АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2007, том 53, № 2, с. 201–206

АКУСТИКА ОКЕАНА, ГИДРОАКУСТИКА

УДК 534-14

ПОДВОДНЫЕ ШУМЫ В МЕЛКОВОДНЫХ РАЙОНАХ ТРОПИЧЕСКОЙ ЗОНЫ ИНДИЙСКОГО ОКЕАНА

© 2007 г. В. И. Бардышев

Акустический институт им. Н.Н. Андреева РАН

117036 Москва, ул. Шверника 4

E-mail: lekomtsev@akin.ru

Поступила в редакцию 06.04.06 г.

Выполнены измерения частотных спектров в лагуне кораллового атолла, с внешней стороны рифа и на мелководных банках тропической зоны Индийского в общем диапазоне частот 0.003–9 кГц с использованием автономных гидроакустических буев и малого катера. Во всех районах наблюдались непрерывные шумы донной фауны, наиболее интенсивные на частотах 1–1.5 кГц и 7–8 кГц. В лагуне атолла и вблизи рифа они значительно превосходили по уровню обычные динамические шумы океана. Их уровни достигали максимальных значений в первую половину ночи.

PACS: 43.30. +m

Исследования подводных шумов океана представляют научный и практический интерес, позволяя получить информацию о процессах в океане и его фауне. Подводные шумы океана являются помехой работе гидроакустических систем, и знание их характеристик необходимо для разработки методов их подавления.

В то время как исследованию подводных шумов Тихого и Атлантического океанов посвящены многочисленные публикации ([1–4] и другие), Индийский океан в этом отношении почти не изучен, и в особенности его мелководные районы. Между тем, эти районы с богатой океанической фауной считаются одной из важнейших экосистем Мирового океана и заслуживают внимания [5]. Ниже показано, фауна этих районов является источником интенсивных подводных шумов, представляющих интерес для гидроакустики.

Измерения подводных шумов в Индийском океане выполнялись в общем диапазоне частот 0.003–9 кГц. В качестве основного средства измерений использовались автономные исследовательские буи: радиогидроакустический, ретранслирующий принимаемые подводные шумы в диапазоне частот 3–100 Гц по радиоканалу, и гидроакустический с таймером и магнитной записью в диапазоне 0.08–9 кГц. Буи были оснащены пьезокерамическими ненаправленными калиброванными сферическими гидрофонами диаметром 5 см, погружаемыми на 15 м. В мелководных районах буи устанавливались на якорях, в глубоководных – дрейфовали. При измерениях с внешней стороны рифа использовался такой же гидрофон, отводимый в дрейфе от борта малого катера на плавающей кабельной линии и погруженный на глубину 2 м, что позволяло проводить измерения, начиная с глубины места 3 м. Для снижения уровня гидродинамических помех и перемещений гидрофонов под воздействием волнения применялась система механической защиты, состоявшая из резиновой ленты-амортизатора с грузом на конце, петли нейтральной плавучести и сферического обтекателя диаметром 32 см, изготовленного из редкой ткани, обтягивающей каркас. Резонансная частота колебаний груза с амортизатором равнялась 0.5 Гц. На частотах выше резонансной амплитуда колебаний снижалась на 10–15 дБ при возрастании частоты на октаву. Петля нейтральной плавучести на частотах выше 0.2 Гц значительно снижала амплитуду и скорость вертикальных перемещений гидрофона под воздействием волнения. Скорость вертикальных перемещений гидрофона не превышала 0.1 м/с. Обтекатель снижал уровень гидродинамических пульсаций давления турбулентности, проносимой течением мимо гидрофона. Следуя Блохинцеву [6], будем называть этот вид помех псевдозвуком. Измерения в речном потоке воды с обтекателем и гидрофоном, аналогичными использованным при исследовании подводных шумов, показали, что на частотах 20–30 Гц при скорости потока 0.3 м/с обтекатель снижает уровень псевдозвука на 8–9 дБ, но все же его уровень остается высоким [7].

Наши измерения в глубоководных районах Индийского океана показали, что их частотные

