УДК 532.539

© *В. В. Максимов*[1], *И. С. Нуднер*[2,3], *В. В. Лебедев*[2], *К. К. Семенов*[2,4], *С. П. Кшевецкий*[5], *А. А. Амосов*[1]
[1]АО «Концерн «Океанприбор», г. Санкт-Петербург
[2]23 ГМПИ — филиал АО «31 ГПИСС», г. Санкт-Петербург
[3]БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург
[4]Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург
[5]Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, г. Калининград
wmaximov@mail.ru

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОЛН ЦУНАМИ С ОТКОСНЫМИ СООРУЖЕНИЯМИ

Статья поступила в редакцию 30.05.2017, после доработки 21.08.2017.

В данной работе выполнен краткий обзор теоретических и экспериментальных исследований по проблеме воздействия волн цунами на элементы откосных сооружений. Приведены авторские результаты экспериментальных и теоретических исследований, которые были положены в основу руководящих документов при проектировании морских защитных гидротехнических сооружений и Свода Правил «Здания и сооружения в цунамиопасных районах. Правила проектирования», вышедшего под эгидой Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации в 2017 году. Исследовалось влияние шероховатости сооружений на величину наката одиночной волны. Расчеты проводились с использованием модели длинных волн, полученной профессором Алешковым Ю.З., реализованной разностной схемой второго порядка. В данной работе рассмотрены защитные сооружения в виде откоса с вертикальной стенкой и откоса с бермой и вертикальной стенкой. Приведено сравнение расчетных данных с данными экспериментальных исследований для двух относительных высот волны. В завершающей части приводятся новые результаты, полученные при численном моделировании цунами на основе полных уравнений Эйлера (авторами построена новая, полностью консервативная схема второго порядка для численной реализации этих уравнений), и рассматриваются перспективы дальнейшего изучения проблемы взаимодействия цунами с защитными сооружениями.

Ключевые слова: цунами, защитные сооружения, откосные сооружения, взаимодействие волн цунами.

V. V. Maximov[1], *I. S. Nudner*[2,3], *V. V. Lebedev*[2], *K. K. Semenov*[2,4], *S. P. Kshevetskii*[5], *A. A. Amosov*[1]
[1]JSC «Concern«Oceanpribor», St.-Petersburg, Russia
[2]The 23 State Marine Design Institute — Branch of «31 State Design Institute of Special Construction», St.-Petersburg, Russia
[3]Baltic State Technical University, St.-Petersburg, Russia
[4]Peter the Great St.-Petersburg Polytechnic University, St.-Petersburg, Russia
[5]Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

INTERACTION OF TSUNAMI WAVES WITH SLOPING STRUCTURES

Received 30.05.2017, in final form 21.08.2017.

In this paper, a brief review of theoretical and experimental studies on the effect of tsunami waves on elements of sloping structures is considered. Authors' results of experimental and theoretical studies, which were used as the basis for guiding documents for the design of marine protective hydraulic structures and the Code of Rules "Buildings and Structures in tsunami-prone areas. Rules of Design", published under the auspices of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation in 2017. The influence of the roughness of structures on the magnitude of the solitary wave runup was investigated. The calculations were carried out using the long-wave model obtained by Professor Yu. Z. Aleshkov, realized by a difference scheme of the second order. In this paper, we consider protective structures in the form of a slope with a vertical wall and a slope with a berm and a vertical wall. Comparison of the calculated data with the experimental data for two relative wave heights is given. In the final part, new results obtained

Ссылка для цитирования: *Максимов В. В., Нуднер И. С., Лебедев В. В., Семенов К. К., Кшевецкий С. П., Амосов А. А.* Взаимодействие волн цунами с откосными сооружениями // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2017. Т. 10, № 4. С. 53—60.

For citation: *Maximov V. V., Nudner I. S., Lebedev V. V., Semenov K. K., Kshevetskii S. P., Amosov A. A.* Interaction of tsunami waves with sloping structures. Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika. 2017, 10, 4, 53—60.

DOI: 10.7868/S2073667317040050.

in the numerical modeling of tsunami based on the complete Euler equations are presented (the authors constructed a new, completely conservative second-order scheme for the numerical realization of these equations) and discusses the prospects for further study of the problem of tsunami interaction with protective structures.

Key words: tsunami, protecting structures, sloping structures, interaction of tsunami waves.

Изучению воздействия волн цунами на морские гидротехнические сооружения посвящено большое количество как экспериментальных, так и теоретических работ. Родоначальником теоретического изучения был, по-видимому, Дж. Стокер, который рассмотрел в своей монографии [1] вопрос наката волны цунами на откосное сооружение.

В Советском Союзе работы по теоретическому, а также по экспериментальному изучению воздействия волн цунами на морские гидротехнические сооружения развивались с середины 1970-х гг. Были предложены новые теоретические модели длинных волн [2—7] и их применение к вычислительному эксперименту [8—13]. В Ленинграде на базе гидроволновой лаборатории НИЦ 26 ЦНИИ МО под руководством Манойлина С. В. и профессора Нуднера И. С. (Максимов В. В., Лебедев В. В., Семёнов К. К. и др.) проводились обширные экспериментальные исследования по трансформации волн цунами и их взаимодействию с морскими гидротехническими сооружениями различных типов, отдельные результаты которых помещены в работах [11, 14—22].

К настоящему времени в России успешно работают две крупные теоретические научные школы, получившие мировое признание: сибирская — под руководством академика Шокина Ю. И. (Марчук Ан. Г., Чубаров Л. Б., Федотова З. И., Хакимзянов Г. С., Бейзель С. А. и др.) [7, 9, 13, 23—27] и нижегородская — под руководством профессора Пелиновского Е. Н. (Талипова Т. Г., Куркин А. А., Диденкулова И. И., Зайцев А. И. и др.) [5, 28—33].

