

Испытание свайного (проницаемого) волнолома из композитных материалов для берегоукрепления. Часть 2. Оценка влияния на состояние берега

Б. В. Чубаренко¹, Д. И. Дикий^{1*}, Д. А. Домнин¹, Р. Б. Закиров¹,
А. Н. Бабаков¹, В. Т. Пака¹, А. А. Кондрашов¹, А. О. Корж¹,
Е. М. Бурнашов², К. В. Карманов³, О. В. Басс⁴,
В. И. Ефремов⁵, О. И. Рябкова⁴

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

² ГБУ КО «Балтберегозащита», Светлогорск, Россия

³ Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

⁴ Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта,
Калининград, Россия

⁵ ООО «Торговый дом «Базальтовые трубы», Москва, Россия

* e-mail: dimandikiy@mail.ru

Аннотация

Проанализирована эффективность применения свайного сооружения вида волнолом «Гребенка» для целей берегозащиты. С 03.10.2020 по 30.04.2023 были проведены натурные испытания данной конструкции на границе абразионного и аккумулятивного сегментов северного побережья Калининградской области вблизи г. Зеленоградска. Четыре модуля волнолома были установлены в одну линию в бунном кармане на глубине около 2 м мористее конца бун, но не перекрывали этот карман полностью. Один прибрежный модуль был установлен в непосредственной близости от линии уреза. Эксперимент охватил несколько сезонов сильной штормовой активности, что позволило сравнить динамику береговой линии в месте установки волнолома и на соседних участках. Проводились регулярные измерения ширины пляжа, аэрофотосъемка, повторное измерение глубин в месте установки, оценка динамики подводного вала, определение толщины слоя песчаного чехла в месте установки конструкции, размещение инклинометрических датчиков скорости течения на волноломе. Выявлено, что ширина пляжа в месте установки волнолома и на смежных участках изменялась синхронно. Отсутствие очевидного аккумулятивного эффекта позади волнолома связано, во-первых, со смещением модулей и их частичным погружением в песок, а во-вторых, с недостаточной длиной линии мористых модулей по отношению к их удалению от уреза. Временный положительный эффект был достигнут только позади отдельно стоящего модуля и выражался в периодическом выдвигении пляжа к корню примыкающей

© Чубаренко Б. В., Дикий Д. И., Домнин Д. А., Закиров Р. Б., Бабаков А. Н.,
Пака В. Т., Кондрашов А. А., Корж А. О., Бурнашов Е. М., Карманов К. В., Басс О. В.,
Ефремов В. И., Рябкова О. И., 2025



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

к нему с востока старой буны. Результаты проведенного натурного испытания будут применены для дальнейшего совершенствования конструкции волнолома.

Ключевые слова: волнолом, берегоукрепление, Балтийское море, натурный эксперимент, динамика пляжа, подводный склон, абразия берега

Благодарности: создание и установка волнолома, а также проведение части визуальных обследований и промерных работ 2022 г., подготовка средств измерения течений выполнены за счет разработчика волнолома «Гребенка» – ООО «Торговый дом «Базальтовые трубы», г. Москва. Работы были поддержаны двумя темами государственного задания Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН: работы по определению долговременных изменений ширины пляжа, аэровизуальные обследования 2022–2023 гг., промерные работы 2023 г., подводная съемка и определение толщины рыхлого осадка 2022 г. и измерение течений проводились при поддержке темы № FMWE-2021-0012, а анализ результатов эксперимента и подготовка статьи – при поддержке темы № FMWE-2024-0025. Авторы благодарят инженерный состав института и персонально А. П. Подуфалова, М. И. Немцова, Ю. Н. Перова за высокопрофессиональный вклад в проведение экспедиционных работ.

Для цитирования: Испытание свайного (проницаемого) волнолома из композитных материалов для берегоукрепления. Часть 2. Оценка влияния на состояние берега / Б. В. Чубаренко [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 1. С. 72–95. EDN TPHYNA.

Testing of a Piled (Permeable) Breakwater Made of Composite Materials for Coastal Protection. Part 2. Evaluation of Impact on the Shore State

B. V. Chubarenko¹, D. I. Dikii^{1*}, D. A. Domnin¹, R. B. Zakirov¹,
A. N. Babakov¹, V. T. Paka¹, A. A. Kondrashov¹, A. O. Korzh¹,
E. M. Burnashov², K. V. Karmanov³, O. V. Bass⁴,
V. I. Efremov⁵, O. I. Ryabkova⁴

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

² GBU KO Baltberegoshchita, Svetlogorsk, Russia

³ Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

⁴ Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

⁵ LLC Trading House Basalt Pipes, Moscow, Russia

* e-mail: dimandikiy@mail.ru

Abstract

The paper analyzes the effectiveness of a pile breakwater structure *Grebenka* for coastal protection purposes. From 03.10.2020 to 30.04.2023, full-scale testing of the structure was conducted on the northern shore of the Kaliningrad Oblast near the city of Zelenogradsk between the eroded and accumulative shore segments. Four breakwater modules were installed in a single line in the groin pocket at a depth of about 2 m offshore of the groin end but did not completely overlap the pocket. One module was installed in the immediate vicinity of the shoreline. The experiment covered several seasons of severe storms, which allowed us to compare the shoreline dynamics at the breakwater installation site and in the neighbouring areas. We carried out regular measurements of the beach width, aerial survey, repeated

depth measurement at the installation site and assessed the underwater slope dynamics. We also determined the thickness of the sand cover layer at the structure installation site and placed tilting flow velocity sensors on the breakwater. It was found that the beach width at the breakwater installation site and in adjacent areas was changing synchronously. The absence of an obvious accumulative effect behind the installed breakwater was, first, due to the displacement of the breakwater modules and their partial immersion in the sand and, second, due to the limited line length of the offshore modules in proportion to their distance from the shoreline. A temporary positive effect was achieved only for a solitary module as periodic beach progradation to the root of an old groin adjacent thereto from the east. The results of the full-scale test will be used to further improve the breakwater design.

Keywords: breakwater, shore protection, Baltic Sea, field experiment, beach dynamics, underwater slope dynamics, coastal erosion

Acknowledgments: The experiment in terms of creating and installing the breakwater (as well as conducting part of visual surveys and measurement works in 2022, preparation of flow measuring instruments) was funded entirely by the developer, LLC Trading House Basalt Pipes, Moscow. Expeditionary work to determine long-term changes in the width of the beach, aerial visual surveys 2022-2023, measurement works 2023, underwater survey and determination of the thickness of loose sediment 2022, measurement of currents were carried out with the support of topic no. FMWE-2021-0012, while the analysis of the experiment results and preparation of this article were performed with the support of topic no. FMWE-2024-0025 of the state assignment of the P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences. The authors thank the engineering staff of IO RAS and personally A.P. Podufalov, M.I. Nemtsov and Yu.N. Perov for their highly professional contribution to the expedition work.

For citation: Chubarenko, B.V., Dikii, D.I., Domnin, D.A., Zakirov, R.B., Babakov, A.N., Paka, V.T., Kondrashov, A.A., Korzh, A.O., Burnashov, E.M., Karmanov, K.V., Bass, O.V., Efremov, V.I. and Ryabkova, O.I., 2025. Testing of a Piled (Permeable) Breakwater Made of Composite Materials for Coastal Protection. Part 2. Evaluation of Impact on the Shore State. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 72–95.

Введение

Повсеместное отступление береговой линии окраинных морей [1] характерно и для Балтийского моря. Наблюдается явная тенденция к увеличению размыва берегов южной части Балтики [2–4], что связано с геологическими характеристиками [5]. Отрицательная динамика наблюдается в первую очередь для песчаных берегов, на которые воздействуют штормы северо-западного, западного, юго-западного направлений [6, 7].

Штормовое воздействие на фоне повышенного уровня моря [8, 9] является одним из основных внешних факторов, способствующих размыву и отступанию береговой линии. Рост уровня моря как одно из ярких проявлений изменения регионального климата [10] – это характерное явление для открытого побережья Юго-Восточной Балтики, где скорость роста уровня моря в XX в. составляла 1.3–1.5 см / 10 лет [11].

За 2007–2017 гг. отступление берегов Калининградской области составило по средним оценкам: для Балтийской косы – 0.2 м/год, для Куршской косы – 0.4 м/год, для западного побережья Самбийского п-ова – 0.5 м/год, для северного – 0.2 м/год.

В Калининградской области принимали различные меры противодействия размыву берега [12], такие как установка волноломов и бун, укрепление склонов клифа с помощью габионов или покрытий из геосинтетических материалов [13]. Имеется опыт поддержания берега за счет намыва песка, полученного в результате террасирования склонов вблизи п. Филино [14, 15]. Этот намыв обеспечил поддержание береговой полосы в течение нескольких лет. Сброс в экспериментальном режиме донного материала, полученного в ходе дноуглубительных работ в районе Балтийска [16], не привел к ожидаемому результату, так как придонные течения в этом районе [17] не позволяют материалу откладываться на уреze [18].

