

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 625.122

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-5-3>

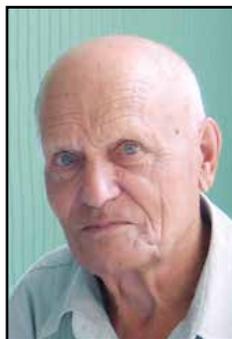
Защита транспортных сооружений от волнового воздействия путём создания песчаного волногасящего пляжа



Галина ТЛЯВЛИНА



Роман ТЛЯВЛИН



Нестифор ЯРОСЛАВЦЕВ

Галина Вячеславовна Тлявлиная¹, Роман Маратович Тлявлин², Нестифор Аксентьевич Ярославцев³

^{1, 2, 3} Научно-исследовательский центр «Морские берега», обособленное подразделение Центрального научно-исследовательского института транспортного строительства, Сочи, Россия.

✉ ¹ TlyavlinaGV@Tsniis.com.

¹ ORCID 0000-0003-4083-9014, Scopus ID: 57215131371, SPIN-код: 5516-9241, Author ID: 604630.

² ORCID 0000-0002-8648-0492, SPIN-код: 3365-3637, Author ID: 123325.

АННОТАЦИЯ

Проектирование и эксплуатация транспортных сооружений (железных и автомобильных дорог, мостовых переходов), расположенных на берегах морей в зоне возможных размывов волнами, требует особо тщательной проработки берегозащитных мероприятий.

В настоящей статье на примере конкретного участка Самбийского полуострова в Калининградской области от мыса Таран до мыса Гвардейский показана проблема защиты от волнового воздействия автодороги, пролегающей по побережью, и предложены пути её решения. Представлены результаты лабораторных исследований по созданию

волногасящего песчаного пляжа на берегах в условиях дефицита материала во вдольбереговом потоке наносов. Исследования выполнены с применением метода физического моделирования в волновом бассейне.

Доказана принципиальная возможность создания локального устойчивого песчаного пляжа для защиты транспортных сооружений от волнового воздействия в условиях дефицита материала во вдольбереговом потоке наносов.

Результаты исследований можно распространить и на другие прижимные участки автомобильных, а также железных дорог.

Ключевые слова: автодорога, берегозащита, волногасящие сооружения, железная дорога, литодинамические процессы, опора моста, песчаный пляж, размыв, физическое моделирование.

Для цитирования: Тлявлиная Г. В., Тлявлин Р. М., Ярославцев Н. А. Защита транспортных сооружений от волнового воздействия путём создания песчаного волногасящего пляжа // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 5 (108). С. 24–33. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-5-3>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

Защита транспортных сооружений (автомобильных и железных дорог, опор мостов и др.), расположенных на берегах морей, от волнового воздействия всегда представляла собой непростую задачу [1]. Особенно сложным является укрепление берегов с песчаными наносами, когда интенсивность и направленность литодинамических процессов в береговой зоне моря не всегда можно однозначно и достоверно оценить с точностью, требуемой для разработки проектных мероприятий по инженерной защите [2].

Одним из ярких примеров железной дороги, проложенной вдоль берегов с песчаными наносами, является Тихоокеанский участок Дальневосточной железной дороги Корсаков – Ноглики, где на некоторых участках земляное полотно и устои мостов уже подвергаются воздействию волн. На рис. 1 видно, что песчаный пляж практически полностью размыт и устои моста через реку Гарь (263-й км участка Корсаков – Ноглики Дальневосточной железной дороги) находятся под угрозой размыва штормовыми волнами.

На другом участке (272–273-й км) перед земляным полотном железной дороги лежит узкая полоса пляжа (рис. 2). Здесь пляж рассматривается как берегозащитное сооружение, и его ширина должна быть достаточной для гашения энергии волн при расчётном приливном уровне моря. На рассматриваемом участке берега ширина существующего пляжа недостаточна для предохранения от размыва волнами земляного полотна. Для защиты

берега от размыва волнами и обеспечения бесперебойной работы железнодорожного транспорта в течение продолжительного времени осуществлялись берегозащитные мероприятия. В настоящее время береговой откос почти на всём протяжении рассматриваемого участка берега прикрыт камнем разной крупности.

При покрытии берегового откоса использовался в основном крупный камень. Однако под верхним слоем крупного камня, уложенного в один ряд, отсыпался камень более мелкой фракции. Во время воздействия волн на откос при нарушении верхнего слоя из наброски камня происходило вымывание мелких фракций, что привело к деформации покрытия из камня, защищающего земляное полотно железной дороги (рис. 3). Прикрытие откоса земляного полотна камнем разной крупности при отсутствии перед ним волногасящего пляжа не смогло в полной мере обеспечить необходимую его защиту от размыва волнами.

