

Оригинальная статья

УДК 627.8:69.05

DOI: 10.26897/1997-6011-2023-2-81-85



ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОФИЛЯ СКЛОНА ПОЙМЕННЫХ ДАМБ И БЕРЕГОВ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ВОЛНОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Черных Ольга Николаевна^{1✉}, канд. техн. наук, доцент

WoS ResearcherID: S-2542-2018; Scopus AuthorID: 57213261727; ORCID:0000-0003-2905-446X; SPIN-код:7757-7969; AuthorID: 692667; chon@mail.ru

Бурлаченко Алена Владимировна^{2✉}, канд. техн. наук

WoS ResearcherID: HPE-1499-2023; Scopus AuthorID: 57191856023; ORCID:0000-0003-2617-9515, SPIN-код: 3155-2490; AuthorID: 1098780; chtara@mail.ru

¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, г. Москва, Тимирязевская ул., 49, Россия

² Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ); 125319, г. Москва, Ленинградский проспект, 64, Россия

Аннотация. Рассмотрены особенности трансформации профиля склона пойменных дамб и берегов водных объектов при изменении глубины и параметров волнового воздействия включая и место начала разрушения откосов из гравийного материала. Приводятся результаты модельных исследований на откосах с заложением, равным 5, по которым выявлено влияние изменения относительной высоты гребня волн в пределах 0,01...0,10 на тип профиля переформированного откоса. Проанализированы результаты сопоставления полученных экспериментальных данных с данными Ван-Хьюмена для профилей двух основных типов: эрозионного и намывного. Даны рекомендации по определению устойчивого заложения откоса в приустьевой зоне водоема или крупного водотока при разной пологости созидательных волн. Установлено, что пологость волн не оказывает существенного влияния на величину устойчивого заложения склона при известной средней крупности несвязанного материала, слагающего его. С ростом отношения высоты набегающей волны к среднему диаметру материала, формирующего откос, устойчивое заложение в приустьевой зоне увеличивается, и его значение доходит до 10.

Ключевые слова: пойменные дамбы, волна, откос, гравийный материал, деформации, инженерная защита

Формат цитирования: Черных О.Н., Бурлаченко А.В. Изменения профиля склона пойменных дамб и берегов водных объектов при волновом воздействии // Природообустройство. – 2023. № 2. С. 81-85. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-2-81-85.

© Черных О.Н., Бурлаченко А.В., 2023

Original article

PECULIARITIES OF CHANGING THE PROFILE OF THE SLOPE OF FLOOD-PLAIN DAMS AND BANKS OF WATER BODIES UNDER WAVE IMPACT

Chernikh Olga Nikolaevna^{1✉}, doctor of technical sciences, professor

WoS ResearcherID: S-2542-2018; Scopus AuthorID: 57213261727; ORCID:0000-0003-2905-446X; SPIN-код:7757-7969; AuthorID: 692667; chon@mail.ru

Burlachenko Alyona Vladimirovna^{2✉}, candidate of technical sciences, associate professor

WoS ResearcherID: HPE-1499-2023; Scopus AuthorID: 57191856023; ORCID:0000-0003-2617-9515, SPIN-код: 3155-2490; AuthorID: 1098780; chtara@mail.ru

¹ Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after C.A. Timiryazev; 127434, Moscow, Timiryazevskaya st., 49, Russia

² Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), 125319, Moscow, Leningradsky prospect, 64, Russia

Annotation. The features of the transformation of the profile of the slope of floodplain dams and banks of water bodies with a change in the depth and parameters of the wave action, including the place where the destruction of gravel slopes begins, are considered. The results of modeling studies on slopes with a laying equal to 5 are presented, according to the results of which the influence of a change in the relative height of the wave crest within 0.01...0.10 on the type of the reshaped slope profile is revealed. The results of comparison of the obtained experimental data with Van-Human data for profiles of two main types: erosional and alluvial are analyzed. Recommendations are given for determining the stable laying of a slope in the coastal wave zone of a reservoir or a large watercourse with different flatness of creative waves.

