

УДК 551.468.1

## МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ВДОЛЬБЕРЕГОВОГО ПОТОКА НАНОСОВ В БУХТЕ КОКТЕБЕЛЬ (ЧЕРНОЕ МОРЕ)

*Харитонов Л. В.<sup>1</sup>, Фомин В. В.<sup>2</sup>, Горячкин Ю. Н.<sup>3</sup>, Алексеев Д. В.<sup>4</sup>*

*<sup>1, 2, 3, 4</sup> Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Российская Федерация*

*E-mail: <sup>1</sup>l.kharitonova@mhi-ras.ru, <sup>2</sup>v.fomin@mhi-ras.ru, <sup>3</sup>yngor@mhi-ras.ru, <sup>4</sup>d.alekseev@mhi-ras.ru*

В статье исследуется межгодовая изменчивость емкости вдольберегового потока наносов в районе набережной пгт Коктебель (г. Феодосия, Крым) за современный климатический период. На основе данных реанализа ветрового волнения, полученных с использованием спектральной модели SWAN и полей приземного ветра ERA-Interim и ERA5 за период 1979–2020 гг., для шести прямолинейных участков проведены расчеты направления и интенсивности перемещения наносов. Показано, что на всех участках существуют потоки наносов противоположных направлений. По мере продвижения с юго-запада на северо-восток, вклад отрицательных составляющих в общем балансе потоков уменьшается, а положительных – возрастает. Выявлена направленность перемещения наносов от мысов в центральную часть бухты, что обусловлено ориентацией участков берега относительно преобладающего направления штормового волнения.

**Ключевые слова:** Крымский полуостров, бухта Коктебель, береговая зона, потоки наносов, ветровое волнение, математическое моделирование, SWAN.

### ВВЕДЕНИЕ

Уникальные природно-климатические условия прибрежных территорий Крымского полуострова являются важным рекреационным ресурсом региона. Для привлечения отдыхающих береговая зона должна соответствовать стандартам безопасности. Однако, согласно [1, 2], значительная часть берегозащитных сооружений Крыма находится в аварийном и предаварийном состояниях.

Объектом исследования данной работы является береговая зона бухты Коктебель Черного моря (г. Феодосия, пгт Коктебель) (рис. 1), расположенная на юго-восточном побережье п-ова Крым. Береговая линия бухты образует практически правильный полукруг длиной около 7 км, ограниченный с юго-запада м. Планерный (массив Карадаг), с северо-востока — м. Лагерный. Берег в ее западной части горно-абразионный мелкобухтовый с глыбовыми навалами на урезе и подводном склоне, клифы состоят из вулканических пород. Севернее породы сменяются на рыхлые глинистые сланцы и мергели высотой до 30 м. В вершине бухты побережье практически полностью застроено. По преобладающим современным экзогенным процессам его можно отнести к аккумулятивному, техногенному. Берег в северо-восточной части является абразионно-обвальным в рыхлых породах, активный клиф высотой около 10 м сложен бурыми четвертичными и серыми юрскими глинами (возвышенность Биюк-Янышар). Пляжи на этом участке имеют ширину от 0 до 3 м, выклиниваются к востоку. Восточная оконечность бухты — узкий полуостров м. Лагерный состоит из серых юрских глин, у подножия находится бенч, прикрытый небольшим количеством щебня [1, 3].

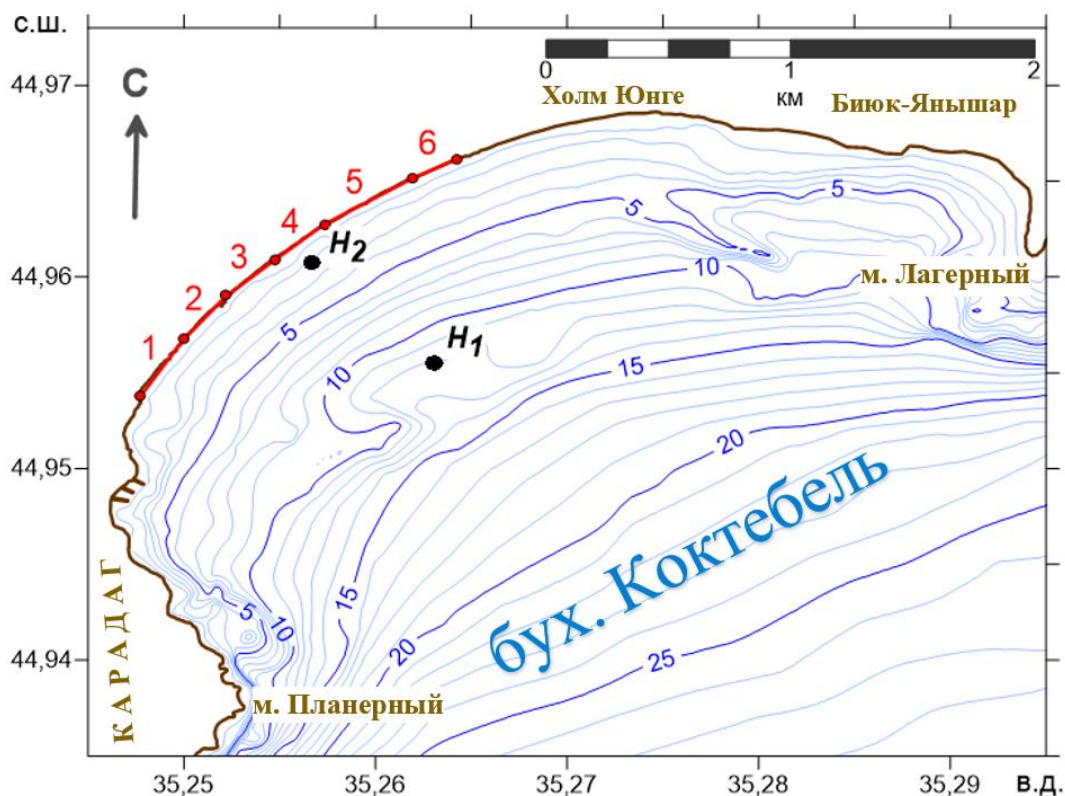


Рис. 1. Карта-схема бух. Коктебель. Черные точки  $H_1$  и  $H_2$  — точки, в которых рассчитывались режимные характеристики волн. Красные линии и цифры — положение и нумерация участков берега, для которых выполнялся расчет емкости потока наносов.

Составлено авторами.

