

DOI 10.22363/1815-5235-2023-19-1-110-116

EDN: HKIUSI

УДК 502/504:627.8:69.05


НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH ARTICLE

## Оценка основных параметров волнового воздействия на пологие откосы берегов крупных водных объектов

О.Н. Черных<sup>1</sup>  , А.В. Бурлаченко<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup>Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Москва, Российская Федерация

 chon36@mail.ru

### История статьи

Поступила в редакцию: 23 ноября 2022 г.

Доработана: 25 января 2023 г.

Принята к публикации: 30 января 2023 г.

**Аннотация.** При проектировании берегозащитных мероприятий особое внимание обращается на создание и расширение естественного пляжного откоса на побережье водного объекта. Для назначения геометрических размеров относительно устойчивых пляжных откосов необходимо оценить взаимосвязь волнения с учетом режима уровней, характерного для данного участка берега. Цель работы – изучение особенностей трансформации профиля волны на мелководье и проведение сопоставительного анализа теории и эксперимента. Исследования выполнялись в волновом лотке, где волны воспроизводились качающимся щитом. Рассмотрены особенности трансформации профиля волн на уменьшающихся глубинах мелководья крупного водного объекта. Дана оценка изменения кинематических характеристик волны, набегающей в мелководной зоне на неукрепленный пляжный склон, имеющий заложение 10, 20 и 30. Приводятся и анализируются результаты экспериментальных исследований, выявивших влияние крутизны волны на кинематические характеристики и особенности трансформации волны на мелководье. Выполнен сопоставительный анализ теоретических решений и данных экспериментов с оценкой области их применимости. В целом профиль волны и горизонтальная составляющая орбитальной скорости при прохождении гребня волны удовлетворительно согласуются с расчетами по теории Стокса при относительных глубинах более 0,07. Установлено, что для условий мелководья на относительную высоту гребня волны воздействующей на пляжный откос приурезовой зоны берега крупного водного объекта наиболее заметное влияние оказывает заложение откоса, с увеличением которого от 10 до 30 величина крутизны волны может возрасти в 1,2 раза.

**Ключевые слова:** берегозащита, разрушение, гребень волны, мелководье, подпорные грунтовые сооружения

### Для цитирования

Черных О.Н., Бурлаченко А.В. Оценка основных параметров волнового воздействия на пологие откосы берегов крупных водных объектов // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2023. Т. 19. № 1. С. 110–116. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2023-19-1-110-116>

**Черных Ольга Николаевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры гидротехнических сооружений, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Российская Федерация, 127550, Москва, Большая Академическая, д. 44; ORCID: 0000-0003-2905-446X, eLIBRARY SPIN-код: 7757-7969; chon36@mail.ru

**Бурлаченко Алена Владимировна**, кандидат технических наук, доцент кафедры гидравлики, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Российская Федерация, 125319, Москва, Ленинградский пр-кт, д. 64; ORCID: 0000-0003-2617-9515, eLIBRARY SPIN-код: 3155-2490; chtara@mail.ru

© Черных О.Н., Бурлаченко А.В., 2023



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

## Estimation of the main parameters of wave action on the gentle slopes of the banks of large water bodies

Olga N. Chernykh<sup>1</sup> , Alena V. Burlachenko<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup>Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russian Federation