Наиболее впечатляющим является пример многолетнего сброса материала, полученного методом гидроразмыва породы при добыче янтаря Калининградским янтарным комбинатом. Этот сброс привел к полному изменению природной динамики западного побережья Самбийского полуострова – прева-лированию аккумуляции над природно-обусловленным процессом абразии и выдвиганию уреза в море на сотни метров [19]. Прекращение сброса позволило выяснить, что для поддержки намытого на открытом побережье материала требуется ежегодная подпитка в объеме не менее 20 % от ранее сбрасываемого объема [20].

Берегозащитные волноломы ¹⁾ никогда ранее не использовались на Калининградском побережье. Имеется опыт применения таких конструкций на соседнем побережье Польши [21], но он не всегда положительный [22], так как успех во многом зависит от локальных условий.

Целью работы является подтверждение или опровержение гипотезы о возможности защиты берега от размыва с помощью относительно недорогого про-ницаемого волнолома «Гребенка» [23] и выявление его положительных и отрицательных сторон. Рекомендация по использованию подводных волноломов с учетом имеющихся условий была дана в рамках концепции по берегозащите побережья Калининградской области [24], поэтому натурное тестирование возможных решений исключительно полезно. Создание проникаемого варианта сооружения было связано с желанием получить более легкую и удешев-ленную конструкцию по сравнению с монолитным волноломом.

Эксперимент проводился на побережье юго-восточной части Балтийского моря (рис. 1, а, б), в прибрежной зоне Калининградской области вблизи г. Зеленоградска, на границе стабильного и абразионного берега (участок ВС на рис. 1, с). Испытываемый волнолом сквозной конструкции «Гребенка» [23, 25] состоял из четырех 12-метровых модулей (мористые модули 1–4, рис. 1, d), установленных на глубине 2.5 м на расстоянии 75–80 м от уреза, расстояние между модулями 1.5–2 м. Модули были установлены в створе край-него с востока межбунного кармана группы старых полуразрушенных бун начала XX в., находящихся к западу от г. Зеленоградска. Модуль 5 был уста-новлен на глубине 1.5 м на расстоянии 35 м от уреза воды на середине видимой части самой восточной из разрушенных старых бун.

¹⁾ Берегозащитный волнолом – сооружение, расположенное на акватории вдоль берега, для за-щиты от разрушения береговой полосы волнением и для накопления и удержания наносов от перемещения (ГОСТ Р 54523-2011).

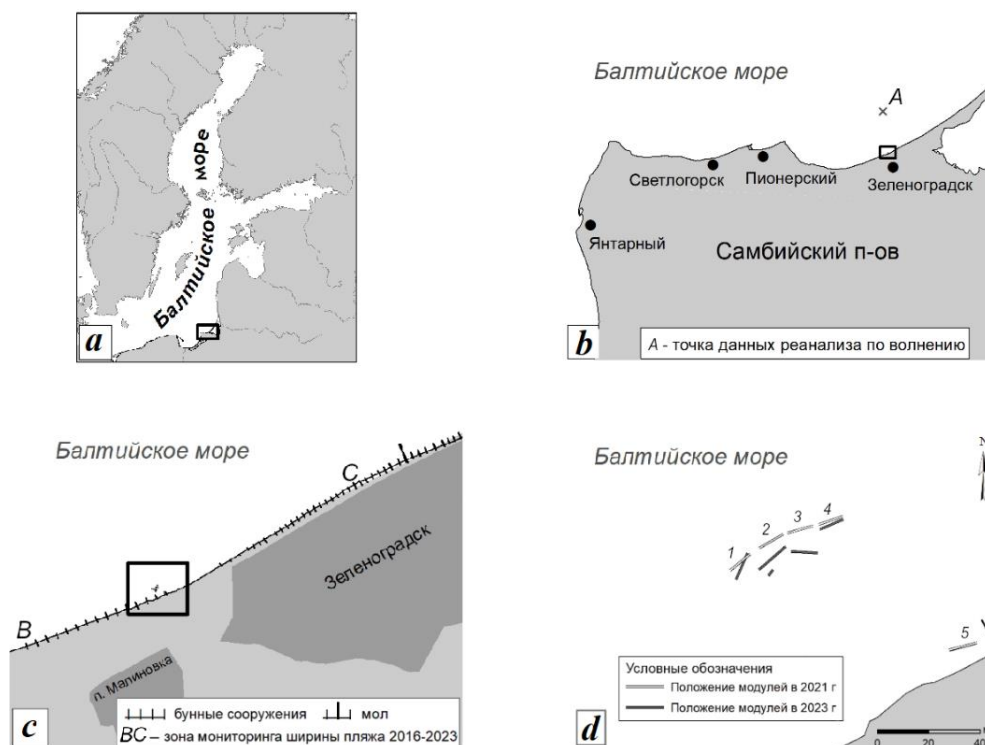


Рис. 1. Место проведения эксперимента: *a* – Балтийское море; *b* – увеличенное изображение области, ограниченной прямоугольным контуром на фрагменте *a*: северное побережье Самбийского п-ова, Калининградская область; *c* – увеличенное изображение области, ограниченной прямоугольным контуром на фрагменте *b*: участок берега, примыкающий с запада к городскому пляжу г. Зеленоградска (прямоугольным контуром выделена зона установки волнолома; *BC* – участок наблюдения за многолетней динамикой ширины пляжа); *d* – расположение модулей в 2021 г. (после установки) и в 2023 г. (при окончательном обследовании)

Fig. 1. Testing site: *a* – the Baltic Sea; *b* – enlarged image of the area contoured in fragment *a*: the northern shore of the Sambia Peninsula, Kaliningrad Oblast; *c* – enlarged image of the area contoured in fragment *b*: a section of the shore adjacent to the Zelenogradsk city beach from the west; the rectangle highlights the breakwater installation site, *BC* – observation area for long-term dynamics of the beach width; *d* – location of the modules in 2021 (after installation) and in 2023 (during final inspection)

Детали установки волнолома и изменения в его конструкции в ходе эксперимента представлены в работе [23]. В работе использованы материалы XXX Всероссийской конференции «Береговая зона морей России в XXI веке»²⁾.

²⁾ Береговая зона морей России в XXI веке : Тезисы докладов XXX всероссийской конференции, Москва, 3–7 июня 2024 г. / Под ред. С. А. Огородова. Москва : Географический факультет МГУ, 2024. С. 150–151.

Район проведения эксперимента и метеоусловия

В исследуемом районе поток наносов, в среднем направленный с запада на восток, достаточно насыщен. На глубинах от 18 до 28 м имеется обширная реликтовая песчаная линза³⁾ площадью около 7 км².

В пределах группы старых бун начала XX века (длина 2 км), установленной в 1925–1927 гг., которая улавливает и удерживает песок, берег с пляжем шириной в среднем 30–40 м и авантюной высотой до 6–8 м достаточно стабилен (рис. 2, *a*). Прилегающий с востока теневой участок берега (рис. 2, *b*) более динамичен и характеризуется явно выраженной тенденцией к абразии.



Р и с . 2 . Состояние пляжа: *a* – стабильный пляж на западной оконечности участка старых бун начала XX в., 27 апреля 2012 г.; *b* – низовой размыв на восточной оконечности участка старых бун начала XX в., 27 апреля 2012 г.; *c* – сезонное восстановление пляжа, заметное по полосе намытого песка, в том числе и в теневой зоне бун, 27 апреля 2012 г. (фото – А. Н. Бабаков); *d* – состояние до начала периода осенне-зимних штормов 2020 г., 19 октября 2020 г. Стрелками указано будущее положение модулей волнолома

F i g . 2 . State of the beach: *a* – stable beach at the western tip of the old groins site (the early 20th cent.) (27.04.2012); *b* – lee erosion at the eastern tip of the old groins site (27.04.2012); *c* – seasonal beach restoration identified by a strip of washed sand, including in the shady zone of the groins (27.04.2012) (photo by A. N. Babakov); *d* – the state before the period of autumn-winter storms in 2020, 19.10.2020. The arrows indicate the future position of the breakwater modules

³⁾ Исследование стратиграфии и литологии донных осадков Самбийского п-ова по данным бурения и сейсмопрофилирования // Отчет КГУ. Рук. темы проф. В. В. Орленок. Калининград, 1992. 64 с.

Темпы отступления клифа⁴⁾ в западной части г. Зеленоградска в 1963–1974 гг. достигали 0.6 м/год, в объеме – 7.2 м³/(пог. м·год).

Только после строительства новой группы бун в начале 2017 г. пляж на ранее абразионном городском участке быстро восстановился. Однако в промежутке протяженностью 700 м между группами старых и современных бун пляж активно размывается под действием штормовых событий (рис. 2, d).

