

## СТАТЬИ И СООБЩЕНИЯ

### Инженерная экология и математика

УДК 627.522

#### Разработка нового метода защиты искусственных территорий от штормового волнения

Екатерина Сергеевна Волкова

Филиал ОАО ЦНИИС «НИЦ «Морские берега», Россия  
354002, Краснодарский край, г. Сочи, ул. Я.Фабрициуса, 1  
Сочинский государственный университет, Россия  
354000, Краснодарский край, г.Сочи, ул. Советская, 26 а  
Младший научный сотрудник,  
E-mail: volkovaes@tsniis.com

**Аннотация.** На основе результатов экспериментальных исследований, проведенных в волновых лотке и бассейне, разработан способ защиты искусственных территорий, выдвинутых на значительные глубины в море, с использованием галечного пляжа в комплексе с пляжеудерживающими сооружениями. В качестве продольного защитного сооружения, препятствующего выносу пляжеобразующего материала на глубину, была предложена конструкция в виде укрепительной стены с волноломом-козырьком, представляющим собой подводный выступ, устанавливаемый на внешней границе выдвигаемой территории. Представлены результаты численного моделирования трансформации волн при взаимодействии с подводным пляжеудерживающим сооружением (волноломом-козырьком).

**Ключевые слова:** искусственные территории; рекреационный пляж; искусственные мысы; подводный волнолом-козырек; пляжеудерживающие сооружения.

**Введение.** Одним из перспективных направлений гидротехнического строительства в прибрежных зонах является создание новых и развитие существующих искусственных территорий, а, соответственно, актуальной задачей – защита этих территорий от волнового воздействия [1, 2]. Особый интерес представляет защита искусственных территорий с использованием в качестве берегозащитного сооружения галечного пляжа, что позволяет получить значительный дополнительный экологический и социально-экономический эффект за счет создания новых рекреационных территорий. Это требует нестандартных подходов в решении комплексной задачи защиты искусственной территории, формировании рекреационного пляжа, повышении экономической и экологической эффективности предлагаемых решений [3].

**Материалы и методы.** При разработке способа защиты искусственных территорий были использованы следующие методы:

1) гидравлическое моделирование, на плоской и пространственной моделях, подводного сооружения, обеспечивающего устойчивость галечного пляжа от размыва штормовыми волнениями;

2) математическое моделирование трансформации волн при прохождении через подводное пляжеудерживающее сооружение;

**Обсуждение.** Основная задача исследования заключалась в разработке способа защиты искусственных территорий, выдвинутых на значительные глубины в море, с использованием галечного пляжа в комплексе с пляжеудерживающими сооружениями [4].

В качестве продольного защитного сооружения, препятствующего выносу пляжеобразующего материала на глубину, была предложена конструкция в виде укрепительной стены с волноломом-козырьком, представляющим собой подводный выступ, устанавливаемый на внешней границе выдвигаемой территории. Схема сооружения представлена на рисунке 1.

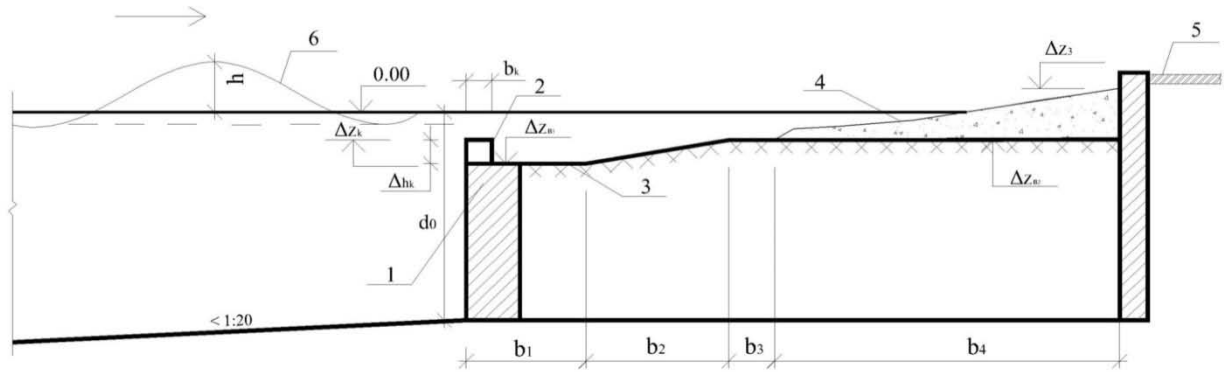


Рис. 1. Схема сооружения, предлагаемого для удержания галечного пляжа на искусственной территории

Основными конструктивными элементами рассматриваемого сооружения являются подводная укрепительная стена 1, волнолом-козырек 2, укрепленное дно 3, галечный пляж 4. Верхняя отметка волнолома-козырька заглублена до отметки  $\Delta z_k$ ; верхняя отметка подводной стенки и нижняя отметка укрепленного дна приняты равными  $\Delta z_{b1} = -h$ ; основание галечного пляжа находится на отметке  $\Delta z_{b2}$ .

