

Испытание свайного (проницаемого) волнолома из композитного материала для берегоукрепления. Часть 1. Условия установки и оценка устойчивости

Д. И. Дикий¹ *, В. И. Ефремов², Б. В. Чубаренко¹, Д. А. Домнин¹,
Р. Б. Закиров¹, Е. М. Бурнашов³, К. В. Карманов⁴, О. В. Басс⁵

¹ Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

² ООО «Торговый дом «Базальтовые трубы», Москва, Россия

³ ГБУ КО «Балтберегозащита», Светлогорск, Россия

⁴ Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

⁵ Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта,
Калининград, Россия

* e-mail: dimandikiy@mail.ru

Аннотация

Рассмотрены итоги испытания (03.10.2021–30.04.2023) волнолома «Гребенка» (волнолома сквозной конструкции, или волногасящей проницаемой стенки) из композитного стеклобазальтопластика. Цель исследования – доказать или опровергнуть гипотезу о том, что исследуемые конструкции достаточно устойчивы к естественным воздействиям морской среды и могут быть рассмотрены в качестве альтернативы традиционным берегозащитным средствам. Тестовый волнолом в виде пяти 12-метровых модулей, четыре из которых были расположены в один ряд, установили на северном побережье Самбийского полуострова (Балтийское море, Калининградская область). Состояние волнолома фиксировали разными способами, включая подводную съемку и аэросъемку. Результаты показали, что установка модулей на неподготовленное дно спровоцировала их сдвиг и наклон вследствие волнового воздействия. Для повышения устойчивости волнолома «Гребенка» к таким воздействиям необходимо подготавливать грунт путем размыва песчаного чехла до уровня консолидированного слоя. Несмотря на то, что один из модулей волнолома разделился на две части при продольном разломе его основания (из-за нарушения технологии монтажа), все вертикальные трубы-сваи, образующие волногасящие свайные ряды с консольной заделькой в основании и свободными верхними концами, не обломились и не подверглись коррозии. Это говорит о достаточной прочности композитного материала для использования в морских условиях с волновыми и ледовыми нагрузками. Биообрастание водорослями свидетельствует о дружелюбности материала к биоте.

© Дикий Д. И., Ефремов В. И., Чубаренко Б. В., Домнин Д. А.,
Закиров Р. Б., Бурнашов Е. М., Карманов К. В., Басс О. В., 2024



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Ключевые слова: волнолом, берегоукрепление, композитный материал, Балтийское море, натурный эксперимент

Благодарности: создание и установка конструкции – ООО «Торговый дом «Базальтовые трубы», г. Москва; подготовка публикации – тема № FMWE-2024-0025 государственного задания ИО РАН.

Для цитирования: Испытание свайного (проницаемого) волнолома из композитного материала для берегоукрепления. Часть 1. Условия установки и оценка устойчивости / Д. И. Дикий [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 3. С. 79–92. EDN GNODYF.

Testing of a Piled (Permeable) Breakwater Made of Composite Material for Coastal Protection. Part 1: Installation Conditions and Stability Assessment

D. I. Dikii^{1*}, V. I. Efremov², B. V. Chubarenko¹, D. A. Domin¹,
R. B. Zakirov¹, E. M. Burnashov³, K. V. Karmanov⁴, O. V. Bass⁵

¹ *Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

² *LLC Trading House Basalt Pipes Moscow, Russia*

³ *GBU KO Baltberegozashhita, Svetlogorsk, Kaliningrad Oblast, Russia*

⁴ *Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia*

⁵ *Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia*

* e-mail: dimandikiy@mail.ru

Abstract

The article discusses the results of an experiment (03 October 2021–30 April 2023) to test a “Greibenka” breakwater (breakwater of a through structure, or wave-breaking piled wall) made of composite material. The purpose of the study is to prove or disprove the hypothesis that the structures under study are sufficiently resistant to natural effects of the marine environment and can be considered as an alternative to existing coastal protection methods and means. The test breakwater in the form of five 12-meter modules, four of which were arranged in a line, was installed on the northern shore of the Sambia Peninsula (Baltic Sea, Kaliningrad Oblast). The state of the breakwater was registered by various methods, including underwater and aerial photography. The results of the study showed that the installation of modules on the unprepared bottom caused their shear and tilt as a result of wave action. In order to improve the resistance of the “Greibenka” breakwater to such impact, it is necessary to prepare the bottom by flushing out the sand cover up to the consolidated layer level. Despite the fact that one of the breakwater modules split into two parts following the longitudinal fracture of its base (due to a violation of installation technology), all vertical pipe-piles forming the wave-dampening pile rows with cantilevered sealing at the base and free upper ends did not break off or corrode. This indicates that the composite material is strong enough for use in marine conditions with wave and ice loads. Algae biofouling has demonstrated the friendliness of the composite material to the biota.

Keywords: breakwater, coastal protection, composite material, Baltic Sea, natural experiment

Acknowledgments: Production and installation of the construction were funded by LLC Trading House Basalt Pipes (Moscow). The publication was prepared under topic no. FMWE-2024-0025 of the state assignment of Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences.