В настоящей работе, на примере Самбийского полуострова (Калининградская область), приведены результаты исследования песчаных пляжей, обеспечивающих стабильность берега и безопасность транспортных магистралей.

Проблема размыва берегов данного района и расположенных вдоль них автодорог актуальна уже несколько десятилетий [3, 4]. Попытки её решения, в основном, не являются успешными. А, между тем, автодороги, подвергаемые угрозе размыва, имеют очень



Рис. 1. Подъём устоев моста на 263-м км участка Корсаков – Ноглики Дальневосточной железной дороги. 2020 год [фото авторов].



Рис. 2. Узкая полоса пляжа на 272–273-м км участка Корсаков – Ноглики Дальневосточной железной дороги. 2020 год [фото авторов].



Рис. 3. Подмыв основания откоса земляного полотна на 273-м км участка Корсаков – Ноглики. 2020 год [фото авторов].

большое значение для всего региона. Так, например, дорога, проложенная по Куршской косе, – единственная, связывающая Национальный парк с г. Зеленоградском. Так как для качественного решения проблемы размыва берегов в данном регионе преимущественное значение имеет точная оценка протекающих литодинамических процессов на подводном склоне, их изучению уделяется большое внимание.

Северная береговая зона Самбийского полуострова от мыса Таран на всем протяжении длительное время подвержена абразии. Построенные в начале прошлого столетия берегозащитные и пляжеудерживающие сооружения уже к 1971 году оказались разрушенными или основательно деформированными [5], а возведённые позднее пляжеудерживающие сооружения – малоэффективными.

Размыв пляжей продолжается, а берег отступает [6].

Одностороннее перемещение песчаного материала вдоль берегов Самбийского полуострова (вдольбереговой поток наносов) и его влияние на темпы отступления берега были установлены ещё в первой половине XX века. Было показано, что в пределах западного побережья полуострова генеральное перемещение наносов направлено на юг – в сторону Вислинской косы, а в пределах северного – на восток, в сторону Куршской косы.

Исследования литодинамических процессов в береговой зоне юго-восточной Балтики в 60-х годах прошлого столетия подтвердили существование вдольберегового перемещения песчаных наносов. Была предложена концепция единого вдольберегового потока песчаных наносов, направленного от мыса Таран

до входа в Рижский залив [7]. Вместе с тем эти исследования показали дефицит песчаных наносов в пределах Самбийского полуострова до корня Куршской косы, а, следовательно, и дефицит песка во вдольбереговом потоке наносов.

Концепция единого вдольберегового потока песчаного материала в практическом плане выливалась в строительство пляжеудерживающих сооружений, которые задерживали часть материала из потока наносов, обуславливая локальное расширение пляжной полосы и снижение скорости размыва берега, но, не прекращая его полностью. Изъятие материала из вдольберегового потока наносов системой бун увеличивало дефицит наносов в потоке и интенсивность размыва низового участка берега.

В настоящее время представление о едином вдольбереговом потоке наносов юго-восточной Балтики рядом исследователей считается устаревшим, и предложена концепция относительно обособленных морфо-литодинамических ячеек разного масштаба [8], согласно которой вдоль берега чередуются участки расходящихся потоков наносов, в ячейках меньшего масштаба формируются встречные потоки, сходящиеся в вершинах береговых дуг. Существование морфо-литодинамических ячеек подтверждается результатами математического моделирования транспорта песка, генерируемого ветровым волнением в береговой зоне.

В пределах рассматриваемого берега от м. Таран до м. Гвардейский расположены два участка конвергенции – от мыса Таран до Светлогорска и участок дивергенции потоков в Пионерской бухте [9]. Рекомендаций по использованию выделенных морфо-литодинамических ячеек для решения практических задач берегозащиты пока не разработано.

Из вышеизложенного следует, что ряд вопросов, связанных с перемещением наносов вдоль юго-восточной Балтики, остаётся открытым несмотря на непрекращающиеся исследования [10–16], а применяемые методы берегозащиты малоэффективны [17].

Поэтому необходимы дальнейшие исследования литодинамических процессов в береговой зоне Калининградской области, а поиск рационального способа защиты размываемых берегов и транспортных сооружений, расположенных на них, является одной

из важных практических задач.

ЦЕЛЬ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В настоящей работе исследования устойчивости песчаного пляжа в комплексе с волногасящими и пляжеудерживающими сооружениями выполнены методом физического моделирования в волновом бассейне.

Рассмотрена береговая зона северного побережья Калининградской области от мыса Таран до Куршской косы включительно.