Экспериментальные исследования методом гидравлического моделирования проводились в волновом лотке в достаточно широком диапазоне изменения измеряемых параметров: высота волн изменялась от 2 до 6 м; период  $T=6\div 9$ с; высота волнолома-козырька от 1 м до 3 м. Средняя крупность наносов была постоянной и равнялась  $d_{50\%} = 30,0$  мм

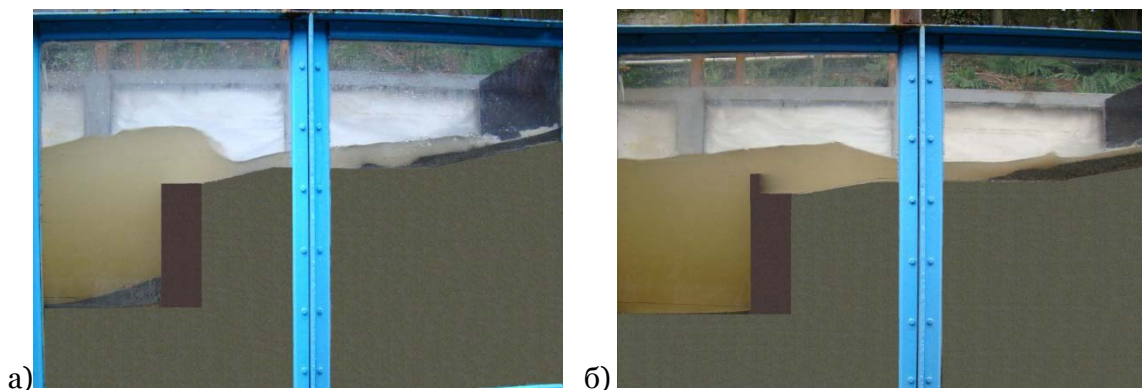


Рис. 2. Воздействие штормового волнения на сооружение в волновом лотке:  
а) без волнолома-козырька; б) с волноломом-козырьком

По итогам исследований было выявлено, что, чем меньше заглубление волнолома-козырька, тем выше его эффективность: волнолом-козырек с заглублением 1 м (высотой 3 м) обеспечил 100%, 2 м – 95%, 3 м (высотой 1 м) – 70% удержание отсыпанного пляжевого материала. Однако при уменьшении заглубления волнолома-козырька увеличивается высота нагонного уровня за ним, что при сильном волнении ( $H = 6$  м) приводит к формированию течений с высокими скоростями в сторону моря в зоне разрывов между массивами волнолома и выносу пляжевого материала на большие глубины [5]. По результатам проведенных исследований принято, что оптимальным для сохранения пляжевой полосы является волнолом-козырек с заглублением  $\Delta h = 2$  м. Под действием волнения наблюдалось незначительное оттягивания пляжевого материала (при высоте волны  $H = 6$  м), кроме того, крутизна подводного склона во всех экспериментах при наличии козырька увеличивалась, а вместе с этим увеличивалась и ширина пляжа.

Эффективность волнолома-козырька также была доказана при проведении исследований на пространственной модели. В волновом бассейне исследовалась возможность защиты искусственной территории, выдвинутой на глубину 4-5 м. Волнолом-

козырек располагался на расстоянии 80 м от основания пляжа, с заглублением гребня – 2 м. При таком расположении пляж остается устойчивым, наносы равномерно распределяются по ширине, отсутствует вынос пляжевого материала в акваторию [5].