✉ chon36@mail.ru

### Article history

Received: November 23, 2022

Revised: January 25, 2023

Accepted: January 30, 2023

**Abstract.** When designing coastal protection measures, special attention is paid to the creation and expansion of a natural beach slope on the coast of a water body. To assign geometric dimensions to relatively stable beach slopes, it is necessary to evaluate the relationship of waves, taking into account the level regime characteristic of a given section of the coast. The aim of the research is to explore the features of the transformation of the wave profile in shallow water and to conduct a comparative analysis of theory and experiment. The studies were carried out in a wave tray, where the waves were reproduced by a swinging shield. The features of the transformation of the wave profile at decreasing depths of the shallow water of a large water body are considered. An assessment is given of the change in the kinematic characteristics of a wave incident in a shallow water zone on an unfortified beach slope with a depth of 10, 20 and 30. The results of experimental studies are presented and analyzed, as a result of which the influence of the wave steepness on the kinematic characteristics and features of wave transformation in shallow water is revealed. A comparative analysis of theoretical solutions and experimental data with an assessment of the area of their applicability is carried out. On the whole, the wave profile and the horizontal component of the orbital velocity during the passage of the wave crest are in satisfactory agreement with the calculations according to the Stokes theory at relative depths of more than 0.07. It has been established that for shallow water conditions the relative height of the wave crest affecting the beach slope of the near-shore zone of the coast of a large water body is most noticeably affected by the slope, with an increase from 10 to 30 the magnitude of the wave steepness can increase by 1.2 times.

**Keywords:** bank protection, wave crest failure, shallow water, beach slopes, retaining ground constructions, retaining ground structures

### For citation

Chernykh O.N., Burlachenko A.V. Estimation of the main parameters of wave action on the gentle slopes of the banks of large water bodies. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2023;19(1):110–116. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2023-19-1-110-116>

### Введение

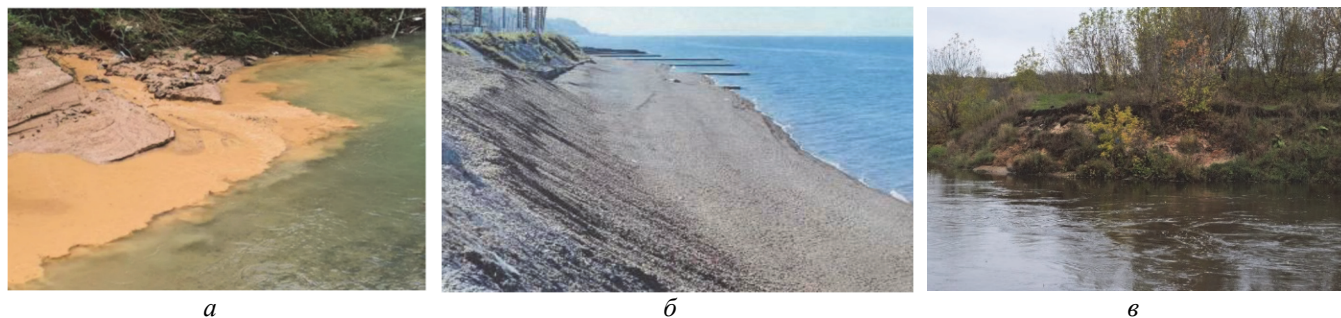
Защита от волновых воздействий береговых участков водных объектов рекреационного назначения, откосов приканальных земляных дамб, прибрежных транспортных магистралей, откосов судоходных и крупных мелиоративных каналов и водотоков, подвергающихся разрушению под действием как природных – ветер, волны, дождь, снег, лед, выходы грунтовых вод и т. д., так и искусственных (производственных) – колебания уровня от работы шлюзов, затворов водопропускных сооружений, насосных станций, действия волн проходящих судов, работы землечерпательных снарядов, когда в этом возникает необходимость, факторов, осуществляется с помощью специальных гидротехнических сооружений (ГТС). В мировой практике для проведения берегозащитных мероприятий в прибрежных зонах используются различные классические типы пляжеудерживающих ГТС<sup>1</sup> [1]. Среди них можно выделить следующие основные типы [2]: галечные и песчаные пляжи (рис. 1); покрытия из камня или фасонных массивов;

**Olga N. Chernykh**, Ph.D. Tech. Sciences, Associate Professor of the Department of Hydraulic Structures, Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev; 49 Timiryazevskaya St, Moscow, 127434, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-2905-446X, eLIBRARY SPIN-code: 7757-7969; chon36@mail.ru

**Alena V. Burlachenko**, Ph.D. Tech. Sciences, Associate Professor of the Department of Hydraulics, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University; 64 Leningradskii Prospekt, Moscow, 125319, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-2617-9515, eLIBRARY SPIN-code: 3155-2490; chrtara@mail.ru

<sup>1</sup> Черных О.Н., Ханов Н.В., Бурлаченко А.В. Берегоукрепительные конструкции водных объектов: учебное пособие. М.: РГАУ МСХА, 2019. Ч. 1. 145 с.; Черных О.Н., Ханов Н.В., Бурлаченко А.В. Берегоукрепительные конструкции водных объектов: учебное пособие. М.: РГАУ МСХА, 2020. Ч. 2. 185 с.