Сброс донного грунта, извлеченного в ходе дноуглубительных работ при строительстве Международного морского терминала в г. Пионерском Калининградской области (рис. 1, b), стал одним из источников наносов на рассматриваемом участке. Морской отвал находится в 5 км к востоку от г. Пионерского в пределах той же литодинамической ячейки, где располагались волноломы. Превалирующие ветры западных румбов способствуют переносу материала вдоль берега [26]. Всего с 2018 по 2023 г. на морской отвал поступило 834 тыс. м³ грунта: 291 тыс. м³ в 2018–2019 гг. и ежегодно с 2021 по 2023 г. 347, 185 и 11 тыс. м³ соответственно.

На подводном склоне исследуемого участка берега обычно присутствует подводный вал на удалении 50–150 м от уреза с глубиной над вершиной около 1.3–1.7 м. Рельеф дна однороден вдоль берега, но имеются локальные особенности в виде депрессий и участков обмеления, которые активно мигрируют в зависимости от условий последнего шторма.

По разным оценкам, глубина замыкания для этого района находится в пределах от 7.5 м [27] до 8.4 м [28]. Зона обрушения волн начинается на удалении более чем 200 м от уреза [29].

Сезонная динамика на данном участке традиционная. Осенне-зимние штормы смывают песок и перемещают вдоль и поперек берега. Материал, приходящий на подводный склон с запада и востока в весенне-летний период, намывается на пляж более умеренным волнением, восстанавливая ширину пляжа (рис. 2, c). Процессы абразии и аккумуляции постоянно чередуются с периодом в несколько лет, и, по-видимому, установка волноломов пришла на фазу активной абразии.

За время проведения эксперимента (весна 2021 г. – весна 2023 г.) на северном побережье Самбийского п-ова были зафиксированы несколько штормовых событий. Самые продолжительные и разрушительные из них пришлись на осенне-зимний период: 19–20 ноября 2021 г., 13–21 января 2022 г., 27–31 января 2022 г., 17–21 февраля 2022 г., 04–08 апреля 2022 г., 18–21 февраля 2023 г. Средняя скорость ветра в эти даты превышала 15 м/с, а направление было преимущественно западным. Последствия их воздействия на берега представлены в работе [30].

Согласно данным реанализа, для точки с глубиной 17.5 м мористее расположения волнолома (точка А на рис. 1) самые высокие волны за исследуемый период были зафиксированы 30 января 2022 г., их высота составляла около 6 м, а направление движения волн было с северо-запада. Количество дней, в течение которых значительная высота волны достигала 2 м, составило 105. При этом большинство из этих дней зафиксировано в октябре – марте (85 %). Наибольший вклад в этот показатель внесли январь 2022 г. – 17 дней, февраль

⁴⁾ *Рябкова О. И.* Динамика берегов Самбийского полуострова и Куршской косы в связи с проблемами берегозащиты : автореф. дис. канд-та геогр. наук. Москва : Геогр. фак-т МГУ, 1987. 17 с.

Параметры основных зафиксированных штормовых событий за время проведения эксперимента

Parameters of main registered storm events during the experiment

Дата шторма / Storm date	$H_{\max}$, м / $H_{\max}$, m	$H_{\max_3h}$, м / $H_{\max_3h}$, m	$H_{\text{mean_}3h}$, м / $H_{\text{mean_}3h}$, m	Направление волн / Wave direction	Период волны, с / Wave period, s
13–22 января 2022 / 13–22 January 2022	5.52	5.31	2.80	Северное, северо-западное / Northern, north-western	5.42
26–31 января 2022 / 26–31 January 2022	6.09	6.01	2.64	Северное, северо-западное / Northern, north-western	5.01
17–25 февраля 2022 / 17–25 February 2022	3.73	3.60	1.80	Северное / Northern	3.60
30 января – 02 февраля 2023 / 30 January – 02 February 2023	3.06	3.02	1.93	Юго-западное / South-western	4.22
17–21 февраля 2023 / 17–21 February 2023	5.84	5.78	2.33	Юго-западное / South-western	4.60

Примечание. $H_{\max}$ – максимальная значимая высота волны; $H_{\max_3h}$ – максимальная значимая высота волны для скользящего среднего 3 часа; $H_{\text{mean_}3h}$ – средняя значимая высота волны для скользящего среднего 3 ч (данные реанализа).

Note. $H_{\max}$ – maximum significant wave height; $H_{\max_3h}$ – maximum significant wave height for moving average 3 hours; $H_{\text{mean_}3h}$ – average significant wave height for moving average 3 hours (re-analysis data).

2022 г. – 12 дней, февраль 2023 г. – 11 дней, ноябрь и декабрь 2021 г. – по 10 дней. Суммарное количество часов, в которые наблюдались волны со значительной высотой более 2 м, за исследуемый период составило 1139. Таким образом, период проведения эксперимента был насыщен продолжительными и достаточно сильными штормовыми событиями (таблица).

Методы и объем проведенных обследований

Привязка положения волнолома, пляжа и уреза на спутниковых снимках производилась по координатам стационарных опорных точек; определение местоположения модулей волнолома и трассировка уреза осуществлялись с помощью GPS (погрешность до 2 м).

В процессе аэровизуального наблюдения с применением беспилотного летательного аппарата (БПЛА) *DJI Mini2* фиксировали положение береговой линии и границы подводного берегового вала (в осенне-летний период 2022 г. и в зимне-весенний период 2023 г.). Полеты БПЛА осуществлялись на высоте 120 м, вдольбереговой охват составил более 900 м, в поперечном к урезу направлении он ограничивался шириной пляжа (вглубь суши), и 100 м

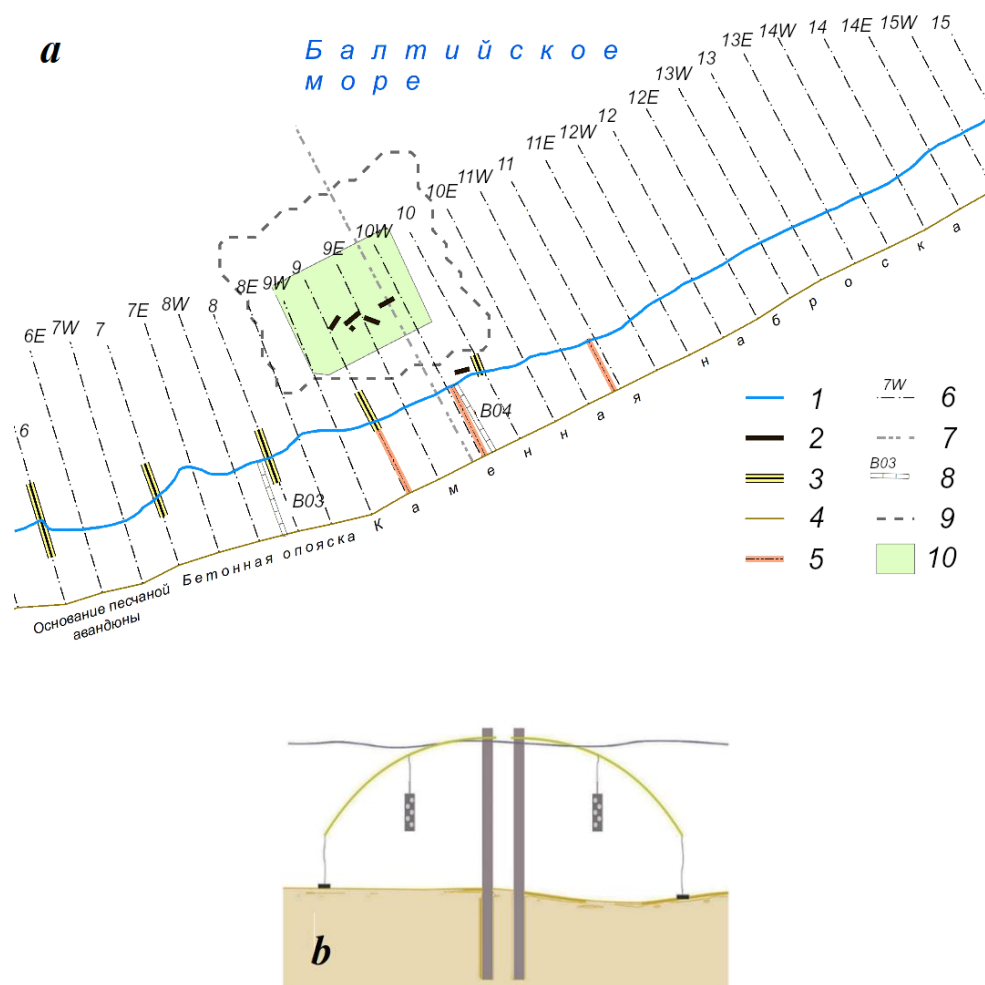
(в сторону моря). Подводный вдольбереговой вал определяли визуально по характерному желтому цвету без применения автоматизированных методик. Под вершиной вала понималась зона наиболее интенсивного желтого цвета на снимке.