Рис. 3. Общий вид сооружений после проведения эксперимента в волновом бассейне а) с непроницаемым волноломом-козырьком, б) с проницаемым волноломом-козырьком

### Математическая модель

Уравнение сохранения массы и количества движения, описывающие трансформацию относительно длинных волн в мелководной акватории с произвольным по направлению движения волн рельефом дна с учетом нелинейных и дисперсионных эффектов, в безразмерных переменных имеют следующий вид[6, 7]:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} + \sqrt{\frac{g}{d_0}} T_0 f_w \frac{|U|U}{d+\eta} = \frac{d_0}{3gT_0^2} \left[ d^2 \left( \frac{\partial^2 U}{\partial t \partial x^2} \right) + \frac{d}{2} \left( 2 \frac{\partial d}{\partial x} \frac{\partial^2 U}{\partial t \partial x} + \frac{\partial^2 d}{\partial x^2} \frac{\partial U}{\partial t} \right) \right], \quad (1)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\eta + d)U = 0 \quad (2)$$

Здесь  $x$  – горизонтальная ось, совпадающая с линией свободной поверхности в невозмущенном состоянии, направление оси  $x$  совпадает с направлением движения волн;  $t$  – время;  $d$  – глубина;  $\eta$  – отклонение свободной поверхности от невозмущенного уровня;  $U$  – осредненная по глубине скорость жидкости;  $d_0$  – характерная глубина;  $T_0$  – характерный период волн;  $\sqrt{gd_0 \cdot T_0}$  – характерная длина;  $f_w$  – коэффициент гидравлического сопротивления.

Известно, что нелинейно-дисперсионная модель не описывает обрушения волн. Поэтому для расчетов в прибойной зоне требуется модификация модели. В математической модели эффект обрушения учитывается путем введения в правую часть уравнения (1) дополнительного члена

$$\sqrt{\frac{g}{d_0}} T_0 \frac{k(\sqrt{d+\eta}-|U|)^2 \cdot U}{(d+\eta)|U|} \quad (3)$$

В расчетах принято  $k = 0$  при  $\eta < 0,4d$ ,  $k = 0,25$  при  $\eta > 0,4d$ . Коэффициент гидравлического сопротивления  $f_w$  определялся по зависимости Маннинга.

Для решения системы уравнений (1), (2) необходимо задать начальные и граничные условия. Если конечный створ расчетной области непроницаем, можем записать: при  $t=0$ :  $U(x)=0$ ,  $\eta=0$ ; при  $x=0$ :  $\eta=f(t)=a \sin \omega t$ ; при  $x=M$ :  $U=0$ , здесь  $a$  – амплитуда волн,  $\omega$  – угловая частота.

Расчеты выполнялись численно методом конечных разностей по двуслойной явно- неявной схеме с итерациями по нелинейности. Шаг по времени  $t$  и шаг по пространственной координате  $\Delta x$  задавались из условий обеспечения устойчивости и гидродинамической аппроксимации схемы:  $\Delta t < \sigma$ ;  $\Delta x < \sqrt{\sigma}$ , где  $\sigma = \frac{d_0}{3gT_0^2}$ .

По вышеизложенной математической модели были проведены расчеты трансформации волн, как без волнолома-козырька, так и при его наличии. Результаты расчета в случае с волноломом-козырьком при  $h=3,9$  м,  $T_0=9$  с,  $d_0=16$  м,  $\Delta z_k=-2$  м,  $\Delta z_{b1}=-4$  м,  $\Delta z_{b2}=-2$  м,  $\Delta z_{b3}=1,3$  м,  $b_1=6$  м,  $b_2=8$  м,  $b_3=3$  м,  $b_4=29$  м (рис. 1) в момент наката волны иллюстрируются на рис. 4а, а без волнолома-козырька – на рисунке 4б.

Казалось бы, влияние не очень заметное, однако достаточное, чтобы изменить направленность процесса и, как показали экспериментальные исследования, обеспечить устойчивость галечного пляжа.

По-видимому, существенное влияние оказывает и турбулизация потока за волноломом-козырьком после прохождения гребней волны, в результате чего увеличивается перенос наносов к берегу при накате волн.