поперечные сооружений типа пляжеудерживающих бун, шпоры, подводные волноломы с траверсами, подводные банкеты (рис. 2), мысы и острова; подводные рифы, вдольбереговые банкеты, волнозащитные стены с вертикальной, криволинейной либо ступенчатой передней гранью; сквозные стены, свайные поля и другие сооружения [3–5].



**Рис. 1.** Эрозия берегов крупного водного объекта (обследование выполнено осенью 2022 г.):  
 а – с песчаным пляжем [2]; б – искусственного пляжа, отсыпанного щебнем и гравийно-галечниковым материалом [2];  
 в – р. Протва в месте впадения в р. Оку (фото О.Н. Черных)

**Figure 1.** Erosion of the banks of a large water body (survey completed in autumn 2022):  
 а – with a sandy beach [2]; б – an artificial beach, backfilled with rubble and gravel-pebble material [2];  
 в – Protva River at the confluence with the Oka River (photo by O.N. Chernykh)

Защита морских побережий и берегов крупных водохранилищ является сравнительно молодой отраслью гидротехнического строительства. В нашей стране впервые морские берегозащитные ГТС были построены в Сочи в конце 1940-х гг. [6]. Научные основы морской берегозащиты уже прошли стадию становления. Однако в области береговой гидротехники существует много проблем, которые ждут своего разрешения. В частности, в дальнейшем изучении нуждается явление взаимодействия волн с ГТС и пляжами. Существует необходимость в разработке теории расчета конструкций биопозитивных берегозащитных ГТС на устойчивость и прочность, также имеются нерешенные технологические проблемы. Намечились две тенденции в практике защиты берегов. Приверженцы первой отдают предпочтение инженерным методам, основанным на использовании ГТС; сторонники второй исключают инженерное вмешательство в береговую зону водного объекта и считают, что в основе берегозащиты должен лежать принцип сохранения естественного ландшафта побережий. Задача береговой гидротехники как науки – обеспечить оптимальное сочетание этих двух тенденций.

Для обеспечения рекреационных потребностей на крупных водных объектах везде, где это приемлемо по технико-экономическим показателям, уширяют существующие или создают новые искусственные пляжи, стремясь по возможности не обострять проблемы охраны используемых территорий. В существующих крупных акваториях большое место занимают галечниковые пляжи, общая длина которых составляет около 5 % от всей береговой линии Мирового океана, или порядка 40 тыс. км. Из современных технологий можно выделить: экологические технологии «Строительство вместе с природой», базирующиеся на создании намывных прибрежных территорий, они часто применяются в Европе и получили широкое распространение в Азии, Африке, Америке и Австралии; устройство на дне биологического укрепления в виде посадок влаголюбивых растений; полосы из полипропилена искусственных водорослей и ряд других решений из природных и природоприближенных материалов экодинамического проектирования (габионов, валунного камня, специальных полименизированных бетонов, миксированных биопозитивных, типизированных фасонных блоков, заборчатых конструкций для образования отмелей, использование сочетания укрепления шпунтом или сваями с другими типами креплений или применение биоинженерных систем с геоболочками и геотубами, искусственных рифов). Среди инновационных решений берегозащиты можно выделить пляжеудерживающие сооружения, например искусственные рифы, которые возводятся на глубине 3–4 м, на участках длиной по 80–100 м (Евпатория, Охотское море, Южно-Курильское мелководье и др.). За последнее десятилетие установлено более полумиллиона рифболов из экобетона в 70 странах мира [6].

### Методы и материалы

Прогрессивные волны при выходе на мелководье и приближении к берегу трансформируются [7; 8]. Трансформации подвержен профиль волны, при этом ее высота, длина и скорость распространения изменяются. Вопрос о критических параметрах волн в настоящее время рассмотрен в литературе достаточно

подробно, как теоретически, так и экспериментально, предложены формулы для определения критической высоты  $h_k$ , соответствующей длине волны  $\lambda_k$  к моменту разрушения на пологом склоне, а также критической глубины воды в водоеме  $H_k$ , при которой волна теряет устойчивую форму правильного периодического движения и разрушается. Подобные эксперименты проводились в лаборатории гидравлики Московского автомобильно-дорожного института под руководством кандидата технических наук В.И. Алтунина, во Всесоюзном научно-исследовательском институте водоснабжения, канализации, гидротехнических сооружений и инженерной гидрогеологии Д.И. Алтуниным [7; 8], а ранее выполнялись в гидротехнической лаборатории Московского гидромелиоративного института и в лаборатории отдела динамических исследований Научно-исследовательского института энергетических сооружений под руководством доктора технических наук, профессора В.М. Лятхера [9–11]. Однако особенности трансформации профиля волны, в частности изменение профиля ее гребня к моменту разрушения, а также закономерности вертикального распределения горизонтальных составляющих орбитальных скоростей на ограниченных глубинах исследованы недостаточно. Вместе с тем точность расчета взаимодействия волн с берегозащитными и другими ГТС зависит от достоверности значений кинематических характеристик волн. В этой связи **цель исследования** – изучение особенностей трансформации профиля волны на мелководье и проведение сопоставительного анализа теории и эксперимента.

Большая часть экспериментальных исследований выполнялась в стеклянном волновом лотке длиной рабочей части 8 м, шириной 0,55 м и наполнением 0,5 м [12]. Волны воспроизводились качающимся щитом, приводимым в движение волновой машиной, периоды волны  $\tau$  равнялись 0,92, 1,22 и 1,64 с. Высоты генерируемых волн составляли для глубоководной зоны  $h_d = 8\text{--}12$  см, при исходной пологости  $\lambda_d/h_d = 10\text{--}65$ , где  $\lambda_d$  – соответствующая длина волны. Коэффициент начального заложения прибрежного склона  $m$  составлял 10, 20 и 30. Профиль волны, время ее набегания  $t$  и орбитальные скорости фиксировались с помощью индикаторов и кинокамеры, устанавливаемой на расстоянии 1 м от боковой стеклянной стенки лотка.