For citation: Dikii, D.I., Efremov, V.I., Chubarenko, B.V., Domnin, D.A., Zakirov, R.B., Burnashov, E.M., Karmanov, K.V. and Bass, O.V., 2024. Testing of a Piled (Permeable) Breakwater Made of Composite Material for Coastal Protection. Part 1: Installation Conditions and Stability Assessment. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 79–92.

Введение

Концепция берегозащиты побережья Калининградской области [1] предполагает применение нескольких методов укрепления береговой линии, а также их апробацию перед внедрением. При строительстве берегозащитных сооружений применяются современные материалы на основе натуральных или искусственных полимеров, например геосинтетика [2, 3], которые придают грунту или строительным материалам большую надежность [4]. Именно таким материалом является стеклобазальтопластик [5], из которого выполнен волнолом вида «Гребенка», рассматриваемый в статье.

В работе [6] показано, что в случае установки волнолома длиной 300 м на расстоянии 250 м от берега наблюдались приrost пляжа и выдвигание береговой линии до 40 м за год.

Практика и правила применения волноломов для целей защиты берега регламентируются СП 277.1325800.2016¹⁾. В работе [7] показано, что эффективность проницаемых сооружений зависит от отношения площади отверстий к общей площади конструкции.

В настоящей работе рассматривается натурный эксперимент, в ходе которого оценивали возможность использования волноломов вида «Гребенка». Предполагается, что такие волноломы оказывают необходимый волногасящий эффект, устойчивы к сильному штормовому воздействию, безопасны для людей и окружающей среды. Кроме того, волноломы «Гребенка» значительно превосходят бетонные и деревянные волноломы по техническим характеристикам [8]. Участок, на котором проводился эксперимент, расположен в Юго-Восточной Балтике на северном побережье Самбийского полуострова (Калининградская область, Российская Федерация) к западу от г. Зеленоградска (рис. 1, а).

Целью статьи является анализ результатов натурного эксперимента, оценка устойчивости волнолома «Гребенка» к деструктивным воздействиям окружающей среды и формулирование рекомендаций по совершенствованию технологии его установки.

Данная статья является первой частью описания результатов эксперимента и посвящена вопросам технологии установки волнолома, его устойчивости к естественным штормовым нагрузкам и другим воздействиям. Результаты анализа данных о влиянии волнолома на берег, собранных в ходе эксперимента, достаточно обширны и будут представлены во второй части.

¹⁾ СП 277.1325800.2016 «Сооружения морские берегозащитные. Правила проектирования». 2017.

Материалы и методы исследований

Волнолом «Гребенка» в составе пяти модулей был установлен (рис. 1, *b, c*), напротив последнего межбунного кармана на восточной оконечности участка со старыми, частично разрушенными бунами (рис. 1, *c*). Глубины на экспериментальном участке составляли от 1.2 м у берега до более чем 2.5 м в точке установки модулей. По разным оценкам глубина замыкания для этого района находится в пределах от 7.5 м [9] до 8.4 м [10]. Согласно данным исследования [11], зона обрушения волн в районе установки волнолома начинается на удалении более чем 200 м от уреза.

В отличие от традиционных сквозных свайных волноломов²⁾ особенностью конструкции волнолома «Гребенка» является использование труб (полых свай) разного диаметра. Трубы сделаны из стеклобазальтопластика –

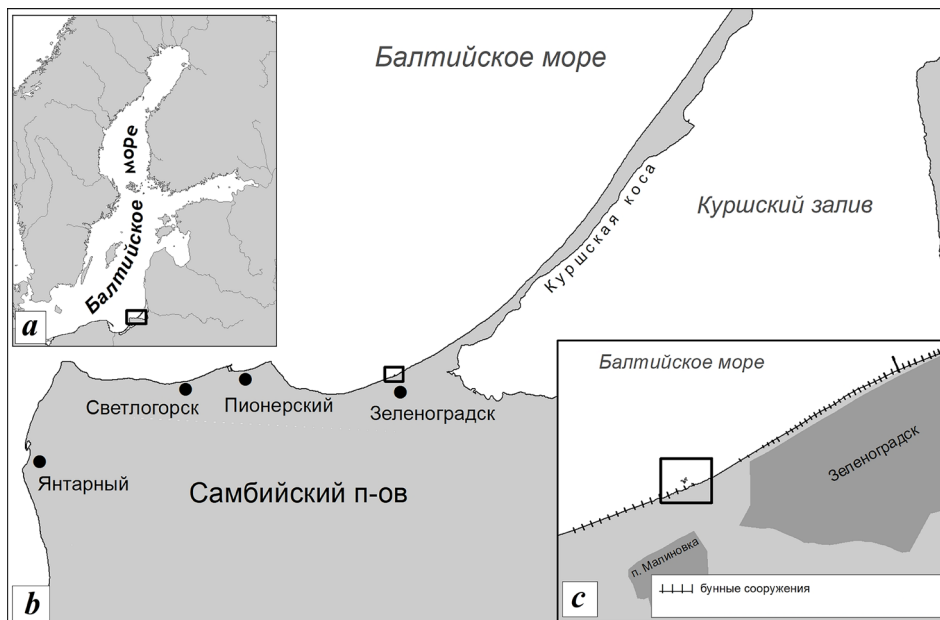


Рис. 1. Место проведения эксперимента: *a* – Балтийское море; *b* – северное побережье Самбийского полуострова, Калининградская область; *c* – участок берега, примыкающий с запада к городскому пляжу города Зеленоградска (слева направо указаны старые буны в виде черточек на линии уреза, волнолом в море (он и четыре старые буны выделены прямоугольником), далее – группа новых бун и выдающийся в море мол)

