

М.В.Крыленко, В.В.Крыленко

Институт океанологии им. П.П.Ширинова РАН, г.Москва

ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ПЛЯЖЕВЫХ И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ БАКАЛЬСКОЙ КОСЫ

Приведены методика и результаты исследований гранулометрического состава пляжевых и донных отложений, слагающих Бакальскую косу (Черное море) и прилегающий подводный склон. Анализ полученных данных показал, что вдольбереговое распределение гранулометрического состава в большей степени отражает различия гидро-литодинамических условий отдельных участков берегов косы, чем положение основных источников пляжеобразующего материала. Полученные данные важны для понимания современных литодинамических процессов и эволюции геосистемы Бакальской косы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *морские берега, аккумулятивные формы, пляжеобразующие наносы, гранулометрический анализ, Бакальская коса*

doi: 10.22449/2413-5577-2018-4-40-49

Введение. Изучение особенностей пространственного распределения гранулометрического состава осадков, слагающих аккумулятивные морские береговые формы, является важной составляющей их исследования. Анализ гранулометрического состава проб грунта, отобранных на характерных морфологических элементах рельефа, позволяет выявить закономерности перераспределения наносов в пределах литодинамической системы и сделать выводы о действующих лито- и гидродинамических процессах [1 – 4]. Учет особенностей гранулометрического состава отложений важен при определении основных действующих факторов, определяющих миграцию, дифференциацию и аккумуляцию наносов. Кроме того, данные о механическом составе наносов необходимы при математическом моделировании береговых процессов и прогнозе развития берега.

Бакальская коса – крупная аккумулятивная форма, расположенная на северо-западном побережье Крымского п-ова в акватории Каркинитского залива Черного моря (рис.1) [5, 6]. В последние десятилетия аккумулятивное тело косы трансформировалось под влиянием природных процессов и антропогенного воздействия. В 2017 – 2018 гг. сотрудниками Южного отделения Института океанологии (ЮО ИО) РАН и Морского гидрофизического института РАН в ходе выполнения проекта РФФИ № 14-17-00547 проводились комплексные исследования Бакальской косы [5], включающие изучение гранулометрического состава пляжевых и донных осадков, выделение преобладающих фракций, выявление источников пляжеобразующего материала. На первом этапе в 2017 г. использовались архивные данные и полевые материалы. Обобщение результатов исследований было выполнено в [1]. В настоящей статье приведены результаты работ 2018 г., дополняющие и уточняющие данные предшествовавших исследований.

© М.В.Крыленко, В.В.Крыленко, 2018

Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. вып.4. С.40-49.