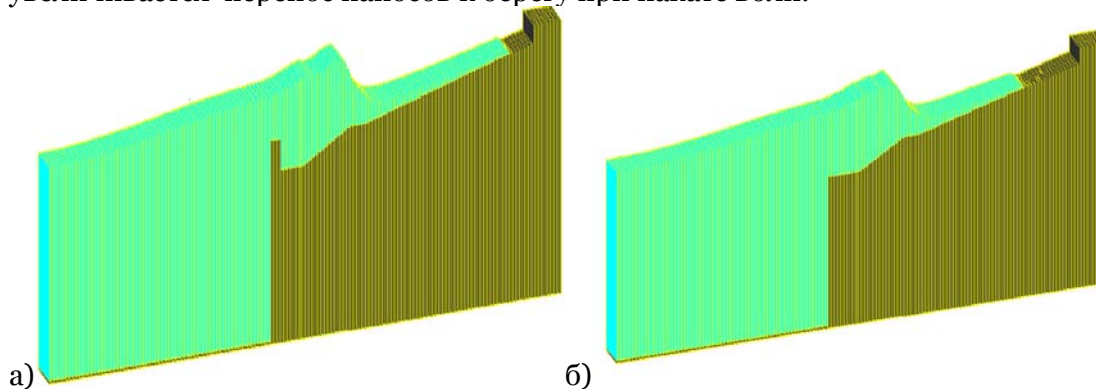


Рис. 4. Результаты численного моделирования трансформации волн

**Заключение.** На основе анализа полученных результатов можно сделать вывод, что искусственная выдвинутая в море территория может быть эффективно защищена рекреационным галечным пляжем в комплексе с волноломом-козырьком. Ширина гидротехнического сооружения может быть принята равной  $B \geq 0,4\lambda$ , где  $\lambda$  – средняя длина расчетной волны, заглубление волнолома-козырька  $\Delta z_k = \frac{1}{2}h$ , где  $h$  – высота волны 13% обеспеченности в расчетном шторме, ширина надводной и подводной части галечного пляжа  $b_{пл} \geq 0,25\lambda$ , крупность галечных наносов принята  $d = 30 \div 50$  мм.

Эффективность волнолома-козырька также была доказана при проведении исследований на пространственной модели. В волновом бассейне исследовалась возможность защиты искусственной территории, выдвинутой на глубину  $4 \div 5$  м. Волнолом-козырек располагался на расстоянии 80 м от основания пляжа, с заглублением гребня – 2 м. Получено, что при таком расположении пляж остается устойчивым, наносы равномерно распределяются по ширине, отсутствует вынос пляжевого материала в акваторию.

Также необходимо отметить качественное соответствие теоретических и экспериментальных исследований. Волнолом-козырек определенным образом влияет на форму гребня волны, кроме того, примерно на 10% уменьшает отрицательные скорости течения при откате волны, которые переносят пляжевый материал на подводный склон. При этом высоту волны волнолом-козырек уменьшает незначительно.

#### Примечания:

1. Volkova E.S. Experimental research on beach creation on artificial territories // MEDCOAST 2009. THE NINTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE MEDITERRANEAN COASTAL ENVIRONMENT, 2009. 1121 p.

2. Леонтьев И.О. Прибрежная морфодинамика и прогноз развития берега // Мат. Междунар. конф. «Динамика прибрежной зоны бесприливных морей», г. Балтийск. Калининград: Изд. «Терра Балтика», 2008. С. 96–103.

3. Волкова Е.С. Устройство рекреационных пляжей на искусственных территориях // «Исследование взаимодействий техносферных и природных компонентов транспортных природно-технических систем». Научные труды ОАО ЦНИИС. Вып. 243. М.: ОАО ЦНИИС, 2008. С. 87–92.

4. Макаров К.Н., Макарова И.Л., Абакумов О.Л. О влиянии продольных берегозащитных сооружений на динамику берегов // Водные ресурсы. 2003. Том 30. №1.

5. Волкова Е.С. Исследование эффективных берегозащитных сооружений для рекреационных пляжей, выдвинутых в море искусственных территорий // «Транспортное строительство». 2011. №4. С. 12–14.

6. Шахин В.М., Шахина Т.В. Моделирование трансформации волн и течений в прибрежной зоне моря. Океанология. 2000. Т. 40. № 5. С. 653–657.

7. Шахин В.М., Шахина Т.В., Волкова Е.С., Радионов А.Е. Защита искусственных территорий от штормового волнения // Труды 2-й Междунар. конф. «Создание и использование земельных участков на берегах и акватории водоемов», г. Новосибирск. 2011. С. 368–370.

UDC 627.522

### **New Method of Man-made Territories Protection from Storm Waves**

Ekaterina S. Volkova

Branch of public joint stock company «Research institute of transport construction» «Research center «Sea coast»

Russia, Y.Fabritsiusa st.1, Sochi city, Krasnodar region, 354002

Sochi State University, Russia

Sovetskayastreet 26a, Sochi city, Krasnodar region, 354000

Juniorresearch assistant

**Abstract.** New method of man-made territories, protruding deep into the sea protection, using shingle beach together with groin facilities was developed on the basis of experimental research, conducted in wave flume and wave tank. Construction in the form of protective wall with breakwater-canopy, representing underwater projection, installed at the outer perimeter of the prolonged territory was offered as a longitudinal protective facility, preventing beach material from drifting away. The results of numerical simulation of wave transformation when interacting with underwater beach maintenance facility (breakwater-canopy).

**Keywords:** man-made territories; recreational beach; man-made forelands; underwater breakwater-canopy; beach maintenance facilities.