Периодические измерения ширины пляжа (11 измерений с 15 марта 2022 г. по 12 апреля 2023 г.) в районе расположения волнолома проводили на трех профилях (линии 5 на рис. 3). Центральный профиль находился между модулями волнолома, левый (западный) – на траверсе предпоследней старой буны, а правый (восточный) – в центральной части зоны низового размыва на расстоянии от центрального профиля, примерно равном ширине межбунного кармана. Полученные методом оптического нивелирования данные были использованы для построения профилей высоты пляжа. Замеры ширины пляжа производили после зимнего периода 2022 г. в ходе измерений: 15 марта – 21 апреля 2022 г. с частотой примерно одна неделя, а также 1 июля 2022, 22 ноября 2022, 1 декабря 2022, 12 апреля 2023 г. Изменения ширины пляжа за длительный период оценивали по данным замеров ширины пляжа в 2016–2023 гг. по сети профилей на участке от западного края группы бун начала XX в. до западной оконечности променада в г. Зеленоградске (участок BC на рис. 1, с, линии 8 на рис. 3).

Толщину слоя рыхлого песка на створе, проходящем через модули волнолома (линия 7 на рис. 3), определяли методом гидроразмыва: электрической водяной помпой создавали постоянный напор воды, которая подавалась в зондирующую металлическую трубку диаметром 20 мм. Под напором воды грунт размывался и зонд углублялся. Измерения проведены 23 апреля 2023 г., результаты приведены к среднемноголетнему уровню моря по уровенному посту в порту г. Пионерского.

Рельеф дна в прибрежной зоне меняется из года в год под действием различных природных факторов. В месте установки волнолома съемка глубин (с междугалсовым расстоянием 40 м) производилась 07 сентября 2022 и 23 апреля 2023 г. (рис. 3). Для съемки использовался одноручевой эхолот с навигационной привязкой при помощи картплоттера *Garmin GPSMAP 421s*. Результаты измерений были привязаны к среднемноголетнему уровню моря и интерполированы на сетку с шагом 10×10 м. Затем методом вычитания поверхностей была получена дифференциальная цифровая модель рельефа, на основе которой выявлены зоны донной деформации и рассчитаны объемы убывшего и прибывшего песка в период между датами съемок 07 сентября 2022 и 23 апреля 2023 г.

Чтобы количественно оценить эффект затухания энергии волны при ее прохождении через волнолом, были использованы два измерителя скорости течений инклинометрического типа [31]. Один измеритель крепился с мори-стой, а второй – с тыльной части модуля 3. В качестве кронштейнов для подвеса инклинометров использовали скрепленные вместе пруты упругой стеклоарматуры диаметром 10 мм, верхние концы которых были закреплены горизонтально в верхней части модуля. К свободным концам кронштейнов были подвязаны свинцовые грузы, которые притягивали кронштейны ко дну и притапливали инклинометры. При этом упругость стеклоарматуры препятствовала замыванию грузов в песок. Инклинометры были закреплены на веревочных



Р и с . 3 . Схема проведения работ: *a* – базовые отсчетные линии и схемы расположения модулей волнолома «Гребенка», створов и районов проведения работ: 1 – линия уреза воды на 24.09.2022; 2 – модули волнолома «Гребенка»; 3 – старые деревянные буны; 4 – базовая отсчетная линия; 5 – профили определения ширины пляжа (ГБУ КО «Балтберегозащита»); 6 – профили оценки ширины подводного вала и его удаленности от уреза; 7 – профиль определения толщины рыхлого осадка; 8 – профили измерения сезонной динамики ширины пляжа (использованы данные за предшествующие годы); 9 – граница полигона промерных работ; 10 – полигон расчета деформации подводного склона; *b* – схема монтажа измерителей течений

F i g . 3 . Work layout: *a* – basic reference lines and layout of the *Grebenka* breakwater modules, cross sections and work areas: 1 – the water's edge on 24.09.2022; 2 – *Grebenka* breakwater modules; 3 – old wooden groins; 4 – basic reference line; 5 – profiles for determining the beach width (GBU KO *Baltberegozashchita*); 6 – profiles for estimating the width of the underwater bar and its distance from the water's edge; 7 – profile for determining the loose sediment thickness; 8 – profiles for measuring the seasonal dynamics of the beach width (data from previous years were used); 9 – the boundary of the measuring range; 10 – the polygon for calculating the deformation of the underwater slope; *b* – inclinometer installation diagram

поводках длиной 30 см с таким расчетом, чтобы занять положение на расстоянии 1 м от модуля и 1 м от поверхности. Инклинометры регистрировали (с частотой 5 Гц) абсолютную величину скорости течения, индуцированного волнами и вдольбереговым переносом, с 12:00 23 апреля 2023 по 12:00 28 апреля 2023 г.

Результаты и обсуждение

Наблюдения за состоянием и динамикой пляжа были проведены в 2016–2023 гг. на участке восточного крыла Зеленоградской вогнутости, от п. Прибой до западного края променада г. Зеленоградска (участок *BC* на рис. 1, с, линии 8 на рис. 3), границы участка – 2 км к западу и 2 км к востоку от места установки волноломов. Периодические обследования выявили заметные вариации ширины пляжа в зависимости от активности ветро-волнового воздействия и сгонно-нагонных явлений, а также объемов поступления донного грунта с морского отвала порта Пионерский.

Фотофиксация положения уреза воды показала его периодическое выдвигание после весенне-летнего умеренного волнения (рис. 4, *a, e*), а размыв и сужение пляжа – после осенне-зимних штормов (рис. 4, *b – d, f*). Но результирующего устойчивого причленения пляжа к прибрежному модулю не произошло. Ширина пляжа варьировалась здесь в тех же пределах, что и до установки волноломов.

Тенденция к зимним размывам пляжа (22 декабря 2016, 17 декабря 2021, 02 февраля 2022, 22 февраля 2023 г.) и его обратному расширению при слабом волновом воздействии (05 мая 2022, 25 августа 2022, 19 декабря 2022, 12 мая 2023) наблюдалась на всем участке от п. Прибой до г. Зеленоградска (рис. 5). Показателен активный размыв пляжа после экстремальных февральских штормов 2022 г., в ходе которых пять раз была зафиксирована скорость ветра выше 20 м/с, а уровень моря превышал среднесезонный на 0.5–1 м. Пляж на западном участке был размыв наполовину – до 20 м, а восточнее старых бун был смыт полностью, до основания валунной бермы (см. график за 02.02.2022 на рис. 5).

Ширина пляжа в пределах старых бун начала XX века (0–2 км) изменяется в зависимости от сезона – от 20–30 м зимой до 30–55 м летом при максимуме до 45–55 м на восточном конце участка (рис. 5). Исторические данные⁵⁾ (октябрь 1976 г. – 43 м, июль 1977 г. – 28 м, август 1978 г. – 43 м, сентябрь 1979 г. – 19 м, октябрь 1981 г. – 25 м, август 1982 г. – 28 м) свидетельствуют о том же.

Западный двухкилометровый участок достаточно стабилен при всех волнениях и отличается более широким пляжем, чем традиционно размываемый восточный участок (2–3.7 км), даже после установки на восточном участке новых бун в 2017 г.

Заметный выступ пляжа на восточном конце группы бун начала XX в., в районе расположения волноломов, наблюдался весь период измерений (2016–2023 гг.), до и после их установки, а динамика местного пляжа была аналогичной динамике смежных участков, что свидетельствует об отсутствии влияния волнолома на морфодинамику пляжа.

Важную роль в динамике исследуемого берега играет также ориентация вектора ветро-волнового воздействия. Ветры западных и северных румбов

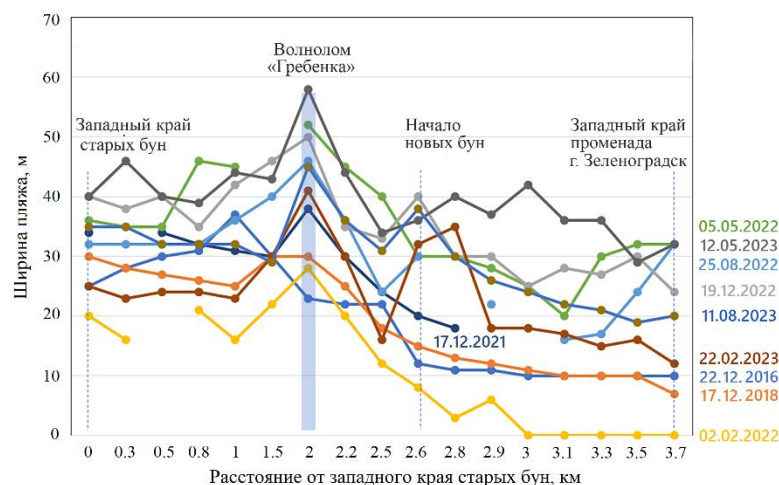
⁵⁾ Личный архив О. И. Рябковой.