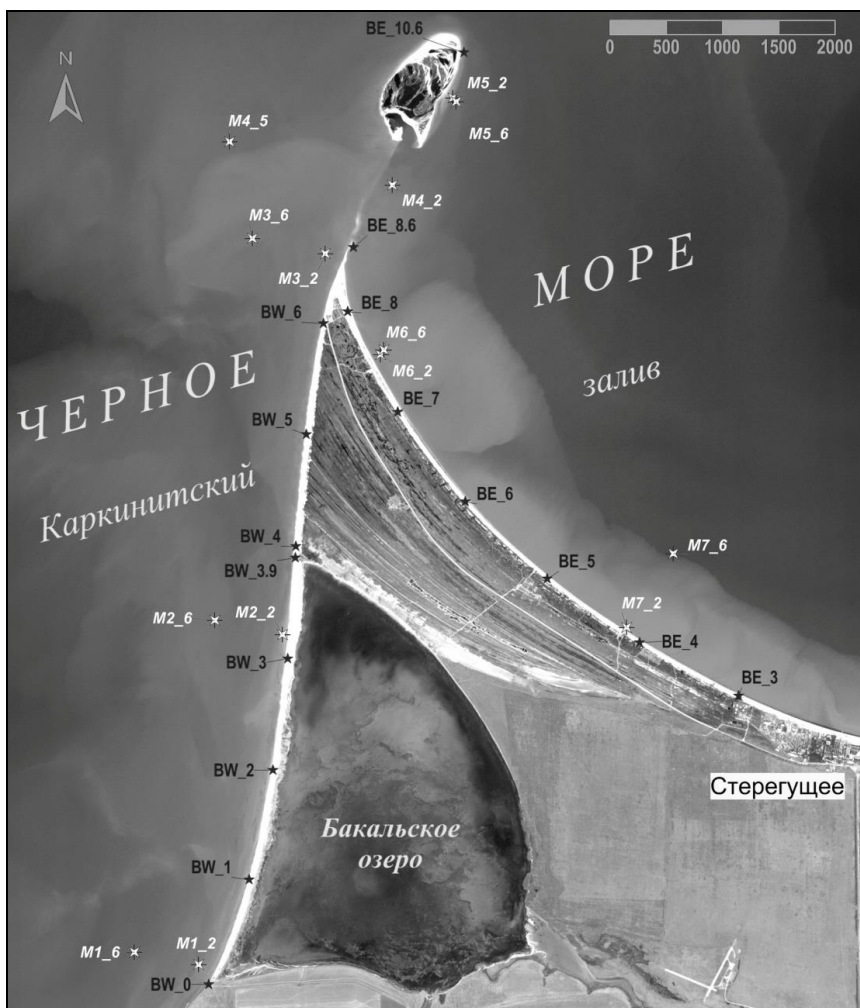


Рис. 1. Расположение точек отбора проб донных (белый шрифт) и пляжевых (черный шрифт) отложений.

Методика получения и обработки данных. В 2018 г. был выполнен отбор пляжевых отложений Бакальской косы (27 проб, рис.1). При проведении полевых работ, как и ранее на Анапской пересыпи [7], использовалась система «виртуальных» опорных профилей. Вдоль всей протяженности берегов Бакальской косы были выбраны условные точки вблизи уреза моря, расположенные в 1 км друг от друга. Координаты точек определялись при помощи *GPS*. Пробы отбирались мерной емкостью в средней части пляжа, с поверхности (~ 10 см) наиболее характерного участка.

Одновременно был произведен отбор проб донных отложений на подводном склоне Бакальской косы. Поскольку методика работ предусматривала анализ механического состава наносов, находящихся в схожих морфологических зонах, отбор проб производился водолазом на ближайших к берегу изобатах 2 и 6 м. Определение координат и глубины точек отбора проводилось с использованием навигационной аппаратуры и эхолота, установ-

ленных на лодке. Параллельно производился отбор живых двустворчатых моллюсков и раковинного детрита для биологических исследований. Помимо получения сведений о распределении наносов, эти работы были частью исследований биогенного источника наносов [8].

Гранулометрический анализ проб проводился в лаборатории литодинамики и геологии ЮО ИО РАН согласно [9]. Разделение на фракции осуществлялось ситовым методом без промывки водой: образцы грунта весом 100 – 200 г были высушены до воздушно-сухого состояния, затем просеивались через сита. Использовался сепаратор просеивающий СПЭ, оснащённый ситовым набором СЛМ-200. Выделялось 22 фракции (в мм): < 0,05; 0,05 – 0,063; 0,063 – 0,08; 0,08 – 0,1; 0,1 – 0,125; 0,125 – 0,16; 0,16 – 0,2; 0,2 – 0,25; 0,25 – 0,315; 0,315 – 0,4; 0,4 – 0,5; 0,5 – 0,63; 0,63 – 0,8; 0,8 – 1,0; 1,0 – 1,25; 1,25 – 1,6; 1,6 – 3,0; 3,0 – 4,0; 4,0 – 5,0; 5,0 – 7,5; 7,5 – 9,5; > 9,5. Так как основной целью было исследование характеристик пляжеобразующих наносов, выделение более мелких фракций не производилось, оценивалось только их общее содержание.

Типизация грунтов и обработка результатов механического анализа проводилась с учетом нормативов ГОСТ 25100-2011 «Грунты. Классификация» [10]. В соответствии с [10], во всех пробах отдельно анализировалось содержание и состав фракций крупнее 2 мм, отдельно – фракций мельче 2 мм.

Литодинамическая характеристика Бакальской косы. Шельф в районе Бакальской косы представляет собой пологую равнину с уклоном на запад, осложненную остатками затопленных морем аккумулятивных тел. Вдоль западного берега косы подводный склон отмельный, на восточной стороне – значительно более крутой и выполаживается лишь в южной части [11]. Сформировавшаяся конфигурация является отражением процесса развития косы, в ходе которого аккумулятивное тело смещается к востоку.