Цель исследования – определить на физической модели комплекс мер, обеспечивающих устойчивость (стабильность) создаваемого песчаного пляжа на абразионном участке берега с дефицитом наносов во вдольбереговом потоке.

РЕЗУЛЬТАТЫ

История вопроса

В 1976 году Черноморским отделением ЦНИИС был разработан инженерный метод расчёта образования искусственных свободных пляжей и подготовлены рекомендации по их применению на Калининградском побережье Балтики [18]. На возможность создания песчаного пляжа без пляжеудерживающих сооружений указывала впечатляющая разница в динамике западного берега Самбийского полуострова в зоне сброса песчаной пульпы Янтарного комбината и северного берега полуострова, поток наносов вдоль которого пополнялся, в основном, материалом размыва берега. Северный берег полуострова в течение 1960–1970 гг. повсеместно отступал, местами до 0,5 м в год, а западный от места сброса пульпы до г. Балтийск на протяжении 33 км был аккумулятивным. Объем песка, отложившийся на этом участке, к 1974 году составил около 30 000 м³, а в зоне слива пульпы сформировался обширный аккумулятивный выступ. Возникла привлекательная идея создания полнопрофильного песчаного пляжа без пляжеудерживающих и волногасящих сооружений, обеспечивающего полное гашение штормовых волн и устойчивость берегового склона. Для этого надо было отсыпать (рефулировать) необходимый объём песчаного материала, из которого сформируется профиль динамического равновесия, и таким образом берег будет прикрыт от воздействия волн.

На северном побережье Самбийского полуострова преобладает абразия. Скорость



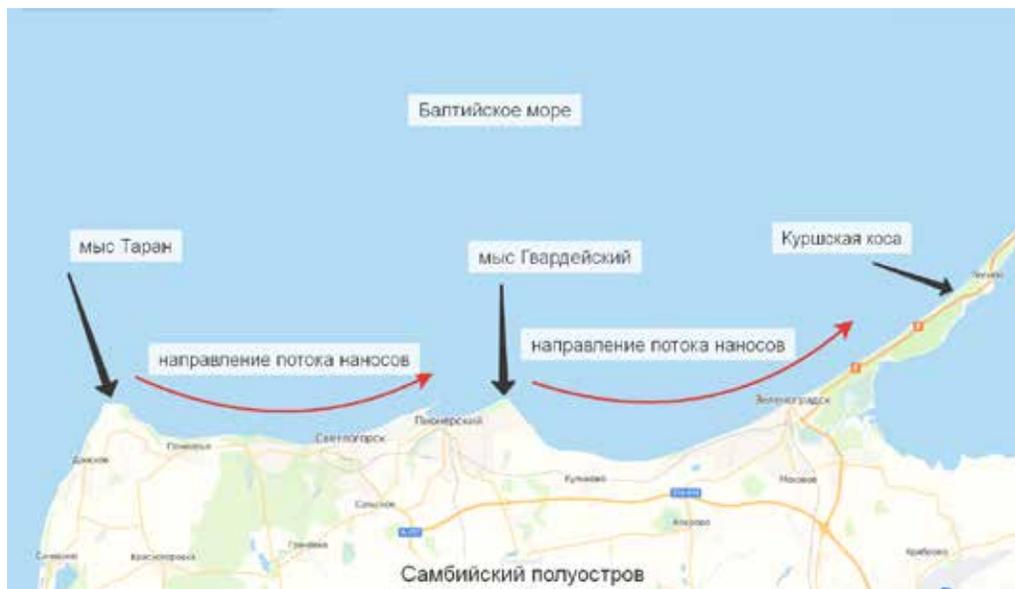


Рис. 4. Северное побережье Самбийского полуострова [разработано авторами].

отступления бровки берега в 1976 году на отдельных участках оценивалась от 0,1 до 0,5 м в год и примерно такой же остаётся в настоящее время. Следует отметить, что до начала сброса вскрышных пород Янтарного комбината западный берег Самбийского полуострова отступал примерно с такой же скоростью, как и северный [6].

Расчёт профиля динамического равновесия на участке м. Таран – м. Купальный был выполнен при параметрах волн 4 % обеспеченности в режиме и 50 % обеспеченности в системе по линии первого обрушения: высота волн $h = 4,4$ м, период $T = 9,5$ с и средней крупности песка $d_{50} = 0,15$ мм. Обрушение расчётной волны в таких условиях происходит на глубине $H_{кр.} = 7,6$ м на расстоянии 600 м от берега.

Сопоставление фактических профилей подводного склона в шестисотметровой полосе рассматриваемого побережья с расчётным профилем динамического равновесия показало, что на всем протяжении натурные профили расположены ниже расчётного, свидетельствуя о дефиците песчаного материала в прибрежной полосе. Суммарный дефицит песка только на участке м. Таран – м. Купальный протяжённостью около 25 км составил 17,3 млн m^3 .

На значительной площади дна прибрежной полосы на поверхности залегает валунно-глыбовый материал, образующий окаймляющую Самбийский полуостров каменную от-

мостку шириной от 250 м до 5 км. У мысов Таран, Купальный и Гвардейский отмостка примыкает непосредственно к берегу, и пляжная полоса полностью размыта. Только в вершинах бухт сохранились пляжи шириной до 30–50 м из мелкого и среднезернистого песка, а на подводном склоне располагается пласт песчаного материала над каменной отмосткой. Широкое распространение каменной отмостки, прикрывающей донные отложения в прибрежной полосе, послужило основанием для заключения о том, что вдольбереговой поток наносов на участке от мыса Таран до мыса Гвардейский формируется, в основном, за счет размыва берегового склона, а доля материала от размыва дна незначительна (рис. 4). При этом предполагалось, что весь материал от размыва берега и дна уходит во вдольбереговом потоке и не участвует в формировании профиля подводного склона абразионных участков берега.

Каменная отмостка дна вдоль северного побережья Самбийского полуострова обуславливает формирование вдольберегового потока с большим дефицитом наносов. Вдольбереговой поток без дефицита наносов может сформироваться только на профиле динамического равновесия. Расчёт ёмкости вдольберегового потока, то есть транспортирующей способности волн и возбуждаемых ими вдольбереговых течений, мелкозернистого песка средним диаметром 0,15 мм у северного берега Самбийского полуострова показал,

что он изменяется от 240 тыс. до 520 тыс. м³ в год в зависимости от направления (азимута) береговой линии. Фактический вдольбереговой поток наносов на подходе к мысу Купальному оценивался в 200 тыс. м³ в год и, следовательно, дефицит наносов во вдольбереговом потоке составлял на отдельных участках берега от 280 тыс. м³ до 320 тыс. м³ в год.

Объёмы дефицита песчаного материала на северном побережье Самбийского полуострова и одновременно дефицита песка во вдольбереговом потоке показали всю масштабность решения задачи создания волногасящего песчаного пляжа без пляжеудерживающих сооружений, но представлялось, что технически эта задача может быть решена. Необходимо только найти соответствующие запасы песка и отсыпать (рефулировать) его на берег в зону зарождения (формирования) вдольберегового потока наносов. Был предложен и вариант решения этой проблемы путем переброски пульпы Янтарного комбината на северный берег Самбийского полуострова, но это предложение не получило поддержки, а сброс пульпы на западный берег полуострова был прекращён в 2000 году.

Идея создания волногасящего песчаного пляжа без пляжеудерживающих сооружений была реализована СНПО «Балтбергозащита». В течение 1987–1991 годов из материала срезки высокого аварийного берега на участке Филино – Приморье в объёме 2,3 млн м³ песка на протяжении 1,1 км был намыт пляж максимальной шириной 140 м [6]. Техногенный пляж был создан в зоне минимальной ёмкости вдольберегового потока наносов 240 тыс. м³ в год в пределах рассматриваемого участка северного побережья Самбийского полуострова и, следовательно, минимального дефицита наносов во вдольбереговом потоке. Однако устойчивость намытого пляжа оказалась невысокой, а скорость размыва значительно выше ожидаемой [18]. Через восемь лет после окончания намыва пляж был почти полностью размыт. При этом не было выявлено заметных приращений пляжа на нижележащих участках по ходу потока наносов, а, следовательно, материал уходил с намытого участка не только вдоль берега, а также и, возможно, в основном, на глубину, формируя профиль динамического равновесия.

Продолжившийся размыв пляжей и берега Самбийского полуострова обуславливал необходимость защиты локальных аварийных

участков с помощью пляжеудерживающих сооружений, при этом продолжили возводить буны с низкой корневой частью [17], столетний опыт применения которых в условиях дефицита песка во вдольбереговом потоке показал их малую эффективность. Низкая корневая часть бун снижает их пляжеудерживающую способность. Максимальная эффективность бун будет обеспечена, когда профиль их гребня будет повторять профиль проектируемого пляжа с разумным запасом. Именно поэтому 40 ранее возведенных деревянных бун из лиственницы в г. Зеленоградске не привели к стабилизации пляжевой полосы.

