

го усилителя и подавался на амплитудный анализатор. Номер канала определялся по пику полного поглощения. Детекторы Дт 2, Дт 3 облучались моноэнергетическим пучком электронов на β -спектрометре в диапазоне энергий 0,2—3,0 МэВ. Полученная зависимость $U_{\text{вых}} = kE_e$ приведена на рис. 4. Спектрометр применялся на спутнике Земли серии «Интеркосмос».

Авторы признательны Ю. И. Логачеву, С. Н. Кузнецову за ценные советы; Л. А. Смирнову и Ю. П. Гордееву за помощь в изготовлении и испытании аппаратуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Винклер Дж. Тр. междунар. семинара по исследованию космического пространства. Л., 1969, с. 133—158. 2. Вакулов П. В., Коврыгина Л. М., Минеев Ю. В., Тверская Л. В. Динамика энергичных электронов радиационных поясов Земли во время магнитных бурь.—Изв. АН СССР. Сер. физ. 1976, 40, № 3, с. 502—509. 3. Минеев Ю. В., Савенко И. А., Савельев В. Г., Спирькова Е. С. Изучение электронов с энергиями 0,3—3 МэВ на спутнике «Прогноз-4».—Геомagnetизм и астрономия, 1978, 18, № 2, с. 203—206. 4. Алексеев Н. В., Вакулов П. В., Коврыгина Л. М., Минеев Ю. В., Щербовский Б. Я. Полупроводниковый спектрометр электронов для исследований в космосе.—Косм. исследования, 1974, 12, № 2, с. 301—304.

Поступила в редакцию
27.02.79

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1981, т. 22, № 1

УДК 551.466.4

Г. Е. КОНОНКОВА, К. В. ПОКАЗЕЕВ, Л. Л. ТАРАСОВ

ВЕТРОВЫЕ ВОЛНЫ САНТИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА НА ТЕЧЕНИЯХ

При радиофизических методах исследования морской поверхности большую роль играют волны сантиметрового диапазона. Взаимодействие этих волн с длиннопериодными компонентами волнения и течения изменяет существенно как характеристики волн, так и характер отраженного радиосигнала. В реальных морских условиях может наблюдаться ситуация, когда ветровые волны сантиметрового диапазона генерируются ветром на течениях, созданных орбитальными движениями длиннопериодных компонент волнения или течениями другого происхождения. Эксперименты показали, что процесс генерации ветровых волн сантиметрового диапазона на спутных течениях (направление течения совпадает с направлением распространения волн) имеет некоторые особенности по сравнению с процессом генерации ветровых волн без течения [1].

В данной работе выполнено экспериментальное исследование процесса генерации ветровых волн при малых разгонах на спутном и встречном течениях. Эксперимент поставлен в гидродинамическом лотке, который был оборудован съемной крышей и вентиляционной установкой для создания ветровых волн. Используемая часть лотка имела следующие размеры: высота 0,5 м, ширина 0,6 м, длина 7,5 м. Скорость течения измерялась микровертушкой X-10, скорость воздушного потока — нестандартной микровертушкой, ветровые волны — струнным

волнографом. Для измерения длин волн использовалась кино- и фото-съемка. Измерения скорости течения показали, что на глубине от 1 до 20 см скорость неизменна, т. е. в пределах волнового слоя скорость практически не зависит от глубины. Эксперименты проводились при средних скоростях течения от -45 см/с (встречное течение) до $+14$ см/с (спутное течение).

Скорость воздушного потока над волновой поверхностью удовлетворяла логарифмической зависимости. Средняя скорость ветра V на высоте 7 см составляла от 2,3 до 6,2 м/с. Наблюдения показали, что при генерации волн на встречном течении их длина, высота и период возрастают по сравнению с волнами, генерируемыми тем же ветровым потоком на неподвижной воде. На спутном течении наблюдается

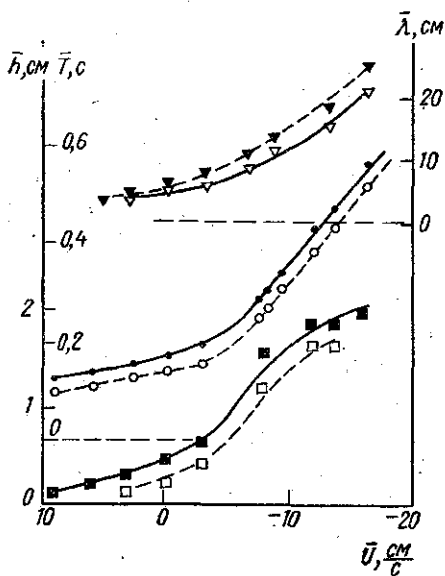


Рис. 1. Зависимость $\bar{\lambda}(V, \blacktriangledown)$, $\bar{T}(O, \bullet)$, $\bar{h}(\square, \blacksquare)$ от скорости течения \bar{U} при скорости ветра $V=3,2$ и $3,85$ м/с соответственно

Таблица 1
Экспериментальные значения минимального периода \bar{T}_m и значения T_K , рассчитанные по формуле (3) для различных скоростей течения

Разгон, м	\bar{U} , см/с	\bar{T}_m , с	T_K , с
4,5	-7,9	0,21	0,20
4,5	-9,2	0,24	0,23
4,5	-14,2	0,35	0,36
4,5	-23,3	0,69	0,60
4,5	-29,6	0,79	0,76
4,5	-36,1	0,98	0,93
4,5	-42,0	1,07	1,07
1,6	-29,6	0,70	0,76
1,6	-42,0	1,06	1,07

уменьшение этих трех параметров. При этом влияние встречного течения оказывается более существенным, чем спутного.

На рис. 1 приведены экспериментальные значения средних высот, длин и периодов волн в зависимости от скорости течения при различных скоростях ветра. При неизменной скорости течения средний период волн \bar{T} зависит от скорости ветра. Зависимость \bar{T} от скорости течения близка к линейной, причем наклон прямой, определяющей эту зависимость, различен для спутного и встречного течения. Изменение параметров волн при их генерации на течениях (см. рис. 1) качественно согласуется с теоретической работой [2] и отличается от изменения параметров волн при их распространении на неоднородном течении (например, при трансформации зыби на приливных течениях). Различие двух физических явлений — генерации волн на течении и распространения волн на неоднородном течении подробно рассмотрено в обзоре [3].

Наблюдения показывают, что на встречном течении происходит образование волн только с периодом, не меньшим некоторого критического значения \bar{T}_m , зависящего от скорости течения. Этот факт может быть объяснен следующим образом. Согласно [4], для стационар-

ной системы волн, генерируемых на глубокой воде, текущей со скоростью U , дисперсионное соотношение имеет следующий вид:

$$\omega = (gk)^{1/2} + kU, \quad (1)$$

откуда

$$\sqrt{k} = \frac{-\sqrt{g} + \sqrt{g + 4U\omega}}{2U}, \quad (2)$$

здесь ω , k — частота и волновое число соответственно, g — ускорение силы тяжести.

Если течение встречное, т. е. $U < 0$, то существует критическое значение $\omega_k = -g/4U$ или

$$T_k = -\frac{8\pi U}{g}. \quad (3)$$

При $\omega > \omega_k$ (2) не имеет решений в области действительных чисел. В табл. 1 приводятся наблюдаемые значения минимального среднего периода \bar{T}_m и вычисленные по формуле (3). Расчетные значения минимального периода хорошо согласуются с экспериментальными, что свидетельствует о справедливости формулы (3).