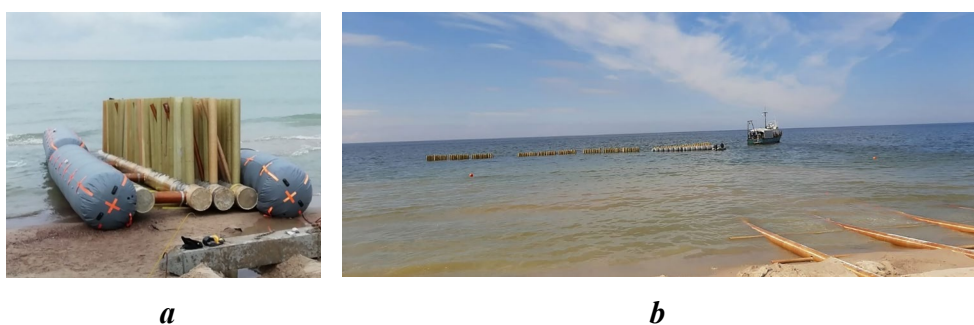
Fig. 1. Place of the experiment: *a* – the Baltic Sea; *b* – the northern shore of the Sambia Peninsula, Kaliningrad Oblast'; *c* – a section of the shore adjacent from the west to the Zelenogradsk city beach. From left to right: old groins (dashes on the shore line), a breakwater in the sea (the breakwater and four old groins are highlighted by a rectangle), a group of new groins and a pier protruding into the sea

²⁾ Седрицев Д. Н., Рубинская А. В. Основы проектирования гидротехнических сооружений, лесных бирж и рейдов приплава : учебное пособие. Красноярск : СибГТУ, 2011. 119 с.

устойчивого к коррозии композитного материала, который уже нашел широкое применение во многих областях строительства [5]. Основные преимущества стеклобазальтопластика, а также результаты испытаний набора труб в волновом лотке подробно представлены в [8].

Была выбрана модульная конструкция волнолома³⁾ с максимальной длиной одного модуля 12 м (исходя из возможностей транспортировки материалов к месту установки) и шириной 3 м. Модуль волнолома (рис. 2) состоял из базы-решетки (три горизонтальных ряда параллельных базовых труб длиной 12 м и диаметром 0.5 м и дополнительной трубы на расстоянии 0.5 м, соединенных поперечными трубами длиной 3 м диаметром 0.25 м), которая служит устанавливаемым на дно основанием. Все трубы основания заполнялись бетоном. Вертикально установленные трубы-сваи диаметром 0.2 и 0.1 м вставлялись в основные трубы базы-решетки и образовывали гребенку из трех рядов – аналог свайного ряда. На трех модулях высота вертикальных труб была 3 м, а на двух модулях (4 и 5) – 2.5 м. Дополнительная горизонтальная труба (расположенная мористее) в основании была без свай и играла роль балластной трубы (видна на рис. 2, *a*) для повышения устойчивости модуля к сдвигу и опрокидыванию. Вес модуля после заполнения горизонтальных труб основания бетоном составил около 28 т. Модули устанавливали в линию параллельно урезу.

Для наиболее эффективного волногашения сквозность ряда вертикальных труб должна быть не более 30–40 % предпочтительно с уменьшением сквозности от ряда к ряду в сторону берега (согласно рекомендации АО ЦНИИС). Наиболее эффективная схема (из опробованных в НИЦ «Морские берега») имела сквозность 30–20–10 %. Для испытания стойкости вертикальных рядов к штормовому воздействию сквозность конструкции была взята 40–30–20 %. Коэффициент отражения, рассчитанный путем испытаний в волновом лотке, составлял 0.2 [8].



Р и с . 2. Модуль (с понтонами) на берегу (*a*), линейка модулей (1–4) и ряд установочных стапелей в мае 2021 г. (*b*)

Fig. 2. The module (with pontoons) on the shore (*a*), a line of modules (1–4) and a number of installation slips in May 2021 (*b*)

³⁾ Патент на полезную модель № 187014 U1 Российская Федерация. МПК E02B 3/06. Волногаситель : 2018137512 : заявл. 23.10.2018 : опубл. 13.02.2019 / Ефремова М. В. 10 с.

С точки зрения функционального применения волногасящее свайное сооружение «Гребенка» можно считать разновидностью волнолома сквозной конструкции или волногасящей проницаемой стенки.

Традиционно свайные волноломы и другие свайные оградительные конструкции – это сооружения на сваях, которые вдавлены, вбиты, вкручены в неразмываемый плотный грунт, что не соответствует технологии монтажа «Гребенки». С другой стороны, в приложении А СП 24.13330.2021 упоминается свая-стойка, передающая нагрузку на основание только через пяту (в случае с «Гребенкой» этой пятой является база-решетка конструкции). Исследуемая конструкция содержит также элементы свайного волнолома, упоминаемые в СП 277.1325800.2016 «Сооружения морские берегозащитные. Правила проектирования». Новыми в конструкции волнолома «Гребенка» по сравнению с традиционными волноломами сквозной конструкции являются композитный футляр, модульность и мобильность сборки и установки.

