

Физическое моделирование влияния приливных колебаний уровня моря на волногасящие галечные пляжи

В. А. Петров*, Г. В. Тлявлина, Н. А. Ярославцев

Научно-исследовательский центр «Морские берега» (ОП АО ЦНИИТС), Сочи, Россия
*e-mail: demmi8@mail.ru

Аннотация

Проведение берегозащитных мероприятий на побережье арктических и дальневосточных морей с приливо-отливными явлениями определяет повышенные требования к обоснованию проектных решений при разработке схем инженерной защиты берегов. Для защиты берегов от воздействия волн наиболее эффективными являются волногасящие сооружения, включая и волногасящие пляжи из крупнообломочного материала. Особенно это актуально для северных морей, на берегах которых распространена вечная мерзлота. При расчете таких пляжей необходимо учитывать влияние периодических колебаний уровня моря на формируемый профиль. Исследования влияния приливо-отливных колебаний уровня моря на профиль волногасящего галечного пляжа в природных условиях сопряжены с определенными сложностями. Наиболее перспективными являются эксперименты, выполняемые на гидравлических моделях в волновых бассейнах и лотках. Цель работы – исследование в волновом лотке влияния приливо-отливных циклов на профиль волногасящего галечного пляжа. Получено, что во время прилива при воздействии волн на исходную отсыпку формируется профиль пляжа, подобный профилю, вырабатываемому при постоянном уровне, соответствующем максимальной фазе прилива. При отливе галечный материал смещается под воздействием волн мористее подводной границы галечного пляжа, сформированного при постоянном уровне воды. Во время прилива смещенный галечный материал не полностью возвращается в верхнюю часть профиля, что приводит к уменьшению ширины надводной части пляжа и снижению его волногасящей эффективности. На основании выполненных исследований на морях с высотой прилива до 3.6 м объем исходной отсыпки пляжеобразующего материала при создании волногасящих галечных пляжей необходимо увеличить на 5 % по сравнению с объемом, рассчитанным для бесприливных морей.

Ключевые слова: волногасящий галечный пляж, гидравлическое моделирование, отлив, прилив, профиль пляжа

Для цитирования: Петров В. А., Тлявлина Г. В., Ярославцев Н. А. Физическое моделирование влияния приливных колебаний уровня моря на волногасящие галечные пляжи // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 3. С. 54–70. doi:10.22449/2413-5577-2022-3-54-70

© Петров В. А., Тлявлина Г. В., Ярославцев Н. А., 2022



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

Physical Modeling of the Effect of Tidal Sea Level Fluctuations on Wave-Absorbing Pebble Beaches

V. A. Petrov*, G. V. Tlyavlina, N. A. Yaroslavtsev

Research center "Sea coast" (branch of JSC TsNIITS), Sochi, Russia

*e-mail: demmi8@mail.ru

Abstract

Implementation of coastal protection measures on the coasts of the Arctic Far Eastern seas with tidal phenomena determines increased requirements for the justification of design solutions when developing schemes for engineering protection of the shores. Wave-absorbing structures, including wave-absorbing beaches consisting of coarse-grained material, are the most effective for protecting coasts from the effects of waves. This is particularly true for northern seas, coasts of which are perpetually frozen. The calculation of such beaches should take into account the effect of periodical sea level fluctuations on the formed profile. Field studies of the effect of tidal sea level fluctuations on the profile of a wave-absorbing pebble beach are associated with certain difficulties. The most promising are experiments performed on hydraulic models in wave pools and flumes. The purpose of the work is to study in a wave flume the effect of tidal cycles on the profile of a wave-absorbing pebble beach. It was found that during high tide, when the initial backfill is exposed to waves, a beach profile is formed similar to the profile generated at a constant level corresponding to the maximum phase of the tide. At low tide, the pebble is displaced by waves seaward of the underwater border of the pebble beach formed at a constant water level. At high tide, the displaced pebble does not completely return to the upper part of the profile, which leads to a decrease in the width of the surface part of the beach and that in its wave damping efficiency. Based on studies performed in seas with a tide height of up to 3.6 m, when creating wave-absorbing pebble beaches, the volume of the initial backfill of beach-forming material must be increased by 5 % compared to the volume calculated for tidal seas.

Keywords: beach profile, high tide, hydraulic modeling, low tide, wave quenching pebble beach

For citation: Petrov, V.A., Tlyavlina, N.A. and Yaroslavtsev, N.A., 2022. Physical Modeling of the Effect of Tidal Sea Level Fluctuations on Wave-Absorbing Pebble Beaches. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 54–70. doi:10.22449/2413-5577-2022-3-54-70

Введение

Освоение ресурсов северных морей часто сопряжено с проведением берегозащитных мероприятий на их берегах. Относительно низкие прибрежные территории, сложенные в основном легко размываемым грунтом и многолетнемерзлыми грунтами, и приливно-отливные явления обуславливают сложные природные условия арктических побережий. В связи с этим к обоснованию проектных решений при разработке схем инженерной защиты берегов предъявляются повышенные требования. Разрабатываемые мероприятия должны в полной мере отвечать экологическим и природоохранным требованиям.

В этих неблагоприятных природных условиях наиболее перспективным направлением при выборе берегозащитных конструкций является использование волногасящих проницаемых сооружений, таких как бермы из камня или фасонных массивов, а также создание волногасящих пляжей, отсыпаемых

из крупнообломочного материала – гальки или щебня. В данной работе под волногасящим пляжем понимается пляж, на котором происходит полное гашение волн расчетного шторма при уровне моря 1 %-ной обеспеченности.

Параметры формируемого под воздействием волн профиля волногасящего галечного пляжа являются основой для расчета необходимых объемов отсыпаемого материала. В основе метода определения объемов исходной отсыпки пляжеобразующего материала лежит профиль относительного динамического равновесия. Данный метод разработан для бесприливных морей ¹⁾, где колебания уровня моря незначительны [1]. На приливных морях значительные по амплитуде колебания уровня моря должны сказываться на формируемом профиле пляжа. Проведение в природных условиях натурных исследований динамики профилей волногасящего галечного пляжа, осложненной влиянием периодических приливо-отливных колебаний уровня моря, представляет определенные сложности, что не позволяет выявить особенности таких профилей и их отличия от профилей, сформированных при постоянном уровне моря. Одним из наиболее перспективных методов таких исследований является гидравлическое моделирование в волновых бассейнах и лотках.