It has been established that the flatness of the waves does not have a significant effect on the magnitude of the stable initiation of the slope with a known average size of the unbound material that composes it. With an increase in the ratio of the height of the oncoming wave to the average diameter of the material forming the slope, the stable laying in the coastal wave zone increases and its value reaches 10.

Keywords: floodplain dams, wave, slope, gravel material, deformation, engineering protection

Format of citation: Chernykh O.N., Burlachenko A.V. Peculiarities of changing the profile of the slope of flood-plain dams and banks of water bodies under wave impact // Prirodoobustrojstvo. 2023. No. 2. S 81-85. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-2-81-85.

Введение. В береговой гидротехнике в настоящее время при борьбе с наводнениями и разработке методов защиты береговых склонов водных объектов от эрозии и обрушения одной из основных задач является снижение стоимости защитного гидротехнического сооружения (ГТС) при одновременном увеличении надежности его работы. Это касается не только создания новых типов берегоукрепительных либо берегозащитных ГТС, но и уточнения параметров ГТС, являющихся искусственными аналогами фрагментов естественных берегов, достигших стадии динамического равновесия или приближающихся к ним [1-5]. Это непосредственно относится к откосам пойменных дамб, выполненных из песчано-гравийных грунтов (рис. 1), которые при воздействии волн в водном объекте подвержены перестроению.

В большей степени переработку испытывает участок откоса, ограниченный нижним пределом размывающего действия волнения и высотой

наката волн [3]. В зависимости от крупности материала, заложения откоса, высоты и длины волн на глубокой воде можно различать волны аккумулярующие (созидательные) и размывающие. Если изменение прирезовой полосы рассматривать в течение ряда лет, то можно определить, что стабильными являются участки, для которых ширина надводной части откоса остается постоянной. На таком, в среднем стабильном участке, при сильном волнении размывается надводная часть и урез перемещается в сторону суши [6]. Одновременно увеличивается объем аккумуляруемого материала подводной части откоса (рис. 2).

При созидательных волнах наносы с подводной части откоса перемещаются вверх по склону, наращивают надводную его часть и выдвигают урез в сторону водоема или крупного водотока. Форма профиля откоса в этом случае существенно изменяется (рис. 3).

Материалы и методы исследований.

Важно знать, при каких параметрах волнения и характеристиках гравийного откоса формируется размываемый или намываемый профиль. Возникает также задача, связанная с величиной заложения устойчивого откоса в прирезовой зоне. Рассмотрению этих вопросов посвящен ряд работ [3]. Подобные эксперименты проводились в лаборатории гидравлики МАДИ под руководством канд. техн. наук В.И. Алтунина, в ВОД-ГЕО – Д.И. Алтуниным [2, 7, 8], а ранее выполнялись в гидротехнической лаборатории МГМИ и в лаборатории отдела динамических исследований НИСа Гидропроекта под руководством д-ра техн. наук, профессора В.М. Ляхера [9, 10]. Основной объем экспериментальных исследований производился в волновом лотке с рабочей частью длиной 10 м, шириной по дну 0,6 м и наполнением 0,55 м [2, 3].

Откос насыпного гидротехнического сооружения (дамбы пляжного участка берега водного

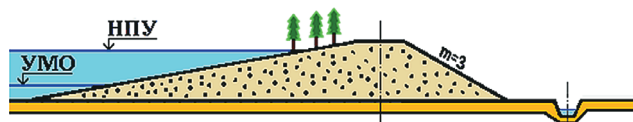


Рис. 1. Поперечное сечение дамбы инженерной защиты с некрепленным верхним откосом $m \geq 5$

Fig. 1. Cross-section of the engineering protection dam with non-fixed upper slope $m \geq 5$



Рис. 2. Эрозия берегов водотоков:

а – р. Большая Невка, г. Санкт-Петербург, 2018 г. [4];
б – р. Протва в месте впадения в р. Оку (обследование выполнено осенью 2022 г.)

Fig. 2. Erosion of the watercourses banks:

а – Bolshaya Nevka River, St. Petersburg, 2018 [4];
б – Protva River at the confluence with the Oka River (survey carried out in the autumn 2022)

объекта и т.п.) устраивался с начальным заложением, близким к условиям природы $m = 5,0$. Он формировался из материала в первой серии опытов со средним диаметром $d_{50} = 3,4$ мм, а во второй серии – 5,1 мм. Волны генерировались волновым щитом. Их высота изменялась от 7 до 13 см с периодом $\tau = 0,924; 1,22; 1,64$ с. Продолжительность опыта длилась 2...4 ч до наступления стабилизации профиля откоса. В процессе опыта откос нивелировался.

Во время проведения опытов на модели было отмечено, что с уменьшением среднего диаметра материала откоса его перекопс вверх по откосу уменьшается при постоянстве высоты, длины волны и ее периода. Увеличение крутизны волны с ростом высоты и постоянства длины волны также приводит к уменьшению переноса материала вверх по склону (рис. 2, 3).

При крутых волнах формируется эрозионный, так называемый штормовой профиль (тип I), с подводным валом в месте разрушения волн (рис. 4). Для этого типа характерно образование бара, который обычно возникает на мелководье в виде длинных узких асимметричных гряд по причине уменьшения энергии волн, резкого падения глубины и снижения скорости потока, утрачивающего возможность транспортирования донных наносов к берегу водного объекта. Аккумуляция песка, гравия, ракушки и другого осадочного материала происходит на дне

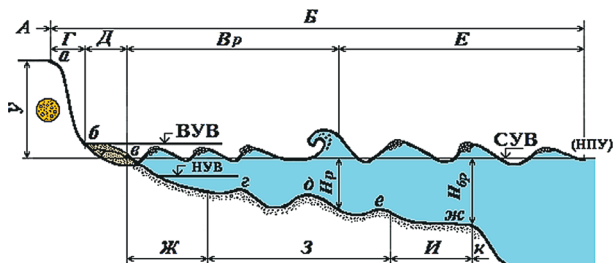


Рис. 3. Схема волнового воздействия на откос водного объекта [7]:
 А – надводный берег; Б – береговая зона;
 Б_р – зона разрушения волн;
 Г – абразионный склон (уступ) берега;
 Д – пляжная зона;
 Е – зона прибрежного мелководья;
 Ж – приурезовая часть береговой отмели;
 ВУВ, СУВ, НУВ – соответственно высший, средний и низший уровни воды

Fig. 3. Scheme of wave impact on the slope of a water body [7]:
 А – above water bank; Б – bank zone;
 Б_р – zone of wave breaking;
 Г – abrasive slope (ledge) of the bank;
 D – beach area; E – zone of coastal shallow waters;
 Ж – coastal wave part of the zone;
 VUV, SUV, NUV – respectively the highest, middle and lowest water level

и откосах дамбы или береговой линии в форме гряд-валов из наносов, динамика которых влияет на режим работы водоема или водотока – в частности, на судоходство. При пологих исходных волнах формируется нормальный, намывной профиль, – тип II.

Результаты и их обсуждение. На предварительных стадиях исследований для песчаных склонов была получена критериальная зависимость по определению типа профиля склона, учитывающая влияние основных параметров, проверенная соответствующими экспериментальными данными [3, 11] и имеющая следующий вид:

$$h_{гп} / \lambda_{гп} = K m^{0,22} (d_{50} / \lambda_{гп})^{0,67}, \quad (1)$$

где $h_{гп}, \lambda_{гп}$ – соответственно средняя высота и длина волны; $K = 1...5$ – критериальный коэффициент; m – заложение откоса; d_{50} – средний диаметр частиц, слагающих откос.

Проведенные опыты показали, что типы профиля откоса ГТС для песчаного и гравийного материала близки по очертанию. Это означает, что переформирование песчаного и гравийного откосов подчиняется общей закономерности. Вместе с тем механизм перемещения наносов в придонной области в общем случае различен. Гравийный материал не дает образования рифелей – сохраняется только гладкая фаза движения наносов, в то время как для песка характерна рифельная фаза движения. Поэтому для проверки справедливости выражения (1) для условий гравийных откосов на графике зависимости $h_{гп} / \lambda_{гп} = f[m^{0,22} (d_{50} / \lambda_{гп})^{0,67}]$ рисунка 5 нанесены полученные на модели экспериментальные данные, условные обозначения для которых приведены в таблице 1.