Рис. 4. Динамика пляжа после установки волноломов в 2021–2023 гг.: *a* – летняя аккумуляция, 06.09.2021 г.; *b* – сужение пляжа после экстремальных штормов, 02.02.2022 г.; *c* – состояние после штормового периода, 05.05.2022 г.; *d* – намыв пляжа в фазу затухания зимнего шторма, 19.12.2022 г.; *e* – восстановление пляжа весенним умеренным волнением, 12.05.2023 г.; *f* – сужение пляжа в связи с заметным ростом уровня моря, 11.08.2023 г. (фото – А. Н. Бабаков)

Fig. 4. The beach dynamics after the installation of the breakwaters in 2021–2023: *a* – summer accumulation, 06.09.2021; *b* – beach narrowing after extreme storms, 02.02.2022; *c* – the state of the beach after the storm period, 05.05.2022; *d* – beach nourishment in the finishing phase of the winter storm, 19.12.2022; *e* – the beach restored by moderate spring waves, 12.05.2023; *f* – beach narrowing due to a noticeable increase in the sea level, 11.08.2023. Photo by A.N. Babakov

способствуют нагону и размыву пляжа, тогда как при восточных и южных ветрах пляж восстанавливается. Так, в апреле – июне 2023 г. доминировали умеренные восточные ветры, воздействие которых привело к понижению уровня моря на 10–15 см ниже среднегогодового ординара и формированию очень широкого пляжа (см. график за 12 мая 2023 г. на рис. 5). Но разворот умеренного ветра в юго-западную четверть (июль – август) привел к повышению уровня на 45 см и к заметному сужению пляжа (11 августа 2023 г.). Следует добавить, что пляж был еще уже во время умеренного юго-западного шторма (08 августа 2023 г.), но через три дня после его окончания на всем участке уже была намыта песчаная полоса шириной 8–12 м.



Р и с. 5. Сезонная динамика ширины пляжа (за 2016–2023 гг.) на участке от западного края бун начала XX в., включая участок новых бун, вплоть до западного края променада в г. Зеленоградске. Расположение волноломов показано синим столбиком

Fig. 5. Seasonal dynamics of the beach width (for 2016–2023) in the area from the western edge of the wooden groins (early 20th cent.), including the area of new buns, up to the western edge of the promenade in Zelenogradsk. The location of the breakwaters is shown with a blue bar

Мониторинг ГБУ КО «Балтберегозащита» за 2020–2023 гг. в районе расположения волнолома также фиксировал наличие устойчивого широкого пляжа как до, так и после установки волнолома. Тот факт, что после установки мористых модулей к 23.06.2021 г., пляж стал незначительно уже, чем до их появления, подтверждает отсутствие аккумулятивного эффекта в тени волнолома (рис. 6). По-видимому, сужение пляжа связано с отмеченными выше колебаниями уровня моря и волновой активности, а продольные вариации уреза – с пространственной неоднородностью волнового поля и морфологии подводного склона.

Детальные измерения ширины пляжа на трех створах напротив волнолома с марта 2022 г. по август 2023 г. подтвердили тесную зависимость динамики пляжа от ветро-волнового воздействия. Слабые неустойчивые ветры (март – июнь 2022 г.) после серии февральских штормов способствовали существенному расширению пляжа, но переход ветра в юго-западную четверть и усиление до 12–15 м/с сопровождалось сужением пляжа. Последующее чередование восточных ветров (декабрь 2022 г., март – май 2023 г.) с юго-западными (январь – февраль 2023 г., июль – август 2023 г.) вызывало соответствующее расширение и сужение пляжа (рис. 7).

Анализ аэрофотоснимков показал, что в период эксперимента подводный вал был удален от уреза не более чем на 100 м. Ширина вала (по данным, снятым по створам, – полигоны 4, 5, 6 на рис. 8) изменялась значительно – от 10



Рис. 6. Межгодовая динамика уреза в районе волнолома до и после его установки (источник данных за 2014 г. – GoogleEarth, 2018 г. – снимок со спутника «Ресурс-П», 2021 г. – GPS-трассировка)

Fig. 6. Interannual dynamics of the water's edge near the breakwater before and after its installation (2014 – GoogleEarth source, 2018 – satellite image ResursP, 2021 – GPS tracing)

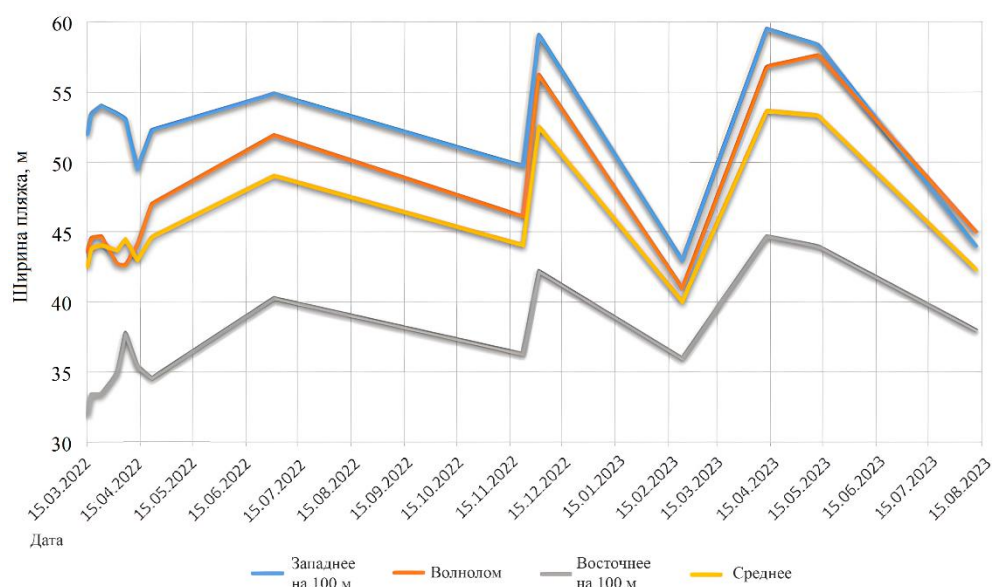


Рис. 7. Внутригодовая динамика пляжа на участке длиной 300 м напротив волнолома по измерениям ГБУ КО «Балтберегозащита» на трех створах (линии 5 на рис. 3), 15.03.2022–11.08.2023

Fig. 7. Intra-annual beach dynamics on a 200 m long section opposite the breakwater according to measurements of GBU KO *Baltbergozashchita* at three cross sections (lines 5 in Fig. 3), 15.03.2022–11.08.2023

до 70 м, ширина пляжа – от 10 до 15 м. Никакой корреляции между вдольбереговым распределением значений ширины не наблюдается (коэффициенты корреляции от -0.15 до 0.34 в разные даты). Вдольбереговые вариации отдаления от берега прибрежного и мористого краев подводного вала в некоторые даты коррелируют с коэффициентом 0.64 – 0.70 .

Анализ динамики подводного вала показал значительную изменчивость его конфигурации, ширины и расположения его мористой и береговой границ (рис. 8). Отчетливо видно, что структура подводного вала не коррелирует с наличием бун и изрезанностью береговой линии. Наличие волнолома «Гребенка» не отражается на структуре подводного вала и положении линии уреза. Стоит отметить, что на участке без бун линия уреза более выположена. На участке с бунами несколько раз фиксировалась фестончатая структура берега, когда края фестонов совпадали с расположением бун.

В исследуемом районе подводный береговой склон характеризуется средним уклоном около 0.016 (или $1:64$) в промежутке глубин от 0 до 5 м. В момент проведения промерных работ $07.09.2022$ вершина вдольберегового подводного вала (рис. 9) примыкала к линии волноломов. Однако это было случайным событием в динамике подводного вала, так как, например, во время промеров $23.04.2023$ его вершина находилась на 30 м мористее, а глубина в районе мористых модулей волнолома увеличилась на 0.5 м (рис. 9).