Целью настоящей работы является выявление отличий профилей волногасящего галечного пляжа, формируемых волнением в условиях приливо-отливных колебаний уровня моря, от профилей, сформированных при постоянном уровне воды.

Материалы и методы исследования

В опубликованных источниках не обнаружены сведения об устойчивости волногасящего галечного пляжа, созданного для защиты размываемого берега от воздействия волн в условиях приливо-отливных явлений, и о сформированных из материала исходной отсыпки пляжеобразующего материала профилях такого пляжа. В связи с этим в волновом лотке Научно-исследовательского центра «Морские берега», расположенного в г. Сочи, исследовано формирование профилей волногасящего галечного пляжа при приливо-отливных колебаниях уровня моря и проведено их сравнение с профилями пляжа, выработанными при постоянном уровне воды.

Влияние приливо-отливных явлений на формирование профиля волногасящего галечного пляжа оценивалось по результатам лабораторных экспериментальных исследований в сравнении с данными, полученными при неизменном уровне воды в волновом лотке, за который принимался уровень воды в максимальную фазу прилива. При этом начальные условия проведения экспериментов и параметры волн оставались неизменными. Исследования динамики профиля волногасящего галечного пляжа, отсыпанного перед береговым уступом для его защиты от воздействия волн, проводились при максимальных параметрах волн, которые могут проявиться при уровне моря в прилив. В начале каждой серии экспериментов выполнялись исследования профиля пляжа, сформированного при неизменном максимальном уровне воды. После чего выполнялись эксперименты по формированию профилей галечного

¹⁾ Смирнова Т. Г., Правдивец Ю. П., Смирнов Г. Н. Берегозащитные сооружения. М. : Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2002. 302 с.

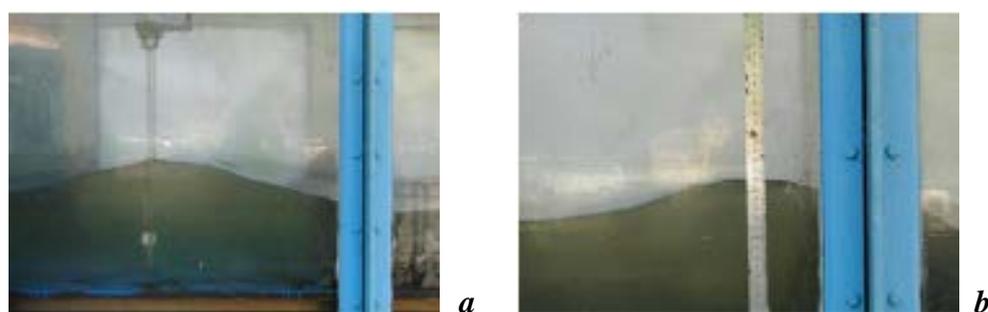
пляжа при приливо-отливных циклах с разными начальными условиями воздействия волн на исходную отсыпку пляжеобразующего материала. Сравнение результатов экспериментальных исследований при неизменном и переменном уровнях воды позволило оценить влияние приливных явлений на формирование профиля волногасящего галечного пляжа.

В качестве основного критерия моделирования ветровых волн ²⁾ использовался критерий Фруда [2]. Согласно этому критерию, размеры сооружений на модели, глубины и элементы волн принимаются в линейном масштабе. Время воздействия волнения на исследуемую модель пляжа определено с учетом масштаба времени, равного квадратному корню из выбранного масштаба модели. При этом продолжительность прилива и отлива в натуре принималось равным 12 часам. На подходах к пляжу воспроизводились регулярные волны. Масштаб модели подводного склона и гидротехнических сооружений выбирался исходя из размеров воспроизводимого дна и элементов волн. Дно модели необходимо изготавливать жестким, при волнении на ней должно размещаться не менее пяти длин волн.

Измерение высот волн на модели производили емкостными волнографами ДУЕ-1 с обработкой результатов измерений на компьютере, а также контролировали по линейке (рис. 1).

Предварительно выполняли тарировку датчиков высот волн при их ступенчатом погружении на определенную глубину. Запись волнения в бассейне сопровождалась фотографированием и видеосъемкой. Длину волн фиксировали съемкой вблизи волнографов на фоне сетки, нанесенной на боковую стену лотка.

Согласно теории подобия, изучать на гидравлической модели процесс волнового воздействия на сооружения следует при обеспечении геометрического подобия модели натурному объекту, подобия волнового режима, подобия поверхностных и объемных сил, т. е. необходимо обеспечить равенство всех определяющих критериев. В общем случае выполнить все эти условия



Р и с . 1 . Определение высот волн на модели емкостными волнографами ДУЕ (а) и по линейке (b)

Fig. 1. Determination of wave heights on the model using capacitive wave recorders DUE (a) and a ruler (b)

²⁾ Users guide to physical modelling and experimentation: experience of the HYDRALAB network / J. Kirkegaard [et al.]. London : CRC Press, 2011. 272 p. <https://doi.org/10.1201/b11335>

практически невозможно. В частности, если на модели используется та же жидкость, что и в натуральных условиях, то нельзя одновременно обеспечить подобие по числам Фруда (Fr) и Рейнольдса (Re). Однако для целого ряда задач, имеющих важное практическое значение, не требуется подобие по обоим параметрам [3].

Так, при исключительно волновом движении или воздействии необрушающихся волн на гидротехнические сооружения, когда влияние вязкости мало, динамическое подобие модельных и натуральных процессов определяется равенством чисел Фруда. При исследовании волн на поверхности несжимаемой жидкости критерий Фруда может быть записан в виде

$$Fr = \frac{h}{gT^2}, \quad (1)$$

где h – высота волн; g – ускорение свободного падения; T – период волн.