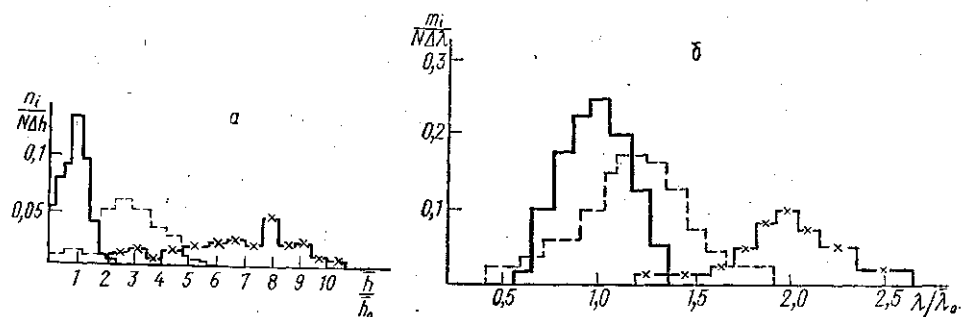


Рис. 2. Гистограммы распределения высот (а) и длин (б) волн при скорости ветра 3,2 м/с и различных скоростях течения: (—) $\bar{U}=0$; (---) $\bar{U}=-3,0$ см/с; (-×-) $\bar{U}=-9,2$ см/с; h_0 , λ_0 — средняя высота и длина волны при $\bar{U}=0$ соответственно; N — общее число измерений; n_i — число высот волн, лежащих в интервале Δh ; m_i — число длин волн, лежащих в интервале $\Delta \lambda$

По осциллограммам и кинограммам были построены гистограммы распределения высот и длин волн. Как было показано ранее [5], дифференциальная кривая распределения высот волн на начальной стадии развития волнения отличается от теоретического распределения Рэлея и наблюдений в природных условиях меньшим разнообразием высот волн и большей симметрией. Такое отличие наблюдалось и в наших экспериментах в отсутствие дополнительных течений. Наибольший интерес представляет влияние течений на функции распределения. Выяснилось, что на встречном течении возрастает доля высоких и длинных волн, на спутном — доля более низких и коротких. На рис. 2 показаны гистограммы распределения высот и длин ветровых волн на встречном течении. Ниже приведены значения коэффициентов вариации θ и асимметрии γ распределения высот волн при скорости ветра 3,2 м/с и нескольких значениях средней скорости течения.

\bar{U} , см/с	0	-3,0	-9,2	-14,2
v	0,43	0,35	0,35	0,41
γ	0,023	-0,026	-0,142	-0,183

На встречном течении уменьшается разнообразие высот волн, определяемое коэффициентом вариации Φ . Особенно заметно уменьшается доля волн, высота которых превышает средние значения \bar{h} , что видно из изменения знака и величины коэффициента асимметрии γ . Наблюдения в природе [6] также показывают, что течения влияют на распределение параметров ветровых волн. Можно предполагать, что в районах моря, где наблюдаются сильные течения, статистика ветровых волн будет иметь некоторые особенности.

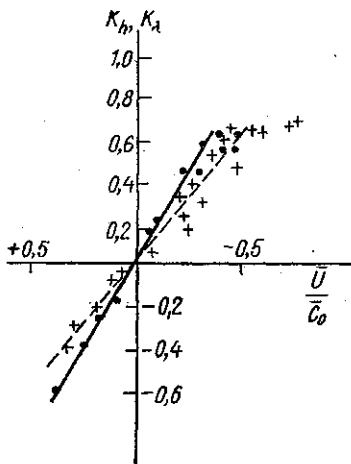


Рис. 3. Зависимость коэффициентов гидродинамического контраста K_h (·) и K_λ (+) от \bar{U}/c_0

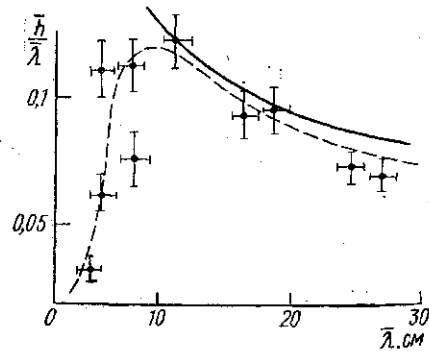


Рис. 4. Зависимость крутизны волны \bar{h}/λ от ее длины. Сплошная кривая получена по формуле (4) для скорости ветра $V=3,2$ м/с. Пунктирная кривая соответствует экспериментальным значениям

Для описания зависимости средней высоты волны \bar{h} от скорости течения воспользуемся коэффициентом гидродинамического контраста $K_h = \bar{h}(\bar{U}, V)/\bar{h}(0, V)$, где $\bar{h}(\bar{U}, V)$ — средняя высота волн, генерируемых на течении со средней скоростью \bar{U} при средней скорости ветра V , $\bar{h}(0, V)$ — средняя высота волн, генерируемых ветром той же скорости при том же разгоне, но без течения. На рис. 3 представлена зависимость гидродинамического контраста K_h от безразмерной скорости течения \bar{U}/c_0 (c_0 — средняя фазовая скорость волн без течения) при различных скоростях ветра. Для данных нашего эксперимента при изменении \bar{U}/c_0 от $-0,5$ до $+0,5$ имеет место равенство

$$\lg K_h = -1,8 \frac{\bar{U}}{c_0}.$$

Следовательно, в рассматриваемом диапазоне коэффициенты K_h можно считать универсальным параметром, описывающим зависимость \bar{h} от \bar{U} и не зависящим от скорости ветра. Наряду с K_h можно ввести

коэффициент $K_\lambda = \bar{\lambda}(\bar{U}, V) / \bar{\lambda}(0, V)$, где $\bar{\lambda}(\bar{U}, V)$ и $\bar{\lambda}(0, V)$ — средняя длина волны на течении и без него при неизменном разгоне и скорости ветра. Зависимость K_λ от \bar{U}/c_0 имеет вид

$$\lg K_\lambda = -1,2 \frac{\bar{U}}{c_0}.$$

Из того факта, что при одинаковой скорости ветра и разгоне на встречном течении высоты волн имеют большие значения, чем без течения или на спутном течении, следует, что скорость роста волн по разгону на встречном течении выше, чем без него или на спутном течении. Это согласуется с наблюдаемым уменьшением скорости роста спектральных компонент по разгону на спутном течении [1].

На основе экспериментальных данных о средних длинах и высотах волн была построена зависимость (рис. 4) средней крутизны $\bar{h}/\bar{\lambda}$ от средней длины волны при постоянной скорости ветра ($V=3,2$ м/с) и различных скоростях течения (от 0 до -30 см/с). В области коротких волн, меньших 10 см, средняя крутизна интенсивно растет с ростом средней длины волны, достигает наибольшего значения 0,12 и постепенно убывает при дальнейшем увеличении длины волны. Подобный ход крутизны волн отметил и объяснил, исходя из теоремы о моменте импульса, В. В. Шулейкин [7, 8]. Для широкого диапазона длин волн — от максимума крутизны до предельной при данной скорости ветра длины волн λ_∞ — В. В. Шулейкин предложил формулу

$$\frac{h}{\lambda} = 0,04 + 0,757 \left(\frac{\lambda}{\lambda_\infty} \right)^{2/3}. \quad (4)$$

Кривая, рассчитанная по этой формуле для скорости ветра 3,2 м/с, приведена на рис. 4. Экспериментальные точки оказались близкими к теоретической кривой, что указывает на универсальный характер формулы (4), оказывающейся справедливой и для волн, генерируемых на встречном течении.

Применение теории подобия и размерностей к анализу ветрового волнения является одним из эффективных методов его использования, так как позволяет установить важные эмпирические и физические закономерности. Однако для волн, генерируемых на течении, не выполняются известные соотношения, полученные на основе этой теории. Например, в выражении $\hat{\omega}_m = A \hat{X}^{-0,33}$, где $\hat{\omega}_m = \omega_m V_* / g$ — безразмерная частота спектрального максимума, $\hat{X} = gx/V_*^2$ — безразмерный разгон, V_* — динамическая скорость воздушного потока, появляется зависимость от разгона \hat{X} . Поскольку на начальной стадии развития с точностью до 5% выполняется равенство частоты максимума спектра ветровых волн ω_m и их средней частоты $\bar{\omega}$, то в дальнейшем мы будем пользоваться средней частотой и средней фазовой скоростью.