Опубликован ряд монографий [28, 34—36]. Аналитические методы подробно рассмотрены в книгах Пелиновского Е. Н. [30, 31]. Численные методы обсуждаются в монографиях [23, 25, 26].

Зарубежные исследования по проблеме цунами начались, как уже отмечалось выше, в середине 1950-х гг. Подробный анализ публикаций до 1995 г. содержится в работах [6, 32, 33, 37—48]. Последние десятилетия характеризуются существенным прогрессом численного моделирования взаимодействия волн цунами с берегом [24, 27, 49—51], которое позволяет получать оперативные оценки цунамиопасности.

Продолжаются и аналитические исследования в этой области [52—55]. Проводятся широкомасштабные экспериментальные исследования по накату волн цунами на берег [56—61].

Следует отметить, что большинство исследований проводятся в тех или иных вариантах длинных волн (с использованием эффектов нелинейности и дисперсии) или так называемой «мелкой воды».

В обоснование ряда рекомендаций, включенных в недавно опубликованный Свод Правил, приведём результаты экспериментальных и (на основе модели уравнений длинных волн профессора Алешкова Ю. З. [2]), расчётных величин наката волн типа цунами на гидротехнические сооружения откосного профиля.

Часть из них была опубликована ранее в журналах, а также в материалах всероссийских и международных конференций и является к настоящему времени труднодоступной.

Эксперименты проводились на базе гидроволновой лаборатории НИЦ 26 ЦНИИ МО РФ (ныне — в составе 23 ГМПИ) в лотках длиной 40—45 м, шириной 0.7—1.5 м и высотой 1.2 м. Общий вид одного из гидролотков представлен на рис. 1.

Одиночные волны создавались при помощи вакуумного волнопродуктора, схема и принцип действия которого описан в [14]. Возвышение волновой поверхности и накат на сооружения фиксировался волномерами. В экспериментах варьировались высота волны и геометрические параметры откосных сооружений.

Ниже приведены экспериментальные данные (табл. 1, 2) и данные, полученные путём расчётов по модели [2], а также приведены схемы откосных сооружений. Здесь α — угол наклона откоса, d — глубина жидкости, h — высота набегающей волны. Было проведено большое количество экспериментов. Исследовалось влияние шероховатости откоса на величину наката одиночной волны.

Из табл. 1 следует, что с ростом относительной высоты волны наблюдается монотонный рост наибольших высот наката при уменьшении угла наклона гладкого откоса. Здесь наблюдается вначале

Рис. 1. Общий вид гидроволнового лотка.

Fig. 1. Common view of the hydrowave flume.

Таблица 1

Наибольшие высоты наката на относительно гладкие преграды

ctg α / *h*/*d*	0.0	1.0	2.0	3.0	5.0	10.0	20.0
0.1	0.260	0.141	0.179	0.221	0.179	0.301	0.522
0.2	0.520	0.318	0.412	0.562	0.411	0.524	0.738
0.3	0.760	0.467	0.645	0.888	0.670	0.725	0.904
0.4	1.040	0.650	0.806	1.142	0.947	0.913	1.044
0.5	1.300	0.848	1.120	1.515	1.238	1.091	1.168
0.6	1.660	1.159	1.415	1.657	1.541	1.263	1.278
0.7	1.820	1.555	1.666	1.767	1.685	1.428	1.380
0.8	2.080	1.753	1.773	2.130	2.173	1.589	1.476

Таблица 2

Наибольшие высоты наката на относительно шероховатые преграды

ctg α / *h*/*d*	0.0	1.0	2.0	3.0	5.0	10.0	20.0
0.1	0.210	0.106	0.090	0.079	0.056	0.111	0.191
0.2	0.490	0.255	0.336	0.281	0.202	0.193	0.270
0.3	0.730	0.375	0.528	0.363	0.262	0.268	0.331
0.4	0.980	0.573	0.640	0.565	0.408	0.337	0.382
0.5	1.100	0.764	0.743	0.720	0.519	0.403	0.428
0.6	1.470	1.004	0.896	0.748	0.539	0.466	0.468
0.7	1.693	1.181	0.958	0.821	0.593	0.527	0.505
0.8	1.975	1.517	1.222	1.051	0.757	0.586	0.541

некоторое увеличение, а затем — уменьшение наибольших высот наката. В случае шероховатого откоса (табл. 2) уменьшение высоты наката имеет более выраженный характер. Таким образом, шероховатость откоса является одним из средств снижения высоты наката одиночной волны и, следовательно, уменьшения катастрофических последствий воздействия цунами на морские гидротехнические сооружения.

Снижение высоты наката за счёт шероховатости наблюдается уже при крутых откосах. Так, например, при угле 45° уменьшение составляет около 14 %. При угле 11.3° оно составляет уже 80 %. Таким образом, при пологих откосах для уменьшения цунамиопасности эффективным средством является их покрытие укладкой (или наброской) фасонными бетонными блоками, имеющими большую шероховатость, например, тетраподами.

По экспериментальным данным и расчетам, выполненным по модели длинных волн [2], получены графики для определения относительных максимальных возвышений на откосных сооружениях. Ниже приведены примеры двух таких сооружений: откос с вертикальной стенкой и откос с бермой и вертикальной стенкой (рис. 2, 3).