В указанном СП 277.1325800.2016 для песчаных пляжей рекомендовано устанавливать подводные волноломы на расстоянии не менее 100 м от уреза. Учитывая, что испытываемый волнолом проницаемый, разработчики приняли решение об уменьшении этого расстояния.

При общей длине линейки модулей 60 м и расстоянии от берега 75–80 м отношение длины сооружения к его удалению от уреза было в пределах 0.75–0.8, что могло привести либо к накоплению материала и выдвиганию уреза в сторону сооружения, либо даже к возникновению томболо.

Модули собирали из готовых комплектов, затем основание заливали бетоном на берегу. Вертикальные трубы-сваи фиксировали в трубах основания одновременно с заливкой бетона. Сборка пяти модулей заняла два дня, кроме того, 3–4 дня бетон застывал и набирал транспортную прочность.

Спуск на воду и транспортировку модулей в море осуществляли с помощью надувных понтонов (рис. 2, *a*, *b*) грузоподъемностью по 8 т (по 4 шт. на модуль). С моря модули с понтонами подтягивали с катера по сборно-разборным стапелям (рис. 2, *c*) длиной 33 м.

Модули были установлены на дно без подготовки постели-основания. Модуль 5 был поставлен на глубине 1.5 м на расстоянии 35 м от уреза воды на уровне середины видимой части самой восточной из разрушенных старых бун. Остальные четыре модуля (1–4) – на глубине 2.5 м на расстоянии 75–80 м от уреза (в линию с небольшим изгибом, расстояние между модулями 1.5–2 м (рис. 3)). Модуль 5 был установлен за один день в октябре 2020 г., остальные четыре модуля – за два дня в мае 2021 г.

После установки модуль 5 (трубы-сваи высотой 2.5 м) выступал над водой на 1 м, модули 1–3 (трубы-сваи высотой 3 м) – на 0.5 м. Модуль 4 (трубы-сваи высотой 2.5 м) почти не выступал из воды, верхушки свай находились в приповерхностном слое.

Испытания волнолома «Гребенка» проводились с 03.10.2021 по 30.04.2023. Экспедиционные обследования проводились изготовителями (ООО «Торговый дом «Базальтовые трубы»), сотрудниками Атлантического отделения Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Балтийского федерального университета им. И. Канта и ГБУ КО «Балтберегозащита».

Изменения в расположении и характеристиках модулей фиксировали в ходе визуального и тактильного осмотров и фотосъемки, позволявших оценить степень механического повреждения и коррозии, а также степень погруженности основания модулей в песок, их положение относительно уровня моря. Фотосъемку с берега производили 2–4 раза в месяц на протяжении всего эксперимента.

Для оценки изменения положения модулей волнолома были использованы спутниковые снимки открытых источников *Google* и Яндекс, как и в работе [3]. Для получения привязки спутниковых изображений использовали координаты стационарных опорных точек на местности. Точность привязки координат модулей была улучшена благодаря геопривязке с помощью *GPS*. Итоговая погрешность составила до 2.7 м.

Аэровизуальные наблюдения с помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА – *DJI Mini2*) производили в 2022 г. в осенне-летний период и в 2023 г. в зимне-весенний период. Предельная высота полетов составляла 120 м с учетом необходимых мер безопасности и требований полетных регламентов. Аналогичные примеры аэровизуального наблюдения представлены для Черного и Азовского морей в работе [12], для Цимлянского водохранилища – в работе [13], для рек Ямало-Ненецкого автономного округа – в работе [14].

Подводная фотосъемка сооружений с использованием экшн-фотокамеры *SJCAM 5000* проведена 07.09.2022 и 12.04.2023. Фотографии каждого модуля конструкции сделаны с расстояния около 1 м, обход сооружения проводили по часовой стрелке от западного мористого угла или западной стороны модуля. На снимки, на которых было видно дно, наносили шкалу глубин от дна до поверхности.

Результаты и их обсуждение

На момент изучения основных морфологических параметров в летний сезон 2022 г. расположение модулей волнолома «Гребенка» стало относительно стабильным. Использованный композитный материал доказал свою прочность в условиях штормового воздействия. Волнолом «Гребенка» успешно выдержал ледовые нагрузки зимой 2020–2021 гг.

Серия сильных штормов в зимние периоды 2020–2021 гг. нарушила линейное расположение модулей 1–4 (рис. 3): три модуля из пяти были сдвинуты или повернуты. Со второго года эксперимента нарушенная линейка модулей выступала как разрозненный набор модулей и не обеспечивала ожидаемого эффекта волногашения.

Фотографирование подводной части модулей волнолома и измерения позволили получить представление о степени погруженности основания модулей в песок, наклоне конструкций, а также об их сохранности и обрастании водорослями.

