

УДК 534.19

© 1992 г. П.Н. Кравчун, К.А. Пестов, О.С. Тонаканов

ОБ ЭМПИРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ШУМОВ ГЛУБОКОГО ОКЕАНА

Предлагаются эмпирические формулы для частотно-угловых спектров шумов поверхностного волнения и удаленного судоходства, построенные путем обобщения экспериментальных данных о шумах в придонной области глубокого океана. Формулы представляют собой явные аналитические функции частоты, угловой переменной, скорости ветра над поверхностью океана и индекса плотности судоходства. Пределы применимости модели: частотный диапазон 250–1200 Гц, состояние поверхности моря 3–7 баллов.

При создании различных гидроакустических средств, в частности для донных станций, одна из основных задач заключается в обеспечении устойчивой работы гидроакустической аппаратуры в условиях помех — шумовых полей океана. Важное значение при этом имеет предварительная оценка устойчивости аппаратуры к воздействию шумов на стадии разработки и проектирования. Для проведения такой оценки необходимо располагать математической моделью шумов океана.

Один из возможных путей построения указанной модели заключается в обобщении полученных на сегодняшний день экспериментальных данных об окружающих шумах океана и построении на их основе достаточно компактных соотношений, описывающих уровни шума с учетом его направленности и частотной зависимости для заданных океанологических условий и выбранного типа источников шума. Несмотря на ограниченность, такие эмпирические модели оказываются в ряде случаев весьма полезными, поскольку они позволяют в неявной форме учесть многочисленные и не всегда поддающиеся строгому теоретическому описанию факторы, связанные с генерацией и распространением звука в реальном океане.

В диапазоне средних частот (100–2000 Гц) наибольший интерес из возможных источников шума в океане представляют поверхностное волнение и судоходство. Эти источники являются доминирующими в указанном диапазоне и присутствуют практически во всех районах Мирового океана (исключение составляет лишь арктическая область, где отсутствует шум поверхностного волнения) [1].

В данной работе предлагаются эмпирические формулы для частотно-угловых спектров шумов поверхностного волнения и удаленного судоходства, построенные путем обобщения экспериментальных данных о придонных шумах в глубоком океане (глубина 4000–6000 м) в диапазоне частот 200–1500 Гц. В отличие от ряда предшествующих работ, в которых приводятся аналитические (эмпирические или полуэмпирические) выражения для диаграмма направленности подводного шума (см., например, [2, 3]), в предлагаемой модели дается явная связь между угловым распределением интенсивности шумового поля, частотой, скоростью ветра над поверхностью, а также индексом плотности судоходства.

Среди работ, результаты которых были использованы при построении модели, отметим прежде всего работы [4–12]. Поскольку использованные экспериментальные результаты были получены в основном с помощью линейных вертикальных антенн или одиночных ненаправленных приемников, предлагаемая модель справедлива для усредненного по азимуту шума. Шумы волнения и судоходства считались статистически независимыми, т.е. предполагалось, что справедливо их энергетическое сложение.

Диапазон изменения состояния поверхности моря (от 1 до 7 баллов), для которого производилось обобщение экспериментальных данных, соответствует наиболее вероятным условиям в Мировом океане [13]. Непосредственное усреднение проводилось для экспериментальных данных, приведенных в [6, 7, 11, 12] (результаты этих работ сопоставимы между собой, поскольку измерения были выполнены в приблизительно одинаковых условиях). Районы измерений характеризовались каноническим профилем скорости звука и коэффициентами отражения от дна, соответствующими рельефу средней расчлененности [2, 6]. Такие условия весьма характерны, в частности, для Северо-Запада Атлантического океана, где проводилась основная часть измерений [6, 7, 11, 12, 14]. Прочие из работ [4–12] были использованы для выявления общих закономерностей, описывающих зависимость шума от выбранных параметров и значительно облегчающих построение эмпирической модели.