Ограничения по параметрам волн обусловлены необходимостью исключения заметного влияния молекулярной вязкости и капиллярных эффектов. Капиллярность (или поверхностное натяжение) можно не учитывать, если длина волн на модели λ_m больше 20 см [4]

$$\lambda_m > 20 \text{ см.} \quad (2)$$

Чтобы пренебречь внутренней диссипацией энергии волн вследствие вязкости, должно быть выполнено условие [5]

$$\lambda_m > 400\sqrt{\nu \cdot T}, \quad (3)$$

где ν – кинематическая вязкость жидкости.

Другой класс задач о движении жидкости со свободной поверхностью включает случаи, когда трение в жидкости существенно, но влиянием молекулярной вязкости можно пренебречь. Примерами такого рода являются течения с сильно развитой турбулентностью при больших числах Рейнольдса. К таким задачам можно отнести задачи о взаимодействии волн с обтекаемыми преградами или проницаемыми сооружениями. Вопрос о моделировании сил сопротивления или сил гидродинамического воздействия в этих случаях сводится к вопросу моделирования формы и массы конструктивных элементов сооружений. Конечно, при этом следует иметь в виду, что существует нижний предел размеров модели, который определяется из условий: течение на модели должно быть турбулентным и автомодельным по числу Рейнольдса [3]. При обтекании тел различной формы эти требования будут выполнены, если

$$Re = \frac{V_m \cdot L_m}{\nu} \geq 500 \div 1000, \quad (4)$$

где V_m – характерная скорость на модели; L_m – характерный размер обтекаемого тела.

При истечении жидкости через отверстия в проницаемых экранах (струи) автомодельность по числу Рейнольдса будет иметь место, если

$$Re = \frac{V_m \cdot \delta_m}{\nu} \geq 100, \quad (5)$$

где δ_m – характерный размер отверстия.

Взаимодействие волн с проницаемой наброской становится независимым от числа Рейнольдса при

$$\text{Re} = \frac{V_m \cdot D_m}{\nu} \geq 1000, \quad (6)$$

где D_m – крупность элементов наброски.

Поскольку на гидравлической модели в волновом бассейне длина волн предполагается более 0.7 м, влияние поверхностного натяжения и молекулярной вязкости жидкости на результаты исследований будет несущественным (см. формулы (2)–(6)). Поэтому можно сделать вывод, что исследуемые процессы на моделях будут динамически подобны натурным. Чтобы обеспечить равенство чисел Фруда (1) на модели и в натуральных условиях, масштаб периода волны будет равен

$$m_t = \frac{T_m}{T_n} = \sqrt{m_l},$$

где индекс « m » относится к модели, а « n » – к натурным величинам.

Масштаб массы конструктивных элементов сооружений принят равным

$$m_G = \frac{G_m}{G_n} = m_l^3.$$

При выполнении исследований с галечными пляжами учитывалось, что эксперименты необходимо проводить при соблюдении геометрического подобия модели и наносов натурному участку берега и подобия модельного волнового режима натурному. При этом плотность наносов пляжного материала на модели и в натуральных условиях должна быть одинаковой, а процессы, протекающие в прибойной зоне галечных пляжей, моделируются достоверно при использовании в экспериментах наносов со средней крупностью не менее 0.5 мм [6].

Экспериментальные исследования выполнялись в волновом лотке длиной 20 м, шириной 0.6 м, с высотой стенок 1 м. Волны генерировались щитовым волнопродуктором, установленным в приямке у торцевой стенки.

Эксперименты проводились в масштабе 1:30. Для выбранного масштаба фанерный подводный береговой склон длиной 7.3 м (219 м), имитирующий осушку перед береговым откосом во время отлива, был установлен с уклоном 0.005, что в природных условиях соответствовало среднему значению уклонов дна в пределах зоны осушки. Здесь и далее по тексту в скобках приводятся значения, соответствующие натурным данным. Сопряжение модели берегового склона с дном лотка также выполнено из фанеры длиной 2.44 м (73 м), установленной с уклоном 0.082 (рис. 2). Для соблюдения шероховатости дна на фанеру наносился слой песка. Глубина воды перед береговым уступом, равная 12.0 см (3.60 м), соответствовала максимальному уровню моря в прилив и во всех опытах оставалась неизменной. При такой длине мелководной зоны и глубины у берегового уступа высота волн, воздействующих на пляж, составляла 5.3 см (1.60 м). Средний период для волн такой высоты был равен 1.1 с (6.0 с) [7]. Непрерывное изменение уровня воды в лотке, имитирующее фазы прилива и отлива с учетом времени их действия (по масштабному

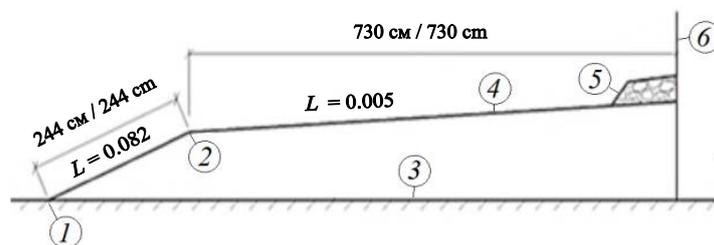


Рис. 2. Схема модели при исследованиях в волновом лотке динамики профиля галечного пляжа в приливо-отливных условиях: 1 – сопряжение осушки с дном установки; 2 – точка перегиба профиля дна; 3 – дно экспериментальной установки; 4 – дно осушки; 5 – исследуемый галечный пляж; 6 – береговой уступ

Fig. 2. Scheme of the model during wave flume studies of the profile dynamics of a pebble beach at tide: 1 – adjunction of the drying height with the test unit bottom; 2 – knee of the bottom profile; 3 – test unit bottom; 4 – drying height bottom; 5 – pebble beach under study; 6 – beach scarp

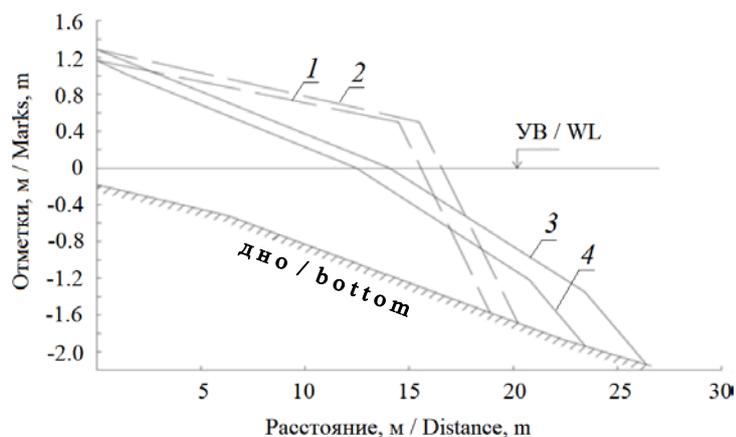
коэффициенту времени) и амплитуды (высоты прилива), подбирались открытием и закрытием задвижек поступления и сбрасывания воды.

Эксперименты были выполнены для двух крупностей пляжеобразующего материала с медианными диаметрами $d_{50\%} = 0.74$ мм (22.2 мм) и $d_{50\%} = 1.19$ мм (35.7 мм). Для этих крупностей наносов при выбранном волновом режиме в натуральных условиях рассчитаны профили относительного динамического равновесия, по которым с учетом уплотнения наносов при волновой переработке определены строительные профили исходной отсыпки, представленные на рис. 3. Исходя из геометрического масштаба, строительный профиль исходной отсыпки воспроизводился на модели и оставался неизменным для соответствующей крупности пляжеобразующего материала в процессе экспериментов (рис. 4).

Результаты исследований и их обсуждение

В первой серии экспериментов исследования в волновом лотке проведены с пляжеобразующим материалом крупностью $d_{50\%} = 0.74$ мм (22.2 мм). Вначале при неизменном в процессе опыта уровне воды, соответствующем максимальной его отметке в фазу прилива, при воздействии волн на исходную отсыпку пляжеобразующего материала у берегового уступа, был сформирован профиль галечного пляжа (рис. 5, профиль 2). С этим профилем в дальнейших исследованиях сравнивались профили, сформированные при приливо-отливных циклах.

В процессе проведенного эксперимента при неизменном уровне воды в лотке под воздействием волн, обрушающихся на исходной отсырке пляжеобразующего материала, наблюдалось смещение наносов к зоне обрушения с формированием профиля пляжа с крутой подводной частью, что характерно для природных галечных пляжей [8]. В конце опыта ширина надводного пляжа составила 24.0 см (7.2 м), и в верхней его части отсутствовал штормовой вал.



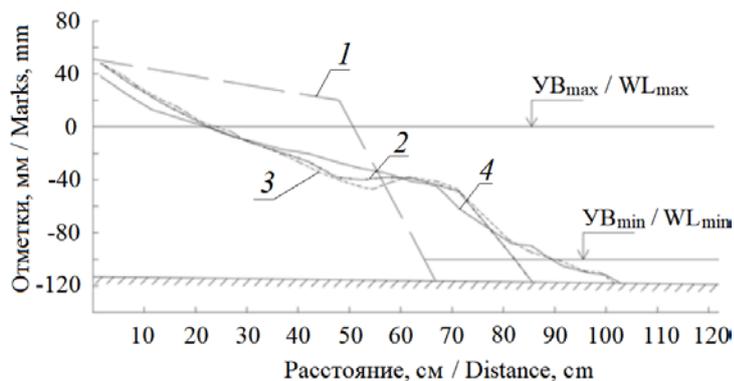
Р и с . 3 . Расчетные профили относительного динамического равновесия волногасящих галечных пляжей и строительные профили исходной отсыпки пляжеобразующего материала: 1 – строительный профиль для $d_{50\%} = 0.022$ м; 2 – строительный профиль для $d_{50\%} = 0.036$ м; 3 – профиль относительного динамического равновесия для $d_{50\%} = 0.022$ м; 4 – профиль относительного динамического равновесия для $d_{50\%} = 0.036$ м. УВ – уровень вод

Fig . 3 . Calculated profiles of the relative dynamic equilibrium of wave-absorbing pebble beaches and construction profiles of the initial backfilling of beach-forming material: 1 – construction profile for $d_{50\%} = 0.022$ m; 2 – construction profile for $d_{50\%} = 0.036$ m; 3 – relative dynamic equilibrium profile for $d_{50\%} = 0.022$ m; 4 – relative dynamic equilibrium profile for $d_{50\%} = 0.036$ m. WL – water level



Р и с . 4 . Модель исходной отсыпки пляжеобразующего материала. Горизонтальной линией показан уровень воды при приливе

Fig . 4 . Model of the initial backfill of the beach-forming material. The horizontal line shows the water level at high tide



Р и с . 5 . Деформация профиля пляжа, сложенного наносами крупностью $d_{50\%} = 0.74$ мм, выработанный при постоянном максимальном уровне при приливно-отливном цикле: 1 – профиль исходной отсыпки; 2 – профиль, выработанный при постоянном максимальном уровне воды; 3 – профиль, выработанный в фазу отлива; 4 – профиль, выработанный в фазу прилива

Fig. 5. Deformation of the beach profile, composed of sediments with a size of $d_{50\%} = 0.74$ mm, worked out at a constant maximum level during the tidal cycle; 1 – profile of the initial backfill; 2 – profile developed at a constant maximum water level; 3 – profile developed during the low tide phase; 4 – profile developed during the high tide phase

В следующем эксперименте при непрерывном уменьшении уровня воды в лотке, имитирующем фазу отлива, под воздействием волн на сформированный при максимальном уровне воды профиль наблюдалось смещение пляжного материала вниз по склону мористее подошвы пляжа, выработанной при максимальном уровне. В результате такого смещения сформировался более пологий профиль подводной части галечного пляжа. Одновременно незначительная часть наносов была перемещена в верхнюю часть профиля, где зафиксировано повышение отметок пляжа. Общее выдвигание подводной границы пляжа относительно профиля, выработанного при неизменном максимальном уровне воды, составило 16.1 см (4.83 м). В отличие от предыдущего эксперимента, при понижении уровня воды (фаза отлива) в подводной части пляжа формировались валы. При непрерывном уменьшении уровня воды верхняя часть профиля, выработанного при постоянном максимальном уровне, мало изменилась (рис. 5, профиль 3).

