

УДК 626+532.5

© Н. Д. Беляев^{1,2}, В. В. Лебедев¹, А. В. Алексеева¹, И. С. Нуднер^{1,3}, К. К. Семенов^{1,2}, Д. И. Щемелинин¹

¹23 ГМПИ — филиал АО «31 ГПИСС», г. Санкт-Петербург

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

³Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ», г. Санкт-Петербург

dnd@mail.ru, igor_nudner@mail.ru, semenov.k.k@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ СТРУКТУРЫ ГРУНТА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВОЛН ЦУНАМИ НА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ

Статья поступила в редакцию 29.05.2017, после доработки 14.08.2017.

Работа посвящена исследованию изменений структуры грунта у оснований морских гидротехнических сооружений, вызванных воздействием на них волн цунами. Представлены результаты выполненных экспериментальных исследований для двух видов сооружений: морской ледостойкой стационарной платформы гравитационного типа и берегоукрепления откосного типа с защитным слоем из наброски. В ходе опытных исследований воздействия волн цунами на морскую платформу гравитационного типа были получены сформировавшиеся профили дна и выполнен их анализ. В результате получены количественные сведения о степени разрыхления грунта у основания платформы. Полученные данные свидетельствуют о возможной независимости значения степени разрыхления грунта от числа Эйлера, характеризующего интенсивность волнового воздействия на грунт. Экспериментальные исследования воздействия волн цунами на берегоукрепительное сооружение откосного типа показали, что фильтрационные потоки, возникающие в теле наклонной грани сооружения, в результате воздействия волны цунами способствуют изменению структуры каменной наброски, которое приводит к увеличению пористости грунта, слагающего тело сооружения. Отмечено качественное подобие следствий воздействия волн цунами на грунт и на набросные элементы гидротехнического сооружения.

Ключевые слова: волны цунами, разрыхление грунта, профиль дна.

N. D. Belyaev^{1,2}, V. V. Lebedev¹, A. V. Alexeeva¹, I. S. Nudner^{1,3}, K. K. Semenov^{1,2}, D. I. Schemelinin¹

¹23 State Marine Design Institute — Branch of «31 State Design Institute of Special Construction», St.-Petersburg, Russia

²Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St.-Petersburg, Russia

³Baltic State Technical University, St.-Petersburg, Russia

dnd@mail.ru, igor_nudner@mail.ru, semenov.k.k@gmail.com

INVESTIGATION OF THE SOIL STRUCTURE CHANGES UNDER THE TSUNAMI WAVES IMPACT ON THE MARINE HYDROTECHNICAL STRUCTURES

Received 29.05.2017, in final form 14.08.2017.

This work is dedicated to the studies of the soil structure changes near the marine hydrotechnical structures caused by the tsunami waves impact. The results of the experimental investigations are presented for two types of structures: for a marine ice-resistant stationary gravitational-type platform and for a bank reinforcement of the sloping type with a protective riprap layer. As the results of the experimental studies of the tsunami waves impact on the gravity-type offshore platform, the formed bed profiles were measured and their analysis was performed. The quantitative information was obtained on the degree of the soil loosening near the base of the platform. The obtained data testify to the possible independence of the soil loosening degree from the Euler number that characterizes the intensity of the wave impact on the soil. Experimental studies of the tsunami waves impact on the bank reinforcement structure of the sloping type shown that the filtration flows occurring inside the inclined facet of the structure as a result of the tsunami wave action lead to a change in the structure of the rock riprap. This increases the porosity of the soil that composes the structure. A qualitative

Ссылка для цитирования: Беляев Н. Д., Лебедев В. В., Алексеева А. В., Нуднер И. С., Семенов К. К., Щемелинин Д. И. Исследования изменений структуры грунта при воздействии волн цунами на гидротехнические сооружения // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2017. Т. 10, № 4. С. 44—52.

For citation: Belyaev N. D., Lebedev V. V., Alexeeva A. V., Nudner I. S., Semenov K. K., Schemelinin D. I. Investigation of the soil structure changes under the tsunami waves impact on the marine hydrotechnical structures. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2017, 10, 4, 44—52.

DOI: 10.7868/S2073667317040049.

similarity between the tsunami waves impact on the soil and on the embankment elements of the hydraulic engineering structure is noted.

Key words: tsunami waves, soil liquefaction, seabed profiles.

При эксплуатации морских гидротехнических сооружений гравитационного типа необходимо обеспечивать их долговременную устойчивость при внешних воздействиях. Частичная или полная ее потеря может привести к повреждению или даже разрушению, что может стать причиной существенного ущерба. Многообразие используемых сооружений, способов сопряжения их основания с дном и условий эксплуатации препятствуют выработке единых рекомендаций по инженерной оценке характеристик устойчивости, выполняемой при проектировании.

Среди воздействий, которым подвергаются морские гидротехнические сооружения, волны цунами являются одним из самых опасных [1—4]. Вместе с тем закономерности их влияния на устойчивость гидротехнических сооружений исследованы не в полной мере, несмотря на то, что эта задача является актуальной и значимой. Среди сравнительно мало изученных вопросов — воздействие волн цунами, оказываемое на грунт у оснований морских гидротехнических сооружений [5—7]. Для частичного преодоления данного обстоятельства в гидроволновой лаборатории «23 ГМПИ — филиала АО «31 ГПИСС» (Санкт-Петербург) были проведены эксперименты по воздействию волн цунами на модели гидротехнических сооружений (рис. 1) для получения и анализа информации о структуре грунта основания или тела самого гидротехнического сооружения при воздействии волн цунами. В настоящей работе представлены результаты исследований двух типов сооружений: морской ледостойкой стационарной платформы (МЛСП) гравитационного типа и берегоукрепления откосного типа с защитным слоем из наброски. Данные материалы были представлены и обсуждены на конференциях [8, 9].

Волны цунами, как правило, представляют собой цуг идущих друг за другом волн. Ниже (рис. 2) представлены мареограммы водной поверхности, зафиксированные в различных местах при Андаман-Суматранском цунами 2004 г. [5].

