

Ю.Н. Горячкин, В.Ф. Удовик, Л.В. Харитонова

## **Оценки параметров потока наносов у западного берега Бакальской косы при прохождении сильных штормов в 2007 году**

На основе ветроэнергетического метода получены оценки распределения параметров вдольберегового потока наносов, сформировавшегося у западного берега Бакальской косы (Северо-Западный Крым) при прохождении сильных штормов в январе и ноябре 2007 г., приведших к существенному размыву западного берега косы и отступанию береговой линии.

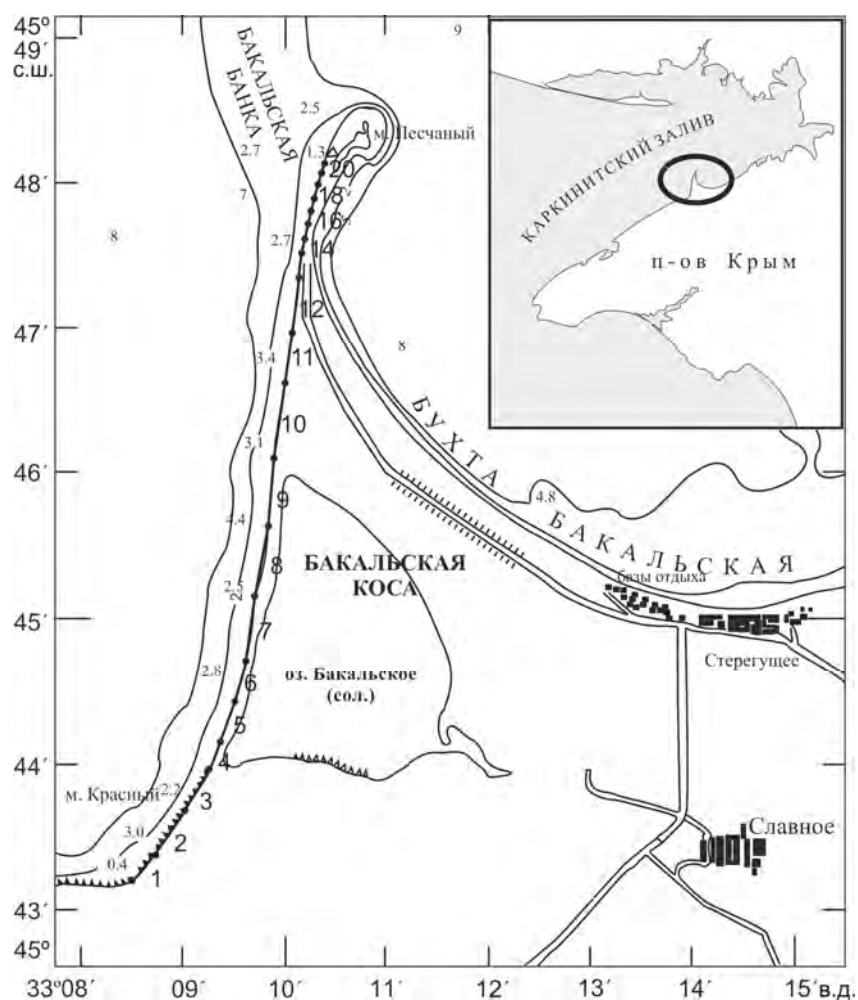
Расчеты проводились с использованием реальных значений направления и скорости ветра, зафиксированных в исследуемом районе. Проведен анализ тенденций переформирования береговой зоны в результате неравномерного распределения интенсивности вдольберегового перемещения наносов. При рассмотрении причин образования промоин в пересыпи Бакальского озера и в узкой дистальной части тела косы сделана попытка интерпретации величин, характеризующих силу лобового воздействия волнения. Полученные результаты подтверждаются данными натурных наблюдений.

**Введение.** Бакальская коса расположена в Каркинитском заливе Черного моря (рис. 1) и морфологически представляет собой свободную двойную аккумулятивную форму берегового рельефа длиной около 8 км [1]. В прикорневой части тела косы располагается Бакальское озеро, которое с запада отделено от прилегающей акватории моря пересыпью, имеющей в среднем ширину около 50 м. Территория косы входит в состав регионального ландшафтного парка «Бакальская коса», площадью 1520 га [2]. Наиболее активно используется рекреационный потенциал песчаных пляжей, имеющих ширину от 30 до 70 м и являющихся популярным местом отдыха.

