

Л.В.Харитонова, В.В.Фомин

*Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь***ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА ПОТОКА НАНОСОВ  
В БЕРЕГОВОЙ ЗОНЕ ЗАПАДНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КРЫМА  
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

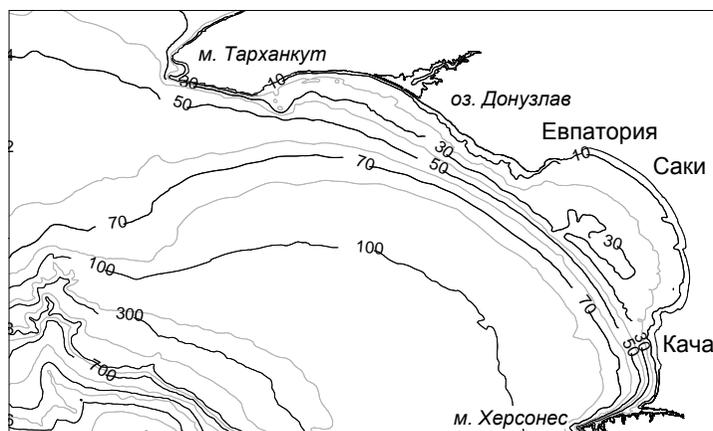
Выполнено математическое моделирование транспорта песчаного материала в прибрежной зоне Западного Крыма под действием стационарного штормового волнения с пространственным разрешением 200 м. Получены схемы потоков наносов для разных типов штормовых ситуаций. Выявлено, что основное перемещение материала средней крупности осуществляется до глубин 10 – 15 м. Максимальная интенсификация потока наносов происходит при юго-западном ветре. Подтверждено существование зависимости интенсивности перемещения материала на определенном участке от ориентации береговой линии относительно направления приходящих волн.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** *математическое моделирование, береговая зона, расход наносов, потоки наносов, берега Крыма, Черное море*

**Введение.** Одним из факторов формирования состояния береговой зоны Западного Крыма от Севастополя до м.Тарханкут (рис.1) является перемещение прибрежно-морских наносов, представленных преимущественно песчаным и песчано-гравийным материалом [1, 2]. Основополагающие представления о структуре вдольберегового перемещения наносов в береговой зоне региона базируются на схемах В.П.Зенковича [1], показывающих генеральное направление потоков наносов без детализации в зависимости от локальной ориентации береговой линии и изменчивости штормового воздействия. Согласно этим схемам, поток наносов на участке от м.Коса Северная (г.Севастополь) до м.Евпаторийский (г.Евпатория) зарождается в районе р.Бельбек и направлен на север до Евпаторийской бухты, где происходит разгрузка потока и отложение материала. Часть наносов на этот участок может поступать с северо-запада, огибая м.Евпаторийский. Основная масса материала на участке от м.Евпаторийский до м.Урет движется в сторону пересыпи оз.Донузлав. В ряде работ [2 – 5] приведены дополненные и уточненные схемы потоков наносов у побережья Западного Крыма, базирующиеся на волновых и ветро-волновых методах расчетов [6]. Так, в современном представлении выделяется несколько локальных литодинамических систем и ячеек, параметры которых существенно зависят от ветроволнового режима в прилегающей акватории Черного моря. Региональные исследования структуры гидро- и литодинамических параметров и возможных вариантов переформирования рельефа в береговой зоне Крыма на основе математического моделирования проводились авторами для районов Бакальской косы и г.Евпатория [7 – 10].

Основное влияние на переформирование рельефа в береговой зоне оказывает штормовое волнение, а при экстремально сильных штормах могут происходить катастрофические разрушения гидротехнических сооружений портов

© Л.В.Харитонова, В.В.Фомин, 2017



Р и с . 1 . Карта рельефа дна у Западного Крыма.

и бережных, коммуникаций и зданий, расположенных в непосредственной близости от берега. Для Западного Крыма наиболее разрушительными являются сильные шторма (4 – 6 баллов и более), которые, согласно [11], обусловлены ветрами юго-западного и западного секторов и имеют повторяемость 0,3 и 0,1 % соответственно.

Одной из задач исследований береговой зоны Крыма является расчет расходов потоков прибрежно-морских наносов. Особую актуальность эти исследования приобретают при планировании хозяйственного освоения прибрежной зоны Крыма, включающего строительство различных видов гидротехнических сооружений, защиту и создание новых искусственных пляжей, обеспечение экологической безопасности в регионе.