Подобный характер имеют и волны в расчетах, связанных с возникновением и распространением волн цунами от подводных землетрясений [10, 11] (рис. 3).

Для получения волн цунами в выполненных исследованиях в головной части экспериментальных установок располагался волнопродуктор, представляющий собой резервуар, который с помощью вакуумного насоса заполнялся водой до определенного объема. Путем срыва вакуума из резервуара осуществлялся выпуск воды, при этом образовывались основная волна и следующий за ней цуг волн меньшей высоты. Описание волнопродуктора и принципа его работы приведено в [12, 13]. Состав экспериментальной установки подробно представлен в [14, 15].



Рис. 1. Использованные экспериментальные установки.

- a* — пространственная установка с моделью морской гравитационной платформы;
b — модель берегоукрепительного сооружения откосного типа в гидроволновом лотке.

Fig. 1. Used experimental setups.

- a* — spatial setup with the model of the marine gravity platform;
b — the model of the bank reinforcement structure of the sloping type in the hydrowave flume.

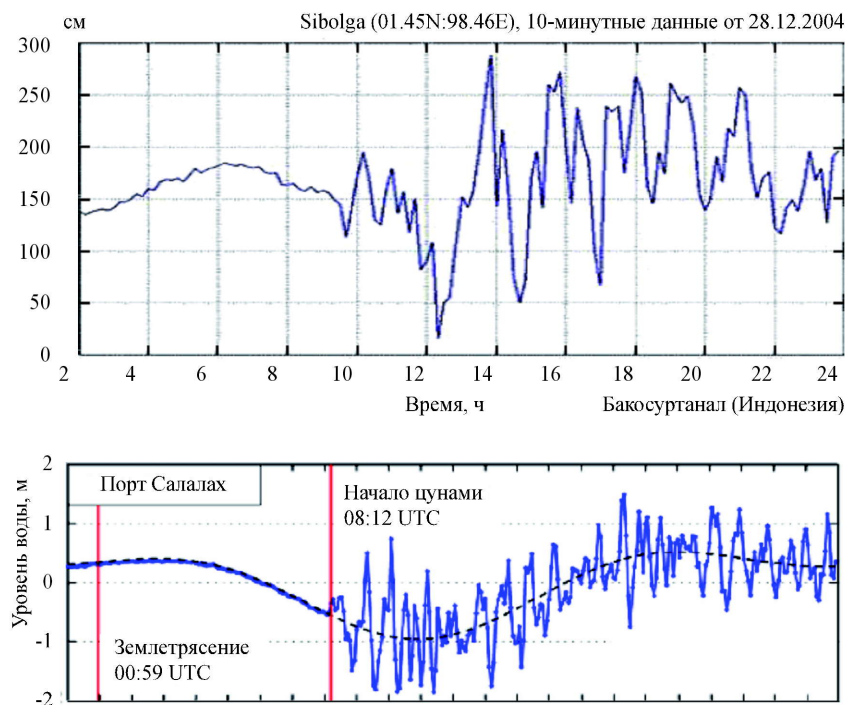


Рис. 2. Изменения уровня воды в разных местах при Андаман-Суматранском цунами 2004 г. [5].

Fig. 2. Changes in the water level in different places under the Andaman-Sumatran tsunami of 2004 [5].

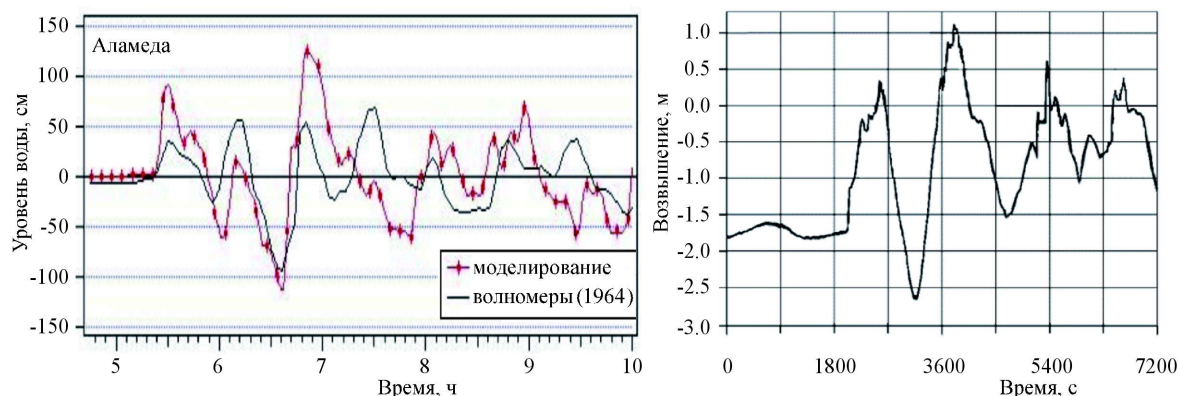


Рис. 3. Пример изменений уровня воды, полученных при расчетах волн цунами [10, 11].

Fig. 3. Example of changes in the water level obtained in the calculation of tsunami waves [10, 11].

На рис. 4 приведены примеры профилей созданной в экспериментах волны цунами.

Экспериментальные исследования на пространственной установке состояли из пяти опытов, отличающихся глубиной d в месте расположения модели и высотой волн цунами h_w : № 1 ($d = 0.34$ м, $h_w = 0.107$ м); № 2 ($d = 0.34$ м, $h_w = 0.078$ м); № 3 ($d = 0.18$ м, $h_w = 0.098$ м); № 4 ($d = 0.18$ м, $h_w = 0.078$ м); № 5 ($d = 0.18$ м, $h_w = 0.121$ м). В опыте № 6 ($d = 0.18$ м, $h_w = 0.135$ м) по периметру модели МЛСП была выполнена защитная наброска из камня. После окончания каждого опыта экспериментальная установка осушалась. Затем проводилось сканирование донной поверхности, прилегающей к модели МЛСП, при помощи специального сканера поверхностей (рис. 5).

