРУСИ

Автореферат диссертации

на соискание ученой степени доктора технических наук
по специальности
05.23.07 – гидротехническое и мелиоративное строительство

Минск 2017

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

Научный консультант – **Михневич Эдуард Иванович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Водоснабжение и водоотведение» Белорусского национального технического университета

Официальные оппоненты: **Куранов Николай Петрович**, лауреат Государственной премии России, доктор технических наук, профессор, Председатель совета директоров АО «ДАР/ВОДГЕО», (г. Москва, Россия);

Кондратьев Виктор Николаевич, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, РУП «Институт мелиорации»;

Власов Борис Павлович, доктор географических наук, профессор, заведующий научно-исследовательской лабораторией озераведения Белорусского государственного университета

Оппонирующая организация Учреждение образования «Брестский государственный технический университет»

Защита состоится «27» октября 2017 г. в 14.00 часов на заседании Совета по защите диссертаций Д 02.05.10 Белорусского национального технического университета по адресу: 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65, корп. 1, ауд. 202, тел. ученого секретаря (017) 265-97-29.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «26» сентября 2017 года.

Ученый секретарь
Совета по защите диссертаций
кандидат технических наук, доцент



Л.В. Нестеров

ВВЕДЕНИЕ

Водохранилища представляют собой сложные природно-технические комплексы. Создаваемые на базе рек, озер в различных целях, водохранилища могут оказывать отрицательное воздействие на окружающую природную среду. Наиболее опасное явление это абразия – переработка естественных берегов и незакрепленных верховых грунтовых откосов дамб и плотин. В результате переработки происходит изъятие сельскохозяйственных земель и лесных угодий из оборота, разрушаются селитебные территории, нарушаются условия жизнедеятельности населения, что приносит значительный ущерб народному хозяйству. Основой безопасной жизнедеятельности населения, проживающего вблизи водохранилищ, является достоверный прогноз абразионных процессов и определение современных эффективных с точки зрения берегозащиты и экономики инженерных мероприятий по берегоукреплению. Существующие методы прогноза не всегда позволяют оценить реальные масштабы разрушения берегов, так как не учитывают особенности динамики, интенсивности и механизма процесса берегоформирования водохранилищ Беларуси.

Актуальность темы исследования обоснована активной реконструкцией, модернизацией и строительством гидроузлов и водохранилищ различного назначения, предназначенных для целей энергетики, мелиорации, регулирования стока и других хозяйственных нужд. В Беларуси эксплуатируется более 150 водохранилищ (водоемов, имеющих полный объем более 1,0 млн.м³), протяженность берегов которых более 1500 км. Строятся каскады водохранилищ на р. Неман: Гродненская и Немновская ГЭС, р. Западная Двина (Витебская, Бешенковичская и Полоцкая ГЭС) и др. Только на водохранилище Витебской ГЭС по предварительному прогнозу протяженность берегов, подверженных переработке, составит около 18 км, а на водохранилище Гродненской ГЭС – около 10 км. В связи с этой важной водохозяйственной для Беларуси проблемой возникла необходимость обобщения накопленного фактического материала и результатов научных исследований. В отличие от других регионов – Европейской части России, Польши, Прибалтики, Украины, Чехии – подобных работ для условий Беларуси до настоящего времени не проводилось.

Многолетние натурные, лабораторные и теоретические исследования позволили изучить механизм формирования профиля динамического равновесия, разработать основные положения теории, модель развития и критерии динамической устойчивости берегов водохранилищ Беларуси. Прикладной задачей явилась разработка методов прогноза, алгоритмов и методики торможения и стабилизации процесса переработки берегов на основе использования берегозащитного эффекта, возникающего в результате образования на поверхности береговой отмели берегозащитной естественной самоотмостки, предложений по созданию системы мониторинга берегов, расчету рисков и ущербов от абразии.

Основой исследования послужили материалы собственных многолетних натуральных наблюдений и лабораторных экспериментов, а также фондовые материалы организаций страны: Белорусского национального технического университета, Белорусского государственного университета, Центрального НИИ комплексного использования водных ресурсов (РУП ЦНИИКИВР), РУП «Институт мелиорации», РУП «Белгипроводхоз» и др.

Автор считает своим долгом выразить благодарность всем коллегам, помогавшим осуществлять натурные, лабораторные и теоретические исследования, прежде всего к.т.н., доценту Г.И. Касперову, к. физ.-мат.н. В.А. Мильману, А.Н.Крючкову, к.т.н., доценту А.А. Новикову, к.э.н., доценту З.Г. Патеевой, а также к.т.н., доценту С.М. Пастухову, к.т.н. В.В. Кобяку, к.г.н. М.П. Кукшинову, А.В.Бузуку, Д.С. Микановичу, В.А. Малашевичу.

Диссертант выражает свою глубокую признательность и благодарность научному консультанту – д.т.н., профессору Э.И. Михневичу, замечания и советы которого способствовали улучшению диссертации.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами. Исследования по диссертации выполнялись в рамках: заданий РНТП 75.02 р «Охрана природы»(1991–1995 гг.):

– «Разработка геоэкологических основ создания, повышения эффективности использования и охраны озерных водохранилищ Беларуси» (номер государственной регистрации № 01220019648);

– «Провести комплексное изучение природных ресурсов водоемов бассейна р. Днепр и их рациональное использование (в пределах БССР)» (номер государственной регистрации № 01860024313),

а также заданий ГПНИ:

– «Разработка и обоснование системы мер для снижения рисков и смягчения последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Республике Беларусь («Снижение рисков чрезвычайных ситуаций») на 2006–2010 годы»;

– «Разработка методики комплексной оценки и прогнозирования абразионного риска и ущербов на искусственных водных объектах» (номер государственной регистрации №20065143);

– «Разработка методов и программных средств оценки экономического и социального ущербов от потенциальных и случившихся ЧС природного и техногенного характера» (номер государственной регистрации № 20065526);

– «Разработка методики и алгоритма оценки вероятности возникновения гидродинамических аварий на водохранилищах проектируемых и реконструируемых гидроэлектростанций Республики Беларусь» (номер государственной регистрации № 20091269).

В период 2011–2015 гг. исследования проводились в рамках ГПНИ «Информатика и космос, научное обеспечение безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций» на 2011–2015 годы по подпрограмме: «Научное обеспечение безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций» («Снижение рисков чрезвычайных ситуаций») по заданиям:

– «Разработка методики оценки ущербов от подтопления территорий в условиях чрезвычайных ситуаций природного характера на водных объектах Республики Беларусь различного типа» (номер государственной регистрации № 20121657);

– «Исследование устойчивости ограждающих гидротехнических сооружений шламохранилищ и прудов-накопителей мелиоративных и польдерных систем для предупреждения чрезвычайных ситуаций, оценки рисков и ущербов» (номер государственной регистрации № 20143749).

Научные разработки автора использованы в грантах Белорусского фонда фундаментальных исследований и Российского фонда фундаментальных исследований:

– № 04-227 от 03.05.2004 г. «Разработать концепцию управления экологическими рисками в Республике Беларусь» (номер государственной регистрации № 20042813) (2004–2006 гг.);

– № Г12 СО-050 от 01.04.2011 г. «Концепция устойчивого развития и природно-техногенной безопасности территорий Беларуси и Сибири, построенная на основе учета рисков и применения геоинформационных технологий» (номер государственной регистрации № 2012321) (2011–2014 гг.).

Цель и задачи исследований. *Цель работы* – разработка теоретических основ формирования профиля динамического равновесия и динамической устойчивости берегов водохранилищ Беларуси для обоснования новых методов прогнозирования абразионных процессов, способов берегозащиты, торможения и стабилизации процесса переработки.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

1. *Изучить* на основе натуральных стационарных наблюдений и экспедиционных обследований на водохранилищах страны динамику, масштабы и интенсивность переработки берегов и *обосновать* влияние комплекса факторов и условий (ветро - волнового, уровенного, ледового режимов и режима течений), а также условий эксплуатации водохранилищ различного типа – русловых, наливных и озерных на развитие процесса переработки.

2. На основе закона сохранения массы и особенностей формирования профиля равновесия *разработать основные положения* процесса формирования и *модели развития* динамически активных берегов, подверженных переработке, а также *методы прогноза деформаций берегов* и незащищенных верховых грунтовых откосов дамб и плотин на водохранилищах Республики Беларусь и внедрить их в практику проектирования.

3. *Разработать* критерии устойчивости профиля динамического равновесия разрушаемого берегового склона (откоса) подводной части береговой отмели.

4. *Оценить* на основании натуральных обследований водохранилищ состояние существующих берегозащитных сооружений различных типов и выявить причины, вызывающие их деформации и разрушения.

5. *Исследовать* влияние гранулометрической неоднородности грунтов на процесс переработки берегов и формирование профиля динамического равновесия, а также *разработать* механизм торможения и алгоритм *стабилизации* разрушаемых береговых склонов путем создания искусственной самоотмостки, как способа берегозащиты и внедрить его в производство.

6. *Обосновать* создание системы мониторинга и кадастра берегов с разработкой алгоритмов и информационно-программного обеспечения.

7. *Разработать методiku* оценки абразионного риска и возможных ущербов от переработки берегов с построением карт территории страны по развитию процесса абразии.

Объектом исследования являются берега водохранилищ Республики Беларусь, а **предметом исследования** – динамическая устойчивость береговых склонов водохранилищ, методы прогноза деформаций и способ берегозащиты, основанный на явлении «самоотмостки».

Положения, выносимые на защиту:

1. *Теоретические положения развития процесса переработки берегов и откосов подпорных гидротехнических сооружений*, позволяющие более обоснованно назначать берегозащитные мероприятия как на проектируемых, так и на существующих водохранилищах.

2. *Критерии динамически устойчивого профиля берега*, сложенного несвязными грунтами, позволяющие оценивать степень разрушения берегов и прогнозировать форму профиля равновесия, а также математические модели развития береговой линии.

3. *Методы прогнозирования процесса переработки естественных берегов*, а также незакрепленных верховых откосов дамб и плотин, учитывающие особенности гидрологического режима и режима эксплуатации водохранилищ Беларуси, основанные на использовании статистических моделей и гидродинамических аналогий.

4. *Оценка современного состояния креплений и берегов*, научное обоснование использования способности неоднородных несвязных грунтов к самоукреплению путем образования «самоотмостки» из крупных фракций, а также *методiku расчета* устойчивого профиля равновесия с «самоотмосткой», что обеспечит удешевление берегоукрепительных работ на водохранилищах.

5. *Методика и алгоритмы торможения и стабилизации* процесса переработки берегов в условиях проектируемых и эксплуатируемых водохранилищ.

6. *Алгоритмы и программно-методическое обеспечение* по ведению кадастра берегов, а также научное обоснование системы мониторинга берегозащитных сооружений на водных объектах, что позволит разработать карты территории Беларуси по развитию процесса переработки (абразии) склонов, дающие возможность определять масштабы деформаций берегов на проектируемых объектах.

7. *Методика расчета рисков и ущербов от развития переработки берегов на водохранилищах* для оценки последствий и объемов разрушений от абразии берегов и верховых откосов подпорных сооружений и назначении способов их крепления.

Личный вклад соискателя. Цель и задачи исследований сформулированы совместно с научным консультантом, доктором технических наук, профессором Э.И. Михневичем. Также совместно с научным консультантом впервые разработаны оригинальные критерии устойчивости профиля динамического равновесия, сложенного несвязными грунтами. Совместно с кандидатами технических наук, доцентами Г.И. Касперовым, С.М. Пастуховым, В.В. Кобяком, кандидатом физико-математических наук В.А. Мильманом, аспирантами

А.В.Бузуком и Д.С. Микановичем проведены исследования процесса переработки береговых склонов водохранилищ и незакрепленных верховых откосов дамб и плотин, а также оценка состояния сооружений берегозащиты и креплений откосов, лабораторные и натурные исследования течений в естественных и лабораторных условиях. Совместно с кандидатом технических наук, доцентом А.А. Новиковым и аспирантом А.В. Бузуком выполнена разработка математической модели распределения скоростей стоковых течений в русловых водохранилищах и на примере тестового объекта проведено численное моделирование и оценка их влияния на устойчивость берегов. Совместно с аспирантом А. В. Бузуком разработана база данных берегозащитных сооружений на водохранилищах страны и выполнены лабораторные исследования креплений откосов и берегов. Самостоятельно обобщены, обработаны и проанализированы результаты натуральных наблюдений и лабораторных исследований; проведены лабораторные исследования деформации береговых склонов, сложенных различными по однородности несвязными грунтами и развитию «самоотмостки» при воздействии различных сочетаний высот волн и уровней. Автором на основе установленных закономерностей самостоятельно разработаны положения теории формирования берегов небольших водохранилищ, математические модели равновесной береговой линии и профиля динамически равновесия; предложен коэффициент развития берегов в плане; методы прогноза переработки естественных берегов и деформаций откосов дамб и плотин, а также методики и алгоритмы торможения и стабилизации процесса переработки проектируемых и находящихся в эксплуатации водохранилищ с учетом механизма образования берегозащитной отмостки. Автором разработан новый тип берегозащиты, основанный на эффекте самоукрепления и образования «самоотмостки» а также. структура организации системы мониторинга и кадастра берегов и алгоритмы их информационно-программного обеспечения. Впервые предложена методика оценки абразионного риска и определена структура ущербов народному хозяйству от процесса разрушения берегов, составлены карты территории страны по развитию переработки берегов и абразионному риску, разработаны практические рекомендации по берегоукреплению.

Апробация результатов диссертации. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на: III Всесоюзной конференции «Динамика и термика рек, водохранилищ и окраинных морей» – ИВП РАН, Москва, Россия, 1989 г.; III Международной научно-практической конференции «Допустимый уровень риска в строительстве» – Госстрой России – ПНИИИС, РАН, Москва, Россия, 1997 г.; III Международной конференции «Новые идеи в науках о Земле» – МГУ им М.В. Ломоносова, Москва, Россия, 1997 г.; Международной научной конференции «Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды» – БГУ, Минск, Беларусь, 1999 г.; Общероссийской конференции «Оценка и управление природными рисками (РИСК-2000)» – ИГЕ РАН – МЧС России, Москва, Россия, 2000 г.; XX Международной конференции «Человечество и береговая зона мирового океана в 21 веке» – Институт океанологии им П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия, 2000 г.; Первом Белорусском космическом конгрессе – ОИПИ НАН Беларуси, Минск, Беларусь, 2003 г.; III Международном

экологическом симпозиуме «Региональные проблемы экологии: пути решения» – Полоцкий ГУ, Полоцк, Беларусь, 2003 г.; Первой международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» – Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Санкт-Петербург, Россия, 2005 г.; 5-й Международной конференции «Обработка информации и управление в чрезвычайных и экстремальных ситуациях» – ОИПИ НАН Беларуси, Минск, Беларусь, 2006 г.; 7-м Международном конгрессе ЭКВАТЭК-2006 – Москва, Россия, 2006 г.; Третьем Белорусском космическом конгрессе – ОИПИ НАН Беларуси, Минск, Беларусь, 2007 г.; Международной конференции «Управление водно-ресурсными системами в экстремальных условиях» в рамках Международного конгресса ЭКВАТЭК-2008 – Москва, Россия, 2008 г.; IV международной научно-практической конференции «Природная среда Полесья: особенности и перспективы развития» – Брест, Беларусь, 2008 г.; 7-й Международной конференции «Проблемы снижения природных опасностей и рисков» (ГЕОРИСК-2009) – Научный совет РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии, ИГЭ РАН, ВНИИ ГО ЧС, Москва, Россия, 2009 г.; IV Международном водном форуме «Стратегические проблемы охраны и использования водных ресурсов» – ЦНИИКИВР, Минск, Беларусь, 2010 г.; Международной научной конференции «Научные и прикладные аспекты оценки изменений климата и использование климатических ресурсов» – БГУ, Минск, Беларусь, 2011 г.; III, IV, VI Международных научно-практических конференциях «Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация» – КИИ МЧС Республики Беларусь, Минск, Беларусь, 2007 г., 2009 г., 2011 г.; IV Международной научной конференции «Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды» – БГУ, Минск – Нарочь, Беларусь, 2011 г.; Международной научной конференции «Комплексное использование водных ресурсов» – ЦНИИКИВР, Минск, Беларусь, 2011 г.; Международной научной конференции «Природные риски: анализ, оценка, картография» – МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия, 2013 г.; V Международной научной конференции «Современные проблемы ландшафтоведения и геоэкологии» – БГУ, Минск, Беларусь, 2014 г.; Международной научно-практической конференции «Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания» – БрГТУ, Брест, Беларусь, 2014 г.; Международной научно-практической конференции «Экология и защита окружающей среды» – БГУ, Минск, Беларусь, 2014 г.; 3-й Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы экономики строительства и городского хозяйства» – БНТУ, Минск, Беларусь, 2014 г.; 9-й Международной конференции «Проблемы снижения природных опасностей и рисков» (ГЕОРИСК-2015) в рамках Международного конгресса – ИГЭ РАН, ВНИИ ГО ЧС, Москва, Россия, 2015 г.; V Международной научно-практической конференции «Современные проблемы водохранилищ и их водосборов» – ПГНИУ – Пермь, Россия, 2015 г.; XXX Пленарном совещании Межвузовского научно-координационного Совета по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов – МГУ, Москва – Набережные Челны, Россия, 2015 г.; Международной научно-практической конференции «Актуальные научно-

технические и экологические проблемы сохранения среды обитания» – БрГТУ, Брест, Беларусь, 2016 г.; Международной конференции «Проблемы рационального использования природных ресурсов и устойчивое развитие Полесья» – ИПИПРЭ НАН Беларуси, Минск, Беларусь, 2016 г.

Опубликованность результатов диссертации. Основные положения диссертации опубликованы в 112 печатных работах, в том числе: 8 монографиях (51,9 авторских листа), 56 статьях (40 в рецензируемых журналах, включенных в Перечень ВАК Беларуси, общим объемом 18 авторских листов), а также 30 в сборниках научных трудов международных конференций и семинаров, 6 тезисах докладов на конференциях, 1 патенте и 11 учебно-методических документах и препринтах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, 7 глав, заключения и приложений. Полный объем диссертации составляет 333 страницы. Работа содержит 157 страниц машинописного текста, 128 рисунков на 57 страницах, 66 таблиц на 26 страницах, библиографического списка в количестве 437 наименований, включая собственные публикации (112 авторских работ) и 10 приложений (А – К) со вспомогательным фактическим материалом и документами.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приведена оценка современного состояния водохранилищ с выявлением их особенностей, а также аналитический обзор литературы и сравнительный анализ результатов изучения динамики береговых процессов на водохранилищах мира, стран СНГ и Беларуси.

