

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

---

# ОКЕАНОЛОГИЯ

Том XXII

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

3

---

МОСКВА · 1982

УДК 551.04.68

В. Г. БОНДУР, Е. А. ШАРКОВ

## СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ НА ВЗВОЛНОВАННОЙ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

На основании статистической обработки данных аэрофотосъемки морской поверхности получены экспериментальные распределения относительных площадей, а также площадей единичных пенообразований. Обнаружен пороговый характер зарождения пенных структур при скорости ветра  $4-5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  и установлены зависимости средних значений площадей пенопокрытий от скорости ветра (в диапазоне от 2 до  $10,5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ ).

Исследование пространственно-временных характеристик пенной активности является актуальным для решения таких научных и прикладных задач океанологии, как изучение взаимодействия океана и атмосферы [9], динамики ветрового волнения [12], развитие дистационных методов зондирования поверхности океана [2, 4, 8], разработка надежных количественных мер вместо описательных оценок шкал Бофорта, неудовлетворяющих в настоящее время запросы практики [5, 11].

К одним из наиболее важных количественных характеристик пенной активности относятся зависимости единичных размеров образований различных типов (гребней и полосовых структур), а также их относительных площадей покрытия от приповерхностной скорости ветра, состояния морской поверхности, степени волнения, сезона наблюдения, биологической активности и т. п. При этом ввиду зависимости от большого числа факторов физической, химической и биологической природы процесс пенообразования носит стохастический характер и его количественные характеристики должны быть описаны на соответствующем статистическом языке.

В известных в настоящее время работах, посвященных исследованию пенных образований [3, 10, 13, 14], не проводилась достаточно корректная статистическая обработка экспериментальных данных (не выяснены, например, характер распределений, доверительные интервалы ошибок измерений и т. д.). Экспериментальные данные, полученные в результате корабельных исследований, имеют ряд ограничений. Во-первых, в силу своей естественной специфики эти измерения [3, 10] являются в известной мере локальными и не могут обеспечить получение необходимой информации на значительных площадях за достаточно короткое время наблюдения. Во-вторых, они не обеспечивают полной статистической независимости выборок при фотосъемке поверхности, поскольку время жизни отдельных пенных образований может достигать минут и более. В-третьих, корабельным наблюдениям присущи серьезные искажения, связанные с перспективным фотографированием [3]. С другой стороны, применение аэрофотосъемки с высотных носителей или съемки с малых высот ( $100-300 \text{ м}$ ) с помощью скоростных (более  $70 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ ) носителей без использования в аппаратуре сложных компенсационных устройств не позволяет получить высокое пространственное разрешение, которое необходимо для детального анализа пенных структур.

В настоящей работе на основании предположения о квазистационарности и квазиэргодичности случайного процесса пенообразования осуществляется статистическая обработка данных аэрофотосъемки, проведенной с помощью малоскоростного носителя ( $15-20 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ ) с высоты 100 м.

**Методика исследований.** Для проведения натурных исследований использовалась камера, имеющая угол поля зрения  $44^\circ$  и фокусное рас-

стояние объектива 20 см. Пространственное разрешение с учетом разрешающей способности системы объектив — пленка на вибрирующем носителе при высоте полетов 100 м составляло около 2 см. При исследованиях выполнялись прямолинейные полеты с длинами галсов 30—60 км. Эксперименты проводились в акваториях Черного и Баренцева морей с удалением от берега 20—40 км. Сведения о гидрометеорологических условиях (ГМУ) брались по результатам измерений с корабельных и береговых гидрометеорологических станций. Эксперименты проводились при волнении моря 1; 2—3; 3—4; 4—5 баллов и соответствующими скоростях ветра 2; 3,2; 5,7; 9,5 и  $10,5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ . Причем значения скоростей ветра определялись путем осреднения результатов измерений (на высоте 19,5 м) в нескольких местах исследуемого района. Для обеспечения статистической независимости выборок анализировались неперекрывающиеся кадры. Отснятые в натурных экспериментах аэрофильмы группировались в отдельные массивы выборок, соответствующие одинаковым ГМУ. Затем в каждом кадре оконтуривались гребни и пена, вычислялись абсолютные величины площадей покрытия (в пересчете на морскую поверхность) и относительные величины покрытий в процентах и строились их реализации для различных ГМУ.