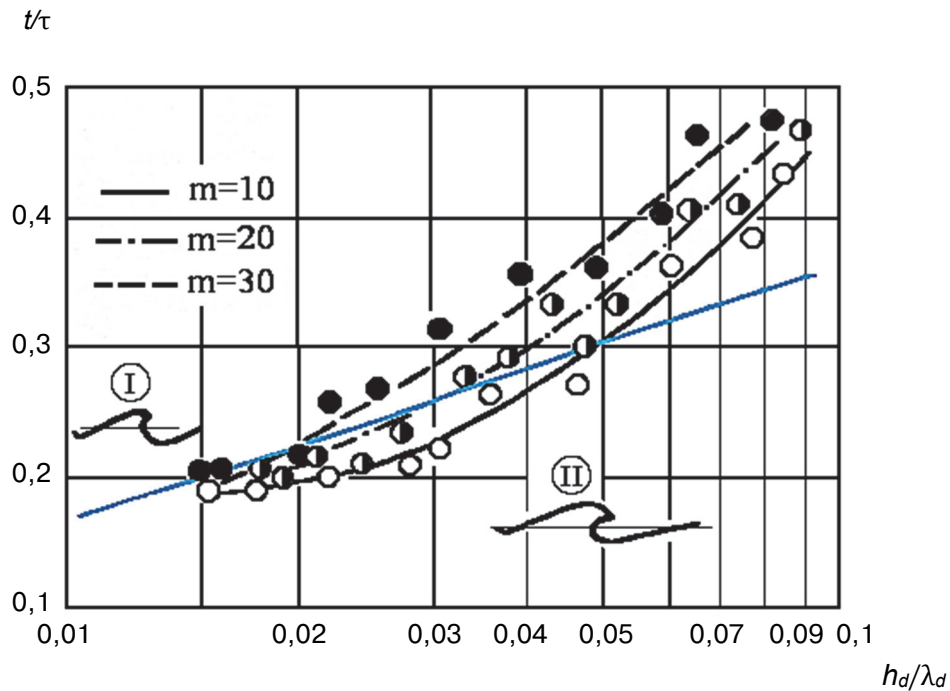
### Результаты и обсуждение

На предварительных стадиях наблюдения за процессом трансформации волн установлено, что в мелководной зоне на глубинах  $H/\lambda_d < 0,3$ , где  $H$  – глубина воды в водном объекте, происходит перестроение профиля волны. Увеличивается высота гребня волны  $\eta$ , а ее длина уменьшается, в то же время длина ложбины увеличивается. Гребень волны сужается и заостряется, а ложбина становится плоской. Сопоставление с расчетным профилем волны на мелководье, построенным по формулам третьего приближения волновой теории Стокса [13; 14] и второму приближению кноидальной теории волн [15], трансформации волны, зафиксированной на относительных глубинах  $H/\lambda_d = 0,07; 0,04; 0,03$ , показало, что при  $H/\lambda_d \geq 0,07$  расчетные и опытные профили совпадают. При меньшей относительной глубине  $H/\lambda_d = 0,04$  и  $0,03$  расчетные профили гребня волны все более отличаются от экспериментальных. Лобовая или передняя сторона гребня становится круче ее задней грани. Оказалось, что теоретические решения не учитывают асимметрию профиля волны и дают только симметричную форму гребня на мелководье. Таким образом, расчетные профили гребня волны хорошо согласуются с опытными данными при 0,07, а при уменьшении относительных глубин они все более отличаются.

Изучение закономерности изменения профиля гребня волны перед ее разрушением показало, что в зависимости от крутизны исходной волны и заложения склона, результаты которых приведены на рис. 2, для пологих волн с крутизной  $h_d/\lambda_d = 0,017\text{--}0,02$  значение отношения  $t/\tau$  не зависит от заложения пологого склона и остается постоянной величиной в пределах 0,19–0,21. Эти величины  $t/\tau$  отражают максимальное перестроение профиля волны перед разрушением. Для волны большей крутизны значения  $t/\tau$  возрастают и при  $h_d/\lambda_d = 0,08$  равняются 0,40–0,47. На изменение величины  $t/\tau$  влияет заложение склона. Для более пологих склонов при постоянстве отношения  $h_d/\lambda_d$  величина  $t/\tau$  становится больше.

В исследованном диапазоне изменения заложения прибрежного склона и пологости исходных волн вычленены два вида разрушения гребня волны: скользящее и ныряющее. При скользящем разрушении (тип I) величина  $t/\tau$  изменяется в диапазоне 0,21–0,48, а при ныряющем (тип II), соответственно, 0,19–0,30. Причем для склона с  $m = 30$  скользящее разрушение имеет место только для пологих волн с  $h_d/\lambda_d < 0,02$ , для склона  $m = 10$  крутизна волны возрастает до 0,05. Этот результат согласуется с ранее полученными данными [13; 16]. Анализируя изменение относительной высоты гребня ( $\eta/h_k$ ) (рис. 3), можно отметить, что для крутых волн с  $h_d/\lambda_d = 0,08\text{--}0,09$  наблюдается минимальное значение параметра, равное  $t/\tau = 0,66\text{--}0,71$ . При уменьшении крутизны волны относительная высота гребня возрастает и для

склона с  $m = 30$  при  $h_d/\lambda_d = 0,017$  достигает 0,81. Для более крутого склона ( $m = 10$ ) и при той же крутизне волны величина  $\eta/h_k$  меньше и составляет 0,73.