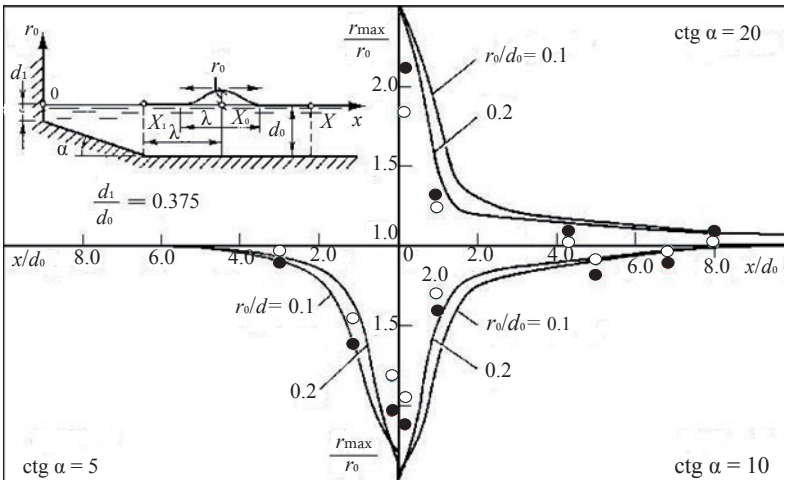

Рис. 2. Графики для определения относительных максимальных возвышений. Преграда — откос с вертикальной стенкой. Кривые — данные расчетов по модели [2], черные кружки — данные экспериментов при относительной высоте 0.1, белые кружки — данные экспериментов при относительной высоте 0.2.

Fig. 2. Graphs for determination of relative maximum elevation of water level. The obstacle is a slope with a vertical wall. Curves represent the data calculated from model [2], black circles represent the experimental data for relative height 0.1, white circles represent the experimental data for relative height 0.2.

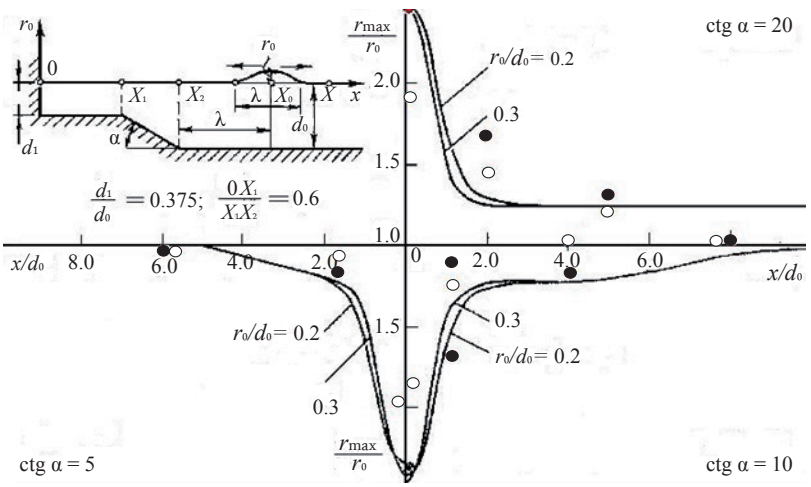

Рис. 3. Графики для определения относительных максимальных возвышений. Преграда — вертикальная, горизонтальная и наклонная грани. Кривые — данные расчетов по модели [2], черные кружки — данные экспериментов при относительной высоте 0.1, белые кружки — данные экспериментов при относительной высоте 0.2.

Fig. 3. Graphs for determination of relative maximum elevation of water level. The obstacle is vertical, horizontal inclined faces. Curves represent the data calculated from model [2], red circles represent the experimental data for relative height 0.1, blue circles represent the experimental data for relative height 0.2.

Шероховатость откосных сооружений позволяет в большой степени снижать максимальную величину наката цунами на берег. Данное обстоятельство целесообразно использовать на практике.

Полученные данные широко использовались при создании разделов 6 и 7 Свода Правил «Здания и сооружения в цунамиопасных районах. Правила проектирования и строительства», вышедшего под эгидой Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации в 2017 г.

Численное моделирование наката волн на основе полных уравнений Эйлера. До последнего времени большинство аналитических и численных исследований проводилось в рамках теории длинных волн, т. е. в условиях мелкой воды. Авторами настоящей статьи развивается новый теоретический аппарат, основанный на численном моделировании полных уравнений Эйлера.

В качестве примера было выполнено численное моделирование воздействие волн цунами на откосное сооружение (рис. 4).

В качестве входного воздействия рассмотрена волна, получаемая с помощью вакуумного волнопродуктора (конструкция и принцип его работы рассмотрены в [14, 62]).

Профиль подходящей волны, зарегистрированный волномером, установленным в положении, как на рис. 7 (см. вклейку), представлен на рис. 5.

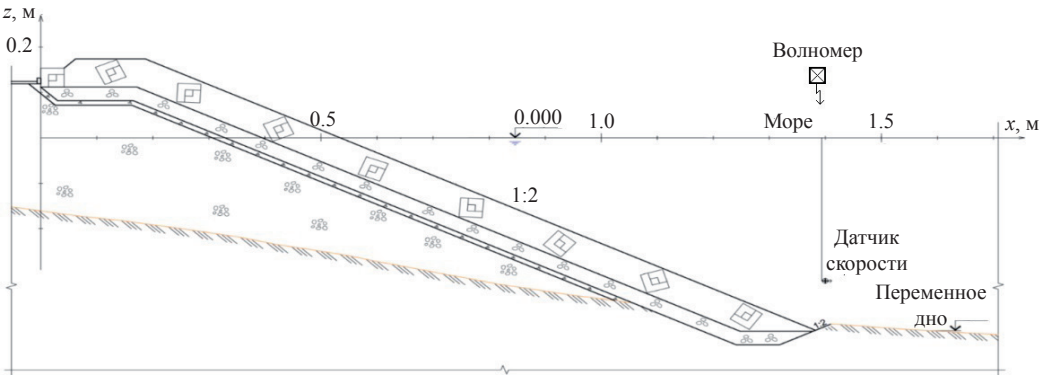

Рис. 4. Схема модели откосного сооружения, принятая при расчетах.

Fig. 4. Schematic model of a sloping structure used in calculations.