Разделение (в известном смысле условное) типов пенных образований на гребни («динамическая» пена с характерным временем жизни — секунды) и полосовые (или пятнистые) структуры («статичная» пена с временем жизни порядка минут) осуществлялось оператором на основании анализа яркости, плотности и специфической формы их изображений. Проведение такой обработки различными операторами показало удовлетворительную степень корреляции в идентификации различных пенных образований. В результате проведенной оцифровки получались выборки массивов  $S_j$ -площадей полосовой пены  $S^n$  и гребней  $S^r$ , а также относительных площадей покрытия пеной  $S_\Sigma^n$  и гребнями  $S_\Sigma^r$  в пространственном окне  $100 \times 100 \text{ м}^2$  при скоростях ветра 5,7; 9,5;  $10,5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ . Для аэрофильмов, отснятых при скоростях ветра 2 и  $3,2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ , полосовых структур и гребней обнаружено не было.

Для каждой группы массивов строились гистограммы, являющиеся статистическими аналогами выборочных плотностей вероятностей при конкретных условиях проведения экспериментов [6, 7]:

$$W(S_f) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N \frac{w_i(S_f)}{h_i}, \quad (1)$$

где  $w_i(S_f) = \begin{cases} w_i(S_f), & (S_f)_i \leq S_f \leq (S_f)_{i+1}, \\ 0, & S_f < (S_f)_i, \quad S_f \geq (S_f)_{i+1}; \end{cases}$   $h_i = (S_f)_{i+1} - (S_f)_i$  — ширина интервала;  $n$  — полный объем выборки;  $N$  — число интервалов (разрядов).

Для каждой группы массивов вычислялись также выборочные средние  $\bar{m}$  и дисперсии  $D$  [7]:

$$\bar{m}[S_f] = \bar{S}_f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N n_i (\bar{S}_f)_i, \quad (2)$$

$$D[S_f] = \sigma_{S_f}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^N n_i \{ (\bar{S}_f)_i - m[S_f] \}^2 - \frac{1}{12} h^2, \quad (3)$$

где  $n_i$  — количество слагаемых в каждом разряде;  $(\bar{S}_f)_i$  — среднее значение параметра для каждого разряда.

Статистики вида (2) и (3) являются несмещанными оценками среднего значения и дисперсии и удовлетворяют условиям эффективности и состоятельности [6]. Кроме того, для подбора вида функции распределения выборок  $S_j$  вычислялись значения коэффициентов асимметрии  $\gamma_1$  и эксцесса  $\gamma_2$  (с учетом поправок Шеппарда [7]):

$$\gamma_1 = \frac{1}{\sqrt{D^3[S_f]}} \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N n_i [(\bar{S}_f)_i - M[S_f]]^3 - \frac{1}{4} M[S_f] h^2 \right\}, \quad (4)$$

$$\gamma_2 = \frac{1}{D^2 [S_f]} \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N n_i [(\bar{S}_f)_i - M[S_f]] - \right. \\ \left. - \frac{1}{2} \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^N n_i [(\bar{S}_f)_i - M[S_f]]^2 h^2 + \frac{7}{400} h^4 \right\} - 3. \quad (5)$$

Результаты обработки представлены в таблице и на рис. 1—4.

**Обсуждение результатов.** 1. Полученные по экспериментальным данным плотности распределения относительных площадей двух классов пенных структур весьма сильно отличаются от гауссовского распределения (положительная асимметрия и положительный эксцесс) [12, 13]. Это видно из анализа рис. 1 и данных таблицы. На рис. 1 сплошными кривыми иллюстрируются теоретические гамма-распределения [7]:

$$P(S_f) = \frac{\lambda (\lambda S_f)^{\eta-1} \exp(-\lambda S_f)}{\Gamma(\eta)}, \quad (6)$$

где  $\eta = 6/\gamma_2 = 4/\gamma_1^2$ ;  $\lambda = \sqrt{\eta/\sigma^2}$ ;  $\Gamma(\eta)$  — гамма-функция.