Наиболее полное обследование конструкций произведено 07.09.2022 (рис. 3–5). Модуль 1 возвышался над дном на 1.5 м, не был разрушен или опрокинут, был почти полностью покрыт водой, хотя при постановке он возвышался над уровнем воды на 0.5 м; верхние 2/3 не занесенной песком части свай обросли нитчатыми водорослями. Сегмент 2а модуля 2 возвышался

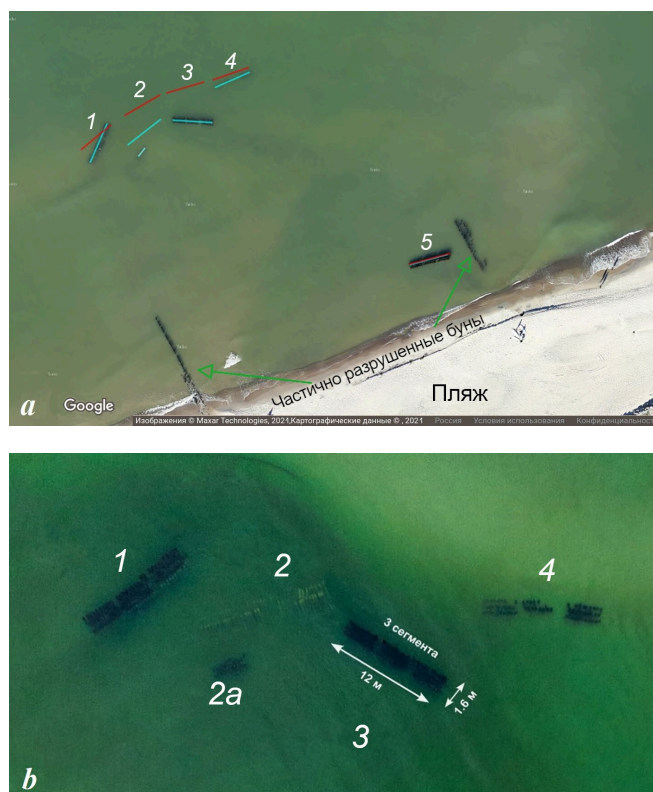


Рис. 3. Первоначальное и окончательное расположение модулей волнолома «Гребенка»: *a* – исходное (красные линии) и итоговое (голубые линии) расположение модулей (снимок *Google Maps*, 2021 г. URL: <https://www.google.ru/maps>); *b* – расположение модулей волнолома «Гребенка» на 12.04.2023 г.

Fig. 3. Initial and final location of the “Grebенка” breakwater modules: *a* – initial (red lines) and final (blue lines) location of the modules (Google Maps image, 2021. <https://www.google.ru/maps>); *b* – location of the “Grebенка” breakwater modules on 12 April 2023

над дном на 1 м, был наклонен в сторону берега в западном направлении и полностью покрыт водой. Вся видимая часть свай обросла водорослями. Глубина в месте расположения модуля 3 была 1.2 м. Он не был разрушен или опрокинут. Часть свай возвышалась над водой на 0.1–0.3 м. Сваи обросли водорослями по всей длине подводной части. Модуль 4 возвышался над дном на высоту до 0.5 м, был наклонен в западном направлении и полностью покрыт водой. Западная часть модуля почти полностью была скрыта в песке, обрастание водорослями – только в верхней восточной, не занесенной песком части до 1/3 высоты. По рис. 3, *b* создается впечатление, что он разломан на две части поперек основания, так как его восточная треть явно выбивается из единой линии первых двух третей.

Повторная съемка всех модулей с БПЛА была выполнена 12.04.2023 (рис. 3, *b*). Во время этой съемки был обнаружен обнажившийся модуль 2, который не был виден при съемке с БПЛА 07.09.2022, так как находился под слоем песка подводного вала. Верхние концы вертикальных свай возвышались над дном на 0.4–1.0 м и имели наклон в сторону моря. Модуль 2 оказался разломленным на две части. Разделение модуля на несколько частей не должно было произойти при соблюдении технологии сборки конструкции. Причину этого окончательно предстоит выявить при демонтаже модуля. Наиболее вероятно, что оставшиеся не залитыми бетоном соединительные поперечные трубы базы-решетки модуля попали на неровную часть дна под песчаным слоем, что привело к разлому при размыве песка.

Обрастание водорослями у свай модуля 2 отсутствовало, поскольку он большую часть времени был скрыт песчаным подводным валом. Тот факт, что он оголился и был замечен на съемке 12.04.2023, является следствием деформации берегового вала и увеличения глубин в точке расположения модуля.

На рис. 3 темный цвет свай связан с их обрастанием водорослями (кроме модуля 2 (рис. 3, *b*), который целиком находился под песком); отделившаяся от модуля 2 часть 2*a* не была замята полностью, поэтому ее сваи частично обросли водорослями.

Верхние части свай всех модулей (находящиеся в воде) были покрыты водорослями, что свидетельствует об определенной «дружественности» стеклобазальтопластика к биоте и его способности быть основой подводного рифа. Если нижняя часть свай была свободна от растительности, то это означало, что она находилась под песком в вегетационный период до момента обследования. Во время повторной съемки 12.04.2023 зафиксировано увеличение нижней оголенной части всех модулей, что свидетельствует о частичном смыве песка с подводного склона.