Термин «*переработка берегов*» впервые был введен Ф.П. Саваренским в 1935 г. В публикациях Е.Г. Качугина, Н.Е. Кондратьева, С.Л. Вендрова, Г.С. Золотарева, Е.С. Цайтца, Е.К. Гречищева, Н.А. Лабзовского, Л.Б. Розовского, Б.А.Пышкина, В.Л. Максимчука, И.А. Печеркина, В.М. Широкова, Д.П. Финарова, Л.Б. Иконникова, В.К. Епишина, В.Н. Экзарьяна, А.Л. Рогозина, Д.М. Белова, С.А. Двинских, А.Ш. Хабидова и многих других авторов рассмотрен процесс переработки берегов крупных водохранилищ. Проблемы переработки берегов малых водохранилищ, в частности водных объектов Беларуси, отражены в работах: Е.М. Левкевича, Г.М. Базыленко, Ф.В. Саплюкова, В.Н. Юхновеца, Е.С. Ленартович, В.М. Широкова, П.С. Лопуха, И.И. Кирвеля, А.М. Пастухова, В.В. Кобяка, В.Е. Левкевича. Имеются сведения о формировании берегов небольших водохранилищ за рубежом: России (В.М. Сунндуков, Н.С. Кремез, М.Я. Прыткова,), Литве (Ф.А. Норкус, П.А. Милюс), Латвии (Г.Э. Розенталс, Г.Я. Сегаль), Венгрии (Nad Imre); Чехии (O. Horsky, J. Linhart, M. Kostecki, M. Lukas, D. Abaffi, T. Spanila); Польше (Z. Dziewonsky, Z. Pluta, E.Rydzik); Германии (H. Wagner, E. Niemann); США (E.J. Carlson, W.W. Sayre); Швейцарии (J. Bruschin, M. DysLi).

По проявлению процесса переработки берегов автором выделены три группы водохранилищ. *Первая группа*: русловые водохранилища (Осиповичское, Чигиринское, Чижовское, Витебской и Гродненской ГЭС и др.). *Вторая группа*:

озерного типа (Езерищенское, Хоробровка, Лепельское). Третья группа представляют водохранилища наливного типа (Судково, Красная слобода). Установлено, что на русловых водохранилищах переработка берегов составляет 25–40% длины береговой линии и наблюдается в приплотинной части водоема. На водохранилищах озерного и наливного типа переработке подвержено до 70% берегов и верховых грунтовых откосов дамб и плотин (рисунок 1).



а) Вилейское водохранилище



б) Краснослободское водохранилище

Рисунок 1. – Переработка берегов и откосов на водохранилищах Беларуси (2015 г.)

Профиль переработки водохранилищ Беларуси имеет ряд отличий от крупных водохранилищ: верхний предел размыва лежит близко к урезу, ширина надводной части отмели незначительна (не более 1,5 м); форма отмели прямолинейного контура и является *профилем динамического равновесия* у которого *частицы грунта на поверхности отмели хоть и совершают колебательные движения относительно условного среднего положения, однако суммарный объем перемещающихся наносов остается равным нулю.*

Во второй главе приведена оценка влияния берегоформирующих факторов и условий на переработку (рисунок 2), а также результаты натурных исследований деформаций берегов и грунтовых откосов, полученных автором.



Рисунок 2. – Классификация берегоформирующих факторов и условий

В условиях Беларуси наиболее распространены несвязные, песчаные грунты с содержанием крупнофракционного материала в виде гравийно-галечниковых и валунных включений. Среди показателей, характеризующих *механический состав грунтов* (Э.И. Михневич, А.А. Печеркин, Ю.А. Соблевский, 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 η для однородных, а также D_{50} и η_0 для неоднородных грунтов.

Гидрологические и морфометрические характеристики водохранилища определяют динамику процесса переработки берегов наряду со структурой грунтов. Результаты стационарных наблюдений за ветровым волнением, полученные на Заславском водохранилище, показали, что рост высот волн и затухание ветрового волнения происходит в течение 20–30 мин. Для водоемов Беларуси является характерным высокая 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 $\Delta H_{\text{бл}}$ все водохранилища Беларуси автором были сгруппированы: 1-я группа $\Delta H_{\text{бл}} > 0,5$ м, 2-я характеризуется $\Delta H_{\text{бл}} \leq 0,5$ м. Кроме уровня режима изучались и оценивались 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. На основе метода экспертных оценок и корреляционного анализа автором определена значимость отдельных факторов, определяющих процесс деформации склона, характеризуемой величиной линейной переработки берега S_t , (м), что позволило выделить доминирующие условия:

- для исходного берега пологой формы

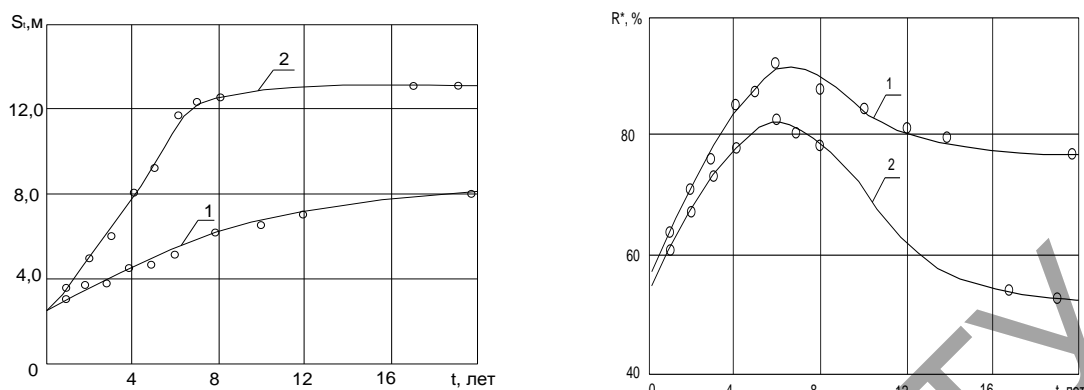
$$S_t = f(L_p, h_L, h_{1\%}, \Delta H_{\text{бл}}, i_b, \eta), \quad (1)$$

- для профиля берега обрывистой формы

$$S_t = f(L_p, h_L, h_{1\%}, \Delta H_{\text{бл}}, H_b, d_{50}), \quad (2)$$

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

На различных стадиях развития переработки происходит изменение значимости отдельных факторов, что подтверждается изменением коэффициента множественной детерминации R^* во времени (рисунок 3). На I и II стадиях преобладают гидродинамические факторы – волновой, уровеньный режимы, на III стадии при наличии *профиля динамического равновесия* преобладают неволновые факторы: стоковые и вдольбереговые течения, ледовые явления, подпор грунтовых вод и пр..



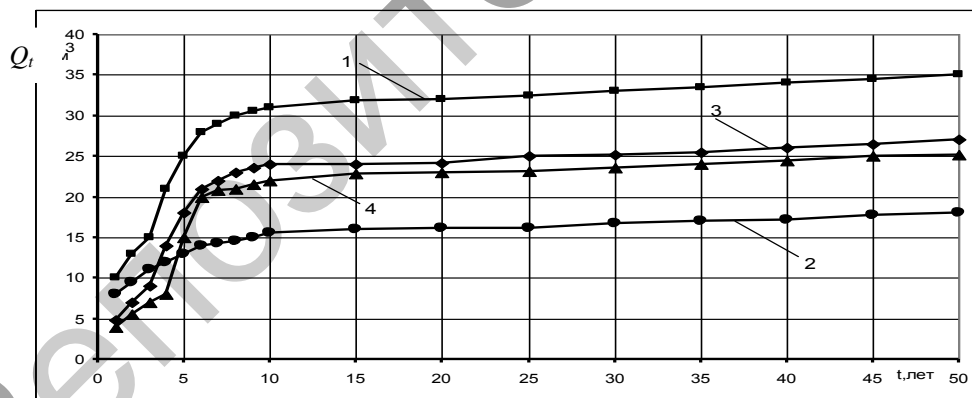
1 – водохранилища 1-й группы; 2 – водохранилища 2-й группы

Рисунок 3. – Графики вида $S_t = f(t)$ и $R^* = f(t)$

Выполненное автором обобщение и анализ результатов собственных наблюдений за динамикой берегов водохранилищ, более чем по 100 водохранилищам страны позволили установить:

$$S_{ti} = f(t)^{-b}, \quad (3)$$

где S_{ti} – линейная переработка берега по i -му створу, м; t – время, лет; b – показатель степени, зависящий от типа грунта, высоты и формы склона ($b = 0,025-0,334$). Динамика переработки берегов Осиповичского водохранилища, характеризуемая величиной объема переработки Q_t (м³), показана на рисунке 4.



1 – створ №1; 2 – створ №3; 3 – створ №5; 4 – створ №7

Рисунок 4. – График зависимости $Q_t = f(t)$. Осиповичское водохранилище

На рисунке 5 приведен типичный профиль переработки абразионного берега, одного из опорных тестовых водохранилищ.

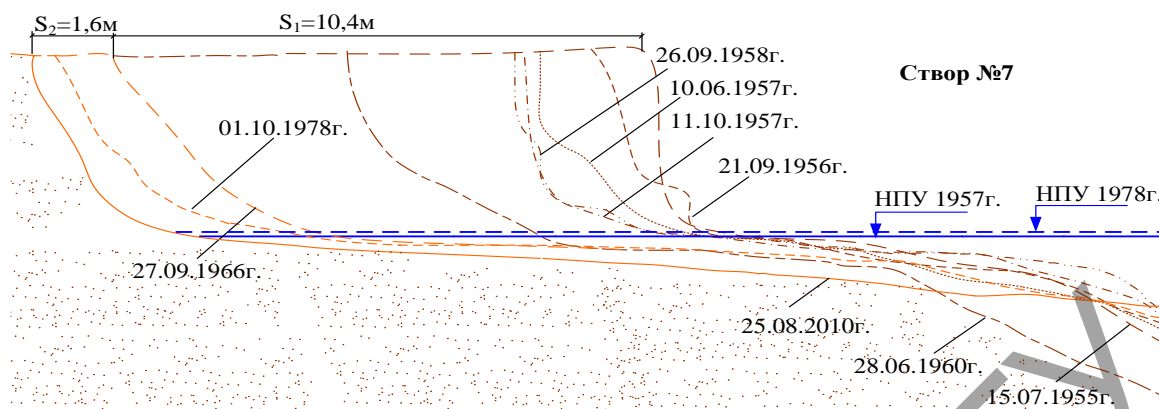


Рисунок 5. – Осиповичское водохранилище. Створ №7

Считая, что процесс переработки является стохастическим, автором выделены неслучайные \bar{S} и случайные S^*_t , составляющие линейной переработки берега. Неслучайной составляющей или «трендом» \bar{S} является средневзвешенное значение величины S_t по j – му участку переработки берега: $\bar{S} = S_{t_j} / n$, где n – количество створов на участке:

$$S_t = \bar{S} + S^*_t. \quad (4)$$

Случайная составляющая (флюктуация) определяется как отклонение от \bar{S} и по наблюдениям для водохранилищ страны составляет от 5 до 10%.

В третьей главе рассматриваются теоретические аспекты формирования профиля равновесия абразионных берегов. Ранее теоретическими исследованиями развития морских берегов занимались В.П. Зенкович, В.В. Лонгинов, И.О. Леонтьев, Г.А. Сафьянов, В.В. Пешков, Н.В. Пыхов и ряд других исследователей. Береговые процессы, протекающие в условиях крупных водохранилищ рассматривались в работах Н.Г. Варазашвили, С.Л. Вендрова, Е.К. Гречищева, Г.С. Золотарева, Л.Б. Иконникова, Е.Г. Качугина, К.Е. Крыжановской, В.Л. Максимчука, Д.Е. Финарова, А.Н. Печеркина, А.Ш. Хабидова, А.Б. Пышкина, Ю.Н. Сокольников, А.Л. Рагозина, Л.Б. Розовского, В.М. Широкова и др.. Однако единой теории развития берегов искусственных водных объектов так и не создано. Что касается небольших водохранилищ, вопросы теории формирования берегов практически не рассматривались.

Положив в основу развития берегов водохранилищ закон сохранения масс, а также разработанный механизм формирования профиля равновесия по материалам натуральных и лабораторных исследований, автором были сформулированы следующие *теоретические положения развития берегов водохранилищ*:

– **положение 1:** процесс переработки берегов и незакрепленных верхних грунтовых откосов дамб и плотин протекает под воздействием *берегоформирующих «активных»* гидрологических факторов (ветрового волнения, колебания уровней, внутриводоемных течений, ледового режима) и *«пассивных» условий* (морфометрии водохранилищ – линейных размеров, распределения глубин, формы

и высоты берега или откоса подпорного сооружения, а также механического состава размываемых грунтов) (рисунок 2);

– **положение 2:** береговой процесс обладает *инерционностью и изменчивостью*. Инерционность заключается в сохранении основных черт переработки в период продолжительного отрезка времени, изменчивость – в потере свойств инерционности из-за наличия естественных причин (изменения значимости отдельных факторов в процессе берегоформирования). Процесс переработки является стадийным и дискретным во времени, протекает с различной динамикой и масштабами, зависит от принадлежности водохранилища к той или иной группе водоемов (рисунок 3);

– **положение 3:** *стохастичная природа процесса переработки* предопреляет возможность расчета характеристик деформаций профиля (неслучайных и случайных отклонений от среднего) путем использования вероятностных методов (зависимость 4);

– **положение 4:** *береговой процесс на малых водохранилищах в отличие от крупных и морей, ограничен во времени* и имеет конечный срок окончания (стабилизации) переработки, который составляет от 10 до 20 лет для различных групп водохранилищ (рисунок 3), при этом условие равновесия, вида: $L_{ак} = L_{абр}$. (где $L_{ак}$, $L_{абр}$ - протяженности аккумулятивных и абразионных берегов, км) достигается синхронным развитием и затуханием абразии и формированием аккумулятивных берегов, что в итоге ведет к спрямлению и стабилизации береговой линии водоема в плане;

– **положение 5:** *формирование профиля переработки абразионного берега происходит синхронно в надводной и подводной частях склона*, в результате чего формируется *профиль равновесия*, который в отличие от условий крупных водохранилищ имеет ряд особенностей: а) малую надводную часть от 0,5 до 1,5 м; б) ограниченную по ширине подводную часть отмели, близкую к прямолинейной; в) малую аккумулятивную составляющую; г) неизменяемую постоянную глубину на внешнем краю береговой отмели $H_{вн}$;

– **положение 6:** *по окончании процесса переработки происходит формирование профиля равновесия*, соответствующего форме *профиля динамического равновесия*, который подчиняется закону сохранения массы. В зависимости от несвязных грунтов, образующих абразионный берег и береговую отмель, могут формироваться две формы профиля равновесия: а) для грунтов однородного состава с неоднородностью η от 2,0 до 4,5, б) для грунтов, имеющих включения гравия, гальки ($\eta > 4,5$) с образованием естественной «самоотмостки»;

– **положение 7:** использование природного *эффекта самоукрепления абразионного профиля* путем естественной волновой сортировки частиц несвязного грунта с повышенной неоднородностью и образования «самоотмостки», создают условия для торможения и стабилизации процесса формирования профиля равновесия в более короткие сроки. Учет естественной неоднородности грунтов, как фактора, необходимого для возникновения искусственной «самоотмостки», является альтернативным решением при берегозащите более эффективным и дешевым, чем традиционные способы берегоукрепления.

В основе представленных положений, рассматривающих берег как инженерно-геодинамическую систему, лежит задача обеспечения равновесия и устойчивого безаварийного функционирования водохранилищ и их прибрежной зоны. Для оценки степени приближения длины береговой линии водохранилищ к равновесной автором был предложен коэффициент развития береговой линии k_p , который равен отношению протяженности аккумулятивных берегов $L_{ак}$ к длине береговой линии водохранилищ, подверженной переработке $L_{абр}$, т.е.: $k_p = L_{ак} / L_{абр}$.

Текущее состояние береговой линии характеризуют: предложенный автором коэффициент развития k_p и коэффициент извилистости береговой линии $k_{из}$, равный отношению протяженности береговой линии (или ее отрезков) по кратчайшей прямой L_1 к реально существующей L_2 .

$$\left. \begin{aligned} L_{ак} / L_{абр} &= k_p \\ L_1 / L_2 &= k_{из}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

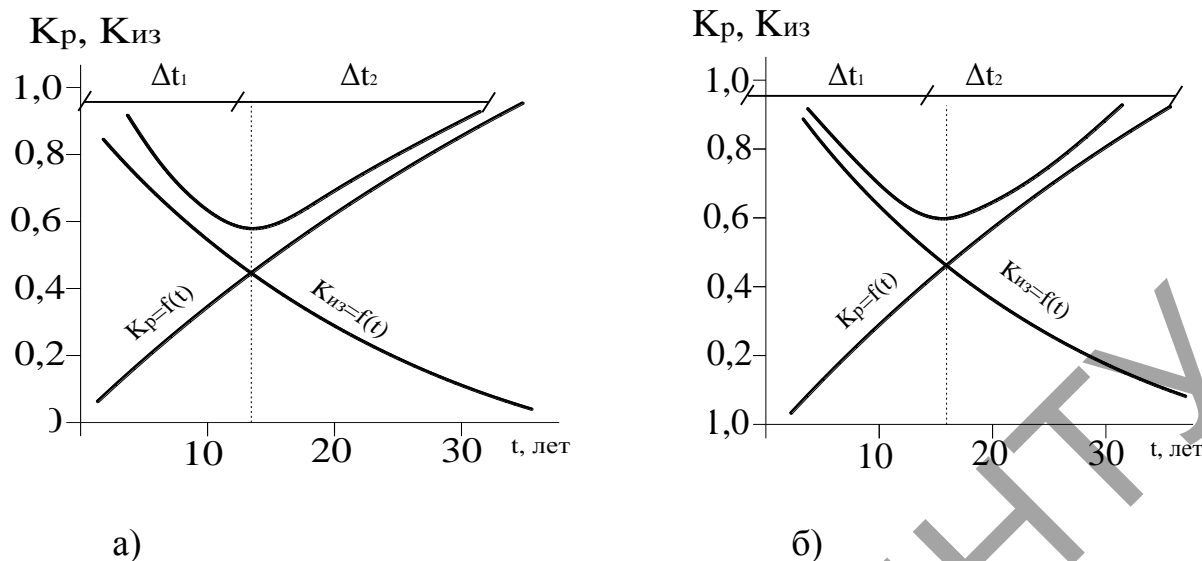
По величине коэффициента развития k_p можно судить о состоянии береговой линии. При $k_p \rightarrow 1$ береговая линия стремится к равновесной. В первые годы существования водохранилища преобладает абразионное выравнивание склонов. Затем начинает доминировать аккумулятивное выравнивание.

Установлено, что при увеличении k_p от начального значения $k_{рн}$, до $k_{рк}$, наблюдается изменение $k_{из}$, т. е. происходит переход от криволинейной формы береговой линии в плане к прямолинейной за счет уменьшения длины прогиба заливов и увеличения линейной переработки мысовидных участков берега. При этом должно соблюдаться соотношение (6), так как с увеличением периода эксплуатации водохранилища t происходит уменьшение $L_{абр}$ и увеличение $L_{ак}$. В идеальных условиях их рост должен наблюдаться синхронно.

$$\left. \begin{aligned} k_{рн} < k_{рк} \\ k_{изн} > k_{изк} \end{aligned} \right\} , \quad (6)$$

где $k_{рн}$, $k_{изн}$, $k_{рк}$, $k_{изк}$ – значения коэффициентов на начальный t_n и конечный t_k периоды соответственно.

Изменение коэффициентов $k_{из} = f(t)$ и $k_p = f(t)$ во времени показано на рисунке 6.. Участок графика $t_0 - t_1 = \Delta t_1$, находящийся левее точки пересечения кривых $k_{из} = f(t)$ и $k_p = f(t)$ характеризует стадию абразионного выравнивания, а правее $t_1 - t_2 = \Delta t_2$ – стадию аккумулятивного формирования. Асимметрия графика свидетельствует о доминировании первого или второго процесса во времени и зависит от режима поступления материала переработки в чашу водохранилища и питания потока наносов $\Delta Q_{абр}$ с учетом формы берегового склона. Для берега приглубой формы ($H/\lambda > 2$, где H – глубина у берега, м; λ – длина волны 1% -ной обеспеченности, м) характерна абразионная асимметрия (рисунок 6а), для отмелой – аккумулятивная (рисунок 6б).



а) - абразионная асимметрия; б) - аккумулятивная асимметрия
Рисунок 6. – Изменение во времени коэффициентов $k_{из} = f(t)$ и $k_{п} = f(t)$, характеризующих развитие береговой линии

Выделяется как *плановое равновесие всей береговой линии* водохранилищ, так и *профильное равновесие*. *Плановое равновесие* береговой линии определяется соотношением вида $L_{ак} = L_{абр}$. Тогда *балансовая модель* развития берега на стадии равновесия, соответствующей конечному периоду формирования t_k , имеет следующий вид

$$\int_{t_n}^{t_{kN}} \sum_{n=1} (Q_{абр,n}) dt = \int_{t_n}^{t_{kN}} [\sum_{n=1} (Q_{ак,n} \pm \Delta Q_{ак,n})] dt, \quad (7)$$

где $Q_{абр,n}$, $Q_{ак,n}$ – соответственно величины объемов материала переработки и аккумуляции, являющиеся функцией времени t для n -го контрольного створа на участке наблюдений, m^3 ; $\Delta Q_{ак}$ – невязка баланса за счет продольного переноса материала переработки по участку и поступлению эрозийного материала в береговую зону с прилегающих территорий, m^3 .

Уравнение (7) выполняется при соблюдении начальных и конечных условий (5) и (6). *Профильное равновесие* берега, подвергающегося переработке, характеризуется соотношением величин объема переработки Q_t или линейной переработки берега S_t с параметрами подводной части профиля – береговой отмели. При этом соотношение элементов профиля выражается зависимостью вида: $Q_t / S_t = f(B_{пт} / B_{нт})$, где $B_{пт}$, $B_{нт}$ – ширина подводной и надводной частей береговой отмели соответственно, м. Отношение S_b к $B_{пт}$ в условиях водохранилищ страны находится в пределах 0,80–0,96 и отличается от крупных европейских равнинных водохранилищ для которых оно составляет 0,48–0,77.

В общем случае процесс развития профиля равновесия определяется режимом движения материала переработки в виде вдольберегового Q_x и поперечного Q_y потоков наносов. Принятая автором расчетная схема профиля абразионного берега изображена на рисунке 7.

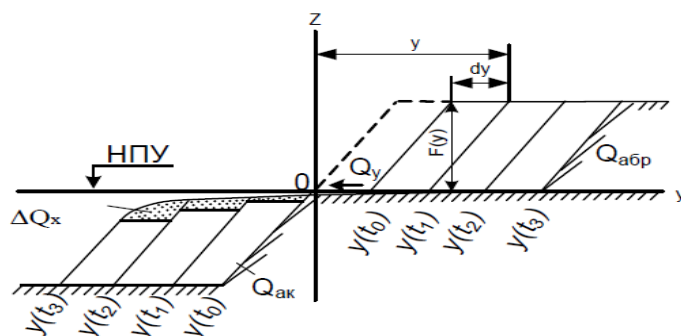


Рисунок 7. – Расчетная схема формирования профиля равновесия берега, подверженного переработке

Принято, что на I –й стадии развития берега отсутствует вдольбереговой перенос и преобладает процесс переработки и поперечный перенос, т.е. $Q_x = 0$, $Q_y > 0$. Для I –й стадии $Q_{ак} = Q_{абр} \xi'_1$, где ξ'_1 – коэффициент аккумуляции, $\xi'_1 = 1$. Коэффициент аккумуляции равен $\xi'_1 = Q_{ак} / Q_{абр}$ зависит от объема размыва надводной части берега, который равен сумме элементарных блоков на отдельных стадиях переработки (рисунок 7). На II –й стадии формирования профиля равновесия величина ξ'_2 принимается $\xi'_2 \approx \xi'_1$. На III –ей стадии, т.е. на стадии затухания переработки и формирования профиля динамического равновесия при наличии вдольберегового переноса наносов ($Q_x > Q_y$, $\xi'_1 < 1$) с учетом наличия сформированной береговой отмели (рисунок 7) математическая (балансовая) модель устойчивого профиля имеет вид:

$$Q_{ак} = \Delta Q_{xt} + l_x \xi'_3 \int_{y(t_2)}^{y(t_3)} F(y) dy, \quad (8)$$

где $y(t_2)$, $y(t_3)$ – границы элементарного блока переработки на III –й стадии формирования склона, м; ΔQ_{xt} – объем вдольберегового потока наносов, приведенный к единичной ширине береговой отмели l_x , который определяется по эмпирической зависимости В. Мунка, м³:

$$\Delta Q_{xt} = 0,137 \cdot 10^{-5} l_x h_{1\%}^2, \quad (9)$$

где $h_{1\%}$ – высота волны 1% – ой обеспеченности, м.

Полученная балансовая модель профиля переработки может использоваться в условиях берега обрывистой формы высотой от 0,5 до 15,0 м либо откоса с уклоном поверхности от 0,1 до 0,33 и наличия песчаных несвязных грунтов с коэффициентом неоднородности размываемого грунта η от 2,5 до 4,5. Форма подводной части берегового склона из несвязных грунтов описывается дифференциальным уравнением, предложенным И.О. Леонтьевым, В.Л. Максим-чуком для однородных грунтов, а также В.В. Вайтман для неоднородных.

Учет соотношения сил, действующих на элемент грунта, находящегося на откосе, дал возможность решить прикладную задачу по определению критерия устойчивости профиля динамического равновесия. Основной причиной

разрушения откосов, находящихся в зоне действия волнового потока, является создание им гидродинамическое давление, вызывающее *знакопеременное* сдвигающее усилие. При решении данной задачи рассматривался массив грунта, находящийся на откосе ниже зоны разрушения волны (в подводной части отмели), по которой движется волновой поток. Для некоторого элемента грунта, лежащего на поверхности отмели (откоса) объемом W и площадью F , расчетная схема имеет такой вид (рисунок 8).

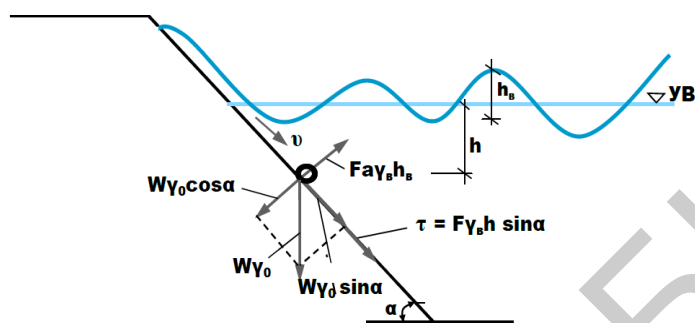


Рисунок 8. –Схема сил, действующих на объем грунта откоса

Условие предельного равновесия элемента грунта, расположенного на откосе под углом α к горизонту, определяется следующим соотношением сил:

- силы тяжести G частицы, погруженной в воду $G = W\gamma_0$, где W – объем элемента грунта, m^3 ; γ_0 – удельный вес грунта во взвешенном состоянии, H/m^3 ;

- предельной влекущей силы, создаваемой волновым потоком τ , стремящейся сдвинуть элемент грунта вниз по откосу

$$\tau = F\gamma_b h \sin \alpha \quad , \quad (10)$$

где F – площадь элемента грунта, m^2 ; γ_b – удельный вес воды, H/m^3 ; h – глубина, m ;

- волнового взвешивающего давления $P_{взв} = Fa\gamma_b h_b$, H/m^3 , где a – эмпирический коэффициент, $a = 0,27$;

- удерживающей силы $T_o = W\gamma_0 \cos \alpha$, H/m^3 ;

- сдвигающей силы $P_{ск} = W\gamma_0 \sin \alpha$, H/m^3 .

Уравнение предельного равновесия имеет следующий вид:

$$W\gamma_0 \sin \alpha + F\gamma_b h \sin \alpha = (W\gamma_0 h \cos \alpha - Fa\gamma_b h_b) f \quad . \quad (11)$$

Разделив выражение (11) на F и $\sin \alpha$, получим

$$d\gamma_0 + \gamma_b h + a\gamma_b h_b f \sqrt{1+m^2} = d\gamma_0 m f \quad , \quad (12)$$

где f – коэффициент внутреннего трения грунта; d – диаметр частиц грунта, mm . Разделив выражение (12) на d , и γ_b , получаем

$$\frac{\gamma_0}{\gamma_b} + \frac{h}{d} + \frac{ah_b f \sqrt{1+m^2}}{d} = \frac{\gamma_0 m f}{\gamma_b} \quad . \quad (13)$$

Считая в воде $\gamma_0 / \gamma_a = \rho_0 / \rho_a = \rho_0'$, где ρ_0, ρ_a – плотность зерен грунта во взвешенном состоянии и воды, кг/м³; ρ_0' – относительная плотность $\rho_0' = \rho_0 / \rho_a$, получаем

$$\rho_0' + \frac{h}{d} + \frac{ah_{1\%}f\sqrt{1+m^2}}{d} = \rho_0'mf, \quad (14)$$

Преобразовав (14), имеем

$$\frac{h}{d} + \frac{ah_{1\%}f\sqrt{1+m^2}}{d} = \rho_0'(mf - 1), \quad (15)$$

Отношение правой части уравнения (15) к левой дает критерий устойчивости частиц грунта на профиле динамического равновесия Π_1

$$\Pi_1 = \frac{\rho_0'(mf - 1)d}{h} + ah_{1\%}f\sqrt{1+m^2}, \quad (16)$$

В выражении (16) для несвязных однородных грунтов с коэффициентом неоднородности, равным $\eta = d_{60}/d_{10} \geq 2,0 - 2,5$ величина d принимается $d = d_{50}$.

После заполнения водохранилища величина Π_1 всегда составляет величину менее 1, так как происходит движение материала переработки только поперек склона и образование береговой отмели. На стадии формирования профиля динамического равновесия форма отмели приобретает устойчивый контур, а величина $\Pi_1 \geq 1$.

Для стадии равновесия автором была рассмотрена расчетная схема, изображенная на рисунке 9, на которой приведен элемент грунта объемом W и площадью F , находящийся в предельном равновесии под воздействием ветрового волнения на сформированной береговой отмели ниже зоны разрушения волн.

Вдольбереговой перенос частиц грунта в виде потока наносов возможен при наличии подводной части береговой отмели и подходящего под углом θ к урезу воды ветрового волнения. Это позволяет представить P_e в виде двух компонент: поперечной P_{vy} и продольной вдольбереговой P_{vx} . Кроме того, присутствует и влияет на устойчивость элемента грунта вертикальная взвешивающая составляющая P_{vz} . Эта сила уравнивается силой тяжести G и компонентой скатывающей силы и далее не учитывается. Давление волнового потока на элемент грунта, создаваемое придонными скоростями v_{max} и его составляющими: продольной P_{vx} и поперечной P_{vy} равны:

$$\begin{aligned} P_{vx} &= a_x F_y \gamma_a v_{max}^2 / 2g, \\ P_{vy} &= a_y F_x \gamma_a v_{max}^2 / 2g. \end{aligned} \quad (17)$$

Тогда равнодействующая сила P_B поперечной и вдольбереговой составляющих имеет такой вид:

$$P_B = \sqrt{P_{vx}^2 + P_{vy}^2}. \quad (18)$$

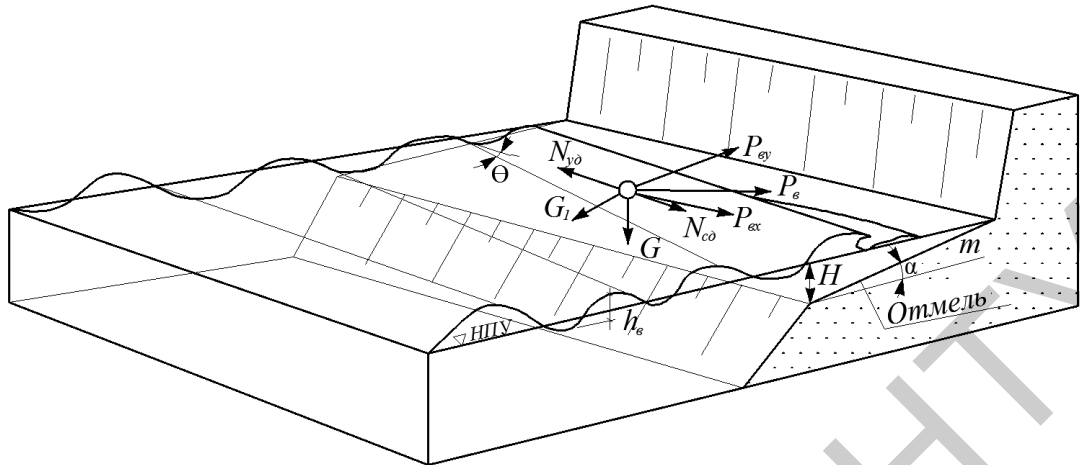


Рисунок 9. - Схема действия сил на элемент грунта на береговой отмели

Натурные и лабораторные исследования ряда авторов (В.В. Лонгинова, З.А. Генина, И.Я Попова, В.З. Аверина, Д.В. Джонсона, Д. Путнама, В. Мунка, М. Трейлора, Н.А. Айбулатова) по изучению режима донных волновых скоростей показали, что они практически совпадают со скоростями руслового потока ($v_{\max} = v_T$), следовательно:

$$v_{\max} = \frac{\pi h_s n}{\sqrt{\frac{\pi \lambda s h \left(\frac{4\pi H}{\lambda} \right)}{g}}}, \quad (19)$$

где h – расчетная высота волны, м; λ – длина волны, м; g – ускорение свободного падения, м/с²; H – глубина на внешнем краю отмели, м; n – коэффициент шероховатости, принимаемый по А.С. Офицерову и В. С.Шайтану.

Площади проекции элемента грунта объемом W на горизонтальную, вертикальную и перпендикулярную к равнодействующей P_B плоскости, принимаются соответственно равными $F_x = F_y = F$, и подставляя значение v_{\max} в (18), получаем

$$P_s = \frac{a_0 F \gamma_s v_{\max}^2}{2g} = \frac{0,5 a_0 F \gamma_s \pi h_s^2 n^2}{\lambda s h \left(\frac{4\pi H}{\lambda} \right)}. \quad (20)$$

Величина сдвигающей силы определится так:

$$N_{c\theta} = \sqrt{\gamma_0^2 W^2 \sin^2 \alpha + \frac{0,25 (a_0 F \gamma_s \pi)^2 (h_s n)^4 \cos^2 \Theta}{\lambda^2 s h^2 \left(\frac{4\pi H}{\lambda} \right)}}. \quad (21)$$

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 косоподходящего ветрового волнения к урезу воды под углом Θ (рисунок 9), введена поправка, учитывающая угол подхода волны к берегу:

$$N_{уд} = \gamma_0 W f \cos \alpha \cos \Theta, \quad (22)$$

где f – коэффициент внутреннего трения для несвязных грунтов. Уравнение равновесия имеет вид $N_{уд} = N_{сд}$. Отношение величин $N_{уд}$ и $N_{сд}$ является критерием устойчивости профиля равновесия. Разделив обе части уравнения (21) на $F \sin \alpha \cos \Theta$, получаем

$$\gamma_0 W f \cos \alpha \cos \Theta = \sqrt{\gamma_0^2 W^2 \sin^2 \alpha + \frac{0,25(a_0 F \gamma_0 \pi)^2 (h_0 n)^4 \cos^2 \Theta}{\lambda^2 sh^2 \left(\frac{4\pi H}{\lambda} \right)}}. \quad (23)$$

Приняв, что $(1+m^2) = \frac{1}{\sin^2 \alpha}$, имеем

$$\gamma_0 d f m = \sqrt{\frac{\gamma_0^2 d^2}{\cos^2 \Theta} + \frac{0,25(a_0 \gamma_0 \pi)^2 (h_0 n)^4 (1+m^2)}{\lambda^2 sh^2 \frac{4\pi H}{\lambda}}}. \quad (24)$$

Обозначив $\frac{\gamma_0 d}{\cos \Theta} = \xi_1$, получаем

$$\frac{a_0 \gamma_0 \pi (h_0 n)^2 \sqrt{1+m^2}}{\lambda sh \frac{4\pi H}{\lambda}} = \xi_2. \quad (25)$$

Тогда критерий устойчивости Π_2 равен

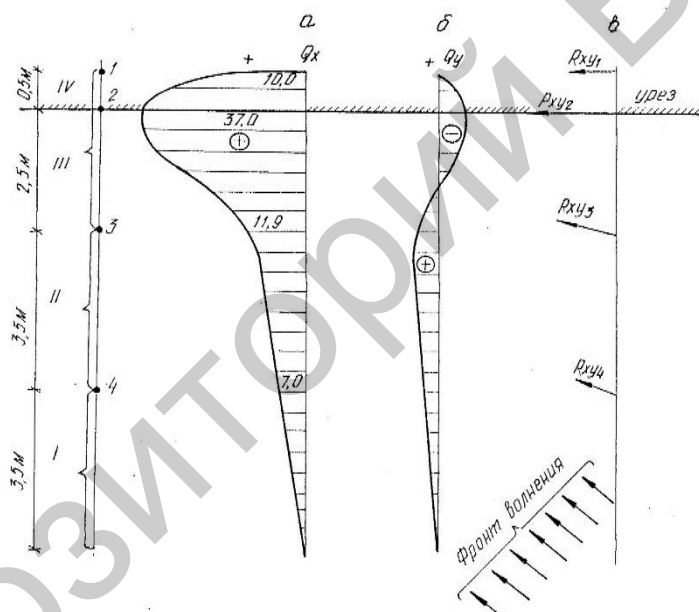
$$\Pi_2 = \frac{\gamma_0 d f m}{\sqrt{\xi_1^2 + 0,25 \xi_2^2}}. \quad (26)$$

При значении $\Pi_2 \geq 1$ профиль берега и береговая линия соответствует равновесной форме профиля динамического равновесия, в противном случае берег находится в стадии интенсивной переработки.

Натурные исследования, проведенные автором позволили установить, что под воздействием ветрового волнения в приурезовой зоне за счет взвешивания частиц

происходит естественная сортировка частиц по крупности и их дифференциация по неоднородности. Ширина зоны перемещения и сортировки в условиях водохранилищ Беларуси составляет 2,0 – 5,0 м от границы уреза. Экспериментальные натурные исследования в береговой зоне водохранилищ Петровичское и Заславское при штормовых условиях (высота волны $h_{1\%} = 0,4-0,7$ м) с использованием разработанных автором наносоуловителей, позволили подтвердить наличие подвижного слоя наносов на поверхности отмели и получить расход влекаемых наносов в приурезовой зоне. По результатам натурных экспериментов построены эпюры распределения продольного вдольберегового Q_x и поперечного Q_y расходов наносов и равнодействующие значения расходов потока наносов в виде векторов $R_{x,y}$ в каждой зоне волнения (рисунок 10).