В последующем опыте, воссоздающем условия прилива, при воздействии волн на профиль, выработанный при отливе (рис. 5, профиль 3), не наблюдалось размыва выдвинутой в отлив его подводной части и смещения в сторону берега подводной границы пляжа (рис. 5, профиль 4). Пляжный материал, который при отливе был смещен вниз, не вернулся назад при приливе. В процессе эксперимента в условиях повышения уровня воды наблюдалось формирование на промежуточных уровнях воды надводных валов, которые при дальнейшем повышении уровня размывались. В конце эксперимента

с повышением уровня воды (при приливе) зафиксировано повышение отметок профиля галечного пляжа мористее уреза (рис. 5, профиль 4). При этом отмечалось понижение отметок сформированной при имитации отлива надводной части пляжа, обусловленное смещением наносов в подводную часть профиля. Процессы, протекающие на галечном пляже при приливе, привели к некоторому сглаживанию профиля пляжа.

В процессе одного приливно-отливного цикла ширина надводной части пляжа, выработанная при постоянном максимальном уровне, изменилась незначительно: 22.4 см (6.7 м) при постоянном максимальном уровне, 24.0 см (7.2 м) при отливе и 22.0 см (6.6 м) при приливе. При отливе подводная граница, по сравнению с галечным пляжем, выработанным при неизменном в процессе опыта максимальном уровне, выдвинулась в море на 16.1 см (4.83 м).

Как следует из проведенных экспериментов, приливо-отливный фактор оказывает влияние на формирование профиля галечного пляжа, в результате чего он отличается от профиля, выработанного волнением в исходной отсыпке пляжеобразующего материала при постоянном максимальном уровне. При отливе наблюдается размыв надводной части пляжа и смещение пляжного материала в подводную его часть, что приводит к выдвиганию в сторону моря подводной границы пляжа. При приливе материал, смещенный при отливе вниз, не возвращается в верхнюю часть профиля. Подводная часть профиля пляжа, сформированного при приливо-отливном цикле, оказалась более пологой, по сравнению с профилем при постоянном максимальном уровне воды. Высота верхней надводной части пляжа, выработанной при приливе, оказалась меньше, чем на профиле при отливе.

Последующие эксперименты с воздействием волн непосредственно на исходную отсыпку пляжеобразующего материала с $d_{50\%} = 0.74$ мм при разном сочетании фаз приливов и отливов в целом подтвердили полученные выше результаты, описывающие их влияние на формирование профиля пляжа, сложенного крупнообломочным материалом.

При воздействии волн на исходную отсыпку пляжеобразующего материала в сочетании с непрерывным подъемом уровня воды (прилив) отмечалось смещение пляжного материала в сторону моря, в результате чего подводная граница сформированного пляжа выдвинулась по сравнению с положением исходной отсыпки на 19.5 см (5.85 м). Профиль пляжа, выработанный при воздействии волн на исходную отсыпку пляжеобразующего материала, при приливе (рис. 6, профиль 2) мало чем отличался от профиля, полученного при неизменном максимальном уровне (рис. 5, профиль 2).

При воздействии волн при отливе на профиль пляжа, сформированного из материала исходной отсыпки при приливе (рис. 6, профиль 2), как и в предыдущих экспериментах, подошва (подводная граница) галечного пляжа выдвинулась на 12.0 см (3.6 м) (рис. 6, профиль 3), при этом ширина надводной части пляжа сократилась с 25.5 (7.65 м) до 24.0 см (7.20 м). Полученные результаты близки к ранее полученным данным.

При неоднократном воздействии на исходную отсыпку пляжеобразующего материала волн в отлив сформировались профили пляжа, представленные

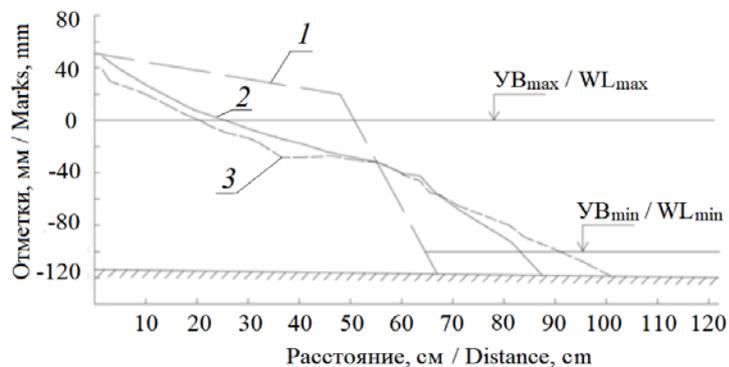


Рис. 6. Профили пляжа, сформированные в фазу прилива при воздействии волн на исходную отсыпку пляжеобразующего материала крупностью $d_{50\%} = 0.74$ мм (22.2 мм): 1 – профиль исходной отсыпки; 2 – профиль пляжа, выработанный в исходной отсыпке пляжеобразующего материала в фазу прилива; 3 – профиль пляжа, сформированный в фазу отлива при воздействии волн на профиль, выработанный при приливе

Fig. 6. Beach profiles formed during the high tide phase under the action of waves on the initial backfill of beach-forming material with a particle size of $d_{50\%} = 0.74$ mm (22.2 mm): 1 – profile of the initial backfill; 2 – beach profile developed in the initial backfill of beach-forming material during the high tide phase; 3 – beach profile formed in the low tide phase under the influence of waves on the profile developed at high tide

на рис. 7. На рис. 8 показаны осредненные профили, выработанные волнами при отливе при их воздействии на профиль, сформированный из материала исходной отсыпки при приливе (рис. 6, профиль 2) и при их воздействии на исходную отсыпку (строительный профиль) (рис. 7) пляжеобразующего материала крупностью $d_{50\%} = 0.74$ мм (22.2 мм). Как следует из полученных результатов, оттягивание пляжного крупнообломочного материала при разных начальных условиях проведения экспериментов происходило на одну и ту же глубину.