В основу модели были положены достаточно надежно установленные усредненные законы изменения уровня подводного шума с частотой (спад $\sim 4-5$ дБ на октаву) и скоростью ветра над поверхностью (линейная связь между уровнем шума и логарифмом скорости ветра, наблюдаемая на самых различных глубинах [8, 9, 15]). Для описания угловой зависимости (вертикальной анизотропии) шума, а также уточнения указанных основных зависимостей вводились дополнительные функции, зависящие от угловой переменной, частоты, скорости ветра и индекса плотности судоходства, и поправочные коэффициенты.

Уровень шума поверхностного волнения L_S является функцией угла ϑ (отсчитываемого в градусах от горизонтали), частоты f в Гц и скорости ветра v над поверхностью (в м/с):

$$L_S(\vartheta, f, v) = 0,027 f - 72 + 50 \lg v + 11,1 \cdot [e^{-4(\lg v - 0,6)} - 1] (\lg f - 1,4) [\cos(4\vartheta) + 3] \lg [\cos(\vartheta/2) \cdot \sqrt{2}]. \quad (1)$$

Уровень шума судоходства L_F зависит от переменных ϑ , f и индекса плотности судоходства s :

$$L_F(\vartheta, f, s) = -33(10^{-3} \cdot f + 1) [1 + \vartheta^2 / (2\vartheta_0)^2] \{ \exp [-(\vartheta_0 - \vartheta) \delta] + 1 \} + 6,7(s - 2), \quad (2)$$

где $\delta = 5$, $\vartheta_0 = 15^\circ$, индекс s определяется числом судов в квадрате $500 \text{ км} \times 500 \text{ км}$ над точкой приема: $s = 1$ для 1–3 судов, 2 – для 4–9 судов, 3 – для 10–25 судов, 4 – для 25–50 судов, 5 – при количестве судов более 50. Выражение (2) при $s = 1$ (и в некоторых случаях при $s = 2$) вполне удовлетворительно аппроксимирует также имеющиеся данные по шумам удаленного судоходства за пределами указанного квадрата [5, 12, 13]. Отметим, впрочем, что в глубоком океане при состоянии поверхности 3 балла и выше шум удаленного судоходства в выбранном диапазоне частот практически полностью маскируется шумом поверхностного волнения. Уровни L_S и L_F в предложенных формулах определены в децибелах относительно $1 \text{ мкбар}^2 / (\text{Гц} \cdot \text{стерадиан})$. Следует подчеркнуть, что угол ϑ в приведенных выражениях может изменяться лишь от 0 до 90° , поскольку выражения были получены на основе результатов придонных измерений.

Частотно-угловая зависимость энергетического спектра подводного шума может быть вычислена по формуле

$$G(\vartheta, f, v, s) = 10^{L_S(\vartheta, f, v)/10} + 10^{L_F(\vartheta, f, s)/10}. \quad (3)$$

Примеры сравнения расчетных угловых зависимостей интенсивности шума, вычисленных по формулам (1)–(3), с экспериментальными данными [6, 7] приведены на рис. 1,а (для слабого судоходства: $s = 2$). Хорошее совпадение угловых зависимостей шума с результатами эксперимента наблюдается и для других случаев, соответствующих выбранному диапазону частот и скоростей ветра. Частотные спектры интенсивности шума, полученные интегрированием частотно-угловых спектров (3) по угловой переменной, и полная интенсивность (интеграл по углу и частоте) также оказываются сходными с данными экспериментов [5, 8, 9, 12], причем рост уровня шума пропорционально величине $\lg v$ наблюдается при скоростях ветра, превышающих $4-5 \text{ м/с}$.