На рис. 6 (см. вклейку) приведены результаты сканирования поверхности дна, сформировавшейся по результатам воздействия волн цунами на модель МЛСП.

Сканирование донной поверхности показало, что в процессе проведения каждого опыта в результате взаимодействия волн цунами с моделью МЛСП наряду с образованием участков местного размыва происходило уменьшение плотности донного грунта по всему периметру модели (в среднем

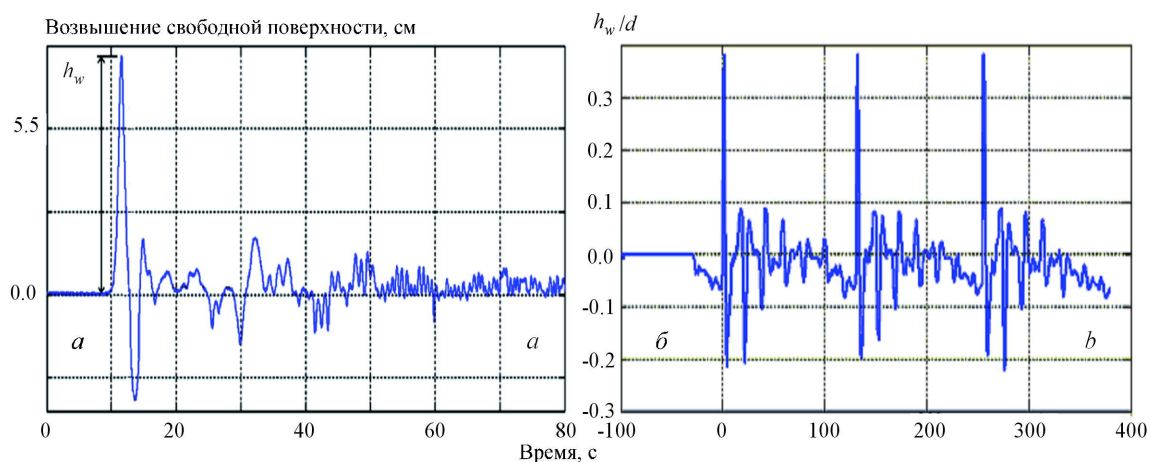


Рис. 4. Пример изменений уровня воды, полученных в экспериментах.
a — первая волна цунами; *б* — последовательность трех волн цунами.

Fig. 4. Example of changes in the water level obtained in experiments.
a — first tsunami wave; *b* — sequence of three tsunami waves.

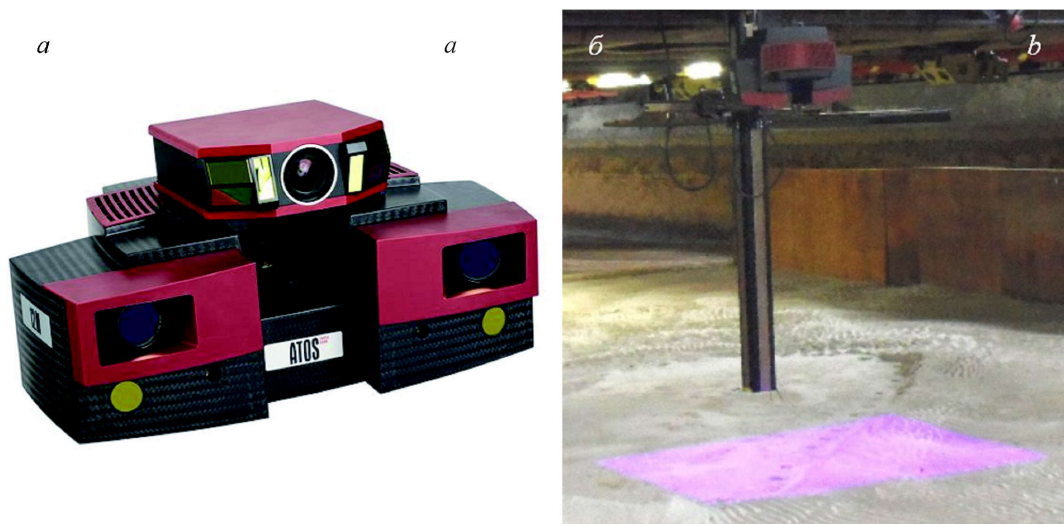


Рис. 5. Средства измерения профиля дна.
a — вид сканера поверхностей ATOS Triple Scan; *б* — сканер ATOS Triple Scan при измерении поверхности.

Fig. 5. Means for measuring the bed profile.
a — the surface scanner ATOS Triple Scan; *b* — scanner ATOS Triple Scan during the bed surface measuring.

на 40 % согласно [16]). Следует отметить, что изменение структуры грунта и, как следствие, изменение его плотности в пределах определенного (активного) слоя происходит неравномерно: изменение максимально в придонном слое и уменьшается с глубиной погружения в грунт. Таким образом, активный слой может быть разбит на два участка: придонный участок с опасным изменением структуры грунта и более глубокий участок с допустимыми изменениями структуры. Граница опасного участка в пределах глубины активного слоя определяется типом и классом обтекаемого волной цунами сооружения. Вследствие большой ответственности рассмотренного в работе сооружения было принято решение, что глубина опасного участка активного слоя равна максимальной глубине размыва донного грунта.

Полученные по результатам сканирования профили дна, сформировавшиеся после воздействия волн цунами в опытах №№ 1—5, приведены на рис. 7 для сечений 1-1, 2-2, 3-3 соответственно.

Согласно приведенным профилям дна максимальное уменьшение плотности донного грунта наблюдается после проведения каждого опыта в створе сопряжения дна и модели МЛСП по всему периметру сооружения.