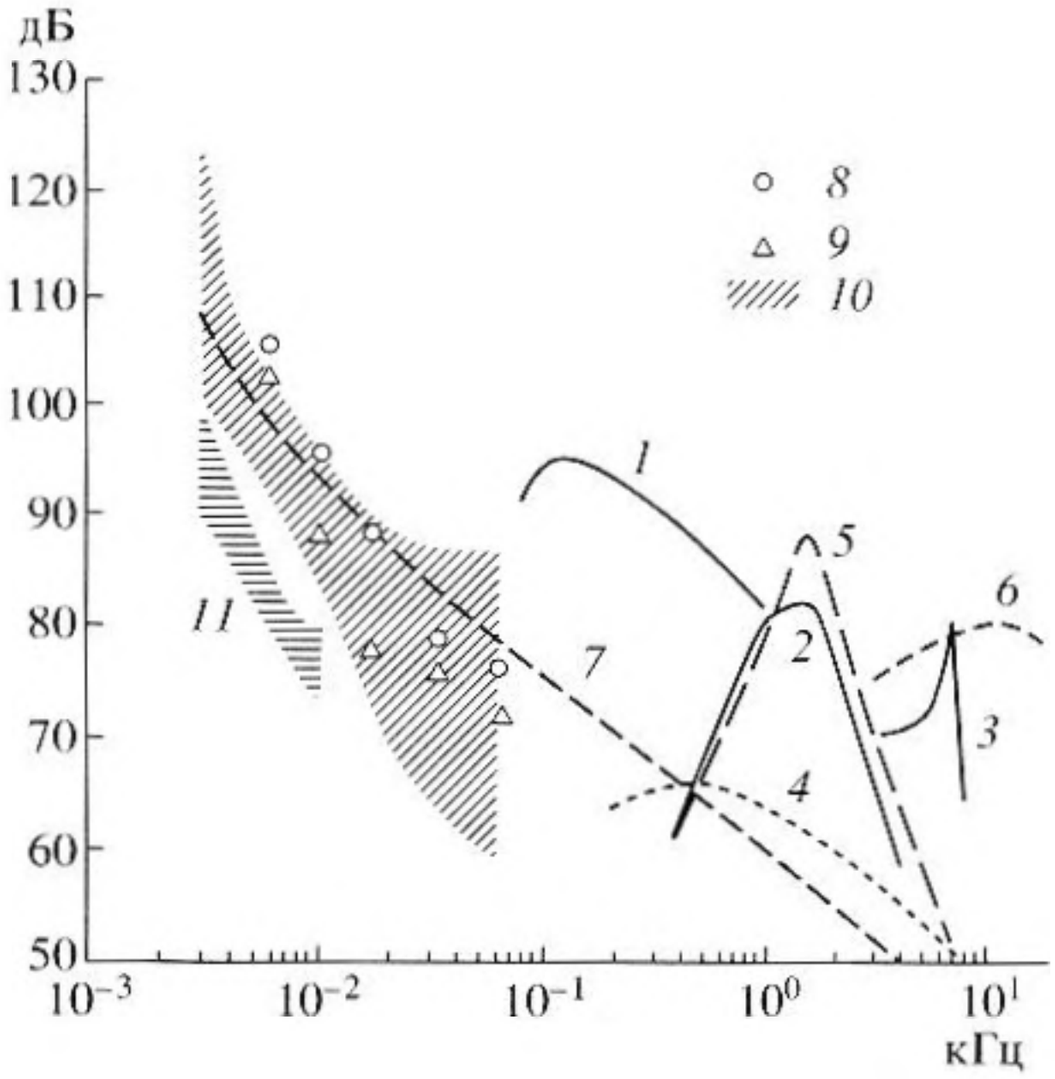

Рис. 1. Частотные спектры основных источников подводных шумов в мелководных районах: кривые *1–3*, *10* – Индийского океана, *4–7* – Тихого и Атлантического океанов; *1* – звуки соударений обломочного материала, перемещаемого волнами по известковому дну; *2*, *3* – импульсные шумы, издаваемые предположительно: *2* – морскими ежами, *3* – двустворчатыми моллюсками; *4* – динамические шумы ветрового волнения на мелководье при силе ветра 4 балла [2]; *5* – шумы морских ежей у побережья Новой Зеландии [3]; *6* – шумы раков-щелкунов [1]; *7* – обобщенный спектр шумов глубокого океана при силе ветра 4 балла [8]; *8* – гидродинамические пульсации давления (псевдозвук) речного потока при средней скорости течения 0.3 м/с, воспринимаемые сферическим гидрофоном диаметром 5 см [7]; *9* – то же при защите гидрофона сферическим обтекателем диаметром 39 см, обтянутым редкой тканью [7]; *10* – область гидродинамических пульсаций давления течения; *11* – область инфразвуковых шумов, связанных с волнением и ветром [12] .

спектры по виду и уровню аналогичны полученным в Тихом и Атлантическом океанах [2, 8] при соответствующих значениях скорости ветра, умеренном судоходстве и при наличии псевдозвука течения, как и можно было ожидать.

Более интересные результаты получены в мелководных тропических районах Индийского океана – кольцевых коралловых атоллах, окруженных рифами, и мелководных банках, не имеющих барьерного рифа. Обследование этих районов показало богатство и разнообразие донной фауны на участках с известняковым коралловым дном. Они плотно заселены беспозвоночными организмами – кораллами, морскими ежами и звездами и моллюсками, многие из которых обладают двустворчатыми раковинами. Среди двустворчатых моллюсков выделялись размерами тридакны (*Tredachidae*), раковины которых имели поперечный размер в десятки см. Известны и более крупные (*Tredacna maxima*) с поперечником раковины до 1 м и массой до 300 кГ [5]. На некоторых участках известнякового дна плотность колоний тридакн достигала двух особей на м^2. Все они укрывались в кавернах с относительно небольшим входным отверстием, высверленных ими в известняке. Морских ежей (*Echinometridae*) насчитывалось от 2 до 10 шт. на м^2.

Донная фауна излучала непрерывный шум – треск, слагающийся из множества коротких импульсов. Его интенсивность менялась в течение суток, достигая максимума в первую половину ночи (от 22 до 2 ч). Характерные голоса рыб, напоминающие пароходные гудки, квакание и редкую барабанную дробь на частотах в сотни Гц были слышны на восходе солнца, однако их интенсивность была невелика, и на спектр подводных шумов они влияли незначительно.