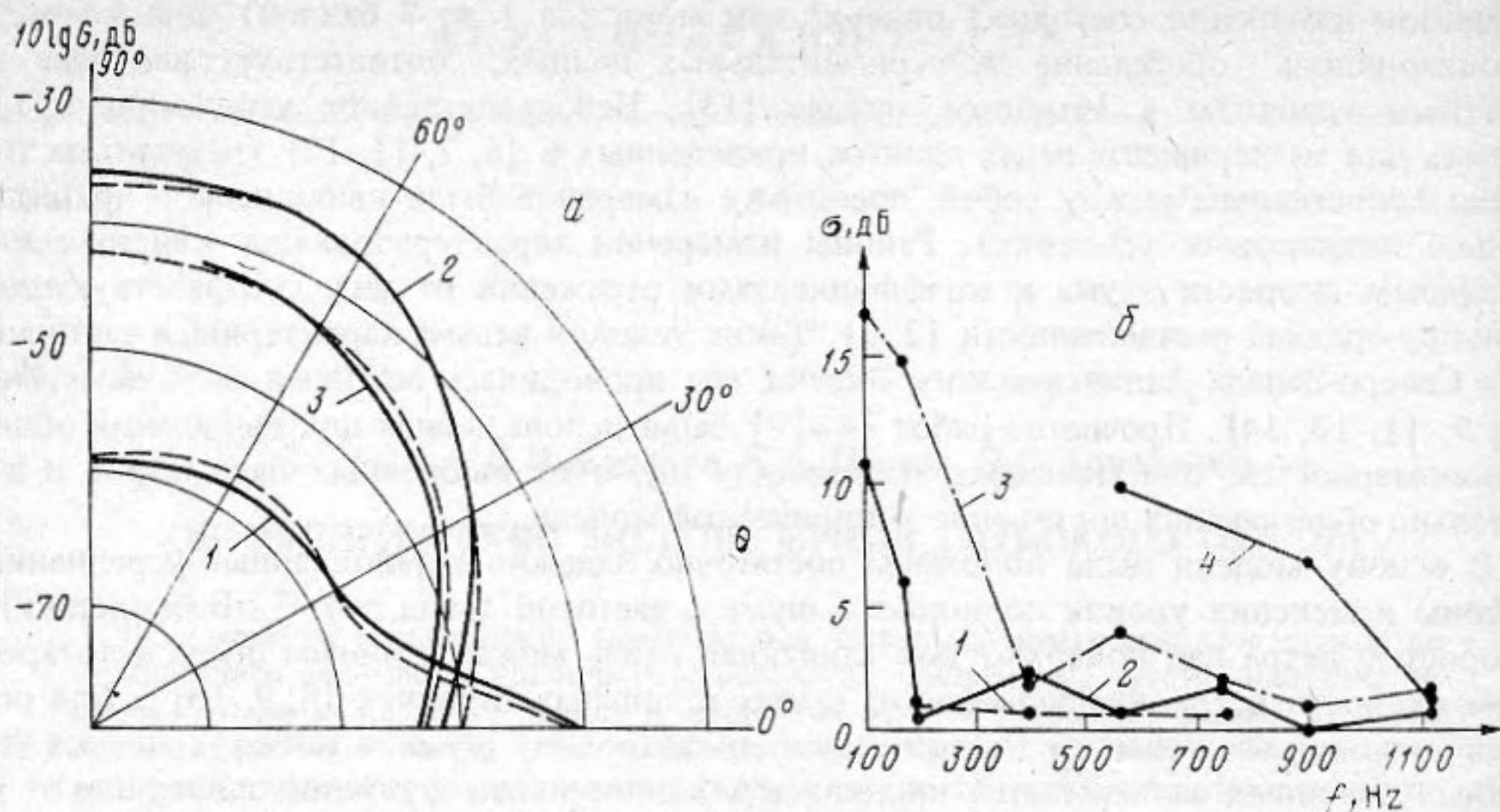


Рис. 1. Угловая зависимость шума (а) (сплошные кривые — эксперимент [6,7], штриховые — расчет): 1 — частота 200 Гц, скорость ветра 2,5 м/с (состояние поверхности 1 балл), 2 — 750 Гц, 11 м/с (5 баллов), 3 — 1122 Гц, 17,3 м/с (7 баллов); усредненные по углу модули отклонения расчетных и экспериментальных значений уровня шума (б): 1 — для состояния поверхности 1 балл, 2 — 3 балла, 3 — 5 баллов, 4 — 7 баллов