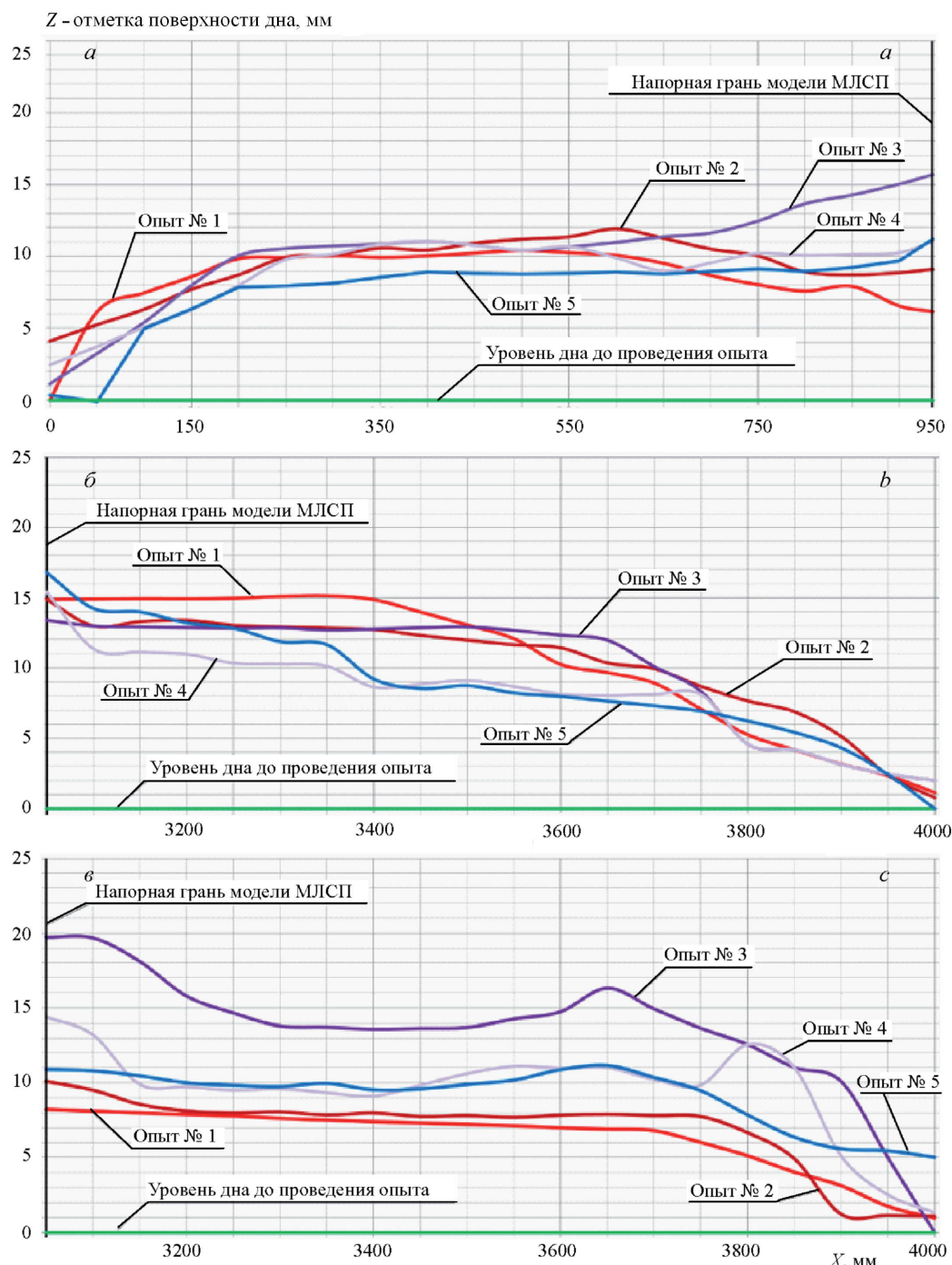


Рис. 7. Профили дна в сечениях 1-1 (а), 2-2 (б) и 3-3 (в), сформировавшиеся по результатам опытов №№ 1—5.
Fig. 7. The bed profiles in sections 1-1 (a), 2-2 (b) and 3-3 (c) formed according to the results of experiments No 1—5.

На рис. 8 приведен профиль дна в сечениях 1-1, 2-2 и 3-3, сформировавшийся по результатам воздействия волн цунами в опыте № 6 (с защитной наброской).

Из представленных рисунков видно, что при воздействии волны цунами на МЛСП с защитной призмой из каменной наброски по периметру сооружения, также происходит изменение структуры грунта, но уменьшение плотности донного грунта не столь значительно, как в предыдущих случаях. При этом максимальное уменьшение плотности донного грунта происходит в створах, расположенных на границе донного грунта и каменной наброски.

В работе [16] приведены численные значения коэффициента уменьшения плотности донного грунта или иначе коэффициента разжижения донного грунта, возникающего в результате взаимодействия волны цунами с гравитационным гидротехническим сооружением, $C_1 = \rho_{swc} / \rho_{s0}$, где ρ_{s0} и ρ_{swc} — плотности