Дефицит наносов в береговой зоне и во вдольбереговом потоке Самбийского полуострова, а также неудачный опыт создания свободного волногасящего песчаного пляжа показали бесперспективность этого направления. Но проблема защиты размываемых берегов Калининградской области осталась, и поиск способа решения этой проблемы продолжается и в настоящее время.

Постановка задачи

Перспективным направлением защиты абразионных берегов Калининградского побережья представляется создание песчаных пляжей в комплексе с волногасящими, пляжеудерживающими и берегозащитными (берегоукрепительными) сооружениями.

Волногасящее сооружение – прерывистый волнолом из тетраподов – частично гасит энергию волн и снижает волновое воздействие на пляж, а также сокращает ширину зоны интенсивного вдольберегового переноса пляжного материала. Пляжеудерживающие сооружения – буны из крупного камня с примкнутой корневой частью к опояске – обеспечивают относительную стабильность пляжа и в то же время пропуск транзитного потока наносов, который формируется на подходе к защищаемому участку.

Пляж расчётных размеров образуется из материала, отсыпанного в межбунные отсеки. Берегозащитные сооружения – опояска или каменная берма – возводятся по подошве берегового склона для повышения его устойчивости и защиты при штормах редкой повторяемости при высоком нагонном уровне.

Транзитный поток песчаного материала вдоль системы сооружений и пляжа на локальном участке исключает их негативное влияние на прилегающий участок берега по ходу пото-



ка наносов – низовой размыв. Вместе с тем транзит песчаного материала в условиях дефицита материала в потоке наносов обуславливает минимальную ширину устойчивого пляжа, которая определяется пляжеудерживающей способностью комплекса волногасящих и пляжеудерживающих сооружений и реальным потоком наносов, сформированным на подходе к участку. Размер устойчивого пляжа может быть увеличен путем отсыпки песчаного материала на подходе к защищаемому участку, то есть путём снижения дефицита материала в потоке наносов.

Возведение устойчивой полосы песчаного пляжа в комплексе с волногасящими и пляжеудерживающими сооружениями и отсыпкой (намывом) пляжеобразующего материала позволит решать задачу защиты размываемых берегов и расположенных в береговой зоне транспортных магистралей Калининградской области поэтапно. Сначала выполняется защита локальных (аварийных) участков, а в последующем – создание искусственного пляжа в пределах основной зоны размыва берега на всем северном побережье от мыса Таран и до Куршской косы включительно. Автодорога, проложенная по Куршской косе, неоднократно затопливалась при размыве береговых дюн и прорыве нагонных вод в районе Зеленоградска [17].

Результаты экспериментальных исследований

Исследование устойчивости песчаного пляжа было выполнено на модели фрагмента берега Самбийского полуострова в районе бухты Пионерской с дефицитом материала во вдольбереговом потоке наносов. Высота берегового склона в пределах участка изменяется от трех до десяти метров. Основание склона местами размывто. Ширина пляжной полосы составляет 10–15 м.

Уклон подводного склона в стометровой прибрежной полосе составляет 0,01, а в 500-метровой ещё уполаживается.

На подводном склоне выделяются два подводных песчаных вала. Первый вал располагается на расстоянии 50 м от берега, имеет относительную высоту 0,6 м и глубину над гребнем 0,9 м. Второй вал находится на расстоянии 250 м от берега, высота его составляет 0,7 м, а глубина на гребне 3,4 м.

Средний многолетний уровень моря по данным наблюдений на ГМС Пионерский

составляет 0,07 м в Балтийской системе высот. Максимальный уровень обеспеченностью 1 % равен 1,36 м абс., а минимальный уровень составляет минус 1,10 м абс. (амплитуда колебаний 2,46 м).

Экспериментальные исследования в волновом бассейне устойчивости отсыпанного материала были выполнены при западном шторме повторяемостью один раз в 25 лет при уровне моря обеспеченностью 1 %. Параметры волн западного шторма на подходе к волнолому составляли:

- средний период $\bar{T} = 13,5$ с;
- высота волн $h = 2,24$ м;
- азимут 331 градус.

При экспериментальных исследованиях на гидравлических моделях литодинамических процессов, протекающих на песчаных побережьях, в качестве наносов применялся песок, крупность которого соответствует материалу пляжа в натуре.

На модели в волновом бассейне в вертикальном масштабе 1:37 и в горизонтальном масштабе 1:131 был построен фактический рельеф прибрежной зоны участка Пионерской бухты протяжённостью 700 м и шириной 342 м от подошвы берегового склона до изобаты 5,0 м. Поверхность рельефа была построена по установленным маякам.

На расстоянии 170 м от подошвы берегового склона построены три фрагмента прерывистого волнолома из шести слоев тетраподов массой 3 тонны.

Отметка верха гребней прерывистого волнолома составляла +1,70 м БС (на 0,34 м выше расчетного максимального уровня обеспеченностью 1 %), а просветы между фрагментами прерывистого волнолома при среднем уровне – 29 м.

Четыре буны длиной по 100 м из крупного камня массой от 100 до 300 кг были расположены в центральной части выбранного участка. Расстояние между осями бун составляло 100 м. Корневая часть бун, примыкающая к опояске, выполнена горизонтальной на отметке +2,0 м на протяжении 15 м. Далее в море гребень понижается до отметки +1,0 м в голове бун.

В межбунные отсеки был отсыпан песок средней крупностью 0,50 мм. В пределах прибрежной полосы шириной 59 м поверхность отсыпанного материала выполнена на 20 см ниже гребня каменнонабросных бун, а дальше в море слой отсыпанного материала



Рис. 5. Вид модели во время эксперимента [фото авторов].

уменьшался до нуля в 150 м от берега. Отметки поверхности отсыпанного материала контролировались по маячкам, распределённым по площади. За пределами бун с верховой относительно потока наносов и низовой стороны рельеф дна модели оставался естественным.

Согласно материалам наблюдений, продолжительность штормов, проходящих в исследуемом районе, изменяется от 6 до 40 часов. Средняя продолжительность штормов составляет 23 часа. При исследовании на модели пляжа в волновом бассейне продолжительность шторма, которая соответствует фазе его стабилизации, принята равной 24 часам в натуре и, соответственно, четырем часам на модели.

Во время эксперимента под действием волн из материала исходной отсыпки начал формироваться пляж (рис. 5). Основная часть материала перемещалась в верхнюю часть модели к опояске. Незначительная часть песчаного материала перебрасывалась через гребни второй, третьей и четвертой бун на протяжении всего опыта.

В первые два часа эксперимента отмечался интенсивный размыв естественного дна модели западнее первой (западной) буны. Размытый материал частично аккумулировался перед первой буной, а оставшаяся часть компенсировала дефицит материала во вдольбереговом потоке наносов и транзитом уходила за пределы участка. Снижение дефицита материала в транзитном потоке наносов и перестройка профиля отсыпанного пляжа

под действием волн, выразившаяся в массовом перемещении материала с глубины 2,5 м – 4,0 м в верхнюю и надводную часть формирующегося пляжа, обусловили расширение пляжа и повышение его отметок. В начале опыта ширина отсыпанного пляжа при расчётном уровне 1,36 м в пределах всего участка составляла 22 м. Через два часа опыта (первые 12 часов шторма в натуре) ширина пляжа увеличилась во всех трех отсеках и составляла от 38 до 62 м.

В течение последних двух часов эксперимента размыв дна модели на подходе к защищаемому участку сократился в связи с истощением запасов песка и частичным обнажением каменной отмостки. Это привело к росту дефицита материала в потоке наносов. У подветренной стороны первой буны пляж был размыт полностью, а у наветренной стороны второй с запада буны ширина пляжа составляла 26,6 м. Таким образом, в первом межбунном отсеке наблюдался резкий перекокс контура пляжа в сторону перемещения материала.

Во втором и третьем межбунных отсеках сформировался пляж с более ровным контуром, а ширина его превысила ширину исходной отсыпки в два раза.

По результатам выполненных на модели измерений были определены объёмы деформаций рельефа в межбунных отсеках и на прилегающих участках берега. На участке к западу от первой (западной) буны преобладал размыв в течение всего эксперимента с постепенным снижением интенсивности.



Объём размыва только в полосе шириной 15 м, прилегающей к первой западной буне, составил 1892 м³. Следует отметить, что размывалась, в основном, внешняя низкая часть дна на отметках от 0,0 м до минус 4,0 м, в то время как пляж прирастал. В результате во входящем углу у первой буны сформировался пляж шириной 26 м и протяженностью 22 м, который сохранился до конца эксперимента.

В первом западном отсеке отсыпанный материал пляжа и дно были частично размывты. Объём размыва составил 7452 м³. Во втором межбунном отсеке зафиксирована аккумуляция материала в объёме 10443 м³. В третьем отсеке аккумуляция пляжа составила 9963 м³. Аккумуляция песчаный материал и на восточной подветренной стороне четвертой буны. Здесь отложилось 1556 м³.

Суммарный объём песчаного материала в пределах защищаемого участка протяжённостью 300 м по осям крайних бун за период расчётного шторма в целом увеличился на 13151 м³. Следовательно, предлагаемая система волногасящих и пляжеудерживающих сооружений обеспечивает устойчивость пляжа.

Следует отметить, что на подводном склоне в районе голов бун второго и третьего межбунных отсеков и далее до волноломов деформации дна в течение всего эксперимента были незначительны, также как за пределами волноломов. Волна, проходя в просветы прерывистого волнолома, огибает выступающий из воды его фрагмент, и два элемента волны встречаются в заволноломной акватории, образуя новую волну, по высоте близкую к исходной. Место встречи двух элементов волны отклоняется от середины фрагмента волнолома в зависимости от угла подхода волн. В результате этого эффекта высота пляжа вдоль абразионного берега изменялась от минимального 2,0 м в зоне дивергенции волновых лучей до максимального в зоне конвергенции 3,60 м.

ВЫВОДЫ

Экспериментальные исследования на физической модели берега с дефицитом материала во вдольбереговом потоке наносов показали, что комплекс волногасящих и пляжеудерживающих сооружений в сочетании с отсыпкой материала позволяет создавать локальный устойчивый волногасящий песча-

ный пляж, обеспечивающий защиту берега и расположенных в береговой зоне транспортных магистралей и других сооружений.

В проведённых экспериментах показана принципиальная возможность создания локального устойчивого песчаного пляжа на северном побережье Калининградской области.

Результаты исследований можно распространить и на другие прижимные участки автомобильных и железных дорог, расположенные на берегах морей с песчаными наносами. При защите конкретного участка необходим поиск оптимального варианта размеров и компоновки волногасящих и пляжеудерживающих сооружений, позволяющего решить задачу при минимальных затратах.

Так как в области защиты транспортных сооружений, расположенных на морских берегах с песчаными наносами, всё ещё остаётся достаточно много неразрешённых вопросов, исследования в данном направлении требуется продолжить.

Так, одной из основных проблем остаётся адекватная оценка транспорта песчаных наносов в береговой зоне. Наиболее достоверно морфодинамические процессы и транспорт наносов на песчаных берегах описаны с использованием математических моделей в [9; 19], что подтверждается данными натурных наблюдений [15; 16 и др.] и исследованиями, представленными в настоящей работе. Учитывая успешное развитие в последние годы численных моделей динамики рельефа и успешное применение моделей, отражённых в [9; 19], дальнейшие исследования данных вопросов целесообразно продолжить с использованием методов математического моделирования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Баринов М. Ф., Смешко В. А. Разработка предложений по предупреждению чрезвычайных ситуаций, вызванных размывом дорожного полотна автомобильных дорог федерального значения // Проблемы и пути совершенствования проведения аварийно-спасательных работ при ликвидации чрезвычайных ситуаций: Сб. трудов XXXIII Международной научно-практ. конференции, Химки, 01 марта 2023 года. – Химки: Академия гражданской защиты Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий имени генерал-лейтенанта Д. И. Михайлика, 2023. – С. 18–21. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50480381&pff=1>. Доступ 26.06.2023. EDN: FHDLOK.

2. Тлявлиня Г. В., Ярославцев Н. А., Петров В. А., Тлявлин Р. М. О методах защиты транспортных соору-

жений на открытых песчаных берегах внутренних морей // Транспортное строительство. – 2015. – № 6. – С. 14–16. EDN: SGDDMX.

3. Саратникова Ю. В. Актуальные вопросы берегового природопользования северного побережья Калининградской области // Молодой ученый. – 2019. – № 3 (241). – С. 126–129. EDN: VSBVNZ.

4. Михневич Г. С., Лосева В. М. Классификация геологических и инженерно-геологических факторов экологического риска в прибрежной зоне Калининградской области // Геопрограммные исследования общественных и природных систем: теория и практика: сборник статей / ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова». – Чебоксары: ООО «Издательский дом «Среда», 2019. – С. 115–123. DOI: 10.31483/g-33276.

5. Болдырев В. Л. Аварийная обстановка на Калининградском побережье Балтийского моря // ГеоРиск. – 2009. – № 1. – С. 32–34. EDN: KTZOPL.

6. 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: XBOEQV.

7. Богданов Н. А., Совершаев В. А., Жиндарев Л. А., Агапов А. П. Эволюция представлений о динамике юго-восточных берегов Балтийского моря // Геоморфология. – 1989. – № 2. – С. 62–69. EDN: QNQRCE.

8. Бабаков А. Н. Эволюция представлений о вдольбереговых потоках наносов в юго-восточной Балтике. // Литодинамика донной контактной зоны океанов. Материалы международной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения В. В. Логинова. – М.: ГЕОС, 2009. – С. 56–58.

9. Леонтьев И. О. Потоки наносов вдоль юго-восточного побережья Балтики // Геоморфология. – 2015. – № 1. – С. 70–76. DOI: <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2015-1-70-76>.

10. Белова П. М., Корзинин Д. В. Математическое моделирование вдольберегового потока наносов у побережья Балтийской косы // Комплексные исследования Мирового океана: Материалы VI Всероссийской научной конференции молодых ученых, Москва, 18–24 апреля 2021 года. – М.: Институт океанологии им. П. П. Ширшова Российской академии наук, 2021. – С. 41–42. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46522868&pf=1>. Доступ 26.06.2023.

11. Корзинин Д. В., Штремель М. Н. Динамика подводного вала песчаного берега под воздействием штормового волнения по данным мониторинговых наблюдений // Морской гидрофизический журнал. – 2020. – Т. 36. – № 4 (214). – С. 424–436. DOI: 10.22449/0233-7584-2020-4-424-436.

12. Стонт Ж. И., Бобыкина В. П. «Ныряющие циклоны» и размыв берегов Куршской косы (Калининградская область) // XXIX Береговая конференция: Натурные и теоретические исследования – в практику берегопользования: Сб. материалов Всероссийской конференции с международным участием, Калининград, 18–24 апреля 2022 года. – Калининград: Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, 2022. – С. 151–153. EDN: VPERKC.

13. Карманов К. В., Бурнашов Е. М. Анализ пространственно-временной изменчивости характеристик современной динамики морского берега в Калининградской области // Арктические берега: путь к устойчивости: Материалы XXVII Международной береговой конференции, Мурманск, 24–29 сентября 2018 года / Ответственный редактор Е. А. Румянцев. – Мурманск: Мурманский арктический государственный университет, 2018. – С. 88–91. EDN: VKNZKR.

14. Масуров П. С., Великанов Н. Л. Динамика изменения ширины пляжа в отдельных районах морского побережья города Зеленоградска // Вестник молодежной науки. – 2020. – № 4 (26). – С. 10. DOI: 10.46845/2541-8254-2020-4(26)-10-10.

15. Белов Н. С., Шапльгина Т. В., Данченков А. Р., Волкова И. И. Оценка эффективности восстановления авантоны после шторма (на примере участка авантоны на 14-м км национального парка «Куршская коса») // Проблемы изучения и охраны природного и культурного наследия национального парка «Куршская коса»: Сб. научных статей. Вып. 17. ФГБУ «Национальный парк «Куршская коса». – Калининград: Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, 2021. – С. 95–103. EDN: QTCUOS.

16. 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 годов // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Естественные и медицинские науки. – 2021. – № 2. – С. 73–83. [Электронный ресурс]: https://journals.kantiana.ru/upload/iblock/fd5/6_73-83.pdf. Доступ 26.06.2023.

17. Зеняускяйте А. А. Берегозащитные сооружения как метод защиты морского побережья Калининградской области // Академическая публицистика. – 2020. – № 4. – С. 579–593. EDN: BUOQSI.

18. Рыбак О. Л., Супрунов Л. И. Деформация песчаного берегового склона под действием длинных волн // Сб. научных трудов Всесоюзного научно-исследовательского института транспортного строительства – М., 1978. – Вып. 106: Защита морских берегов. – С. 32–39.

19. Леонтьев И. О. Прибрежная динамика: волны, течения, потоки наносов. – М.: ГЕОС, 2001. – 272 с. ISBN 5-89118-211-4. ●

Информация об авторах:

Тявлина Галина Вячеславовна – кандидат технических наук, заведующий лабораторией моделирования, расчётов и нормирования в гидротехническом строительстве Научно-исследовательского центра «Морские берега» (ОП АО ЦНИИТС «НИЦ «Морские берега») – обособленного подразделения Центрального научно-исследовательского института транспортного строительства (АО ЦНИИТС), Сочи, Россия, TlyavlinaGV@Tsnis.com.

Тявлин Роман Маратович – кандидат технических наук, заместитель генерального директора Научно-исследовательского центра «Морские берега» (ОП АО ЦНИИТС «НИЦ «Морские берега») – обособленного подразделения Центрального научно-исследовательского института транспортного строительства (АО ЦНИИТС), Сочи, Россия, TlyavlinRM@Tsnis.com.

Ярославцев Нестифор Аксентьевич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского центра «Морские берега» (ОП АО ЦНИИТС «НИЦ «Морские берега») – обособленного подразделения Центрального научно-исследовательского института транспортного строительства (АО ЦНИИТС), Сочи, Россия, detm18@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 19.04.2023, одобрена после рецензирования 23.11.2023, принята к публикации 04.12.2023