На рис. 1, б представлены частотные зависимости усредненного по углу модуля разности экспериментальных [6, 7] и расчетных значений уровня шума, характеризующие точность предложенных эмпирических формул для различных состояний поверхности моря. Наиболее отчетливо выраженные тенденции состоят в повышении точности формул по мере роста частоты и снижения скорости ветра. Для диапазона частот 400–1122 Гц и состояний поверхности 1–5 баллов отклонения расчетных и экспериментальных значений не превышают 4 дБ и лишь для состояния поверхности 7 баллов достигают 7–10 дБ, что тем не менее практически не превышает допустимой ошибки, обусловленной статистическим разбросом экспериментальных данных (5–6 дБ) и способом их обработки (2–3 дБ) [7, 11, 12].

Кроме частотно-угловых зависимостей уровня шума и его спектральной плотности, практический интерес представляет также пространственно-временная корреляционная функция шума, соответствующая приведенным выше эмпирическим зависимостям. Указанная функция, как нетрудно показать, может быть определена следующим образом:

$$R(\rho, \tau) = 2\pi \int_0^{\infty} \left[\int_0^{\pi/2} G(\vartheta, f, v, s) \cos(k|\rho| \cos\alpha \sin\vartheta - \omega\tau) J_0(k|\rho| \sin\alpha \cos\vartheta) \times \right. \\ \left. \times \cos\vartheta d\vartheta \right] d\omega, \quad (4)$$

где ρ — пространственное разделение точек наблюдения, α — угол между вертикалью и вектором ρ , $\omega = 2\pi f$ — циклическая частота, τ — время задержки, k — волновое число J_0 — функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

Сравнение корреляционных функций, рассчитанных по формулам (1)–(4), с результатами соответствующих морских экспериментов [14, 16] позволяет более полно и точно определить границы применимости предложенных эмпирических соотношений, как по частотному диапазону, так и по диапазону изменения скорости ветра (поскольку эксперименты по определению корреляционных функций шумов океана полнее освещены в литературе, чем частотно-угловые спектры). Кроме того, целесообразно сравнить точность аппроксимации экспериментально измеренных корреляционных функций, полученную с помощью соотношений (1)–(4), с точностью аппроксимации на

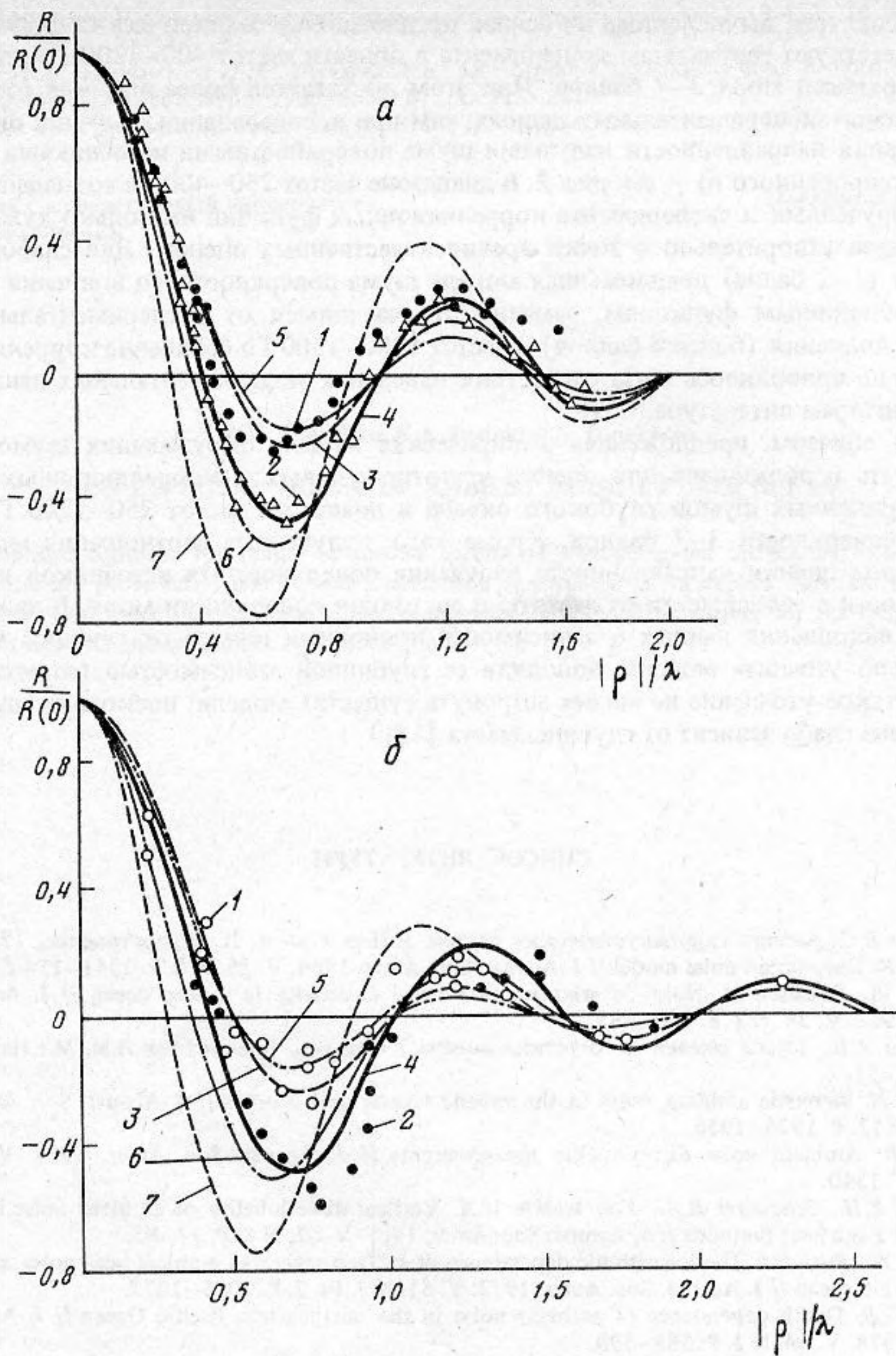


Рис. 2. Пространственные корреляционные функции шума (вертикальная ориентация приемной пары, $\tau = 0$): а — частота 400 Гц, б — 800 Гц. Экспериментальные точки [16]: 1 — для состояния поверхности 3 балла, 2 — 5 баллов. Расчет по формулам (1) — (4): 3 — для состояния поверхности 3 балла, 4 — 5 баллов; расчет на основе описания направленности источников шума волнения функцией $\sin^n \vartheta$: 5 — $n = \frac{1}{2}$, 6 — $n = 1$, 7 — $n = 2$ (λ — длина волны)

угловые спектры, вычисленные на основе предложенных эмпирических формул, хорошо соответствуют результатам эксперимента в области частот 400–1200 Гц для состояния поверхности моря 3–7 баллов. При этом достигается более высокая точность аппроксимации экспериментальных данных, чем при использовании функций вида $\sin^n \theta$ для описания направленности излучения шума поверхностными источниками (для любого фиксированного n) — см. рис. 2. В диапазоне частот 250–400 Гц совпадение расчетных и полученных в эксперименте корреляционных функций несколько хуже, однако вполне удовлетворительно с точки зрения качественных оценок. Для слабого волнения моря (1–2 балла) предложенная модель шума поверхностного волнения приводит к корреляционным функциям, заметно отличающимся от экспериментальных; для сильного волнения (более 8 баллов) и частот 1200–1500 Гц сравнение корреляционных функций не проводилось из-за отсутствия надежных экспериментальных данных в доступной авторам литературе.

Таким образом, предложенная эмпирическая модель окружающих шумов океана может быть использована для оценки частотно-угловых и корреляционных характеристик придонных шумов глубокого океана в диапазоне частот 250–1200 Гц при состоянии поверхности 3–7 баллов. Кроме того, полученные соотношения могут быть полезны для оценки направленности излучения поверхностных источников шума и ее изменчивости в зависимости от частоты и состояния поверхности моря. В дальнейшем, по мере накопления данных о зависимости придонных шумов от глубины места, целесообразно уточнить модель, дополнив ее глубинной зависимостью (отметим, впрочем, что такое уточнение не может затронуть существа модели, поскольку шум глубокого океана слабо зависит от глубины места [18]).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурдик В.С. Анализ гидроакустических систем / Пер. с англ. Л.: Судостроение, 1988. 392 с.
2. Talham R. Deep ocean noise model // J. Acoust. Soc. Amer. 1964. V. 36. N 8. P. 1541–1544.
3. Liggett W., Jacobson M. Noise covariance and vertical directivity in a deep ocean // J. Acoust. Soc. Amer. 1966. V. 39. N 2. P. 280–288.
4. Фурдусев А.В. Шумы океана // Акустика океана / Под ред. Бреховских Л.М. М.: Наука, 1974. С. 615–691.
5. Wenz G.M. Acoustic ambient noise in the ocean: spectra and sources // J. Acoust. Soc. Amer. 1962. V. 34. N 12. P. 1936–1956.
6. Fox G.R. Ambient noise directionality measurements // J. Acoust. Soc. Amer. 1964. V. 36. N 8. P. 1537–1540.
7. Axelrod E.H., Schooner B.A., Von Winkle W.A. Vertical directionality of ambient noise in the deep ocean at a site near Bermuda // J. Acoust. Soc. Amer. 1965. V. 37. N 1. P. 77–83.
8. Crouch W., Burt P.J. The logarithmic dependence of surface-generated ambient sea-noise spectrum level on wind speed // J. Acoust. Soc. Amer. 1972. V. 51. N 3. Pt. 2. P. 1066–1072.
9. Morris G.B. Depth dependence of ambient noise in the northeastern Pacific Ocean // J. Acoust. Soc. Amer. 1978. V. 64. N 2. P. 581–590.
10. Dashen R., Munk W. Three models of global ocean noise // J. Acoust. Soc. Amer. 1984. V. 76. N 2. P. 540–554.
11. Perrone A.J. Ambient-noise-spectrum level as a function of water depth // J. Acoust. Soc. Amer. 1970. V. 48. N 1. Pt. 2. P. 362–370.
12. Perrone A.J. Deep-ocean ambient noise spectra in the North-West Atlantic // J. Acoust. Soc. Amer. 1969. V. 46. N 3. Pt. 2. P. 762–770.
13. Высоцкая Л.С., Строкина Л.А. Средняя скорость ветра у поверхности океанов // Тр. Гос. гидрологич. ин-та, 1988. № 340. С. 75–82.
14. Cron B.F., Hassel B.C., Keltonik F.J. Comparison of theoretical and experimental values of spatial correlation // J. Acoust. Soc. Amer. 1965. V. 37. N 3. P. 523–529.
15. Piggott C.L. Ambient sea noise at low frequencies in shallow water of Scotian Shelf // J. Acoust. Soc. Amer. 1964. V. 36. N 11. P. 2152–2163.

16. *Arase E.M., Arase T* Correlation of ambient sea noise // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1966. V. 40. N 1. P. 205–210.
17. *Аредов А.А., Охрименко Н.Н., Фурдуев А.В.* Анизотропия шумового поля в океане (эксперимент и расчет) // *Акуст. журн.* 1988. Т. 34. № 2. С. 215–221.
18. *Cato D.H.* Ambient noise in waters near Australia // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1976. V. 60. N 2. P. 320–328.

Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова

Поступила в редакцию
30.07.90
После исправления
03.03.92

P.N. Kravchun, K.A. Pestov, O.S. Tonakanov

ON EMPIRICAL MODEL OF AMBIENT NOISE IN DEEP OCEAN

The empirical formulas for frequency-angular spectra of wind-generated surface waves noise and far-shipping noise are proposed. These formulas have been constructed as an explicit function of frequency, vertical angle wind speed and index of shipping intensity. The model is correct for the frequency range from 250 to 1200 Hz and sea surface state from 3 to 7.