Параметры и доверительные интервалы распределений геометрических характеристик пенообразований

ГМУ, скорость ветра $V$ , $\text{м}\cdot\text{s}^{-1}$	Тип образования	Параметры распределений				Доверительные интервалы с вероятностью $P$				
		$\bar{m}$	$\sigma/\bar{m}$	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$P=0,6$		$P=0,9$		
						нижняя граница	верхняя граница	нижняя граница	верхняя граница	
ГМУ тип 1, $V=5,7$	Полосовая пена	$S_f^n$	17,7	1,02	3,09	10,52	8,8	31,2	2,4	72,9
		$S_f^{\Sigma}$	0,712	1,26	3,2	12,6	0,17	1,14	0,04	2,8
	Гребни	$S_f^r$	0,52	1,11	3,73	22,19	0,16	0,98	0,04	1,95
		$S_f^{\Sigma}$	0,0146	1,24	2,31	6,97	0,0031	0,022	0,002	0,045
ГМУ тип 2, $V=9,5$	Полосовая пена	$S_f^n$	23,2	0,67	2,46	10,77	10,4	38	3,8	72,9
		$S_f^{\Sigma}$	1,13	0,93	2,36	7,10	0,4	2,2	0,1	3,0
	Гребни	$S_f^r$	0,93	0,75	3,28	15,2	0,34	1,21	0,16	2,08
		$S_f^{\Sigma}$	0,04	0,71	1,67	3,22	0,016	0,067	0,004	0,12
ГСУ тип 3, $V=10,5$	Полосовая пена	$S_f^n$	26,3	1,02	3,64	25,01	10,08	51	4,2	80
		$S_f^{\Sigma}$	1,62	0,80	1,22	0,92	0,6	3,2	0,16	4,8
	Гребни	$S_f^r$	1,2	2,1	10,87	6,17	0,36	1,39	0,21	2,24
		$S_f^{\Sigma}$	0,0695	1,08	4,36	16,6	0,015	0,11	0,003	0,21

Полученные экспериментальные распределения носят достаточно устойчивый характер и мало деформируются в зависимости от изменения силы ветра в пределах от 5 до 10,5  $\text{м}\cdot\text{s}^{-1}$  (например, наблюдаются изменения коэффициента асимметрии в пределах от 2 до 4). Вероятность соответствия экспериментальных гистограмм гамма-распределениям оценивалась по критерию согласия Пирсона  $\chi^2$  [6, 7] и составляла для всех случаев величину не менее 0,5—0,6. Выборочное среднее значение распределений имеет явную тенденцию к росту по мере увеличения силы ветра (более подробно эти зависимости будут обсуждены ниже); такая особенность выявлена и у выборочной дисперсии (отношение же  $\sigma$  к  $\bar{m}$  порядка единицы). В силу наличия сильного «хвоста» (больших коэффициентов асимметрии) у экспериментальных распределений выборочную дисперсию нельзя считать мерой достоверности измерений (как это делается, например, в [14]), и следует проводить специальные вычисления доверительных интервалов с соответствующими уровнями довери-

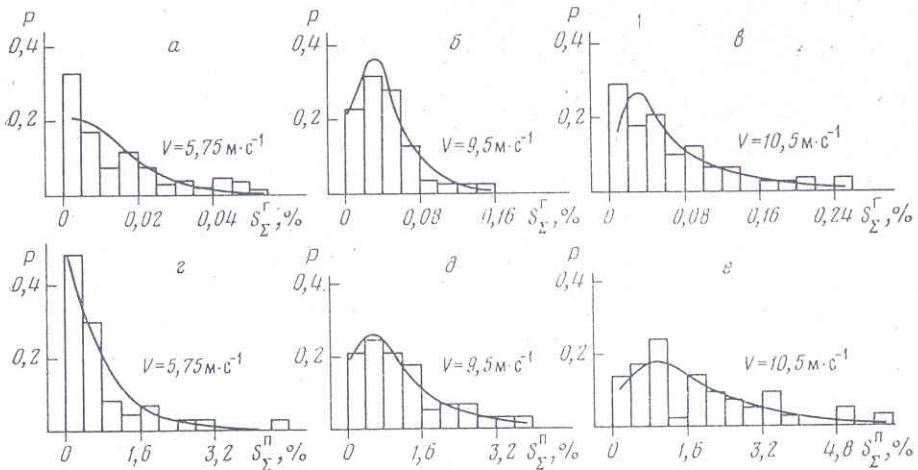


Рис. 1. Гистограммы распределений относительных площадей пенопокрытий в пространственном окне  $100 \times 100 \text{ м}^2$

*а, б, в* — гребни; *г, д, е* — полосовая пена при различных скоростях ветра. Сплошные кривые — гамма-распределения с параметрами, полученными при обработке соответствующих гистограмм (см. таблицу)

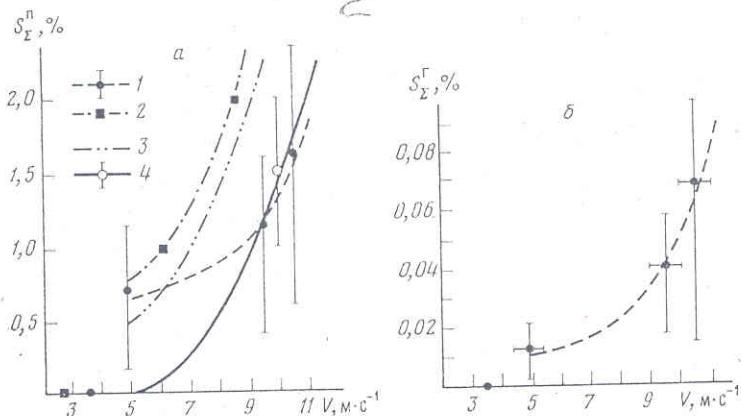


Рис. 2. Экспериментальные зависимости относительной площади покрытия (*а*) полосовой пены ( $S_{\Sigma}^n$ ) и (*б*) — гребней ( $S_{\Sigma}^{\Gamma}$ ) в процентах от скорости ветра (на высоте 19,5 м)

1 — средние значения (точки) с доверительными интервалами при достоверности 0,6; пунктир — аппроксимация (7) и (8) данной работы; 2 — экспериментальные точки [10]; 3 — аппроксимация данных [3]; 4 — экспериментальная точка и аппроксимация [14]

тельной вероятности. Результаты расчетов доверительных интервалов, проведенных с уровнями достоверности 0,6 и 0,9, показывают резкую асимметричность верхнего и нижнего пределов по отношению к выборочному среднему (см. таблицу и рис. 2). Рассмотрим практически важный вопрос о зависимости средних значений пенопокрытий и площадей единичных образований от скорости ветра. Из анализа полученных данных, во-первых, можно указать на наличие пороговой области значений скоростей ветра при образовании пенных структур, что отмечалось и ранее [3, 10, 13, 14]. Она колеблется для исследованных акваторий (Черное море, температура воды  $12^\circ\text{C}$ ) от 4,5 до 5,5  $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$  (рис. 3, 4). Вторым, более важным моментом является факт обнаружения при анализе наших результатов порога у средних величин относительной площади пенопокрытий (рис. 2). Средние значения относительных площадей покрытия (в %) по нашим экспериментальным данным могут быть аппроксимированы ступенчатыми функциями (пунктир на рис. 2) — для полосовых структур:

$$S_{\Sigma}^n = \begin{cases} 0 & V < 5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}, \\ 0,65 \cdot [1 + 4,76 \cdot 10^{-2} (V - 5)^2] & V \geq 5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}; \end{cases} \quad (7)$$

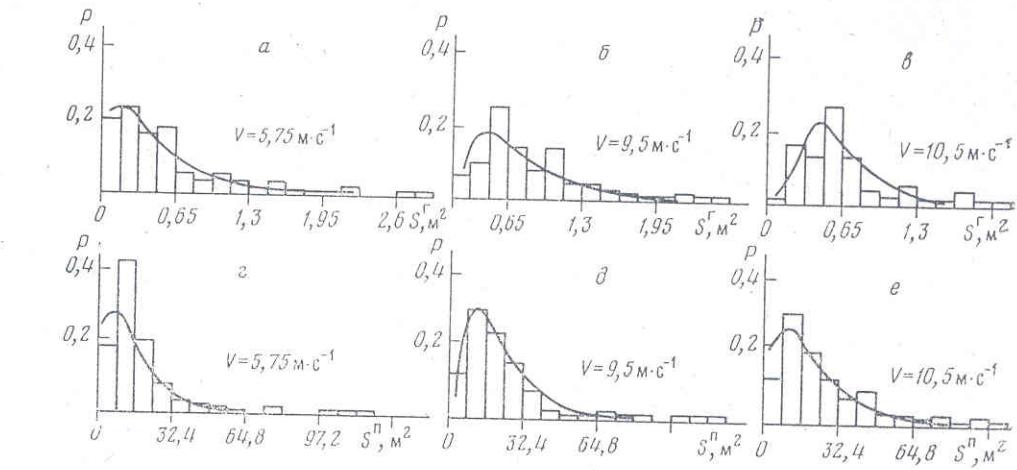


Рис. 3. Гистограммы распределения площадей единичных пенных образований в пространственном окне  $100 \times 100 \text{ м}^2$   
 $a, b, c$  — гребни;  $d, e, f$  — полосовая пена при различных скоростях ветра. Сплошные кривые — гамма-распределения с параметрами, полученными при обработке соответствующих гистограмм (см. таблицу)