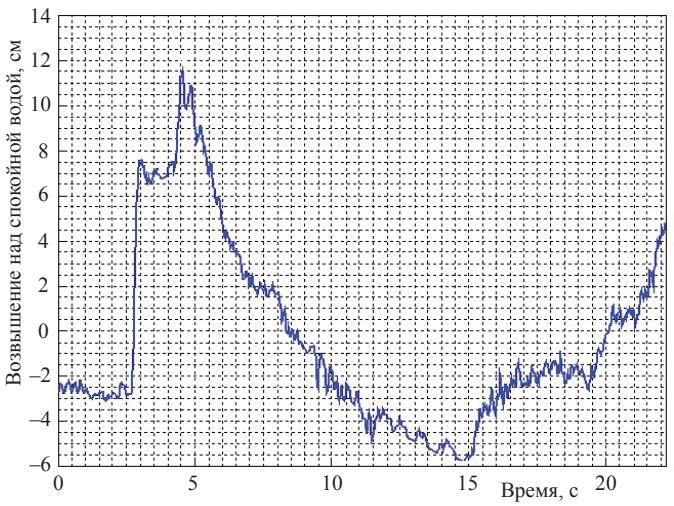

Рис. 5. Возвышение подходящей к сооружению волны, измеренное в точке установки волномера как функция времени.

Fig. 5. The elevation of the incident wave running on the construction, measured at the point of the wavemeter installation, as a function of time.

Теоретическая постановка задачи. Рассматривались полные уравнения Эйлера для двуслойной жидкости. Вычислительный алгоритм, разработанный на основе новой, полностью консервативной численной схеме второго порядка, подробно рассмотрен авторами в [63]. Компоненты линий тока, поля плотности, горизонтальной и вертикальной скорости течения вычисляются во всех точках рассматриваемой области. Высоту наката волн можно оценить по изменению поля плотности.

Следует отметить, что начальное распределение скоростей во всей области в экспериментах не регистрировалось. Оно было получено из уравнений мелкой воды по имеющейся осциллограмме подходящей волны в указанном створе. Некоторые результаты численного моделирования приведены ниже (рис. 6—10, см. вклейку). Все величины являются размерными.

Приведём значения горизонтальной и вертикальной составляющих скорости водного потока в заданных сечениях, полученные при численном моделировании (рис. 9).

Значения вертикальной составляющей скорости, полученные в створе, где находился волномер (рис. 4), приведены на рис. 10.

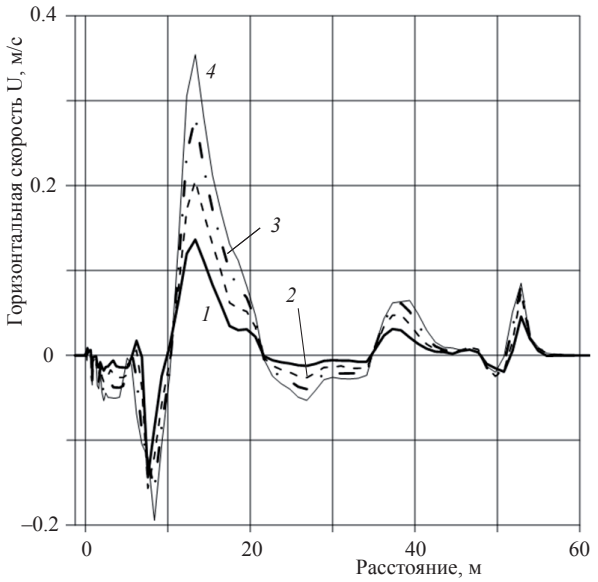

Рис. 9. Горизонтальные составляющие скорости водного потока (м/с), на уровне невозмущенной поверхности жидкости в моменты времени t = 0.30 с (*1*), t = 0.55 с (*2*), t = 0.80 с (*3*), t = 1.05 с (*4*).

Fig. 9.The horizontal components of the water flow velocity (m/s) at the level of the calm water at the time moments t = 0.30 s (*1*), t = 0.55 s (*2*), t = 0.80 s (*3*), t = 1.05 s (*4*).

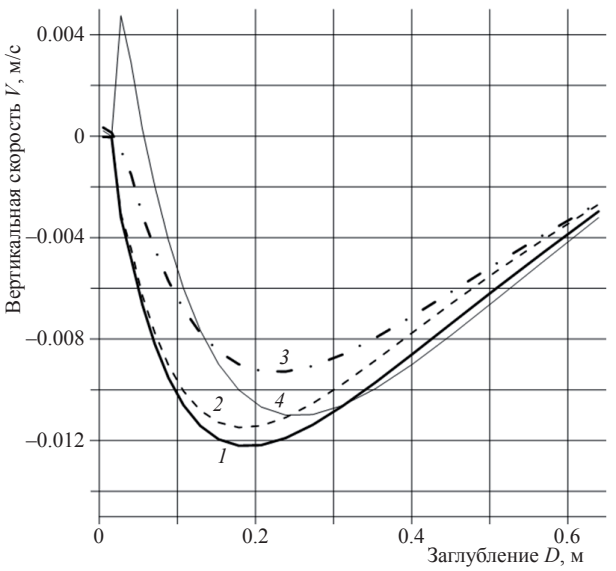

Рис. 10. Вертикальные составляющие скорости водного потока (м/с), полученные в створе расположения волномера в моменты времени t = 1.05 с (1), t = 1.55 с (2), t = 2.05 с (3), t = 2.55 с (4).

Fig. 10. The vertical components of the water flow velocity (m/sec) obtained in the place of the wavemeter location in time moments t = 1.05 s (*1*), t = 1.55 s (*2*), t = 2.05 s (*3*), t = 2.55 s (*4*).

***

Созданный авторами на основе полных уравнений Эйлера аппарат позволяет в деталях рассматривать взаимодействие волн цунами с морскими гидротехническими сооружениями в плоском случае.

Необходимы дальнейшие его апробация и развитие с точки зрения учёта шероховатости поверхности откоса, проницаемости её защитного слоя, свойств морского дна.