Берега представлены пляжами полного профиля практически на всей протяженности косы (рис.1). Высота гребня берегового вала с западной стороны косы больше (1,4 – 1,6 м), чем с восточной (0,9 – 1,2 м), что обусловлено преобладанием сильных волнений западных – юго-западных румбов. Вдоль восточной стороны косы на пляжах и вдоль уреза имеются скопления отмершей морской травы зостеры, местами полностью перекрывающие прирезцовую зону, в прикорневой части косы на них сформированы марши. Скопления зостеры оказывают существенное влияние как на формирование профиля пляжа, так и на распределение пляжевых наносов.

Бакальская коса и ее подводная отмель сложены песком и ракушей, присутствует галька размером до 10 – 15 см. Минеральная часть наносов состоит из кварцевого песка с примесью известнякового песка, гравия и гальки, а также довольно крупных оолитовых зерен [6]. Вдоль прикорневой части западной стороны косы береговой вал и дно до глубины 1,5 м сложены ракушечным песком с примесью оолитов, гравия и мелкой гальки. Прилегающее дно представлено обнажениями коренных пород (бурых глин) или илистыми отложениями, местами с примесью ракуши. Перед пересыпью Бакальского озера, на глубине около 2 м, на поверхность дна выступает пласт озерного ила того же состава, что и на дне лагуны [6]. В северной части восточной стороны косы береговой вал и крутой прибрежный подводный откос сложены

Таблица 1. Содержание преобладающих фракций в пляжевых пробах (для гравия – % от общего веса пробы, для песков – % от суммы фракций < 2 мм).

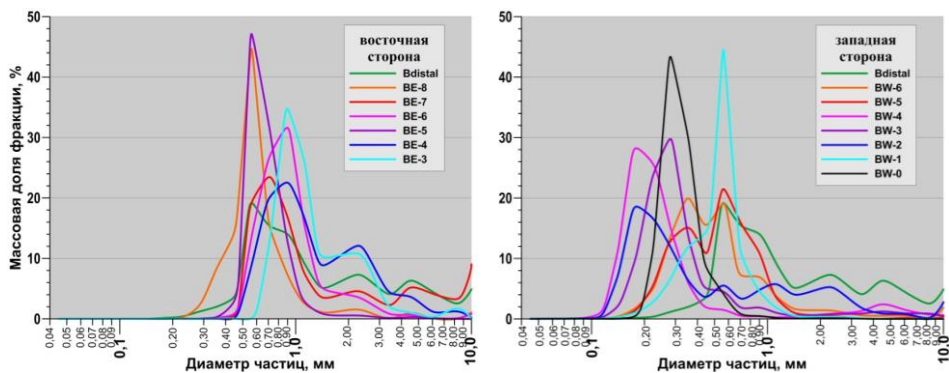
элементы	фракции [7]	размер фракций, мм	номера точек отбора проб													
			BW-0	BW-1	BW-2	BW-3	BW-4	BW-5	BW-6	в дист.	BE-8	BE-7	BE-6	BE-5	BE-4	BE-3
гравий		> 2	0,1	0,1	6,3	4,5	6,6	0,6	3,6	22,7	2,4	24,5	2,7	0,5	11,0	5,7
		1 – 2	0,3	2,8	16,2	2,4	1,4	5,1	7,0	27,4	5,2	20,2	24,9	4,4	41,9	49,4
		0,5 – 1	5,4	60,0	14,5	8,6	2,6	48,5	34,5	63,0	69,3	79,0	73,9	92,3	57,8	50,5
		0,25 – 0,5	81,9	32,9	23,4	50,8	24,7	39,0	50,9	8,8	25,3	0,8	1,2	3,3	0,2	0,1
		0,10 – 0,25	12,2	4,2	45,7	38,0	71,0	7,3	7,6	0,8	0,3	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0
песчаные частицы		тонкие	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		0,05 – 0,10	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

ракушечным материалом и крупными песками. С удалением от подножия откоса, на глубине 5 – 6 м, дно покрыто тонким (8 – 15 см) слоем илистого песка с незначительной примесью ракуши. В южном направлении подводный откос выполаживается. На глубинах до 3 – 4 м залегает ракуша, подобная ракуше, слагающей надводную часть косы. Глубже дно покрыто илами с зарослями zostеры.