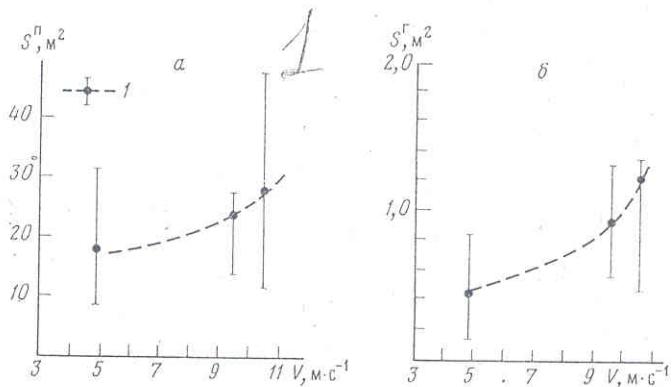


Рис. 4. Экспериментальные зависимости площади (в  $\text{м}^2$ ) отдельного пенного образования — полосовой пены  $S^n$  (а) и гребня (б)  $S^r$  от скорости ветра (в  $\text{м}\cdot\text{s}^{-1}$ )  
 $1$  — средние значения (точки) с доверительными интервалами ( $P=0,6$ ) и аппроксимации (10) и (11)

для гребней:

$$S_{\Sigma}^r = \begin{cases} 0 & V < 5 \text{ м}\cdot\text{s}^{-1}, \\ 0,015 \cdot [1 + 2,2 \cdot 10^{-2} (V - 5)^3] & V \geqslant 5 \text{ м}\cdot\text{s}^{-1}; \end{cases} \quad (8)$$

где  $V$  — скорость ветра.

Интересно отметить, что аппроксимации относительных площадей пенопокрытия, полученных другими авторами, при значении скорости ветра  $5 \text{ м}\cdot\text{s}^{-1}$  практически совпадают с нашим значением ( $S_{\Sigma}^n = 0,65 \%$ ). Так, по данным [3] —  $S_{\Sigma}^n = 0,5 \%$  (кривая 3, рис. 2, а), по данным [10] —  $S_{\Sigma}^n \approx 0,75 \%$  (кривая 2 рис. 2, а). Для наглядности аппроксимационные кривые этих авторов оборваны при скорости ветра  $5 \text{ м}\cdot\text{s}^{-1}$ . На этом же рисунке представлены данные работы [14] (кривая 4). В-третьих, в отличие от утверждения авторов работы [14] (получившего заметное распространение) о появлении полосовой пены только при значениях скорости ветра<sup>1</sup> выше  $9 \text{ м}\cdot\text{s}^{-1}$ , по нашим данным, происходит «пороговое» рождение практически одновременно как гребней (бараек), так и полосовых структур, которые являются естественным продолжением во временной эволюции «динамических» пенных образований.

<sup>1</sup> Кстати, в работе [14] не проводились эксперименты при скоростях ветра ниже  $10 \text{ м}\cdot\text{s}^{-1}$ , и указанное утверждение экспериментально не обосновано.

При этом было обнаружено, что в исследованных ГМУ полосовая пена сопровождает гребни при всех значениях силы ветра и вклад в общее пенопокрытие (по относительной площади) полосовых структур подавляющий. Отношение площади этих структур к площади гребней  $R = S_{\Sigma}^n / S_{\Sigma}^r$  определяется следующей аппроксимирующей формулой

$$R = R_0 - a(V - 5) \text{ при } V > 5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (9)$$

где  $R_0 = 40$ ;  $a = 3,4$ .

Из формулы (9) следует, что по мере возрастания силы ветра отношение  $R$  уменьшается по линейному закону от 40 до 23. Такое отличное от нуля значение коэффициента  $R$  при пороговых значениях скорости ветра  $V \approx 5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  естественно и, скорее всего, связано со значительным временем жизни «полосовой» пены. Ввиду роста площади зарождающихся гребней при усилении ветра отношение  $R$  будет уменьшаться. Однако, как следует из результатов работ [3, 14], величина относительной площади, занятой гребнями, имеет тенденцию к насыщению ( $S_{\Sigma}^r \rightarrow 6 \div 7\%$ ) при скоростях ветра  $V = 15 \div 20 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ . Поэтому отношение  $R$  при дальнейшем усилении ветра ( $V > 15 \div 20 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ ) начнет увеличиваться.

Анализ доверительных интервалов  $S_{\Sigma}^r$  и  $S_{\Sigma}^n$  с доверительными вероятностями 0,6 и 0,9 (таблица) показывает, что оценки скорости ветра в диапазоне  $5 \div 11 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  по единичным измерениям относительного пенопокрытия на участках размером  $100 \times 100 \text{ м}^2$  могут приводить к значительным ошибкам. Косвенно аналогичный вывод можно сделать и из анализа данных [3] (рис. 4), хотя авторы и не приводят оценок достоверности своих результатов. Определенная однозначность в решении указанного важного для практики вопроса может быть получена, по нашим оценкам, при более значительных площадных реализациях. Для определения размера пространственного кадра  $S_{\Sigma}$ , обеспечивающего заданную статистическую точность оценки математического ожидания, воспользуемся соотношением [1]:

$$S_{\Sigma} = \frac{1}{2\beta\varepsilon^2} \left( \frac{\sigma}{m} \right)^2, \quad (10)$$

где  $\varepsilon^2$  — квадрат нормированной среднеквадратичной ошибки;  $\beta$  — ширина полосы частот.

Проведенные расчеты показывают, что 5%-ная точность оценки математического ожидания относительного пенопокрытия для диапазона скоростей ветра  $5 \div 11 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  может быть получена при размерах пространственного кадра более  $3 \times 3 \text{ км}^2$ .

2. Высокое пространственное разрешение, обеспеченное в настоящих экспериментах, позволило получить (в отличие от ранних работ [3, 10, 13, 14]) информацию о площадях единичных образований — гребней и полосовых структур. Характер распределений единичных площадей пенообразований двух классов практически тот же, что и у распределений суммарных площадей — по классу они близки к гамма-распределению, имеют высокие положительные значения коэффициентов эксцесса и асимметрии (см. таблицу и рис. 3). Параметры распределений достаточно устойчивы при изменении скорости ветра.

Интересно отметить, что, как и в случае относительной площади пенопокрытий, в зависимостях средних значений абсолютных площадей единичных образований от скорости ветра (рис. 4) четко выявляются «пороги», и могут быть предложены соответствующие ступенчатые аппроксимации: для абсолютной площади ( $\text{м}^2$ ) индивидуальных полосовых образований в виде

$$S^n (\text{м}^2) = \begin{cases} 0 & V < 5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}, \\ 17 + 0,0307(V - 5)^2, & V \geq 5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}; \end{cases} \quad (11)$$

для гребней

$$S^r (\text{м}^2) = \begin{cases} 0 & V < 5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}, \\ 0,4 + 0,0384(V - 5)^2, & V \geq 5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}. \end{cases} \quad (12)$$

Отметим значительные величины доверительных интервалов у  $S^r$  и  $S^n$ , особенно при  $P=0,9$  (см. таблицу). Это обстоятельство не позволяет с достаточной уверенностью говорить о возможности оценки скорости ветра по измерениям в пространственном кадре  $100 \times 100 \text{ м}^2$  площадей единичных образований, хотя при наличии соответствующей статистической обеспеченности (см. п. 1) такой вопрос может ставиться.

3. Одним из важных выводов качественной теории эволюции энергетических спектров развитого морского волнения [14] является зависимость между диссилируемой энергией обрушающейся волны и площадью пенопокрытия (гребни). Основываясь на этом заключении и наших экспериментальных данных, можно предположить существование: 1) «порога» диссилируемой энергии (в среднем на единицу поверхности моря) при обрушении волны, 2) слабой кубической зависимости этой энергии при росте силы ветра (по крайней мере в диапазоне скоростей ветра  $5-10,5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ ). Кроме того, одновременное получение в наших экспериментах информации об относительных и абсолютных площадях пенопокрытия позволяет ввести следующий коэффициент:

$$R_1 = S_{\Sigma}^r / S^r, \quad (13)$$

который по физическому смыслу является удельной (на единицу площади поверхности моря) плотностью очагов диссиляции энергии. Используя данные таблицы, коэффициент можно аппроксимировать следующей ступенчатой функцией:

$$R_1 \left( \frac{1}{\text{км}^2} \right) = \begin{cases} 0 & V < 5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}, \\ 281 \cdot [1 + 6,37 \cdot 10^{-3}(V - 5)] & V \geqslant 5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}. \end{cases} \quad (14)$$