Изображенные на рисунке 11 графики, подтверждают влияние крунозернистых включений на процесс переработки и указывают на наличие эффекта торможения при размыве грунтов с повышенной неоднородностью и образованием «самоотмостки»



а) – вдольбереговая составляющая потока влекаемых наносов; б) – поперечная составляющая вдольберегового потока наносов; в) – равнодействующие потока наносов в различных зонах волнения. 1, 2, 3, 4, 5 – точки установки наносоуловителей; I, II, III, IV – зоны волнения

Рисунок 10. – Эпюры расходов наносов в береговой зоне. Заславское водохранилище, участок 4, створ 5

Четвертая глава посвящена вопросам прогнозирования переработки берегов. В настоящее время разработано более 60 методов прогноза деформаций грунтовых откосов дамб и плотин. Наибольшие известны методы: Г.С. Золотарева, Н.Е. Кондратьева, Е.Г. Качугина, Б.А. Пышкина, Е.К. Гречищева. Проверка их применимости выполнялась по шести опорным водохранилищам страны. Величины абсолютной и относительной погрешностей, а также коэффициента сходимости изменялись в пределах: абсолютной погрешности метода прогноза от 2,9 до 324,9 м; относительной более 1000%; коэффициента сходимости от 0,10 до 28,13 (рисунок

12). Низкий уровень сходимости явился основанием для разработки методов прогноза, учитывающих условия водохранилищ Беларуси.

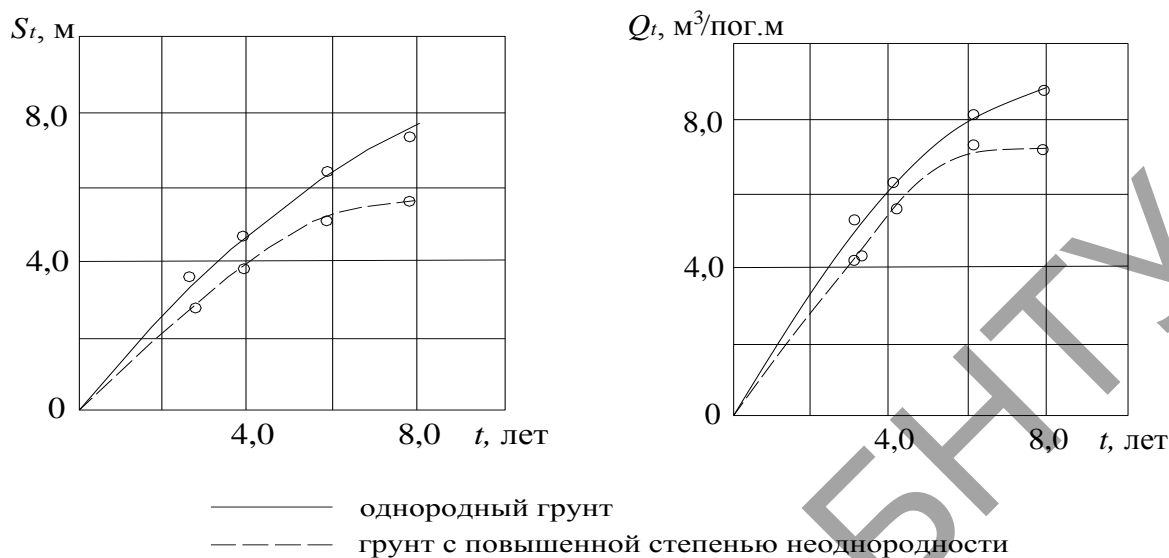


Рисунок 11. –Изменение характеристик профиля переработки в грунтах с различной неоднородностью. Водоохранилище Дрозды

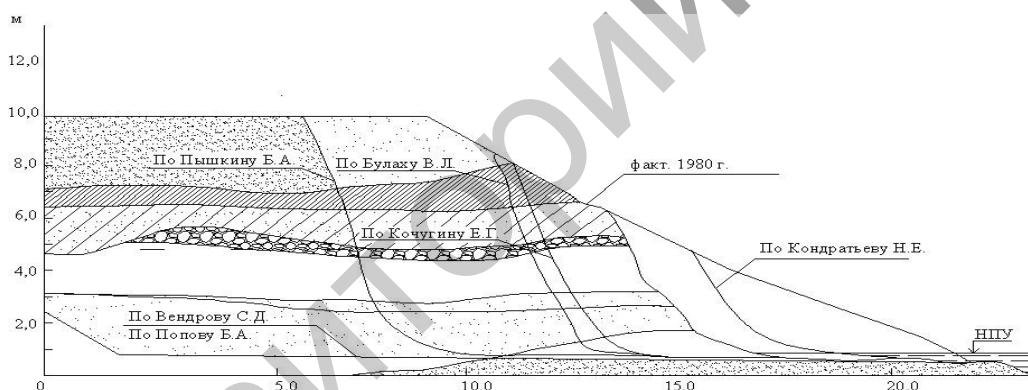


Рисунок 12. – Прогноз переработки берега. Чижовское водохранилище, участок 1

Вероятностно-статистический метод прогноза, основанный на применении регрессионных моделей. Метод разработан на данных натуральных многолетних наблюдений по тестовым опорным водохранилищам. Используя (1) и (2), все берегообразующие факторы были агрегированы, что позволило сформировать безразмерные комплексы: $X_1 = L_p/h_L$ – морфометрическая характеристика водоема; $X_2 = h_{1\%}/\Delta H_{бл}$ – характеристика гидрологического режима; $X_3 = H_6/d_{50}$ – геоморфологическая и грунтовая характеристика берегового склона; $X_3 = i_6/\eta$ – геоморфологическая характеристика берега пологой формы или верхового откоса дамбы или плотины. Автором были получены прогнозные модели вида:

- для исходного профиля берега пологой формы

$$S_t = A_0 + A_1 (L_p / h_L) + A_2 (h_{1\%} / \Delta H_{бл}) + A_3 (i_6 / \eta), \quad (27)$$

- для профиля обрывистой формы

$$S_t = A_0 + A_1 (L_p / h_L) + A_2 (h_{1\%} / \Delta H_{бл}) + A_3 (H_6 / d_{50}), \quad (28)$$

где A_0, A_1, A_2, A_3 – эмпирические коэффициенты, полученные на основе обработки натурных данных, приведены в таблице 1, а условия применения в таблице 2. Практический интерес представляет переработка склона на конечной срок – стадию динамического равновесия. В прогнозных расчетах конечным сроком считается для водохранилищ: группы 1 $t_k = 15$ лет, группы 2 $t_k = 10$ лет.

Метод прогноза переработки верховых незакрепленных откосов дамб и плотин на основе учета призмы возможных деформаций. Метод разработан для расчета относительных деформаций верховых незакрепленных откосов, м. На профиле верхового откоса дамбы (плотины) выделяются деформации надводной части профиля $E_S, E_{ВН}$ (м), находящиеся выше отметки НПУ и подводной части профиля $E_{Вп}$ (м) ниже уреза воды (рисунок 13), которые образуют призму возможных деформаций. По величине относительных деформаций профиля $E_{ВН}$, рассчитывается величина коэффициента откоса m_2 , соответствующая равновесному состоянию. Характеристики деформаций профиля откоса представляется в виде суммы величин: неслучайной $E_{Вн}^*$ всегда присутствующей и случайной $E'_{Вн}$, составляющей, зависящей от локальных условий развития и обеспеченности деформаций, определяемой аналогично (4).

Таблица 1. – Структура регрессионных прогнозных моделей

Группа водохранилищ	Срок прогноза t_k , лет	Форма берегового склона	Параметр профиля переработки	Коэффициенты			
				A_0	A_1	A_2	A_3
Группа I	15 лет	Наличие обрыва	St_k	74,07	0,02	97,71	0,002
			Qt_k	46,08	0,06	39,44	0,006
	15 лет	Пологий склон	St_k	20,40	0,007	58,90	-64,18
			Qt_k	25,10	0,009	86,43	75,49
Группа 2	10 лет	Наличие обрыва	St_k	42,65	-0,03	-4,84	-0,001
			Qt_k	67,10	-0,04	28,46	-0,001
	10 лет	Пологий склон	St_k	2,81	0,02	-3,82	-13,29
			Qt_k	3,96	0,01	-4,01	8,40

Таблица 2. – Условия применения метода прогноза

Водохранилище	Берегообразующие факторы и их характеристики							
	L_p , м	h_L , м	$h_{1\%}$, м	$\Delta H_{бз}$, м	$I_б$	η	$H_б$, м	d_{50} , м
Группа 1	1000÷5000	2÷4	0,2÷1,2	0,6÷3,5	0,01÷0,3	1,5÷10,0	1,5÷12,0	0,0005÷0,035
Группа 2	1000÷3500	2÷4	0,2÷0,7	0,1÷0,5	0,01÷0,3	1,5÷10,0	1,5÷12	0,0005÷0,035

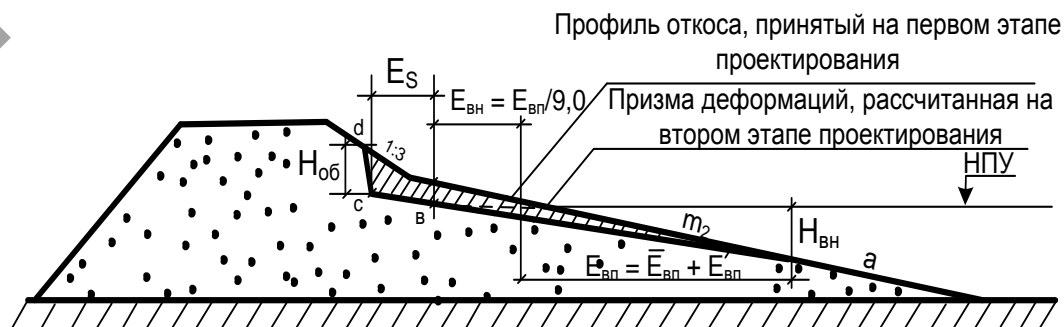


Рисунок 13. – Схема расчета деформаций верхового откоса дамбы (плотины)

Определение абсолютных деформаций профиля верхового откоса в надводной и подводной частях склона выполняется графическим способом при помощи номограмм (рисунок 14). Полученные деформации затем учитываются при окончательном определении устойчивого m_2 .

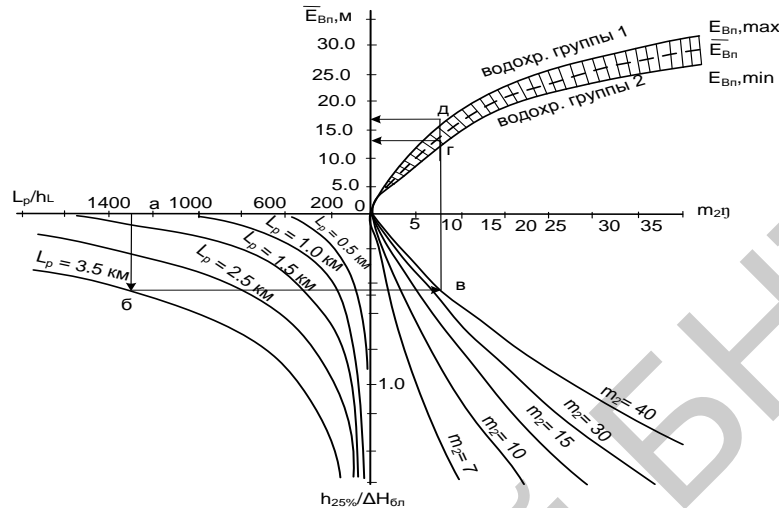


Рисунок 14. – Номограмма определения деформаций откоса (подводная часть)

Прогноз переработки естественных берегов и грунтовых откосов методом гидроморфологического подобия (метод натуральных аналогий). Известны несколько методов аналогий – предложения Б.А. Полякова, Е.К. Гречищева, Г.С. Золотарева, Ф.П. Саваренского, В.Л. Булаха, Л.Б. Розовского, В.Е. Левкевича, В.В. Кобяка. Для условий водохранилищ Беларуси автором были разработаны основные принципы метода гидроморфологического подобия и критерии подобия, которые имеют следующий вид:

– морфометрические

$$\left. \begin{aligned} M_{ky} &= L_p/B_{cp} \\ M_{kz} &= H_{cp} \cdot 10^{-3}/B_{cp} \\ M_{kh} &= L_p/h_L \end{aligned} \right\} idem, \quad (29)$$

– гидрологические

$$\left. \begin{aligned} M_{k\Delta} &= \Delta H_{бл}/H_{cp} \\ M_{kA} &= h_{1\%}/\Delta H_{бл} \\ M_{knp} &= W_{cp,мпн} / V_{п} \end{aligned} \right\} idem, \quad (30)$$

– геоморфологические

$$\left. \begin{aligned} M_{киз} &= L_1 / L_2 \\ M_{kd} &= H_6/d_{50} \\ M_{k\eta} &= I_6/\eta \end{aligned} \right\} idem. \quad (31)$$

где L_p – длина водохранилища, м; B_{cp} – средняя ширина водохранилища, м; $W_{cp,мпн}$ – среднемноголетний объем стока водотока в створе гидроузла, млн м³; $V_{п}$ – полный

объем водохранилища, млн м^3 ; L_1 – длина спрямленной береговой линии, м; L_2 – длина реальной береговой линии, м.

Пятая глава рассматривает вопросы защиты берегов, верховых откосов дамб и плотин. В Беларуси для крепления откосов используются различные типы креплений: активные и пассивные. Активные представлены искусственными пляжами и биологическим креплением, реже бунами и волноломами. К пассивному типу относятся волнобойные стенки, одежды откосов напорных сооружений (водохранилища Селец, Рудня, Зельва и др.). Наиболее распространены бетонные и железобетонные крепления.

Обследование креплений откосов (более 100 объектов) показало, что большинство из них имеют серьезные повреждения. Основными причинами повреждений бетонных креплений являются: слабое уплотнение швов, некачественное выполнение бетонных работ и подготовки, низкий уровень эксплуатации, что ведет к раскрытию швов, выносу грунта из-под плит и последующему разрушению покрытий (рисунок 15). Общая длина поврежденных и разрушенных берегоукрепительных сооружений по данным обследований, выполненных в период 2012–2016 гг. составляет около 110 км.

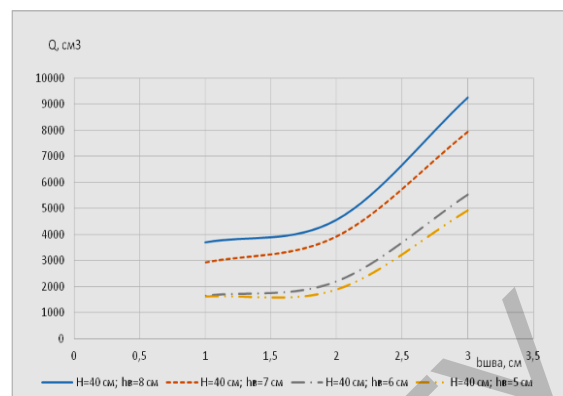


а)– водохранилище Любанское; б)– водохранилище Лепельское
Рисунок 15. – Типичные разрушения креплений откосов и берегов (2015 г.)

Изучение совместного воздействия волнения, а также колебания уровней на устойчивость плит креплений проведено в волновом лотке гидротехнической лаборатории Белорусского национального технического университета (БНТУ) на размываемой модели откоса, имеющего заложение 1:3 с креплением из железобетонных плит толщиной 2,2 см и открытыми швами. (рисунок 16,а). Моделирование выполнялось в масштабе 1:10. Опыты, проведенные совместно с аспирантом А.В. Бузуком, позволили оценить характер воздействия волнового потока на крепление и вымыв грунта откоса из-под плит, установить зависимость объемных деформаций откоса Q_t от ширины раскрытия швов $b_{\text{шва}}$, высоты волны h и уровней воды в лотке (рисунок 16,б).



а)



б)

а) – воздействие волны на плиту крепления; б) – зависимость $Q_t = f(b_{шва})$

Рисунок 16. – Исследование устойчивости плит крепления

На этой же лабораторной установке автором совместно с к.т.н. В.В. Кобяком исследовались деформации береговых незакрепленных склонов при совместном воздействии волн различной высоты в условиях изменения колебания уровней при трансформированном режиме эксплуатации водохранилища. Модель изготавливалась из среднезернистого несвязанного песка с коэффициентом неоднородности $\eta = 1,2 \div 2,4$. Интенсивность переработки берегового склона $S = f(t)$ при различных высотах волн показана на рисунке 17. Установлено, что изменение уровня режима (сработка или наполнение) при постоянных высотах волн приводит к изменению интенсивности и масштабов линейной переработки тела модели.

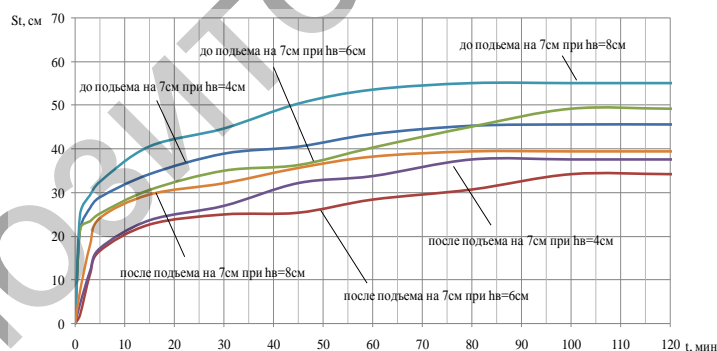


Рисунок 17. – График зависимости $S = f(t)$: до и после поднятия уровня воды на 7 см при высотах волн 4, 6, 8 см

В гидротехнической лаборатории БНТУ в большом русловом лотке на жесткой модели каскада водохранилищ Вилейско-Минской водной системы (масштаб: горизонтальный – 1:1000, вертикальный – 1:100) (рисунок 18) совместно с к.т.н., доцентом С.М. Пастуховым, к.т.н. В.В. Кобяком, к.г.н. М.П. Кукшиновым, аспирантом А.В. Бузуком проводилось моделирование стоковых течений и оценка их на устойчивость берегов водохранилищ. Регистрация скоростей течений выполнялась с помощью жидкого цветового маркера, фотографирования, а также микрокомпьютерного расходомера-скоростемера (МКРС). По результатам лабораторных исследований были построены эпюры скоростей и карты течений по акватории тестовых водохранилищ Криницы и Чижовское.



Рисунок 18. – Лабораторная установка для изучения режима течений в водохранилищах. На переднем плане модель водохранилища Криницы

Наличие данных, полученных автором в результате натурных исследований и физического моделирования, позволило выполнить математическое моделирование распределения стоковых течений по акватории водохранилища Криницы. Реализация этой задачи выполнена совместно с к.т.н., доцентом А.А. Новиковым и аспирантом А.В. Бузуком. Для описания скоростной структуры потока жидкости в русловом водохранилище была использована плановая (двухмерная) модель потока, полученная на основе уравнения Навье–Стокса путем интегрирования уравнений трехмерной задачи по z - вертикальной координате (глубине водоема). Формирование скоростной структуры потока в русловом водохранилище на плановой модели определяется взаимодействием: *инерционных (кинематических)* характеристик движущейся жидкости, *диссипативных*, вызванных трением жидкости и дна водоема, а также *трением* жидкости по границе уреза. Сравнение натурных данных о структуре течений на водохранилище Криницы с результатами физического и численного моделирования показали их идентичность и возможность применения полученной модели на водохранилищах руслового типа (рисунок 19).