Во второй серии экспериментов исследовалось влияние приливо-отливного цикла на формирование профиля волногасящего галечного пляжа, сложенного наносами крупностью $d_{50\%} = 1.19$ мм (35.7 мм). Параметры волн остались такими же, как и в предыдущей серии экспериментов с пляжеобразующим материалом крупностью $d_{50\%} = 0.74$ мм (22.2 мм): высота волн 5.3 м (1.60 м), период 1.1 с (6.0 с). Профили пляжа, выработанные волнами в сочетании с приливо-отливными колебаниями уровня, сравнивались с профилем, сформированным при воздействии волн на исходную отсыпку пляжеобразующего материала крупностью $d_{50\%} = 1.19$ мм (35.7 мм) (см. рис. 3) при постоянном максимальном уровне воды в фазу прилива (рис. 9). Этот профиль представлен на рис. 10 (профиль 2).

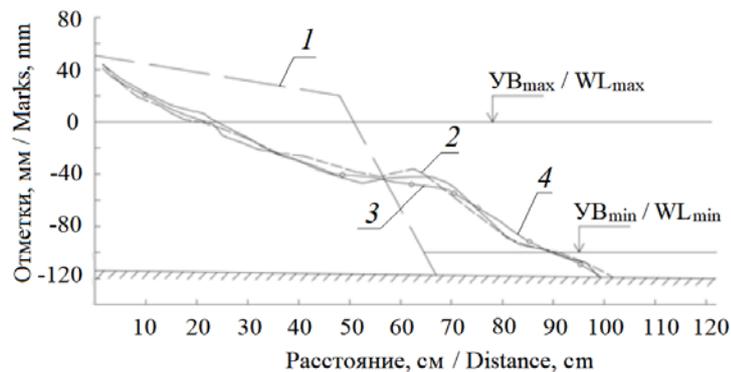


Рис. 7. Профили пляжа, сформированные в фазу отлива при воздействии волн на исходную отсыпку материала крупностью $d_{50\%} = 0.74$ мм (22.2 мм): 1 – профиль исходной отсыпки; 2–4 – профили пляжа, сформированные в фазу отлива при воздействии волн на исходную отсыпку материала крупностью $d_{50\%} = 0.74$ мм (22.2 мм)

Fig. 7. Beach profiles formed in the low tide phase under the action of waves on the initial filling of material with a particle size of $d_{50\%} = 0.74$ mm (22.2 mm): 1 – profile of the initial backfill; 2–4 – beach profiles formed in the low tide phase under the influence of waves on the initial backfill of material with a particle size of $d_{50\%} = 0.74$ mm (22.2 mm)

При неизменном в процессе опыта уровне воды в лотке под воздействием волн, обрушение которых происходило на подводном продолжении исходной отсыпки пляжеобразующего материала, на модели наблюдалось смещение пляжного материала из ее надводной части в подводную. В зоне обрушения волн формировался профиль пляжа с крутым откосом. В отличие от пляжа, сложенного более мелким материалом (см. рис. 5), надводная его часть заканчивалась штормовым валом. Подошва сформированного пляжа на 11.7 см (3.51 м) выдвинулась в море по сравнению с подводной границей исходной отсыпки. В предыдущей серии экспериментов при более мелком пляжеобразующем материале это выдвижение составляло 16.1 см (5.43 м). Ширина надводной части пляжа, сложенного более крупным материалом, составила 23.6 см (7.05 м), что превысило аналогичную ширину при наносах с меньшей крупностью (22.4 см). Это не противоречит общим представлениям о влиянии крупности пляжного материала на формирование профиля галечного пляжа и свидетельствует о правильном отражении на модели процессов, протекающих в береговой зоне.

В последующих опытах, как и в предыдущей серии экспериментов, исследовалось переформирование профиля пляжа, сложенного наносами крупностью $d_{50\%} = 1.19$ мм (35.7 мм) и выработанного исходным волнением при постоянном уровне воды при последовательном чередовании фаз отлива и прилива.

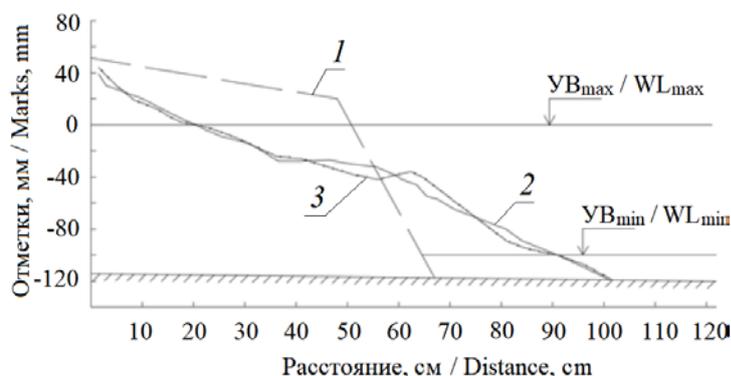
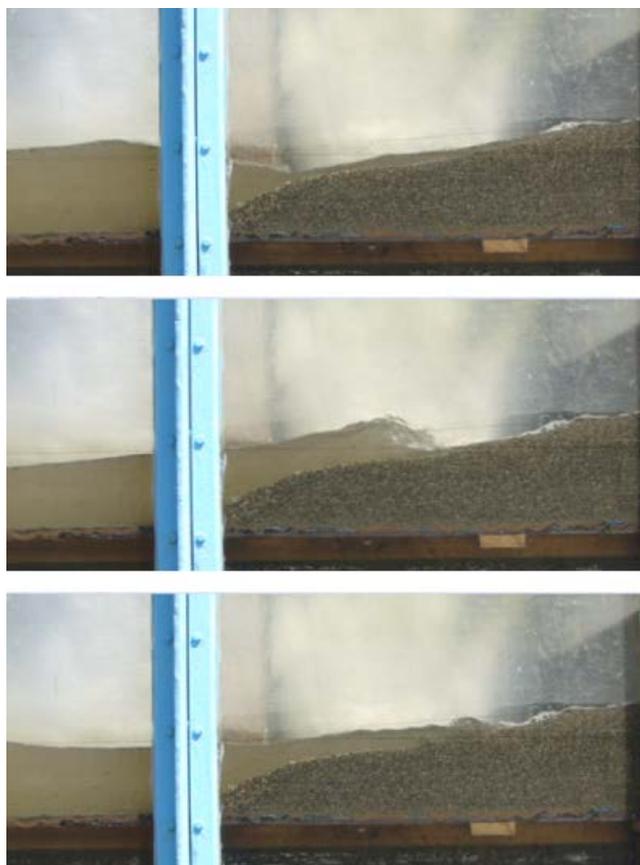