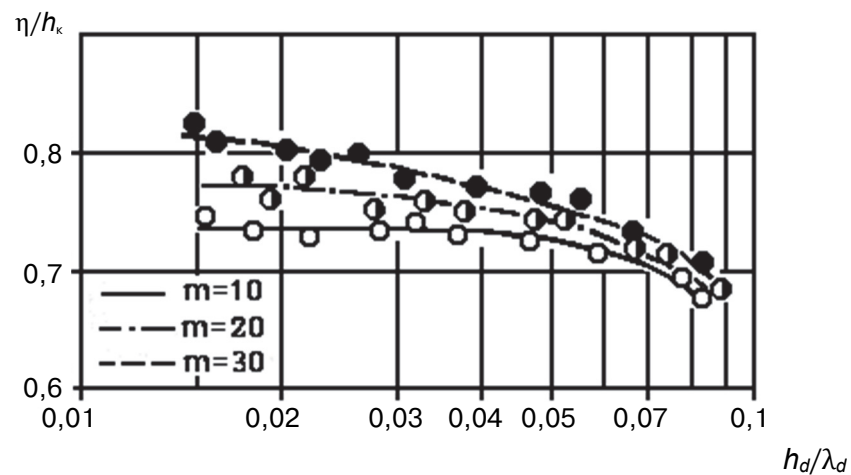


**Рис. 2.** График зависимости относительных параметров волны перед разрушением от крутизны исходных волн  $t/\tau = f(h_d/\lambda_d)$  на склонах с различным заложением (синим цветом указана граница областей с разным типом разрушения волн):

*I* – область скользящего разрушения волны; *II* – область ныряющего разрушения волны

**Figure 2.** Graph of the dependence of the relative parameters of the wave before breaking on the steepness of the initial waves  $t/\tau = f(h_d/\lambda_d)$  on slopes with different inclinations (blue color indicates the boundary of areas with different types of wave destruction):

*I* – the region of sliding wave breaking; *II* – the area of the diving destruction of the wave



**Рис. 3.** График зависимости относительной высоты гребня волны от крутизны исходных волн  $\eta/h_k = f(h_d/\lambda_d)$  при изменении заложения откоса берега  $m$  от 10 до 30

**Figure 3.** Graph of the dependence of the relative height of the wave crest on the curvature of the initial waves  $\eta/h_k = f(h_d/\lambda_d)$  when changing the bank slope  $m$  from 10 to 30

Таким образом, на относительную высоту гребня волны  $\eta/h_k$ , помимо относительной величины  $h_d/\lambda_d$ , заметное влияние оказывает заложение склона, с увеличением которого величина отношения  $\eta/h_k$  возрастает. Так как величины отношений  $t/\tau$  и  $\eta/h_k$  получены в створе перед разрушением волны, то их значения соответствуют максимальным значениям исследуемых параметров при фиксированных  $h_d/\lambda_d$



и  $m = 10\text{--}30$ . Очевидно, что установленное ранее Д.И. Алтуниным [13; 14] для мелководья отличие расчетного и экспериментального профилей гребня волны на уменьшающихся глубинах должно сказаться и на кинематических характеристиках волны, что необходимо проверить в дальнейшем и сопоставить с данными [2; 17] по теории Стокса при близких значениях  $h_d/\lambda_d$ .

### Заключение

Выполненные экспериментальные исследования позволили выявить некоторые закономерности построения профиля волны на мелководье и изменений кинематических характеристик волнового потока.

Сопоставление опытных данных с расчетными формулами теории Стокса (3-е приближение) показало, что профиль волны и горизонтальная составляющая орбитальной скорости при прохождении гребня волны удовлетворительно согласуются при относительных глубинах  $H/\lambda_d > 0,07$ .