На том же графике приведены и экспериментальные данные Ван-Хьюмена для гравийных откосов с $m = 5,0$ и крупностью материала $d_{50} = 1,3; 6,1; 13,0$ мм [12]. Высота волны $h_{гп}$ в опытах изменялась от 10 до 47 см, а периоды τ – от 1,2 до 2,44 с. Как показали анализ экспериментальных данных и их сопоставление с данными

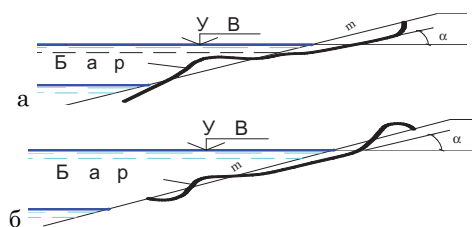


Рис. 4. Типы профиля откосов дамбы при волновом воздействии:
 а – тип I эрозионный с подводным баром;
 б – тип II намывной

Fig. 4. Types of dam slopes profile under wave impact:
 а – type I – erosion with underwater bar; б – type II – alluvial

Ван-Хьюмена, полученные точки для различных типов профиля группируются таким образом, что профиль первого типа формируется при условии

$$h_{гр}/\lambda_{гр} > 4 m^{0,22} (d_{50}/\lambda_{гр})^{0,67}, \quad (2)$$

а профиль второго типа – при условии

$$h_{гр}/\lambda_{гр} < 4 m^{0,22} (d_{50}/\lambda_{гр})^{0,67}. \quad (3)$$

При этом наблюдается хорошее согласование полученных экспериментальных данных и данных Ван-Хьюмена.

Для обоснованного проектирования откосов из гравийного материала важно знать величину

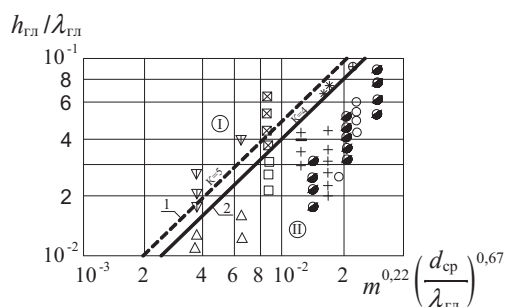


Рис. 5. Графики зависимости $h_{гр}/\lambda_{гр} = f[m^{0,22} (d_{50}/\lambda_{гр})^{0,67}]$ (условные обозначения – в таблице 1):

- 1 – разграничивающая линия для откоса из песка;
- 2 – разграничивающая линия для откоса из гравия

Fig. 5. Graphs of the dependence $h_{гр}/\lambda_{гр} = f[m^{0,22} (d_{50}/\lambda_{гр})^{0,67}]$ (symbols are given in table 1):
 1 – demarcation line for the sand slope;
 2 – dividing line for gravel slope

Таблица 1. Обозначения экспериментальных данных, нанесённых на рисунке 3 для графических зависимостей

$$h_{гр}/\lambda_{гр} = f[m^{0,22} (d_{50}/\lambda_{гр})^{0,67}]$$

Table 1. The symbols of the experimental data shown in Figure 3 for the graphical dependencies $h_{гр}/\lambda_{гр} = f[m^{0,22} (d_{50}/\lambda_{гр})^{0,67}]$

Автор Author	d_{50} мм d_{50} mm	Тип профиля Type of profile	
		I	II
Алтунин Д.И. (ВОДГЕО) Altunin D.I. (VODGEO)	3,5	⊗	□
Алтунин В.И., Бурлаченко А.В. (МАДИ) Altunin V.I., Burlachenko A.V. (MADI)	5,1		⊙
Ван-Хьюмен Van-Human	1,3	∇	△
	6,1	*	+
	13,0	⊕	○

Работа выполнена за счет средств гранта Российского научного фонда № 23-29-00928, <https://rscf.ru/project/23-29-00928/>.

The work was supported by the Russian Science Foundation grant no. 23-29-00928, <https://rscf.ru/project/23-29-00928/>.