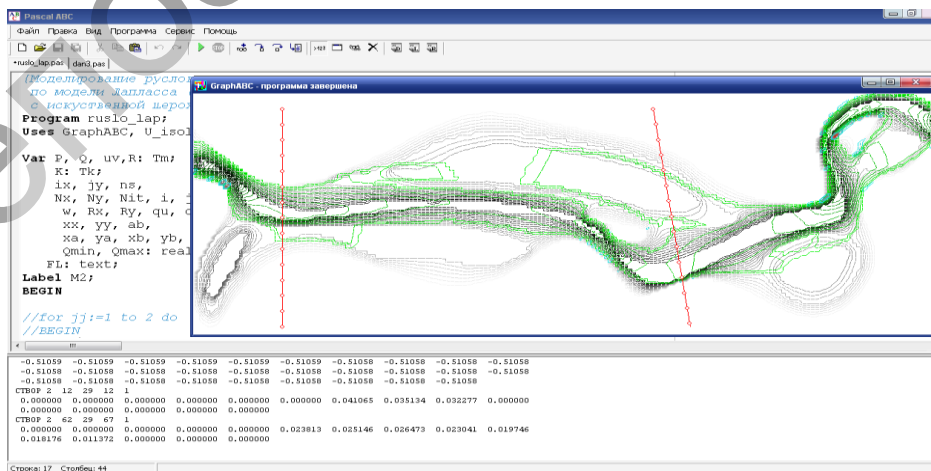


Рисунок 19. – Результаты численного моделирования распределение скоростей стоковых течений в водохранилище Криницы

Шестая глава посвящена рассмотрению задачи формирования профиля равновесия берега, подверженного переработке в грунтах с повышенной неоднородностью, торможения и стабилизации переработки. Ранее вопрос

воздействия на процесс абразии в условиях морских берегов изучался В.М. Московкиным, а также Н.В. Есиным, В.А. Дмитриевым и А.Ш. Хабидовым. Предложения В.М. Московкина и других авторов базировались на основе уравнения баланса обломочного материала, который в береговых процессах играет роль обратной отрицательной связи. В приложении к крупным равнинным водохранилищам аналогичные предложения высказаны Ю.Н. Сокольниковым, который показал, что процесс развития берегов, сложенных несвязными грунтами, завершается выработкой *динамически устойчивого профиля*. Элементы шероховатости на поверхности отмели обеспечивают гашение волнового потока. Автором диссертации на основе данных натурных исследований подтверждено, что так называемая «самоотмостка» из крупнофракционного материала, образующаяся на поверхности профиля отмели и являющаяся фактически макрошероховатостью, наиболее интенсивно гасит волнение. В результате возникновения «самоотмостки» поверхность береговой отмели «бронирована» слоем наиболее крупных фракций за счет выноса, находящихся между ними более мелких частиц (рисунок 20).

Натурными наблюдениями установлено, что одним из факторов, влияющих на динамическую устойчивость берегов в условиях водохранилищ Беларуси, является неоднородность размываемого грунта. Этот показатель может использоваться при торможении процесса переработки и дальнейшей стабилизации деформаций берега.



а) – Заславское водохранилище



б) – Дубровское водохранилище

Рисунок 20. –Образование естественной отмостки

Лабораторные исследования, проведенные автором в лаборатории БНТУ, позволили изучить механизм закрепления поверхности отмели в зависимости от неоднородности материала и оценить скорость процесса переработки и формирования профиля равновесия. В качестве основного «базового» грунта, образующего тело модели, использовался однородный среднезернистый песок с $d_{50} = 0,5$ мм и песчано-гравийная смесь с крупнофракционными добавками. Исследовалось влияние на динамику разрушения модели 1, 2, 3 и 4 - х компонентных песчано-гравийных смесей, имеющих различный средний диаметр частиц D_{50} и коэффициент неоднородности η_0 при различном содержании крупнозернистых включений: 10, 25, 50 и 75 %.(таблица 3). В опытах в качестве добавки применялся сортированный гравий с $D_{50} = 1,5; 3,5; 7,5$ и 12,5 мм. Обеспечение условий автомодельности выполнялось по А.С. Офицерову, Ж. Буссинеску и В.Л. Максимчуку. Моделирование откоса проводилось без искажений

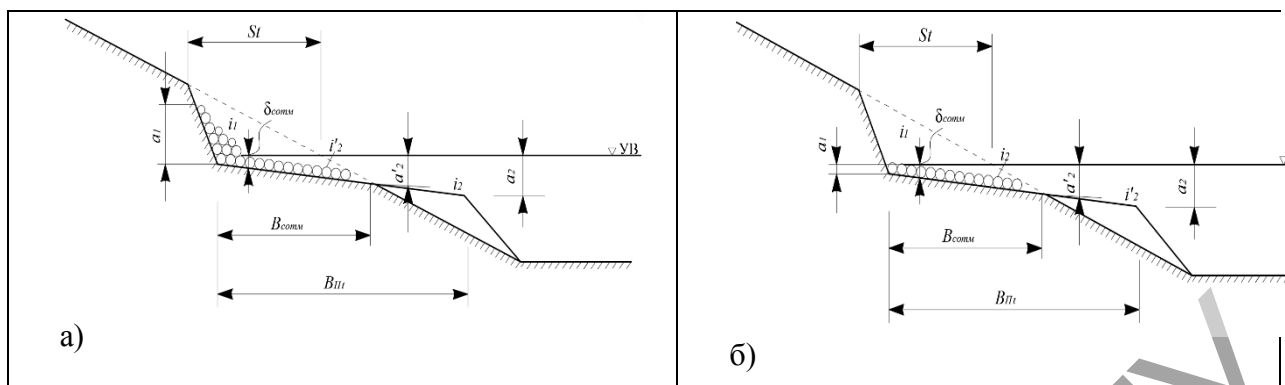
линейного масштаба, как для условий галечно–гравийных грунтов. Всего было проведено 18 серий опытов. В качестве «оптимального» состава размываемого грунта, при котором наблюдался наибольший берегозащитный тормозящий эффект была экспериментальным путем определена смесь, имеющая содержание гравелистых частиц равное $P = 25 \%$.

Таблица 3. – Состав грунтовой смеси, укладываемой в тело модели

№ опыта	Тип смеси	Фракционный состав смеси, мм	D_{50} , мм	η_0
4	Однокомпонентная	(1,0 + 2,0)	1,5	5,2
6		(5,0 + 10,0)	7,5	4,5
5	Двухкомпонентная	(2,0 + 5,0) и (10,0 + 15,0)	8,0	5,6
9		(10,5 + 15,0) и (15,0 + 20,0)	15,0	6,3
2	Трехкомпонентная	(0,1 + 0,25, 1,0 + 2,0, 2,0 + 5,0)	2,57	6,0
2	Четырехкомпонентная	(2,0 + 5,0, 5,0 + 10,0, 10,0 + 15,0, 15,0 + 20,0)	10,2	6,0

Натурные наблюдения автора показали, а лабораторные эксперименты подтвердили, что возможно образование двух основных типов профиля, имеющего покрытие из крупнофракционного материала: первый – при содержании (насыщении) крупными фракциями более 25%, второй – при насыщении грунта крупными фракциями менее 25 % (рисунок 21).

В результате лабораторных опытов получен ряд зависимостей для расчета отдельных элементов профиля (таблица 4). Определено, что наибольший берегозащитный эффект (при минимальной величине деформаций откоса) дает отсыпка смеси оптимального состава через время $T = 0,25 T_k$, где T_k – срок стабилизации процесса переработки. Автором был разработан способ берегозащиты – искусственный аналог естественной отмостки, достоинствами которого является простота реализации, возможность полной механизации, снижение удельной стоимости крепления. Способность абразионного берега, сложенного неоднородным грунтом к самоукреплению была использована при разработке методики и алгоритма процесса торможения и стабилизации процесса переработки абразионных берегов для условий проектируемых и существующих водохранилищ. Для решения задачи проектирования креплений и эксплуатации водохранилищ разработаны научно – обоснованные предложения по созданию системы мониторинга берегов и систематизированному своду сведений о береговых процессах в виде кадастра берегов.



а – профиль с призмой $25\% < P < 50\%$; б – профиль без призмы $10\% < P < 25\%$
Рисунок 21. – Варианты образования профиля равновесия в зависимости от содержания крупнофракционного материала в грунте

Таблица 4. – Зависимости для расчета элементов профиля равновесия с креплением откоса

Тип профиля с самоотмосткой	Элемент профиля	Расчетная зависимость*
Самоотмостка с призмой на урезе при $25\% \leq P_{гр} \leq 50\%$	Верхний предел размыва и граница самоотмостки	$a_1 = (1,5 - 2,0) \delta_{отм}$
	Нижняя граница самоотмостки	$a_2' = 0,36 \left(\frac{h_{1\%}^2 \lambda_0}{\sqrt{D_{50} \eta_0^{0,3}}} \right)^{\frac{2}{3}}$
	Внешний край береговой отмели	$a_2 = a_2' / 0,70$
	Уклон призмы самоотмостки выше уреза воды	$i_1 = 0,032 \left(\frac{h_{1\%} \sqrt[3]{\lambda_0}}{D_{50} \eta_0^{0,3}} \right)^{\frac{2}{3}} + i_0$
	Уклон поверхности самоотмостки ниже уреза воды	$i_2' = 0,028 \left[\left(\frac{h_{1\%} \sqrt[3]{\lambda_0}}{d_{50}} \right)^{\frac{2}{3}} \right] + i_0$
	Уклон на нижней границе отмели	$i_2 = 0,50 i_2'$
Профиль с самоотмосткой без призмы при $10\% \leq P_{гр} \leq 25\%$	Верхний предел размыва и граница самоотмостки	$a_1 = \delta_{отм}$
	Нижняя граница самоотмостки	$a_2' = 0,27 \left(\frac{h_{1\%}^2 \lambda_0}{\sqrt{D_{50} \eta_0^{0,3}}} \right)^{\frac{2}{3}}$
	Внешний край береговой отмели	$a_2 = a_2' / 0,80$
	Уклон самоотмостки на урезе воды	$i_1 = i_2'$
	Уклон поверхности самоотмостки ниже уреза воды	$i_2' = 0,012 \left[\left(\frac{h_{1\%} \sqrt[3]{\lambda_0}}{d_{50}} \right)^{\frac{2}{3}} \right] + i_0$
	Уклон на нижней границе отмели	$i_2 = 0,60 i_2'$

*Примечание: a_1, a_2, a_2' – пределы размыва, глубина в конце самоотмостки, м; $\delta_{отм}$ – толщина слоя отмостки, м; $h_{1\%}$ – высота волны, м; λ_0 – относительная длина волны, м; D_{50}, d_{50} – средневзвешенная крупность частиц соответственно размываемого грунта и частиц самоотмостки, м; η_0 – коэффициент неоднородности размываемого грунта; i_0, i_1, i_2' – уклоны исходного профиля и поверхности элементов самоотмостки соответственно.

Кадастр берегов включает сведения о процессах, протекающих в береговой зоне водохранилищ, их характеристики, а также параметры основных берегообразующих факторов. Вся кадастровая информация формируется в виде справочных таблиц. Основой информационной частью системы мониторинга является информационно-справочная система ДИССА – ДИПС «Береговые процессы на водохранилищах», а также база данных о гидротехнических сооружениях (рисунок 22).

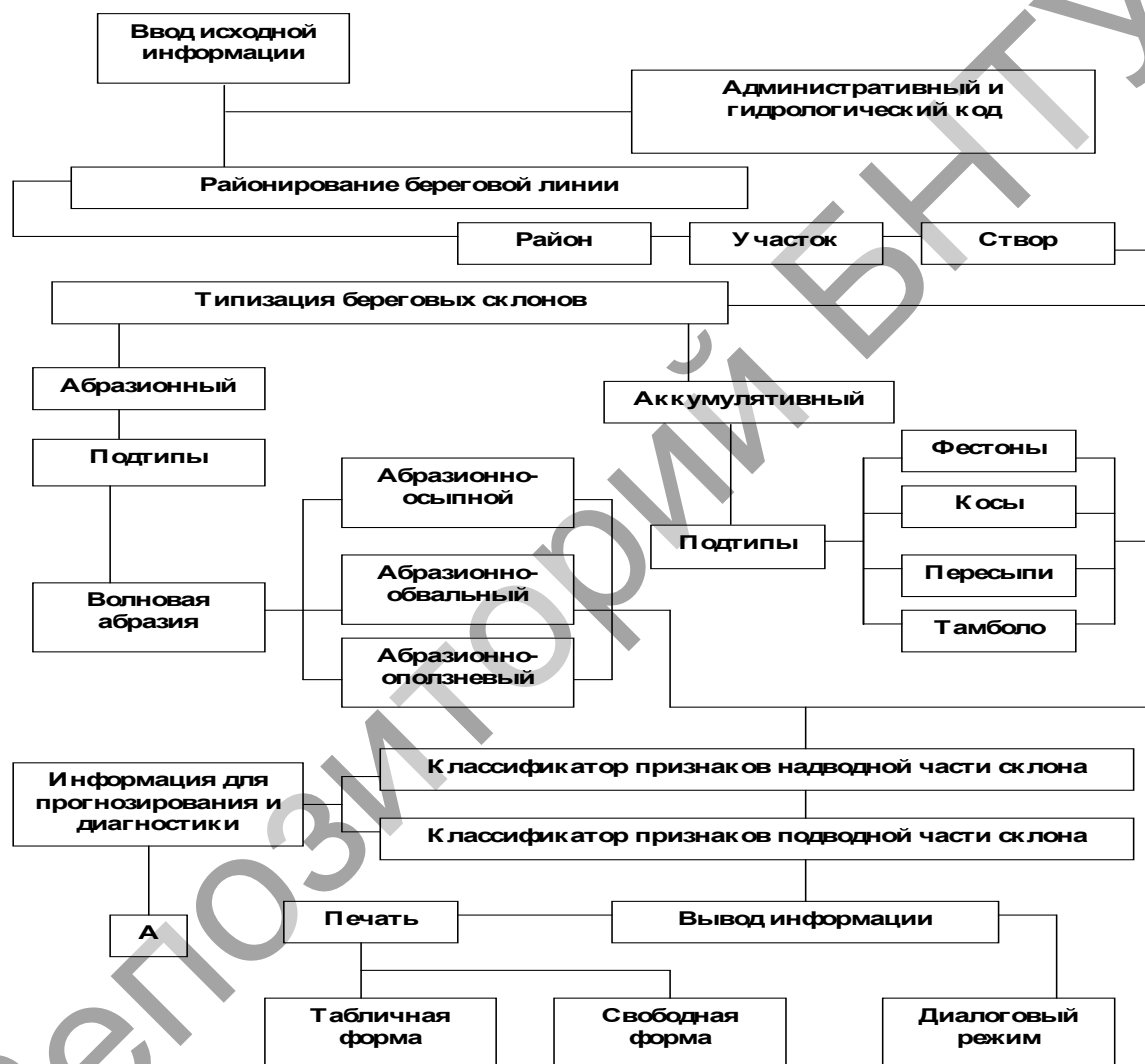


Рисунок 22.– Блок-схема функционирования информационной системы

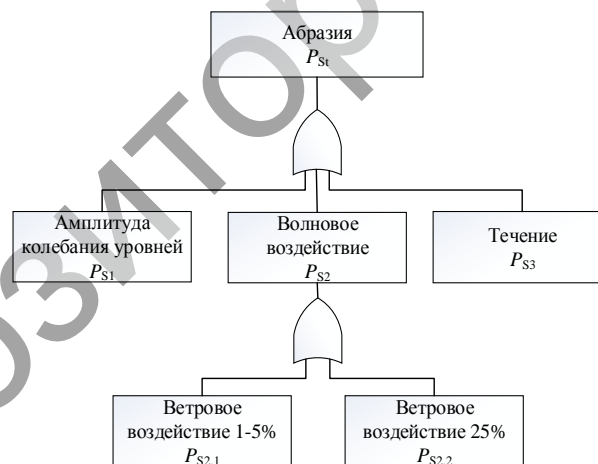
Седьмая глава рассматривает оценку абразионного риска и ущербов от переработки берегов. В применении к побережьям водохранилищ наибольшую опасность для людей, объектов экономики и окружающей среды имеют процессы формирования берегов, прежде всего, процессы переработки (абразии). Развитием принципов и методов оценки опасности и риска, связанных с проявлением экзогенных геологических процессов, занимается ограниченный круг исследователей: В.И. Осипов, А.Л. Рагозин, А.И. Шеко, В.С. Круподеров, Л.К. Малик, В.Н. Бузова, Г.Л. Кофф. Величина риска от абразии напрямую зависит

от скорости разрушения берега и величины отступления береговой линии. В настоящее время проектный нормативный срок службы водохранилищ Беларуси близок к критическому. По современным оценкам автора, износ сооружений на гидроузлах и водохранилищах достигает 70%. Все это ведет к вероятности возникновения риск-ситуаций природно-техногенных и техногенных аварий. В общем виде абразионный риск определяется как:

$$R = \sum_{\phi_i} P_{\phi_i}^n U, \quad (32)$$

где P_{ϕ} – вероятность возникновения i -го рискообразующего фактора на рассматриваемом водном объекте, 1/год; n – количество рискообразующих факторов; U – возможный ущерб от процесса абразии, тыс. руб. Отступление береговой линии в результате переработки, наносит реальный материальный ущерб объектам экономики: населенным пунктам, лесному и сельскому хозяйству (Лепельское, Заславское, Осиповичское, Вилейское и др.). Общая площадь земель, теряемых в результате развития и протекания абразионных процессов, в настоящее время составила более 1000 га.

Для определения вероятности возникновения абразионного риска строилось так называемое «дерево отказов» процесса по схеме, представленной на рисунке 23 с учетом сценариев развития события – абразии (переработки) берегов $P(S_t)$.



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

Рисунок 23. – Схема дерева отказов для оценки вероятности возникновения абразии - переработки береговых склонов

Конечная вероятность возникновения рассматриваемого процесса переработки определяется по следующей формуле:

$$P(S_t) = P_{S1} + P_{S2} + P_{S3} - P_{S1}P_{S2} - P_{S2}P_{S3} - P_{S1}P_{S3} + P_{S1}P_{S2}P_{S3}, \quad (33)$$

где $P(S_t)$ – 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 (обеспеченность) волн 1% - ной обеспеченности, 1/год; $P_{S2.2}$ – вероятность (обеспеченность) волн 25% - ной обеспеченности, 1/год.

Качественная оценка риска от процесса абразии выполнялась на основе комплексных показателей территориального риска – γ_A , площадного показателя риска – γ_p , которые были использованы при построении карт абразионного риска Минской области с помощью программных средств ГИС *MapInfo*. Обобщение материалов многолетних наблюдений с привлечением материалов аэро - фото и спутниковой информации позволило разработать карту территории Беларуси по развитию процесса переработки берегов.

При оценке ущерба от процесса переработки автором предложено выделять следующие виды ущерба: прямой, косвенный и упущенную выгоду (недополученная прибыль). Оценка общего ущерба от абразии берегов определяется суммированием, возникающих частных ущербов:

$$U_{\text{общ}} = U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_5 + U_6, \quad (34)$$

где U_1 – ущерб лесному хозяйству, тыс. руб.; U_2 – ущерб сельскохозяйственному производству, тыс. руб.; U_3 – ущерб объектам промышленности, тыс.руб.; U_4 – ущерб, наносимый населенным пунктам, тыс. руб.; U_5 – ущерб от нарушения работы систем водоснабжения и водозаборов, тыс. руб; U_6 – ущерб памятникам архитектуры, археологии и др.