На рис. 1 показаны характерные частотные спектры основных источников подводных шумов в обследованных мелководных районах. Здесь и ниже спектральные уровни приведены в дБ, отсчитанных от 1 мкПа/Гц$^{1/2}$. Для сравнения показаны частотные спектры подводных шумов, полученных в Тихом и Атлантическом океанах [1–4, 8]. Как и там, в районах наших измерений наблюдался высокий уровень низкочастотного шума в диапазоне частот 3–60 Гц с возрастанием спектра на 10–12 дБ при понижении частоты на октаву. Сравнение с псевдозвуком потока воды со скоростью 0.3 м/с [7] позволяет отождествить низкочастотный шум с псевдозвуком течения, на что указывали также авторы работ [2, 4]. В ряде работ рассчитывались спектральные уровни псевдозвуковых и акустических инфразвуковых шумов, возникающих при взаимодействии спектральных компонент морских волн друг с другом и с турбулентностью ветра [10–12]. Согласно расчетам на частотах выше 3 Гц эти шумы по уровню ниже псевдозвука океанических течений в мелководных районах.

На глубинах 4–10 м с внешней стороны рифа, где волны перемещают по известковому дну обломки кораллов и известняка, в диапазоне частот 0.08 – 1 кГц прослушивались стуки этого обломочного материала. Они формировали высокий спектральный максимум на частотах 0.1–0.15 кГц.

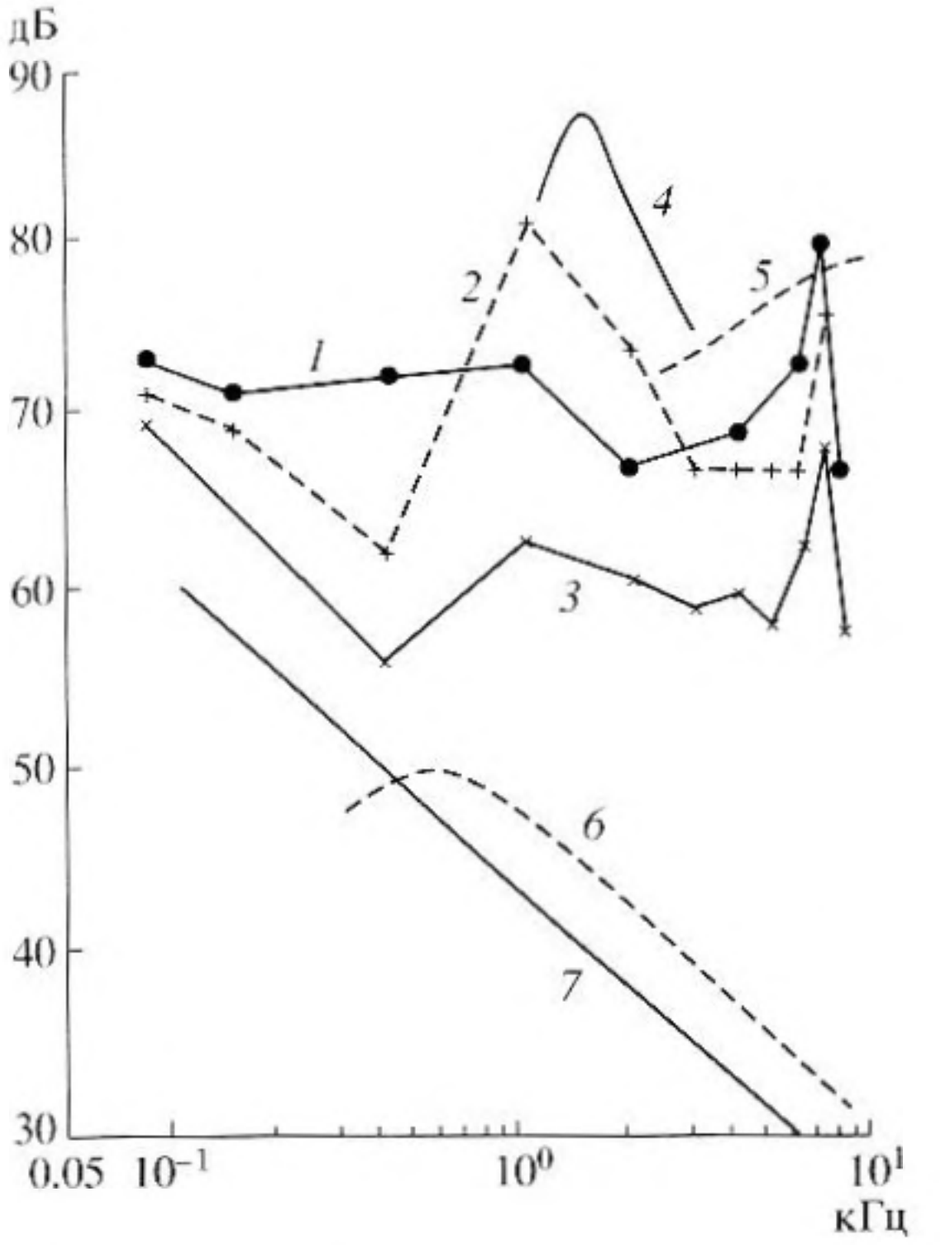

Рис. 2. Частотные спектры подводных шумов в лагуне кораллового атолла в Индийском океане при штиле во время суток: *1* – 22 ч, *2* – 2 ч, *3* – 10 ч; глубина места 50 м, донный грунт – коралловый известняк и песок; *4* – спектр шума колонии морских ежей у побережья Новой Зеландии [3]; *5* – спектр шума колонии раков-щелкунов [1]; *6* – спектр шума кавитации в гребнях волн на мелководье при силе ветра 1 балл [2]; *7* – спектр подводного шума океана при штиле [1].

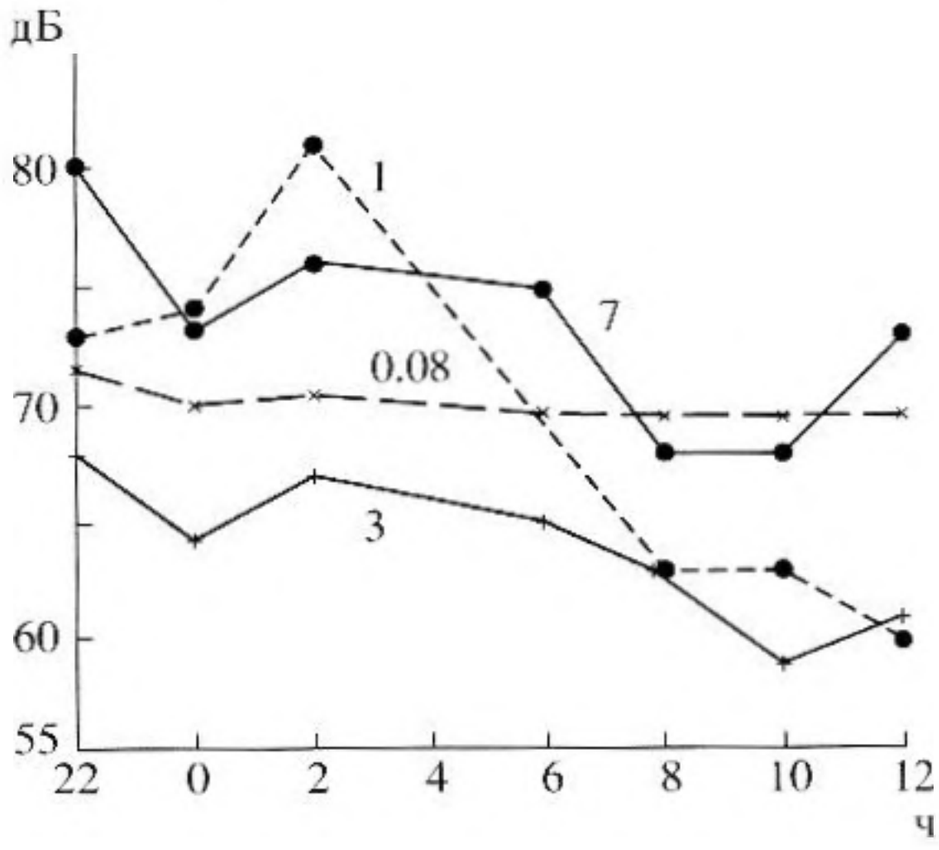

Рис. 3. Зависимость от времени суток спектральной плотности подводных шумов в лагуне атолла в Индийском океане при штиле; цифрами указаны частоты в кГц.

В диапазоне частот 0.2–9 кГц прослушивался непрерывный треск со спектральными максимумами на частотах 1–1.5 кГц и 7–8 кГц. Первый из них по форме и уровню спектра близок к спектру шума колонии морских ежей у побережья Новой Зеландии [3], и по всей вероятности, имеет такое же происхождение. Второй максимум по уровню и частотам сходен с импульсным шумом, издаваемым колониями раков-щелкунов (*Crangonidae*), нередко встречающихся на мелководьях тепловодных районов Тихого и Атлантического океанов. Максимум спектра шума раков-щелкунов отмечался на частотах 5–12 кГц [1, 13]. Его ширина по уровню –3 дБ достигает 7–8 кГц и более [1, 13]. В нашем случае ширина максимума на частотах 7–8 кГц, меньшая, близкая к 1 кГц. При осмотре дна и проб грунта раков-щелкунов обнаружено не было, хотя заметить их было бы не трудно (их длина достигает 5 см, и они малоподвижны). Сказанное позволяет предполагать в нашем случае другой источник высокочастотных шумов. Таким источником могут быть двустворчатые моллюски. Они излучают звуковые импульсы при обрыве нитей биссуса [3], захлопывании створок раковин и сверлении ими известняка. Их твердые раковины преобладающих размеров, по-видимому, резонируют на частотах 7–8 кГц, что может объяснить соответствующий спектральный максимум шума.

Наибольший уровень шумов донной фауны наблюдался во внутренней лагуне атолла, где он значительно превосходил уровень динамических шумов океана (рис. 2). На частотах 0.5–9 кГц уровень шумов в лагуне достигал максимального значения в первую половину ночи, от 22 ч до 2 ч (рис. 3). Отметим, что возрастание шума океанической фауны в ночное время в мелководных районах Атлантического и Тихого океанов связывалось с жизнедеятельностью рыб-крокеров [3, 14].

Коралловые рифы также являются источниками интенсивных подводных шумов. Океанские волны, накатываясь на риф, взаимодействуя с его неровной поверхностью и перемещая обломочный материал по твердому известняковому дну, генерируют динамические шумы и псевдозвук. Значительны и шумы донной фауны. На расстоянии 20 м от гребня рифа выделяются спектральные максимумы на частотах 0.1–0.15 кГц, 1.5 кГц и 7–8 кГц, первый из которых наибольший (рис. 4). На частотах ниже 2 кГц на указанном расстоянии подводные шумы рифа превосходят максимальный уровень обычных динамических шумов океана. При удалении от гребня рифа и выходе на слабонаклоненную песчаную отмель уровень шу-

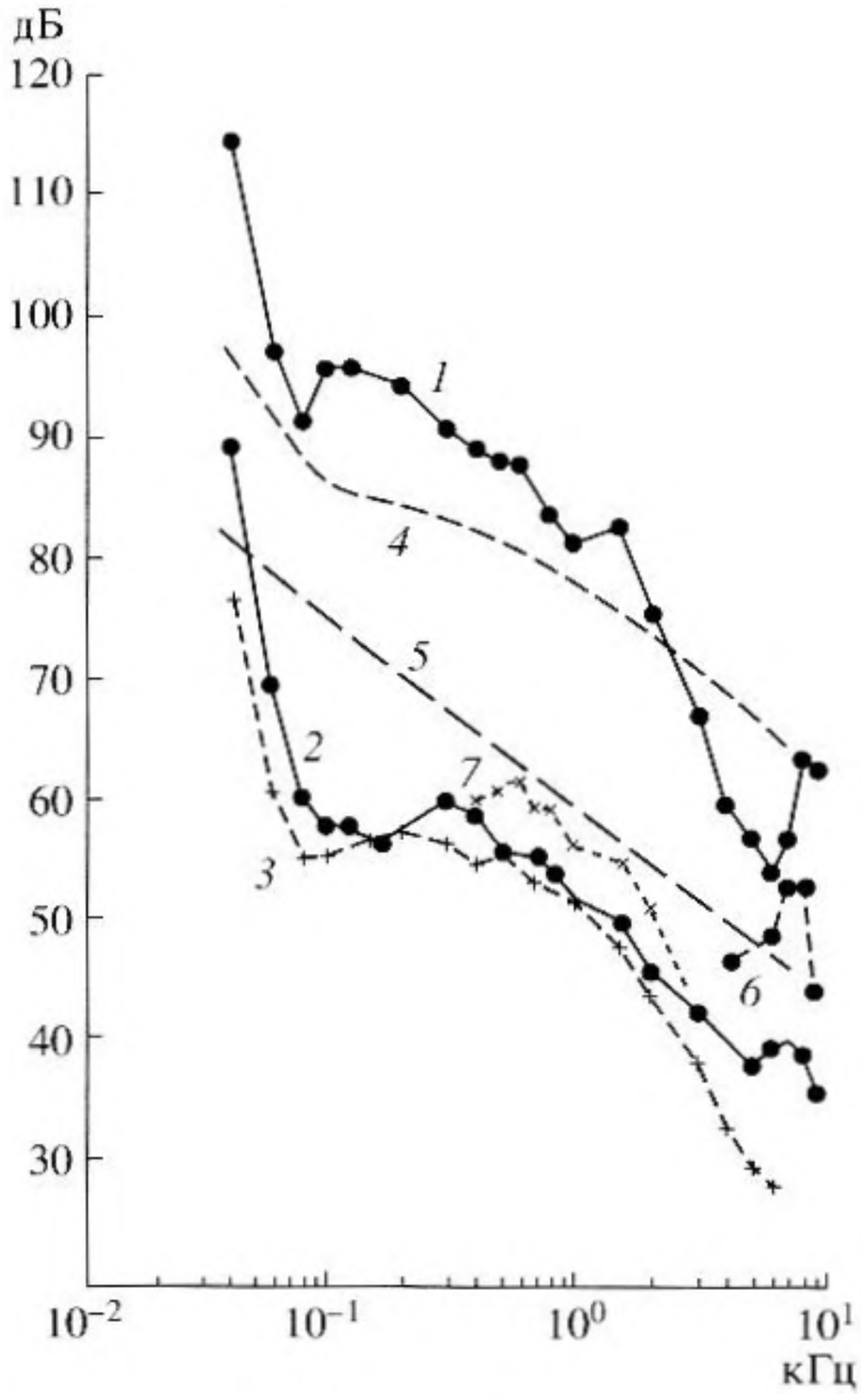

Рис. 4. Частотные спектры подводных шумов с внешней стороны кораллового рифа при скорости ветра 6–7 м/с (4 балла) и высоте волн около 1 м на дистанциях от гребня рифа: *1* – 20 м, *2* – 110 м, *3* – 150 м: *4* – максимальные значения спектра подводных шумов океана по Вензу [2]; *5* – обобщенный спектр шума океана при силе ветра 4 балла по Фурдуеву [8]; *6* – спектр кратковременного повышения уровня биогенного шума на дистанции 110 м от гребня рифа; *7* – подводный шум гребня, волны, проходящей над гидрофоном.

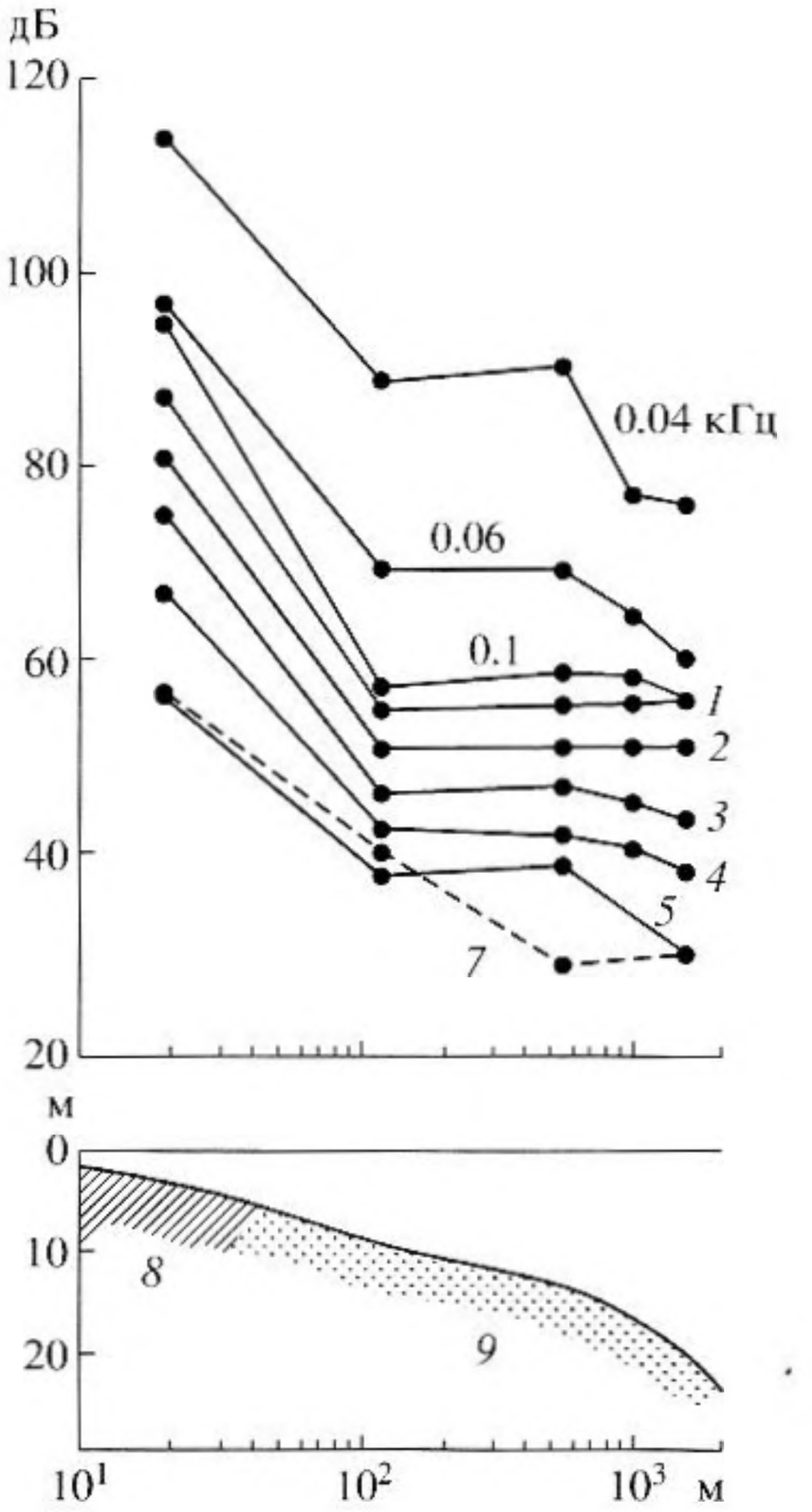

Рис. 5. Спектральные уровни подводных шумов с внешней стороны рифа в зависимости от расстояния от гребня рифа на частотах, указанных в кГц для каждой кривой; ниже – рельеф дна, *8* – донный грунт–коралловый известняк, *9* – песок.

ма быстро спадал всех частотах (рис. 5), на расстоянии 110 м от гребня рифа опускался ниже обычного уровня шумов океана и только при прохождении пенистого гребня волны над гидрофоном на короткое время в диапазоне 0.6–1.5 кГц повышался до этого уровня. На частотах 6–9 кГц изредка также отмечались кратковременные, длительностью 1–2 с, повышения уровня шума на 10–12 дБ.

На банках в Индийском океане с глубинами 30–50 м в частотных спектрах подводных шумов наблюдались те же максимумы на частотах 1 кГц и 7–8 кГц (рис. 6). На частотах выше 0.08 кГц обнаруживалась зависимость уровня шума от времени суток (рис. 7). Они достигали максимальных значений в первой половине ночи, от 23 ч до 1 ч. В утренние часы (в 5–7 ч) уровни шумов спадали ниже уровней обычных динамических шумов мелководных районов океана. На частотах ниже 0.08 кГц частотный спектр шумов возрастал на 12 дБ при понижении частоты на октаву, и, по всей видимости, формировался псевдозвуком турбулентности течения. Скорость течения на банках в среднем близка к 0.3 м/с.

Следует отметить, что в ряде зарубежных и отечественных работ [15–18] выполнялись теоретические расчеты поля точечного источника звука и шума прибоя в клиновидной прибрежной области. Однако теоретические модели оказывались чрезмерно упрощенными. В лучшем случае достигалось лишь качественное совпадение расчетов с данными натурных измерений.

Полученные данные показывают, что подводные шумы мелководных районов тропической зоны Индийского океана обладают характерными спектральными максимумами повышенного уровня, отличающими их от шумов глубокого океана.

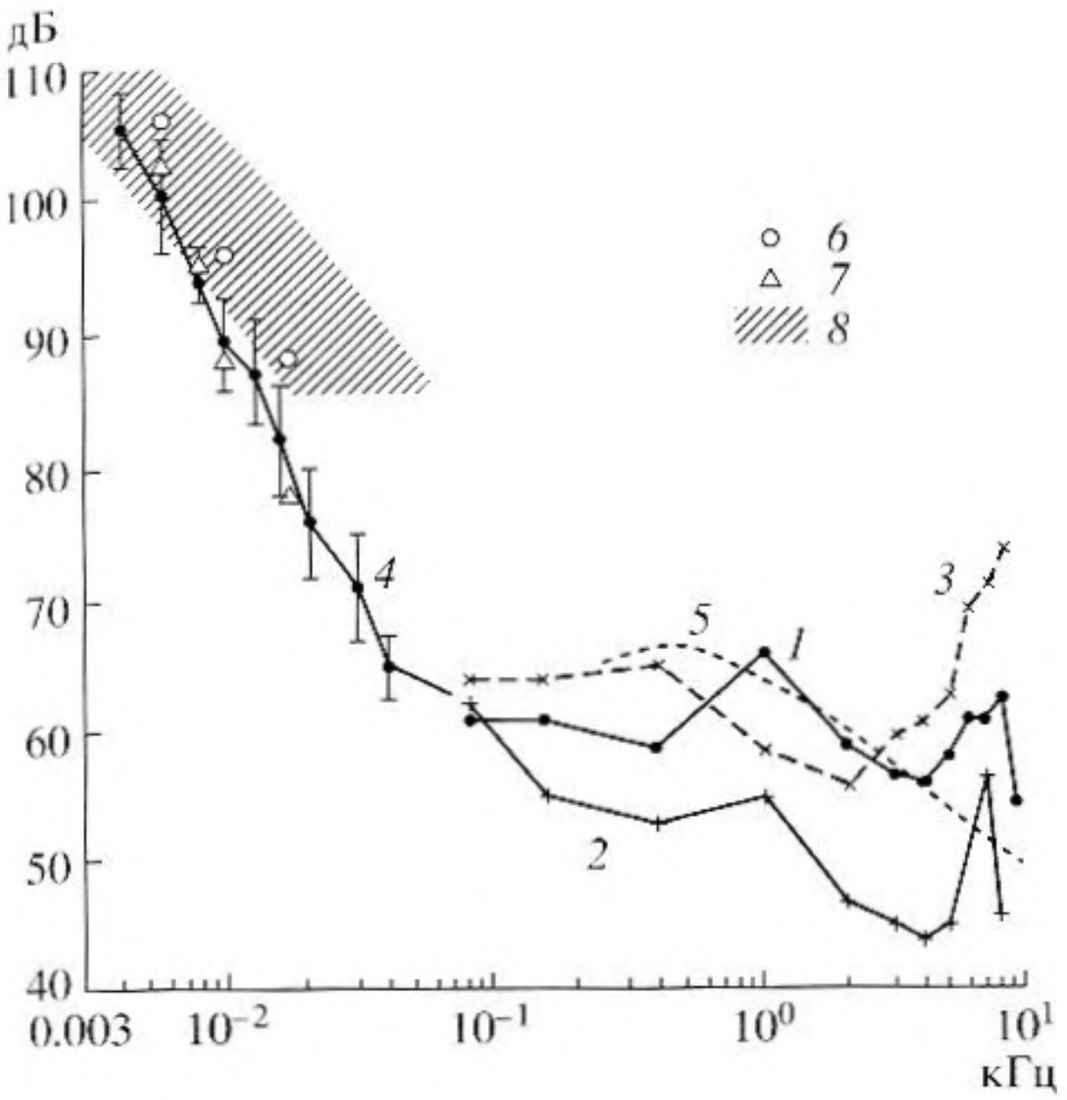

Рис. 6. Частотные спектры подводных шумов на мелководной банке в Индийском океане при силе ветра 4–5 баллов во время суток: *1* – 1 ч, *2* – 5 ч, *3* – 23 ч; *4* – усредненный по всем измерениям спектр низкочастотного шума, не зависящего от времени суток, вертикальными черточками показаны значения среднеквадратического отклонения замеров спектра по всем измерениям; *5* – спектр динамического подводного шума в мелкой воде при силе ветра 4 балла по Вензу [2]; *6* – псевдозвук потока воды со скоростью течения 0.3 м/с; *7* – то же при защите гидрофона обтекателем, аналогичным использовавшемуся при измерениях подводных шумов в Индийском океане; *8* – область спектров турбулентных пульсаций давления в мелководной зоне океана по Вензу [2].

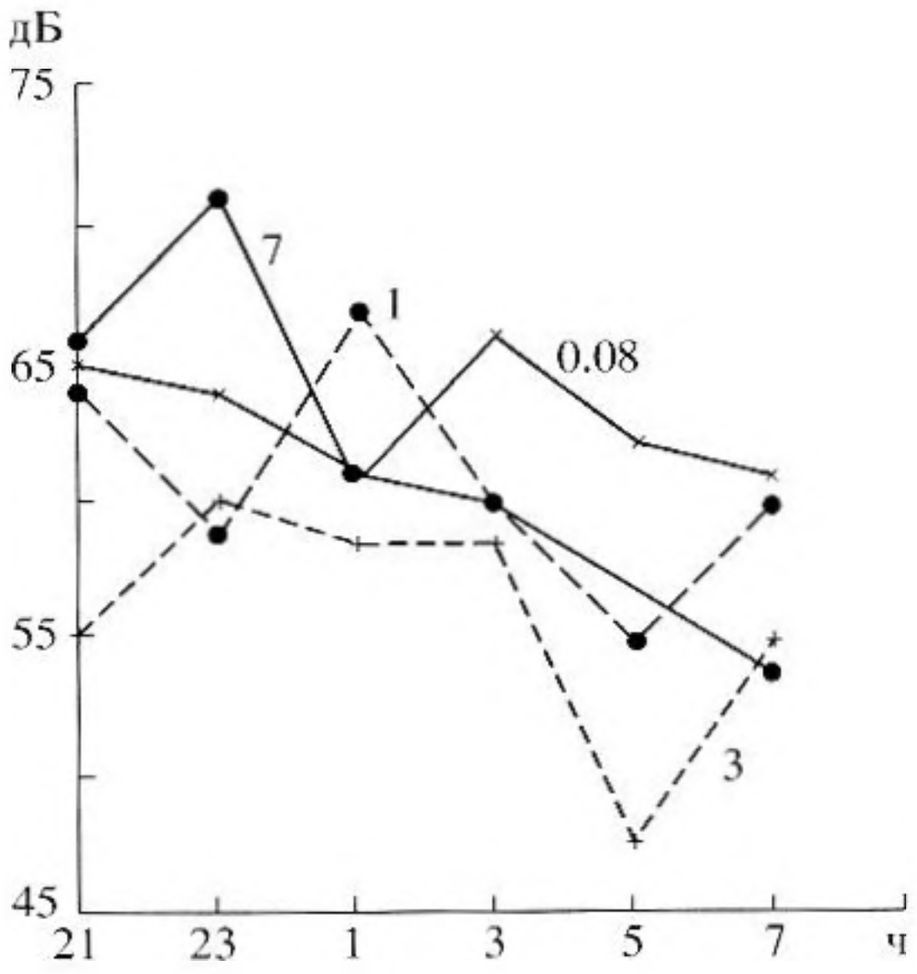

Рис. 7. Зависимость от времени суток спектральной плотности подводных шумов на мелководной банке в Индийском океане на частотах, обозначенных на каждой кривой в кГц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Knudsen V.O., Alford R.S., Emling J.W.* Underwater ambient noise // J. Mar. Res. 1948. V. 7. P. 410–429.
2. *Wenz G.* Acoustic ambient noise in the ocean: spectra and sources // J. Acoust. Soc. Amer. 1962. V. 34. № 12. P. 1936–1956.
3. *Фиш М.* Биологические источники непрерывных морских шумов / В кн. Морская биоакустика. Пер. с англ. Ю.П. Венедиктова. Л.: Судостроение. 1969. С. 198–219. *Fish C.J.* In Marine bio-acoustics. Ed. by W.N. Tavolga. Pergamon Press. Oxford, London, New York, Paris. 1963.
4. *Фурдуев А.В.* Шумы океана / В кн. Акустика океана. М.: Наука. 1974. С. 615–691.
5. *Сорокин Ю.И.* Экосистемы коралловых рифов. М.: Наука. 1990.
6. *Блохинцев Д.И.* Акустика неоднородной движущейся среды. М.-Л.: ГИТТЛ. 1946. 220 с.
7. *Бардышев В.И.* О происхождении низкочастотных подводных шумов океана // Труды АКИН. 1970. № 11. С. 156–160.
8. *Фурдуев А.В.* Спектрально-энергетические характеристики динамических шумов океана // Труды АКИН. 1970. № 11. С. 161–164.
9. *Исакович М.А., Курьянов Б.Ф.* К теории низкочастотных шумов океана // Акуст. журн. 1970. Т. 16. № 1. С. 62–74.
10. *Бреховских Л.М., Гончаров В.В.* Излучение звука пограничным слоем океан–атмосфера // Морское приборостроение. Серия "Акустика". 1972. Вып. I. С. 47–61.
11. *Nichols R.N.* Infrasonic ambient ocean noise measurements: Eleuthera // J. Acoust. Soc. Amer. 1981. V. 69. № 4. P. 974–981.
12. *Kibblewhite A.C., Ewans K.S.* Wave-wave interactions, microseisms, and infrasonic ambient noise in the ocean // J. Acoust. Soc. Amer. 1985. V. 78. № 3. P. 981–994.
13. *Widener M.W.* Ambient-noise levels In selected shallow-water of Miami, Florida // J. Acoust. Soc. Amer. 1967. V. 42. № 4. P. 904–905.
14. *Sabra K.G., Roux P., Kuperman W.A.* Emergens rate of the time-domain Green's function from the ambient noise cross-correlation function // J. Acoust. Soc. Amer. 2005. V. 1118. № 6. P. 3524–3531.
15. *Сахарова Н.П.* Асимптотические представления звукового поля точечного источника в клиновидной области // Акуст. журн. 1959. Т. 5. № 2. С. 215–220.
16. *Захаров Л.Н., Киршов В.А., Матвеев А.К., Наумова В.В.* О характеристиках направленности точечного источника, расположенного в вершине клиновидной области пресного водохранилища // Акуст. журн. 1973. Т. 19. № 6. С. 912–913.
17. *Карновский А.М.* Модальные представления шумового поля в клине // Акуст. журн. 1978. Т. 24. № 6. С. 867–872.
18. *Комиссарова Н.Н.* Изменение спектра шума прибоя при распространении в береговом клине // Вопросы судостроения, серия Акустика. 1982. № 15. С. 34–41.

Underwater Ambient Noise in Shallow-Water Areas of the Indian Ocean within the Tropical Zone

V. I. Bardyshev

Andreev Acoustics Institute, Russian Academy of Sciences, ul. Shvernika 4, Moscow, 117036 Russia
e-mail: lekomtsev@akin.ru

Abstract—Frequency spectra of underwater ambient noise were measured in the lagoon of a coral atoll, outside the reef, and on shallow-water banks in the tropical zone of the Indian Ocean. The measurements were performed in the frequency range from 0.003 to 9 kHz with the use of self-contained acoustic buoys and a small boat. In all of the regions studied, continuous underwater noise of biological origin was observed with spectral maxima at frequencies of 1–1.5 and 7–8 kHz. In the lagoon of an atoll, this noise was much more intense than regular dynamic noise in the ocean. The maximum noise levels were observed in the first half of night.