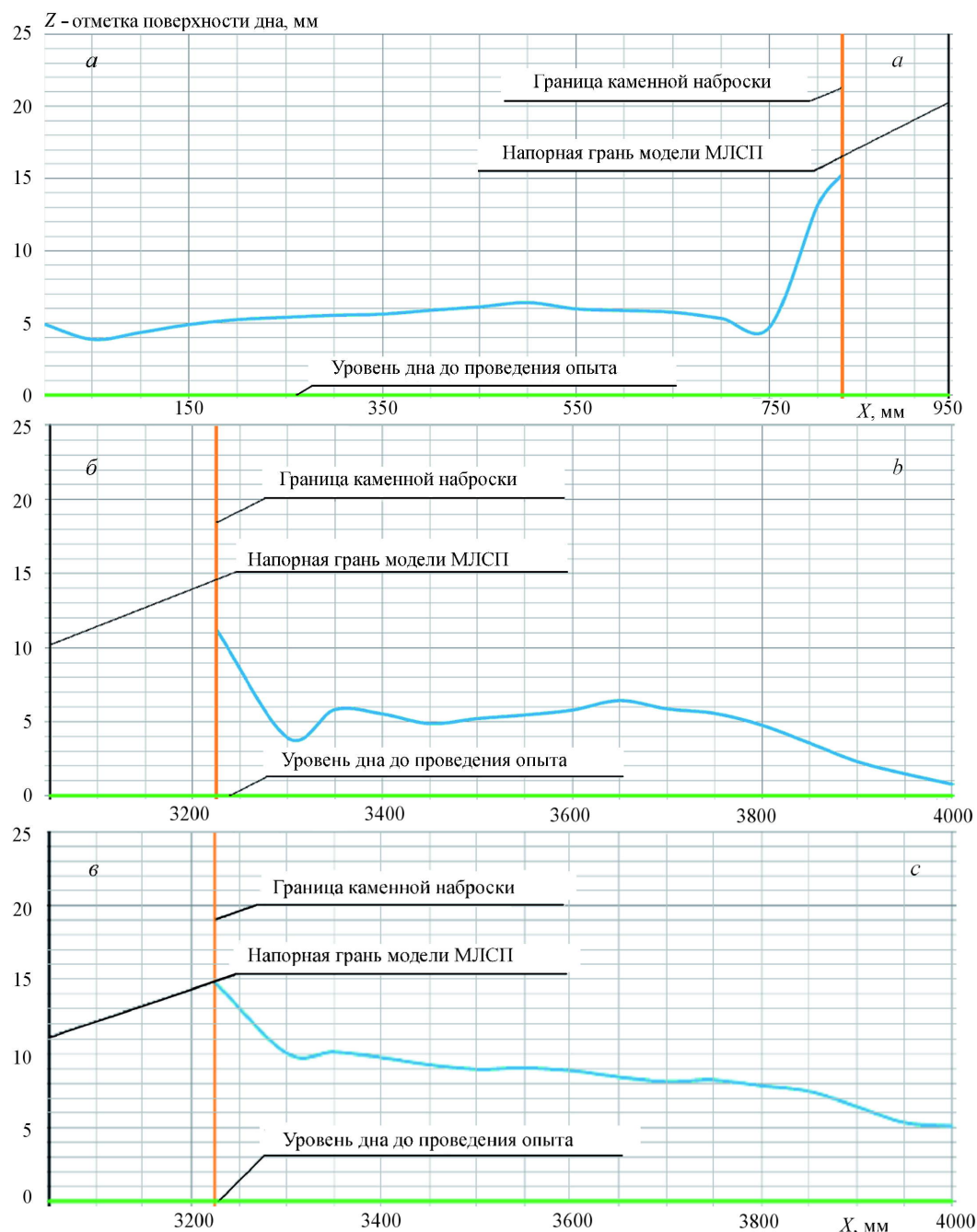


Рис. 8. Профиль дна в сечениях 1-1 (а); 2-2 (б); 3-3 (в), сформировавшийся по результатам опыта № 6 ($d = 0.18$ м, $h_w = 0.135$ м).

Fig. 8. The bed profile in section 1-1 (a); 2-2 (b); 3-3 (c) formed according to the results of experiment No 6 ($d = 0.18$ m, $h_w = 0.135$ m).

грунта до и после прихода волны цунами. Значения коэффициента C_1 могут быть поставлены в соответствие числам Рейнольдса $Re_B = V_{wc \max} B / \nu$, где $V_{wc \max}$ — максимальное значение скорости водного потока в период действия волны цунами; B — характерный линейный размер, в данном случае ширина МЛСП; ν — кинематический коэффициент вязкости воды. Вычисленные значения приведены в табл. 1. В опытах 1—4 исследовалось воздействие цуга волн цунами приблизительно одной суммарной длительности (~80 с), в опыте 5 — существенно более высокой длительности (180 с).

График зависимости значения коэффициента $C_1 = C_1(Re_B) = 1 - 5.3 \cdot 10^{-7} \cdot Re_B$ от числа Рейнольдса представлен на рис. 9.

Полученные данные свидетельствуют также о возможной независимости значения степени разрыхления грунта от числа Эйлера $E_{wc} = \Delta p_{wc \max} / (\rho V_{wc \max}^2)$, характеризующего интенсивность

Значения C_1 , Re_B и E_{wc} , полученные в проведенных опытах

	Опыт № 1	Опыт № 2	Опыт № 3	Опыт № 4	Опыт № 5
C_1	0.530	0.601	0.561	0.621	0.626
$Re_B \cdot 10^{-5}$	9.573	7.351	7.927	6.646	7.930
E_{wc}	4.788	5.384	6.183	9.679	6.603

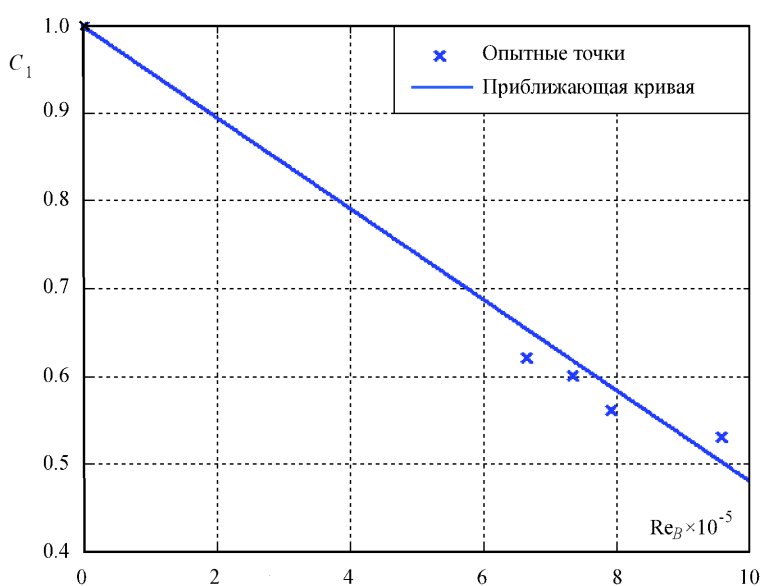
волнового воздействия на грунт, где ρ — плотность воды; $\Delta p_{wc \max}$ — максимальное изменение давления на границе модели платформы и грунта.

Обоснование возможной независимости значения C_1 от числа Эйлера выполнено следующим образом. По результатам измерений пар значений (E_{wc} , C_1) для диапазона значений $4 < E_{wc} < 10$ методом наименьших квадратов была построена зависимость $C_1(E_{wc}) = C_1 = 0,5878$. Была осуществлена проверка его адекватности экспериментальным значениям (E_{wc} , C_1). Поскольку как значения C_1 , так и значения E_{wc} искажены погрешностями, проверка производилась на основе критерия серий Вальда-Вольфовица [17], соответствующего тем условиям, в которых были получены опытные данные.

Были вычислены разности $\Delta_i = C_{1i} - C_1$, $i = 1, 2, \dots, 5$ для всех опытов. График признается адекватным исходным данным, если данные разности не коррелированы друг с другом. Было подсчитано число положительных и отрицательных значений Δ_i ($P = 3$ и $N = 2$ соответственно), число серий последовательных значений Δ_i , имеющих одинаковый знак ($S = 4$). График признается адекватным [17], если величина $K = |S - M - 1|/V$ окажется меньше критического значения $K_{\text{крит}} = 0.5V + 1.6449$. Приняты обозначения: $M = 2PN/(P + N)$, $V = \sqrt{(P + N - 1)/(M(M - 1))}$. В результате вычислений значение K оказалось равным 0.65, а значение $K_{\text{крит}}$ — равным 2.19. Это свидетельствует о том, что есть основания считать, что значение степени разрыхления C_1 не зависит от числа Эйлера E_{wc} .

Экспериментальные исследования воздействия волн цунами на берегоукрепительное сооружение откосного типа были проведены на физической модели, выполненной в масштабе 1:27 в гидроволновом лотке (рис. 10). Для бесконтактного измерения отметок уровня дна были использованы ультразвуковые датчики, описанные в [18, 19].

Выполненные опыты показали, что фильтрационные потоки, возникающие в теле наклонной грани сооружения, в результате воздействия волны цунами способствуют изменению структуры каменной наброски, которое приводит к увеличению пористости грунта, слагающего тело сооружения [9, 18]. Это подтверждается увеличением отметок верха слоя каменной наброски относительно первоначального положения d_s (рис. 11).

Рис. 9. График зависимости коэффициента C_1 от числа Рейнольдса Re_B .Fig. 9. The dependence of C_1 on the Reynolds number Re_B .

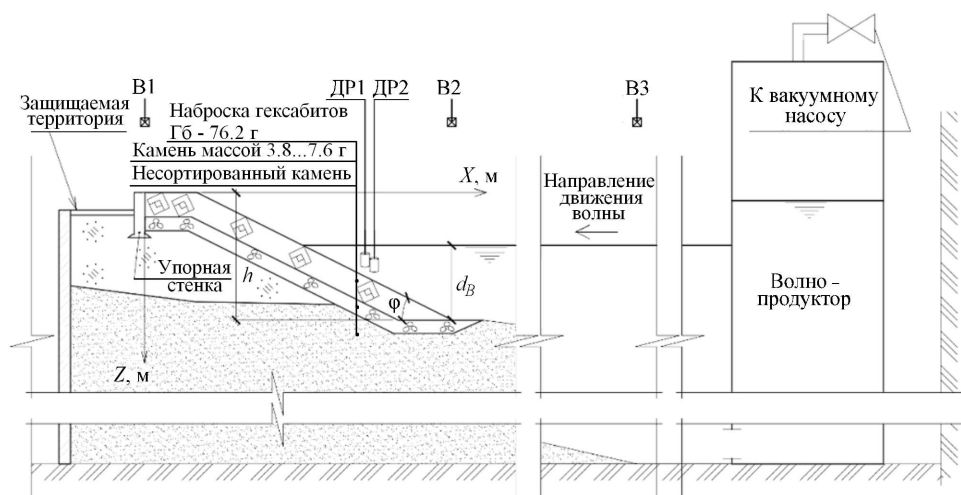


Рис. 10. Схема экспериментальной установки с моделью берегоукрепительного сооружения откосного типа.

В1, В2, В3 — ультразвуковые волнометры;

ДР1, ДР2 — датчики ультразвуковой системы измерения отметки дна.

Fig. 10. The experimental setup for the model of the bank reinforcement structure of the sloping type.

В1, В2, В3 — ultrasonic wavemeters;

ДР1, ДР2 — gauges of the contactless ultrasonic system for measuring the bed profile changes.

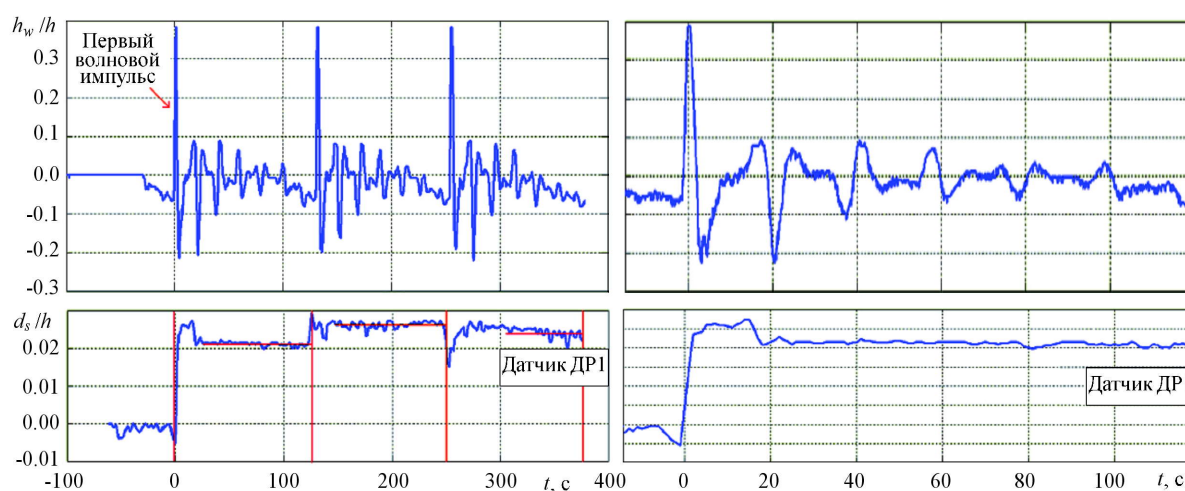


Рис. 11. Изменение отметки поверхности каменной наброски от воздействия цунами при отношении глубины к высоте волны цунами $d_b / h_{wc} = 0.595$ [9].

Fig. 11. Change of the rock riprap surface mark caused by the tsunami waves impact for the ratio of the depth to the tsunami wave height equal to $d_b / h_{wc} = 0.595$ [9].

Данные экспериментов показывают, что наибольшее изменение отметок верхней поверхности слоя каменной наброски происходит в течение воздействия первого, наиболее мощного, волнового импульса волны цунами [9]. В процессе действия на откосное берегоукрепительное сооружение остального цуга волн происходит колебание отметок рассматриваемой поверхности около некоторого среднего значения, которое в целом остается постоянным даже при последовательном воздействии нескольких волн цунами (рис. 11).

Результаты проведенных исследований показывают:

- при взаимодействии волны цунами с гидротехническим сооружением происходит существенное изменение структуры донных грунтов, характеризующееся увеличением их пористости;
- при обтекании волной цунами сооружения указанное изменение структуры грунтов происходит по всему контуру на участке дна полосой, равной $0.40 \dots 0.50$ ширины сооружения, при этом максимальное увеличение пористости донных грунтов происходит на его контуре;

— защита гидротехнического сооружения от размыва в виде каменной наброски снижает выявленные эффекты, но при этом в самой наброске происходят те же изменения структуры.

Изменение структуры грунтов основания может повлиять на обеспечение устойчивости гидротехнических сооружений.

Литература

1. Matsuda T., Maeda K., Miyake M., Miyamoto J., Sumida H., Tsurugasaki K. Instability of a Caisson-Type Breakwater Induced by an Earthquake-Tsunami Event // *International Journal of Geomechanics*. 2016. Vol. 16. No 5. C4016003-1. Doi: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000619.
2. Nistor I., Palermo D., Cornett A., Al-Faehly T. Experimental and numerical modeling of tsunami loading on structures // *Proceedings of International Conference of Coastal Engineering, ICCE2010, ASCE, Shanghai*. 2010. 10 p.
3. Imase T., Maeda K., Miyake M., Sawada Y., Sumida H., Tsurugasaki K. Destabilization of a caisson-type breakwater by scouring and seepage failure of the seabed due to a tsunami // *Proceedings of ISCE6*. 2012. Paper ISCE6-128. P. 807—814.
4. Matsuda T., Maeda K., Miyake M., Tsurugasaki K., Miyamoto J., Sumida H. Instability on the sandy ground under breakwater due to earthquake and tsunami // *Proceedings of the 15th Asian Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. P. 930—933. Doi: 10.3208/jgssp.JPN-081.
5. Tsunami Inundation Scour of Roadways, Bridges and Foundations: Observations and Technical Guidance from the Great Sumatra Andaman Tsunami // *EERI/FEMA NEHRP 2006 Professional Report*.
6. de Groot M. B., Bolton M. D., Foray P., Meijers P., Palmer A. C., Sandven R., Sawicki A., Teh T. C. Physics of liquefaction phenomena around marine structures // *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*. ASCE, 2006. Vol. 132. No 4. P. 227—243.
7. Young Y. L., White J. A., Xiao H., Borja R. I. Liquefaction potential of coastal slopes induced by solitary waves // *Acta Geotechnica*. 2009. Vol. 4. P. 17—34. Doi 10.1007/s 11440-009-0083-6.
8. Беляев Н. Д., Лебедев В. В., Мишина А. В., Нуднер И. С., Семенов К. К., Щемелинин Д. И. Изменение структуры грунта и наброски при воздействии волн цунами на гидротехнические сооружения // Доклады и выступления Десятой научно-технической конференции «Гидроэнергетика. Гидротехника. Новые разработки и технологии», 2016. СПб: Изд-во АО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», 2017. С. 172—179.
9. Лебедев В. В., Мишина А. В., Нуднер И. С., Беляев Н. Д., Семенов К. К., Щемелинин Д. И. Воздействие волн цунами на откосные берегоукрепительные сооружения с защитным слоем гексабитов // Сборник трудов Третьей международной конференции «Полярная механика», Владивосток, 2016. С. 1038—1049.
10. Borrero J., Dengler L., Uslu B., Synolakis C. Numerical modeling of tsunami effects at marine oil terminals in San Francisco Bay. Report prepared for the Marine Facilities Division of the California State Lands Commission. 2006. URL: www.slc.ca.gov/Division_Pages/MFD/MOTEMS/SFTsunamiReport/SF_MOT_final_report.pdf (Last accessed: 15.11.2016).
11. Нуднер И. С., Лебедев В. В., Семенов К. К., Беляев Н. Д., Бейзель С. А., Чубаров Л. Б. Исследования распространения волны цунами в бухте // Труды XIII Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики ГА-2016», Санкт-Петербург, 2016. С. 159—161.
12. Захаров Ю. Н., Зимин А. И., Стуколов С. В., Лебедев В. В., Нуднер И. С., Семенов К. К. Численное моделирование работы лабораторного волнопродуктора одиночных волн на воде // Сборник трудов Третьей международной конференции «Полярная механика». Владивосток, 2016. С. 954—964.
13. Афанасьев К. Е., Максимов В. В., Нуднер И. С., Семенов К. К., Стуколов С. В. Численное моделирование работы опытового волнопродуктора одиночных волн // Труды XI Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». Санкт-Петербург, С. 201—203.
14. Babchik D. V., Belyaev N. D., Lebedev V. V., Nudner I. S., Semenov K. K., Shchemelinin L. G. Experimental investigations of local scour caused by currents and regular waves near drilling barge foundation with cutout into stern // *Proceedings of 5th Conference Coastlab14, Varna*. 2014. Vol. 2. P. 114—124.
15. Gaydarov N. A., Zakharov Y. N., Ivanov K. S., Semenov K. K., Lebedev V. V., Nudner I. S., Belyaev N. D., Mishina A. V., Shchemelinin L. G. Numerical and Experimental Studies of Soil Scour Caused by Currents near Foundations of Gravity-Type Platforms // *Proceedings of 2014 International Conference on Civil Engineering, Energy and Environment (CEE 2014)*. Hong Kong, 2014. P. 190—196.
16. Беляев Н. Д., Лебедев В. В., Нуднер И. С., Мишина А. В., Семенов К. К., Щемелинин Д. И. Экспериментальные исследования воздействия волн типа цунами на грунт у оснований морских гравитационных платформ // *Инженерно-строительный журнал*. 2014. № 6 (50). С. 4—12. Doi: 10.5862/MCE.50.1.
17. Померанцев А. Л. Методы нелинейного регрессионного анализа для моделирования кинетики химических и физических процессов. Дисс. на соиск. степени докт. физ.-мат. наук. М., 2003. 304 с.
18. Жуков Д. В., Лебедев В. В., Нуднер И. С., Осюхин Б. А., Семенов К. К., Фомин Ю. П. Опыт применения акустической бесконтактной измерительно-информационной системы для лабораторных исследований размывов грунта у оснований морских платформ гравитационного типа // Труды XII Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики ГА-2014». СПб.: Наука, 2014. С. 571—573.
19. Shchemelinin L. G., Utin A. V., Belyaev N. D., Lebedev V. V., Nudner I. S., Semenov K. K. Experimental Studies Regarding the Efficiency of Seabed Soil Protection near Offshore Structures // *Proceedings of the 24th International Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE-2014)*. Busan, Korea, 2014. 14TPC-0320. Vol. 2. P. 625—631.