References

1. *Stoker J. J.* Water Waves: The Mathematical Theory With Applications. John Wiley & Sons, Inc./Wiley Classics Library, 1992. 600 p.
2. *Aleshkov Yu. Z.* The complete model of the propagation of long waves and their interaction with a vertical wall. *Izv. AN SSSR. Mekhanika zhidkosti i gaza.* 1985, 3, 173—176 (in Russian).
3. *Aleshkov Yu. Z.* The complete model of tsunami waves propagation. Issledovaniya tsunami. 1987, 2, 113—122. (in Russian).
4. *Aleshkov Yu. Z.* Mathematical modeling of generation, propagation and force effects on marine hydraulic structures. *Trudy Vsesoyuznogo soveschaniya po chislennym metodam v zadachakh volnovoi gidrodinamiki. Krasnoyarsk, Izd-vo VC SO AN SSSR,* 1991, 41—46. (in Russian).

5. *Zheleznyak M. A., Pelinovsky E. N.* Physical and mathematical models of the tsunami run-up on the beach. *Nakat tsunami na bereg. Gorky, Izd-vo IPF AN SSSR,* 1985, 8—33 (in Russian).
6. *Lyatkher V. M., Militeyev A. N.* Calculation of the long gravitational waves run-up on a slope. *Okeanologiya.* 1974, 1, 37—43 (in Russian).
7. *Fedotova Z. I., Khakimzyanov G. S.* Nonlinear-dispersion models of wave hydrodynamics for a movable bottom. *Tr. IX vserossiyskoi konf. "Prikladnye tekhnologii gidroakustiki I gidrofiziki". SPb., Nauka,* 2008, 326—331 (in Russian).
8. *Zakharov Yu. N.* On a numerical algorithm for solving Aleshkov's nonlinear dispersion equations. *Trudy Vsesoyuznogo soveschaniya po chislennym metodam v zadachakh volnovoi gidrodinamiki. Krasnoyarsk, Izd-vo VC SO AN SSSR,* 1991, 64—69 (in Russian).
9. *Karev V. Yu., Kompaniyets L. A., Novikov V. A., Chubarov L. B.* Numerical algorithm for 2-d nonlinear dispersion models of Aleshkov and Green-Nagdy. *Trudy Vsesoyuznogo soveschaniya po chislennym metodam v zadachakh volnovoi gidrodinamiki. Krasnoyarsk, Izd-vo VC SO AN SSSR,* 1991, 116—121 (in Russian).
10. *Mazova R. Kh., Pelinovsky E. N.* Tsunami run-up to the shore without collapse. *Volny i difrakciya. M., IRE AN SSSR,* 1981, 2, 265—268 (in Russian).
11. *Manoilin S. V., Maksimov V. V., Fedorov A. S.* Transformation of nonlinear long waves on the shelf. Issledovaniya po tsunami. *M., Izd-vo AN SSSR,* 1988, 81—85 (in Russian).
12. *Matveyeva M. S.* Numerical model of long waves propagation. *Trudy Vsesoyuznogo soveschaniya po chislennym metodam v zadachakh volnovoi gidrodinamiki. Krasnoyarsk, Izd-vo VC SO AN SSSR,* 1991, 75—79 (in Russian).
13. *Shokin Yu. I., Beizel S. A., Fedotova Z. I., Chubarov L. B.* On the use of numerical simulation methods for solving applied tsunami problems. *Tr. mezhdunar. konf. "Vychislitel'nye i informacionnye tekhnologii v nauke, tekhnike i obrazovanii". Pavlodar, TOO NPF "EKO",* 2006, I, 36—51 (in Russian).
14. *Kamynin E. Yu., Maksimov V. V., Nudner I. S., Semenov K. K., Khakimzyanov G. S.* Investigation of the interaction of a solitary wave with a partially submerged structure. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika.* 2010, 4(10), 39—54 (in Russian).
15. *Maksimov V. V., Manoilin S. V., Nudner I. S.* Interaction of a long solitary wave with marine waterworks (experimental approach). *Sovmestny vypusk. Vychislitel'nye tekhnologii. T. 13, Vestnik KAZNU im. Al'-Farabi. Ser. Matem., mech., informatika. N 3 (58). Part II. Almaty-Novosibirsk,* 2008, 361—364 (in Russian).
16. *Manoilin S. V., Maksimov V. V.* The interaction of tsunami waves with protective structures. *Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo.* 1986, 4, 32—34 (in Russian).
17. *Manoilin S. V., Maksimov V. V., Fedorov A. S.* The study of the interaction between long waves and obstacles of complex shape. *Morskoy gidrofizicheskii zhurnal. Sevastopol,* 1987, 3, 24—28 (in Russian).
18. *Manoilin S. V., Maksimov V. V., Nudner I. S.* Interaction of a solitary wave with the complex shape obstacles. *Tr. IX vserossiyskoy konf. "Prikladnye tekhnologii gidroakustiki i gidrofiziki". SPb., Nauka,* 2008, 441—443 (in Russian).
19. *Manoilin S. V., Maksimov V. V., Nudner I. S.* Mathematical and physical simulation of the run-up of the solitary wave on a smooth slope. *Matematicheskiye metody v tekhnike i tekhnologiyakh — MMTT-22. Sb. trudov XXII Mezhdunar. naychn. konf. Pskov, Izd-vo Pskov. gos. politechn. in-ta,* 2009, 5, 70—71 (in Russian).
20. *Nudner I. S., Maksimov V. V.* Tsunami waves action on the marine waterworks. *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika.* 2008, 2, 45—56. (in Russian).
21. *Nudner I.S., Manoilin S. V., Maksimov V. V.* Impact of a solitary wave on structures. *Tr. mezhdunar. konf. "Shestye Okunevskiye chteniya" 23—27.06.2008. SPb., Materialy dokladov. T. II. Balt. gos. tekhn. un-t. SPb.,* 2008, 10—16 (in Russian).
22. *Manoilin S. V., Maksimov V. V.* Interaction of tsunami type waves with protective structures. *Hydrotechnical construction.* 1986, 20, 4, 237—240.
23. *Marchuk An. G., Chubarov L. B., Shokin Yu. I.* Numerical simulation of tsunami waves. *Novosibirsk, Nauka,* 1983, 176 p. (in Russian).
24. *Fedotova Z. I.* Justification of the numerical method for run-up simulating of long waves on the shore. *Vychislitel'nye tekhnologii.* 2002, 7, 5, 58—76 (in Russian).
25. *Khakimzyanov G. S., Shokin Yu. I., Barakhnin V. B., Shokina N. Yu.* Numerical simulation of fluid flows with the surface waves. *Novosibirsk, Izd-vo SO RAN,* 2001 (in Russian).
26. *Shokin Yu. I., Chubarov L. B., Marchuk An. G., Simonov K. V.* Computing experiment in the tsunami problem. *Novosibirsk, Nauka,* 1989. 168 p. (in Russian).
27. *Chubarov L. B., Fedotova Z. I.* An Effective High Accuracy Method for Tsunami Runup Numerical Modeling. *Submarine Landslides and Tsunamis. Book Series:* NATO SCIENCE SERIES: IV. Eds: Ahmet C. et al. *Kluwer Academic Publishers,* 2003, 203—216.
28. *Voltsinger N. E., Klevanny K. A., Pelinovsky E. N.* Long-wave dynamics of the coastal zone. *Leningrad, Gidrometeoizdat,* 1989, 272 p. (in Russian).
29. *Didenkulova I. I.* Run-up modeling of long waves on 2-d slope and real events analysis. *Diss. ... k.f.-m.n. Nizhny Novgorod,* 2006. 199 p. (in Russian).
30. *Pelinovsky E. N.* Nonlinear dynamics of tsunami waves. *Gorky, Izd-vo IPF AN SSSR,* 1982, 226 p. (in Russian).
31. *Pelinovsky E. N.* Hydrodynamics of tsunami waves. *Nizhny Novgorod, Izd-vo IPF RAN,* 1996, 276 p. (in Russian).
32. *Pelinovsky E. N., Stepanyants Yu., Talipova T.* Nonlinear dispersion model of sea waves in the coastal zone. *J. of Korean Society Coastal and Ocean Engineers.* 1993, 5, 4, 307—317.
33. *Pelinovsky E.* Nonlinear hyperbolic equations and run-up of huge sea waves. *Applicable Analysis.* 1995, 57, 63—84.
34. *Aleshkov Yu. Z.* Theory of the interaction of waves with obstacles. *Leningrad, Izd-vo LGU,* 1990, 372 p. (in Russian).
35. *Kulmach P. P., Filippenok V. Z.* The tsunami impact on marine hydraulic structures. *Moskva, Transport,* 1984, 298 p. (in Russian).
36. *Levin B. V., Nosov M. A.* Physics of tsunamis and related phenomena in the ocean. *Moskva, Yanus-K,* 2005, 360 p. (in Russian).
37. *Carrier G. F., Greenspan H. P.* Water waves of finite amplitude on a sloping beach. *J. Fluid Mech.* 1958, 4, 97—109.
38. *Keller H. B., Levine D. A., Whitham G. H.* Motion of a bore over sloping beach. *J. Fluid Mech.* 1960, 7, 302—316.