В результате модельных исследований выяснено, что для условий мелководья на относительную высоту гребня волны, воздействующей на неукрепленный пляжный откос приурезовой зоны берега крупного водного объекта, наиболее заметное влияние оказывает заложение откоса, с увеличением которого от 10 до 30 величина крутизны волны  $\eta/h_k$  может возрасти в 1,2 раза.

### Список литературы

1. Курбанов С.О., Румянцев И.С. Основы проектирования природно-технических систем биопозитивной конструкции по регулированию русел, защиты и восстановления прибрежных зон // Проблемы развития мелиорации и водного хозяйства и пути их решения: материалы международной научно-практической конференции: в 3 ч. М.: МГУП, 2011. Ч. III. С. 121–135.
2. Левкевич В.Е. Крепление берегов и верховых откосов подпорных сооружений гидроузлов Беларуси. Минск: БНТУ, 2019. 172 с.
3. Коренева В.В., Козырь И.Е., Штеренлихт Д.В. Гидравлическое и конструктивное обоснование берегозащитных и берегоукрепительных мероприятий на водных объектах. М.: МГУП, 2002. 116 с.
4. Правдивец Ю.П., Смирнова Т.Г., Смирнов Г.Н. Берегозащитные сооружения. М.: Изд-во АСВ, 2002. 303 с.
5. Смирнова Т.Г., Кантаржи И.Г. Расчет и проектирование искусственных свободных песчаных пляжей. М.: МГСУ, 2000. 125 с.
6. Черных О.Н., Бурлаченко А.В. Пути решения проблем Имеретинской бухты // Вестник учебно-методического объединения по образованию в области природообустройства и водопользования. 2021. № 23. С. 33–39.
7. Алтунин Д.И., Алтунин В.И. Переформирование откосов пойменных дамб // Гидравлика водопропускных сооружений: тезисы докладов V Республиканской конференции по научно-техническим проблемам гидравлики дорожных водопропускных сооружений. Саратов, 1985. 205 с.
8. Weinel R.L. A presentation of cnoidal wave theory for practical application // Journal of Fluid Mechanics. 1960. Vol. 7. Issue 2. Pp. 273–286. <http://doi.org/10.1017/s0022112060001481>
9. Chernykh O.N., Komelkov L.V. Hydrodynamic loads and stability of the lower-pool apron of hydraulic structures // Hydrotechnical Construction. 1983. Vol. 17. No. 8. Pp. 410–416.
10. Suetina T.A., Chernykh O.N., Burlachenko A.V. Hydraulic calculation features of helically corrugated steel culverts // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 456. Article 012129. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/456/1/012129>
11. Ляхтер В.М., Милетеев А.Н. Расчет наката длинных гравитационных волн на откос // Океанология. 1974. Т. 14. № 1. С. 37–43.
12. Алтунин Д.И. Кинематические характеристики волн на пологих прибрежных склонах // Водопроектные сооружения в условиях Крайнего Севера: сборник научных трудов. Якутск: ЯГУ, 1986. 132 с.
13. Алтунин Д.И., Сидоров Н.Н. Распределение волновых скоростей на критической глубине в зоне берегозащиты // Труды ВОДГЕО. Инженерная защита территорий. М., 1982. С. 100–105.
14. Iwagaki Y., Sakai T., Tsukioka K., Sawai N. Relationship between vertical distribution of water particle velocity and type of breakers on beaches // Coastal Engineering in Japan. 1974. Vol. 17. Pp. 51–58. <https://doi.org/10.1080/05785634.1974.11924182>
15. Francis J.R.D. Experiments on the motion of solitary grains along the bed of a water-stream // Proceedings of the Royal Society of London. 1973. Vol. 332. Issue 1591. Pp. 443–471. <https://doi.org/10.1098/rspa.1973.0037>
16. Volkova E. Experimental researches of creation beaches on the artificial territories // MEDCOAST 2009: The Ninth International Conference on the Mediterranean Coastal Environment. Sochi, 2009. Pp. 1121–1127.
17. Ranieri G. The surf zone distortion of beach profiles in small-scale coastal models // Journal of Hydraulic Research. 2007. Vol. 45. No. 2. Pp. 261–269. <https://doi.org/10.1080/00221686.2007.9521761>