На основе сравнения удельной стоимости креплений, сравнения капитальных затрат и издержек на эксплуатацию сооружений автором предложена укрупненная методика определения экономической эффективности различных типов берегозащиты, в том числе технологии торможения и стабилизации береговым процессом на основе применения эффекта самоукрепления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Сформулированы и научно обоснованы теоретические положения развития процесса переработки берегов и откосов подпорных гидротехнических сооружений применительно к условиям водохранилищ Беларуси [1–А - 14–А, 18–А, 20–А, 23–А, 54–А, 66–А, 85–А]:

– процесс переработки берегов и незакрепленных верховых грунтовых откосов дамб и плотин протекает под воздействием *берегоформирующих «активных»* гидрологических факторов (ветрового волнения, колебания уровней, внутриводоемных течений, ледового режима) и *«пассивных» условий* (морфометрии водохранилищ – линейных размеров, распределения глубин), формы и высоты берега, структуры грунтов и др. [7, 8, 9, 14 –17, 21, 29 –32, 36, 37, 46, 48–50, 57, 68, 77, 79, 86, 94];

– *береговой процесс* обладает *инерционностью и изменчивостью*. Инерционность заключается в сохранении основных черт переработки в период продолжительного отрезка времени, изменчивость – в потере свойств инерционности из-за наличия естественных причин (изменения значимости отдельных факторов в процессе берегоформирования) [8, 9, 15, 27–32, 36, 37, 58].;

– *стохастичная природа процесса переработки* предопределяет возможность расчета характеристик деформаций профиля (неслучайных и случайных отклонений от среднего) путем использования вероятностных методов;

– *береговой процесс на водохранилищах страны, в отличие от крупных и морей, ограничен во времени* имеет конечный срок окончания (стабилизации) переработки, который составляет от 10 до 20 лет для различных групп водохранилищ, при этом условие равновесия определяется соотношением протяженности аккумулятивных и абразионных берегов, которое в итоге ведет к спрямлению и стабилизации береговой линии водоема в плане;

– *формирование профиля переработки абразионного берега происходит синхронно в надводной и подводной частях склона* в результате чего формируется *профиль равновесия*, который в отличие от условий крупных водохранилищ имеет ряд особенностей: а) малую надводную часть от 0,5 до 1,5 м; б) ограниченную по ширине подводную часть отмели, близкую к прямолинейной; в) малую аккумулятивную составляющую; г) неизменяемую постоянную глубину на внешнем краю береговой отмели $H_{вн}$;

– *по окончании процесса переработки происходит формирование профиля равновесия*, соответствующего форме *профиля динамического равновесия*, который подчиняется закону сохранения масс. В зависимости от несвязных грунтов, образующих абразионный берег и береговую отмель, могут формироваться две формы профиля равновесия: а) в грунтах однородного состава с коэффициентом неоднородности η от 2,0 до 4,5, б) в грунтах, имеющих включения гравия, гальки ($\eta > 4,5$) с образованием естественной «самоотмостки»;

– использование *природного эффекта самоупрепления* абразионного профиля путем естественной волновой сортировки частиц несвязного грунта с повышенной неоднородностью и образования «самоотмостки», создает условия для торможения и стабилизации процесса формирования профиля равновесия в более короткие сроки. Учет естественной неоднородности грунтов, как фактора, необходимого для возникновения искусственной «самоотмостки», является альтернативным решением традиционной берегозащите.

Экспериментально установлено, что республике в настоящее время *происходит активное разрушение коренных берегов и откосов* более чем на 80% водных объектах страны, суммарная протяженность берегов водохранилищ, подверженных переработке составляет около 350 км при максимальном отступании берега более 40 м. Стационарные наблюдения, проведенные на опорных водохранилищах (руслowych, озерных, наливных) позволили оценить динамику и масштабы процесса абразии [1–3, 7, 8, 9 –19, 21, 29 –31, 49, 50, 53, 60–62, 63, 96, 99]. Определено, что на водохранилищах руслового типа переработка получает развитие только лишь в приплотинной части водоема и достигает 40% протяженности береговой линии [1–

3, 7, 8, 19, 25] в тоже время у водохранилищ озерного типа, как и у наливных этот показатель может составлять до 70 % протяженности берегов водоема [12–14, 21].

2. Автором с учетом рассмотрения условий равновесия массива грунта на подводной части откоса и действующих нагрузок, а также характера перемещения материала переработки (наносов) по отмели на различных стадиях развития профиля *теоретически обоснованы критерии устойчивости профиля динамического равновесия* берега, подверженного переработке P_1 и P_2 , сложенного несвязными грунтами [46, 47, 85, 94]. На основе обобщения материалов наблюдений и закона сохранения масс, учета гидрологических особенностей водохранилищ, геологического строения рельефа и гранулометрического состава грунтов, образующих берег (откос) *разработаны математические (балансовые) модели развития устойчивой береговой линии в плане и профиля динамического равновесия* [7, 8, 18, 54, 94]. Для оценки состояния береговой линии в плане автором предложен коэффициент развития береговой линии k_p , характеризующий соотношение протяженностей аккумулятивных $L_{ак}$ и абразионных берегов $L_{абр}$. Показано, что при приближении величины k_p к 1 профиль стремится к равновесному [7, 8, 18, 19, 94].

3. Разработаны *методы прогнозирования переработки берегов водохранилищ, а также незакрепленных верховых откосов дамб и плотин* из несвязных грунтов, которые могут использоваться проектировании берегозащиты. Разработаны следующие методы прогноза: вероятностно-статистический метод, использующий регрессионные многофакторные модели; метод расчета деформаций верховых незакрепленных грунтовых откосов дамб и плотин, возникающих в процессе их эксплуатации; метод прогноза, основанный на принципах гидродинамических аналогий. Указанные методы прогноза применимы для водохранилищ различного типа и обеспечивают точность прогноза в пределах 15 - 25 % [7–10, 25, 34, 35, 48–50, 58, 82, 87, 97, 98, 100, 101, 103, 104, 108, 110, 111].

4. На основании обследования сооружений *берегозащиты* более чем по 100 водохранилищам страны автором проведена *оценка современного состояния различных видов креплений* с выявлением причин их разрушений и масштабов деформаций. Наиболее распространенными креплениями берегов и откосов являются крепления в виде железобетонных монолитных либо сборных плит. Определено, что деформации креплений представлены раскрытием межплиточных строительных, температурных и осадочных швов (зарегистрирована ширина раскрытия до 0,30 м) и развиваются под комплексным воздействием ветрового волнения, колебания уровней и других факторов [20, 22, 26–28, 32, 36, 38, 42, 48, 52, 59, 64, 68, 73, 75, 83, 86, 90, 91, 111, 112]. Экспериментально установлено, что в результате раскрытия швов плит, происходит разрушение и вымыв песчано-гравийной подготовки, образование пазух и ниш с последующей переработкой грунтового откоса, деформацией и разрушением крепления. Физическое моделирование деформаций откосов защищенных железобетонным креплением с различными ширинами раскрытия швов, позволило автору выделить три стадии развития обрушений и установить динамику развития линейных деформаций откоса при воздействии волнового и уровня режимов [7, 8, 15, 32, 42, 48, 50–52, 68, 90, 91, 111, 112]. Дополнительным условием для выбора рационального типа крепления явились лабораторные исследования распределения внутриводоемных и стоковых течений, выполненные на модели водохранилищ

Вилейско – Минской водной системы. Компьютерное моделирование течений с помощью численной модели, разработанной на основе уравнения Навье-Стокса, а также сравнение результатов математического и физического моделирования и данных натурных измерений, позволили автору оценить влияние режима течений на разрушение берегов и откосов дамб применительно к условиям водохранилищ руслового типа с коэффициентом удлиненности $k_y = 3,8-24,0$ [7,8, 28, 42, 43, 45, 75, 76, 83, 84, 89, 90, 91, 92].

5. При разработке *методики и алгоритмов торможения и стабилизации процесса переработки берега* применительно к условиям проектируемых и эксплуатируемых водохранилищ автором в основу был положен *эффект самоукрепления профиля береговой отмели*, который тормозит процесс переработки [7–11, 13, 20, 25, 28, 55, 62, 63, 66, 67]. Натурные исследования переработки берегов, образованных несвязными грунтами с повышенной неоднородностью ($\eta > 4,5$), *подтвердили способность берега к самоукреплению* путем образования естественной отмостки из крупнофракционного материала. Автором установлено, что в зависимости от содержания крупных частиц в размываемом грунте возможны две формы профиля равновесия. Лабораторные исследования переработки берега, сложенного несвязными грунтами с включениями крупнофракционного материала: гравия, гальки при различном их содержании P показали, что при $25\% < P < 50\%$ образуется устойчивый профиль с призмой у основания склона, а в случае $10\% < P < 25\%$ происходит равномерное покрытие отмели гравийно-галечниковым материалом [7–11, 13, 20, 25, 28, 55, 62, 63, 66, 67]. Обобщение натурных и лабораторных данных о процессе переработки берегов в условиях неоднородных грунтов, позволило автору разработать способ крепления берега «самоотмосткой», а также *методику расчета устойчивого профиля равновесия*. В основу методики положена идея принудительного внесения в определенный период времени на профиль, подверженный переработке по определенной схеме расчетного объема песчано-гравийной смеси, так называемого «оптимального» состава, имеющей крупнофракционные включения с содержанием $P = 25\%$ от объема отсыпаемого грунта, последующий размыв которой ведет к закреплению откоса «самоотмосткой» и, как следствие, к торможению и стабилизации процесса переработки в более короткие сроки.

6. *Разработаны алгоритмы ведения кадастра берегов и организации системы мониторинга берегозащитных и гидротехнических сооружений на водохранилищах (СМБВ) с использованием как наземных, так и дистанционных средств наблюдений. Разработаны структура, алгоритмы и программно - методическое обеспечение информационной системы «Береговые процессы на малых водохранилищах» (ДИССА - ДИПС), электронный кадастр берегов, а также база данных о состоянии сооружений* [7, 8, 24, 38, 40, 41, 51, 52, 56, 63, 64, 69 –73, 95, 102, 105]. На основе фактического материала натурных стационарных наблюдений и экспедиционных обследований водохранилищ страны автором *разработана карты районирования Республики Беларусь по развитию переработки берегов* [1,2, 5, 7, 8].

7. *Разработана методика расчета абразионного риска территорий, а также ущербов от переработки берегов - абразии с определением их составляющих: прямого, косвенного и упущенной выгоды* [6, 7, 26, 27, 30, 31, 33 -35, 39, 44, 60, 61,

65, 71, 74–80, 81, 86–89, 93, 96, 99, 106–109]. На примере водохранилищ Минской области построена карта абразионного риска [5 - 8]. Предложена *укрупненная методика определения экономической эффективности* различных типов сооружений берегозащиты, технологии торможения и стабилизации берегового процесса, получившей внедрение на водных объектах страны [3, 8, 20, 39, 40, 59, 60, 63, 64].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Представленные в настоящей диссертации результаты теоретических, натуральных и лабораторных исследований получили практическое применение и внедрение при проектировании водных объектов, прогнозировании береговых процессов и элементов берегозащиты, оценке рисков и ущербов от воздействия водоемов на прилегающие территории, учебном процессе в высших учебных заведениях страны.

Результатом исследований явилась разработка ряда нормативно-методических документов: «Методических рекомендаций по расчету незакрепленных верховых откосов дамб и плотин на малых водохранилищах и прудах мелиоративного назначения» (ЦНИИКИВР, Минск, 1989); «Рекомендаций по оценке воздействия малых водохранилищ на окружающую среду» (БГУ, Минск, 1994); «Методических рекомендаций по оценке воздействий малых водохранилищ на окружающую среду» (БГУ, Минск, 1996); «Методических рекомендаций по прогнозированию и оценке экологических рисков и ущербов» (КИИ МЧС Респ. Беларусь, Минск, 2007); «Методических рекомендаций по оценке рисков на искусственных водных объектах Республики Беларусь» (КИИ МЧС Респ. Беларусь, Минск, 2007); «Методики оценки размера ущерба от чрезвычайных ситуаций на водохранилищах энергетического назначения» (Ин-т экономики НАН Беларуси, Минск, 2011); «Методических рекомендаций по прогнозированию деформаций (переработки) берегов проектируемых и находящихся в эксплуатации водохранилищ Беларуси методом природных аналогов» (КИИ МЧС Респ. Беларусь Минск, 2011); а также «Методических рекомендаций по расчету устойчивости креплений верховых откосов дамб и плотин и берегозащитных сооружений на водохранилищах» (КИИ МЧС Респ. Беларусь, Минск, 2015), которые могут быть использованы при мониторинге прилегающих территорий, предупреждении чрезвычайных ситуаций на водных объектах, а также при проектировании берегозащитных мероприятий.

В рамках проведения диссертационного исследования автором получены:

- Патент «Лабораторная установка для определения коэффициента фильтрации»: пат. 11303, Респ. Беларусь, МПК G01N 9/00 G01N 15/08 /С.М. Пастухов, В. Е. Левкевич, Д.С. Миканович [112];

- Регистрационное свидетельство №1141303474 от 16.05.2013 г. о включении в Государственный регистр информационных ресурсов «Учебного программного обеспечения «Fire Quest Rassledovania» / А.Н. Камлюк, В.А. Малашевич, В.А. Кудряшов, В.Е. Левкевич, Д.И. Чиркун, А.В. Врублевский, А.В. Бузук, владелец информационного ресурса ГУО «Командно-инженерный институт» МЧС Республики Беларусь / НИРУП «Институт прикладных программных систем» (НИИРУП «ИППС») Министерства связи и информатизации Республики Беларусь.

Наряду с теоретическими проработками и внедрением в учебный процесс результатов исследований проводилась работа по внедрению результатов в проектные организации страны. В период 1996–2016 гг. были внедрены в производство следующие научно обоснованные предложения:

- по прогнозированию переработки берегов и берегоукреплению на оз. Нарочь и устройству берегозащитных пляжей в пос. Занарочь, п/л Зубренок (ОАО «Минсгражданпроект»), а также «Сосны» (РУП «БелНИИПГрадостроительства»);

- по проектированию пляжей на водохранилище «Дрозды» в районе пионерлагеря «Ракета» (ОАО «Минсгражданпроект»);

- по защите берега и устройству пирса на территории базы отдыха на Браславском озере (ТМ АРК Архитектора А.П. Назарова);

- по проектированию берегозащитного волноустойчивого пляжа на Вилейском водохранилище, объект: «Реабилитационный центр «Надежда – XXI век» (ОАО «Минсгражданпроект»);

- по прогнозированию развития береговых процессов на водохранилище Витебской ГЭС в составе проекта ОВОС (ЦНИИКИВР, Минприроды Республики Беларусь, г. Минск);

- по организации берегозащиты в составе строительного проекта объекта №121: «Строительство Витебской ГЭС на реке Западная Двина. Мероприятия по ложу водохранилища» (РУП «Белгипроводхоз», г. Минск) с экономическим эффектом, подтвержденным актами внедрения в объеме 5,941380 млрд руб.;

- по берегозащите на объекте: «Инженерные мероприятия по строительству Хотомельского перепуска Столинского района Брестской области» (РУП «Белгипроводхоз», г. Минск). Величина экономического эффекта по данному объекту составила 1,072 млрд руб. (в ценах ноября 2015 г.);

- по организации инженерной защиты и крепления откосов. выполненное по объекту № 068-14: «Реконструкция автомобильной дороги М–3 «Украина» – от Москвы через Калугу, Брянск до границы с Украиной (на Киев), на участках км 514+300 – км 518 + 494, км 519 + 146 – км 519+868, Брянской области» (ГП «Белгипродор») позволило получить экономический эффект в размере 250,663 млн руб. (в ценах ноября 2015 г.);

- по разработке информационно-прогнозной системы «Береговые процессы» в рамках научно-технической программы «КАСПИЙ» и Федеральной целевой Программы по защите берегов Азовского и Черного морей (ПНИИИС Госстроя России, г. Москва), в рамках которой получен экономический эффект от использования предложений автора в размере 150 тыс. руб. РФ;

- по разработке технико-экономического обоснования автоматизированной системы мониторинга берегов Каспийского моря (ПНИИИС Госстроя России, г. Москва) – экономический эффект от предложений автора – 250 тыс. долларов США.

Фактический суммарный экономический эффект от разработок автора, подтвержденный актами о внедрении, составляет: 7,264043 млрд руб. (в ценах 2015 г.) Республики Беларусь; 150 тыс.руб. Российской Федерации (в ценах 1997 г.) и 250 тыс.долларов США.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монографии

1. Широков, В.М. Водохранилища Белоруссии: природные особенности взаимодействия с окружающей средой / В.М. Широков, П.С. Лопух, Т.Д. Гречухина, Г.М. Базыленко, Ф.В. Саплюков, Ю.Н. Емельянов, А.Г. Гриневич, Л.В.Авсиевич, Л.В. Кириленко, Л.В. Ломако, Л.Л. Шляпников, Р.Г. Гурина, З.Г.Споли так, В.Е. Левкевич. – Минск, 1991. – 208 с.
2. Матвеев, А.В. Современная динамика рельефа Белоруссии /А. В. Матвеев, Л. А. Нечипоренко, А. И. Павловский, Г. И. Сачек, В. П. Зерницкая, Э.А. Крутоус, Л. А. Мастюлин, Н.А. Махнач, Г.И. Симакова, И.А. Шишонок, Л.С. Вольская, Г.А.Комышенко, О.П. Корсакова, В.Е. Левкевич. – Минск : Навукаі тэхніка, 1991. – 102 с.
3. Широков, В.М. Формирование берегов малых водохранилищ лесной зоны / В. М. Широков, П. С. Лопух, В. Е. Левкевич. – СПб. : Гидрометеоиздат, 1992. – 160 с.
4. Левкевич, В. Е. Экологический риск – закономерности развития, прогноз и мониторинг / В. Е. Левкевич. – Минск : Право и экономика, 2004. – 154 с.
5. Левкевич, В. Е. Проблемы экологических рисков и устойчивого развития территорий (на примере Республики Беларусь и Красноярского края России) / В.Е. Левкевич, В.В. Москвичев, П.Г. Никитенко, С.Ю. Солодовников, Н.Я.Шапарев, Ю.И. Шокин; под науч. ред. В.Е. Левкевича. – Минск : Право и экономика, 2011. – 315 с.
6. Левкевич, В. Е. Безопасность и риски устойчивого развития территорий / В.Е. Левкевич, А.М. Лепихин, В.В. Москвичев, П.Г. Никитенко, В.В. Ничепорчук, Н.Я. Шапарев, Ю.И. Шокин / Сиб. федер. ун-т. – Красноярск, 2014. – 224 с.
7. Левкевич, В. Е. Динамика берегов русловых, наливных и озерных водохранилищ Беларуси / В. Е. Левкевич. – Минск : Право и экономика, 2015. – 202 с.
8. Левкевич, В. Е. Динамическая устойчивость берегов водохранилищ Беларуси / В. Е. Левкевич. – Минск : Право и экономика, 2015. – 307 с.