39. *Shen M. C., Meyer R. E.* Climb of a bore on a beach. Part 3. Run-up. *J. Fluid Mech.* 1963, 16, 113—125.
40. *Sielecki A., Wurtele M.* The numerical integration of the nonlinear shallow water equations with sloping boundaries. *J. Compt. Physics.* 1970, 6, 219—236.
41. *Spielvogel L. Q.* Single-wave run-up on sloping beaches. *J. Fluid Mech.* 1976, 74, 4, 685—694.
42. *Hibberd S., Peregrine D.H.* Surf and run-up on a beach: A uniform bore. *J. Fluid Mech.* 1979, 95, 2, 323—345.
43. *Pedersen G., Gjevik B.* Run-up of solitary waves. *J. Fluid Mech.* 1983, 135, 283—290.
44. *Kim S. K., Liu Ph. L.-F., Liggett J. A.* Boundary integral equation solutions for solitary wave generation, propagation and run-up. *Coastal Engng.* 1983, 7, 299—317.
45. *Synolakis C. E.* The runup of solitary waves. *J. Fluid Mech.* 1987, 185, 523—545.
46. *Tadepalli S., Synolakis C. E.* The run-up of N-waves on sloping beaches. *Proc. R. Soc. Lond. A*. 1994, 445, 99—112.
47. *Liu Ph. L.-F., Cho Yo-S., Briggs M. J., Kanoglu U., Synolakis C. E.* Runup of solitary waves on a circular island. *J. Fluid Mech.* 1995, 302, 259—285.
48. *Titov V. V., Synolakis C. E.* Modelling of Breaking and Non-breaking Long Wave Evolution and Runup using VTCS-2. *J. of Waterways, Ports, Coastal and Ocean Engineering.* 1995, 121, 6, 308—316.
49. *Titov V. V., Synolakis C. E.* Numerical modeling of tidal wave runup. *J. of Waterways, Ports, Coastal and Ocean Engineering.* 1998, 124, 4, 151—171.
50. *Liu Ph. L.-F., Yeh Harry, Synolakis Costas* (eds). Advanced numerical models for simulating tsunami waves and runup. *World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.* 2008, 341 p.
51. *Maiti Sangita, Sen Debabrata.* Computation of solitary waves during propagation and runup on a slope. *Ocean Engineering.* 1999, 26, 1063—1083.
52. *Liu Ph. L.-F., Lynett P., Synolakis C. E.* Analytical solutions for forced long waves on a sloping beach. *J. Fluid Mech.* 2003, 478, 101—109.
53. *Carrier G. F., Wu T. T., Yeh H.* Tsunami runup and drawdown on a plane beach. *J. Fluid Mech.* 2003, 475, 449—461.
54. *Kanoglu U.* Nonlinear evolution and runup-rundown of long waves over a sloping beach. *J. Fluid Mech.* 2004, 513, 363—372.
55. *Maksimov V. V., Fomin A. N.* Modeling of the solitary wave run-up on protective hydraulic structures. *Vestnik SPGUTD. Ser. 1: Yestestvennye i tekhnicheskiye nauki.* 2014, 2, 33—37 (in Russian).
56. *Baldock T. E., Cox D., Maddux T., Killian J., Fayler L.* Kinematics of breaking tsunami wavefronts: A data set from large scale laboratory experiments. *Coastal Engineering.* 2009, 56, 506—516.
57. *Chang Yu-Hsuan, Hwang Kao-Shu, Hwung Hwung-Hweng.* Large-scale laboratory measurements of solitary wave inundation on a 1:20 slope. *Coastal Engineering.* 2009, 56, 1022—1034.
58. *Hsiao Shih-Chun, Hsu Tai-Wen, Lin Ting-Chieh, Chang Yu-Hsuan.* On the evolution and run-up of breaking solitary waves on a mild sloping beach. *Coastal Engineering.* 2008, 55, 975—988.
59. *Lee Y., Raichlen F.* Solitary Wave Runup on Plane Slopes. *J. of Waterways, Ports, Coastal and Ocean Engineering.* 2001, 127, 1, 33—44.
60. *Lin Chang, Hwung Hwung-Hweng.* Observation and measurement of the bottom boundary layer flow in the prebreaking zone of shoaling waves. *Ocean Engineering.* 2002, 29, 1479—1502.
61. *Pudjaprasetya S.R., Groesen E. Van, Soewono E.* The splitting of solitary waves running over a shallow water. *Wave Motion.* 1999, 29, 375—389.
62. *Afanas'yev K. E., Maksimov V. V., Nudner I. S., Semenov K. K., Stukolov S. V.* Numerical simulation of the solitary wave by wave-maker operation. *Tr. XI Vserossiyskoy konf. "Prikladnye tekhnologii gidroakustiki i gidrofiziki". SPb., Nauka,* 2012, 201—203 (in Russian).
63. *Maksimov V. V., Kshevetskii S. P.* A new method for internal waves modeling in a stratified fluid of finite depth generated by a current and a seamount. *Tr. XIII Vserossiyskoy konf. "Prikladnye tekhnologii gidroakustiki i gidrofiziki". SPb.,* 2016, 180—182 (in Russian).

