

Д.И.Лазоренко, Л.В.Харитонов, В.В.Фомин

*Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь***РАСЧЕТ ИЗМЕНЕНИЙ БЕРЕГОВОЙ ЛИНИИ ПЛЯЖЕЙ
ЕВПАТОРИЙСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ
ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ**

Для береговой зоны евпаторийского побережья с помощью численной модели *GENESIS* проведены расчеты изменений береговой линии при различных конфигурациях берегозащитных сооружений. Проанализированы изменения положения береговой линии под воздействием ветрового волнения при изменении калибровочных параметров модели и выбраны наиболее подходящие коэффициенты калибровки. Предложены оптимальные конфигурации берегозащитных сооружений для рассмотренных участков.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *Западный Крым, Евпатория, изменения береговой линии, берегозащитные сооружения, транспорт наносов, численное моделирование.*

Береговая зона г.Евпатория является наиболее развитой курортно-рекреационной зоной Западного Крыма. Несколько десятков лет назад мелководный рельеф и широкие песчаные пляжи являлись наиболее привлекательными ресурсами этого региона. Однако с конца XX в. началась стремительная деградация береговой зоны. Только за период с 1986 по 2009 гг. на отдельных участках берега в черте города отступление береговой линии достигло 30 м [1], площадь пляжей сократилась на $\sim 100000 \text{ м}^2$ [2]. Значительное уменьшение количества пляжеобразующего материала снизило привлекательность пляжей региона: на ряде участков песок исчез полностью, открыв глинистый и известняковый бенч, практически повсеместно на поверхности пляжа появились обломки известняка.

Развитие евпаторийского региона как рекреационной зоны не может происходить без сохранения, защиты и возобновления пляжей, что требует детальных исследований процессов в его береговой зоне. Одной из важнейших задач при планировании проведения берегозащитных мероприятий должно являться прогнозирование изменения береговой линии. Для расчета этих изменений обычно используются модели эволюции береговой линии или одномерные модели эволюции берегового склона [3 – 5]. Они базируются на уравнениях сохранения массы, учитывающих интегральный эффект волн и дефицита бюджета наносов. В настоящей работе для расчета изменений береговой линии пляжей евпаторийского побережья используется модель *GENESIS* (*Generalized Model for Simulating Shoreline Change*) [5]. Эта модель наиболее часто применяется при планировании берегозащитных мероприятий, когда необходимо определить общие тенденции изменения береговой линии при проектировании тех или иных защитных сооружений.

Математическая модель. В основу модели *GENESIS* положено уравнение эволюции береговой линии вида [5]

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{1}{(D_B + D_C)} \left(\frac{\partial Q}{\partial x} - q \right) = 0. \quad (1)$$

Здесь $y(x, t)$ – координата береговой линии, D_B – высота бермы, D_C – глубина замыкания, Q – вдольбереговой поток наносов, q – источники и стоки пляжеобразующего материала. Для решения уравнения (1) необходимо задать начальное положение береговой линии и граничные условия.

Вдольбереговой поток наносов в (1) задается выражением

$$Q = h_b^2 C_{gb} \left(a_1 \sin 2\theta_{bs} - a_2 \cos \theta_{bs} \frac{\partial h_b}{\partial x} \right), \quad (2)$$

где h_b – высота волн; C_{gb} – групповая скорость волн; θ_{bs} – угол подхода волн к береговой линии. Индекс b указывает на то, что волновые параметры соответствуют зоне обрушения. В формуле (2) для определения волновых параметров в зоне обрушения используется закон сохранения волновой энергии и соотношения геометрической оптики [5]. При этом входными данными являются высота, период и направление волн за пределами зоны обрушения.

Безразмерные параметры a_1 и a_2 в (2) определяются формулами:

$$a_1 = \frac{K_1}{16(S-1)(1-p)(1,416)^{5/2}}, \quad a_2 = \frac{K_2}{8(S-1)(1-p)\tan\beta(1,416)^{7/2}}. \quad (3)$$

Здесь K_1, K_2 – эмпирические коэффициенты, используемые как калибровочные параметры; $S = \rho_s/\rho$; ρ_s – плотность частиц песка; ρ – плотность морской воды; p – пористость песка; $\tan\beta$ – средний уклон дна от береговой линии до глубины, где поток наносов является существенным.

Первое слагаемое в (2) соответствует формуле *CERC* (*Coastal Engineering Research Center*) и задает вдольбереговой транспорт наносов, возникающий за счет обрушения косо подходящих к берегу волн.

Второе слагаемое в (2) описывает механизм генерации вдольберегового транспорта за счет изменения вдольберегового градиента высот волн. Этот механизм обычно менее значим по сравнению с первым. Однако вблизи структур, где эффекты дифракции вызывают существенные изменения высот волн, его учет может улучшить результат моделирования.

Ширина зоны, в пределах которой происходит транспорт наносов, зависит от интенсивности волнения. Поскольку основные вдольбереговые потоки имеют место в зоне прибоя, то выбирается расстояние приблизительно равное ширине прибойной зоны, которое, главным образом, определяется высотой обрушающихся волн.

Для определения положения точек обрушения волн и глубин оконечностей прибрежных структур в модели используется профиль равновесия вида [6]:

$$D = Ay^{2/3}, \quad (4)$$

где D – глубина (м); A – масштабирующий параметр ($m^{1/3}$), являющийся функцией медианного диаметра частиц песка d_{50} (мм).

Средний уклон дна для профиля равновесия (4) рассчитывается как среднее значение интеграла от $\partial D/\partial y$, взятого в пределах от 0 до y_{LT} . С учетом выше сказанного получаем, что

$$\tan \beta = A(y_{LT})^{-1/3}, \quad (5)$$

где y_{LT} – ширина зоны, простирающейся от берега до глубины D_{LT} . Глубина D_{LT} такова, что при $D \geq D_{LT}$ транспорт наносов вдоль берега можно считать пренебрежимо малым. Таким образом,

$$y_{LT} = (D_{LT}/A)^{3/2} \quad (6)$$

и средний уклон дна

$$\tan \beta = \left(\frac{A^3}{D_{LT}} \right)^{1/2}. \quad (7)$$

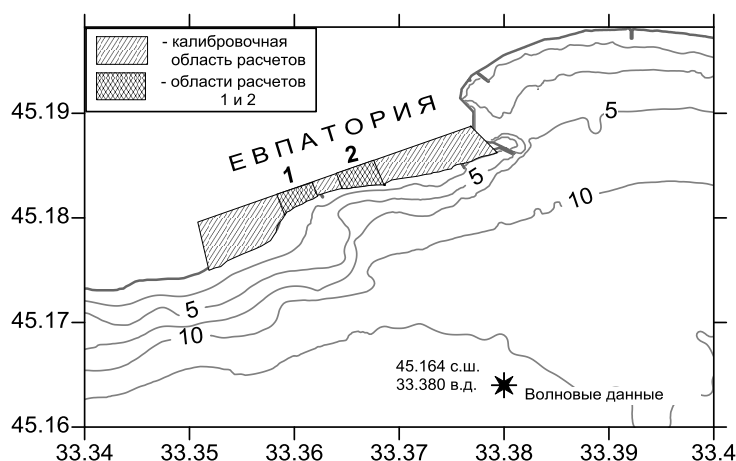
Величина D_{LT} в модели оценивается эмпирической формулой

$$D_{LT} = 2,28 \cdot h_E - 68,5 \frac{h_E^2}{gT_E^2}, \quad (8)$$

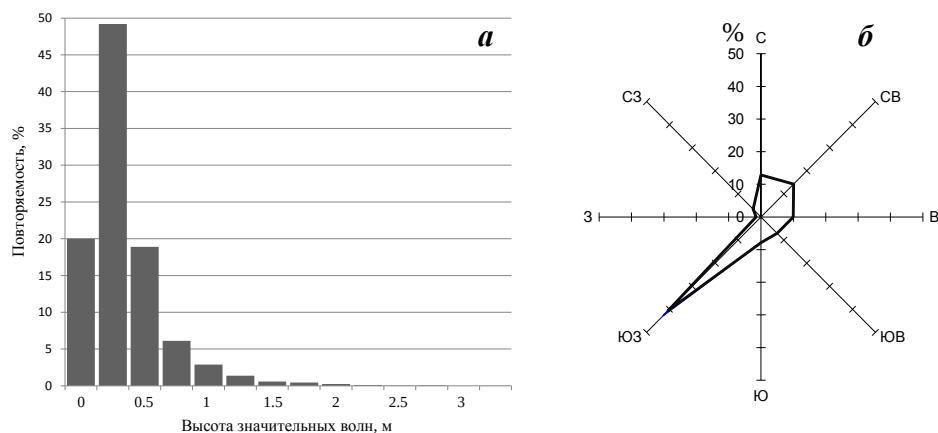
где h_E – высота волны обеспеченности 0,137 % (т.е. возможные не более чем 12 часов в год); T_E – период, соответствующий h_E .

Выбор параметров и валидация модели. Для моделирования изменений положения береговой линии была выбрана область от пирса Евпаторийского торгового порта до пляжа санатория им.Н.К.Крупской. Длина области вдоль оси x составляла 3 км (рис.1). Шаг сетки $\Delta x = 15$ м. Уравнение (1) интегрировалось по времени с шагом 3 ч. В расчетах учитывался пирс Евпаторийского торгового порта (длина 200 м, глубина у оконечности 7 м; проницаемость 0,5) и бетонная набережная, которая параметризовалась волноотбойной стенкой. При расчете профиля равновесия эффективный диаметр частиц песка $d_{50} = 0,33$ мм. Это значение задано, исходя из результатов экспедиционных исследований Морского гидрофизического института. Глубина замыкания D_{LT} принималась равной 5 м.

На входе в модель задавались временные ряды высоты значительных волн SWH (рис.2, а), пикового периода T_p и пиковые направления волн (рис.2, б) на глубине 13 м в точке, показанной на рис.1. Эти ряды имели



Р и с . 1 . Карта-схема района исследования с указанием областей расчетов и положения точки, в которой задавались параметры ветрового волнения.



Р и с . 2. Гистограмма распределения высот значительных волн *SWH* (а) и пиковых направлений волн (б) в точке с координатами 45,164° с.ш. 33,380° в.д. за 2006 – 2010 гг. по данным модели *SWAN*.

дискретность 6 ч и были получены на основе ретроспективных расчетов ветрового волнения за 2006 – 2010 гг. [7] с использованием волновой модели *SWAN* (*Simulating Waves Nearshore*) [8] и 2-х шагового метода вложенных сеток. Атмосферным форсингом служили поля скорости и направления приводного ветра *JRA* [9] Японского метеорологического агентства. При расчете волновых характеристик угловое разрешение модели составляло 15°. По частотной координате применялась сетка с 25 узлами в интервале частот 0,02 – 2 Гц, что дает возможность учесть вклад в волновое поле, как ветровых волн, так и волн зыби. Выбранная точка находится за пределами зоны обрушения, и ее положение совпадает с положением ближайшего узла сетки, на которой моделировалось волнение.

Для калибровки модели *GENESIS* были проведены методические расчеты по выбору оптимальных значений K_1 , K_2 и параметра IS , который определяет степень сглаживания в алгоритме расчета волновых полей модели *GENESIS*. В качестве критерия выбора параметров K_1 , K_2 и IS использовалось среднеквадратичное отклонение измеренной и расчетной береговой линий (σ) 16 июля 2010 г.

Анализ расчетов показал, что применять одинаковые значения параметров K_1 , K_2 и IS для всей расчетной области не представляется возможным. Поэтому было выбрано два участка берега: первый (западный) длиной 270 м включает территорию городского пляжа и пляжа санатория «Таврида»; второй (восточный) длиной 240 м – пляж центральной курортной поликлиники.

В таблице представлены величины среднеквадратичного отклонения положения расчетной и измеренной береговой линий для каждого из двух выбранных участков (σ_1 , σ_2) при разных значениях параметров K_1 , K_2 и IS . Как видно, для первого участка наименьшее среднеквадратическое отклонение (σ_1) равно 2,5 м при $K_1 = 0,0125$, $K_2 = 0,0005$ и $IS = 11$, для второго участка минимальное среднеквадратическое отклонение (σ_2) составляет 5,8 м и достигается при $K_1 = 0,025$, $K_2 = 0,0001$ и $IS = 5$. Далее эти значения параметров называются оптимальными.

Т а б л и ц а . Среднеквадратические отклонения положения расчетной и измеренной береговой линий для каждого из двух выбранных участков (σ_1 , σ_2) при разных значениях параметров K_1 , K_2 и IS .

№	K_1	K_2	IS	σ_1 , м	σ_2 , м
1	0,005	0,0002	1	6,6	6,5
2	0,005	0,0002	0	6,6	6,5
3	0,005	0,0002	5	4,2	6,3
4	0,005	0,0002	11	3,1	6,9
5	0,050	0,002	0	9,0	15,8
6	0,050	0,002	5	13,2	5,9
7	0,050	0,002	11	15,4	7,9
8	0,025	0,001	0	10,0	14,1
9	0,025	0,001	5	10,7	5,8
10	0,025	0,001	11	6,9	7,8
11	0,0125	0,0005	0	7,5	10,0
12	0,0125	0,0005	5	6,9	6,1
13	0,0125	0,0005	11	2,5	7,4
14	0,0125	0,0005	8	4,1	7,0
15	0,0125	0,0005	6	4,6	7,0
16	0,020	0,00008	5	9,4	5,9
17	0,030	0,0012	5	11,4	5,6
18	0,035	0,0014	5	12,0	5,5
19	0,040	0,0016	5	12,4	5,5

все расчеты, в которых в качестве защитных сооружений задавались буны, дали отрицательный результат, поскольку на защищаемых участках наблюдался активный размыв пляжа и отступление береговой линии вплоть до бетонной набережной.

Западный участок побережья. Для западного участка, расположенного на городском пляже и пляже санатория «Таврида», было рассмотрено пять конфигураций подводных волноломов.

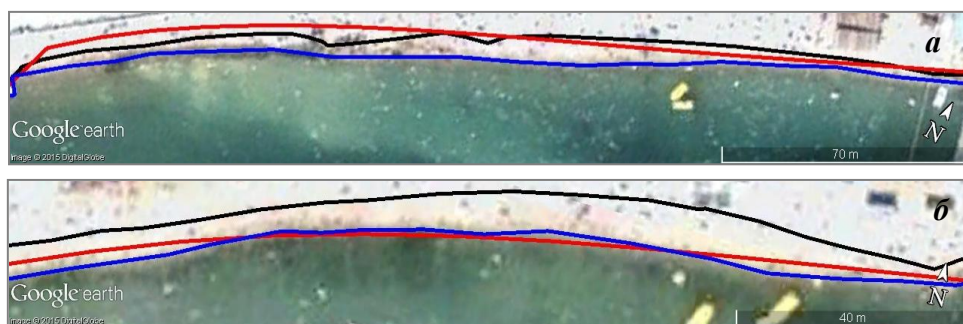
В первой серии численных экспериментов один подводный волнолом длиной 100 м был расположен в западной части исследуемого участка поочередно на расстояниях 7; 10; 15; 20 и 30 м от исходной береговой линии. Анализ результатов расчетов показал, что при всех рассмотренных вариантах часть берега за волнолом незначительно нарастает, однако в центральной части происходит сильный размыв пляжа.

Вторая серия расчетов проводилась для одного подводного волнолома длиной 100 м, расположенного с восточной стороны участка поочередно на расстояниях 7; 10; 15; 20 и 30 м от исходной береговой линии. Как показали расчеты, в зоне волновой тени волнолома происходит нарастание пляжа, од-

На рис.3 показаны положения береговой линии городского пляжа и пляжа санатория «Таврида» (рис.3, а) и пляжа центральной курортной поликлиники (рис.3, б). Здесь синие и черные кривые – измеренные положения береговой линии на 27 августа 2006 г. и 16 июля 2010 г. соответственно; красные кривые – положения береговой линии на 16 июля 2010 г. по расчетным данным при оптимальных значениях параметров K_1 , K_2 и IS .

Обсуждение результатов расчетов. Далее при оптимальных значениях параметров модели было выполнено несколько серий численных экспериментов. Анализировалось изменение положения береговой линии на выбранных участках за период 2006 – 2010 гг. при различных конфигурациях берегозащитных сооружений (бун и подводных волноломов).

Следует отметить, что

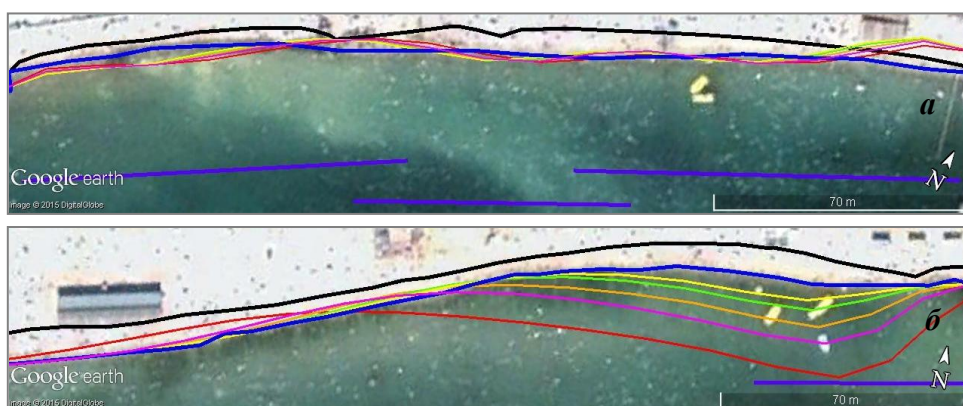


Р и с . 3 . Положения береговой линии городского пляжа и пляжа санатория «Таврида» (а) и пляжа центральной курортной поликлиники (б): измеренные положения береговой линии на 27 августа 2006 г. (синяя кривая); на 16 июля 2010 г. (черная кривая); положения береговой линии на 16 июля 2010 г по расчетным данным при оптимальных значениях параметров K_1 , K_2 и IS (красная кривая).

днако в западной части участка возникает отступление береговой линии вплоть до бетонной набережной.

Далее расчеты проводились при двух подводных волноломах, окаймляющих исследуемый участок и расположенных поочередно на расстоянии 7; 10; 15; 20 и 30 м от исходной береговой линии. Установлено, что в этих случаях происходит нарастание части пляжа в зонах волновой тени обоих волноломов и отступление береговой линии в центральной и восточной частях модельной области.

В четвертой серии численных экспериментов один подводный волнолом длиной 250 м располагался на расстоянии 7; 10; 15; 20 и 30 м от исходной береговой линии. Хотя при таких расположениях волнолома береговая линия в зоне волновой тени ведет себя стабильно, но на восточной границе участка возникают значительные отступления береговой линии. Отрицательным факто-



Р и с . 4 . Положения береговой линии городского пляжа и пляжа санатория «Таврида» (а) и пляжа центральной курортной поликлиники (б), рассчитанные при удалении волноломов от исходной береговой линии 27 августа 2006 г. (синяя кривая) на 7 м (желтая), 10 м (зеленая), 15 м (оранжевая), 20 м (розовая) и 30 м (красная). Черная кривая – реальное положение береговой линии на момент окончания расчетов 16 июня 2010 г.

ром такой защитной конфигурации является то, что она приведет к уменьшению интенсивности циркуляции вод между береговой линией и волноломом.

Последняя серия численных экспериментов проводилась для защитной конфигурации, состоящей из трех подводных волноломов длиной 100 м, расположенных в шахматном порядке. Волноломы располагались параллельно берегу на расстоянии 7; 10; 15; 20 и 30 м от исходной береговой линии соответственно с восточного и западного края участка, и 17; 20; 25; 30 и 40 м по центру (рис.3, а). Анализ результатов расчетов показал, что при таком расположении волноломов береговая линия в целом будет наиболее стабильна. Отступление береговой линии будет наблюдаться на восточной оконечности рассматриваемого участка.

Восточный участок побережья. Для восточного участка побережья, расположенного в пределах пляжа центральной курортной поликлиники, расчеты были проведены для двух защитных конфигураций подводных волноломов, расположенных на разном расстоянии от береговой линии.

В первой серии численных экспериментов рассматривался один подводный волнолом длиной 240 м, расположенный от исходной береговой линии на расстоянии 7; 10; 15; 20 и 30 м поочередно. Анализ результатов расчетов показал, что при таких положениях волнолома происходит сильный размыв у восточной оконечности исследуемого участка.

В следующей серии расчетов задавался один подводный волнолом длиной 60 м, расположенный на расстоянии 7; 10; 15; 20 и 30 м от исходной береговой линии. На рис.4, б представлены положения береговой линии для этой серии расчетов. Как видно, в зоне волновой тени происходит нарастание пляжа. Чем дальше от уреза воды расположен волнолом, тем большее количество материала изымается с прилегающих участков, что приводит к размыву (розовая и красная кривые на рис.4, б).

Заключение. С использованием математической модели *GENESIS* для береговой зоны центральной части г.Евпатория проведены расчеты изменений береговой линии при различных конфигурациях берегозащитных сооружений. Расчеты проводились в предположении наличия достаточного количества пляжеобразующего материала.

Проведен выбор оптимальных значений настроечных коэффициентов модели K_1 , K_2 , с помощью которых параметризуется объем перемещаемого в береговой зоне материала. Выбор коэффициентов проводился путем сопоставления среднеквадратичного отклонения положения расчетной и измеренной береговой линий для августа 2006 г. и июля 2010 г. Установлено, что применять одинаковые настроечные коэффициенты для всего евпаторийского побережья не представляется возможным.

Поэтому расчеты изменений береговой линии при различных конфигурациях берегозащитных сооружений проводились для двух участков небольшой протяженности. Для первого участка, расположенного на территории городского пляжа и пляжа санатория «Таврида», проведено пять серий численных экспериментов с одним, двумя и тремя подводными волноломами. Для второго участка, охватывающего пляж центральной курортной поликлиники, проведено две серии расчетов с одним волноломом. Анализ результатов расчетов показал, что для всех рассмотренных ситуаций в зоне волновой тени

происходит выдвигание береговой линии, а на прилегающих участках размыв пляжа, при некоторых конфигурациях происходит полная деградация пляжа.

Полученные результаты показывают, что применение активных способов берегозащиты этих участков должно сопровождаться их обязательной подпиткой пляжеобразующим материалом. В этом случае волноломы будут способствовать удержанию материала в береговой зоне, а не изымать песок с прилегающих территорий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горячкин Ю.Н., Харитонов Л.В. Изменения береговой линии Крыма по спутниковым данным // Причорноморський екологічний бюлетень «Стан та проблеми берегової зони морів України». – 2010. – вип.1 (35). – С.122-129.
2. Горячкин Ю.Н., Долотов В.В. Изменения береговой линии аккумулятивных берегов Западного Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. – вып.25, т.1. – С.8-18.
3. Леонтьев И.О. Прогнозирование эволюции берегов на основе математического моделирования // Океанология. – 2006. – т.46, № 4. – С.603-611.
4. Ashton A.D., Murray A.B. High-angle wave instability and emergent shoreline shapes: 1. Modeling of sand waves, flying spits, and cape // J. Geophys. Res. – 2006. – 111. – F04011. doi:10.1029/2005JF000422
5. Gravens M.B., Kraus N.C., Hanson H. GENESIS: Generalized model for simulating shoreline change. Workbook and system user's manual / Technical Report 2 of a Series. – Washington, 1991. – 341 p.
6. Moore B. Beach profile evolution in response to changes in water level and wave height / M.S. Thesis. – U.S.A.: Department of Civil Engineering, University of Delaware, 1982.
7. Харитонов Л.В., Фомин В.В. Численное моделирование ветрового волнения у западного побережья Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. – вып.25, т.1. – С.26-37.
8. SWAN Cycle III ver.40.85, User Manual, Delft University of Technology, Netherlands, 2011. – 119 p.
9. Onogi K., Tsutsui J., Koide H. et al. The JRA-25 Reanalysis // J. Meteor. Soc. Japan. – 2007. – v.85. – P.369-432.

Материал поступил в редакцию 25.02.2016 г.
После доработки 14.03.2016 г.

D.I.Lazorenko, L.V.Kharitonova, V.V.Fomin

CALCULATION OF CHANGES BEACH SHORELINE YEVPATORIYA COAST UNDER THE INFLUENCE WIND WAVES

Using the GENESIS numerical model the shoreline changes with different configurations of coast protection constructions near Yevpatoria coast were calculated. The shoreline changes under wind wave influence were analysed when changing the model calibration parameters and the most appropriate calibration coefficients were selected. The optimal configurations of protection constructions for studing areas were proposed.

KEYWORDS: Western Crimea, Yevpatoria, shoreline change, protection constructions, sediment transport, numerical modeling.