Статьи, опубликованные в рецензируемых журналах

9. Левкевич, В. Е. Определение расчетных параметров береговой отмели, имеющей профиль равновесия с самоотмосткой / В. Е. Левкевич // Водное хозяйство и гидротехническое строительство : сб. науч. ст. – Минск, 1987. – № 16. – С. 55–63.
10. Левкевич, В. Е. Метод расчета деформаций искусственных пляжей, уположенных верховых откосов дамб и плотин на малых водохранилищах и прудах / В. Е. Левкевич // Водное хозяйство и гидротехническое строительство : сб. науч. ст. – Минск, 1988. – Вып. 1. – С.22 –25.
11. Левкевич, В. Е. Основные результаты стационарных геоморфологических исследований абразионно-эрозионных процессов на водохранилищах БССР/В.Е.Левкевич // Водное хозяйство и гидротехническое строительство : сб. науч. ст. – Минск : Выш. шк., 1988. – № 17. – С. 44 – 49.
12. Левкевич, В. Е. Активизация береговых деформаций на водохранилищах Беларуси, как фактор возникновения чрезвычайных ситуаций / В. Е. Левкевич,

В.В. Кобяк, М.С. Кукшинов // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2011. – № 1(29). – С. 64 – 76.

13. Левкевич, В. Е. Результаты стационарных геоморфологических исследований динамики абразионно-эрозионных процессов на водохранилищах Полесья / В. Е. Левкевич // Проблемы Полесья. – Минск, 1989. – Вып. 12. – С. 134–141.

14. Левкевич, В. Е. Динамика береговых процессов на водохранилищах озерного типа / В. Е. Левкевич, А. М. Макрицкий // Вестн. БГУ. Сер. 2. – Минск, 1989. – Вып. 3. – С. 58 –61.

15. Левкевич, В. Е. Влияние грунтовых вод на устойчивость абразионных берегов водохранилищ БССР / В. Е. Левкевич // Водное хозяйство и гидротехническое строительство : сб. науч. ст. – Минск, 1989. – № 18. – С. 37–43.

16. Левкевич, В. Е. Использование гидроэнергоресурсов и эксплуатация малых ГЭС в БССР / В. Е. Левкевич // Энергетика. Изв. Высших учебных заведений. – 1989. – № 5. – С.115–118.

17. Левкевич, В. Е. Районирование и типизация берегов водохранилищ Белоруссии (на примере Полесья) / В. Е. Левкевич // Проблемы Полесья. – Минск, 1990. – Вып. 13. – С. 159–166.

18. Левкевич, В. Е. Основы теории развития берегов малых водохранилищ / В.Е. Левкевич // Проблемы Полесья. – Минск, 1990. – Вып. 13. – С. 211–218.

19. Левкевич, В. Е. Методика и приборы для измерения расхода и направления движения влекомых наносов в береговой зоне малых водохранилищ /В. Е. Левкевич // Водное хозяйство и гидротехническое строительство : сб. науч. ст. – Минск, 1990. – № 19. – С. 57–66.

20. Левкевич, В. Е. Прикладные аспекты теории формирования берегов водохранилищ мелиоративного назначения / В. Е. Левкевич // Проблемы Полесья. – Минск, 1991. – Вып. 14. – С. 216–225.

21. Левкевич, В. Е. Условия и причины нарушения устойчивости берегов естественных озер, находящихся в подпоре / В. Е. Левкевич, А. М. Макрицкий // Вестн. БГУ. Сер. 2. – 1991. – Вып. 2. – С. 43–48.

22. Левкевич, В. Е. Опыт эксплуатации берегозащитных сооружений в Белоруссии / В. Е. Левкевич // Мелиорация и водное хозяйство. – 1991. – № 5. – С. 66–74.

23. Левкевич, В. Е. Некоторые аспекты теории процесса берегоформирования в условиях малых водохранилищ / В.Е. Левкевич // Водные ресурсы. – 1992. – Вып. 3. – С. 103–110.

24. Левкевич, В.Е. Создание и ведение кадастра берегов на основе СУБД «Береговая зона водохранилищ» / В.Е. Левкевич // Водное хозяйство и гидротехническое строительство: сб. науч. ст. – Минск, 1993. – Вып. 20. – С. 56–77.

25. Левкевич, В.Е. Расчет коэффициента разрушения на основе результатов лабораторных и натурных исследований профиля равновесия берегового склона / В.Е. Левкевич, В.В. Кобяк // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2012. – № 2(32). – С.69 – 77.

26. Касперов, Г.И. Учет технического состояния гидротехнических сооружений при предупреждении чрезвычайных ситуаций на водных объектах / Г.И. Касперов,

В.Е. Левкевич, С.М. Пастухов, В.А. Малашевич, А.В. Бузук // Труды БГТУ. – 2014. – № 2(166). – С. 146–149.

27. Касперов, Г. И. Методика оценки вероятности возникновения гидродинамических аварий при обособленном и каскадном расположении водохранилищ / Г.И. Касперов, В.Е. Левкевич, С.М. Пастухов // Труды БГТУ. – 2011. – № 2(141). – С. 279–286.

28. Левкевич, В.Е. К оценке возникновения чрезвычайных ситуаций гидрологического характера на Чижевском водохранилище / В. Е. Левкевич, С. М. Пастухов // Вестн. Команд.-инженер. ин-та МЧС Респ. Беларусь. – 2005. – № 1(3). – С. 23–34.

29. Левкевич, В.Е. Влияние абразионно-эрозионных процессов на трансформацию прибрежных зон водохранилищ Беларуси / В.Е. Левкевич, С. М. Пастухов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Прикладные науки. – 2006. – № 9. – С. 145–148.

30. Левкевич, В. Е. К методике оценки абразионного риска на водохранилищах Республики Беларусь / В.Е. Левкевич, Г.И. Касперов, С.М. Пастухов, В.В. Кобяк // Вестн. Команд.-инженер. ин-та МЧС Респ. Беларусь. – 2007. – № 1(5). – С. 56–64.

31. Левкевич, В.Е. Натурные исследования рискообразующих факторов на гидроузлах Республики Беларусь, расположенных в каскадах / В. Е. Левкевич, С.М. Пастухов // Вестн. Команд. - инженер. ин-та МЧС Респ. Беларусь. – 2008. – №1 (7). – С. 4-12.

32. Левкевич, В. Е. Ветровое волнение как фактор риска возникновения аварий на водохранилищах комплексного и мелиоративного назначения / В.Е. Левкевич, С. М. Пастухов // Мелиорация. – 2008. – №2 (60). – С. 59–70.

33. Левкевич, В.Е. Оценка ущерба от абразионных риск-процессов на водных объектах Республики Беларусь / В. В. Кобяк, В. Е. Левкевич [и др.] // Вестн. Команд.-инженер. ин-та МЧС Респ. Беларусь. – 2008. – № 2 (8). – С. 69–73.

34. Левкевич, В. Е. Показатели подобия абразионных процессов на искусственных и естественных водных объектах / В.Е. Левкевич, В.В. Кобяк // Вестн. Команд.-инженер. ин-та МЧС Респ. Беларусь. – 2008. – № 1 (7). – С. 13–18.

35. Левкевич, В. Е. Применение критериев подобия для оценки абразионных рисков на водохранилищах мелиоративного назначения, созданных на базе естественных озер / В. Е. Левкевич, В.В. Кобяк // Мелиорация. – 2009. – № 1 (61). – С. 72–79.

36. Левкевич, В. Е. Причины нарушения устойчивости защитных сооружений на искусственных водных объектах / В.Е. Левкевич, В.В. Кобяк, А.В. Бузук // Мелиорация. – 2009. – № 1 (61). – С. 79–85.

37. Левкевич, В. Е. Анализ экспериментальных данных по моделированию уровня режима каскадов водохранилища при возникновении аварийных ситуаций / В. Е. Левкевич, С.М. Пастухов // Вестн. Команд.-инженер. ин-та МЧС Респ. Беларусь. – 2010. – №12 (2). – С. 14–25.

38. Касперов, Г.И. Состав и структура электронной базы гидротехнических сооружений водохранилищ Республики Беларусь / Г.И. Касперов, В.Е. Левкевич, А. В. Бузук // Труды БГТУ. – 2013. – № 2(158). – С. 232– 233.

39. Левкевич, В. Е. Оценка вероятности возникновения гидродинамических аварий при каскадном расположении водохранилищ / В.Е. Левкевич, С.М. Пастухов,

В.А. Мильман // Вестн. Команд.-инженерин-та МЧС Респ. Беларусь. – 2011. – № 1 (13). – С. 61–71.

40. Левкевич, В. Е. Картографическая основа оперативной оценки природно-техногенных рисков и ущербов // В.Е. Левкевич, А.Н. Крючков, Г.И. Касперов, С.М. Пастухов // Вестн. Команд.-инженер. ин-та МЧС Респ. Беларусь. – 2008. – №2 (8). –С. 65–69.

41. Левкевич, В. Е. К созданию системы мониторинга риск-ситуаций на искусственных водных объектах / В.Е. Левкевич, В.А. Малашевич, В.А. Мильман // Вестн. Команд.-инженер. ин-та МЧС Респ. Беларусь. – 2011. – № 1(13). – С. 110–121.

42. Касперов, Г. И. Методика и результаты натурных обследований водных объектов Республики Беларусь как источников чрезвычайных ситуаций техногенного характера / Г.И. Касперов, В.Е. Левкевич [и др.] // Труды БГТУ. – 2012. – № 2 (149). – С. 236-238.

43. Касперов, Г. И. Моделирование режима стоковых течений водохранилищ на основе программных средств для оценки устойчивости берегоукрепительных сооружений / Г. И. Касперов, В.Е. Левкевич, С.М. Пастухов, А.В.Бузук // Труды БГТУ. – 2012. – № 2 (149). – С. 239–243.

44. Левкевич, В.Е. Районирование регионов Беларуси по развитию абразионного риска на водохранилищах / В. Е. Левкевич, Э.И. Михневич // Вестн. БрГТУ. – 2014. – № 2 (86). – С. 13–18.

45. Бузук, А.В. Исследование режима стоковых и вдольбереговых течений в русловых водохранилищах Беларуси для оценки их безопасной эксплуатации / А.В. Бузук, В. Е. Левкевич, В. В. Кобяк, // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. – 2015. – № 2 (92). – С. 115–118.

46. Левкевич, В.Е. Основы динамической устойчивости берегов водохранилищ Беларуси / В.Е. Левкевич // Вестн БГТУ. – 2016. – № 2 (98). – С. 19–24.

47. 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.

48. Касперов, Г. И. Методика лабораторных исследований проницаемости и устойчивости грунтов земляных плотин шламохранилищ / Г.И. Касперов, В.Е. Левкевич, С. М. Пастухов, Д.С. Миканович // Труды БГТУ. Сер. 1. – 2017. – № 1 (192). – С. 176–181.

Статьи в научно-технических и научно-практических журналах

49. Левкевич, В.Е. Динамика процесса формирования отмели абразионного берега в условиях малых водохранилищ / В. Е. Левкевич // Труды ЗапСибНИИгидромет. – М., 1987. – Вып. 76. – С.124–131.

50. Широков, В. М. Развитие берегов малых водохранилищ Северо-запада СССР и особенности их прогноза / В.М. Широков, П.С. Лопух, В.Е. Левкевич, Я.С. Про- бокс // Вопросы прикладной геоморфологии: сб. науч. ст. – Минск : Наука и техника, 1988. – С.42 – 47.

51. Левкевич, В. Е. Выбор и проектирование берегозащитных мероприятий с помощью автоматизированной информационно-справочной системы «АИССА» /

В. Е. Левкевич // Изыскания и проектирование гидромелиоративных систем: сб. науч. ст. – М., 1988. – Вып. 8. – С.14 – 22.

52. Левкевич, В. Е. Повышение эффективности расчета берегоохранных мероприятий при использовании информационно-справочной системы «Береговые процессы на малых водохранилищах» / В.Е. Левкевич // Мелиорация и водное хозяйство. – 1989. – № 12. – С. 18–24.

53. Левкевич, В. Е. Типизация берегов водохранилищ Полесья (на примере Украинской и Белорусской ССР) / В.Е. Левкевич, В.Л. Максимчук // Гидромелиорация и гидротехнические сооружения. – Львов, 1989. – Вып. 17. – С. 51–55.

54. Левкевич, В. Е. К теории формирования равновесной береговой линии водохранилищ с малыми линейными размерами / В.Е. Левкевич // Динамика и термика рек, водохранилищ и морей : сб. науч. ст. – М., 1989. – Т. 1. – С. 46–51.

55. Левкевич, В. Е. Определение интегральных характеристик равновесной береговой отмели с самоотмосткой / В.Е. Левкевич // Мелиорация и водное хозяйство : сб. науч. ст. – Киев, 1990. – Вып. 73. – С. 67–78.

56. Левкевич, В. Е. Диалоговая справочная система «Береговые процессы на малых водохранилищах» / В. Е. Левкевич, В.С. Розовский // Передовой производ. и науч.-техн. опыт в мелиорации и водном хозяйстве, рекомендуемый для внедрения : сб. ст. – М., 1990. – Вып. 3. – С. 30 –39.

57. Шевелюк, А. А. Оценка влияния малых водохранилищ на ландшафты верхнего и нижнего бьефов с помощью дистанционных методов / А. А. Шевелюк, В. Е. Левкевич // География и природные ресурсы. – 1990. – № 4. – С. 89–97.

58. Левкевич, В. Е. Применение статистических методов для оценки береговых процессов на малых равнинных водохранилищах Белоруссии / В.Е. Левкевич, В. И. Гурарий, В. С. Розовский // Изв. Всесоюз. геогр. общества. – 1991. – Т. 123, № 1. – С. 123–129.

59. Левкевич, В. Е. Оптимизация параметров берегозащитных сооружений на малых водохранилищах / В.Е. Левкевич // Водные ресурсы, их использование и охрана : сб. науч. ст. / ЦНИИКИВР. – Минск, 1992. – С. 78–83.

60. Левкевич, В.Е. Районирование территории Белоруссии по интенсивности процесса абразии на водохранилищах / В.Е. Левкевич // Гидрографическая сеть Белоруссии и регулирование речного стока. – Минск, 1992. – С. 112–117.

61. Левкевич, В.Е. Принципы и критерии районирования региона по абразионному риску на водохранилищах / В.Е. Левкевич // Инженерные изыскания в XXI веке. – М., 2003. – С. 110–115.

62. Левкевич, В.Е. Развитие современных береговых процессов на искусственных водоемах Беларуси / В.Е. Левкевич, И.И. Кирвель // Брэсцкі геаграфічны веснік. – 2004. – Т. IV, вып. 1. – С. 47–49.

63. Левкевич, В. Е. Технология мониторинга и оценки природных рисков на водных объектах Беларуси / В.Е. Левкевич, В.В. Анищенко, В.А. Мильман // Актуальные проблемы экономики. – 2010. – № 10 (112). – С. 307–314.

64. Анищенко, В.А.. Мониторинг природных рисков на водных объектах / В.А. Анищенко, В.Е. Левкевич, В.А. Мильман, Г.И. Касперов // Наука и инновации. – 2015. – № 6 (124). – С. 20–23.

Материалы и доклады конференций

65. Левкевич, В.Е. Относительные показатели риска возникновения гидродинамических аварий в условиях Республики Беларусь / В. Е. Левкевич, С.М. Пастухов // Конгресс ЭКВАТЭК-2008, сб. докл., Москва, 3-6 июня 2008 г. – М., 2008. – С. 98–103.
66. Левкевич, В.Е. Основные положения теории формирования берегов и управления экзогенными процессами в условиях малых равнинных водохранилищ / В. Е. Левкевич // Экологические аспекты теоретической и прикладной геоморфологии : материалы Междунар. конф. «III Щукинские чтения»: Москва, 16-17 мая 1995 г. – М., 1995. – С. 117–120.
67. Левкевич, В.Е. Методика и технология управления береговыми процессами в условиях водохранилищ / В.Е. Левкевич // Современные проблемы изучения берегов : материалы XIX Междунар. конф. – СПб., 1995. – С. 76–82.
68. Левкевич, В. Е. Условия устойчивости грунтовых откосов, формируемых под действием динамических и статических нагрузок / В. Е. Левкевич // Материалы I съезда Почвоведов Беларуси. – Гомель, 1995. – С. 111–113.
69. Левкевич, В. Е. Базы данных и система обработки информации (кадастры берегов водохранилищ) / В.Е. Левкевич, А.А. Ковалев, А.И. Павловский, С.И. Кононович // Экологические аспекты теоретической и прикладной геоморфологии : материалы Междунар. конф. «III Щукинские чтения»: Москва, 16-17 мая 1995 г. – М., 1995 – С. 98–103.
70. Левкевич, В.Е. Мониторинг береговой зоны водных объектов естественного искусственного происхождения с помощью средств дистанционного зондирования / В.Е. Левкевич, А.А. Ковалев, А.И. Павловский // Экологические аспекты теоретической и прикладной геоморфологии : материалы Междунар. конф. «III Щукинские чтения»: Москва, 16-17 мая 1995 г. – М., 1995. – С. 86–89.
71. Левкевич, В.Е. Комплекс показателей, используемых при ведении информационной базы системы риск - мониторинга / В.Е. Левкевич // Анализ и оценка природных рисков в строительстве: сб. докл. Междунар. конф., Москва, 12-13 нояб. 1997 г. – М., 1997. – С. 54–62.
72. Левкевич, В.Е. Информационно-программное обеспечение системы мониторинга эрозионных процессов на внутренних водных объектах / В. Е. Левкевич // Применение оптических методов в экологии : материалы Междунар. конф., СПб., 5-6 июня 1997 г. – СПб., 1997. – С. 36–39.
73. Левкевич, В. Е. Контроль современного состояния береговой зоны водных объектов и выявление тенденций развития риск-ситуаций на основе применения современных информационных и ГИС-технологий / В.Е. Левкевич // Оценка и управление природными рисками : сб. докл. междунар. конф. – М., 2000. – С. 44–49.
74. Левкевич, В. Е. Оценка масштабов абразионного риска на водохранилищах Полесья / В.Е. Левкевич // Природная среда Полесья: особенности и перспективы развития : материалы междунар. конф.: Брест, 10-11 сент. 2004 г./ ООП НАН Беларуси. – Брест, 2004. – С. 34–41.
75. Левкевич, В. Е. Оценка риска возникновения ЧС на гидроузлах Республики Беларусь / В.Е. Левкевич, С.М. Пастухов // Предупреждение и техногенная

безопасность : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Черкассы, 1–2 дек. 2005 г. / Черкас. ин-т им. Героев Чернобыля ; – Черкассы, 2005. – С. 142–143

76. Левкевич, В. Е. Прогнозирование чрезвычайных ситуаций на водных объектах Беларуси / В.Е. Левкевич // ЭКВАТЕК – 2006: материалы конгресса., Москва, 30. мая – 2 июня 2006 г. – М., 2006. – С. 122–125.

77. Левкевич, В. Е. Оценка развития абразионного риска в береговой зоне водных объектов Беларуси на основе применения информационных и ГИС-технологий / В.Е. Левкевич, С.М. Пастухов // Обработка информации и управление в чрезвычайных и экстремальных ситуациях : докл. V Междунар. конф., Минск, 23–24 окт. 2006 г.: в 2 т. / ОИПИ НАН Беларуси. – Минск, 2006. – Т. 1. – С. 206–209.