К статье *Максимов В. В.* и др. Взаимодействие волн цунами...

Maximov V. V. et al. Interaction of tsunami waves...

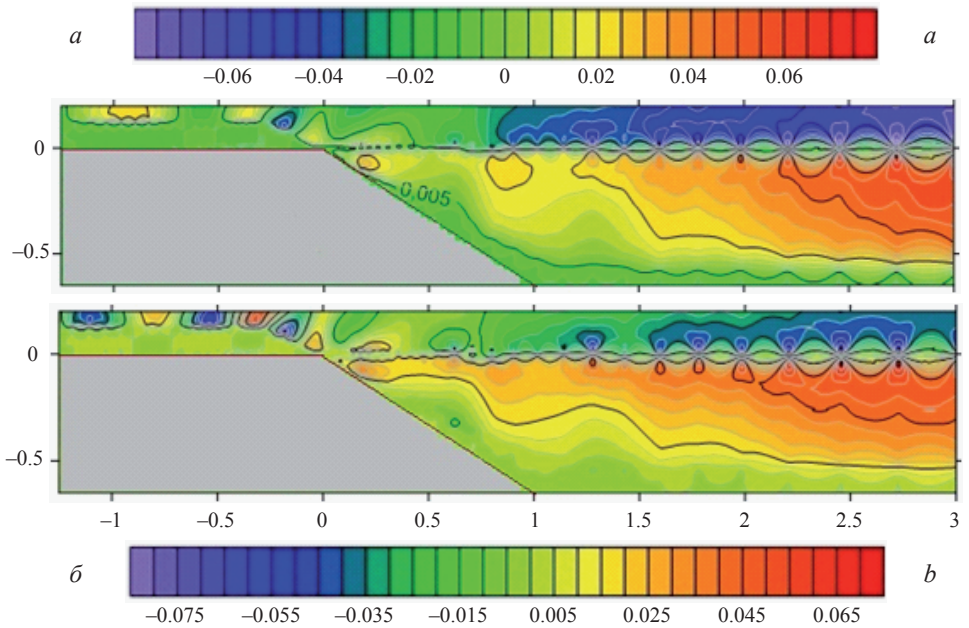

Рис. 6. Горизонтальная составляющая скорости водного потока U, (м/с) при $t = 0.55$ с (*а*) и при $t = 1.05$ с (*б*).

Fig. 6. The horizontal component of the water flow velocity U, (m/s), for $t = 0.55$ s (*a*) and $t = 1.05$ s (*b*).

К статье *Максимов В. В.* и др. Взаимодействие волн цунами...

Maximov V. V. et al. Interaction of tsunami waves...