При выборе места установки волнолома не было учтено, что точка установки волнолома оказалась в зоне влияния протяженного вдольберегового песчаного вала и воздействия сразу нескольких типов течений. Именно миграция подводного вала обеспечила занесение основания всех модулей песком.

Перед установкой модулей волнолома «Гребенка» не были проведены необходимые инженерные изыскания участка дна, в частности не была установлена высота песчаного слоя над уплотненным дном. Модули были не только занесены, но и просели на 0.5 м и более (рис. 5). Во избежание такого опускания необходимо ставить модули на твердое дно. Этого можно достичь, например, путем размыва песка в месте установки до моренного основания, что значительно дешевле, чем приготовление каменной постели под стационарными камнебетонными волноломами.

Предполагалось, что погружение волнолома в песок усилит устойчивость модулей к сдвигу при штормовом воздействии. В первый год эксперимента наблюдалась именно такая динамика, но затем при более сильных штормах модули наклонились.

Поскольку длина штормовых волн составляла 120–140 м, конструкция из четырех модулей, выставленных вдоль одной линии, обеспечивала лишь минимально допустимое соотношение длины волногасящего сооружения к длине волны, то есть примерно 1:2. Изначально организаторы эксперимента

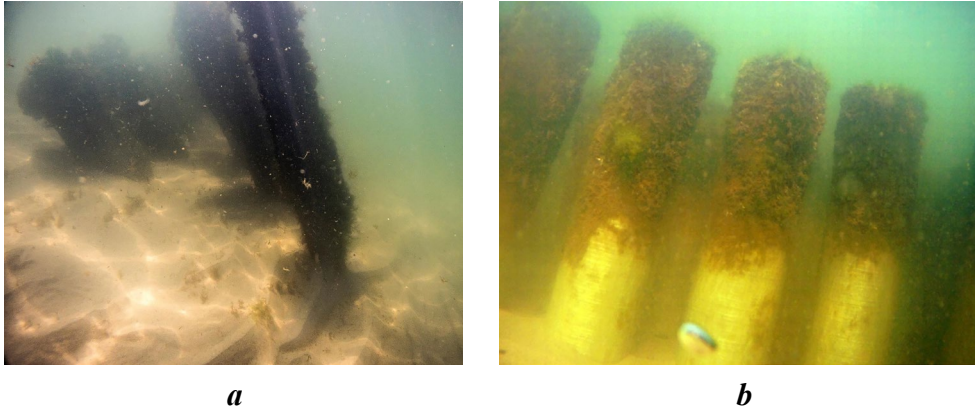


Рис. 4. Состояние модулей волнолома «Гребенка»: *a* – обрастание водорослями до дна и наклон конструкции (съемка 07.09.2022); *b* – послештормовое обнажение от песка части волногасящих свай (съемка 12.04.2023 г.)

Fig. 4. State of the “Gребенка” breakwater modules: *a* – algae fouling and tilt of the structure (survey on 7 September 2022); *b* – post-storm partial exposure of the wave-damping piles from under sand (survey on April 12, 2023)

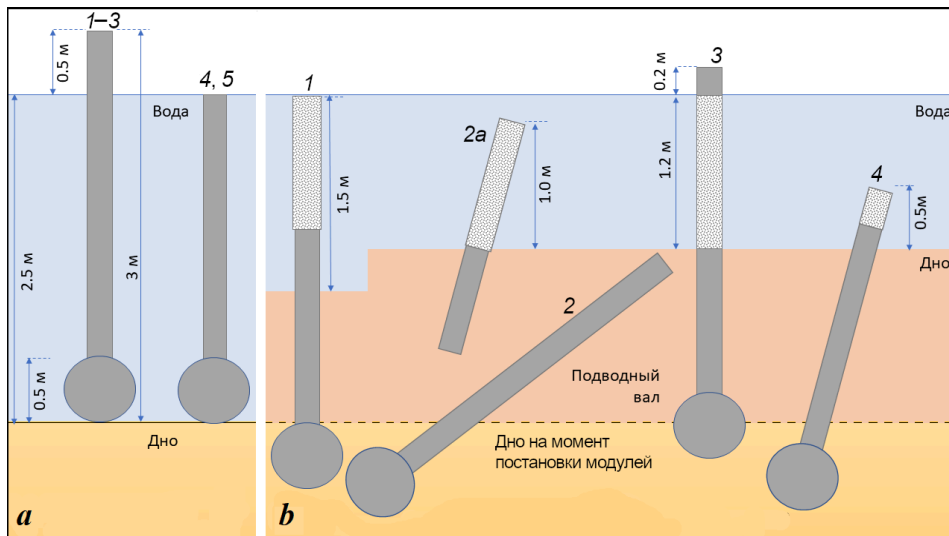


Рис. 5. Схематичное начальное положение модулей (1–5) при установке в мае 2021 в пространстве (а) и их итоговое положение во время обследования 07.09.2022 г. (b). Светло-серым цветом выделены части, подвергшиеся обрастанию водорослями. Схема отображает погружение в песок и занесение песком того или иного модуля, отклонения от вертикальной оси, изменение высоты надводной части

Fig. 5. Schematic initial position of the modules (1–5) during installation in May 2021 (a) and their final position during the survey on 07.09.2022 (b). The parts fouled with algae are highlighted in light gray. The diagram shows the subsidence of modules and their sanding up, deviations from the vertical axis, and changes in the height of the surface part

понимали, что локальное воздействие сооружения могло проявиться только в пределах перекрытого сооружением межбунного кармана. В настоящий момент, по результатам проведения эксперимента, организаторы признают, что была совершена ошибка в расположении конструкции – при ее небольшой длине она была слишком удалена от уреза. Этот опыт нужно будет учесть в дальнейшем при использовании подобных сооружений.