78. Левкевич, В.Е.. Районирование территории региона по экологическим рискам на основе данных дистанционного зондирования / В. Е. Левкевич // Материалы III Белорусского космического конгресса, Минск, 23–25 окт. 2007г.: ОИПИ НАН Беларуси. – Минск, 2007. – С. 168–170.

79. Левкевич, В. Е. Оценка влияния процессов переработки береговых склонов на возникновение гидродинамических аварий / В.Е. Левкевич, С. М. Пастухов, В.В. Кобяк // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация : сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 6–8 июня 2007 г. / НИИ ПБиЧС МЧС Респ. Беларусь. – Минск, 2007. – С. 160–166.

80. Левкевич, В. Е. Оценка риска возникновения чрезвычайных ситуаций на гидроузлах, расположенных в каскадах / В.Е. Левкевич, С.М. Пастухов // Региональные проблемы экологии: пути решения : материалы IV Междунар. эколог. симпозиума, Полоцк, 21–23 нояб. 2007 г. : в 3 т. / Полоц. гос. ун-т . – Новополоцк, 2007. –Т. 1.– С. 78–82.

81. Левкевич, В. Е. Оценка возникновений абразионных риск-процессов на водохранилищах Республики Беларусь / В.Е. Левкевич, С.М. Пастухов // ГЕОРИСК–2009: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 21 мая 2009г.: в 2 т. / РУДН. – М., 2009. – Т. 2. – С. 95–99.

82. Кобяк, В. В. Моделирование абразионных процессов водохранилищ Республики Беларусь / В.В. Кобяк, В.Е. Левкевич // Чрезвычайные ситуации: теория, практика, инновации : материалы науч.-практ. конф., Гомель, 27–28 мая 2010 г. : в 2 ч. / Гомел. инженер. ин-т . – Гомель, 2010. – Ч. 1. – С. 112–113.

83. Левкевич, В.Е. О методике проведения натурных обследований гидро технических сооружений на искусственных водных объектах Беларуси /В. Е. Левкевич, В.А. Малашевич // Чрезвычайные ситуации: теория, практика, инновации : материалы Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 ч. – Гомель, 2012. – Ч. 1. – С. 92–93.

84. Бузук, А. В. Математическое и гидравлическое моделирование конвективной диффузии загрязнений в русловых водохранилищах / А. В. Бузук, В. Е. Левкевич, А. А. Новиков // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 9-й Междунар. науч.-техн. конф. / БНТУ. – Минск, 2012. – Т. 3. – С. 319.

85. Левкевич, В. Е. Закономерности развития деформаций грунтовых откосов дамб и плотин и естественных береговых склонов в условиях водных объектов Беларуси /В. Е. Левкевич, Э. И. Михневич // Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания : материалы IV Междунар. науч.-практ. конф.: Брест, 25–27 сент., 2013 г./БрГТУ. – Брест, 2013. – С. 122–124.

86. 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. / МГУ. – М.. 2013. – С. 93–97.

87. Левкевич В. Е. О прогнозировании абразионного риска на водохранилищах Беларуси / В.Е. Левкевич, В.В. Кобяк // Природные риски: анализ, оценка, картографирование : материалы междунар. науч. конф.: Москва, 22-23 мая 2013 г. – М.. 2013.. – С. 98–103.

88. Бурима, Л. Я. Методическая основа оценки и визуализации пространственного распределения ущербов от возможных чрезвычайных ситуаций на малых равнинных водохранилищах с применением ГИС-технологий / Л.Я. Бурима, В.Е. Левкевич, Л.В. Макущенко // Природные риски: анализ, оценка, картографии рование : материалы междунар. науч. конф.: Москва, 22-23 мая 2013 г. – М.. 2013. – С. 87–92.

89. Левкевич, В. Е. Современные методы оценки абразионного риска на водохранилищах Беларуси / В.Е. Левкевич, Э.И. Михневич, В.В. Кобяк // Современные проблемы ландшафтоведения и геоэкологии : материалы Междунар. конф.: Минск, 14-17 окт., 2014 г. – Минск, 2014. – С. 48–50.

90. Левкевич, В. Е. Инновационные методы инженерной защиты размываемых верхних откосов дамб и плотин на водных объектах Беларуси / В. Е. Левкевич // Перспективы развития и организационно-экономические проблемы управления производством : материалы междунар. науч.-техн. конф. – Минск, 2015. – Т. 1. – С. 159–179.

91. Левкевич, В. Е. Организация и результаты комплексных исследований устойчивости крепления грунтовых откосов в условиях водохранилищ при развитии чрезвычайных ситуаций / В.Е. Левкевич, А.В. Бузук, А.А. Новиков // Перспективы развития и организационно-экономические проблемы управления производством : материалы междунар. науч.-техн. конф.: Минск, 13 -14 мая Минск: Право и экономика, 2015. – Т. 2. – С. 32–48.

92. Михневич, Э.И. Исследование влияния внутриводоемных течений на развитие процесса абразии естественных берегов русловых водохранилищ Беларуси / Э. И. Михневич, В. Е. Левкевич // Доклады 30-го пленарного межвуз. координ. совещ. по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов.: Наб.Челны, 6-8 окт., 2015 г. – Набережные Челны, 2015. – С. 172–176.

93. Левкевич, В.Е. Методические подходы к оценке ущерба от проявления абразионно-эрозионных процессов на водохранилищах Полесья / В. Е. Левкевич, Л. Я. Бурима // Проблемы рационального использования природных ресурсов и устойчивое развитие Полесья : доклады Междунар. науч. конф: Минск, 14 июня – 17 сент., 2016 г. – Минск, 2016. – С. 377–381.

94. Левкевич, В. Е. Масштабы и динамика развития экзогенных процессов на водохранилищах Беларуси / В. Е. Левкевич // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Запада восточно-европейской платформы: материалы Междунар. науч. конф.: 31 июня – 3 авг., 2017 г.. – Минск, 2017. – С. 286–290.

Тезисы докладов

95. Левкевич, В. Е. Закономерности развития береговой зоны водохранилищ озерного типа Беларуси / В. Е. Левкевич, В.В.Кобяк, А.В. Бузук // Биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды: тезисы докл. Междунар. науч. конф.: Минск-Нарочь, 12-17 сент. ,2011 г. /БГУ. – Минск, 2011, – С. 201.

96 Левкевич, В. Е. Риск возникновения чрезвычайных ситуаций на водохранилищах Полесья / В. Е. Левкевич, С. М. Пастухов // Природная среда Полесья: особенности и перспективы развития : тезисы докл. IV Междунар. науч. конф., Брест, 10–12 сент. 2008 г. / Полесский аграрно-эколог. ун-т . – Брест, 2008. – С. 255.

97. Левкевич, В. Е. Применение метода аналогий при прогнозировании абразионных-риск процессов на водных объектах Республики Беларусь /В. Е. Левкевич, В.В. Кобяк // Природная среда Полесья: особенности и перспективы развития: тезисы докл. IV Междунар. науч. конф., Брест,10–12сент. 2008 г. / Полес. аграр.-эколог. ун-т. – Брест, 2008. – С. 256.

98. Левкевич, В. Е. Прогнозирование абразионных риск-процессов на водных объектах Республики Беларусь / В.Е. Левкевич, В.В. Кобяк //Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация : тезисы докл. V Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 8–10 июля 2009 г. : в 2 т. / НИИ ПБ и ЧС МЧС Респ. Беларусь. – Минск, 2009. – Т. 2. – С. 182–184.

99. Левкевич, В. Е. Оценка вероятности возникновения абразионных риск-процессов на водохранилищах Беларуси / В.Е. Левкевич, С.М. Пастухов // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация : тезисы докл. междунар. науч.-практ. конф., Минск, 8–9 июля 2009 г. : в 3 т. / НИИ ПБ и ЧС МЧС Респ. Беларусь . – Минск, 2009. – Т. 2. –С. 185–186.

100. Левкевич, В. Е. Двухфазная модель развития деформации береговых склонов водохранилищ при трансформации гидрологического режима /В. Е. Левкевич, В. В. Кобяк // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация : тезисы докл. VI Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 8–9 июня 2011 г. : в 2 т. / НИИ ПБ и ЧС МЧС Респ. Беларусь. – Минск, 2011. – Т. 1. – С. 410–412.

Препринты, курсы лекций и методические рекомендации

101. Левкевич, В. Е. Методические рекомендации по расчету незакрепленных верховых откосов дамб и плотин на малых водохранилищах и прудах мелиоративного назначения / В. Е. Левкевич / ЦНИИКИВР. – Минск, 1989. – 40 с.

102. Левкевич, В. Е. Ведение кадастра берегов водных объектов (озер, водохранилищ, прудов) с помощью ПЭВМ / В. Е. Левкевич, А. А. Ковалев, А. И. Павловский. – Минск, 1994. – 36 с. – (Препринт / АН Беларуси ; № 29).

103. Широков, В. М. Рекомендации по оценке воздействия малых водохранилищ на окружающую среду / В. М. Широков, В. Е. Левкевич, П. С. Лопух. – Минск : БГУ, 1994 – 116 с.

104. Широков, В. М. Методические рекомендации по оценке воздействия малых водохранилищ на окружающую среду / В. М. Широков, П. С. Лопух, В. Е. Левкевич. – Минск, БГУ, 1996. – 68 с.

105. Левкевич, В. Е. Экологический мониторинг берегов (coastmonitoring) водных объектов Беларуси / В. Е. Левкевич, А. А. Ковалев, А. И. Павловский. – Минск, 1996. – 29 с. – (Препринт / РНТЦ «Экомир», АН Беларуси ; № 33).

106. Касперов, Г. И. Защита от чрезвычайных ситуаций природного характера : курс лекций / Г. И. Касперов, В. Е. Левкевич / Команд.-инженер. ин-т МЧС Респ. Беларусь. – Минск, 2006. – 87 с.

107. Методические рекомендации по оценке рисков на искусственных водных объектах Республики Беларусь / Г.И. Касперов, В. Е. Левкевич, С.М. Пастухов, М.С.Кукшинов/ Команд.-инженер. ин-т МЧС Респ. Беларусь. – Минск, 2007. – 55 с

108. Левкевич, В. Е. Методические рекомендации по прогнозированию и оценке экологических рисков и ущербов / В. Е. Левкевич / Команд.-инженер. ин-т МЧС Респ. Беларусь. – Минск, 2007. – 57 с.

109. Левкевич, В. Е. Методика оценки размера ущерба от чрезвычайных ситуаций на водохранилищах энергетического назначения / В.Е. Левкевич, З.Г.Патеева, А. В. Пликус / И-т экономики НАН Беларуси. – Минск : Право и экономика. – 2011. – 47 с.

110. Левкевич, В. Е. Методические рекомендации по прогнозированию деформации (переработки) берегов проектируемых и находящихся в эксплуатации водохранилищ Беларуси методом природных аналогов / В.Е. Левкевич, В.В. Кобяк. – Минск : Право и экономика, 2011. – 46 с.

111. Левкевич, В. Е. Методические рекомендации по оценке устойчивости креплений верховых откосов дамб, плотин и берегов водохранилищ Беларуси / В.Е. Левкевич, А.А. Новиков, А. В. Бузук / Команд.-инженер. ин-т МЧС Респ. Беларусь. – Минск, 2015. – 54 с.

Патенты

112. Лабораторная установка для определения коэффициента фильтрации: пат. 11303, Респ. Беларусь, МПК G01N 9/00 G01N 15/08 / С.М. Пастухов, В. Е. Левкевич, Д.С. Миканович; заявитель ГУО «Командно-инженерный институт» МЧС Республики Беларусь № и 20160091; заявл. 15.11.2016; опубл. 28.02.2017 // Афіцыйны бюл. / Нац. Цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2017. – 01. – С.165.

РЭЗЮМЕ

Ляўкевіч Віктар Яўгенавіч

ДЫНАМІЧНАЯ ЎСТОЙЛІВАСЦЬ БЕРАГОЎ ВАДАСХОВІШЧАЎ БЕЛАРУСІ

Ключавыя словы: вадасховішча, абразія, перапрацоўка берагавых схілаў, тэорыя фарміравання берагоў, профіль дынамічнай раўнавагі, крытэрыі ўстойлівасці, метады прагнозу, маніторынг берагоў, тармажэнне і стабілізацыя, берагаабарона, абразійныя рызыкі.

Мэта працы. Ацэнка дынамічнай ўстойлівасці берагоў вадасховішчаў Беларусі; распрацоўка тэарэтычных асноў фарміравання профілю раўнавагі абразійных берагоў, складзеных бязладнымі пясчанымі грунтамі рознай неаднастайнасці; абгрунтаванне новых метадаў прагнозу, берагаабарона, тармажэння і стабілізацыі працэсу.

Метады даследавання і апаратура. Агульная метадалогія работы ўключае спалучэнне натуральных назіранняў, лабараторных і тэарэтычных даследаванняў, а таксама колькаснага мадэлявання дэфармацый берагоў вадасховішчаў і грунтовых адхонаў дамбаў і плацін. Для рэгістрацыі параметраў пры правядзенні натуральных і лабараторных даследаванняў выкарыстоўваліся: волномерная рэйка, нівелір, электронны анемометр, камплект гідралагічных і баціметрычных карт, GPS-сістэма, лазерны далямер, пробадборнік, батометр, мерныя іголкі, наносалоўнікі, фота- і відэакамеры.

Атрыманыя вынікі і іх навізна. Праведзена ацэнка маштабаў і дынамікі працэсаў дэфармацыі берагоў на вадасховішчах Рэспублікі Беларусь рознага тыпу. Атрыманы значэння дэфармацыі і ацэнена ўстойлівасць берагавых схілаў на аснове лабараторных доследаў пры сумесным уздзеянні хвалевага і узроўневую рэжымаў. Распрацавана тэорыя развіцця абразійных берагоў вадасховішчаў Беларусі, а таксама комплекс метадаў прагнозу перапрацоўкі берагоў і дэфармацый адхонаў. Праведзена ацэнка эфектыўнасці берагаабаронных збудаванняў і распрацаваны спосаб абароны на аснове выкарыстання з'явы «самаатмоўкі». Падрыхтаваны прапановы па ацэнцы абразійнага рызыка з пабудовай карт раянавання краіны па перапрацоўцы берагоў і абразійнаму рызыку. Распрацаваны прапановы па стварэнні сістэмы маніторынгу берагоў з выкарыстаннем наземных і дыстанцыйных сродкаў.

Вобласць прымянення. Праектныя арганізацыі, вышэйшыя навучальныя ўстановы, Міністэрства: прыродных рэсурсаў, па надзвычайных сітуацыях, сельскай гаспадаркі і харчавання, будаўніцтва і архітэктуры і інш.

РЕЗЮМЕ

Левкевич Виктор Евгеньевич

ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ БЕРЕГОВ ВОДОХРАНИЛИЩ БЕЛАРУСИ

Ключевые слова: водохранилище, абразия, переработка береговых склонов, теория формирования берегов, профиль динамического равновесия, критерии устойчивости, методы прогноза, мониторинг берегов, торможение и стабилизация, берегозащита, абразионный риск.

Цель работы. Оценка динамической устойчивости берегов водохранилищ Беларуси; разработка теоретических основ формирования профиля равновесия абразионных берегов, сложенных несвязными песчаными грунтами различной неоднородности; обоснование новых методов прогноза, берегозащиты, торможения и стабилизации процесса.

Методы исследования и аппаратура. Общая методология работы включает сочетание натуральных наблюдений, лабораторных и теоретических исследований, а также численного моделирования деформаций берегов водохранилищ и грунтовых откосов дамб и плотин. Для регистрации параметров при проведении натуральных и лабораторных исследований использовались: волномерная рейка, нивелир, электронный анемометр, комплект гидрологических и батиметрических карт, GPS-система, лазерный дальномер, проботборники, батометр, мерные иглы, наносоуловители, фото- и видеокамеры.

Полученные результаты и их новизна. Проведена оценка масштабов и динамики процессов деформации берегов на водохранилищах Республики Беларусь различного типа. Получены значения деформации и оценена устойчивость береговых склонов на основе лабораторных опытов при совместном воздействии волнового и уровневого режимов. Разработана теория развития абразионных берегов водохранилищ Беларуси, а также комплекс методов прогноза переработки берегов и деформаций откосов. Проведена оценка эффективности берегозащитных сооружений и разработан способ защиты на основе использования явления «самоотмостки». Подготовлены предложения по оценке абразионного риска с построением карт районирования страны по переработке берегов и абразионному риску. Разработаны предложения по созданию системы мониторинга берегов с использованием наземных и дистанционных средств.

Область применения. Проектные организации, высшие учебные заведения, Министерства: природных ресурсов, по чрезвычайным ситуациям, сельского хозяйства и продовольствия, строительства и архитектуры и др.

SUMMARY

Victor Levkevich

DYNAMIC STABILITY OF RESERVOIR SHORES IN BELARUS

Keywords: Reservoir, abrasion, shore slopes treatment, the theory of shore formation, dynamic balance profile, stability criteria, forecast methods, shore monitoring, braking and stabilization, shore protection, abrasion risk.

Goal. Assessment of the dynamic stability of reservoir shores in Belarus; development of theoretical bases of formation of the balance profile of abrasion shores constructed with incoherent sandy soils of different heterogeneity; substantiation of new methods of forecast, shore protection, braking and stabilization.

Methods of research and equipment. The general methodology of research includes combination of field observations, laboratory and theoretical research and numerical modeling of reservoir shores deformation and ground slopes of dams and dikes. To register the indicators while conducting field and laboratory research the following equipment was used: wave staff, meter, electronic wind gauge, a set of hydrological and bathymetric maps, GPS-system, laser rangefinder, samplers, bathometer, measuring pins, silt traps, photo and video cameras.

Findings and newness. Assessment of the scale of shore deformation of different types of reservoirs in the Republic of Belarus is carried out. Deformation values are obtained and stability of shore slopes is evaluated on the basis of the laboratory experiments under combined influence of wave and level modes. Developed is the theory of the development of reservoir abrasion shores in Belarus and a set of forecast methods of shore treatment and slopes deformation. Assessment of the efficiency of shore protective constructions is carried out and the method of protection is developed on the basis of armoring use. Prepared are the proposals for abrasion risk assessment with the development of slopes treatment and abrasion risk maps. Proposals for the establishment of the system of shore monitoring with the use of ground and remote devices are developed.

Field of application. Design organizations, higher educational establishments, the Ministry of Natural Resources and Environmental Protection, the Ministry of Emergency Situations, the Ministry of Agriculture and Food, the Ministry of Construction and Architecture etc.

Левкевич Виктор Евгеньевич

**ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ БЕРЕГОВ
ВОДОХРАНИЛИЩ БЕЛАРУСИ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени докторатехнических наук
по специальности 05.23.07 – гидротехническое и мелиоративное
строительство

Подписано в печать 25.09.2017 Формат 60x84_{1/16} Бумага офсетная

Гарнитура Roman Печать цифровая Усл.печ.л. 3,3 Уч.изд.л. 3,4

Тираж 60 экз. Заказ № 2453

ИООО «Право и экономика» 220072 Минск Сурганова 1, корп. 2

Тел. 284 18 66, 8 029 684 18 66

E-mail: pravo-v@tut.by; pravo642@gmail.com Отпечатано на издательской системе

KONICA MINOLTA в ИООО «Право и экономика»

Свидетельство о государственной регистрации издателя,

изготовителя, распространителя печатных изданий, выданное

Министерством информации Республики Беларусь 17 февраля 2014 г.

в качестве издателя печатных изданий за № 1/185