устойчивого заложения склона для известной средней крупности материала и высоты исходной волны. На основе полученных на модели экспериментальных данных, а также данных Ван-Хьюмена построен график зависимости $tga = f(h_{гр}/d_{50})$ при различной пологости исходных волн (рис. 6).

Анализ графика показывает, что пологость не оказывает существенного влияния на tga . Это согласуется с экспериментальными данными других авторов [11-14]. С ростом отношения $h_{гр}/d_{50}$ до 80 устойчивая величина заложения ($m = 1/tga$) в приурезовой зоне увеличивается и приближается к 10.

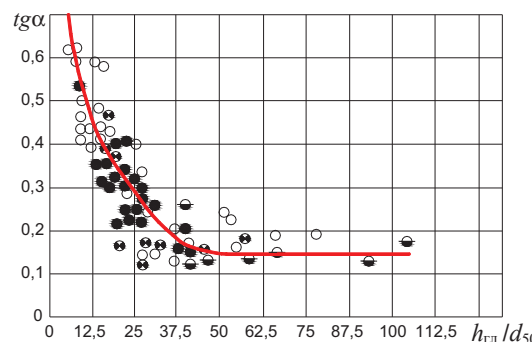


Рис. 6. График зависимости $tga = f(h_{гр}/d_{50})$ для исследованной модели с откосом из гравия, построенный по экспериментальным данным при d_{50} :
 ● – 1,3 мм; ● – 3,4 мм; ○ – 6,1 мм; ⊙ – 5,1 мм
Fig. 6. Graph of dependence $tga = f(h_{гр}/d_{50})$ for the studied model with gravel slope, built on the experimental data at d_{50} :
 ● – 1.3 mm; ● – 3.4 mm; ○ – 6.1 mm; ⊙ – 5.1 mm

Выводы

Таким образом, в результате экспериментальных исследований найдены безразмерные параметры, определяющие величины устойчивого заложения откоса в приурезовой зоне и закономерности изменения типа профиля откосов пойменных дамб и береговых участков водных объектов, сложенных из гравелистых материалов и подвергающихся волновому воздействию. Получены графические и аналитические зависимости для определения устойчивого очертания склона с учетом основных параметров волн и средней крупности материала, формирующего откос. Все это позволяет уточнить гидротехнический расчет береговых гидротехнических сооружений и расширить круг вопросов, связанных с их проектированием.

Список использованных источников

1. 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.
2. Altunin V.I., Chernyh O.N., Burlachenko A.V. Hydraulic Resistance of Corrugated Metal Culvert Pipes with Elevated Abrasive Resistance // Power Technology and engineering. 2016. V. 50, Issue 4, P. 385-390.
3. Алтунин Д.И. Кинематические характеристики волн на пологих прибрежных склонах // Водопрпускные сооружения в условиях Крайнего Севера. Сборник научных трудов. Якутск, изд. ЯГУ, 1986. 132 с.
4. Черных О.Н., Бурлаченко А.В. Обеспечение безопасности гидротехнических сооружений мелиоративных гидроузлов с грунтовой плотинной. 2022. В ЭБС РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева в электронном виде (режим доступа: <http://elibr.timacad.ru/dl/full/s13102022Chernykh.pdf>). 172 с.
5. 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.
6. Altunin V.I. Resistance of Corrugated Metal Culvert Pipes with Elevated Abrasive Resistance / Chernyh O.N., Burlachenko A.V. Hydraulic // Power Technology and engineering. 2016. V. 50, Issue 4, P. 385-390.
7. Алтунин Д.И., Алтунин В.И. Реформирование откосов пойменных дамб // Гидравлика водопрпускных сооружений. Тезисы докладов V Республиканской конференции по научно-техническим проблемам гидравлики дорожных водопрпускных сооружений. Саратов: 1985. 205 с.
8. Черных О.Н., Волков В.И., Алтунин В.И. Расчёты сооружений гидроузла с плотинной из грунтовых материалов. М.: Из-во РГАУ-МСХА, 2015. 202 с.
9. Левкевич В.Е. Крепление берегов и верховых откосов подпорных сооружений гидроузлов Беларуси. Минск: БНТУ, 2019. 172 с.
10. Черных О.Н., Ханов Н.В., Бурлаченко А.В. Берегоукрепительные конструкции водных объектов: учебное пособие Ч. 1. М.: РГАУ-МСХА, 2019. 145 с.
11. Черных О.Н., Ханов Н.В., Бурлаченко А.В. Берегоукрепительные конструкции водных объектов: учебное пособие Ч. 2. М.: РГАУ-МСХА, 2020. 185 с.
12. Iwagaki Y. Relationship between vertical distribution of water particle velocity and type of breakers on beaches. Journal Coastal Engineering in Japan. v. VI. 1985.
13. Ляхтер В.М., Милетеев А.Н. Расчет наката длинных гравитационных волн на откос // Океанология, 1974, № I. 14, 37 с.
14. Volkova E. Experimental researches of creation beaches on the artificial territories // MEDCOAST 2009 The ninth international conference on the Mediterranean coastal environment. 2009. 1356 p.