После прохождения над акваторией Черного моря сильного шторма 24 – 25 января и катастрофического шторма 11 – 12 ноября 2007 г. были зафиксированы значительные размывы и существенное переформирование западного берега Бакальской косы. Первый шторм привел к отступанию береговой черты на расстояние до 50 м. В результате произошло разрушение участка дороги, линии электропередач и капитальных строений, а также появилась промоина в северной части пересыпи Бакальского озера. Под воздействием второго шторма произошло дальнейшее отступление западного берега, также сопровождавшееся разрушением объектов инфраструктуры. При этом не только образовались промоины в пересыпи озера, но и произошел размыв непосредственно тела косы. Во время экспедиции Морского гидрофизического института НАН Украины, проведенной 20 ноября 2007 г., была зафиксирована промоина шириной около 300 м, полностью отделившая наиболее удаленную (дистальную) часть от основного тела косы [3].

Основные представления о перемещении наносов непосредственно у берегов Бакальской косы и вдоль примыкающих участков береговой зоны (БЗ) Каркинитского залива базируются на схеме, приведенной в работе [4]. Здесь

показано, что среднее за год перемещение обломочного материала у западного берега косы происходит с юга на север, т. е. от корневой части к оконечности косы. Далее поток разделяется на две ветви, одна из которых направлена на север и обеспечивает перемещение части наносов в сторону Бакальской банки, а другая огибает оголовок косы и питает наносами ее восточный берег. Поступление материала, формирующего западную часть тела косы, осуществляется в основном путем вдольберегового перемещения наносов с прилегающего участка БЗ, простирающегося до м. Тарханкут. Наносы состоят главным образом из кварцевого песка и ракуши с примесью известнякового песка и гравия, а также довольно крупных оолитовых зерен [4, 5]. Донное питание западного берега путем перемещения наносного материала из глубоководной области возможно только в районе дистальной части косы и непосредственно ее оголовка [6].



**Р и с. 1.** Схема аппроксимации береговой черты прямолинейными отрезками (показаны жирными линиями и нумерацией) в районе исследований (Бакальская коса, Северо-Западный Крым)

В настоящее время отмечается интенсификация переформирования западного берега Бакальской косы под воздействием отдельных сильных штормов, особенно с преобладающими направлениями ветра в секторе ЮЗ – З. Результаты проведенных ранее исследований не дают представления о характере перемещения наносов при прохождении отдельного шторма, а также о зависимости параметров вдольберегового потока наносов от локальной ориентации береговой линии.

Целями данной работы являются получение оценок интенсивности потоков наносов, формирующихся под воздействием реальных штормов, и определение основных тенденций переформирования западного берега Бакальской косы в зависимости от пространственной неоднородности параметров потока.

**Методика расчетов.** Расчеты параметров потока наносов проведены на базе ветроэнергетического метода (ВЭМ) [7], который посредством эмпирической зависимости устанавливает связь непосредственно между энергией ветра, передаваемой водной среде, и интенсивностью перемещения наносов. ВЭМ может применяться при расчетах для отмелых песчаных и песчано-гравийных берегов бесприливных морей с любым профилем подводного берегового склона. При этом, однако, не учитывается воздействие зыби, а также вводится предположение об однородности поля ветра на прилегающей акватории вдоль всей протяженности лучей разгона волнения.

Преимуществом данного метода является возможность расчета относительной интенсивности потока наносов при минимальном количестве входных параметров, что позволяет осуществлять оперативную оценку ветроволнового воздействия на перемещение морских прибрежных наносов на участках берега, имеющих значительную протяженность, и рассматривать применение ВЭМ как начальный этап моделирования в рамках комплексных исследований динамики наносов и переформирования рельефа БЗ.

Западный берег Бакальской косы характеризуется плавным изгибом береговой линии и параллельных ей изобат. В исследуемом районе преобладают малые уклоны дна. Пляжи и подводный береговой склон сложены подвижными грунтами указанного выше состава, что соответствует условиям применимости ВЭМ [7].

В основе расчетной схемы ВЭМ лежит суммирование энергии, передаваемой водной среде при ветрах различных направлений. Диапазон всех направлений ветров, вызывающих движение наносов, разбивается на сектора, для каждого из которых общее выражение для передаваемой энергии может быть записано в виде

$$e = \frac{\sum p_i W_i^2 D^{1/3}}{1000} R ,$$

где  $p$  – повторяемость ветра в пределах сектора (% или доли единицы);  $W$  – скорость ветра (м/с);  $D$  – длина луча разгона волнения ветром (км);  $R$  – безразмерный коэффициент, учитывающий понижение количества передаваемой энергии под влиянием мелководья. Индекс  $i$  относится к градациям скорости ветра, определенным через 1 м/с. В данной работе принято  $p = 1$  в связи с тем,

что производится прямое суммирование с использованием эквидистантных значений скорости ветра. Коэффициент  $R = 1$  при  $H > 30$ , где  $H$  – средняя глубина бассейна по лучу разгона волнения (м). В диапазоне  $1 \leq H \leq 30$  коэффициент принимает значения  $0,018 \leq R \leq 0,953$ , зависимость  $R$  от  $H$  близка к линейной (см. табл. 26 в [7]). В связи с несоблюдением правила сохранения размерности в приведенной формуле, рассчитываемые по ВЭМ величины традиционно выражаются в условных единицах (усл. ед.).

Величина  $e$ , характеризующая передачу энергии ветра в пределах отдельно взятого сектора, интерпретируется как вектор, который направлен под определенным углом к береговой линии и может быть представлен в виде вдольбереговой  $t$  и нормальной  $b$  составляющих. В этой процедуре используются эмпирические угловые функции  $f_t$  и  $f_b$ , которые учитывают основные закономерности рефракции волн на мелководье и характер изменения скорости перемещения наносов в зависимости от угла подхода волн. Составляющая  $t$  интерпретируется как наносодвижущая сила, определяющая интенсивность движения наносов вдоль берега. Принимается, что величинам векторов вдольбереговой составляющей, направленных вправо от смотрящего с берега наблюдателя, присваиваются положительные значения ( $t_+$ ), а величинам векторов, направленных влево, – отрицательные ( $t_-$ ). Составляющая  $b$ , направленная по нормали к береговой линии, интерпретируется как сила прибоя, или сила лобового воздействия волнения. Она не вызывает вдольберегового перемещения наносов, но может существенно влиять на переформирование профиля подводного берегового склона [8].

В результате суммирования рассчитанных для каждого сектора значений  $b$ ,  $t_+$  и  $t_-$  получаются следующие величины, описывающие структуру и параметры потока наносов:  $B = \sum b$  – прибойная составляющая;  $T_+ = \sum t_+$  и  $T_- = \sum t_-$  – положительная и отрицательная составляющие наносодвижущей силы, характеризующие миграции наносов в противоположных направлениях;  $T = T_+ + T_-$  – суммарная вдольбереговая составляющая, определяющая интенсивность потока наносов и их результирующее перемещение;  $A = |T_+| + |T_-|$  – амплитуда размаха вдольбереговых миграций наносов.

Рассчитываемые по ВЭМ величины интенсивности вдольберегового потока наносов в первую очередь позволяют качественно оценить характер перемещения наносов и соответствующие тенденции переформирования рельефа БЗ в исследуемом районе. В представляемой работе интерпретация изменений интенсивности вдольберегового потока наносов на смежных участках БЗ проведена в предположении его насыщенности [7, 8], что подразумевает равенство мощности потока и его емкости. Согласно существующим определениям, вдольбереговым потоком будем считать суммарное перемещение определенной массы наносов по пляжу и подводному береговому склону за определенный промежуток времени. Перемещение прибрежно-морских наносов в потоке складывается из множества подвижек, которые могут менять направление и характеризуют вдольбереговые миграции наносов. Емкость потока определяется максимально возможным количеством (объемом или весом) наносов, которое может перемещаться волнами и течениями, возникшими при данных гидрометеорологических условиях, вдоль исследуемого участка берега в единицу времени. В свою очередь, мощность потока характеризуется факти-

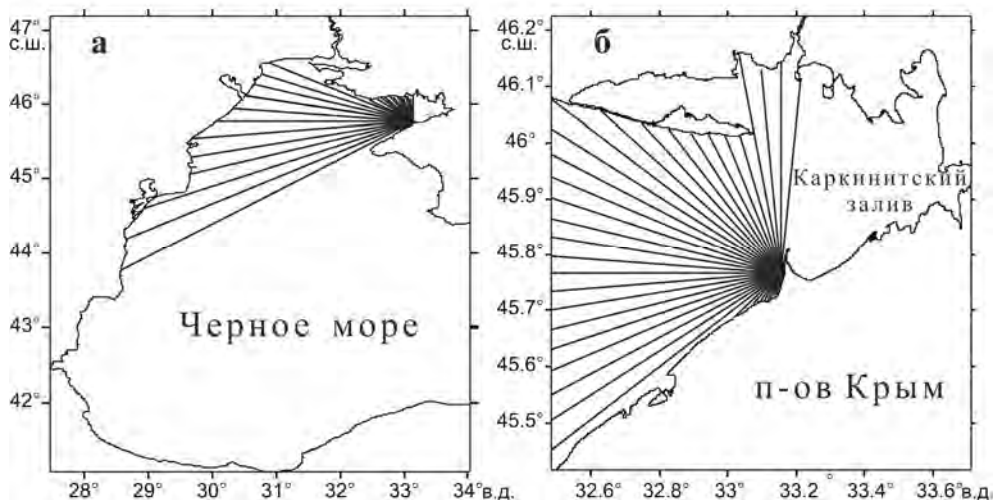
ческим количеством транспортируемых в потоке наносов в единицу времени. Насыщенность потока определяется соотношением величин его емкости и мощности. При прочих равных условиях поток считается насыщенным в случае равенства этих величин.

В предположении насыщенности вдольберегового потока наносов увеличение рассчитываемых по ВЭМ значений интенсивности потока  $T$  аналогично увеличению его емкости. Для насыщения потока необходимо увеличение его мощности и соответственно вовлечение в движение дополнительных объемов наносов за счет размыва БЗ. В случае уменьшения емкости происходит уменьшение мощности потока, в результате чего появляется излишек материала, который поток не в состоянии перемещать, что приводит к аккумуляции наносов.

**Входные параметры.** Исследуемый район включает западный берег Бакальской косы, за исключением небольшого участка, расположенного в ее дистальной части, где происходит разделение потока на две ветви и существует возможность донного питания. Аппроксимация береговой черты произведена ломаной линией, состоящей из 20 прямолинейных отрезков (рис. 1), имеющих длину от 140 до 930 м в зависимости от конфигурации берега. Для каждого отрезка определено значение экспозиции, представляющей собой азимут нормали к отрезку, направленной в сторону моря (таблица). Далее, с учетом экспозиции, для центров отрезков рассчитаны длины разгона волнения  $D$  и соответствующие средние глубины  $H$  по лучам разгона. Для этого использовались оцифрованные карты западной части Черного моря и Каркинитского залива. Лучи разгона волнения для каждого отрезка проводились с шагом  $5^\circ$  по угловой координате в пределах 120-градусных секторов в обе стороны от нормали. После чего, с учетом конфигурации берегов акватории, производилась стыковка данных, полученных по картам разного масштаба. На рис. 2 приведен пример подготовки входных параметров для отрезка 8. Априори можно отметить наибольшую вероятность подхода к западному берегу косы сильного волнения, сформировавшегося под воздействием ветра в секторе ЮЗ – СЗ.

Длина отрезков аппроксимации и их экспозиция

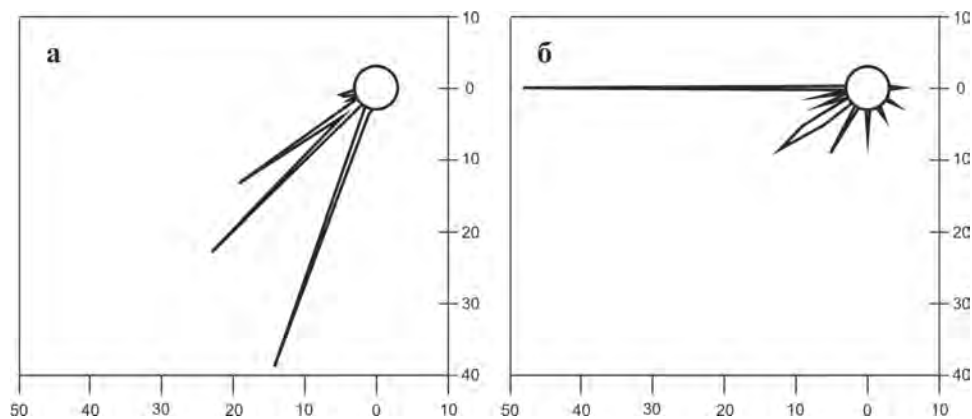
Номер отрезка	Экспозиция, град	Длина, м	Номер отрезка	Экспозиция, град	Длина, м
1	315,0	450	11	275,0	645
2	305,0	720	12	277,5	695
3	300,0	535	13	280,0	325
4	290,0	400	14	282,5	165
5	285,0	540	15	285,0	165
6	280,0	520	16	287,5	160
7	280,0	770	17	290,0	170
8	277,5	920	18	295,0	180
9	275,0	840	19	300,0	160
10	272,5	930	20	320,0	140



**Р и с. 2.** Схема подготовки входных параметров о длине разгона волнения и средней глубине бассейна по лучу разгона по данным оцифрованных карт западной части Черного моря (а) и Каркинитского залива (б) (пример для отрезка 8)

В качестве информации о направлении и скорости ветра использованы данные срочных трехчасовых наблюдений за реальным ветром на морской гидрометеостанции Черноморское при прохождении штормов 24 – 25 января и 11 – 12 ноября 2007 г. Входные параметры сформированы в виде рядов ежечасных значений направления и скорости ветра, полученных в результате интерполяции исходных данных.

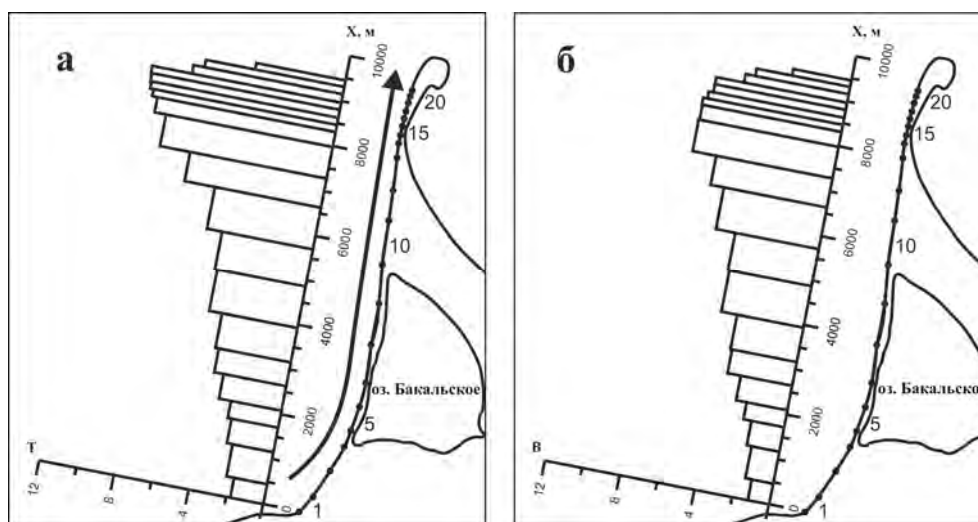
Во время шторма 24 – 25 января зафиксировано преобладающее направление ветра в секторе ЮЮЗ – ЮЗ (рис. 3, а). Устойчивый ветер ЮЗ направления со скоростями, близкими к максимальной (10 м/с), непрерывно наблюдался на протяжении 33 ч.



**Р и с. 3.** Розы повторяемости направлений ветра (%) для штормовых ситуаций 24 – 25 января (а) и 11 – 12 ноября (б) 2007 г.

При прохождении шторма 11 – 12 ноября полная продолжительность воздействия ветра, используемая при проведении расчетов, составила 40 ч. На протяжении всего шторма было зафиксировано направление ветра преимущественно в секторе 3 – ЗЮЗ (рис. 3, б). После резкого усиления ветра его скорость достигала 20 м/с уже к 6 ч утра и 25 м/с к 9 ч, а затем удерживалась на отметке 19 м/с до конца суток 11 ноября. Далее было зафиксировано снижение скорости ветра до 12 м/с в период с 0 до 9 ч 12 ноября и уменьшение до 5 м/с к 15 ч.

**Обсуждение результатов.** Согласно результатам расчетов под воздействием шторма 24 – 25 января произошло формирование суммарного вдольберегового потока северного направления (рис. 4, а). Миграция наносов в южном направлении полностью отсутствовала. Фактическое зарождение потока отмечается в южной части исследуемого участка БЗ, его интенсивность возрастает на отрезках 1 – 18 при продвижении к дистальной части косы. Вследствие этого практически вдоль всего западного берега Бакальской косы возникает необходимость вовлечения в движение объемов наносов для насыщения потока.

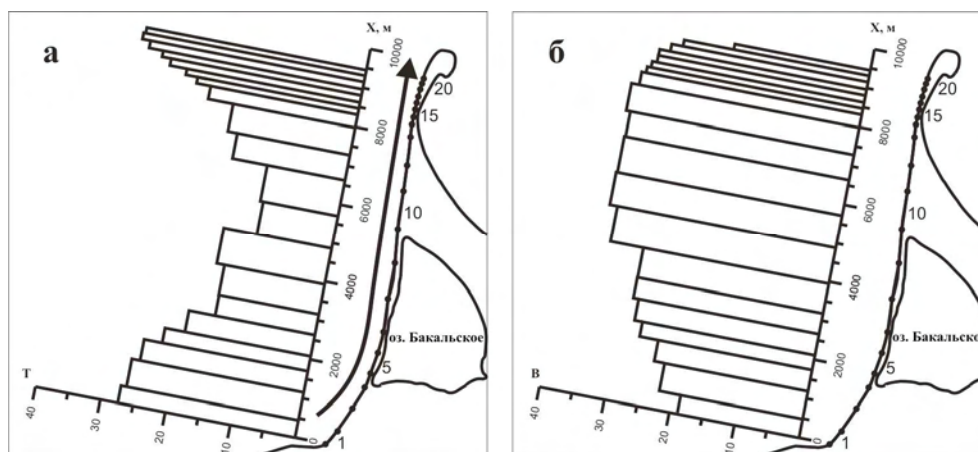


**Р и с. 4.** Направление и интенсивность ( $T$ , усл. ед.) вдольберегового потока наносов (а) и распределение силы лобового воздействия волнения ( $B$ , усл. ед.) (б) для западного берега Бакальской косы при прохождении шторма 24 – 25 января 2007 г. (стрелкой показано направление вдольберегового потока наносов;  $x$  – развертка длины береговой линии)

В прикорневой части косы происходит формирование зоны «волновой тени» (отрезки 1 – 10) вследствие ограничения Тарханкутским п-вом длины лучей разгона волнения для ветра в секторе ЮЮЗ – ЮЗ, имевшего наибольшую повторяемость направления при прохождении шторма 24 – 25 января (рис. 3, а). Таким образом, наиболее вероятно, что основное перемещение наносов на данном участке БЗ происходило под воздействием волн, генерированных ветром ЗЮЗ направления, имевшим меньшую продолжительность.

Достаточно резкое возрастание интенсивности потока на отрезках 11 – 15 предполагает соответствующее увеличение вероятности размыва БЗ. Помимо этого, на отрезках 12 – 15 отмечается также максимум силы лобового воздействия волнения (рис. 4, б). Совместное влияние данных факторов, очевидно, и привело к размыву берега на данном участке (см. далее рис. 6, а).

Образовавшийся при прохождении шторма 11 – 12 ноября результирующий поток наносов также имеет северное направление (рис. 5, а) и характеризуется отсутствием миграции наносов на юг. Однако структура распределения значений относительной интенсивности существенно отличается от предыдущей, а максимальные значения практически в 3 раза превышают рассчитанные для первого шторма.



**Р и с. 5.** Направление и интенсивность ( $T$ , усл. ед.) вдольберегового потока наносов (а) и распределение силы лобового воздействия волнения ( $B$ , усл. ед.) (б) для западного берега Бакальской косы при прохождении шторма 11 – 12 ноября 2007 г. (стрелкой показано направление вдольберегового потока наносов;  $x$  – развертка длины береговой линии)

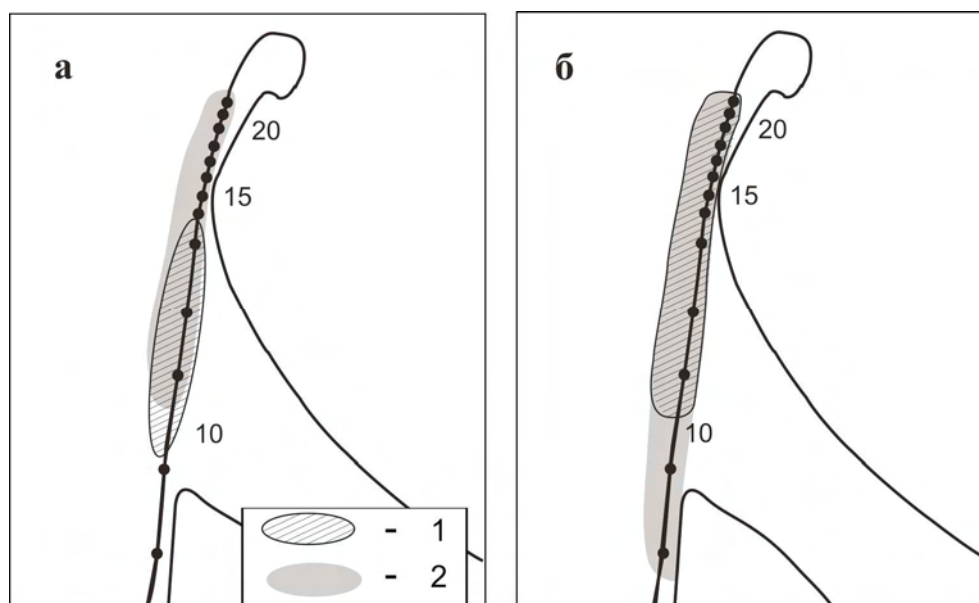
Формируются фактически две однонаправленные ветви потока, разделенные участком со значительным уменьшением емкости в районе отрезков 9, 10. Происходит это в результате того, что при направлении ветра с ЗСЗ – З уже отсутствует зона волновой тени и длины разгона волнения незначительно отличаются для всех отрезков. Следовательно, параметры волнения, приходящего из северо-западной части Черного моря, достаточно однородно распределены для всего западного берега косы. В данном случае параметры потока наносов на различных участках в наибольшей степени зависят от экспозиции береговой линии, определяющей угол подхода волнения по отношению к нормали, который имеет наименьшие значения в районе отрезков 6 – 10. Данное распределение интенсивности вдольберегового потока наносов предполагает возможность аккумуляции наносов на отрезках 4, 5, 6, 9 и интенсивный размыв БЗ в районе отрезков 11 – 18. Последнее отчетливо наблюдалось при проведении экспедиции 20 ноября. При близких к максимуму значениях интенсивности потока наносов в дистальной части косы (отрезки 19, 20) прослеживалась тенденция к безвозвратному выводу наносного мате-



риала за пределы расчетной области, а соответственно и за пределы литодинамической ячейки западного берега косы.

Логично предположить, что образование промоины в устьи дистальной части косы во многом обусловлено резким возрастанием емкости потока на отрезках 14 – 19 при ее больших абсолютных значениях. Следует также учитывать характер распределения величин и абсолютные значения силы лобового воздействия волнения (рис. 5, б), которые близки к максимуму на отрезках 8 – 19. В частности, наличие минимума емкости вдольберегового потока на отрезках 9, 10, согласно используемой методике, предполагает возможность транзита и аккумуляции наносов, поступающих из прикорневой части косы. Однако после ноябрьского шторма в районе отрезка 9 зафиксировано образование промоины в пересыпи Бакальского озера, имевшей ширину около 60 м. В данном случае наиболее вероятно, что определяющим фактором выступило воздействие нормальной составляющей волнения, что можно в значительной степени отнести и к образованию широкой промоины (около 300 м) в дистальной части косы.

**Выводы.** На основе ВЭМ разработан комплекс программного обеспечения, который позволяет оперативно исследовать зависимость распределения интенсивности вдольберегового потока наносов от направления и скорости штормового ветра для протяженных участков берега, а также проводить оценки основных тенденций перераспределения объемов наносов и соответствующего переформирования рельефа БЗ при возникновении реальных штормовых ситуаций.



**Р и с. 6.** Участки интенсивного размыва западного берега Бакальской косы после прохождения штормов 24 – 25 января (а) и 11 – 12 ноября (б) 2007 г.: 1 – результаты расчетов; 2 – данные экспедиционных наблюдений

Участки наиболее вероятного интенсивного размыва, выделенные по результатам расчетов с использованием фактических значений направления и скорости штормового ветра, достаточно хорошо совпадают с зафиксированными в реальных условиях изменениями берегов при проведении экспедиционных работ (рис. б, а, б).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зенкович В.П.* Бакальская коса // Сб. работ Института океанологии АН СССР. – 1955. – № 4.
2. *Ена В.Г., Ена Ал.В., Ена Ан.В.* Заповедные ландшафты Тавриды. – Симферополь: Бизнес-Информ, 2004. – 424 с.
3. *Горячкин Ю.Н., Иванов В.А.* Проявление климатических изменений в динамике берегов Западного Крыма // Доп. НАН України. – 2008. – № 10. – С. 118 – 122.
4. *Зенкович В.П.* Берега Черного и Азовского морей. – М.: Географиздат, 1958. – 371 с.
5. *Зенкович В.П.* О селекции материала на оконечностях морских кос // Тр. Института океанологии. Т. 21. – М.: Изд-во АН СССР, 1957. – С. 133 – 136.
6. *Невесский Е.Н.* Новые данные о генезисе Маркитанской и Бакальской банок на Черном море // Тр. Океанографической комиссии. Т 4. – М.: Изд-во АН СССР, 1959. – С. 122 – 126.
7. *Руководство по методам исследований и расчетов перемещения наносов и динамики берегов при инженерных изысканиях.* – М.: Гидрометеиздат, 1975. – 240 с.
8. *Зенкович В.П.* Основы учения о развитии морских берегов. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – 710 с.
9. *Кнапс Р.Я.* Гидрометеорологический метод определения характеристик режима движения песчаных наносов. Технические условия по проектированию морских берегоукрепительных сооружений (ВСН 80 – 62). – М.: Оргтрансстрой, 1962.
10. *Справочник по климату Черного моря.* – М.: Гидрометеиздат, 1974. – 405 с.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,  
Севастополь  
E-mail: yngor@yandex.ru,  
ydovik126@bigmir.net,  
lukharitonova@rambler.ru

Материал поступил  
в редакцию 15.05.09  
После доработки 14.07.09

**АНОТАЦІЯ** На основі вітроенергетичного методу одержані оцінки розподілу параметрів уздовж берегового потоку наносів, який сформувався біля західного берега Бакальської коси (Північно-Західний Крим) при проходженні сильних штормів у січні і листопаді 2007 р., що призвели до суттєвого розмиву західного берега коси і відступу берегової лінії.

Розрахунки проводилися з використанням реальних значень напрямів і швидкості вітру, зафіксованих у досліджуваному районі. Проведено аналіз тенденцій переформовування берегової зони в результаті нерівномірного розподілу інтенсивності переміщення наносів уздовж берега. При розгляді причин утворення промоїн в пересипі Бакальського озера та у вузькій дистальній частині тіла коси зроблена спроба інтерпретації величин, які характеризують силу лобової дії хвилювання. Отримані результати підтверджуються даними натурних спостережень.

**ABSTRACT** Based on the wind-energetic method estimated are the distributions of the parameters of the alongshore sediment flux formed at the Bakal'skaya spit western coast (northwestern Crimea) at heavy gales in January and November, 2007 resulted in essential wash out of the spit western coast and the coastline recession.

The calculations are performed using real value of the wind direction and speed registered in the area under study. The trends of reformation of the coastal zone resulted from non-uniform distribution of intensity of alongshore sediment transport are analyzed. At consideration of the reasons of gullies' formation in the bar of the Bakal'skaya lagoon and in the narrow distal part of the spit body, an attempt to interpret the values characterizing the force of frontal wave effect is made. The obtained results are confirmed by the data of field observations.