Анализ экспериментальных материалов привел к эмпирической формуле, связывающей безразмерную скорость в движущейся системе координат $\hat{c} = (\bar{c} - \bar{U}) / \bar{V}_*$ с безразмерным разгоном \hat{X} :

$$\hat{c} = A \hat{X}^B,$$

где $B=0,27$, а коэффициент A зависит от скорости течения. Введение безразмерной частоты $\hat{\omega}_0 = (\bar{\omega} V_* / g) (\bar{c} - \bar{U}) / \bar{c}$, учитывающей скорость течения \bar{U} , позволяет получить зависимость между $\hat{\omega}_0$ и \hat{X} :

$$\hat{\omega}_0 = F \hat{X}^D.$$

Величины F и D зависят от скорости течения. В табл. 2 приведено несколько значений A , F , D при различных скоростях течения. Уменьшение безразмерной частоты ω_0 с ростом безразмерного разгона происходит более интенсивно при возрастании скорости течения. F уменьшается с увеличением скорости встречного течения. При $\bar{U}=0$ показатель D равен $-0,205$, что отличается от величины $-0,33$, обычно получаемый в измерениях (см., например, [1, 5]).

Таблица 2

Зависимость безразмерных коэффициентов A , F , D от скорости течения \bar{U}

\bar{U} , см/с	A	F	D
+6,9	0,22	1,46	-0,152
0	0,31	2,67	-0,205
-14,2	0,48	2,53	-0,268
-29,6	0,65	3,55	-0,377

Дрейфовое спутное течение, действуя подобно спутному течению стороннего происхождения, уменьшает величину D . Влияние дрейфового течения особенно сильно в лабораторных экспериментах или на начальной стадии развития ветрового волнения, когда фазовая скорость волн на частоте максимума спектра соизмерима со скоростью дрейфового течения [3].

Проведенный эксперимент показал, что при генерации ветровых волн на течениях имеют место следующие особенности.

1. При генерации волн на встречном течении их длина, высота и период больше, а на спутном течении меньше, чем при генерации на спокойной воде при том же разгоне и той же скорости ветра.

2. Функции распределения высот и длин ветровых волн зависят от скорости течения.

3. Коэффициенты гидродинамического контраста K_b , K_a при изменении \bar{U}/c_0 от $-0,5$ до $+0,5$ не зависят от скорости ветра.

4. Экспериментальные зависимости безразмерной фазовой скорости \hat{c} и частоты $\hat{\omega}_0$ от безразмерного разгона при генерации волн на течениях аппроксимированы формулами, отличающимися от предложенных ранее для случая отсутствия течения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кононкова Г. Е., Поборчая Л. В., Показеев К. В. Лабораторное исследование генерации ветровых волн на спутном потоке. Изв. АН СССР. Физ. атм. и океана, 1977, 13, с. 991—993.
2. Гришин Г. А., Ефимов В. В. О ветровых волнах на неоднородном по глубине стационарном течении.— Морские гидрофиз. исследования, 1973, № 4(63), с. 24—42.
3. Кононкова Г. Е., Показеев К. В. Исследования ветровых волн на течениях.— Деп. ВИНТИ, № 969-78 от 20.03.78, 26 с.
4. Kitaigorodskii S. A., Krasitskii V. P., Zaslavskii M. M. On Phillip's theory of equilibrium range in the spectra of wind-generated gravity waves.— J. Phys. Oceanogr., 1975, 5, N 3, p. 410—420.
5. Кононкова Г. Е., Никитина Е. А., Поборчая Л. В., Сперанская А. А. О спектрах ветрового волнения при малом разгоне.— Изв. АН СССР. Физ. атм. и океана, 1970, 6, № 7, с. 747—751.
6. Жевноватый В. Т. Изменение параметров ветровых волн на приливных течениях.— В кн.: Сб. трудов Мурманской ГМО, 1969, № 2, с. 45—51.
7. Шулейкин В. В. Развитие ветровых волн от зарождения до наибольшей крутизны.— ДАН СССР, 1958, 118, № 3, с. 472.
8. Шулейкин В. В. Физика моря. М., 1968, 1072 с.

Поступила в редакцию
22.02.79