Бухта Коктебель мелководная: изобата 5 м проходит в среднем на расстоянии 200–300 м от уреза воды, а на ее внешней границе глубины составляют около 10–15 м. Наиболее волноопасным для района исследований является сектор восток–юго-запад. Поступление пляжеобразующего материала происходит в основном в период штормовой деятельности за счет абразии клифов и бенча, размыва оползней и осыпей преимущественно из восточной части бухты, а также поступления биогенного материала с подводного берегового склона [3, 4]. Миграция наносов вдоль берега происходит в зависимости от режима волнения от мысов в бухту и вдоль бухты. До строительства набережной и зарегулирования водотоков существенными источниками материала в береговую зону были абразия в центральной части бухты и выносы из береговых эрозионных форм (в том числе рекой Янтык) [4].

Антропогенное преобразование береговой зоны бух. Коктебель началось около века назад. Подробный анализ изменений береговой зоны бухты проведен в работе

## МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ВДОЛЬБЕРЕГОВОГО ПОТОКА НАНОСОВ В БУХТЕ КОКТЕБЕЛЬ (ЧЕРНОЕ МОРЕ)

[3], здесь же приведем его краткое описание. Первая набережная была построена в 30-х гг. XX в., в конце 50-х гг. была создана новая набережная, частично выдвинутая на пляж, который тогда имел ширину 20–30 м. С 1954 до 1967 г. в центральной части бухты и с пляжа велась промышленная добыча песчано-гравийных смесей, что привело к резкому сокращению ширины пляжей (до 0–10 м). После шторма в январе 1967 г. набережная длиной более 2 км находилась в аварийном состоянии, под угрозой разрушения оказались здания. В 1967 г. по проекту Ялтинского отдела института «ГИПРОкоммунстрой» были проведены аварийные берегозащитные мероприятия, включавшие создание искусственных пляжей. К 1981 г. привозной материал практически полностью сместился к центру бухты, в западной части берег вновь оказался в аварийном состоянии. В 1984–1990 гг. по проекту Ялтинского отдела института «Укрюжгипрокоммунстрой» было выполнено строительство откосно-ступенчатой набережной, восстановление ширины пляжей и создание резервной отсыпки щебня объемом 144 тыс. м<sup>3</sup> на западном участке побережья. Более 10 лет в центральной части бухты пляж шириной до 45 м оставался достаточно стабильным. В юго-западной части (участок резервной отсыпки) наблюдалась устойчивая деградация пляжа (исходной шириной 42–43 м). Новый этап деградации береговой зоны начался в XXI в., когда на участке резервной отсыпки развернулось капитальное строительство. К 2021 г. пляж на этом участке полностью исчез, в районе набережной он сократился до 2–12 м. Восточнее конфигурация и ширина пляжей практически не изменились (15–42 м). У холма Юнге и далее на восток ширина пляжей стабильна и составляет 33–42 м.

В настоящее время ведется реконструкция набережной и восстановление пляжей бух. Коктебель общей протяженностью 1850 м. Проект реконструкции набережной пгт Коктебель (г. Феодосия) разработан в рамках Федеральной целевой программы «Социально-экономического развития Республики Крым и г. Севастополя...». В создании проекта приняли участие несколько организаций: ООО «Берегозащита» (г. Краснодар), ООО «Институт «КРЫМГИНИТИЗ» (г. Симферополь) и ФГБУН ФИЦ «Морской гидрофизический институт РАН» (г. Севастополь). Одной из задач в ходе разработки проекта была оценка направления и емкости вдольбереговых потоков наносов в зависимости от продолжительности и интенсивности штормов разных направлений.

Цель данной работы – исследовать межгодовую изменчивость емкости вдольберегового потока наносов в районе реконструируемого участка набережной пгт Коктебель за современный климатический период.

Изучение потоков наносов в береговой зоне морей является важной практической задачей. Однако, натурные измерения особенно в период шторма сопряжены с определенными трудностями. Анализ измерений характеристик потоков наносов в береговой зоне Крыма (Бакальской косы, г. Евпатории и о. Коса Тузла) посвящены работы [5, 6]. С развитием методов дистанционного зондирования Земли из космоса появляются методики исследования переноса донного материала по данным космических снимков [7]. В большинстве своем исследования литодинамических характеристик проводятся на основе полуэмпирических расчетных методик, в которых учитываются положение

береговой линии относительно приходящего волнения, длина разгона волны и индуцирующая сила (ветер или волнение). Для Крымского п-ова такие расчеты проводились для береговой зоны его западной части [8–11] и о. Коса Тузла [12–13].

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Согласно [14], под емкостью вдольберегового потока наносов  $Q$  понимается максимально возможный объем наносов, который волны способны перемещать вдоль данного участка берега за определенный период времени. В настоящей работе рассчитывались суммарные за год значения  $Q$ . Береговая линия района проектирования аппроксимировалась шестью прямолинейными участками (рис. 1).

Для расчета емкости вдольберегового потока наносов  $Q$  (м<sup>3</sup>/сут) на каждом участке использовалась формула [14]:

$$Q = 0,087 \frac{\rho}{\rho_s} g \frac{h_{cr}^3 \bar{\tau}}{k_{ок} D_{50}} \sin 2\theta_b, \quad (1)$$

где  $\rho$  — плотность воды;  $\rho_s$  — плотность частиц наносов;  $g$  — ускорение силы тяжести;  $h_{cr}$  — высота волн 1%-ной обеспеченности в зоне обрушения;  $\bar{\tau}$  — средний период волн;  $D_{50}$  — средняя крупность пляжеобразующего материала;  $k_{ок}$  — коэффициент, учитывающий влияние класса окатанности пляжевого материала на интенсивность его перемещения;  $\theta_b$  — угол между внешней нормалью к береговой линии  $\theta_N$  и направлением подхода волн к берегу  $\theta$ .

Для расчетов вдольбереговых потоков наносов  $Q$  на каждом участке использовались данные ретроспективных расчетов ветровых волн за период 1979–2020 гг. с дискретностью по времени 1 ч. Массив данных (далее – массив SWAN-ERA) был получен с помощью численной спектрально-дискретной модели SWAN (Simulating Waves Nearshore) [15, 16] на неструктурированной расчётной сетке со сгущением в прибрежной зоне Черного моря [17]. Атмосферным форсингом модели служили данные глобальных атмосферных реанализов *ERA-Interim* и *ERA5* [18]. Валидация модели была проведена на основе данных измерений волнения на морской платформе в Каркинитском заливе Черного моря [19].

Из массива SWAN-ERA был выбран узел расчетной сетки, расположенный в центре бухты Коктебель на изобате ~11,5 м (точка  $H_1$  на рис. 1). Для этой точки были сформированы многолетние ряды параметров, включающие: скорость и направление ветра на высоте 10 м; высоту значительных волн  $h_s$ ; средний период волн  $\bar{\tau}$ ; среднее направление волнения  $\theta$ ; пиковый период волн  $\tau_p$ . Графики исходных рядов  $h_s$  и  $\bar{\tau}$  приведены на рисунках 2 и 3, их основные статистические характеристики (максимум, среднее, медиана, среднеквадратическое отклонение (СКО) даны в таблице 1. Длина исходных рядов  $n = 368\ 184$ . Среднее многолетнее значение направления волн  $\theta$  равно 146°.

Анализ данных ветрового волнения показал, что более половины всех штормов, определяемых как ситуации, когда высоты значительных волн равны или превышают 1,57 м, приходят в исследуемый район из сектора восток–восток-юго-восток (рис. 4). Штормовые волны более 2,5 м проникают в бухту от востока-юго-

МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ВДОЛЬБЕРЕГОВОГО ПОТОКА НАНОСОВ  
В БУХТЕ КОКТЕБЕЛЬ (ЧЕРНОЕ МОРЕ)

востока. Штормовые ситуации могут длиться от 5,6 до 34,3 сут (среднее значение – 16,4 сут), при этом с ноября по март возникают наиболее продолжительные штормовые ситуации (более 7 сут).

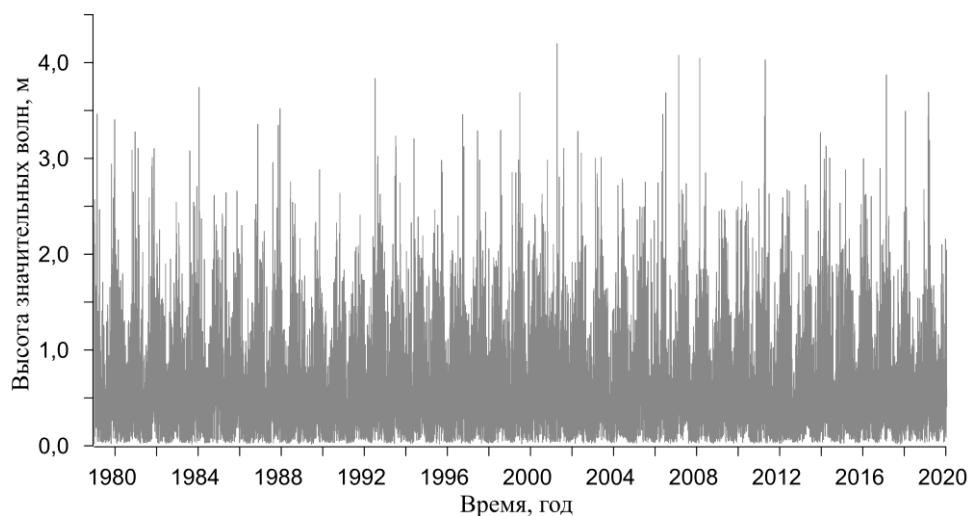


Рис. 2. Высота значительных волн (м) в центральной части бух. Коктебель в точке  $H_1$  на глубине  $\sim 11,5$  м по данным SWAN-ERA  
Составлено авторами.

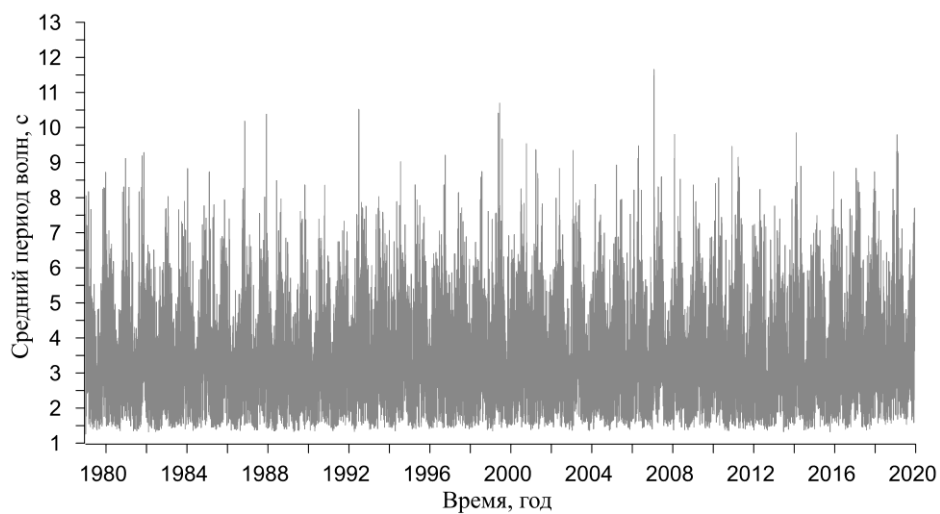


Рис. 3. Средний период волн (с) в центральной части бух. Коктебель в точке  $H_1$  на глубине  $\sim 11,5$  м по данным SWAN-ERA  
Составлено авторами.

Таблица 1.

Статистические характеристики исходных рядов  $h_s$  и  $\bar{\tau}$  в центральной части бух. Коктебель в точке  $H_1$  на глубине  $\sim 11,5$  м по данным SWAN-ERA

Статистические характеристики	Градации статистических характеристик			
	Максимум	Среднее	Медиана	СКО
Высота значительных волн $h_s$ , м	4,19	0,61	0,49	0,48
Средний период волн $\bar{\tau}$ , с	11,7	3,5	3,3	1,21

Составлено авторами.

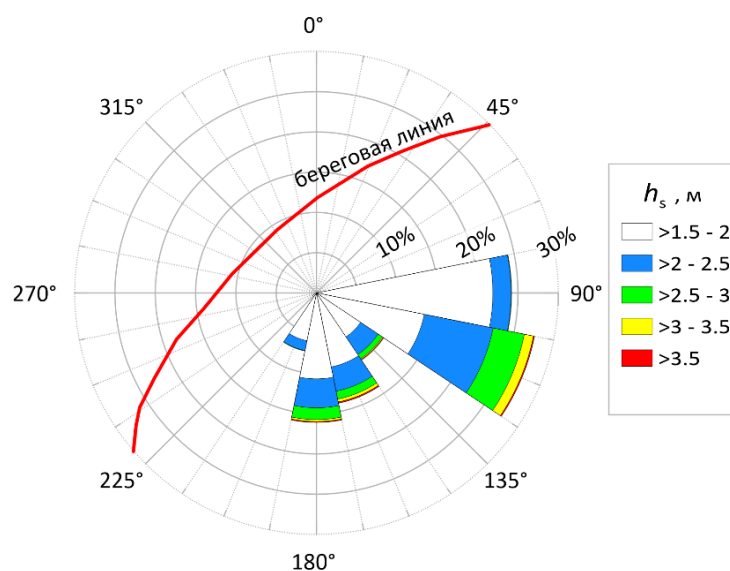


Рис. 4. Роза штормового волнения в центральной части бух. Коктебель на глубине 12 м по данным реанализа волнения SWAN-ERA за период 1979–2020 гг.