Отсюда следует, что возникающая пороговая плотность очагов диссиляции энергии составляет около 300 центров на  $1 \text{ км}^2$  и затем эта величина возрастает (по кубическому закону) и при  $V=10,5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  составляет около 580 на  $1 \text{ км}^2$ .

**Заключение.** Проведенная статистическая обработка экспериментального материала позволила сформулировать следующие выводы:

1. Плотности распределения величин площади единичных пенообразований и относительной площади покрытия гребнями и полосовыми структурами на длинах реализаций  $20-40 \text{ км}$  и при размерах кадра съемки  $100 \times 100 \text{ м}^2$  близки к гамма-распределениям с достаточно стабильными (при изменениях скорости ветра от  $5,7$  до  $10,5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ ) параметрами.

2. Обнаружено, что зависимости средних величин относительной площади пенопокрытий и площадей единичных образований двух классов от скорости ветра носят «пороговый» характер. Указанные зависимости, кроме  $S_{\Sigma}^r(V)$ , имеют квадратичный характер от скорости ветра, последняя — кубический. При этом показано, что в исследованных ГМУ и акваториях преобладают полосовые структуры.

## ЛИТЕРАТУРА

- Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. М.: Мир, 1974.
- Бордонский Г. С., Василькова И. Б., Веселов В. М. и др. Спектральные характеристики СВЧ излучения пенных образований. — Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1978, т. 14, № 6, с. 656—663.
- Бортковский Р. С., Кузнецов М. А. Некоторые результаты исследования состояния морской поверхности. — В кн.: Тайфун-75. Т. 1. Л.: Гидрометеоиздат, 1977, с. 90—105.
- Бялко А. В., Ефименко И. Д., Пелевин В. Н., Судьбин А. Н. О яркости поверхности моря. — В кн.: Гидрофизические и оптические исследования в Индийском океане. М.: Наука, 1975.
- Ветер и волны в океанах и морях. Справочные данные. Л.: Транспорт, 1974.
- Кендалл М. Д., Стюарт А. Теория распределений. Т. 1. М.: Наука, 1966.
- Крамер Т. Математические методы статистики. М.: Мир, 1975.
- Матвеев Д. Т. Анализ результатов радиотеплового зондирования морской поверхности при штурме. — Метеорология и гидрология, 1978, № 4, с. 58—66.
- Процессы переноса вблизи поверхности раздела океан — атмосфера. Л.: Гидрометеоиздат, 1974.

10. Самойленко В. С., Матвеев Д. Т., Семенченко Б. А. Материалы к количественной оценке покрытия поверхности океана пеной.— В кн.: Тропекс-72. Л.: Гидрометеоиздат, 1974, с. 584—559.
11. Alcock R. K., Morgan D. G. Investigation of wind and sea state with respect to the Beaufort scale.— Weather, 1978, v. 33, N 7, p. 271—277.
12. Hasselmann K. On the spectral dissipation of ocean waves to Whitecapping.— Boundary-Layer Meteorology, 1974, v. 6, p. 107—127.
13. Monahan E. C. Oceanic Whitecaps.— J. Phys. Oceanogr., 1971, v. 1, N 2, p. 139—144.
14. Ross D., Cordon V. Observations of Oceanic Whitecaps and their Relation to Remote Measurements of Surface Wind Speed.— J. Geophys. Res., 1974, v. 79, N 3, p. 444—452.

Институт космических  
исследований АН СССР,  
Москва

Поступила в редакцию  
9.IV.1981

V. G. BONDUR, E. A. SHARKOV

STATISTICAL CHARACTERISTICS OF FOAM FORMATIONS  
ON A DISTURBED SEA SURFACE

The statistical processing of the sea surface aerophotographic data has yielded experimental distributions of relative areas, as well as areas of single foam formations. The generation of foam structures has been found to be of a bumpy character at a wind speed of  $4\text{--}5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . A dependence has been established between mean values of the foam areas and wind speed (over the range from  $2$  to  $10.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ).