

К.И.Гуров, В.В.Фомин, Д.И.Лазоренко

Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕСЧАНЫХ ФРАКЦИЙ ПО ПОДВОДНОМУ БЕРЕГОВОМУ СКЛОНУ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ

Изучены процессы эрозии и седиментации донных осадков в районе пгт. Николаевка Западного Крыма с использованием одномерного варианта численной модели *XBeach* (*eXtreme Beach behavior*). Проведен анализ особенностей перераспределения песчаных фракций по подводному береговому склону, имеющему неоднородный фракционный состав при разных гидродинамических условиях. Моделирование динамики подводного берегового склона проводилось на период времени 24 часа. Анализ результатов расчетов показал, что основные морфодинамические процессы проходят в пределах 25 метровой зоны, ограниченной изобатой 2,5 м.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *донные отложения, подводный береговой склон, математическое моделирование, XBeach, Каламитский залив*

Введение. Первоочередной задачей изучения донных осадков в прибрежной зоне является анализ их пространственного распределения. Именно он помогает выявить источники поступления загрязняющих веществ, содержащихся в отложениях, и выполнить моделирование путей их дальнейшего распространения. Это особенно важно, учитывая тот факт, что загрязненные донные осадки при определенных условиях могут становиться источником вторичного загрязнения. Такие особенности отложений связаны с тем, что накопление вещества в донных осадках отражает всю совокупность процессов, протекающих как в водоеме, так и на его водосборной площади.

Макро- и микроэлементный состав донных осадков в основном зависит от литодинамических и литохимических особенностей осадочных отложений, трансформации их современными преобразовательными процессами и является результатом сложного процесса осадконакопления [1].

Что касается моделирования особенностей накопления и перераспределения донных осадков, то оно имеет важное прикладное значение, в особенности для прибрежных районов.

В мелководных акваториях и прибрежных зонах волны и течения способны, достигая дна, вызывать перемещение обломочного материала и подстилающих грунтов, представленных в виде взвешенных и влекомых наносов. Пространственная неоднородность движущихся потоков за счет процессов размыва дна и аккумуляции наносов трансформирует донный рельеф и изменяет очертания берегов [2].

Необходимость в использовании математических моделей, описывающих процессы переноса веществ на мелководье под воздействием гидродинамических условий, определяется возможностью прогнозировать влияние на экосистему различных антропогенных воздействий.

Анализу особенностей волновых полей для западного побережья Крыма и получению статистических характеристик волновых параметров посвящена работа [3]. Исследования медианного диаметра и коэффициента сортировки, а также особенностей распределения отдельных фракций в наносах пляжей Западного Крыма в рамках изучения особенностей морфологии и динамики прибрежной и береговой зон описаны в статье [4]. Сезонная и годовая изменчивость направления и интенсивности вдольбереговых потоков наносов на участках береговой зоны Западного Крыма с применением ветроэнергетического метода детально изучены в работе [5].

Результаты численного моделирования течений, индуцируемых поверхностным волнением, их влияние на транспорт наносов и оценки величин потоков этих наносов в районе побережья Евпатории и пгт. Николаевка представлены в работах [6, 7]. В работе [8] показаны последствия антропогенного воздействия на изменение характера волновых течений и транспорта наносов на примере Евпаторийской бухты.

Постоянный интерес к изучению шельфовой зоны западного побережья полуострова объясняется тем, что именно в ее пределах происходят специфические изменения многих природных процессов.

В данной работе исследуется подводный береговой склон центральной части Каламитского залива в районе пгт. Николаевка. Этот район отличается прямолинейным характером береговой линии и расположением изобат параллельно берегу [7].

Повышенный интерес к исследованию береговой зоны в районе пгт. Николаевка определяется подверженностью этого района интенсивному негативному воздействию экзогеодинамических процессов. Наиболее остро это воздействие проявляется в связи с активным и недостаточно обоснованным вмешательством человека в природные процессы в последнее десятилетие.

Математическая модель и выбор параметров. Для моделирования динамики прибрежной зоны применялся одномерный вариант комплексной гидродинамической модели *XBeach*, описывающей динамику волн и течений, транспорт наносов и изменения рельефа дна, а также процессы осушения и затопления береговой зоны [9].

Расчетная область представляла собой профиль дна, построенный на основе данных промеров и распределения глубин, полученных с навигационной карты. Длина профиля составляла 500 м. Количество узлов сетки, в зависимости от решаемых задач, задавалось равным 250 и 500. Шаг сетки составлял 2 м при 250 узлах и 1 м при 500 узлах. В качестве условия на берегу использовалась неразрываемая стенка, расположенная на удалении 6,5 м от уреза воды. Применение этого условия обусловлено реальной ситуацией, наблюдаемой в исследуемом районе, где в качестве береговой границы выступают элементы разрушенной набережной.

Расчеты проводились для различных параметров сетки, дна и ветрового волнения. Направление ветрового волнения в течение всего времени принималось неизменным, ориентированным вдоль профиля исследуемого подводного берегового склона. Моделирование морфодинамики подводного берегового склона проводилось на период времени 24 часа. Особенностью моделирования являлось использование двух фракций донных осадков при

разном положении границы раздела между ними на профиле. Каждая фракция определялась своими параметрами крупности, включающими медианный диаметр D_{50} и дополнительный параметр D_{90} .

Результаты и обсуждение. В первом случае решались две задачи. Для этого, в качестве параметров дна задавались две комбинации фракционного состава осадка, граница раздела которых проходила посередине профиля. Крупность донных осадков уменьшалась по профилю, таким образом: в первом случае использовалась комбинация крупнозернистые (1 – 0,5 мм) и среднезернистые (0,5 – 0,3 мм) пески, а во втором – среднезернистые и мелкозернистые (0,3 – 0,1 мм). В качестве входных данных задавалась различная высота волнения, изменяемая в диапазоне 1 – 3 м. Количество ячеек сетки задавалось равным 250, а шаг по сетки составил 2 м.

Полученные результаты показали, что формирование подводного бара в структуре профиля дна происходит под влиянием волн высотой выше 2 м. Для волн с максимальной высотой 1 м незначительные изменения структуры подводного профиля прослеживались только для фракции крупнозернистых песков.

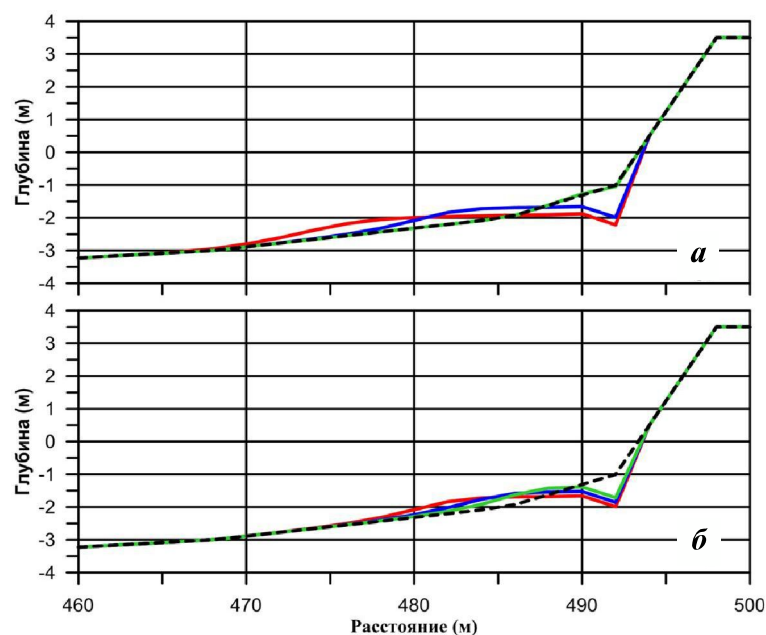
Под воздействием более интенсивного волнения, при H_{max} равном 2 и 3 м, происходили различные изменения структуры подводного берегового склона. Для этих вариантов расчетов были оценены следующие характеристики: максимальная глубина эрозионного воздействия, максимальная высота и ширина образованного подводного бара.

Для начала рассмотрим особенности полученных характеристик для профиля, сложенного крупнозернистыми песками (рис.1). С увеличением высоты волны максимальная глубина эрозионного воздействия смещается с 1,73 м при $H = 2$ м до 2,37 м при $H = 3$ м. Ширина образованного подводного бара изменяется от 13,6 м при $H = 2$ м, до 25,8 м при $H = 3$ м. Расположение вершины бара изменяется от 1,43 до 2,01 м.

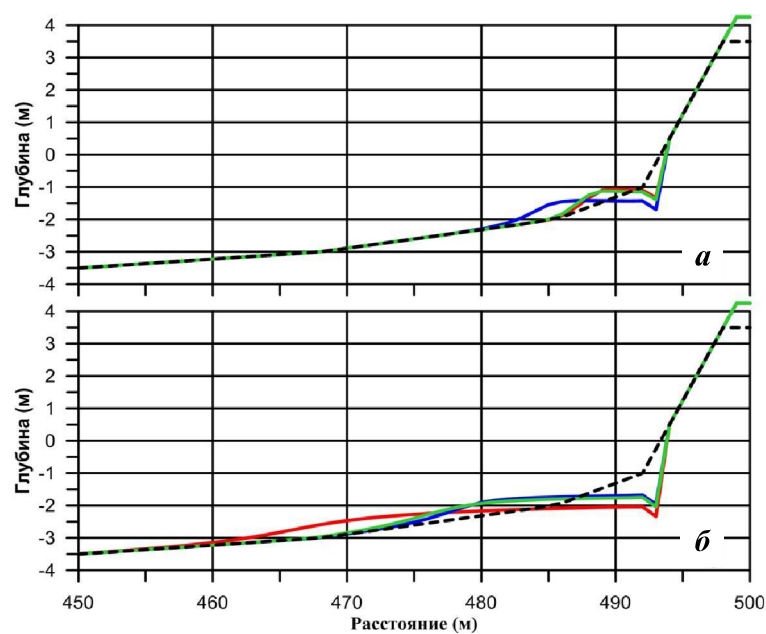
Для профиля, сформированного среднезернистыми песками, принцип изменения характеристик идентичен. Однако, сравнивая полученные значения для разных типов дна при одинаковых высотах волн, выявляется одна особенность. Для высоты волны $H = 2$ м полученные характеристики слабо меняются от смены гранулометрического состава, а для волнения высотой $H = 3$ м значения морфометрических характеристик подводного склона, сложенного крупнозернистыми осадками, выше, чем для склона, сформированного среднезернистым материалом.

Для второго случая было принято использовать одну комбинацию фракционного состава осадка, а именно: крупнозернистый (1,5 – 0,5 мм) и среднезернистый (0,5 – 0,3 мм) песок. Крупность частиц, как и в первом случае, уменьшалась по мере удаления от берега. Кроме того, использовалось несколько границ раздела для фракций осадка, задаваемых по глубине. Было изменено число вариаций интенсивности ветрового волнения (максимальная высота волны изменялась от 2 до 5 м). Количество ячеек сетки было увеличено до 500, а шаг по сетки составил 1 м.

В результате решалось три задачи. Для первой граница раздела фракций проходила на глубине 3 м, для второй на 3,5 м, а в третьей задаче на 4 м.



Р и с . 1 . Эволюция профиля дна, сложенного крупнозернистыми песками. Начальный профиль дна (черный пунктир), профиль через 24 ч при $H = 1$ м (зеленая линия), $H = 2$ м (синяя линия), $H = 3$ м (красная линия) (а); профиль при $H = 2$ м через 6 ч (зеленая линия), 12 ч (синяя линия), 24 ч (красная линия) (б).



Р и с . 2 . Эволюция профиля дна за сутки при $H = 2$ м (а) и $H = 4$ м (б): начальный профиль дна (черный пунктир), профиль для границы раздела фракций на глубине 3 (зеленая линия), 3,5 (синяя линия), 4 м (красная линия).

Полученные результаты показали, что изменение морфодинамических особенностей подводного склона, как и для первого случая, напрямую зависит от параметра ветрового волнения. Так, наибольшее эрозионное воздействие, достигающее отметки 2,3 м, и наибольшая ширина образованного бара (25,5 м) были получены для волнения высотой 5 м.

Дальнейший анализ показал, что результаты моделирования зависят не только от интенсивности волнового воздействия, но и от изменения расположения границы раздела материала по профилю склона.

В качестве примера возьмем такую характеристику, как ширина образованного подводного бара, и проследим ее изменение для каждой высоты волны при разных границах раздела (рис.2).

При высоте волны $H_{max} = 2$ м максимальная площадь бара отмечается в случае, когда граница раздела фракций проходила на глубине 3,5 м, а минимальная наблюдалась для варианта с глубиной раздела на 4 м (рис.2, а).

При волнах высотой 3 и 4 м увеличение площади бара происходит пропорционально увеличению глубины смены фракционного состава (рис.2, б).

При высоте волны $H_{max} = 5$ м своих максимальных морфометрических значений бар достигает при глубине раздела на 4 м, минимальных на 3,5 м.

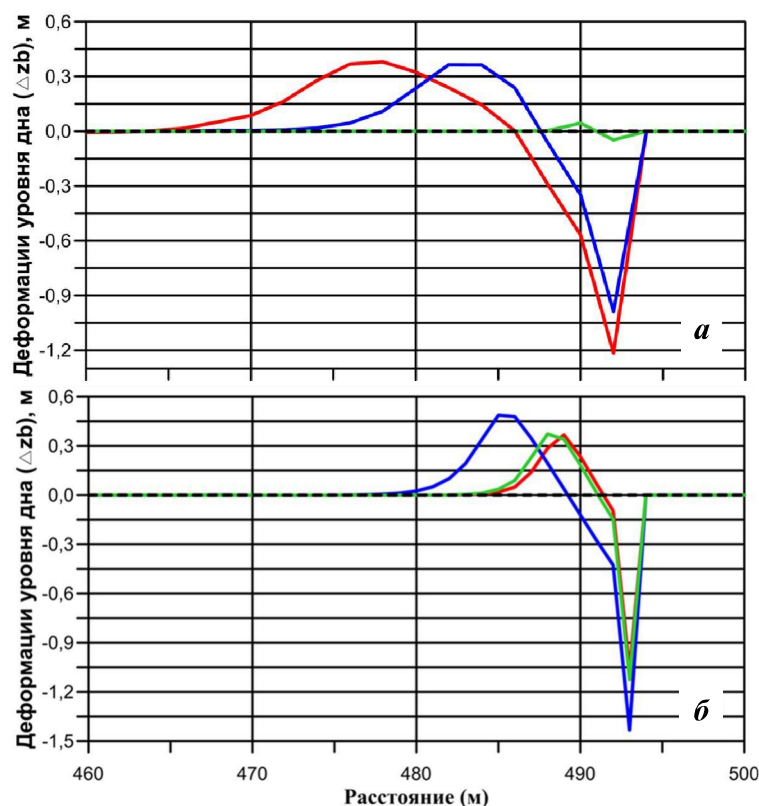
Значения деформаций уровня дна Δz_b , полученные для первой серии экспериментов, показали, что при воздействии слабого волнения ($H_{max} = 1$ м) эрозионно-аккумулятивные процессы минимальны. При сильном волнении ($H_{max} = 2$ и 3 м) высота образованного бара достигает своих максимальных значений (0,36 – 0,38 м), а глубина эрозионного вымывания увеличивается от 0,98 при $H_{max} = 2$ м до 1,21 м при $H_{max} = 3$ м (рис.3, а). Результаты второй серии модификаций профиля дна для примера сильного волнения ($H_{max} = 2$ м) показали, что наибольшие эрозионно-аккумулятивные процессы наблюдались, когда граница раздела фракций проходила на глубине 3,5 м. В этом случае высота образованного бара составила 0,49 м, а глубина эрозионного вымывания достигла отметки 1,43 м. Наименьшие значения деформаций отмечались для модификации с границей раздела на 4 м (рис.3, б).

Выводы. Анализ результатов математического моделирования показал, что основные морфодинамические процессы происходят в пределах 25 м зоны, ограниченной изобатой 2,5 м.

Наибольшие изменения подводного берегового склона происходят под воздействием интенсивного волнения в случаях, когда граница раздела материала проходила на глубинах 3 – 4 м.

Расчетные профили подводного берегового склона, сформированные разными по гранулометрическому составу комбинациями, при одной и той же интенсивности волнения отличаются. При этом, независимо от шага расчетной сетки, положения границ раздела фракций и интенсивности волнения, высота образованного подводного бара составляет 0,25 – 0,3 м.

Значения деформаций уровня дна Δz_b , полученные для первой серии экспериментов, показали, что при воздействии слабого волнения ($H_{max} = 1$ м) эрозионно-аккумулятивные процессы минимальны. В результате второй серии экспериментов было установлено, что при воздействии волнения с $H_{max} = 2$ м наибольшие морфодинамические изменения подводного берегового склона наблюдались, когда граница раздела фракций проходила на



Р и с . 3 . Деформации уровня дна Δz_b для первой серии экспериментов: начальный уровень дна (черный пунктир), деформации уровня через 24 ч для $H = 1$ м (зеленая линия), $H = 2$ м (синяя линия), $H = 3$ м (красная линия) (а); деформации уровня дна (Δz_b) для второй серии экспериментов: начальный уровень дна (черный пунктир), уровень дна через 24 ч для границы раздела фракций на глубинах 3 (зеленая линия), 3,5 (синяя линия), 4 м (красная линия).

глубине 3,5 м, а наименьшие отмечались для модификации с границей раздела на 4 м.

Полученные результаты показали важную роль экзогеодинамических процессов в исследуемом районе. Учет особенностей протекания этих процессов может быть использован при планировании мер, направленных на рациональное использование ресурсов береговой зоны пгт. Николаевка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лисицын А.П. Осадкообразование в океанах.— М.: Наука, 1974.— 438 с.
2. Блатов А.С., Иванов В.А. Гидрология и гидродинамика шельфовой зоны Черного моря.— Киев: Наукова думка, 1992.— 242 с.
3. Иванов В.А., Фомин В.В. Математическое моделирование динамических процессов в зоне море — суша.— Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008.— 363 с.
4. Горячкин Ю.Н., Фомин В.В. Характеристика волновых течений в Каламитском заливе // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплек-

сное использование ресурсов шельфа.— Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010.— вып. 23.— С.159-165.

5. 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.
6. Удовик В.Ф., Горячкин Ю.Н. Межгодовая изменчивость вдольберегового потока наносов в береговой зоне Западного Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.— Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2013.— вып.27.— С.363-368.
7. Горячкин Ю.Н., Фомин В.В., Харитонов Л.В. Динамика наносов в Евпаторийской бухте, Черное море // Вестник Одесского Национального университета. Географические и геологические науки.— 2013.— т.18, вып.2(18).— С.46-53.
8. Шуйский Ю.Д. Механический состав пляжевых наносов на западных берегах Крымского полуострова // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.— Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2007.— вып.27.— С.370-385.
9. *XBeach* model description and manual.— UNESCO-IHE Institute for Water Education.— Deltares; Delft: Deltares and Delft Univ. Technology, 2010.— 106 p.

Материал поступил в редакцию 12.02.2016 г.
После доработки 05.09.2016 г.

K.I.Gurov, V.V.Fomin, D.I.Lazorenko

MATHEMATICAL MODELING OF THE REDISTRIBUTION OF SAND FRACTIONS ACCORDING TO A UNDERWATER COASTAL SLOPE UNDER THE INFLUENCE OF THE WIND WAVES

The processes of erosion and sedimentation of bottom sediments near the village of Nikolaevka, using a numerical model *XBeach* (eXtreme Beach behavior) is studied. The analysis of the characteristics of the redistribution of sand fractions underwater coastal slope is carried out. Changes in the morphology of the underwater coastal slopes composed of different fractional composition of sediments in different hydrodynamic conditions are shown. An important feature of the model was modified to use several sediment fractions, as well as changes in the boundaries of their separation on the profile. The simulation was performed for various parameters of the grid floor and wind waves. The source of energy for the process is a coastal storm surge. Direction of wind waves at all times taken the absence oriented along the profile. Modeling morphodynamics underwater coastal slope was conducted over a time interval of 24 hours. Studies have shown that the main morphodynamic processes are within 25 m of isobath limited to 2.5 m. The greatest changes of the underwater coastal slope were occurring under the influence of intense storm, when the interface of the material took place at a depth of 3 and 4 m.

KEYWORDS: *bottom sediments, underwater coastal slope, mathematical modeling, XBeach, the Kalamitsky Bay*