Красной кривой показана береговая линии исследуемого района;  
 $h_s$  — высота значительных волн (м).

Составлено авторами.

В формуле (1) наиболее сложным является задание значений высот волн 1%-ной обеспеченности в зоне обрушения ( $h_{cr}$ ), поскольку точка, в которой задаются волны, расположена на глубине равной  $\sim 11,5$  м, а глубина последнего обрушения волн составляет 2 м. (точки  $H_1$  и  $H_2$  на рис. 1, соответственно).

Пересчет значений  $h_s$  с глубины  $H_1$  на глубину  $H_2$  осуществлялся с помощью модели SWAN по следующему алгоритму [15, 16]. Первоначально был реализован 5-тишаговый метод вложенных сеток: на первом шаге моделировались поля волнения во всем Черноморском бассейне; на втором и третьем шагах волнение рассчитывалось для областей, включающих п-ов Крым и южное побережье Крыма соответственно; на четвертом шаге определялись волновые поля в области, включающей бухту Коктебель и прилегающую к ней акваторию; на пятом шаге

## МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ВДОЛЬБЕРЕГОВОГО ПОТОКА НАНОСОВ В БУХТЕ КОКТЕБЕЛЬ (ЧЕРНОЕ МОРЕ)

рассчитывались поля волн в западной части залива Коктебель. На втором и всех последующих шагах параметры ветровых волн на жидких границах расчетных областей определялись интерполяцией модельных данных, полученных на предыдущем шаге. Для построения рельефа дна расчетных областей проводилась оцифровка батиметрических карт Черного моря. Модельный рельеф дна в пятой расчетной области с разрешением  $\sim 6 \times 6$  м создан на основе данных промеров в бухте Коктебель.

При численном моделировании волновых полей на 5 вложенных сетках использовались расчетные скорости приземного ветра для района Феодосии (табл. 2). Время действия ветра составляло 16 ч, что соответствовало средней продолжительности расчетных штормов 4 %-ной режимной обеспеченности в исследуемом районе [20]. Угловое разрешение модели SWAN составляло  $10^\circ$ . По частотной координате, изменяющейся от 0,02 до 2 Гц, использовалась неравномерная сетка с 31 расчетным узлом. Расчеты выполнялись на вычислительном кластере Морского гидрофизического института РАН.

Для точек  $H_1$  и  $H_2$  выбирались значения высот значительных волн  $h_s$ , рассчитанных при действии ветров всех румбов повторяемостью 1 раз в 1 год и 1 раз в 25 лет (табл. 2). На основе сопоставления отношения полученных значений  $h_s$  была получена эмпирическая зависимость  $k_b(k_s)$ , переводящая значения  $h_s$  с глубины  $H_1$  на глубину  $H_2$  (табл. 3).

Конкретное значение высоты значительных волн  $h_s$  для глубины последнего обрушения волн определялось из таблицы 3 линейной интерполяцией. Затем по полученному значению  $h_s$  рассчитывалась высота волны 1%-ной обеспеченности в системе шторма  $h_{1\%}$  по распределению для моря конечной глубины [21]. После этого вычислялась высота волн 1%-ной обеспеченности в зоне обрушения  $h_{cr}$  по формуле:

$$h_{cr} = \min(h_{1\%}, h_{max}), \quad (2)$$

где  $h_{max} = \gamma H_b$  — максимально возможная высота волны, которая может существовать при заданной глубине  $H_b = 2$  м;  $\gamma = 0,78$  [22].

С учетом результатов анализа гранулометрических характеристик проб наносов в районе набережной бух. Коктебель, полученных в ноябре 2021 г. [23], расчеты потока наносов  $Q$  проводились для средней крупности пляжеобразующего материала  $D_{50} = 4$  мм. Коэффициент, учитывающий влияние класса окатанности пляжевого материала на интенсивность его перемещения  $k_{ок}$ , принимался равным 1.

При определении суммарного за год значения потока наносов учитывались только те значения  $Q$ , для которых волны направлены в сторону берега, т. е., когда выполняется условие:

$$|\theta_N - \theta| < 90^\circ. \quad (3)$$

В противном случае, полагалось, что  $Q = 0$ . Положительные значения  $Q$  соответствуют потоку наносов, направленному с северо-востока на юго-запад, отрицательные значения – потоку наносов, перемещающему материал с юго-запада на северо-восток.

Таблица 2.

Режимные характеристики скорости ветра и ветрового волнения  
в точках  $H_1$  на глубине  $\sim 11,5$  м и  $H_2$  на глубине 2 м

Направление ветра по румбам	Повторяемость					
	1 раз в год			1 раз в 25 лет		
	Скорость ветра, м/с	Высота значительных волн, м		Скорость ветра, м/с	Высота значительных волн, м	
		$z = H_1$	$z = H_2$		$z = H_1$	$z = H_2$
С	12,2	0,31	0,16	16,2	2,42	1,09
СВ	15,5	1,47	1,02	21,7	2,42	1,09
В	15,3	2,87	1,09	23,3	5,50	1,14
ЮВ	9,7	1,39	1,00	16,7	4,40	1,11
Ю	12,1	1,96	1,05	19,6	5,17	1,13
ЮЗ	14,4	1,57	1,03	19,8	2,74	1,11
З	14,3	0,76	0,40	20,1	1,44	0,97
СЗ	14,6	0,32	0,10	20,1	0,54	0,20

Составлено авторами.

Таблица 3.

Коэффициент  $k_b$  для перевода значений высоты значительных волн  $h_s$   
с глубины  $\sim 11,5$  м на глубину 2 м

$h_s, \text{ м}$	$\leq 0,61$	1,5	2,4	2,7	4,4	$\geq 5,5$
$k_b$	1,00	0,67	0,45	0,41	0,25	0,21

Составлено авторами.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рисунках 5–6 приведены диаграммы изменения по годам суммарной емкости вдольберегового потока наносов  $Q$  на участках 1–6. Светло-серым цветом показана положительная составляющая потока наносов ( $Q_p > 0$ ), темно-серым — отрицательная составляющая потока наносов ( $Q_n < 0$ ). Суммарный годовой поток наносов  $Q_s = Q_p + Q_n$  дан желтым цветом.

В таблице 4 приведены некоторые среднееголетние характеристики емкости суммарного годового потока наносов  $Q_s$  за период 1979–2020 гг., на участках 1–6. Во второй колонке для каждого участка даны значения угла внешней нормали  $\theta_N$ , относительно которой определяется угол направления подхода волн к берегу  $\theta_b$  в формуле (1).

Анализ приведенных диаграмм показывает, что на всех участках существуют как положительные, так и отрицательные составляющие потока наносов. Это



## МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ВДОЛЬБЕРЕГОВОГО ПОТОКА НАНОСОВ В БУХТЕ КОКТЕБЕЛЬ (ЧЕРНОЕ МОРЕ)

обусловлено особенностями ориентации участков берега относительно преобладающего направления штормового волнения (сектор 90–112,5°).

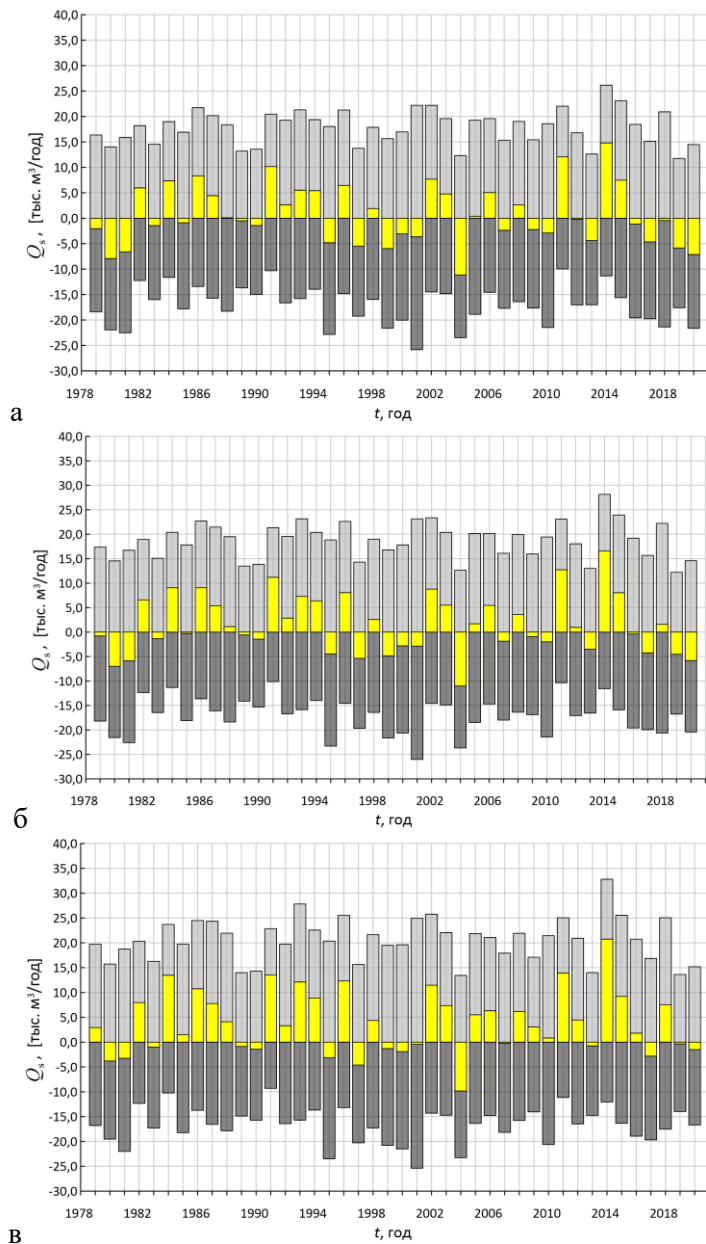


Рис. 5. Распределение по годам емкости суммарного вдольберегового потока наносов (желтый) и его положительной (светло-серый) и отрицательной (темно-серый) составляющих на участках 1 (а), 2(б), 3 (в).

Составлено авторами.

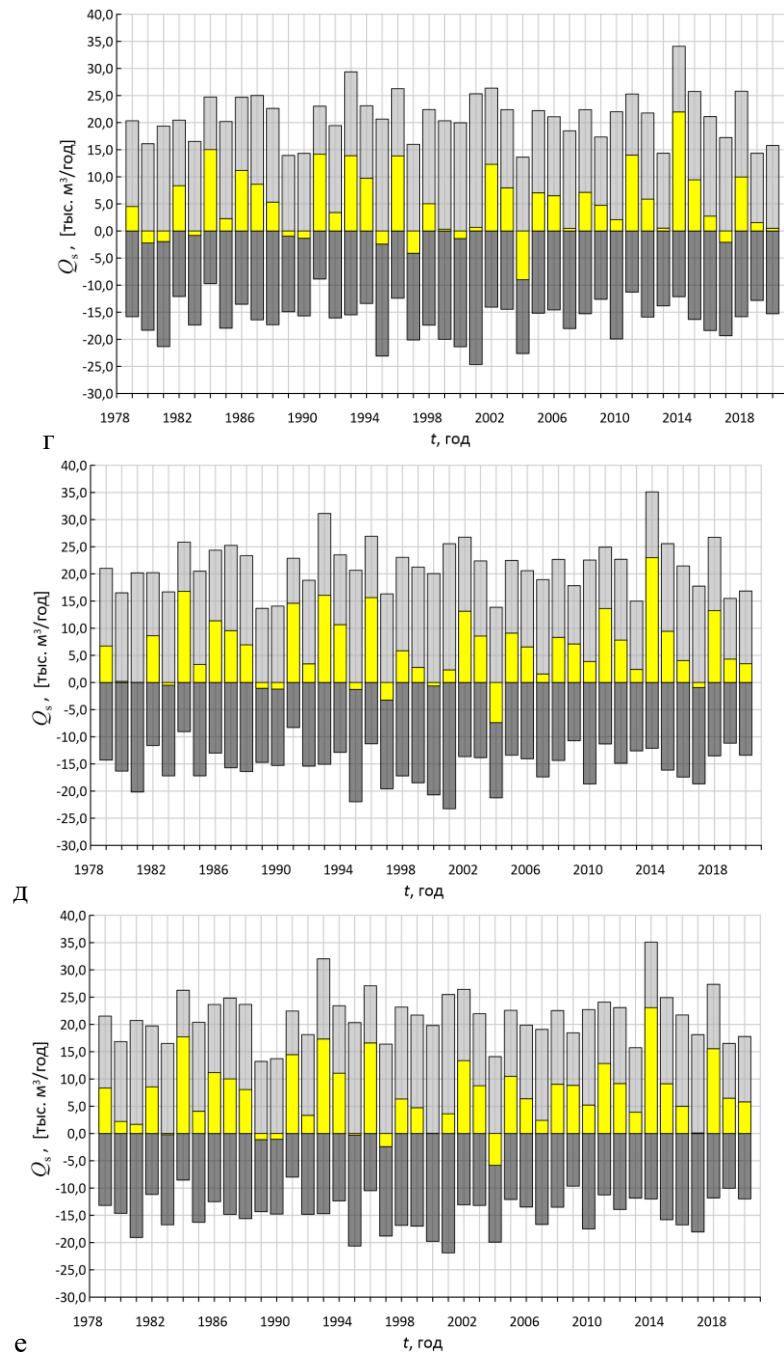


Рис. 6. Распределение по годам емкости суммарного вдольберегового потока наносов (желтый) и его положительной (светло-серый) и отрицательной (темно-серый) составляющих на участках 4 (а), 5 (б), 6 (в).

Составлено авторами.

**МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ВДОЛЬБЕРЕГОВОГО ПОТОКА НАНОСОВ  
В БУХТЕ КОКТЕБЕЛЬ (ЧЕРНОЕ МОРЕ)**

Экстремальные значения положительной  $Q_p$  и отрицательных  $Q_n$  составляющих потока наносов равны соответственно 35 и -26 тыс. м<sup>3</sup>/год. На диаграммах можно выделить 2014 год, характеризовавшийся максимальными положительными потоками (соответствуют значениям максимумов в таблице 4), направленными с северо-востока на юго-запад, и 2004 год — с максимальными отрицательными потоками (значения минимумов в таблице 4), приведшими к перемещению материала с юго-запада на северо-восток. Среднегодовые значения потоков наносов имеют небольшие значения (таблице 4) и направлены с северо-востока на юго-запад на всем протяжении участка исследования. Близким к таким параметрам были 1988 и 2012 гг.

Таблица 4.

Статистические характеристики емкости суммарного вдольберегового  
потока наносов  $Q_s$  на участках 1–6 за период 1979–2020 гг.  
по данным реанализа SWAN-ERA

№ участка	$\theta_N, ^\circ$	$Q_s$ , тыс. м <sup>3</sup> /год				
		Минимум	Максимум	Среднее	Медиана	СКО
1	121	-11,17	14,80	0,64	-0,48	5,86
2	124	-11,02	16,58	1,49	0,34	6,04
3	133	-9,84	20,75	3,91	3,18	6,37
4	137	-8,99	21,97	4,87	4,63	6,41
5	143	-7,40	22,99	6,14	6,20	6,35
6	148	-5,83	23,08	6,99	6,42	6,19

Составлено авторами.

Анализ результатов расчетов показал, что для исследуемого участка за современный климатический период среднегодовое перемещение материала с северо-востока на юго-запад наблюдалось в 19 годах из рассматриваемых (46%). Во всех рассмотренных случаях емкость потоков снижалась от северо-востока к юго-западу. Потоки противоположного направления вдоль всего участка были отмечены в 17% случаев, такие потоки имели меньшую емкость, которая уменьшалась от юго-запада на северо-восток. Встречные потоки наносов определены в 15 годах (37%), при этом зона конвергенции могла формироваться на любом из участков, однако, наиболее часто потоки встречались на участках 2–4 (по 3 случая из рассмотренных). По нашему мнению, это обусловлено особенностями ориентации берега исследуемого района относительно преобладающего направления штормового волнения.

Наблюдаемая структура потоков наносов характеризует исследуемый участок как зону аккумуляции материала при разгрузке потоков наносов, несущих материал от крыльев бухты в ее центральную часть.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование межгодовой изменчивости вдольберегового потока наносов в районе реконструируемого участка набережной пгт. Коктебель за современный климатический период. Береговая линия района аппроксимировалась шестью прямолинейными участками. Для расчетов на каждом участке использовался массив волновых параметров, полученный по данным ретроспективных расчетов ветрового волнения в Черном море за период 1979–2020 гг. Предложена методика пересчета значений высот значительных волн с глубины 11,5 м на глубину последнего обрушения волн 2 м.

Получена детальная информация о характеристиках емкости вдольбереговых потоков наносов за 41-летний период. Показано, что на всех участках существуют как положительные  $Q_p$  (направленные с северо-востока на юго-запад), так и отрицательные  $Q_n$  (направленные с юго-запада на северо-восток) потоки наносов.

Направление и интенсивность вдольбереговых потоков наносов на исследуемом участке береговой зоны бух. Коктебель характеризуются значительной межгодовой изменчивостью: в 46% случаев среднегодовое перемещение материала направлено с северо-востока на юго-запад; в 17% — в обратном направлении. В остальных случаях участок исследования являлся зоной конвергенции встречных потоков от крыльев бухты в центральную ее часть.

Результаты исследования позволили уточнить схемы развития литодинамической системы и использованы при проектировании проекта реконструкции набережной пгт Коктебель.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке темы государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ № FNNN-2024-0016. Модельные расчеты проводились на вычислительном кластере МНИ (<http://www.hpc-mhi.org>).

## Список литературы

1. Горячкин Ю. Н., Долотов В. В. Морские берега Крыма. Севастополь: Колорит, 2019. 256 с.
2. Горячкин Ю. Н., Марков А. А. Анализ эффективности реконструкции берегозащитных сооружений Крыма // Гидротехника. 2023. № 3. С. 2–9.
3. Горячкин Ю. Н. Антропогенное воздействие на береговую зону бухты Коктебель (Черное море) за последние 100 лет // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. №2. С. 6–22. EDN UTBCDW.
4. Клюкин А. А. Экзогеодинамика Крыма. Симферополь: Таврия, 2007. 320 с.
5. Дыкман В. З., Ефремов О. И., Маньковская Е. В. Натурные исследования движения наносов в прибрежной зоне моря // Морской гидрофизический журнал. 2010. № 5. С. 65–80.
6. Дыкман В. З., Ефремов О. И., Воликов М. С. Перенос крупной взвеси в прибойной зоне по нормали к берегу: моделирование и оценки на основе измерений с помощью аппаратного комплекса «Донная станция» // Морской гидрофизический журнал. 2017. № 4. С. 68–81.

## МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ВДОЛЬБЕРЕГОВОГО ПОТОКА НАНОСОВ В БУХТЕ КОКТЕБЕЛЬ (ЧЕРНОЕ МОРЕ)

7. Иванов В. А., Кушнир В. М., Федоров С. В. Литодинамические процессы в Керченском проливе по данным космических съемок оптическими сканерами // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2010. Вып. 22. С. 127–155. EDN WTBHWH
8. Горячкин Ю.Н., Удовик В.Ф., Харитонов Л.В. Оценки параметров потока наносов у западного берега Бакальской косы при прохождении сильных штормов в 2007 году // Морской гидрофизический журнал. 2010. № 5. С. 42–51.
9. 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. 2013. Вып. 27. С. 363–368. EDN VBFSFT.
10. Удовик В. Ф., Горячкин Ю. Н. Оценки межгодовой изменчивости вдольберегового транспорта наносов на участке береговой зоны от Севастополя до Евпатории // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2015. № 1. С.54–65. EDN VHGRAX
11. Харитонов Л. В., Фомин В. В. Пространственная структура потока наносов в береговой зоне Западного побережья Крыма по результатам численного моделирования // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2017. № 1. С. 48–58. EDN YKSPXJ.
12. Удовик В. Ф., Харитонов Л. В. Особенности поступления наносов к юго-восточной оконечности о. Коса Тузла в зависимости от направления штормового ветра // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2011. Вып. 25, Т. 1. С. 96–103. EDN WAPUJN.
13. Удовик В. Ф., Харитонов Л. В. Условия поступления и структура вдольберегового перераспределения наносов в береговой зоне о. Тузла при различных направлениях ветра // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2014. Вып. 28. С. 146–152. EDN VBFSSL.
14. СП 277.13258000.2016 Сооружения морские берегозащитные. Правила проектирования. Москва, 2016. – 91 с.
15. Booij N., Ris R. C., Holthuijsen L. H. A third-generation wave model for coastal regions. Model description and validation. Journal of Geophysical Research. 1999. V. 104 (4). P. 7649–7666. doi:10.1029/98JC02622.
16. SWAN User Manual Cycle III version 41.20. Delft University of Technology, Netherlands. 2018. 121 p.
17. Divinsky V. V., Fomin V. V., Kosyan R. D., Ratner Y. D. Extreme Wind Waves in the Black Sea. Oceanologia. 2020. 62 (1). P. 23–30. doi: 10.1016/j.oceano.2019.06.003.
18. ECMWF: Forecast charts and data [Elektronnyj resurs]. URL: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts> (application: 02.10.2021).
19. Полонский А. Б., Фомин В. В., Гармашов А. В. Характеристики ветрового волнения Черного моря // Доповіді Національної Академії наук України. 2011. № 8. С. 108–112.
20. Справочные данные по режиму ветра и волнения Балтийского, Северного, Черного, Азовского и Средиземного морей / Под ред. Л. И. Лопатухина, А. В. Бухановского, С. В. Иванова, Е. С. Чернышевой. СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2006. 450 с.
21. Крылов Ю. М. Спектральные методы исследования и расчета ветровых волн. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 255 с.
22. СП 38.13330.2012 Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). Актуализированная редакция СНиП 2.06.04-82\*. М., 2012. 142 с.
23. Гуров К. И. Гранулометрический состав наносов береговой зоны бухты Коктебель (Крым) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 4. С. 34–45. EDN PYURTV.

## INTERANNUAL VARIABILITY OF THE ALONGSHORE SEDIMENT FLUX IN KOKTEBEL BAY (THE BLACK SEA)

*Kharitonova L. V.<sup>1</sup>, Fomin V. V.<sup>2</sup>, Goryachkin Yu. N.<sup>3</sup>, Alekseev D. V.<sup>4</sup>*

*<sup>1, 2, 3, 4</sup> Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia,*

*E-mail: <sup>1</sup> l.kharitonova@mhi-ras.ru, <sup>2</sup> v.fomin@mhi-ras.ru, <sup>3</sup> yngor@mhi-ras.ru, <sup>4</sup> d.alekseev@mhi-ras.ru*

The paper investigates the interannual variability of the alongshore sediment flux capacity in the area of the Koktebel embankment (Feodosia, Crimea) in current climatic period. The study area is located on the southeastern coast of the Crimean Peninsula in Koktebel Bay of the Black Sea. Koktebel Bay is opened to storm events from the east-southwest sector, and over half of all storms comes from the east-east-southeast sector. Storm duration varies from 5.6 to 34.3 days and its average value is 16.4 days. The longest storm events typically occur from November to March. During storm activity, beach-forming material from cliff and bench abrasion, landslide erosion and collapses from the bay eastern part and biogenic material from the seaward coastal slope enters the coastal zone. Historically a century ago, the construction of the first wharf and promenade initiated the anthropogenic transformation of the coastal zone. Coastal defense structures were reconstructed many times, notably between 1984 and 1990, including the construction of a slope-stepped embankment and the restoration of the beach width to 45 meters. Additionally, 144,000 m<sup>3</sup> of gravel backfill was added to the western part of the coast. The beach in the central part of the bay remained relatively stable for over a decade until the onset of construction on the reserve backfill, which gave rise to a new phase of coastal degradation in the 21-st century. Now, efforts to reconstruct the embankment and restore the beaches of Koktebel Bay, spanning a total of 1,850 meters, are underway.

Main aim of this paper was to determine the direction and capacity of alongshore sediment fluxes as a function of the duration and intensity of storms coming from different directions. The coastline was segmented into six straight sections where the sediment fluxes were considered. Long-term series of significant wave heights in the central part of the bay (on 11.5 m isobath) were formed from wind wave reanalysis data for the period of 1979–2020. The reanalysis was carried out using the SWAN spectral model and ERA-Interim and ERA5 surface wind fields. To transform significant wave heights from the depth of 11.5 m to the wave breaking depth of 2 m, a special procedure was performed. Firstly, to calculate wave characteristics for the winds possible once a year and once every 25 years of all directions with high spatial resolution by SWAN model five-step nested grid method was implemented. Secondary, the empirical dependences between wave characteristics on depths of 11.5 m and 2 m were made.

Taking into account the results of preliminary analysis of particle size distribution, sediment flux calculations were performed for an average beach-forming material size of 4 mm. As a result the statistical capacity characteristics of the alongshore sediment fluxes for 41-year period were obtained. Namely the annual distribution of the total alongshore sediment flux capacity, one positive and negative components were determined for each straight section. The extreme value of the sediment flux positive component was 35,000 m<sup>3</sup>/year and of the negative one was 26,000 m<sup>3</sup>/year. 2014 and 2004 years were identified as years with maximum sediment fluxes directed to southwest and northeast, respectively. It was shown that both positive (from northeast to southwest) and negative (from southwest to northeast) sediment fluxes occurred at all sections. In the southwestern areas, the contribution of the negative components to the sediment flux balance was greater than that of the positive components, whereas in the northeastern areas, the positive components predominate. The general direction of sediment transport was from

the headlands into the central part of the bay, influenced by the orientation of the coastal sections relative to the predominating storm surge direction (sector 90–112.5°).

This research was funded under state assignment no. FNNN-2024-0016 of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

**Keywords:** coast, coastal zone, sediment fluxes, wind waves, numerical modeling, SWAN, Koktebel, Crimea

### References

1. Goryachkin, Yu.N., Dolotov, V.V. Morskie berega Kryma (Sea Coasts of Crimea). Sevastopol: Colorit, 2019, 256 p. (in Russ.).
2. Goryachkin, Yu.N., Markov, A.A., 2023. Analiz ehffektivnosti rekonstrukcii beregozashchitnykh sooruzhenij Kryma (Analysis of the Effectiveness of Reconstruction of Coast Protection Structures in Crimea). *Hydrotechnics*, 3(72), pp. 2–9 (in Russ.).
3. Goryachkin, Yu.N., 2024. Anthropogenic impact on the coastal zone of Koktebel Bay (Black Sea) over the last 100 years. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp.6-22.
4. Klyukin, A.A. Ehkzogeodinamika Kryma (Exogeodynamics of the Crimea). Simferopol: Tavria, 2007, 320 p. (in Russ.).
5. Dykman, V.Z., Efremov, O.I. and Man'kovskaya, E.V., 2011 Field studies of the motion of sediments in the coastal zone of the sea. *Physical Oceanography*, 20(5), pp. 379–395. doi:10.1007/s11110-011-9093-7.
6. Dykman, V.Z., Efremov, O.I. and Volikov, M.S., 2017. Normal-to-coast transfer of coarse suspension in a surf area: modeling and assessments based on the measurements by the instrumental complex «Donnaya stantsiya». *Physical Oceanography*, (4), pp. 66–78. doi:10.22449/1573-160X-2017-4-66-78.
7. Ivanov, V.A., Kushnir, V.M., Fedorov, S.V., 2010. Litodinamicheskie processy v Kerchenskom prolive po dannym kosmicheskikh s"emok opticheskimi skanerami (Lithodynamic processes in the Kerch Strait by the data of space images derived from optic scanners). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources*, (22), pp. 127–155 (in Russ.).
8. Goryachkin, Yu.N., Udovik, V.F. and Kharitonova, L.V., 2011. Estimations of the parameters of the flux of sediments near the west coast of the Bakal'skaya Spit under the conditions of heavy storms in 2007. *Physical Oceanography*, 20(5), pp. 356–365. doi:10.1007/s11110-011-9091-9.
9. Udovik, V.F., Goryachkin, Y.N., 2013. Mezhhodovaya izmenchivost' vdol'beregovogo potoka nanosov v beregovej zone Zapadnogo Kryma (Interannual variability of longshore drift in the coastal zone of western Crimea). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources*, (27), pp. 363–368 (in Russ.).
10. Udovik, V.F., Goryachkin, Yu.N., 2015. Otsenki mezhhodovoj izmenchivosti vdol'beregovogo transporta nanosov na uchastke beregovej zony ot Sevastopolya do Evpatorii (Estimations of interannual variability of longshore sediment transport on the sector of coastal zone from Sevastopol to Yevpatoriya). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 54–65 (in Russ.).
11. Kharitonova, L.V., Fomin, V.V., 2017. Prostranstvennaya struktura potoka nanosov v beregovej zone Zapadnogo poberezh'ya Kryma po rezul'tatam chislenного modelirovaniya (Spatial structure of sediment flow in the coastal zone of the West coast of Crimea on according numerical simulation). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 48–58 (in Russ.).
12. Udovik, V.F., Kharitonova, L.V., 2011. Osobennosti postupleniya nanosov k yugo-vostochnoj okonechnosti o. Kosa Tuzla v zavisimosti ot napravleniya shtormovogo vetra (Features of sediment inflow in the south-eastern end of the Tuzla Island dependence on storm wind direction). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources*, (25), V. 1, pp. 96–103 (in Russ.).
13. Udovik, V.F., Kharitonova, L.V., 2014. Usloviya postupleniya i struktura vdol'beregovogo pereraspredeleniya nanosov v beregovej zone o. Tuzla pri razlichnykh napravleniyakh vetra (Inflow conditions and structure of longshore sediment redistribution in the coastal zone of Tuzla Island under different wind directions). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources*, (28), pp. 146–152 (in Russ.).

14. SP 277.13258000.2016 Sooruzheniya morskije beregozashchitnye. Pravila proektirovaniya (SP 277.13258000.2016 Marine shore protection structures. Design Rules). Moscow, 2016, 91 p. (in Russ.).
15. Booij N., Ris R.C., Holthuijsen L.H. A third-generation wave model for coastal regions. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research*. 1999. V. 104 (4). P. 7649–7666. doi:10.1029/98JC02622.
16. SWAN User Manual Cycle III version 41.20. Delft University of Technology, Netherlands. 2018. 121 p.
17. Divinsky B.V., Fomin V.V., Kosyan R.D., Ratner Y.D. Extreme Wind Waves in the Black Sea. *Oceanologia*. 2020. 62 (1). P. 23–30. doi: 10.1016/j.oceano.2019.06.003.
18. ECMWF: Forecast charts and data [Elektronnyj resurs]. URL: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts> (application: 02.10.2021).
19. Polonsky, A.B., Fomin, V.V., Garmashov, A.V., 2011. Harakteristiki vetrovogo volneniya Chernogo morya (Characteristics of wind waves of the Black Sea). Rep. National Academy of Sciences of Ukraine, (8), pp.108–112 (in Russ.).
20. Spravochnye dannye po rezhimu vetra i volneniya Baltijskogo, Severnogo, Chernogo, Azovskogo i Sredizemnogo morej (Reference Data on the Wind and Wave Regime of the Baltic, North, Black, Azov and Mediterranean Seas). Lopatoukhin LI, Bukhanovsky AV, Ivanov SV, Chernyshova ES (Eds.). Russian Maritime Register of Shipping: St. Petersburg, Russia, 2006, 452 p. (in Russ.).
21. Krylov YuM (1966) Spektral'nye metody issledovaniya i rascheta vetrovykh voln (Spectral Methods for Investigation and Calculation of Wind Waves). Leningrad: Gidrometeoizdat, 1966, 258 p. (in Russ.)
22. SP 38.13330.2012 Nagruzki i vozdejstviya na gidrotekhnicheskie sooruzheniya (volnovye, ledovye i ot sudov). Aktualizirovannaya redakciya SNIP 2.06.04-82\*. (SP 38.13330.2012 Loads and impacts on hydraulic structures (wave, ice and ship impacts). Updated version of SNiP 2.06.04-82\*). Moscow, 2012, 142 p.
23. Gurov, K.I., 2023. Granulometric Composition of Sediments in the Coastal Zone of Koktebel Bay (Crimea). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 34–45.

*Поступила в редакцию 20.05.2024 г.*