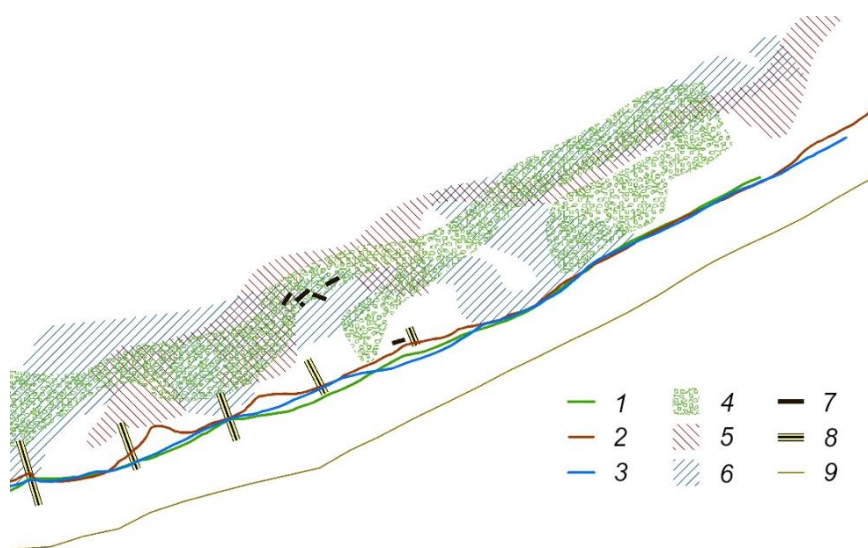
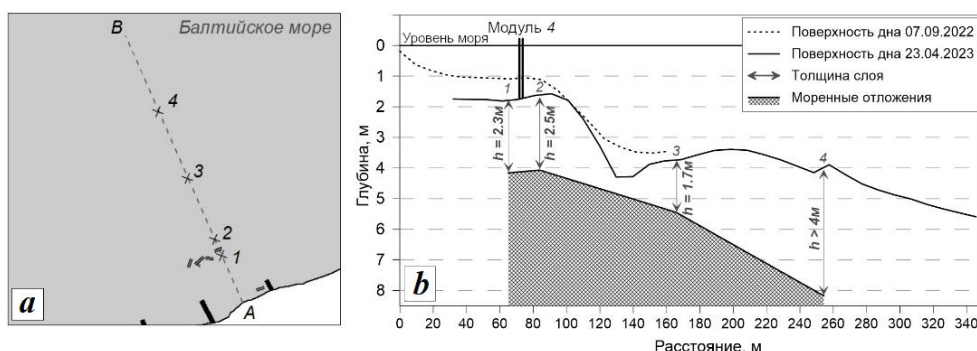


Рис. 8. Видимое положение линии уреза $10.08.2022$ (1), $24.09.2022$ (2), $01.11.2022$ (3) и подводного вдольберегового вала $10.08.2022$ (4), $24.09.2022$ (5), $01.11.2022$ (6). Указаны положения модулей волнолома (7), старых деревянных бун (8) и опорной линии кромки искусственной авандюны (9)

Fig. 8. The visible position of the water's edge on $10.08.2022$ (1), $24.09.2022$ (2), $01.11.2022$ (3) and the underwater longshore bar on $10.08.2022$ (4), $24.09.2022$ (5), $01.11.2022$ (6). The figure shows positions of the breakwater modules (7), old wooden groins (8) and the reference line of the artificial foredune edge (9)



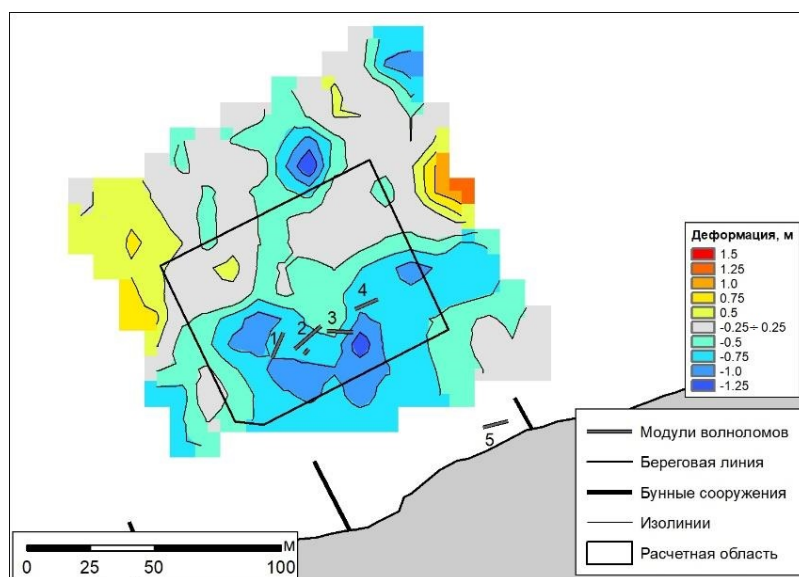
Р и с . 9 . Профиль берегового склона и толщина слоя рыхлого осадка: *a* – схема расположения линии профиля и точек измерений толщины рыхлого осадка; *b* – профили глубин и толщины рыхлого осадка

Fig . 9 . The profile of the coastal slope and the loose sediment thickness: *a* – the layout of the profile line and points of measurement of the loose sediment thickness; *b* – profiles of depths and the loose sediment thickness

Данные промеров 07 сентября 2022 и 23 апреля 2023 г. иллюстрируют изменчивость профиля глубин в районе установки мористых модулей, связанную с миграцией подводного вала из-за штормовых событий в январе 2023 г. (таблица).

На максимальной площади перекрытия областей промеров 07 сентября 2022 и 23 апреля 2023 г. размером 19 тыс. м² (рис. 10) за период 07 сентября 2022 – 23 апреля 2023 убыло 5 тыс. м³ песка, глубина в среднем увеличилась на 26 см. На участке расположения модулей волнолома «Гребенка» (ограниченный прямоугольным черным контуром на рис. 10, площадью 6700 м² с покрытием гребня берегового вала и тыльной части за волноломами) убыло 2.7 тыс. м³ песка, глубина увеличилась в среднем на 41 см. Интервал значений рассчитанных деформаций составил [–2.4...–0.9] м. Сделанные промеры иллюстрируют изменения структуры глубин в районе постановки модулей волнолома, связанные с воздействием штормовых событий зимы 2023 г., – углубление в целом на всем участке и понижение глубин позади волноломов. С учетом того, что глубины в районе установки мористых модулей волнолома весной 2021 г. были более 2 м, а в сентябре 2022 г. – около 1 м (промер 07 сентября 2022 г.), напрашивается вывод о значительной изменчивости штормовых характеристик.

Для оценки возможной динамики подводного берегового склона в районе установки волнолома за более долгий период использованы результаты промеров для аналогичного участка в районе пирса г. Зеленоградска, расположенного в пределах того же литодинамического сегмента берега восточнее волнолома на 2 км. Промеры глубин вдоль восточного края пирса (длина 140 м), уходящего перпендикулярно в море, проводились с начала 2016 г. ручным лотом по три – четыре раза в год с шагом 8.5 м, что соответствовало половине расстояния между сваями пирса. Характерная глубина на конце пирса составляла 3.5–4.5 м. В редких случаях смещения гребня подводного вала к концу пирса при низком уровне моря глубина здесь составляла 2.0–2.2 м (20 апреля 2017 г. и 12 мая 2023 г.).



Р и с . 10 . Схема деформации донного рельефа за 7 сентября 2022 – 23 апреля 2023 г. (положительные значения – аккумуляция, отрицательные – эрозия), расчетная область для оценки объемных деформаций берегового склона обозначена черным контуром

Fig. 10. Diagram of the bottom relief deformation for 07.09.2022–23.04.2023 (positive values – accumulation, negative values – erosion), the calculated area for estimation of volumetric deformations of the coastal slope is delineated in black

Участок около пирса г. Зеленоградска может служить аналогом участку с модулями только в отношении деформаций, связанных с миграцией подводного вала, но не абсолютных глубин и уклона подводного берегового склона. Это обусловлено тем, что мощность подводной песчаной призмы в районе старых бун начала XX в. (где и расположены модули волнолома) в целом существенно больше, чем в районе пирса в г. Зеленоградске. Именно поэтому в марте 2022 г., когда наблюдался экстремально низкий уровень Балтийского моря, обнажения ближайшего к урезу подводного вала отмечались вдоль всего участка бун начала XX в. и в других местах побережья, но не в районе пирса г. Зеленоградска.

Данные промеров вдоль пирса для 2016–2023 гг. иллюстрируют различные ситуации: и когда вершина подводного вала была приближена к урезу (более спокойный период года, на глубине 2.2–3.7 м), и когда она была существенно мористее (период штормового воздействия, на глубине 4–5 м). Применяя эту аналогию для участка волноломов, можно сказать, что деформации подводного берегового склона в связи с миграцией берегового вала в районе расположения модулей волнолома могут быть 2–2.7 м, что сравнимо с высотой самих конструкций и вполне может быть причиной их занесения песком почти на всю высоту.

По результатам измерений (23 апреля 2023 г.), выполненных методом гидроразмыва, построен (рис. 9) график изменения толщины слоя рыхлого осадка

(песка) вдоль профиля, ориентированного перпендикулярно берегу и проходящего через модуль 4 волнолома. На удалении 70 м от уреза воды с тыльной стороны волнолома (рис. 9, *b*) глубина слоя рыхлого осадка составляла от 2 м, в районе расположения гребня подводного вала – от 3 м, у мористого основания подводного вала толщина слоя составляла от 0.5 м, а на мористом окончании профиля – 4 м. Уклон подстилающей поверхности составлял около 0.017 (или 1:59). Судя по геометрическим характеристикам волнолома, его модули не достигали уровня моренного основания при погружении в рыхлый осадок (песок). Их просадка составила 0.5–1.5 м.