Особенности гранулометрического состава наносов. В прикорневой части *западной стороны косы* в пляжевых отложениях преобладают средние пески (табл.1, рис.2), аномально высоко содержание крупных песков в 1 км от корня косы (проба BW-1). В центральной части преобладают мелкие и средние пески, вблизи оконечности – средние и крупные пески. Частицы мельче 0,1 мм практически отсутствуют. Сортированность значительно меняется вдоль берега, содержание преобладающей фракции находится в пределах 21,0 – 44,7 %. Вблизи оконечности косы (BW-5, BW-6) отмечено наличие двух почти равнозначных преобладающих фракций 0,315 – 0,4 и 0,5 – 0,63. Содержание фракций крупнее 2 мм невелико: 0,1 – 6,6 % от общего веса пробы.

В прикорневой части *восточной стороны косы* в пляжевых отложениях преобладают крупные и грубые пески, в центральной части и вблизи оконечности – крупные пески. Сортированность значительно варьирует вдоль берега, содержание преобладающей фракции находится в пределах 29,2 – 47,7 % (здесь и далее указано содержание без учета доли фракций крупнее 2 мм). Содержание фракций крупнее 2 мм составляет 0,5 – 24,5 % от общего веса пробы, как правило, преобладает ракуша, но присутствуют и минеральные обломки. Характерной особенностью является практически отсутствие в составе наносов частиц мельче 0,2 мм.

На *дистальной оконечности косы* преобладают крупные и грубые пески, зна-

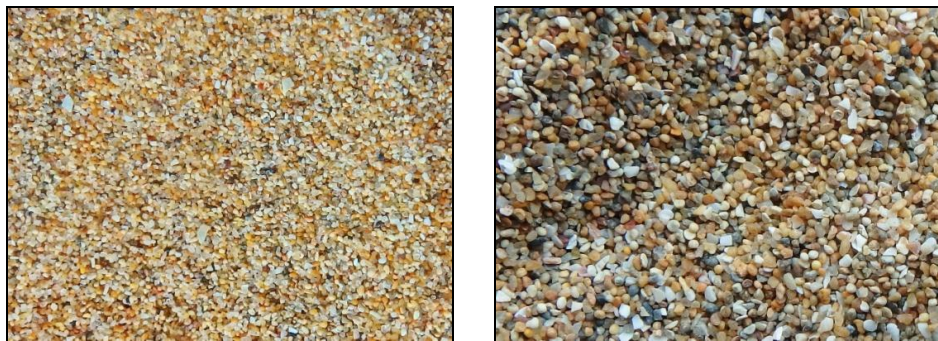


Р и с . 2 . Гранулометрический состав пляжевых отложений.

чительно содержание фракций крупнее 2 мм (22,7 % от общего веса пробы). Сортированность материала невысокая (рис.2).

В целом, в пляжевых отложениях восточной стороны косы преобладают более крупные пески, чем на западной. Это соответствует приведенным в [12] данным, согласно которым в 1945 г. на пляжах западной стороны косы преобладали наносы крупностью 0,25 – 0,5 мм (до 47 %), на пляжах восточной стороны 1 – 2 мм (до 46 %). Поскольку волновое воздействие на западный берег значительно сильнее, более логичной представляется обратная ситуация. Состав горных пород коренных берегов на обеих сторонах косы схож [6], материал соответствующей крупности на западной стороне имеется (проба BW-1). Однако непосредственно у примыкания коренного берега (проба BW-0), откуда направлен поток наносов, содержание грубых и крупных песков менее 6 %. Вероятно, имеются механизмы, способствующие выносу крупных частиц с западной стороны и их накоплению на восточной.

Анализ минерального состава проб показал, что в мелких фракциях преобладают округлые кварцевые частицы (рис.3), в более крупных – ракушка, частицы известняка, оолитовые зерна. Гидравлическая крупность представленных частиц различается, что способствует дифференциации материала под воздействием вдольбереговых или формирующихся в прибойной зоне течений. Более крупные, но менее плотные и с неправильной формой частицы перемещаются активнее мелких окатанных частиц кварца. На западной

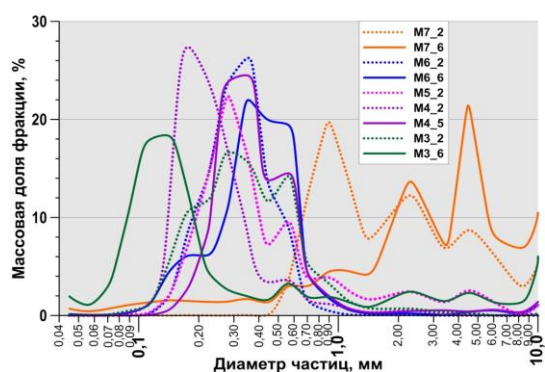


Р и с . 3 . Различие вещественного состава песка по фракциям: 0,25 – 0,315 (проба BW-0) (а); 0,5 – 0,63 (проба BW-1) (б).

стороне косы берег находится в стадии размыва, ветро-волновой режим и конфигурация берега благоприятствуют как усиленному вдольбереговому выносу материала в сторону дистали, так и перемещению наносов на тыльную сторону берегового вала. На восточной стороне косы, напротив, идет процесс аккумуляции: волновое воздействие существенно меньше, а вдольбереговые течения и конфигурация берега способствуют накоплению крупных частиц на пляже. Мелкие и средние пески, движущиеся с юго-востока, в значительной степени перехватываются в ковше Бакальской бухты, чему способствует наличие вблизи уреза скоплений отмершей zostеры.

Наличие пролива между современной оконечностью косы и островом (до 2010 г. являвшимся оконечностью косы [5]) способствует перемещению пляжеобразующего материала с западной на восточную сторону косы. О существовании переноса свидетельствует присутствие на восточной стороне косы, на удалении 1,5 км от оконечности, крупных (до 10 см) обломков горных пород из отсыпки полотна дороги, размываемой на западной стороне.

На рис.4 представлены графики гранулометрического состава отложенного подводного склона восточной и западной сторон косы. В части точек,



отмеченных на схеме (рис.1), в отобранных пробах отсутствуют частицы пляжеобразующей крупности. Характерной особенностью всех донных проб является низкая сортированность материала. В целом, на подводном склоне содержание наиболее массовых фракций не превышает 30 %. В большинстве проб выделяются две или более преобладающие размерные группы (табл.2, рис.4).

Р и с . 4 . Гранулометрический состав донных отложений.

Т а б л и ц а 2 . Содержание преобладающих фракций в донных пробах (для гравия – % от общего веса пробы, для песков – % от суммы фракций < 2 мм).

элементы	фракции [7]	размер фракций, мм	номера точек отбора проб									
			M3_2	M3_6	M4_2	M4_5	M5_2	M6_2	M6_6	M7_2	M7_6	
песчаные частицы	грубые	> 2	0,8	13,0	0,6	3,4	6,6	0,0	2,3	31,2	57,7	
	крупные	1 – 2	3,0	4,9	1,5	1,5	6,9	0,2	1,0	47,4	44,4	
	средние	0,5 – 1	22,8	8,1	6,4	21,4	18,4	11,0	25,9	52,3	24,7	
	мелкие	0,25 – 0,5	44,3	7,1	28,1	64,2	48,7	63,4	54,3	0,2	10,5	
	тонкие	0,10 – 0,25	29,2	60,5	63,7	12,9	25,9	25,4	18,2	0,1	13,5	
		0,05 – 0,10	0,6	17,2	0,3	0,0	0,1	0,0	0,5	0,0	5,2	

В прикорневой части западной стороны косы глубже 1,5 м поверхность дна представлена бенчем из коренных глин или лиманными илами, по которым транзитом проходят наносы с юга и юго-запада. Вдольбереговые течения других направлений практически отсутствуют [6]. Наносы пляжеобразующей крупности на подводном склоне имеются только в приурезовой зоне. Лишь вблизи оконечности косы (морской профиль 3) на глубине 6 м появляются мелкие пески, увеличивается содержание ракуши (до 15 %). На глубине 2 м залегают плохо сортированные мелкие и средние пески. Как видно на графике МЗ_2 (рис.4), в составе наносов выделяются три размерные группы. Вероятно, на этом участке встречаются наносы, приуроченные к различным источникам (потокам). Выделить и идентифицировать данные источники без детальных исследований не представляется возможным.

В проливе между оконечностью косы и островом практически при любых направлениях волнения наблюдается усиление течений; подобные явления отмечены и вдоль приглубого восточного берега вблизи оконечности косы, где формируются знакопеременные вдольбереговые течения [13]. Вероятно, эти течения являются причиной того, что, в отличие от Анапской пересыпи, где с глубиной снижалось содержание крупных фракций [14, 15], на подводном склоне Бакальской косы эта закономерность нарушается. Ракуша и крупные пески под действием волн могут транспортироваться на пляж, а под действием вдольбереговых течений, напротив, выносятся из прибрежной зоны и накапливаются вдоль подножия крутого подводного берегового откоса на глубинах, превышающих вероятное волновое воздействие (проба М6_6). Процесс подобен происходящему на подводных валах Анапской пересыпи, вдоль гребней которых формируются течения, при этом ракуша либо накапливается в межваловых ложбинах, либо выносится к берегу под действием волн. С удалением от крутой части подводного берегового откоса мощность течений резко ослабевает, что создает предпосылки к накоплению мелких фракций. В точке М5_6 с восточной стороны острова на глубине 6 м залегают илы практически без песчаных фракций, в точке М7_6 на глубине 6 м расположены плотные илы с зарослями zostеры.

Южнее, где подводный склон становится более пологим, вдольбереговые течения затухают, что отражается на составе наносов. В донных осадках снижается содержание песчаных минеральных фракций и, одновременно, увеличивается содержание целой и битой ракуши. Влияние ослабления волнового воздействия на содержание в осадках ракуши очевидно при сравнении состава наносов подводного склона на морском профиле 7, где общее содержание ракуши растет с глубиной, но кардинально меняется ее состав (рис.5). На глубине 2 м (точка М7_2) ракуша представлена обломками венерок (*Chamelea gallina* и *Polititapes aureus*), обитающих исключительно на песчаном дне и поступающих сюда с вдольбереговым потоком. На глубине 6 м (точка М7_6) – это раковины биттиумов (*Bittium reticulatum*), обитающих на zostере (*Zostera marina*) и накапливающихся в илах по мере отмирания, и наиболее легкие и плоские пластины обломков ракуши, вынесенные из прибрежной зоны. Данный факт указывает на отсутствие переноса ракуши (как и других наносов) с глубины 6 м к берегу и ослабление обратного выноса.



Р и с . 5 . Раковинный детрит из донных отложений с морского профиля 7: с глубины 2 м (проба М7_2) (слева), с глубины 6 м (проба М7_6) (справа).

На морском профиле 7 (точки М7_2, М7_6) гранулометрический состав донных отложений с глубины 2 м подобен таковому на пляже. Данные особенности указывают на то, что поступление пляжеобразующих наносов на восточной стороне косы осуществляется исключительно с вдольбереговым потоком, накопление наносов первоначально происходит на дне вдоль подножия подводного откоса. При усилении волнового воздействия северных и северо-восточных направлений становится возможно поступление наносов на пляж. Соответственно, при климатических изменениях ветрового режима может существенно изменяться скорость аккумуляции на восточной стороне косы.

Заключение. Новые данные позволили дополнить и уточнить результаты предшествующих исследований [1]. Выявлена значительная изменчивость гранулометрического состава отложений Бакальской косы, как вдольбереговая, так и на поперечных профилях. Это связано со сложными и изменчивыми гидро-литодинамическими условиями, наличием нескольких источников наносов, неоднородным рельефом подводного склона, присутствием ракушки. Разнообразие минерального и механического состава затрудняет выявление закономерностей пространственного распределения, связанных с перемещением минерального или биогенного материала от его источников. В отличие от Анапской пересыпи, на подводном склоне Бакальской косы отсутствуют морфологические зоны с более или менее типичными гидродинамическими условиями. Установлено два основных источника наносов: продукты абразии, поступающие с вдольбереговым потоком с прилегающих абрадируемых участков коренного берега, и ракушка [8], поступающая с подводного склона и с вдольбереговым потоком. Нужно отметить, что с западной стороны косы уклон дна допускает миграцию пляжеобразующих наносов с подводного склона, а на восточной стороне этот процесс возможен только на юго-восточной части косы. Особенности распределения минеральной составляющей наносов позволили предположить их миграцию с юго-запада вдоль западной стороны косы вплоть до ее оконечности. При наличии перемычки с островом наносы двигались далее на север, после ее исчезновения наносы начали огибать оконечность косы и перемещаться на

восточную сторону, где происходит их вдольбереговая миграция на юго-восток, в центральную часть Бакальской бухты.

Экспедиционные работы и гранулометрический анализ проведены благодаря финансовой поддержке РФФ (проект № 14-17-00547).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Горячкин Ю.Н., Гуров К.И.* Механический состав пляжевых наносов Бакальской косы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря.– 2017.– № 3.– С.48-56.
2. *Айбулатов Н.А.* Исследование вдольберегового перемещения песчаных наносов в море.– М.: Наука, 1966.– 149 с.
3. *Kovaleva O., Chubarenko B., Pupienis D.* Grain size variability as an indicator of sediment transport alongshore the Curonian Spit (south-eastern Baltic Sea) // *Baltica*. – 2016.– v.29, № 2.– P.145-155.
4. *Masselink G., Hugues M.* Introduction to Coastal Processes and Geomorphology.– Published by Hodder Arnold, 2003.– 413 p.
5. *Горячкин Ю.Н., Косьян Р.Д.* Бакальская коса – уникальный природный объект Крымского полуострова (обзор) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря.– 2018.– вып.4.– С.5-14.
6. *Современное состояние береговой зоны Крыма* / Под ред. Ю.Н.Горячкина.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2015.– 252 с.
7. *Крыленко В.В., Кочергин А.Д., Крыленко М.В.* Новые данные о гранулометрическом составе отложений Анапской пересыпи // *Океанология*.– 2016.– т.5, № 1.– С.154-158.
8. *Косьян А.Р.* Роль прибрежных моллюсков в формировании карбонатных осадков Бакальской косы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря.– 2018.– вып.4.– С.81-91.
9. *ГОСТ 12536-79.* Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава.
10. *ГОСТ 25100-2011.* Грунты. Классификация.
11. *Руднев В.И.* Особенности рельефа дна прибрежной зоны Бакальской косы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря.– 2018.– вып.4.– С.15-21.
12. *Зенкович Б.П.* Морфология и динамика советских берегов. Т.II. Северо-западная часть.– М.: Изд-во АН СССР, 1960.– С.117-125.
13. *Дивинский Б.В.* Гидродинамические условия вод в районе Бакальской косы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря.– 2018.– вып.4.– С.31-39.
14. *Крыленко В.В., Косьян Р.Д., Кочергин А.Д.* Закономерности формирования гранулометрического состава донных и пляжевых отложений Анапской пересыпи // *Океанология*.– 2011.– т.51, № 6.– С.1123-1134.
15. *Крыленко В.В., Крыленко М.В.* Исследование значимости и взаимосвязей природных факторов формирования гранулометрического состава отложений и рельефа аккумулятивных береговых форм Черного моря // *Геополитика и экогеодинамика регионов*.– Симферополь: ТНУ им. В.И.Вернадского.– 2014.– т.10, вып.1.– С.669-675.

Материал поступил в редакцию 16.10.2018 г.
После доработки 1.11.2018 г.

M.V.Krylenko, V.V.Krylenko

**STUDY OF THE GRANULOMETRIC COMPOSITION OF BEACH AND BOTTOM
SEDIMENTS OF THE BAKALSKAYA SPIT**

The methodology and results of study of the granulometric composition of beach and bottom sediments building the Bakalskaya Spit (the Black Sea) and the adjacent submarine slope are given. The analysis of obtained data is showed that the long-shore distribution of the grain-size composition indicates on differences in hydro-lithodynamics conditions of individual coast sections more than the location of main beach-forming sediment sources. The obtained data are important for understanding of current lithodynamics processes and the evolution of the Bakalskaya Spit geosystem.

KEYWORDS: sea coasts, accumulative forms, beach sediments, grain-size analysis, the Bakalskaya Spit