В данной работе представлены результаты численного моделирования транспорта песчаного материала средней крупности (0,5 мм) в прибрежной зоне Западного Крыма под действием стационарного штормового волнения на основе методики расчета транспорта наносов, изложенной в [7, 12].

**Материалы и методы исследований.** Численное моделирование выполнялось в три этапа. На первом этапе рассчитывались характеристики ветрового волнения у Западного побережья Крыма на основе спектральной волновой модели SWAN (*Simulating Waves Nearshore*) [13, 14]. Для повышения точности расчетов применялся 2-х шаговый метод вложенных сеток. На первом шаге рассчитывалось волнение для всего Азово-Черноморского бассейна с горизонтальным разрешением  $\sim 4,5$  км (сетка  $246 \times 160$ ). Далее проводился расчет волнения для акватории, прилегающей к Западному Крыму, с горизонтальным разрешением  $\sim 200$  м (сетка  $870 \times 1000$ ). В качестве граничных условий на жидкой границе использовались результаты расчетов, полученные на первом шаге. Разрешение модели по угловой координате составляло  $10^\circ$ , частотный интервал равнялся 0,04 – 2 Гц.

На втором этапе по известным из волновой модели градиентам радиационных напряжений определялись установившиеся поля волновых течений в береговой зоне, с использованием модели мелкой воды, описанной в [7]. Поскольку вклад градиентов радиационных напряжений в формирование

волновых течений является определяющим, то непосредственное влияние ветра на течения в прибрежной зоне не учитывалось.

На третьем этапе по методике, изложенной в [12], рассчитывались компоненты удельных расходов наносов в каждом узле расчетной сетки.

Численное моделирование выполнялось на вычислительном кластере Морского гидрофизического института РАН [15].

Основными факторами, формирующими режим волнения, являются скорость ветра, распределение глубин и эффективные разгоны. В акваторию, прилегающую к берегам Западного Крыма, может проникать интенсивное волнение из открытого моря. Поэтому моделирование волн, течений и потоков наносов проводилось для 6 наиболее волноопасных направлений ветра: южного, юго-западного, западного, северо-западного, северного и северо-восточного. Ветер задавался однородным по пространству и неизменным во времени. Рассматривались три значения скорости ветра: 10; 12,5; 15 м/с. Во всех вариантах расчетов длительность модельного шторма составляла 1 сутки.

В данной работе рассматривалась модельная ситуация, при которой все дно сложено из песка средней крупности с медианным диаметром 0,5 мм. Такой размер наносов использовался для оценки потенциальной несущей способности потока. Предполагалось, что материала достаточно для полного насыщения потоков наносов.

В результате были получены массивы величин и направлений удельного расхода наносов на сетке с шагом 200 м для всех рассматриваемых случаев.

**Анализ результатов.** Анализ пространственного распределения удельного расхода наносов показал, что во всех случаях основное перемещение материала осуществляется до глубин 10 – 15 м. Максимальные значения расхода наносов отмечаются при юго-западном ветре для всех градаций скорости ветра. Так, при юго-западном ветре 10 м/с максимальные значения удельного расхода наносов наблюдаются на глубинах 2 – 4 м и достигают 1 – 1,5 кг/м<sup>3</sup>. Усиление ветра до 12,5 м/с приводит к смещению зон максимальных значений расходов наносов (до 3,5 – 4,2 кг/м<sup>3</sup>) на глубины 3 – 6 м. При скорости ветра 15 м/с юго-западного направления происходит формирование устойчивых потоков наносов на глубинах 3 – 10 м (на отдельных участках до 15 м) с удельным расходом ~ 3 кг/м<sup>3</sup>, максимальные значения расходов при этом могут достигать 7,5 – 8,9 кг/м<sup>3</sup>.

Как показали расчеты, направления удельного расхода наносов не зависят от величины скорости ветра, поэтому далее анализируется серия расчетов только для скорости ветра 15 м/с. На рис.2 – 4 представлены схемы расхода наносов, стрелками показаны направления перемещения наносов.

Рассмотрим район южного берега п-ова Тарханкут от м.Урет на западе до м.Евпаторийский на востоке. Участок от м.Урет до пересыпи оз.Донузлав представляет собой абразионный берег (клиф, сложенный известняками мэотиса и сармата, увеличивается в сторону м.Тарханкут до высоты 60 м) с прислоненными песчаными пляжами шириной от 20 м в восточной части и до 3 – 5 м в бухточках западной части. Ширина пересыпи оз.Донузлав составляет от 200 до 400 м. На дне моря перед пересыпью до глубин 15 м расположен выпуклый песчаный подводный склон, осложненный подводными

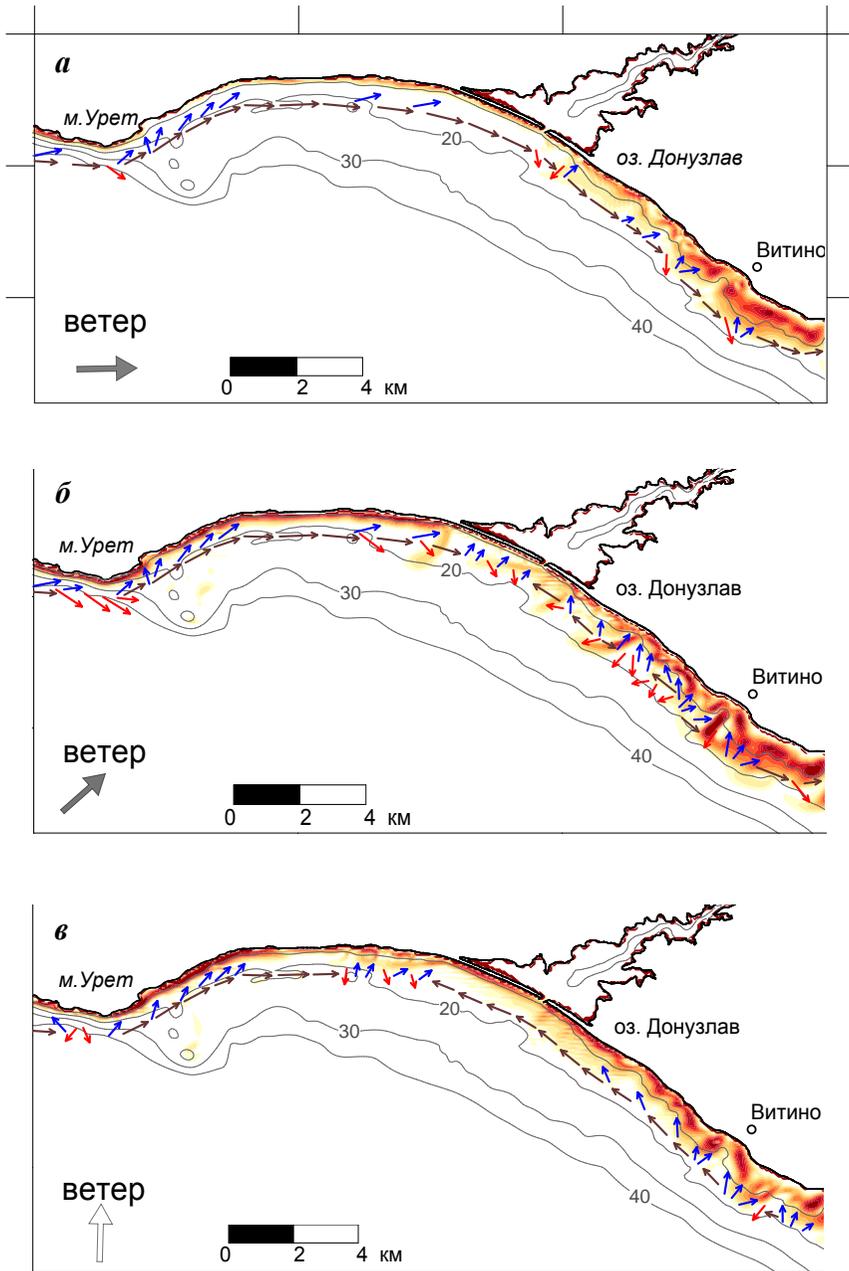
валами и литифицированными возвышенностями, пески берегового бара продолжают под водой, но их полоса, широкая у оз.Донузлав, сужается в западном и восточном направлении [16]. Побережье к юго-востоку представляет собой низкую каменистую равнину с озерами-лагунами. Ширина песчаных пляжей на этом участке варьирует от 5 до 25 м. По данным [5] в этом районе берег практически стабилен. Тем не менее, на некоторых участках отступления берега может достигать  $0,5 \text{ м}^3/\text{год}$ .

Южный берег п-ова Тарханкут ориентирован с северо-запада на юго-восток и закрыт от влияния волнения в секторе от северо-западного до востока-юго-восточного направлений. Наибольшее переформирование береговой зоны происходит при волнении, приходящем из сектора запад – юг. Анализ результатов моделирования показал, что при западном ветре со скоростью  $15 \text{ м/с}$  вдоль всего района формируется вдольбереговой поток наносов, направленный с запада на юго-восток (рис.2 а). У м.Урет основное перемещение материала осуществляется на глубинах  $2 - 4 \text{ м}$  (значения удельного расхода достигают  $2 - 3 \text{ кг/м}^2/\text{с}$ ), восточнее блокирующее влияние мыса приводит к снижению значений расхода потока до  $0,5 - 1 \text{ кг/м}^2/\text{с}$  и перемещению материала к берегу. К юго-востоку от пересыпи оз.Донузлав наблюдается усиление расхода потока до  $4 - 5 \text{ кг/м}^2/\text{с}$ , вдольбереговой поток направлен на северо-восток, на некоторых участках значимыми являются двусторонние миграции материала поперек подводного склона.

При штормах, приходящих от юго-запада, на всем рассматриваемом районе увеличиваются значения удельного расхода наносов: до  $4 - 5 \text{ кг/м}^2/\text{с}$  в западной части района и до  $6 - 8 \text{ кг/м}^2/\text{с}$  – в восточной (рис.2, б). В береговой зоне м.Урет увеличивается составляющая потока наносов, перемещающая материал от берега. Вдольбереговой поток наносов направлен от м.Урет к Косе Северной оз.Донузлав, где перемещение материала осуществляется в поперечном берегу направлении. На остальной части рассматриваемого района наблюдаются двусторонние вдольбереговые и поперечные миграции материала. Можно выделить участок берега вблизи п.Витино, где преобладает перемещение материала к берегу, западнее поток направлен к оз.Донузлав, а восточнее – к м.Евпаторийский.

При ветре южного румба (рис.2, в) значения удельных расходов наносов снижаются до средних величин  $3 - 5 \text{ кг/м}^2/\text{с}$ . В структуре потоков наносов можно выделить два вдольбереговых потока от м.Урет и от п.Витино, встречающиеся в районе древнего городища Беляус, расположенного западнее пересыпи оз.Донузлав.

Второй район охватывает береговую зону от м.Евпаторийский до м.Коса Северная (г.Севастополь). Район представлен дугой Каламитского залива с аккумулятивными отступающими берегами на севере и абразионно-обвальными южнее оз.Кызыл-Яр (п.Новофёдоровка Сакского района). Береговая зона г.Евпатория в значительной степени подвержена переформированию под действием антропогенных факторов, детальное моделирование динамических процессов этого участка проводилось в [7 – 8, 10]. К юго-востоку на  $24 \text{ км}$  простирается низкий лиманный берег, представляющий собой часть единого аккумулятивного образования пересыпей озер Сасык, Сакского и Кызыл-Яр. Пересыпь сложена песком, ракушей, гравием и галькой, на севере



Р и с . 2 . Карта-схема расходов наносов и направлений перемещения материала в районе оз.Донузлав при действии западного (а), юго-западного (б) и южного (в) ветра 15 м/с (коричневые стрелки – перемещение материала вдоль берега, синие – к берегу, красные – от берега).

имеет ширину около 2 км, и от 30 до 70 м – на юге. На подводном склоне пересыпи до глубин 12 – 15 м дно покрыто песками, глубже – илистыми алевритами и илами. Согласно [5], на этом участке отступление берега практически отсутствует. Побережье к югу от оз.Кызыл Яр имеет выровненную береговую линию субмеридионального простирания с выступами мысов Лукулл, Маргопуло и мыса у п.Николаевка. Клиф сложен красно-бурыми и желтовато-бурыми плиоцен-плейстоценовыми глинами с прослоями песчаников, гравелитов и конгломератов древнеаллювиального происхождения. Высота береговых обрывов колеблется от 8 до 20 м (до 40 м у п. Береговое) [1 – 2]. Количества материала повсеместно недостаточно для формирования широких пляжей и защиты берега от разрушения, на подводном склоне вскрыт глинистый бенч, глубже 10 м расположены алевриты и илы. Отступление берега на разных участках составляет от 0,5 до 1 м<sup>3</sup>/год [5].

Анализ результатов расчетов полей удельных расходов наносов показал, что наибольшее переформирование береговой зоны может происходить при действии ветров, приходящих из сектора северо-запад – юг. При этом наблюдается явная зависимость интенсивности перемещения материала на определенном участке от простирания береговой линии относительно направления приходящих волн. Так, при действии северо-западного ветра 15 м/с (рис.3, а) блокирующее влияние п-ова Тарханкут приводит к тому, что потоки наносов формируются только на южном участке. От п.Николаевка поток мощностью 1 – 2 кг/м/с направлен на юг до п.Песчаное, где встречается с потоком противоположного направления от м.Лукулл. Южнее м.Лукулл вдольбереговой поток наносов направлен к югу и достигает мощности 2,5 – 3,5 кг/м/с.

При действии западного ветра структура потоков усложняется (рис.3, б). Можно выделить несколько локальных ячеек со встречными вдольбереговыми потоками наносов:

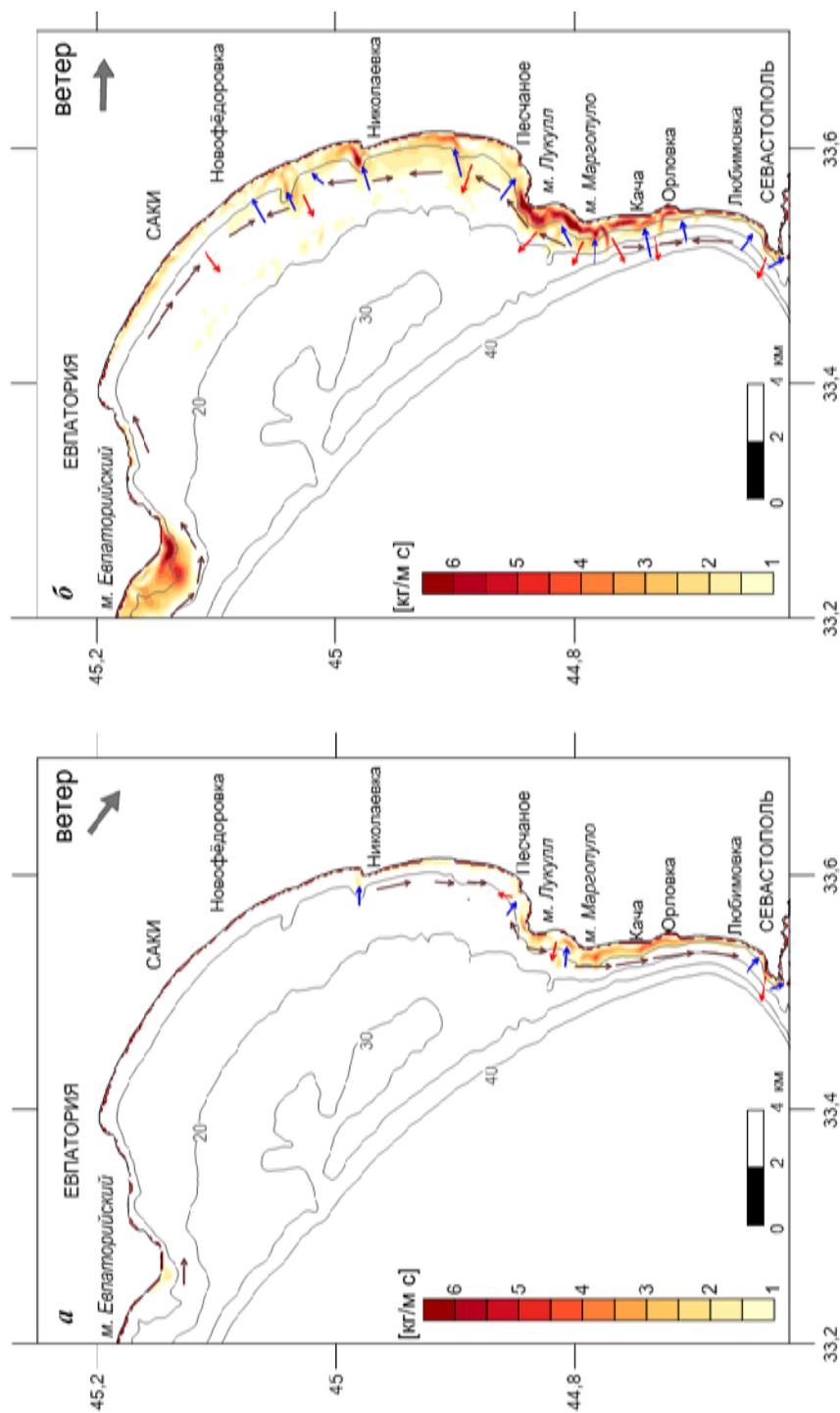
- от пересыпи оз.Сасык до п.Николаевка, где разнонаправленные потоки мощностью 1 – 2 кг/м/с встречаются в районе п.Новофедоровка. Материал, приносимый этими потоками в зону конвергенции, в основной своей массе перемещается к урезу воды, формируя пересыпь оз.Кызыл-Яр;

- от мыса у п.Николаевка, где к урезу перемещается материал с подводной песчаной отмели, до м.Лукулл. Конвергенция потоков происходит в береговой зоне п.Николаевка. Поперечные миграции материала отмечаются в районе п.Песчаное;

- район м.Лукулл – м.Маргопуло характеризуется увеличением значений расхода наносов до 5 – 8 кг/м/с и преобладающим перемещением материала поперек берегового склона;

- от м.Маргопуло вдольбереговой поток наносов направлен к югу до п.Орловка, где встречается с потоком противоположного направления, берущим начало от п.Любимовка. В береговой зоне п.Кача отмечаются двусторонние поперечные миграции материала.

В случае возникновения шторма, генерируемого юго-западным ветром 15 м/с, перемещение материала происходит на всем протяжении района исследования (рис.4, а). Значения удельного расхода наносов в береговой зоне мысов Евпаторийский, Лукулл и Маргопуло достигают максимальных зна-



Р и с . 3 . Карта-схема расходов наносов и направлений перемещения материала в береговой зоне на участке Севастополь – Египетория при действии северо-западного (а) и западного (б) ветра 15 м/с (коричневые стрелки – перемещение материала вдоль берега, синие – к берегу, красные – от берега).

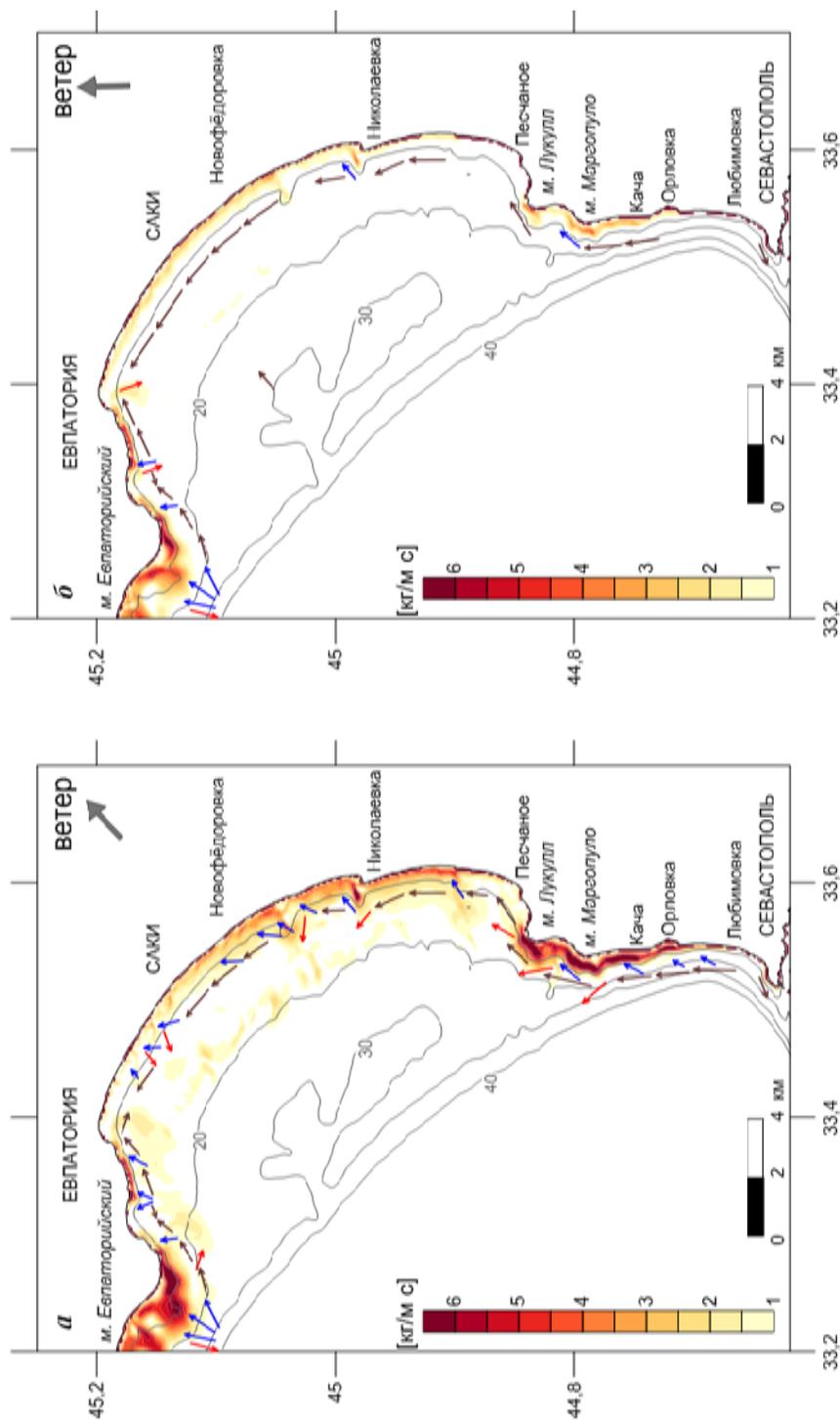


Рис. 4. Карта-схема расходов наносов и направлений перемещения материала в береговой зоне на участке Севастополь – Евпатория при действии юго-западного (а) и южного (б) ветра 15 м/с (коричневые стрелки – перемещение материала вдоль берега, синие – к берегу, красные – от берега).

чений до 6 – 9 кг/м/с. Можно выделить два разнонаправленных вдольбереговых потока наносов. Первый поток зарождается в районе п.Любимовка, часть материала из потока транспортируется к урезу в районе п.Орловка и Кача. Далее поток огибает мысы Маргопуло, Лукулл и мыс у п.Николаевка, на траверзе которых часть материала выносится в глубоководную зону. В районе пересыпей озер Кызыл-Яр и Сасык поток становится нестабильным, преобладают двусторонние поперечные миграции материала, прекращается поток в северной части пересыпи оз.Сасык. Второй поток перемещает материал от м.Евпаторийского, вдоль побережья г.Евпатории, где часть материала может перемещаться к берегу до северного участка пересыпи оз.Сасык.

При южном ветре (рис.4, б) схема потоков наносов имеет более простую конфигурацию. Ощутимым становится блокирующее влияние Гераклейского п-ова и м.Лукулл. В южной части перемещение материала осуществляется только на участке от п.Кача до м.Лукулл, значения удельного расхода наносов составляют 2 – 3 кг/м/с. Также вдольбереговой поток существует в береговой зоне от п.Николаевка до восточной окраины г.Евпатория. Более мощный поток (до 3 – 4 кг/м/с) направлен от м.Евпаторийский в восточном направлении. Конвергенция этих потоков происходит в Евпаторийской бухте, где формируется поперечный поток, способствующий выносу материала в мористую часть.

**Заключение.** Выполнено математическое моделирование транспорта песчаного материала в прибрежной зоне Западного Крыма для разных градаций скорости и направления штормового ветра. Расчеты выполнены на сетке с горизонтальным разрешением 200 м для скоростей ветра: 10; 12,5; 15 м/с.

Полученные данные позволили проанализировать пути возможного перемещения материала по подводному береговому склону при различных сценариях волнового воздействия. Анализ результатов расчетов показал, что при всех рассмотренных штормовых ситуациях основное перемещение песка диаметром 0,5 мм осуществляется до глубин не более 10 – 15 м. Изменение скорости ветра не сказывается на направлении расхода наносов.

Максимальная интенсификация удельных расходов наносов происходит при юго-западном ветре. Наблюдается явная зависимость интенсивности перемещения материала на определенном участке от ориентации береговой линии относительно направления приходящих волн.

Обработка модельных данных позволила получить схемы потоков наносов вдоль Западного побережья Крыма для штормовых направлений ветра, учитывающие возможные двусторонние миграции материала по подводному склону.

Рассмотренные модельные ситуации не отражают перемещения прибрежно-морских наносов в условиях зарождения, развития и затухания реального шторма. В дальнейших работах планируется проводить расчеты транспорта песчаного материала в прибрежной зоне для штормовых ситуаций, используя натурные данные и данные атмосферных ре-анализов.

Работа выполнена в Морском гидрофизическом институте РАН в рамках НИР № 0827-2014-0010 «Фундаментальная океанология».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зенкович В.П.* Берега Черного и Азовского морей.– М.: Географгиз, 1958.– 373 с.
2. *Шуйский Ю.Д.* Основные закономерности морфологии и динамики западного берега Крымского полуострова // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь, 2005.– вып.13.– С.62-72.
3. *Игнатов Е.И., Орлова М.С., Саннини А.Ю.* Береговые морфосистемы Крыма.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014.– 266 с.
4. *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, 2013.– вып.27, т.1.– С.363-368.
5. *Современное состояние береговой зоны Крыма* / Под ред. д.г.н. Ю.Н.Горячкина. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2015.– 252 с.
6. *Руководство по морским гидрологическим прогнозам.*– С.Пб: Гидрометеиздат, 1994.– 525 с.
7. *Иванов В.А., Фомин В.В.* Математическое моделирование динамических процессов в зоне море-суша.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008.– 363 с.
8. *Горячкин Ю.Н., Фомин В.В., Харитонов Л.В.* Динамика наносов в Евпаторийской бухте // Вестник Одесского Национального университета. Географические и геологические науки.– 2013.– т.18, вып.2.– С.64-72.
9. *Фомин В.В., Алексеев Д.В., Харитонов Л.В.* Моделирование морфодинамики Бакальской косы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь, 2013.– вып.27.– С.374-380.
10. *Fomin V.V., Goryachkin Yu.N., Kharitonova L.V., Lazorenko D.I., Alekseev D.V.* Numerical Modeling of Shoreline Changes for Yevpatoria, Crimea // Proc. 12th Intern. Conf. Mediter. Coast. Environ. (MEDCOAST 15).– 2015.– v.1.– P.737-744.
11. *Горячкин Ю.Н., Репетин Л.Н.* Штормовой ветро-волновой режим у Черноморского побережья Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь, 2009.– вып.23.– С.56-69.
12. *Иванов В.А., Михинов А.Е.* Прогноз динамики наносов в прибрежной зоне моря (практические рекомендации и примеры расчетов) / Препринт.– Севастополь: МГИ НАН Украины, 1991.– 51 с.
13. *SWAN Cycle III version 40.85. User Manual.*– Netherlands: Delft University of Technology, 2011.– 119 p. <http://www.swan.tudelft.nl>
14. *Харитонов Л.В., Фомин В.В.* Статистические характеристики ветрового волнения в прибрежной зоне Западного Крыма по данным ретроспективных расчетов за 1979 – 2010 гг. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь, 2012.– вып.26, т.1.– С.24-33.
15. *Фомин В.В., Бородин Д.В., Иванов В.А.* Вычислительный кластер Морского гидрофизического института НАН Украины // Системы контроля окружающей среды.– Севастополь, 2010.– С.121-123.

16. *Зенкович В.П.* Основы учения о развитии морских берегов.– М.: Изд-во АН СССР, 1962.– 710 с.

Материал поступил в редакцию 15.02.2017 г.  
После доработки 10.03.2017 г.

L.V.Kharitonova, V.V.Fomin

**SPATIAL STRUCTURE OF SEDIMENT FLOW IN THE COASTAL ZONE  
OF THE WESTERN CRIMEA ON ACCORDING NUMERICAL SIMULATION**

The sand transport in the coastal zone of the Western Crimea with a spatial resolution of 200 m was simulated under stationary storm waves. Patterns of sediment flows for different storm situations were obtained. It was revealed that the main movement of medium-sized sediment is carried out up to 10 – 15 m depth. The maximum intensification of the sediment flow occurs at the south-west wind. The dependence of the intensity of sediment transport in a certain area on the shoreline orientation with respect to incoming wave direction was confirmed.

**KEYWORDS:** simulation, coastal zone, sediment consumption, sediment flow, Crimean coast, the Black Sea