## References

1. Kurbanov S.O., Rumyantsev I.S. Fundamentals of designing natural and technical systems of biopositive design for channel regulation, protection and restoration of coastal zones. *Problems of Development of Melioration and Water Management and Ways to Solve Them: Materials of the International Scientific-Practical Conference* (part 3, p. 121–135). Moscow: MGUP Publ.; 2011. (In Russ.)
2. Levkevich V.E. *Fastening of banks and upstream slopes of retaining structures of hydropower facilities in Belarus*. Minsk: BNTU Publ., 2019. (In Russ.)
3. Koreneva V.V., Kozyr I.E., Shterenlikht D.V. *Hydraulic and constructive substantiation of bank protection and bank protection measures at water bodies*. Moscow: MGUP Publ.; 2002. (In Russ.)
4. Pravdivets Yu.P., Smirnova T.G., Smirnov G.N. *Shore protection structures*. Moscow: ASV Publ.; 2002. (In Russ.)
5. Smirnova T.G., Kantarzhi I.G. *Calculation and design of artificial free sandy beaches*. Moscow: MGSU Publ.; 2000. (In Russ.)
6. Chernykh O.N., Burlachenko A.V. Ways to solve the problems of the Imeretinskaya Bay. *Bulletin of the Educational and Methodological Association for Education in the Field of Environmental Management and Water Use*. 2021;(23):33–39. (In Russ.)
7. Altunin D.I., Altunin V.I. Reformation of slopes of floodplain dams // *Hydraulics of culverts: Abstracts of the V Republican Conference on Scientific and Technical Problems of Road Culvert Hydraulics*. Saratov; 1985. (In Russ.)
8. Weinel R.L. A presentation of cnoidal wave theory for practical application. *Journal of Fluid Mechanics*. 1960;7(2):273–286. <http://doi.org/10.1017/s0022112060001481>
9. Chernykh O.N., Komelkov L.V. Hydrodynamic loads and stability of the lower-pool apron of hydraulic structures. *Hydrotechnical Construction*. 1983;17(8):410–416.
10. Suetina T.A., Chernykh O.N., Burlachenko A.V. Hydraulic calculation features of helically corrugated steel culverts. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018;456:012129. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/456/1/012129>
11. Lyakhter V.M., Mileteev A.N. Calculation of run-up of long gravitational waves on a slope. *Oceanology*. 1974;14(I):37–43. (In Russ.)
12. Altunin D.I. Kinematic characteristics of waves on gentle coastal slopes. *Culvert Structures in the Conditions of the Far North: Collection of Scientific Papers*. Yakutsk: YSU Publ.; 1986. (In Russ.)
13. Altunin D.I., Sidorov N.N. Distribution of wave velocities at critical depth in the coastal protection zone. *Proceedings of VODGEO. Engineering Protection of Territories*. Moscow; 1982. p. 100–105. (In Russ.)
14. Iwagaki Y., Sakai T., Tsukioka K., Sawai N. Relationship between vertical distribution of water particle velocity and type of breakers on beaches. *Coastal Engineering in Japan*. 1974;17:51–58. <https://doi.org/10.1080/05785634.1974.11924182>
15. Francis J.R.D. Experiments on the motion of solitary grains along the bed of a water-stream. *Proceedings of the Royal Society of London*. 1973;332(1591):443–471. <https://doi.org/10.1098/rspa.1973.0037>
16. Volkova E. Experimental researches of creation beaches on the artificial territories. *MEDCOAST 2009: The Ninth International Conference on the Mediterranean Coastal Environment*. Sochi; 2009. p. 1121–1127.
17. Ranieri G. The surf zone distortion of beach profiles in small-scale coastal models. *Journal of Hydraulic Research*. 2007;45(2):261–269. <https://doi.org/10.1080/00221686.2007.9521761>