Модули желательно ориентировать так, чтобы дополнительная горизонтальная труба в основании находилась с береговой стороны, обеспечивая опору против волнового воздействия и препятствуя опрокидыванию. В данной постановке модули были ориентированы наоборот.

Выводы

В ходе натурных испытаний волнолома «Гребенка» (волнолома сквозной конструкции, или волногасящей проницаемой стенки) на северном побережье Самбийского полуострова (Балтийское море, Калининградская область) были установлены пять 12-метровых модулей. Была отработана технология сборки модулей на берегу, их транспортировка и погружение на дно. На протяжении полутора лет (03.10.2021–30.04.2023) исследуемые конструкции были подвержены воздействию волн и льда.

Подготовка места установки волнолома имеет большое значение для сохранности конструкций, подверженным волновым воздействиям. Изначально предполагалось, что подготовка дна не потребуется. Однако влияние прибрежных течений вблизи подводного вала в отсутствие подготовки дна привело к погружению волнолома в песок.

Часть модулей по прошествии эксперимента изменили свое положение, а значит, несмотря на использование бетона для утяжеления конструкции, воздействие волнения и течений было достаточным для сдвига конструкций. Одним из решений этой проблемы предлагается утяжеление конструкции или, как было рассмотрено выше, более тщательная подготовка дна.

Один из модулей не выдержал нагрузки и разломился в основании (возможная причина – недозаполнение бетоном перемычек в основании). Для уточнения деталей этого факта необходимо извлечь элементы поврежденного модуля для дальнейшей экспертизы.

Все вертикальные волногасящие свайные ряды остались целыми, что говорит о достаточной устойчивости предложенной конструкции к волновым и ледовым нагрузкам. Вертикальные трубы-сваи, образующие волногасящие свайные ряды с консольной заделкой в основании и свободными верхними концами, не обломились и не подверглись коррозии.

Большое количество водорослей и других органических объектов, наблюдаемых на поверхности стеклобазальтопластика, свидетельствует о «дружелюбности» этого материала к биотической компоненте окружающей среды.

Проведение эксперимента оказалось очень полезным для дальнейшего совершенствования конструкции с учетом как отрицательных, так и положительных достигнутых результатов. Следует особо подчеркнуть, что проведенная работа – это редкий пример испытания конструкции в натуральную величину именно в таких естественных условиях, в которых возможно ее применение в будущем после доработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Система берегозащиты приморского региона: опыт Калининградской области / Е. М. Бурнашов [и др.] // Сборник материалов Всероссийской конференции с международным участием «XXIX Береговая конференция: Натурные и теоретические исследования – в практику берегопользования», Калининград, 18–24 апреля 2022 г. / Под ред. Б. В. Чубаренко. Калининград : Изд-во «БФУ им. И. Канта». 2022. С. 17–19. EDN FAKPHY.
2. Change over time in the mechanical properties of geosynthetics used in coastal protection in the South-Eastern Baltic / B. Chubarenko [et al.] // Journal of Marine Science and Engineering. 2023. Vol. 11, iss. 1. 113. <https://doi.org/10.3390/jmse11010113>
3. *Domnin D., Burnashov E.* Geographical information dataset “geosynthetics in coastal protection of the South-East Baltic” // Data in Brief. 2021. Vol. 40. 107693. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107693>
4. Approach to evaluating the change of properties of the geosynthetic material used to stabilize the marine landscape slopes / V. N. Leitsin [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. III International Scientific and Practical Conference “Advanced Building Materials and Technologies 2020”, 26–29 May 2020, Kaliningrad. Kaliningrad, 2020. Vol. 911. 012004. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/911/1/012004>
5. Современные базальтовые волокна и полимерные композиционные материалы на их основе (обзор) / А. А. Далинкевич [и др.] // Конструкции из композиционных материалов. 2010. № 3. С. 37–54. EDN MTEPSL.
6. *Леонтьев И. О.* Изменения береговой линии моря в условиях влияния гидротехнических сооружений // Океанология. 2007. Т. 47, № 6. С. 940–946. EDN IBGWAH.
7. Взаимодействие волн со сквозными стенами / К. Н. Макаров [и др.] // Гидротехника. 2019. № 3. С. 32–36. EDN KQLKWI.
8. *Басс О. В., Васюткин Е. С., Ефремов В. И.* Подход к снижению береговой эрозии на основе применения композитного свайного волнолома «гребенка» // Экономика строительства и природопользования. 2021. № 3. С. 124–133. EDN QIFWWQ. <https://doi.org/10.37279/2519-4453-2021-3-124-133>
9. *Ostrowski R., Stella M.* Sediment transport beyond the surf zone under waves and currents of the non-tidal sea: Lubiatowo (Poland) case study // Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics. 2016. Vol. 63, iss. 1. P. 63–77. <https://doi.org/10.1515/heem-2016-0005>
10. *Леонтьев И. О.* Прогнозирование развития берега в масштабе столетия (на примере Вислинской (Балтийской) косы) // Океанология. 2012. Т. 52, № 5. С. 757–767. EDN PСІКТР.
11. *Chubarenko B. V., Sokolov A. N., Dikii D. I.* Variability of the coastal currents, waves and wind surge along the shore of the South-Eastern Baltic (Kaliningrad Oblast, Russian Federation) // Regional Studies in Marine Science. 2023. Vol. 57. 102762. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2022.102762>
12. *Крыленко М. В., Крыленко В. В.* Особенности выполнения высокоточной съемки рельефа абразионного берега с помощью БПЛА // Бюллетень науки и практики. 2020. Т. 6, № 2. С. 10–19. EDN IAEPTR. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/51/01>
13. Использование беспилотных летательных аппаратов для оценки интенсивности проявления опасных береговых процессов водоохранной зоны Цимлянского водохранилища / О. В. Ивлиева [и др.] // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2021. № 2. С. 56–65. EDN SXJPOD. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2021-2-56-65>