Рис. 8. Профили пляжа, выработанные в фазу отлива при воздействии волн на профиль, сформированный при приливе и при их воздействии на исходную отсыпку пляжеобразующего материала крупностью $d_{50\%} = 0.74$ мм (22.2 мм): 1 – профиль исходной отсыпки; 2 – профиль, выработанный в отлив при воздействии волн на профиль, сформированный при приливе; 3 – профиль, сформированный при отливе при воздействии волн на исходную отсыпку пляжеобразующего материала

Fig. 8. Beach profiles worked out in the low tide phase under the influence of waves on the profile formed at high tide and under their influence on the initial backfilling of the beach-forming material with a particle size of $d_{50\%} = 0.74$ mm (22.2 mm): 1 – profile of the initial dumping; 2 – profile developed at low tide when the waves act on the profile formed at high tide; 3 – profile formed at low tide under the influence of waves on the initial backfill of beach-forming material

В отлив, как и при более мелком пляжном материале, отмечалось переформирование профиля, сформированного при постоянном максимальном уровне воды, и оттягивание наносов на глубину. Подошва галечного пляжа при отливе под воздействием волн по сравнению с исходным профилем выдвинулась в море на 13.5 см (4.05 м). При этом ширина надводной части пляжа в результате перемещения наносов не только вниз, но и вверх по профилю, увеличилась на 6.0 см (1.80 м). Увеличение ширины надводной части пляжа отмечалось и при более мелком материале. Как видно из рис. 10 (профиль 3) при отливе на поверхности подводной части пляжа образовалась серия аккумулятивных валов, но не так ярко выраженных, как при более мелких наносах. Такие же валы, в отличие от пляжа, сложенного более мелкими наносами, сформировались и в надводной части пляжа.

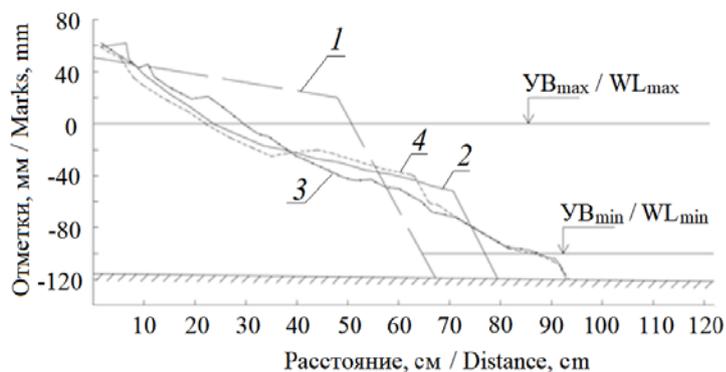
В следующем опыте воссозданы условия прилива, в результате чего под воздействием волн на профиль, выработанный при отливе, наблюдался размыв надводной части пляжа с понижением его высоты и аккумуляция наносов с формированием подводного вала в зоне обрушения волн. При этом, как видно из рис. 10 (профиль 4), положение подводной границы галечного пляжа, выработанное волнами при отливе, осталось без изменения.



Р и с . 9. Воздействие волн на исходную отсыпку пляжеобразующего материала крупностью $d_{50\%} = 1.19$ мм (35.7 мм) при постоянном максимальном уровне

Fig . 9. Impact of waves on the initial backfill of beach-forming material with a size of $d_{50\%} = 1.19$ mm (35.7 mm) at a constant maximum level

Сопоставление данных о формировании профилей галечных пляжей, сложенных наносами крупностью $d_{50\%} = 0.74$ мм (22.2 мм) и $d_{50\%} = 1.19$ мм (35.6 мм), свидетельствует о том, что при отливе пляжный материал, независимо от его крупности, смещается в сторону моря по сравнению с профилем, выработанным при неизменном максимальном уровне воды. Для мелкого материала это смещение составляло 16.2 см (4.86 м), а для крупного – 14.3 см (4.29 м), что обусловлено большей подвижностью мелкого материала. Сравнение профилей пляжа, представленных на рис. 5 и 10, показывает, что при крупном пляжном материале в отлив формируется более крутая подводная часть профиля. В средней подводной части профиля при крупном материале, в отличие от мелкого, во время прилива за счет размыва надводной части пляжа формируются аккумулятивные формы, что приводит к образованию профиля сложной формы в фазу отлива. При мелком материале во время



Р и с . 1 0 . Деформация профиля пляжа, сложенного наносами крупностью $d_{50\%} = 1.19$ мм (35.7 мм), выработанный при постоянном максимальном уровне при приливно-отливном цикле: 1 – профиль исходной отсыпки; 2 – профиль, выработанный при постоянном максимальном уровне воды; 3 – профиль, выработанный в фазу отлива при воздействии волн на профиль, сформированный при постоянном максимальном уровне воды; 4 – профиль, выработанный в фазу прилива, при воздействии волн на профиль, сформированный при отливе

Fig. 10. Deformation of the beach profile composed of sediments with a size of $d_{50\%} = 1.19$ mm (35.7 mm), worked out at a constant maximum level during the tidal cycle. 1 – profile of the initial dumping; 2 – profile developed at a constant maximum water level; 3 – profile developed during the ebb phase when waves act on the profile formed at a constant maximum water level; 4 – profile developed during the high tide phase, when the waves act on the profile formed at low tide

прилива отмечается сглаживание профиля пляжа. По-видимому, это объясняется крупностью пляжеобразующего материала, когда при одинаковых волновых условиях наносодвижущий эффект для крупных наносов, по сравнению с мелкими, снижается.

В последующих опытах, как и при более мелком материале, формировались профили пляжа при волнах, воздействующих непосредственно на исходную отсыпку пляжеобразующего материала с $d_{50\%} = 1.19$ мм (35.7 мм), при разном сочетании фаз приливов и отливов. Проведенные эксперименты подтвердили данные, полученные ранее с мелким материалом, о влиянии чередования приливо-отливных фаз на формирование профиля волногасящего галечного пляжа, сложенного крупнообломочным материалом.

Заклучение

На основе экспериментов, выполненных в волновом лотке, выявлено различие в профилях галечных пляжей, формируемых на бесприливных и приливных морях под воздействием волн. На приливных морях, по сравнению с бесприливными, при формировании профиля волногасящего галечного

пляжа во время отлива происходит оттягивание пляжеобразующего материала на глубины бóльшие, чем на бесприливных. Во время прилива этот материал в полном объеме не возвращается в верхнюю часть профиля волногасящего галечного пляжа. Безвозвратное смещение во время отлива части объема пляжеобразующего материала за пределы расчетного профиля относительного динамического равновесия, рассчитанного для условий бесприливных морей, приводит к уменьшению ширины волногасящего галечного пляжа и снижению его волногасящих свойств. При создании волногасящих галечных пляжей на приливных морях и расчете исходной отсыпки пляжеобразующего материала необходимо учитывать объем безвозвратного смещения крупнообломочных наносов во время отлива в нижнюю часть формируемого профиля.

Согласно выполненным исследованиям, объем пляжеобразующего материала, смещаемого во время отлива на глубину и не возвращаемого назад во время прилива, составляет около 5 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дроботько С. Ю., Петров В. А.* К расчету искусственного волногасящего галечного пляжа // *European Researcher*. 2011. № 5-1(7). С. 601–604. URL: http://www.erjournal.ru/journals_n/1309442455.pdf (дата обращения: 12.09.2022).
2. *Леви И. И.* Моделирование гидравлических явлений. Л. : Энергия, 1967. 236 с.
3. *Дейли Дж. У., Харлеман Д.* Механика жидкости. М. : Энергия, 1971. 480 с.
4. *Кононкова Г. Е., Показеев К. В.* Динамика морских волн. М. : Изд-во МГУ, 1985. 298 с.
5. *Лайтхилл Дж.* Волны в жидкостях. М. : Мир, 1981. 598 с.
6. *Петров В. А., Шахин В. М.* Гидравлическое моделирование динамики галечных пляжей // *Вопросы совершенствования методов берегозащиты*. М. : ЦНИИС, 1990. С. 49–58.
7. *Ланно Д. Д., Стрекалов С. С., Завьялов В. К.* Нагрузки и воздействия ветровых волн на гидротехнические сооружения: Теория. Инженерные методы. Расчеты. Л. : ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 1990. 432 с.
8. *Пешков В. М.* Галечные пляжи неприливных морей (основные проблемы теории и практики). Краснодар, 2005. 444 с.

Поступила 05.04.2022 г.; одобрена после рецензирования 26.04.2022 г.; принята к публикации 6.07.2022 г.; опубликована 26.09.2022 г.

Об авторах:

Петров Виктор Алексеевич, старший научный сотрудник, ОП АО ЦНИИТС «НИЦ «Морские берега» (354002, Россия, Сочи, ул. Яна Фабрициуса, д. 1), кандидат географических наук, **Author ID 71251**, demmi8@mail.ru

Тлявлиная Галина Вячеславовна, заведующая лабораторией моделирования, расчетов и нормирования в гидротехническом строительстве, ОП АО ЦНИИТС «НИЦ «Морские берега» (354002, Россия, Сочи, ул. Яна Фабрициуса, д. 1), кандидат технических наук, **ORCID ID: 0000-0003-4083-9014**, **Author ID: 604630**, **SPIN-код: 5516-9241**, TlyavlinaGV@Tsnii.com

Ярославцев Нестифор Аксентьевич, ведущий научный сотрудник, ОП АО ЦНИИТС «НИЦ «Морские берега» (354002, Россия, Сочи, ул. Яна Фабрициуса, д. 1), кандидат технических наук

About the authors:

Viktor A. Petrov, Senior Research Associate, Research center “Sea coast” (branch of JSC TsNIITS) (1 Jan Fabritsius St., Sochi, 354002, Russian Federation), Ph.D. (Geogr.), **Author ID 71251**, *demmi8@mail.ru*

Galina V. Tlyavlina, Head of the Laboratory of Modeling, Calculations and Rationing in Hydraulic Engineering, Research center “Sea coast” (branch of JSC TsNIITS) (1 Jan Fabritsius St., Sochi, 354002, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0003-4083-9014**, **Author ID: 604630**, **SPIN-код: 5516-9241**, *TlyavlinaGV@Tsnii.com*

Nestifor A. Yaroslavtsev Leading Research Associate, Research center “Sea coast” (branch of JSC TsNIITS) (1 Jan Fabritsius St., Sochi, 354002, Russian Federation), Ph.D. (Technical)

Заявленный вклад авторов:

Петров Виктор Алексеевич – подготовка данных для моделирования, проведение экспериментов в волновом лотке, обработка и анализ полученных результатов, подготовка текста статьи

Тлявлиная Галина Вячеславовна – разработка методики моделирования в волновом лотке, анализ полученных результатов, подготовка графических материалов

Ярославцев Нестифор Аксентьевич – разработка методики моделирования, проведение экспериментов в волновом лотке, анализ полученных результатов, подготовка текста статьи и списка литературы

Contribution of the authors:

Viktor A. Petrov – preparation of data for modeling, conducting experiments in a wave flume, processing and analysis of the results, preparation of the text of the article

Galina V. Tlyavlina – development of a modeling technique in a wave flume, analysis of the results obtained, preparation of graphic materials

Nestifor A. Yaroslavtsev – development of the modeling technique, conducting experiments in a wave flume, analysis of the results obtained, preparation of the text of the article and list of references

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

All the authors have read and approved the final manuscript.