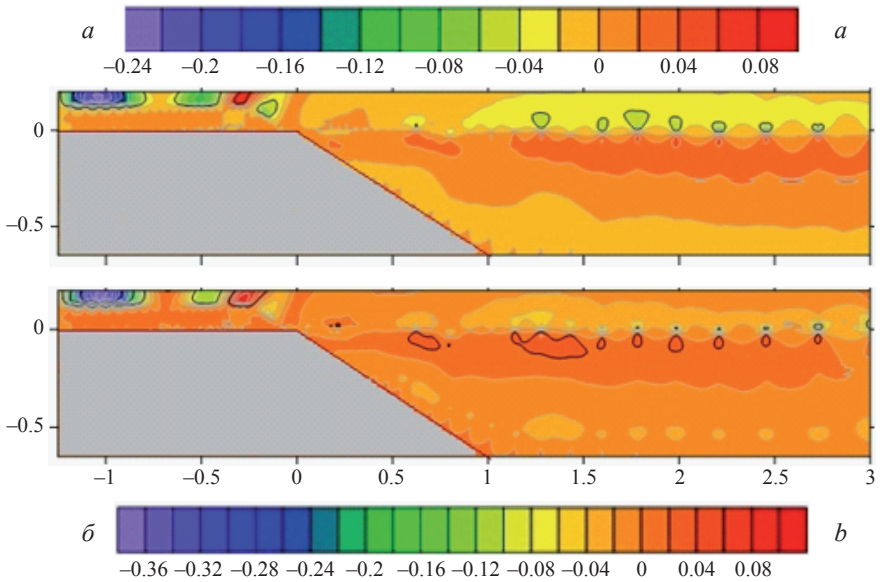

Рис. 7. Горизонтальная составляющая скорости водного потока U, (м/с), при $t = 1.55$ с (*а*) и $t = 2.05$ с (*б*).

Fig. 7. The horizontal component of the water flow velocity U, (m/s) for $t = 1.55$ s (*a*) and $t = 2.05$ s (*b*).

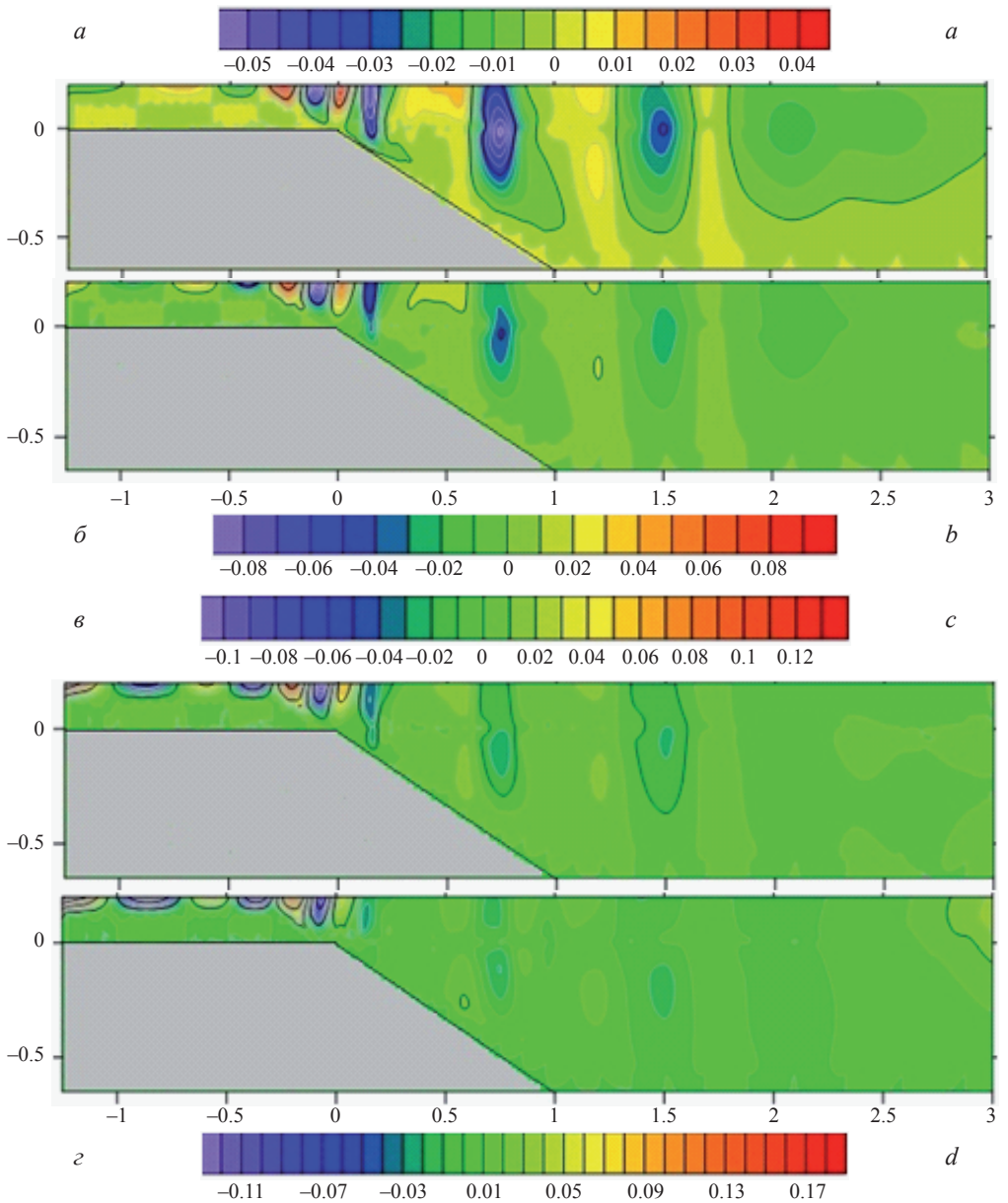

Рис. 8. Вертикальная составляющая скорости водного потока V, (м/с), при $t = 0.55$ с (*а*), $t = 1.05$ с (*б*), $t = 1.55$ с (*в*), $t = 2.05$ с (*г*).

Fig. 8. The vertical component of the water flow velocity V, (m/s), for $t = 0.55$ s (*a*), $t = 1.05$ s (*b*), $t = 1.55$ s (*c*), $t = 2.05$ s (*d*).