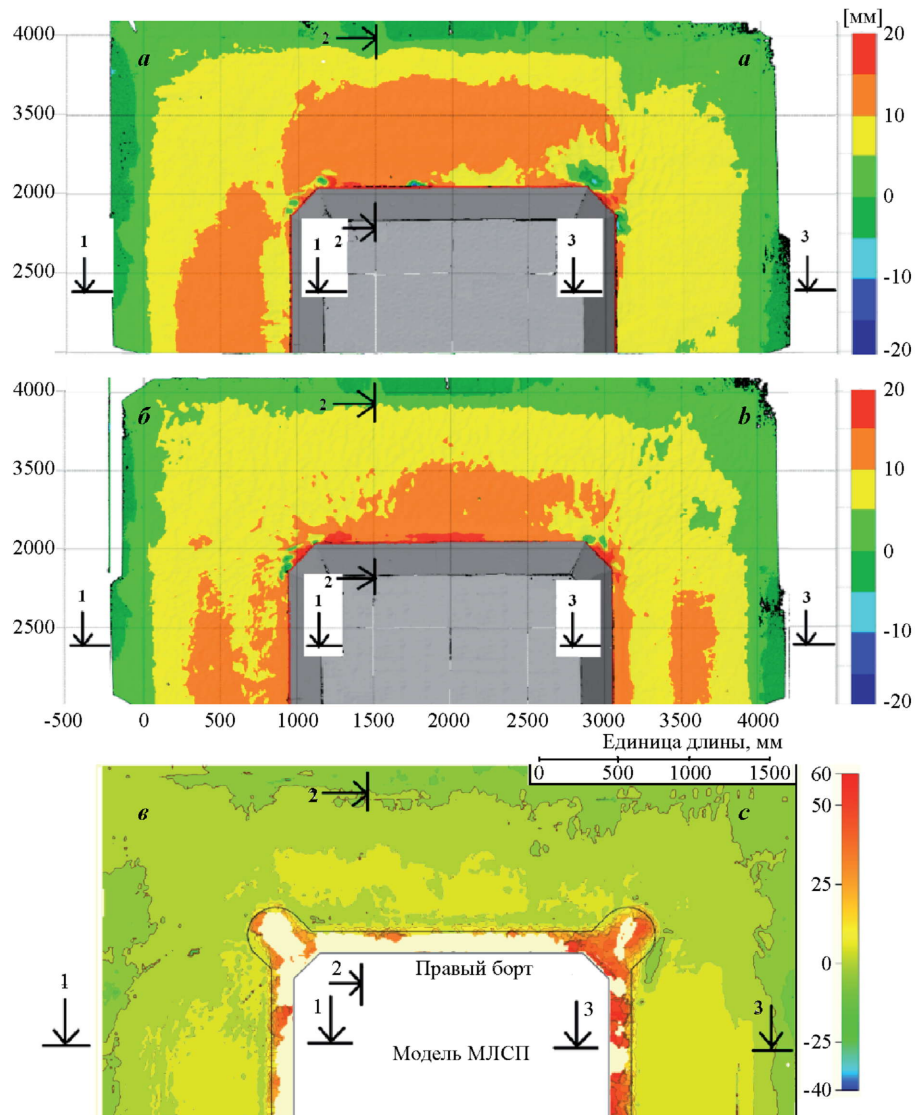


Рис. 6. Результаты сканирования поверхности дна, сформировавшейся по результатам опытов.
a — № 2 ($d = 0.34$ м, $h_w = 0.078$ м); *b* — № 4 ($d = 0.18$ м, $h_w = 0.078$ м); *c* — № 6 ($d = 0.18$ м, $h_w = 0.135$ м).

Fig. 6. The results of scanning the bed surface formed as the result of experiments.
a — No 2 ($d = 0.34$ m, $h_w = 0.078$ m); *b* — No 4 ($d = 0.18$ m, $h_w = 0.078$ m); *c* — No 6 ($d = 0.18$ m, $h_w = 0.135$ m).