Критерии авторства

Черных О.Н., Бурлаченко А.В. выполнили практические и теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов.

Вклад авторов

Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Статья поступила в редакцию 25.01.2023

Одобрена после рецензирования 13.02.2023

Принята к публикации 18.02.2023

References

1. Koreneva V.V., Kozyr I.E., Shterenlikht D.V. Hydraulic and constructive substantiation of shore protection and shore stabilizing measures on water bodies. M.: MGUP, 2002. 116 s.
2. Altunin V.I., Chernyh O.N., Burlachenko A.V. Hydraulic Resistance of Corrugated Metal Culvert Pipes with Elevated Abrasive Resistance // Power Technology and engineering. 2016. V. 50, Issue 4, pp. 385-390.
3. 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, ed. YSU, 1986. 132 p.
4. Chernykh O.N., Burlachenko A.V. Ensuring the safety of hydraulic structures of reclamation hydroelectric facilities with an earth dam. 2022. EBS RGAU-MSHA named after C.A. Timiryazev in electronic form (access mode: <http://elibr.timacad.ru/dl/full/s13102022Chernykh.pdf>). 172 p.
5. 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. M.: 1982. P. 100-105.
6. Altunin V.I., Chernyh O.N., Burlachenko A.V. Hydraulic Resistance of Corrugated Metal Culvert Pipes with Elevated Abrasive Resistance // Power Technology and engineering. 2016. V. 50, Issue 4, pp. 385-390.
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. – 205 p.
8. Chernykh O.N., Volkov V.I., Altunin V.I. Calculations of the structures of a hydroelectric complex with a dam made of soil materials: textbook. M.: Iz-vo RGAU-MSHA, 2015. 202 p.
9. Levkevich V.E. Fastening of banks and upstream slopes of retaining structures of hydropower facilities in Belarus: monograph – Minsk: BNTU, 2019. 172 p.
10. Chernykh O.N., Khanov N.V., Burlachenko A.V. Bank protection structures of water bodies: a textbook. part 1. – M.: RGAU-MSHA, 2019. 145 p.
11. Chernykh O.N., Khanov N.V., Burlachenko A.V. Shore protection structures of water bodies: a textbook, part 2. M.: RGAU-MSHA, 2020. 185 p.
12. Iwagaki. Y. Relationship between vertical distribution of water particle velocity and type of breakers on beaches. Journal Coastal Engineering in Japan. v. VI. 1985.
13. Lyakhter V.M., Mileteev A.N. Calculation of run-up of long gravitational waves on a slope. Oceanology, 1974, No. I, 14, 37 p.
14. Volkova E. Experimental researches of creation beaches on the artificial territories // MEDCOAST 2009 The ninth international conference on the Mediterranean coastal environment / 2009. 1356 p.

Criteria of authorship

Chernykh O.N., Burlachenko A.V. carried out practical and theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript. They have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Conflict of interest

The authors declare that there are no conflicts of interest.

Contributions of the authors

All the authors made an equal contribution to the preparation of the publication

The article was submitted to the editorial office 25.01.2023

Approved after reviewing 13.02.2023

Accepted for publication 18.02.2023