14. *Ильясов Р. М., Колесников Р. А.* Практика использования беспилотных летательных аппаратов при проведении мониторинга водных объектов и их водоохраных зон // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2022. № 3. С. 97–110. EDN GQVMNZ. <https://doi.org/10.26110/ARCTIC.2022.116.3.006>

Поступила 18.04.2024 г.; одобрена после рецензирования 21.05.2024 г.; принята к публикации 17.06.2024 г.; опубликована 25.09.2024 г.

Об авторах:

Дикий Дмитрий Игоревич, младший научный сотрудник, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский пр., д. 36), кандидат технических наук, **ORCID ID: 0000-0002-8819-8423**, **Scopus Author ID: 56998707400**, **SPIN-код: 6377-8773**, dimandikiy@mail.ru

Ефремов Владимир Иванович, исполнительный директор, ООО «Торговый дом «Базальтовые трубы» (127287, Россия, г. Москва, проезд Петровско-Разумовский, д. 29, стр. 4), zbt@bk.ru

Чубаренко Борис Валентинович, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией прибрежных систем, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский пр., д. 36), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0001-7988-1717**, **Scopus Author ID: 6507102508**, **SPIN-код: 2691-5872**, chuboris@mail.ru

Домнин Дмитрий Александрович, старший научный сотрудник, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский пр., д. 36), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0001-8627-2055**, **Scopus Author ID: 9250345600**, **SPIN-код: 1174-4997**, dimanisha@gmail.com

Закиров Руслан Баядитович, научный сотрудник, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский пр., д. 36), кандидат географических наук, **Scopus Author ID: 57222497041**, **SPIN-код: 6502-8689**, zakirov.ruslan.kaliningrad@yandex.ru

Бурнашов Евгений Михайлович, заместитель директора по мониторингу и безопасности ГТС, ГБУ КО «Балтберегозащита» (238560, Россия, г. Светлогорск, Калининградская обл., ул. Хуторская, д. 1), кандидат географических наук, **Scopus Author ID: 41261235800**, **SPIN-код: 8437-4568**, burnashov_neo@mail.ru

Карманов Константин Викторович, магистрант, Институт морских технологий, энергетики и строительства, Калининградский государственный технический университет (236000, Россия, г. Калининград, Советский пр., д. 1), **Scopus Author ID: 55377991800**, **SPIN-код: 5780-0845**, konstantin.karmanoff@yandex.ru

Басс Олег Васильевич, доцент, ОНК «Институт высоких технологий», Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта (236041, Россия, г. Калининград, ул. Александра Невского, д. 14), кандидат географических наук, **Scopus Author ID: 57219593321**, **SPIN-код: 5065-1484**, o.bass@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Дикий Дмитрий Игоревич – сбор и группировка материала, подготовка первого варианта текста статьи, окончательная доработка текста статьи

Ефремов Владимир Иванович – разработка конструкции волнолома, руководство постановкой и участие, фотофиксация состояния конструкции, финансирование части работ, формулировка выводов и рекомендаций касательно конструкции

Чубаренко Борис Валентинович – планирование и подготовка первого варианта текста статьи, анализ всех результатов и формулировка общих выводов, окончательное редактирование текста статьи

Домнин Дмитрий Александрович – проведение аэро-визуального обследования, подводной видеосъемки, анализ результатов

Закиров Руслан Баядитович – привязка спутниковых снимков, анализ изменения расположения модулей, подготовка соответствующих иллюстраций

Бурнашов Евгений Михайлович – анализ результатов и участие в формулировке общих выводов

Карманов Константин Викторович – проведение аэро-визуального обследования, анализ полученных данных

Басс Олег Васильевич – участие в постановке конструкции, участие в формулировке выводов по конструкции

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи