

УДК 551.466.3, 551.465.78:627.222.23

## ВДОЛЬБЕРЕГОВЫЕ ПОТОКИ ПЕСЧАНЫХ ОСАДКОВ В РАЙОНЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ (НА ПРИМЕРЕ П-ВА ИКАКОС, КУБА)

© 2021 г. Б. В. Дивинский<sup>1,\*</sup>, Н. Н. Дунаев<sup>1</sup>, Р. Д. Косьян<sup>1</sup>

Представлено академиком РАН Л.И. Лобковским 01.12.2020 г.

Поступило 04.12.2020 г.

После доработки 15.01.2021 г.

Принято к публикации 15.01.2021 г.

Представлены результаты анализа климатических особенностей вдольбереговых потоков донных осадков. Объектом исследований выступает прибрежная зона полуострова Икакос в северной части Кубы. Основная цель работы – анализ особенностей вдольберегового транспорта донных осадков в районе п-ва Икакос за период с 1990 по 2019 г. В качестве механизма транспорта рассматриваются компоненты поверхностного волнения: чисто ветровое волнение и зыбь. Метод исследований – математическое моделирование. Параметры поверхностного волнения получены с помощью современной спектральной волновой модели DHI MIKE 21 SW. Для оценок объемов перемешаемых донных отложений используется математическая модель, рассчитывающая потоки несвязного материала под воздействием ветрового волнения. Установлено, что в среднегодовом (климатическом) выражении величины потоков с востока на запад оцениваются в 45 000 м<sup>3</sup>/год, с запада на восток – порядка 11 000 м<sup>3</sup>/год. Вклад отдельных тропических циклонов в годовые потоки может быть весьма значительным и измеряется десятками процентов.

*Ключевые слова:* волновой климат, численное моделирование, вдольбереговые потоки, ураганы, Икакос, Куба

**DOI:** 10.31857/S2686739721040058

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Вдольбереговые потоки вещества во многом ответственны за морфологический облик прибрежной зоны, определяя процессы эрозии или аккумуляции наносов, а также трансформацию береговой линии. Потоки формируются под воздействием множества гидродинамических факторов, основным элементом которых выступает ветровое волнение. Обычной практикой является представление характеристик волнового поля в виде набора интегральных параметров (значительная высота волн, средний период, генеральное направление распространения), что оправдано в условиях однородного поверхностного волнения. В реальных условиях волновой спектр формируется в результате взаимодействия нескольких волновых систем (собственно ветрового волнения и зыби). Разделение волнового поля на отдельные компоненты позволяет более корректно описать пространственно-временную структу-

ру поверхностного волнения, а также существенно уточнить схемы перераспределения и транспорта донных осадков в шельфовой зоне.

Основной целью данной работы является анализ климатической изменчивости параметров ветрового волнения и зыби, а также вдольбереговых потоков донных отложений в прибрежной зоне моря. Объектом исследований выступает прибрежная зона полуострова Икакос в северной части Кубы (рис. 1). П-ов Икакос является полигенетическим образованием и по форме напоминает аккумулятивную косу азовского типа протяженностью 22 км с достаточно широкими, до 50 м, пляжами [1]. С 1956 г. он практически является островом в результате строительства в его основании канала Пасо-Мало, обеспечивающего проход маломерных плавсредств из бухты Карденас во Флоридский пролив.

Выбор района исследования обусловлен, во-первых, стремлением расширить изучение специфики береговых зон моря в различных географических и геолого-геоморфологических условиях, их происхождения, современного состояния и перспектив развития; во-вторых, наличием

<sup>1</sup> Институт океанологии им. П.П. Шишова  
Российской академии наук, Москва, Россия

\*E-mail: divin@ocean.ru

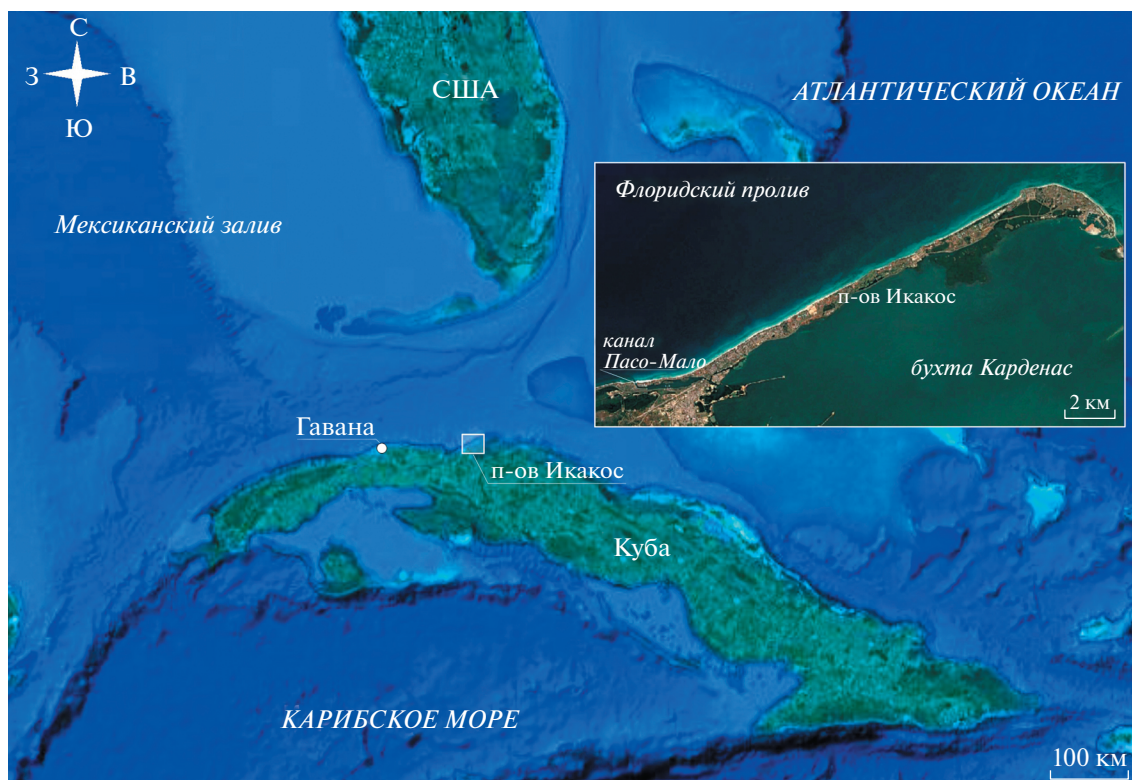


Рис. 1. Местоположение полуострова Икакос.

соответствующего материала, имеющегося в распоряжении авторов.

Существенной спецификой района является его расположение на пути тропических циклонов, сопровождаемых мощными ураганами, негативные последствия которых проявляются и в прибрежно-морской зоне. Для поддержания пляжей производится периодические отсыпки песчаного материала [2]. Проектирование и эффективность подобных мероприятий напрямую зависят от полноты описания исходных литодинамических процессов, в том числе вдольбереговых потоков донных отложений. Оценка самих потоков невозможна без корректного описания влияющих факторов, в качестве которых, в нашем случае, выступают ветровые волны и зыбь. Таким образом, первостепенной по важности является задача получения качественных данных о параметрах поверхностного волнения в прибрежной зоне п-ва Икакос.

К сожалению, экспериментальных данных по исследованию ветрового волнения в интересующем нас районе обнаружить не удалось. Волномерные буи, обслуживаемые National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), находятся или западнее, в Мексиканском заливе, или восточнее, в Атлантике. Несколько мареографов размещены вдоль северного побережья Кубы, но они полезны, пожалуй, при исследованиях штормовых нагонов.

Труды кубинских специалистов сосредоточены, главным образом, на изучении последствий ураганов. Имеющиеся в их распоряжении спектральные волновые модели сосредоточены, главным образом, на прогностических задачах [3, 4]. Отметим некоторые результаты, полученные в рамках советско-кубинских проектов. В работе [5] на основании данных, полученных в 1973–1975 и 1978–1979 гг. (их состав и метод получения, увы, не приводится), сделан вывод о том, что “решительное преобладание ветров восточных направлений определяет основное направление волнового перемещения наносов с востока на запад”. В некоторых работах, посвященных проблемам морфодинамики пляжей Варадеро [2, 6], источником данных о волновом климате в районе п-ва Икакос служит интернет-ресурс Wind and Waves Alerts (<https://wisuki.com>), который, при всем уважении к создателям, является крайне оценочным.

Таким образом, приходится признать, что корректное описание волнового режима прибрежной зоны п-ва Икакос практически отсутствует.

В связи с этим сформулируем основные задачи нашей работы:

- для прибрежной зоны п-ва Икакос расчетным путем получить основные параметры ветро-

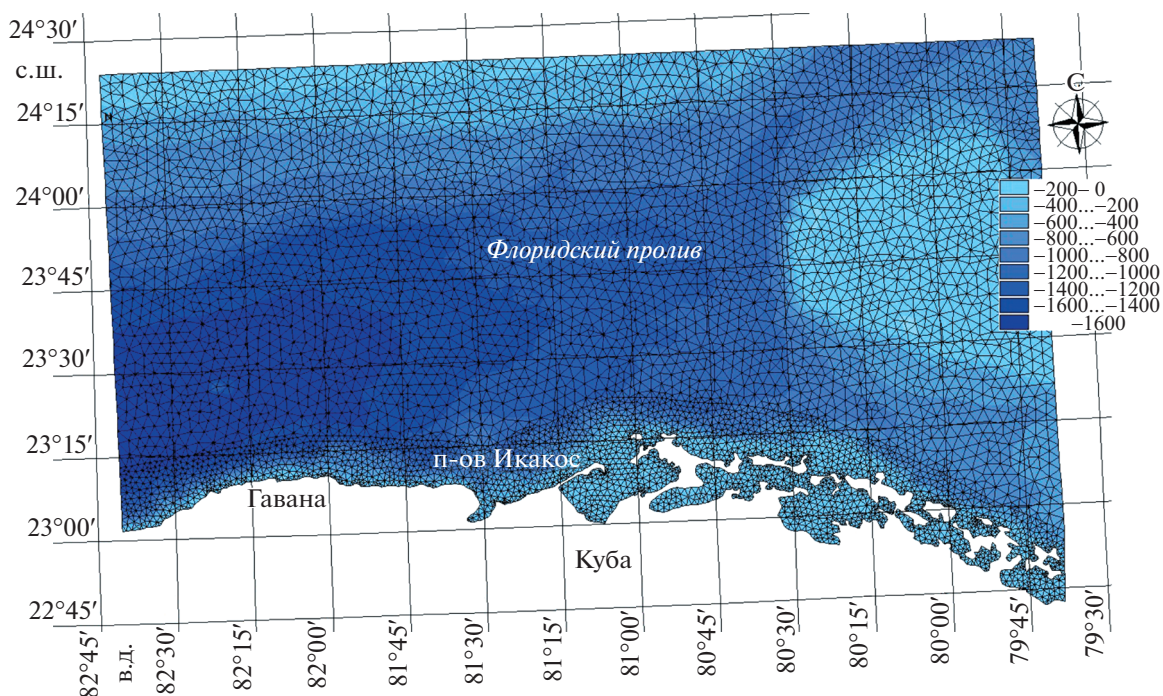


Рис. 2. Расчетная сетка и батиметрическая карта (м).

вых волн и зыби за последние 30 лет (с 1990 по 2019 г.);

- проанализировать статистические свойства компонентов поверхностного волнения;
- рассчитать вдольбереговые потоки донных осадков, генерируемые ветровыми волнами и зыбью;
- исследовать климатические особенности потоков и оценить вклад отдельных ураганов в процессы транспорта песка в прибрежной зоне.

## 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### 2.1. Модель ветрового волнения

Современным средством исследования параметров поверхностного волнения является математическое моделирование. В настоящей работе используется спектральная волновая модель MIKE 21 SW Датского Гидравлического института [7]. Модель реализует основные физические механизмы зарождения, трансформации и затухания ветрового волнения, включая:

- рост волн под воздействием приземного ветра;
- нелинейные внутриволновые взаимодействия;
- диссипацию энергии волн вследствие забурунивания, донного трения и обрушения;
- рефракцию и дифракцию волнового поля;
- взаимодействие поверхностного волнения и течений.

Неравномерная расчетная сетка покрывает акваторию Флоридского пролива и состоит из 11 тысяч расчетных элементов (рис. 2). Размеры области (приблизительно 310 км по широте и 150 км по долготе) позволяют воспроизводить физическую картину трансформации морского волнения. Естественно предположить, что эта картина будет несколько упрощенной, так как не учитывает, к примеру, проникновение на акваторию длинных волн из открытой Атлантики. Тем не менее полагаем, что подобный подход вполне оправдан и являет собой некий компромисс между необходимым качеством получаемых данных и затратами на довольно ресурсоемкие вычисления.

Укажем на основные физические параметры, используемые при моделировании волнового климата:

- используется полностью спектральная модель в нестационарной формулировке;
- спектральные частоты распределены логарифмически в диапазоне периодов от 1.6 до 16.5 с;
- разрешение модели по направлениям составляет  $15^\circ$ , что является средним между рекомендованными значениями для зыби ( $2-10^\circ$ ) и ветрового волнения с более широким угловым спектром ( $10-30^\circ$ );
- учитываемые физические механизмы: четырехволновое взаимодействие; диссипация энергии волн посредством забурунивания, обрушения и донного трения; рефракция волн на мелководье.

**Таблица 1.** Спутниковые треки, используемые при верификации модели

Номер	Дата (год, месяц, день) и время	Длина трека, км
1	2017.08.04 03h	134
2	2017.08.04 15h	69
3	2017.08.05 10h	135
4	2017.08.08 03h	128
5	2017.08.09 20h	130
6	2017.08.19 18h	135
7	2017.08.27 03h	87
8	2017.08.31 03h	134
9	2017.08.31 15h	74
10	2017.09.04 04h	135
11	2017.09.08 14h	135
12	2017.09.23 03h	100
13	2017.09.28 09h	129
14	2019.01.26 03h	134

Указанные настройки позволяют корректно воспроизводить экстремальные волновые явления в условиях быстрой смены синоптической обстановки. Вопросы настройки модели подробно изложены в работах [8, 9].

Качество спектральной волновой модели напрямую зависит от корректности задания исходных компонентов скорости ветра. В работе при задании исходных полей ветра используются данные глобального атмосферного реанализа ERA-Interim, представленного Европейским центром среднесрочных прогнозов (<http://apps.ecmwf.int>). Рассматриваемая область ограничена координатами: по широте – 22.00° с.ш. и 25.25° с.ш., по долготе – 78.25° з.д. и 83.50° з.д.. Пространственное разрешение одинаково по широте и долготе и составляет 0.125°, шаг по времени – 3 ч. Таким образом, на основе реанализа ERA-Interim за период 1990–2019 гг. над заданной акваторией с временным шагом 3 ч сформированы поля атмосферного давления и компонентов скорости ветра. Эти данные используются в дальнейшем при моделировании полей ветрового волнения.

Расчетными выходными параметрами спектральной волновой модели являются:

- пространственные распределения высот волн (значительных и максимальных), средних периодов, периодов максимума спектра, направления волнения;
- двумерные (частотно-направленные) спектры ветрового волнения;
- мощность ветрового волнения, выраженная в киловаттах на метр волнового фронта.

Поскольку значительные высоты волн и периоды определяются через моменты энергетического спектра, оценка энергетической мощности ветрового волнения полностью зависит от корректности и адекватности спектральной модели при воспроизведении всех стадий развития волнения. Корректность любой модели определяется на этапе ее верификации. Верификация спектральной волновой модели проведена с привлечением данных спутниковых измерений. Результатом обработки спутниковой информации является профиль значительной высоты волн вдоль траектории движения спутника.

Всего использовалось 14 спутниковых треков. В табл. 1 приведена информация о времени получения треков, а также их длина. Географическое положение траекторий указано на рис. 3.

На рис. 4 приведено сравнение экспериментальных данных и результатов расчетов по спектральной волновой модели. Анализ рисунков дает основание полагать, что использование полей приземного давления ERA-Interim в качестве ветрового форсинга спектральной модели вполне приемлемо.

Для количественной оценки соответствия расчетных величин экспериментальным данным рассчитывались: средняя ошибка (Bias), среднеквадратичное отклонение (RMS), индекс рассеивания (SI) и коэффициент корреляции (R). Статистические оценки указанных параметров выполнены по соотношениям:

$$\text{Bias} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i), \quad \text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2},$$

$$\text{SI} = \frac{\text{RMS}}{\bar{O}}, \quad \text{R} = \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})^2 \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}}, \quad (1)$$

где  $S_i$  и  $O_i$  – расчетные и наблюдаемые значения соответственно,  $\bar{S}$  и  $\bar{O}$  – их средние значения. Рассчитанные статистические данные для рядов значительных высот волн приведены в табл. 2.

Наглядной графической иллюстрацией результатов верификации модели может служить диаграмма Тейлора [10], представленная на рис. 5. Диаграмма отображает качество спектральной модели в терминах “коэффициент корреляции” – “стандартное отклонение”. Радиальная ось (корреляция) представлена в логарифмическом масштабе.

Для удобства сравнения используется нормализованное стандартное отклонение, при этом статистические характеристики рядов экспериментальных наблюдений расположены в одной точке. Это позволяет визуально оценить качество

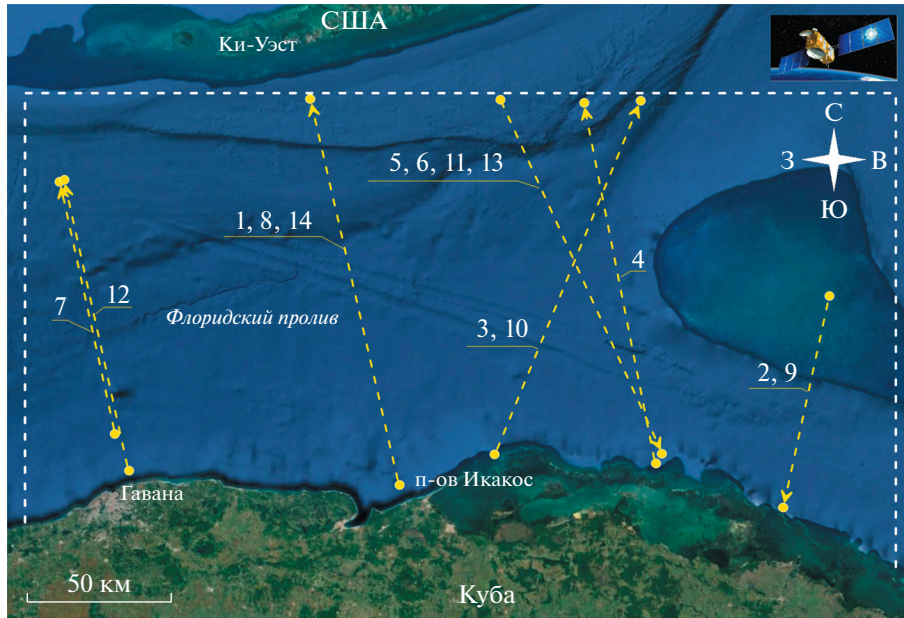


Рис. 3. Карта спутниковых треков на исследуемой акватории.

модели применительно ко всем станциям наблюдения. Как следует из рис. 3 и 4, а также табл. 2, наблюдается хорошее соответствие экспериментальных и расчетных значений высот волн. Отметим также, что расшифровка спутниковых снимков сама по себе является далеко не тривиальной задачей, конечный результат во многом зависит от состояния водной поверхности и атмосферы. В нашем случае использование треков – вынужденная альтернатива в отсутствие прямых инструментальных наблюдений с использованием специализированной волноизмерительной аппаратуры.

Таким образом, можем заключить, что спектральная волновая модель DHI MIKE 21 SW успешно верифицирована для акватории Флоридского пролива и может использоваться как инструмент исследований волнового климата.

2.2. Модель транспорта донных осадков в прибрежной зоне

Исследования транспорта наносов в прибрежной зоне ведутся с помощью математической модели, позволяющей рассчитывать поток несвязного материала под воздействием течений и ветрового волнения.

Потоки представляются в виде:

$$Q = \frac{l}{\rho_0} \int_0^h U_{\text{mean}} C(z) dz, \quad (2)$$

где  $l$  – длина рассматриваемого профиля,  $\rho$  – плотность осадков,  $U_{\text{mean}}$  – осредненная по глуби-

не скорость вдольберегового течения,  $C$  – концентрация взвешенных веществ,  $h$  – глубина.

Осредненная скорость вдольберегового течения оценивается по формуле [11]

$$U_{\text{mean}} = 0.25k_v \sqrt{\gamma_b g H_b} \sin 2\alpha_b, \quad (3)$$

где  $k_v$  – константа,  $\gamma_b$  – параметр обрушения,  $H_b$  – высота волн в точке обрушения,  $\alpha_b$  – угол между нормалью к берегу и фронтом волны в точке об-

Таблица 2. Средние ошибки, средноквадратичные отклонения, индексы рассеивания и коэффициенты корреляции для расчетных и экспериментальных рядов наблюдений значительных высот волн

Номер	Bias, м	RMS, м	SI	R
1	-0.02	0.13	0.09	0.85
2	0.07	0.11	0.10	0.73
3	0.04	0.08	0.07	0.80
4	0.06	0.17	0.13	0.59
5	-0.03	0.12	0.16	0.84
6	0.08	0.12	0.17	0.73
7	0.01	0.05	0.07	0.89
8	0.01	0.07	0.08	0.68
9	0.02	0.03	0.05	0.81
10	-0.05	0.09	0.12	0.79
11	0.01	0.12	0.12	0.81
12	-0.01	0.04	0.05	0.67
13	-0.06	0.12	0.16	0.79
14	0.03	0.12	0.09	0.83

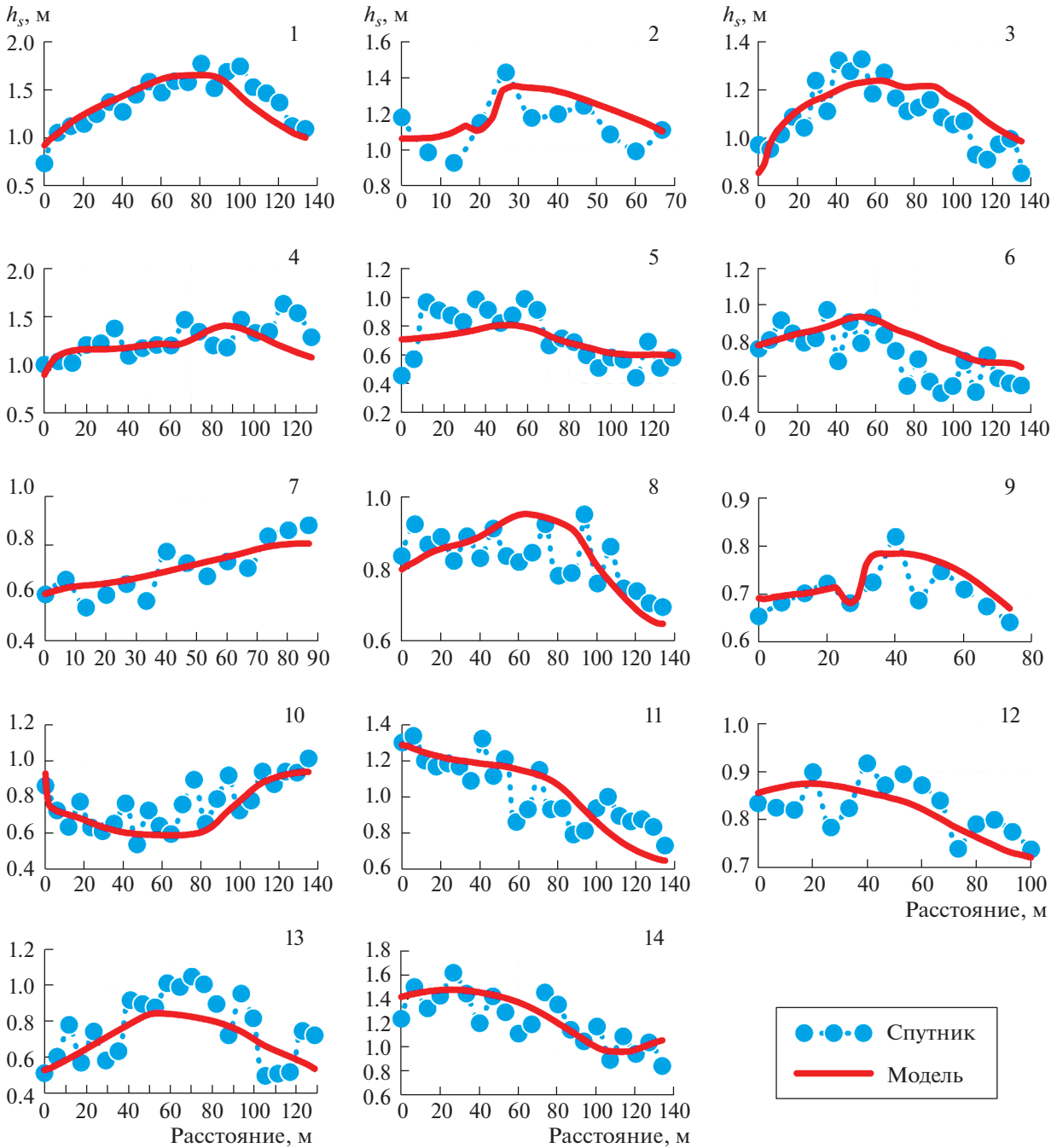


Рис. 4. Сравнение экспериментальных данных и результатов моделирования. Значительные высоты волн.

рушения. Параметры волн в точке обрушения оцениваются методом, изложенным в [12].

Вертикальный профиль концентрации взвешенных веществ описывается формулой:

$$C(z) = C(z_0) \exp\left(-w_s \int_{z_0}^h \frac{dz}{\varepsilon(z)}\right), \quad (4)$$

где  $C(z_0)$  – концентрация взвешенных веществ на уровне  $z_0$ ,  $z_0$  – параметр шероховатости,  $z_0 = z_N/30$ ,  $z_N$  – эффективная шероховатость дна,  $w_s$  – гидро-

динамическая крупность частиц,  $\varepsilon(z)$  – обобщенный коэффициент диффузии. Вертикальный профиль определяется в точке обрушения волн, расположенной, как правило, над подводным валом.

На нижней границе  $z_0$  концентрация взвеси определяется функцией локального выброса взвеси [13]:

$$C(z_0) = 3.3 \left(\frac{\theta - \theta_{cr}}{\theta_{cr}}\right)^{1.5} \frac{(s-1)^{0.6} g^{0.6} d_{50}}{v^{0.2}}, \quad (5)$$

где  $s = \frac{\rho_s}{\rho}$  – относительная плотность наносов,  $g$  – ускорение свободного падения,  $\nu$  – кинематическая вязкость воды,  $\theta$  – параметр Шильдса,  $\theta_{cr}$  – критическое значение параметра Шильдса,  $\varepsilon_z$  – обобщенный коэффициент диффузии. Значение параметра Шильдса отражает баланс сдвигающих и удерживающих сил:

$$\theta = \frac{u_*^2}{((\rho_s - \rho)gd_{50})}, \quad (6)$$

где  $u_*$  – максимальная сдвиговая скорость, рассчитываемая по методике, изложенной в [14].

Обобщенный коэффициент диффузии осадков рассматривается переменным по вертикали и представлен в виде [15]

$$\varepsilon(z) = \varepsilon_1(z) + \varepsilon_2(z). \quad (7)$$

Составляющие правую часть уравнения (6) определяют вклад:  $\varepsilon_1(z)$  – орбитального волнового движения,  $\varepsilon_2(z)$  – диффузии в придонном слое. Вклад орбитального волнового движения находится из соотношения:

$$\varepsilon_1(z) = \frac{\pi H^2 \sinh^2 kz}{2\sqrt{2}T \sinh^2 kh}, \quad (8)$$

где  $H$ ,  $T$  – высота и период волн,  $k$  – волновое число.

Диффузия в придонном слое определяется следующим образом:

$$\varepsilon_2(z) = \frac{b(u_g - w_s) \frac{z}{\sigma}}{1 + 0.06 \frac{z}{\sigma} \exp\left(\frac{z}{\sigma}\right)}, \quad (9)$$

где  $b = 116 \left(\frac{\rho}{\rho_s - \rho}\right) \left(\frac{\nu^2}{g}\right)^{\frac{1}{3}}$ ,  $u_g$  – максимальное значение донной орбитальной скорости,  $\delta$  – толщина пограничного слоя, определяемая из уравнения Джонсона ([16]):

$$\frac{\delta}{z_0} \lg\left(\frac{\delta}{z_0}\right) = 0.6 \frac{H}{z_N \sinh(kh)}. \quad (10)$$

Основным результатом расчетов являются объемы вдольбереговых потоков наносов как в пределах выбранного штормового события, так и интегрированные за интересующий интервал времени (конкретный календарный год).

Расчеты выполнены отдельно для двух основных составляющих поверхностного волнения: ветровых волн и зыби.

Отметим основные допущения, принятые при моделировании вдольберегового перемещения осадков:

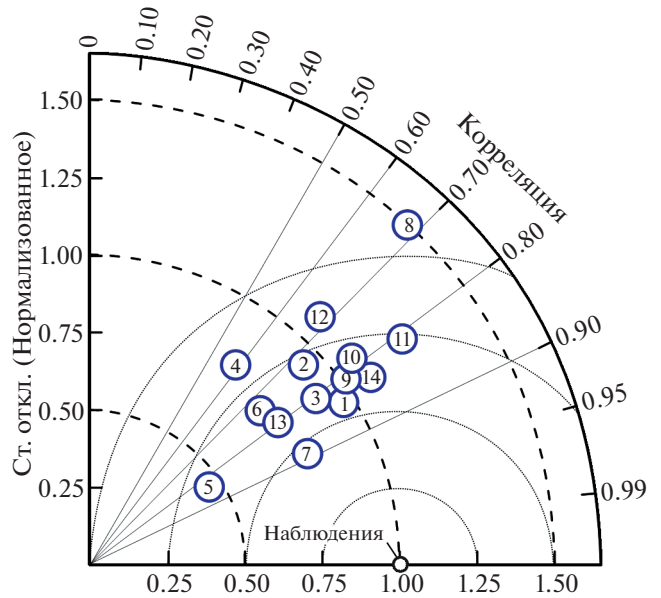


Рис. 5. Диаграмма Тейлора для рядов значительных высот волн.

- медианный диаметр песчаного материала на всем протяжении профилей составляет 0.3 мм [1]. Изменений диаметров частиц не происходит;
- взвешивание и перемещение осадков осуществляется только под воздействием ветрового волнения. Фоновые течения, связанные с общей циркуляцией вод в проливе, не учитываются.

Положение нормальных к берегу разрезов, для которых осуществляется расчет вдольбереговых потоков, а также локальные профили дна, приведены на рис. 6.

Длина каждого профиля – 2.5 км. Первый профиль проведен у основания полуострова, второй – в центральной части, третий – в дистальной.

В качестве начальных волновых условий для модели транспорта донных осадков служат ряды значительных высот волн, средних периодов и направлений распространения волн (отдельно для ветровых волн и зыби), полученные для центральной части полуострова на глубине 22 м.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате проведенной работы получен массив данных, состоящий из полей рассчитанных параметров компонентов ветрового волнения с временным шагом 1 ч и охватывающий период в 30 лет (с 1990 по 2019 г.). Из общего массива произведена выборка, включающая в себя величины значительных высот волн, периодов пика спектра и направлений распространения ветровых волн и зыби.

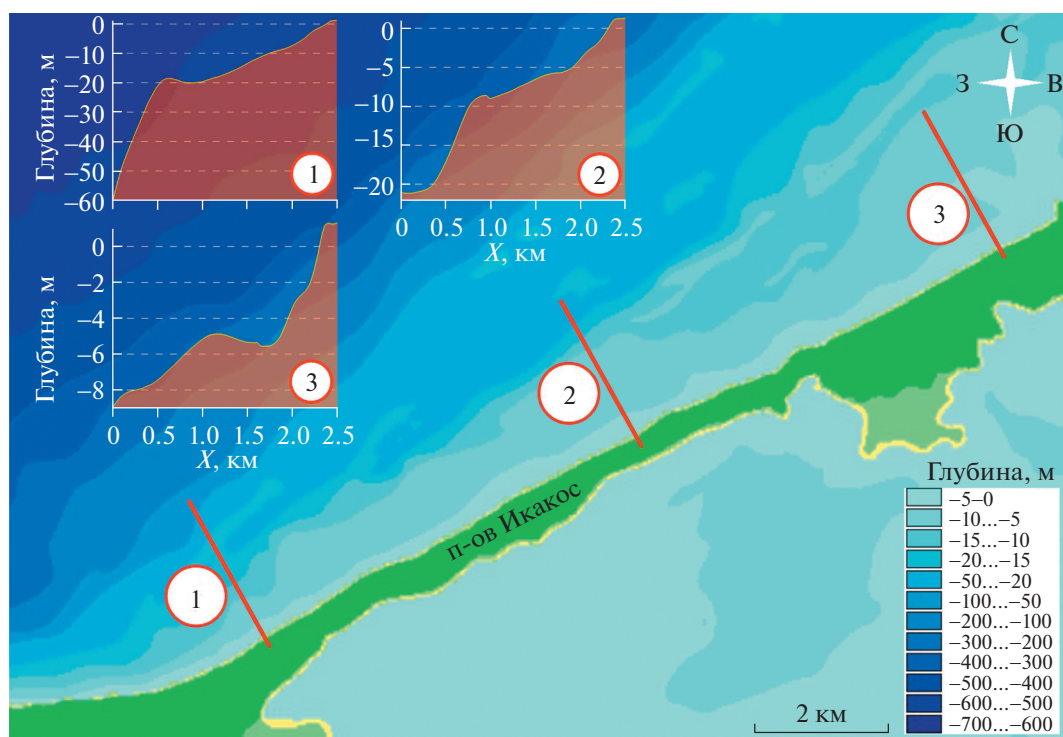


Рис. 6. Положение нормальных к берегу профилей и точки расчета волновых параметров.

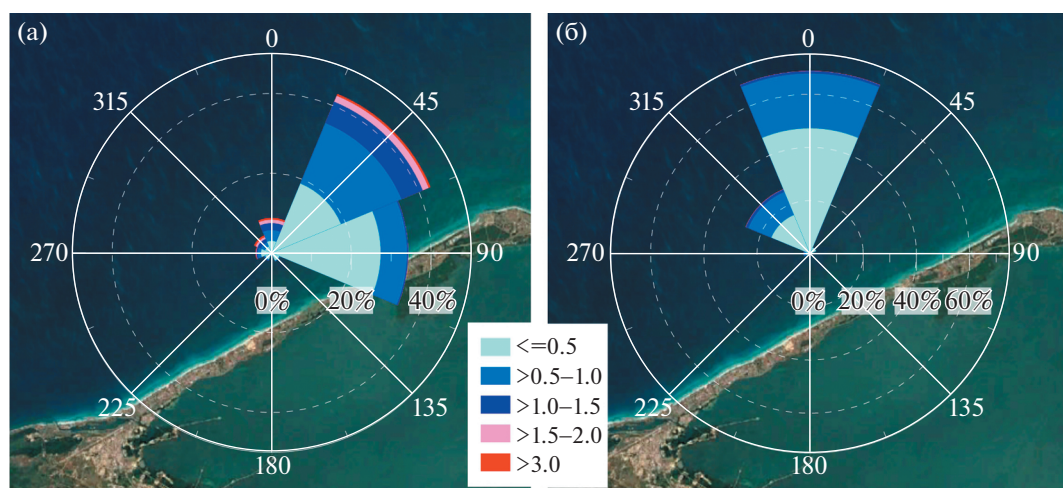


Рис. 7. Розы ветрового волнения (а) и зыби (б), полученные за период с 1990 по 2019 г.

Климатические розы для ветрового волнения и зыби приведены на рис. 7.

Как следует из рис. 7, в прибрежной зоне п-ва Икакос наибольшей повторяемостью обладает ветровое волнение северо-восточных и восточных румбов. Суммарная повторяемость волнения с этих направлений составляет почти 80%. Климатическая повторяемость волн зыби несколько иная, что связано, в основном, с процессами рефракции длинных волн при входе на мел-

ководье. Почти 70% волн зыби приходит с севера, 25% – с северо-запада. Представление о мощности волн при волнении разных направлений дает диаграмма рассеивания, построенная для значительных высот ветровых волн и зыби (рис. 8).

Данные рис. 8 показывают, что наиболее сильное ветровое волнение приходит с северного направления, при этом значительные высоты волн могут превосходить 6 м. Экстремальное ветровое волнение может также наблюдаться при штормах



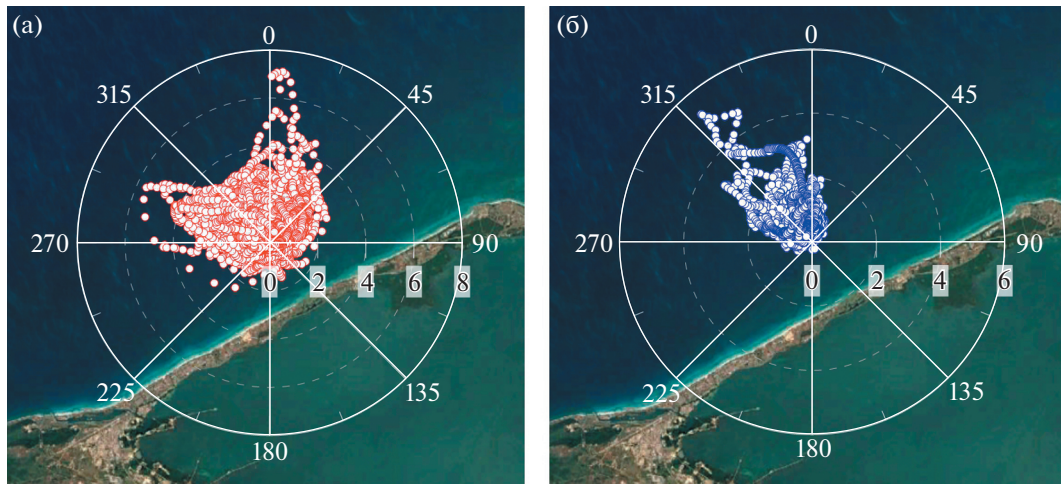


Рис. 8. Климатические диаграммы рассеивания для ветрового волнения (а) и зыби (б), полученные за период с 1990 по 2019 г.

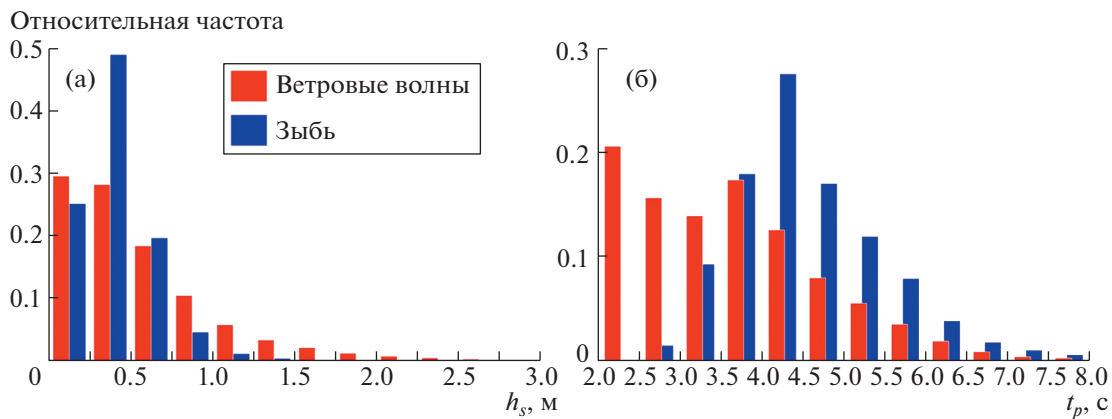


Рис. 9. Гистограммы распределений значительных высот волн (а) и периодов пика спектра (б) для ветрового волнения и зыби.

запад-северо-западного направления. По силе воздействия эти два направления (С и ЗСЗ) доминируют. Наиболее сильная зыбрь с высотами волн, превышающими 4 м, приходит с северо-западных румбов.

В режимном смысле в прибрежной зоне п-ва Икакос наиболее характерно следующее волнение: ветровые волны с высотами, не превышающими полметра, и периодами до 4 с, полуметровая зыбрь с периодами до 4.5 с (рис. 9).

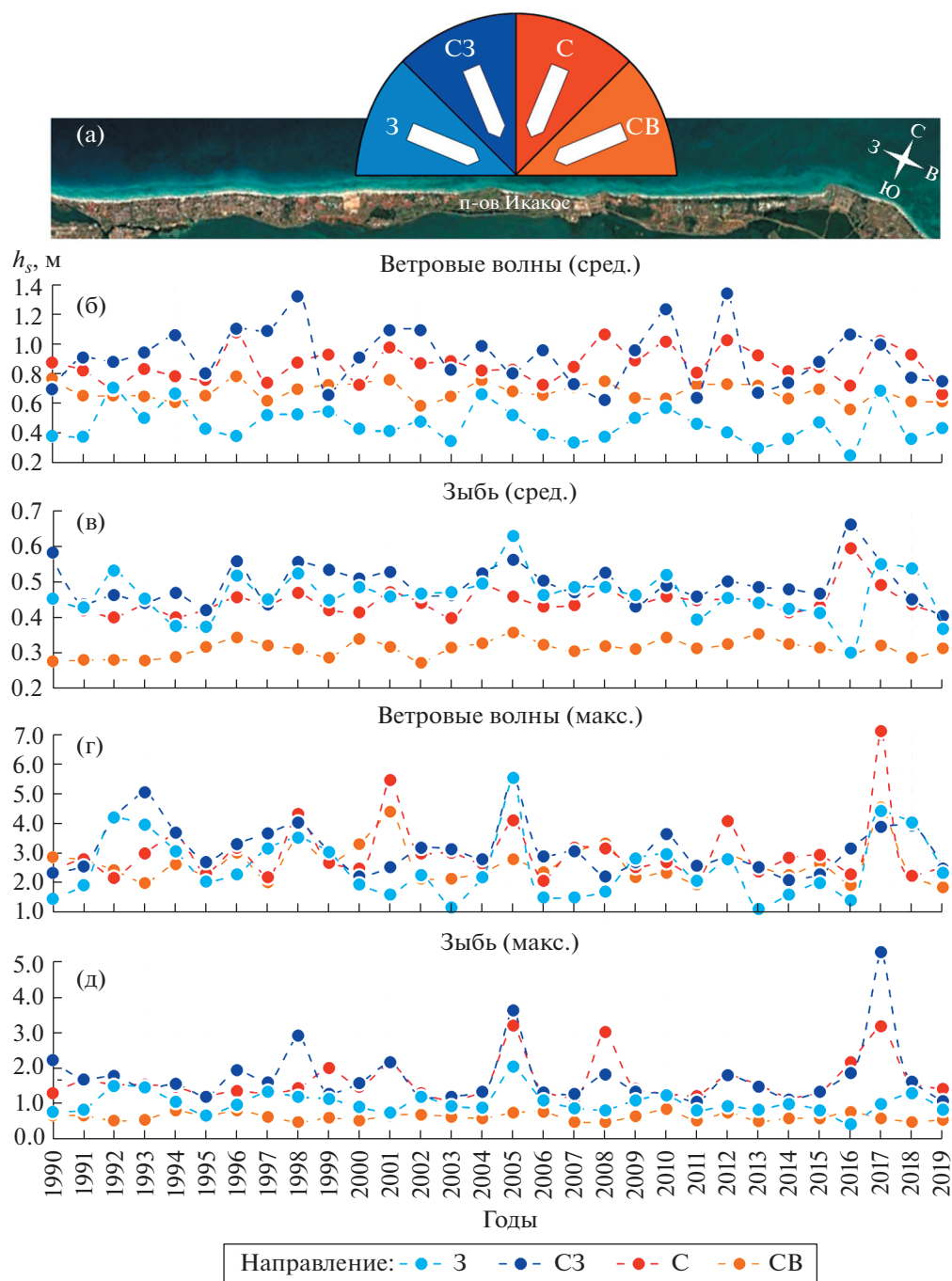
Рассмотрим особенности волнового климата с точки зрения его влияния на литодинамические процессы в прибрежной зоне. В транспорте наносов значительную роль играет угол между направлением волнения и береговой линией. При больших углах ( $45^\circ-90^\circ$ , отсчитывая от нормали к берегу) наблюдаются активные абразионные процессы в прибрежной зоне, при малых ( $0^\circ-45^\circ$ ) преобладает аккумуляция материала [17]. Рассчи-

таем средние и максимальные (в среднегодовом выражении) величины значительных высот ветровых волн и зыби по секторам волнения:

- ( $-90^\circ \dots -45^\circ$ ) – западный;
- ( $-45^\circ - 0^\circ$ ) – северо-западный;
- ( $0^\circ - 45^\circ$ ) – северный;
- ( $45^\circ - 90^\circ$ ) – северо-восточный.

Именуются секторы, естественно, с некоторой долей условности, ориентируясь на генеральные направления. Рассчитанные характеристики ветровых волн и зыби приведены на рис. 10.

Как следует из рис. 10, для ветровых волн в среднем за год самые волноопасные секторы – северо-западный и северный (рис. 10б) с высотами порядка метра, для зыби – северо-западный и западный (рис. 10в) с высотами около 0.5 м. Самые слабые ветровые волны приходят с западного направления (0.4–0.5 м), волны зыби – с северо-



**Рис. 10.** Секторы волнения относительно нормали к берегу (а), а также средние (б, в) и максимальные (г, д) величины значительных высот ветровых волн и зыби для этих секторов.

восточного (0.3 м). Среднегодовые высоты ветровых волн северо-западного направления испытывают самые ощутимые межгодовые колебания, при этом среднее волнение для разных лет по мощности может отличаться более, чем в два раза. Экстремальное волнение связано, как правило, с прохождением ураганов, траектории которых довольно разнообразны. По этой причине максимальное ветровое волнение может наблюдаться

со всех направлений с преобладанием, тем не менее, волнения северных румбов (рис. 10г). Максимальные волны зыби приходят, как правило, с северо-западных и западных направлений (рис. 10д).

Имея в распоряжении рассчитанные параметры ветровых волн и зыби, оценим годовые вдольбереговые потоки донных осадков  $Q$ , придерживаясь следующих обозначений:

**Таблица 3.** Минимальные, максимальные и средние годовые потоки (м<sup>3</sup>/год) за период с 1990 по 2019 г.

	$Q_w+$	$Q_s+$	$Q+$	$Q_w-$	$Q_s-$	$Q-$
Мин.	1685	974	3490	12687	16411	30990
Макс.	15420	13988	26996	58578	46160	87786
Сред.	6337	4782	11120	23992	21101	45094

• знак (+) указывает на направление потоков с запада на восток, (–) – обратный, с востока на запад;

•  $Q_w$  – потоки, сформированные под воздействием ветровых волн,  $Q_s$  – зыби.

Расчеты показали, что, несмотря на существенные различия в строении дна на трех выбранных профилях, потоки для этих профилей различаются не более, чем на 10–15%. По этой причине и для удобства анализа в дальнейшем рассматриваем не отдельные потоки для каждого конкретного профиля, а осредненные по этим профилям величины.

На рис. 11 представлены: (а) – общая, иллюстративная, схема потоков; (б), (г) – соответственно, отношения потоков, генерированных ветровым волнением и зыбью, и суммарные годовые потоки направления с запада на восток; (в), (д) – соответственно, отношения потоков, генерированных ветровым волнением и зыбью, и суммарные годовые потоки направления с востока на запад; (е) – разность между суммарными годовыми потоками, направленными с З на В и обратными. Дополняют рис. 11 данные табл. 3, в которой приведены краткие статистические данные о годовых вдольбереговых потоках в районе п-ва Икакос за последние 30 лет.

Проведенные расчеты показали, что в прибрежной зоне п-ва Икакос абсолютно доминируют вдольбереговые потоки донных осадков, направленные с востока на запад, в 4.5 раза (в среднем) превосходящие потоки с запада на восток. В среднегодовом (климатическом) выражении величины потоков с В на З оцениваются в 45000 м<sup>3</sup>/год, с З на В – порядка 11 000 м<sup>3</sup>/год. В структуре потоков преобладают, в целом, компоненты, сформированные под воздействием ветрового волнения, особенно в потоках с З на В, в которых  $Q_w+$  может превышать  $Q_s+$  в 2–3 раза. Однако это более ха-

рактерно для межгодовых особенностей, по средним показателям за последние 30 лет вклады ветрового волнения и зыби, в общем, сравнимы. Довольно сильны различия между конкретными годами в потоках, направленных с З на В (рис. 11в). Суммарный годовой поток в 2016 г. почти в восемь раз превысил поток 2005 г. Для потоков с В на З картина более сглажена и межгодовые различия не столь ощутимы. Максимальный вдольбереговой поток с В на З наблюдался в 2017 г., что в три раза превышает минимальный поток 2016 г. (рис. 11д).

Обращает на себя внимание одна деталь. Несмотря на общее преобладание потоков под воздействием ветрового волнения, минимальный поток  $Q_s+$  превышает минимальный поток  $Q_w+$  (табл. 3). Это говорит о том, что в случае слабой ветровой нагрузки определяющей становится именно зыбь, сгенерированная со стороны Атлантики. Другими словами, зыбь всегда присутствует как некий фоновый фактор.

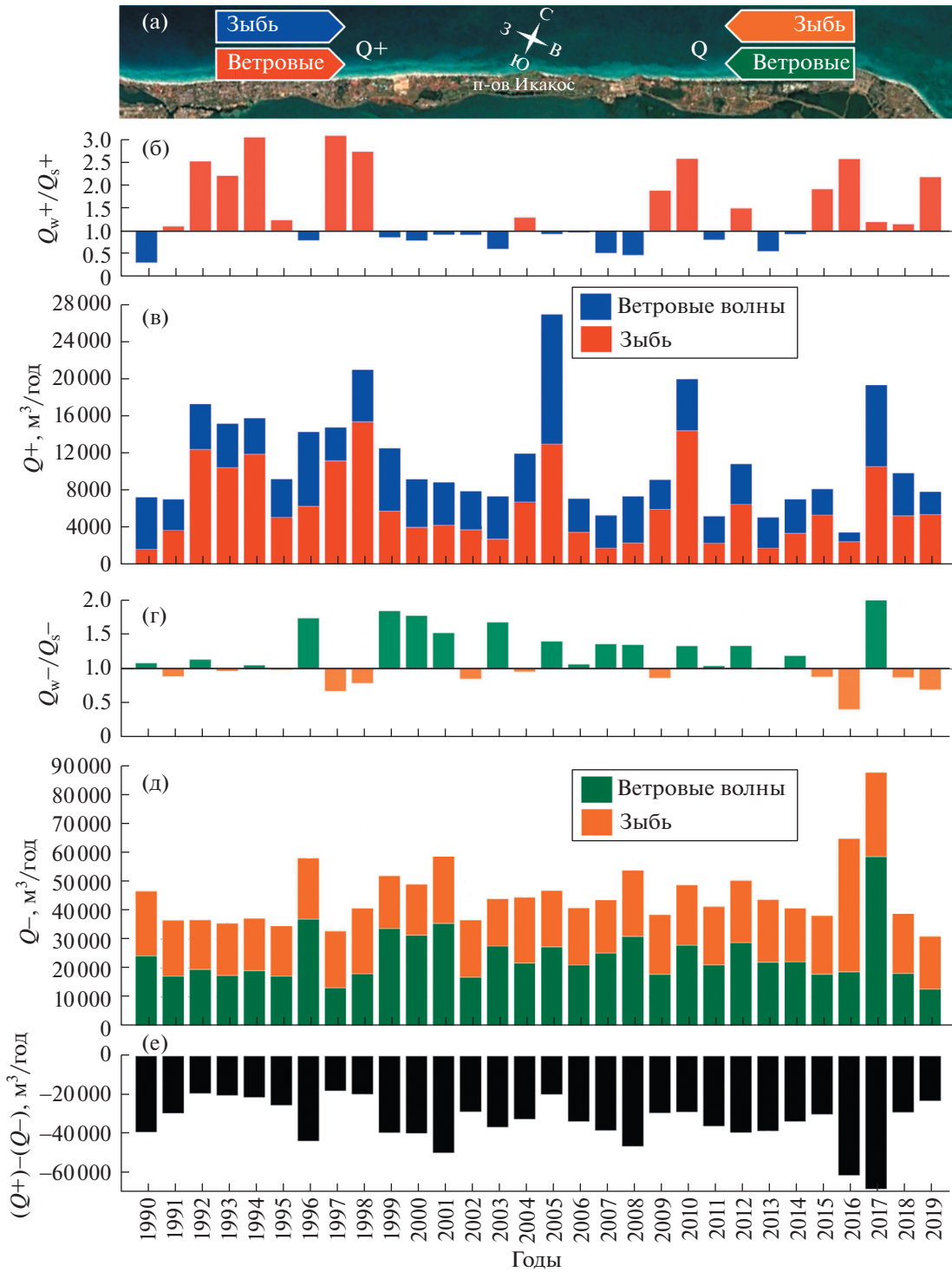
Важнейшей особенностью гидродинамики побережья п-ва Икакос является его подверженность ураганам. В работе [18] приведены сведения о самых сильных ураганах на побережье Кубы, начиная с 1791 г. Траектории и глубины тропических циклонов различны, поэтому общее время прохождения и, соответственно, периоды воздействия ураганов также различаются. Выберем некоторые из ураганов и оценим вдольбереговые потоки, сформированные под воздействием ветровых волн и зыби за период действия урагана. В табл. 4 приведены вклады (в процентах) отдельных ураганов в годовые потоки.

Для ясности, к примеру, в 2017 г. вклад ветровых волн урагана Ирма в годовые вдольбереговые потоки с запада на восток составил 32.2%, зыби того же направления – 44.8%. Другими словами, треть общего объема песка, перенесенного ветровыми волнами с запада на восток, и почти половина объема, транспортированного зыбью, в 2017 г. приходится на ураган Ирма. В направлении с востока на запад ветровым волнением урагана было перенесено две трети от общего за 2017 г. объема осадков.

Таким образом, как показывают данные табл. 4, вклад отдельных тропических циклонов в годовые потоки может быть весьма существенным и даже определяющим. Особенно наглядно это

**Таблица 4.** Вклад некоторых ураганов (%) в годовые вдольбереговые потоки

Ураган	Дата	Период действия, сутки	$Q_w+$	$Q_s+$	$Q+$	$Q_w-$	$Q_s-$	$Q-$
Michelle	Ноябрь 2001 г.	4	0.3	16.5	8.8	35.4	7.7	24.4
Sandy	Октябрь 2012 г.	4	26.8	9.8	20.0	17.8	2.3	11.2
Irma	Сентябрь 2017 г.	6	32.2	44.8	37.9	65.7	23.7	51.8



**Рис. 11.** Общая схема, иллюстрирующая принятые обозначения (а); отношения потоков, сформированных под воздействием ветрового волнения и зыби (б, г); суммарные годовые потоки (в, д); разность между годовыми потоками двух направлений (е).

проявилось при прохождении урагана Ирма с суммарным вкладом в годовые вдольбереговые потоки, направленные с запада на восток, в 38% и 52% – с востока на запад.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основная цель представленной работы – анализ особенностей вдольберегового транспорта

донных отложений в районе п-ва Икакос за период с 1990 по 2019 г. В качестве механизма транспорта рассматриваются компоненты поверхностного волнения: чисто ветровое волнение и зыбь. Необходимые параметры поверхностного волнения получены с помощью современной спектральной волновой модели DHI MIKE 21 SW. Для оценок объемов перемещаемых донных отложений используется математическая модель, рассчитывающая потоки несвязного материала под воздействием ветрового волнения.

Основные результаты:

1. Получен обширный массив данных, состоящий из полей рассчитанных параметров ветрового волнения и зыби в прибрежной зоне п-ва Икакос с временным шагом в 1 ч и охватывающий период в 30 лет (с 1990 по 2019 г.)

2. Рассчитаны вдольбереговые потоки донных осадков, генерируемые ветровыми волнами и зыбью.

3. В прибрежной зоне п-ва Икакос наибольшей повторяемостью обладает ветровое волнение северо-восточных и восточных румбов. Суммарная повторяемость волнения с этих направлений составляет почти 80%. Климатическая повторяемость волн зыби несколько иная, почти 70% волн зыби приходит с севера, 25% — с северо-запада.

4. Наиболее сильное ветровое волнение приходит с северного направления, при этом значительные высоты волн могут превосходить 6 м. Экстремальное ветровое волнение может также наблюдаться при штормах запад-северо-западного направления. По силе воздействия эти два направления (С и ЗСЗ) доминируют. Наиболее сильная зыбь с высотами волн, превышающими 4 м, подходит с северо-западных румбов.

5. В прибрежной зоне п-ва Икакос доминируют вдольбереговые потоки, направленные с востока на запад, в среднем в 4.5 раза превосходящие обратные потоки с запада на восток. В среднегодовом (климатическом) выражении величины потоков с востока на запад оцениваются в 45000 м<sup>3</sup>/год, с запада на восток — порядка 11000 м<sup>3</sup>/год. В структуре потоков преобладают, в целом, компоненты, сформированные под воздействием ветрового волнения. Особенно отчетливо это проявляется в потоках, направленных с запада на восток, в которых доля ветровых волн в 2–3 раза может превышать долю зыби. Тем не менее в обратных потоках с запада на восток фактор зыби может расцениваться как некий фоновый, т.е. постоянно действующий независимо от местных ветровых условий.

6. Вклад отдельных тропических циклонов в годовые потоки может быть весьма значительным и измеряется десятками процентов.

Заметим также, что представленный в работе подход является несколько упрощенным, поскольку не рассматриваются превышения уровня моря, вызванные штормовыми нагонами. Влияние нагонов может быть учтено подключением гидродинамического модуля и является отдельной задачей со своими нетривиальными вопросами настройки и верификации.

## ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Постановка задачи выполнена в соответствии с темой госзадания № 0149-2019-0005 и в рамках проекта РФФИ № 18-55-34002, анализ экспериментальных данных — благодаря финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-17-00060), математическое моделирование и вычислительная часть — при поддержке грантов РФФИ (проекты № 18-05-80035, 19-05-00041, 19-45-230002). Анализ результатов выполнен в рамках программы № 0149-2019-0014 и проекта РФФИ № 20-05-00009.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дунаев Н.Н., Леонтьев И.О., Marti J.L.J. К проблеме защиты берегов курорта Варадеро (Куба) искусственным пляжем // Океанология. 2020. Т. 60. № 4. С. 622–628.  
<https://doi.org/10.31857/S0030157420040085>
2. Дунаев Н.Н., Леонтьев И.О., Репкина Т.Ю., Эрпера Х.Ф. Геоэкологическая обстановка района международного курорта Варадеро (Куба) // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2018. № 50. С. 152–169.
3. Mitrani-Arenal I., Perez-Bello A., Cabrales-Infante J., Povea-Perez Y., Hernandez-Gonzalez M., Diaz-Rodriguez O. Coastal Flood Forecast in Cuba, due to Hurricanes, Using a Combination of Numerical Models // Revista Cubana de Meteorología. 2019. V. 25. № 2. P. 121–138.
4. Pérez-Bello A., Mitrani-Arenal I., Díaz-Rodríguez O., Wettre C., Hole L. A Numerical Prediction System Combining Ocean, Waves and Atmosphere Models in the Inter-American Seas and Cuba // Revista Cubana de Meteorología. 2019. V. 25. № 1. P. 109–120.
5. Медведев В.С., Хуанес Х.Л. Морфолитодинамические исследования в береговой зоне и на шельфе северного побережья Кубы. Континентальные и островные шельфы. Рельеф и осадки. М.: Наука, 1981. С. 229–251.
6. Dunaev N.N., Leont'ev I.O., Repkina T.Y., Marti J.L.J. The Application of Mathematical Modelling to Assess Ecological Safety of the Coastal Area of the International Resort of Varadero (Cuba) // Springer Geology. 2020. V. 1. P. 83–92.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-030-38177-6\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-38177-6_10)
7. DHI Water & Environment. 2007. MIKE 21, Spectral Wave Module.
8. Divinsky B., Kosyan R. Spatiotemporal Variability of the Black Sea Wave Climate in the Last 37 Years //

- Continental Shelf Research. 2017. 136. P. 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2017.01.008>
9. *Divinsky B., Kosyan R.* Parameters of Wind Seas and Swell in the Black Sea Based on Numerical Modeling // *Oceanologia*. 2018. V. 60. P. 277–287. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2017.11.006>
  10. *Taylor K.* Summarizing Multiple Aspects of Model Performance // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. P. 7183–7192.
  11. *Longuet-Higgins M.S.* Alongshore Currents Generated by Obliquely Incident Sea Waves // *Jour. Geophys. Res.* 1970. V. 75. P. 6788–6801.
  12. *Larson M., Hoan L.X., Hanson H.* Direct Formula to Compute Wave Height and Angle at Incipient Breaking // *J. Waterway, Port, Coast, Ocean Eng.* 2009. 136 (2). P. 119–122.
  13. *Zou S., Dalrymple R., Asce F., Rogers B.* Smoothed Particle Hydrodynamics Simulation on Sediment Suspension under Breaking Waves // *Ocean waves measurement and analysis, Fifth Inter. Symposium Waves-2005, Madrid, Spain. 2005. P. 186–192.*
  14. *Walton T.* Coastal Engineering Manual, Part III, Coastal Sediment Processes, Chapter III-6, Engineer Manual 1110-2-1100. 2002. U.S. Army Corps of Engineers. Washington, DC. P. 72.
  15. *Kos'yan R.* Vertical Distribution of Suspended Sediment Concentrations Seawards of the Breaking Zone // *Coastal Engineering*. 1985. V. 9. P. 171–187.
  16. *Jonsson J.G.* On the Existence of Universal Velocity Distributions in an Oscillatory, Turbulent Boundary Layer // Report No. 12, Coast. Eng. Lab/Hydraul. Lab., Tech. Univ. Denmark, 1966. P. 2–10.
  17. *Ashton A.D., Murray A.B.* High-angle Wave Instability and Emergent Shoreline Shapes: 1. Modeling of Sand Waves, Flying Spits, and Capes // *J. Geophys. Res.* 2006. 111, F04011. <https://doi.org/10.1029/2005JF000422>
  18. *González-Ramírez C.M., Guadalupe L.E.* Chronology of Tropical Storms and Hurricanes to be Affected Havana // *Revista Cubana de Meteorología*. 2019. V. 25. № 3. P. 469–480.

## ALONGSHORE SEDIMENT TRANSPORT IN THE AREA OF TROPICAL CYCLONE PASSAGE (HICACOS PENINSULA, CUBA)

**B. V. Divinsky<sup>a,#</sup>, N. N. Dunaev<sup>a</sup>, and R. D. Kosyan<sup>a</sup>**

<sup>a</sup> *P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

<sup>#</sup> *E-mail: divin@ocean.ru*

Presented by Academician of the RAS L.I. Lobkovskiy December 1, 2020

The paper presents the results of the climatic features of alongshore flows of bottom sediments analysis. The object of research is the Icacos Peninsula coastal zone in the northern part of Cuba. On the peninsula, there are beaches of world importance (Varadero), which have noticeably degraded over the past decades, and there is a general erosion and a decrease in their areas. The main purpose of this work is to analyze the features of the alongshore sediment transport in the Icacos Peninsula area for the period from 1990 to 2019. The components of surface waves are considered as a transport mechanism: pure wind waves and swell. Research method – mathematical modeling. Surface wave parameters were obtained using the modern DHI MIKE 21 SW spectral wave model. To estimate the volumes of transported sediments, a mathematical model is used that calculates the flows of non-cohesive sediments under the influence of wind waves. In contrast to the seas of the temperate climatic zone with a pronounced seasonal variation of hydrometeorological parameters, the climate of the coastal zone of Cuba is determined by constant northeastern trade winds and the passage of irregular tropical cyclones.

*Keywords:* wave climate, numerical modeling, longshore sediments transport, hurricanes. Hicacos, Cuba