По техническим причинам измерения течений проводились только с 12:00 23.04.2023 по 12:00 28.04.2023 и захватили кратковременный эпизод усиления ветра и повышения волнения. Согласно данным реанализа поверхностного волнения в т. А (рис. 1), во время инклинометрических измерений сохранялся западный ветер, формирующий волны (значительная высота волн в среднем составляла 0.6 м, а период – 2.3 с), распространяющиеся в юго-восточном направлении (рис. 11).

Наиболее активное волнение наблюдалось 26–28 апреля 2023 г. в условиях достаточно слабого западного ветра средней скоростью до 5 м/с и порывами до 13 м/с. Волны, формирующиеся при западном ветре, рефрагируя на рельефе, хотя и поворачивались в сторону берега, набегали на модуль волнолома фактически без угла атаки, очень близко к линии его простираания. Именно поэтому полученная запись не настолько показательна, чтобы судить о демпфировании волн на модуле волнолома. Моментальные (пульсационные) значения волновых скоростей (рис. 11), полученные с двух сторон модуля волнолома, различаются несущественно, скорости течений с мористой стороны волнолома незначительно превосходят аналогичные с береговой стороны.

Для усредненных характеристик наблюдается обратная ситуация – средние скорости с фронтальной стороны волнолома немного меньше скоростей позади волнолома, что может быть следствием расчета интегральных скоростей по законам векторного усреднения. Волновые движения с мористой

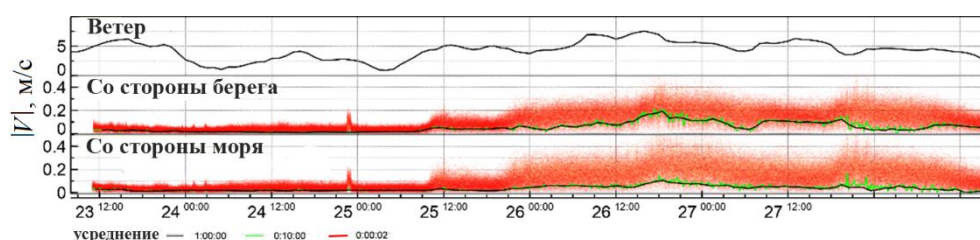


Рис. 11. Результаты регистрации абсолютной скорости течения инклинометрами в период с 12:00 23.04.2023 по 12:00 28.04.2023. Красным цветом обозначены мгновенные значения скоростей течений, зеленым цветом – 10-минутное осреднение, черным цветом – часовое осреднение

Fig. 11. Results of registration of the absolute flow velocity with inclinometers from 12:00 on 23.04.2023 to 12:00 on 28.04.2023. Red colour is instantaneous values of current velocities, green colour is 10-minute averaging, black colour is one-hour averaging



Р и с . 12. Обнажение вершины подводного вдольберегового вала в марте 2022 г. накануне его причленения к урезу при экстремально низком уровне моря: *a* – береговой сегмент, где был установлен волнолом (красные стрелки); *b* – сегмент берега на расстоянии 400 м к западу от точки установки волнолома

Fig. 12. Exposure of the top of the underwater alongshore bar in March 2022 shortly before its attachment to the water's edge at an extremely low sea level: *a* – the shore segment where the breakwater was installed (red arrows); *b* – the shore segment 400 m west of the breakwater installation site

стороны волнолома, естественно, имеют асимметрию, связанную с деформацией волн на рельефе, поэтому их среднее значение не равно нулю. Но волны с береговой стороны волнолома существенно более асимметричны из-за его воздействия, и в результате усредненные (интегральные) скорости течений могут получиться больше, чем скорости набегающего волнения.

Следует отдельно обсудить эпизод экстремального понижения уровня моря в марте 2022 г. (рис. 12). В течение нескольких недель по всей длине побережья оголились приурезовые обмеленные участки в тех местах, где подводный береговой вал оказался в состоянии, предшествующем его сезонному причленению к урезу в мае 2022 г. (см. характерное увеличение ширины пляжа 05.05.2022 г. на рис. 5). Примечательно, что в межбунном сегменте, где был установлен волнолом, это обнажение было наиболее значительным (рис. 12, *a*), хотя аналогичные обнажения были и рядом в 200 м восточнее, и в других межбунных сегментах западнее (рис. 12, *b*). Это, вероятно, указывает на влияние волнолома, когда он еще сохранял свою первоначальную конфигурацию. Достоверно утверждать невозможно, так как в тот период углубленный мониторинг не проводился.

Заклучение

Исследования показали, что ширина пляжа на восточном крыле Зеленоградской вогнутости, в том числе и в месте экспериментальной установки волнолома, испытывает естественные сезонные и синоптические колебания в зависимости от уровня моря и воздействия волнения. Зафиксирована значительная изменчивость конфигурации подводного вдольберегового вала, расположения его мористой и береговой границ, а также его ширины. При этом структура подводного вала не коррелировала ни с наличием бун, ни с изрезанностью береговой черты, ни с наличием волнолома. Миграция вдольберегового вала

обеспечивала значительные изменения глубин (с размахом до 1 м) в месте установки волнолома. Деформации за период осенне-зимних штормов 2022–2023 гг. изменялись в интервале $[-2.4...0.9]$ м. Штормовые подвижки в песчаном основании (зафиксированные значения толщины рыхлого чехла – от 0.5 до 2 м) способствовали просадке конструкций на 0.5–1.5 м.

Ширина пляжа в месте установки волнолома «Гребенка» и на смежных участках изменялась синхронно, что говорит о единой реакции на внешние воздействия всего литодинамического сегмента берега, в пределах которого были установлены волноломы.

От эксперимента ожидалось, что после установки волнолома будет зафиксировано опережающее выдвижение уреза по отношению к соседним участкам, а при благоприятных условиях и образование томболо позади волноломов. Однако положительный эффект от установленных модулей на динамику пляжа не прослеживался ни в сезонном, ни в межгодовом масштабе времени. Исключением стала ситуация экстремально низкого уровня моря в марте 2022 г., когда обнажение вершин подводного вала более явно наблюдалось (по сравнению с аналогичными соседними участками) в межбунном сегменте, где был установлен волнолом.

Отсутствие очевидного результирующего аккумулятивного эффекта от мористой группы модулей волнолома связано с их смещением и частичным погружением в песок под действием волнения, нарушившего линейность всей конструкции, а также с уменьшившейся площадью их сопротивления фронту волны. После зимнего штормового периода 2021–2022 гг. каждый модуль уже действовал фактически как отдельное сооружение. Реакцию берега до этого периода зафиксировать не удалось, так как тщательные наблюдения проводились уже после нарушения конструкции. Вторым фактором, не позволившим достичь положительного эффекта от установки конструкции, стала ограниченная длина сооружения по отношению к его удалению от уреза.

При определенных умеренных волнениях пляж выдвигался и причленялся к прибрежному модулю, создавая временное томболо. Однако аналогичное выдвижение уреза наблюдалось и на смежных участках. Тот факт, что урез примкнул к основанию последней, самой восточной буны и это его положение сохранялось в 2023 г., может говорить о возможном временном (весной 2024 г. причленение отсутствовало) положительном эффекте для линии уреза в тени прибрежного модуля.

Окончательно ответить на вопрос о возможности защиты берега от размыва с помощью проницаемого волнолома «Гребенка» в ходе работы удалось лишь частично в силу заложенных при его постановке недочетов, определивших очень слабое влияние сооружения на динамику берега. Важным результатом работы является испытание конструкции в натуральную величину непосредственно в естественных условиях. Полученный опыт показал полезность такого рода испытаний и необходимость их комплексного планирования с привлечением самого широкого круга специалистов в помощь инженерам-разработчикам для всестороннего учета всех особенностей гидролитодинамики, геоморфологических и геологических особенностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Global long-term observations of coastal erosion and accretion / L. Mentaschi [et al.] // Scientific Reports. 2018. Vol. 8. 12876. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-30904-w>
2. Dune erosion at the German Baltic coast—investigation and analysis of a large-scale field experiment compared to life dunes / C. Kaehler [et al.] // Journal of Marine Science and Engineering. 2022. Vol. 10. 1605. <https://doi.org/10.3390/jmse10111605>
3. Labuz T. A. Erosion and its rate on an accumulative Polish dune coast: the effects of the January 2012 storm surge // Oceanologia. 2014. Vol. 56, iss. 2. P. 307–326. <https://doi.org/10.5697/oc.56-2.307>
4. Šakurova I., Kondrat V., Baltranaite E., Vasiliauskienė E., Kelpšaitė-Rimkienė L. Assessment of coastal morphology on the south-eastern Baltic Sea coast: The case of Lithuania // Water. 2023. Vol. 15, iss. 1. 79. <https://doi.org/10.3390/w15010079>
5. Coastline changes of the Baltic Sea from south to east. Past and future projection / Edited by J. Harff, K. Furmanczyk, H. von Storch. Springer, 2017. Vol 19. 388 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-49894-2>
6. Bagdanavičiūtė I., Kelpšaitė L., Daunys D. Assessment of shoreline changes along the Lithuanian Baltic Sea coast during the period 1947–2010 // Baltica. 2012. Vol. 25, iss. 2. P. 171–184. <https://doi.org/10.5200/baltica.2012.25.17>
7. Karmanov K., Burnashov E., Chubarenko B. Contemporary dynamics of the sea shore of Kaliningrad Oblast // Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics. 2018. Vol. 65, iss. 2. P. 143–159. <https://doi.org/10.1515/heem-2018-0010>
8. Соколов А. Н., Чубаренко Б. В., Карманов К. В. Гидродинамические условия в береговой зоне Балтийской/Вислинской косы и Самбийского полуострова: шторм января 2012 года // Известия КГТУ. 2016. № 43. С. 67–77. EDN WXFTHN.
9. Бобыкина В. П., Стонт Ж. И., Килесо А. В. Деформации морского берега Куршской косы (Юго-восточная Балтика) под воздействием штормов осенне-зимнего сезона 2018–2019 гг. // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Естественные и медицинские науки. 2021. Вып. № 2. С. 73–83. EDN DKVTUP.
10. Стонт Ж. И., Навроцкая С. Е., Чубаренко Б. В. Многолетние тенденции изменчивости гидрометеорологических характеристик в Калининградском регионе // Океанологические исследования. 2020. Т. 48. № 1. С. 45–61. EDN VEUTPN. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2020.48\(1\).3](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2020.48(1).3)
11. Навроцкая С. Е., Чубаренко Б. В. О повышении среднегодовых и сезонных значений уровня воды в устьевой части реки Преголи (Балтийское море) по данным 1996–2015 гг. // Известия РГО. 2017. Т. 149, № 2. С. 16–30. EDN YLYNCP.
12. Басс О. В. Современная концепция берегозащиты и проблемы гидротехнического строительства на морских берегах Калининградской области // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. 2015. № 1. С. 138–144. EDN ULWNZN.
13. 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>
14. Болдырев В. Л., Рябова О. И. Динамика береговых процессов на Калининградском побережье Балтийского моря // Известия Русского географического общества. 2001. Т. 133, № 5. С. 41.
15. Рябова О. И., Левченков А. В. Изучение побережья Самбийского полуострова: вклад немецких, советских и российских ученых // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Естественные и медицинские науки. 2016. № 3. С. 44–70. EDN XBOEQB.

16. Dynamics of sediments disposed in the marine coastal zone near the Vistula Lagoon inlet, south-eastern part of the Baltic Sea / V. Chechko [et al.] // *Baltica*. 2015. Vol. 28. P. 189–199. <https://doi.org/10.5200/baltica.2015.28.16>
17. Бабаков А. Н., Чубаренко Б. В. Структура результирующего вдольберегового транспорта наносов в восточной части Гданьского залива // *Водные ресурсы*. 2019. Т. 46, № 4. С. 370–384. EDN ZQAHLV. <https://doi.org/10.31857/S0321-0596464370-384>
18. Sokolov A., Chubarenko B. Numerical simulation of dynamics of sediments disposed in the marine coastal zone of South-Eastern Baltic // *Baltica*. 2018. Vol. 31, iss. 1. P. 13–23. <https://doi.org/10.5200/baltica.2018.31.02>
19. Басс О. В., Жиндарев Л. А. Техногенез в береговой зоне песчаных побережий внутренних морей (Статья 1. Воздействие горнотехнической деятельности на морфодинамику береговой зоны Юго-Восточной Балтики) // *Геоморфология*. 2007. № 4. С. 17–24. EDN IJAYNP.
20. Burnashov E., Chubarenko B., Stont J. Natural evolution of western shore of a Sambian Peninsula on completion of dumping from an amber mining plant // *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics*. 2010. Vol. 57, iss. 2. P. 105–117.
21. Marcinkowski T., Szmytkiewicz M. Performance of submerged breakwaters as improvement of beach fill effectiveness in Gdynia, Poland // *Journal of Coastal Research*. 2013. Spec. iss. 65. P. 326–331. <https://doi.org/10.2112/SI65-056.1>
22. Kubowicz-Grajewska A. Morpholithodynamical changes of the beach and the nearshore zone under the impact of submerged breakwaters – a case study (Orłowo Cliff, the Southern Baltic) // *Oceanologia*. 2015. Vol. 57, iss. 2. P. 144–158. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANO.2015.01.002>
23. 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.
24. 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», г. Калининград, 18–24 апреля 2022 г. / Под ред. Б. В. Чубаренко. Калининград : Изд-во «БФУ им. И. Канта». 2022. С. 17–19. EDN FAKPHY.
25. 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 (80). С. 124–133. <https://doi.org/10.37279/2519-4453-2021-3-124-133>
26. Соколов А. Н., Чубаренко Б. В. Анализ эффективности сброса в море материала дноуглубления с точки зрения берегозащиты // *Известия КГТУ*. 2017. № 45. С. 102–111. EDN YMDWNF.
27. Ostrowski R., Stella M. Sediment transport beyond the surf zone under waves and currents of the non-tidal sea: Lubiato (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>
28. Леонтьев И. О. Прогнозирование развития берега в масштабе столетия (на примере Вислинской (Балтийской) косы) // *Океанология*. 2012. Т. 52, № 5. С. 757–767. EDN PСІКТР.
29. 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. 57. 102762. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2022.102762>

30. Stont Z. I., Bobykina V. P., Ulyanova M. O. "Diving" cyclones and consequences of their impact on the coast of the South-Eastern Baltic Sea // Russian Journal of Earth Sciences. 2023. Vol. 23, iss. 2. <https://doi.org/10.2205/2023ES000827>
31. Об усовершенствовании инклинометрического измерителя скорости придонных течений / В. Т. Пака [и др.] // Океанологические исследования. 2019. Т. 47, № 2. С. 220–229. EDN KBVIUB. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47\(2\).13](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(2).13)

Поступила 25.07.2024 г.; одобрена после рецензирования 02.11.2024 г.; принята к публикации 17.12.2024 г.; опубликована 31.03.2025 г.

Об авторах:

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

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

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

Бабаков Александр Николаевич, старший научный сотрудник, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский пр., д. 36), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-8824-8929**, **Scopus Author ID: 41261066200**, babakov_temp@mail.ru

Пака Вадим Тимофеевич, главный научный сотрудник, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский пр., д. 36), доктор физико-математических наук. **ORCID ID: 0000-0003-0316-1961**, **Scopus ID: 7003547709**, vpaka@mail.ru

Кондрашов Алексей Александрович, младший научный сотрудник, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский пр., д. 36). **ORCID ID: 0000-0002-3684-2184**, **Scopus ID: 36657225800**, kondrashoff1984@yandex.ru

Корж Андрей Олегович, ведущий инженер, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский пр., д. 36), **ORCID ID: 0000-0001-6409-8228**, **Scopus ID: 15080985900**, andrey.korzh@atlantic.ocean.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**, 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**, o.bass@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

Рябкова Ольга Ивановна, доцент, Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта (236041, Россия, г. Калининград, ул. Александра Невского, д. 14), кандидат географических наук. **ORCID ID: 0000-0002-4562-4162**, ryabko5195@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Чубаренко Борис Валентинович – руководство работами, анализ всех результатов и формулировка общих выводов, планирование и окончательное редактирование текста статьи

Дикий Дмитрий Игоревич – анализ данных реанализа штормовой активности, сбор материала для обзора, подготовка первого варианта текста статьи, группировка материала и доработка текста статьи

Домнин Дмитрий Александрович – проведение аэро-визуального обследования, анализ результатов и подготовка иллюстраций по динамике подводного берегового вала

Закиров Руслан Баядитович – проведение промерных работ, участие в работах по определению толщины рыхлого осадка, анализ результатов измерений подготовка соответствующих иллюстраций по промерам и толщине рыхлого осадка

Бабаков Александр Николаевич – сбора и анализ данных по многолетней динамике пляжа и динамике подводного склона в районе Зеленоградска, детальный анализ данных по связи динамики пляжа с метеоусловиями

Пака Вадим Тимофеевич – руководство работами по измерению течений и определению толщины рыхлого осадка, анализ результатов и формулировка соответствующих выводов

Кондрашов Алексей Александрович – проведение работ, включая подготовку приборной базы, по измерению течений, анализ результатов измерений

Корж Андрей Олегович – проведение работ и математический анализ результатов по измерению течений, подготовка соответствующих иллюстраций

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

Карманов Константин Викторович – проведение нивелировочных работ и аэро-визуального обследования, наблюдение за шириной пляжа, анализ полученных данных

Басс Олег Васильевич – участие в постановке конструкции, проведение промеров 2022 г., фотофиксация состояния конструкции, участие в формулировке выводов по конструкции

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

Рябкова Ольга Ивановна – анализ данных по источнику наносов от дноуглубительных работ в порту Пионерский

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи