АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2010, том 56, № 1, с. 53–62

АКУСТИКА ОКЕАНА. ГИДРОАКУСТИКА

УДК 534.231-14

ПОДВОДНЫЕ ШУМЫ ТИХОГО ОКЕАНА В ЗОНЕ ШЕЛЬФА о. ШИКОТАН

© 2010 г. В. И. Бардышев

Акустический институт им. ак. Н.Н. Андреева

117036 Москва, ул. Шверника 4

E-mail: lekomtsev@akin.ru

Поступила в редакцию 10.09.08 г.

Излагаются результаты измерений подводных шумов Тихого океана в зоне шельфа о. Шикотан на глубине 130 метров в диапазоне частот 1.9–11000 Гц при скорости ветра от 0 до 40 м/с. Выявлена статистическая нелинейная связь между вариациями уровня подводного шума и вариациями скорости ветра. Приводятся данные о биологических, сейсмических, дождевых и подледных шумах данного района.

PACS: 43.30Nb, 43.28Ra

Подводные шумы океана содержат информацию о взаимодействии атмосферы и океана, о гидродинамических процессах в гидросфере и сейсмических в литосфере Земли, о жизнедеятельности океанической фауны и технической деятельности человека. Большое практическое и научное значение имеет изучение подводных шумов шельфовой зоны океана с обильной фауной и огромными доступными запасами полезных ископаемых. Тихоокеанский шельф Курильской островной дуги является одним из интереснейших районов океана. Высокая биологическая продуктивность и сейсмическая активность этого района, сезонная изменчивость гидрометеорологических условий и судоходства – всё это отражается на характеристиках подводных шумов. Гидроакустические сигналы, порождаемые подводными землетрясениями, в частности, представляют интерес с точки зрения оперативного прогноза волн цунами, угрожающих побережьям Курильских островов, Камчатки и Японии [1]. Так, в 1952 году волны цунами уничтожили город Северо-Курильск на о. Парамушир вместе с населением и другие населенные пункты на Курильских островах на протяжении 600 км.

С целью изучения сигналов от землетрясений и других подводных шумов в 60-х годах прошлого века на о. Шикотан, расположенном в южной части Курильской островной дуги, была организована сейсмостанция, совмещенная с гидроакустической лабораторией. На шельфе о. Шикотан последовательно установлены несколько исследовательских приемных гидроакустических систем. В данной статье изложены результаты исследований подводных шумов, принимаемых одной из этих систем, обозначаемой ниже аббревиатурой ПС. Она была оснащена несколькими гидроакустическими трактами, каждый из которых состоял из калиброванного ненаправленного гидрофона и малошумного усилителя. Усилители с различными коэффициентами усиления и частотными характеристиками в совокупности обеспечивали прием гидроакустических шумов в частотном диапазоне от 1 Гц до 11 кГц и динамическом диапазоне 150 дБ. Электропитание усилителей, их переключение и передача сигналов в береговую лабораторию осуществлялись по экранированному кабель-тросу. Гидрофоны размещались внутри обтекателя на стальной опоре на высоте 1.5 м над поверхностью дна. Обтекатель сферической формы диаметром 0.5 м представлял собой металлический каркас, обтянутый синтетическим материалом. Система ПС была установлена на песчаном дне на глубине 130 м в 21 км к северо-востоку от о. Шикотан в 10 км от бровки шельфа.

В данном районе можно выделить два основных гидроакустических сезона: теплый с июня по декабрь и холодный с января по март. В теплый сезон преобладает придонный гидроакустический канал, а в холодный – приповерхностный. Атмосферные осадки – в теплый сезон дожди, в холодный – снегопады. Течения – постоянное Ойя-Сиво и переменные приливно-отливные и дрейфовые ветровые. В холодный сезон присутствует дрейфующий лед, выносимый течениями из Охотского моря.

Район Курильской островной дуги отличается высокой сейсмической активностью, по некоторым данным, максимальной на земном шаре [1]. Фокальная зона землетрясений расположена под Курильской островной дугой и близка к плоскости с уклоном около 50°. Землетрясения, отмечаемые сейсмографами и гидрофонами системы ПС, происходят с интервалами в несколько часов, а в периоды повышенной сейсмической ак-

Таблица 1. Шкала силы ветра Бофорта, принятая в России

Балл	интервал скорости ветра, м/с	средняя скорость ветра, м/с
0	0–0.5	0
1	0.6–1.7	1.1
2	1.8–3.3	2.5
3	3.4–5.2	4.3
4	5.3–7.4	6.3
5	7.5–9.8	8.6
6	9.9–12.4	11.1
7	12.5–15.2	13.8
8	15.3–18.2	16.7
9	18.3–21.5	19.9
10	21.6–25.1	23.3
11	25.2–29	27.1
12	>29	>29

тивности – в несколько минут. Эпицентральные расстояния до очагов землетрясений составляли 40–200 км, глубины очагов – 20–50 км, энергетические классы – 8–12 (10^8–10^{12} Дж) [2], [3]. Изредка регистрировались сигналы от удаленных землетрясений с эпицентральными расстояниями в тысячи км.

Шельфовая зона о. Шикотан – одна из наиболее продуктивных в Мировом океане в биологическом отношении. Океаническая фауна здесь обильна и разнообразна. В больших количествах здесь обитают беспозвоночные, рыбы и млекопитающиеся – дельфины, киты и тюлени. Наблюдения показали, что наибольшую акустическую активность проявляют киты и дельфины и меньшую – беспозвоночные и рыбы. Из беспозвоночных наиболее активны крупные двустворчатые моллюски морские гребешки (*Pecten jacobaeus*) с раковинами до 20 см в поперечнике и камчатские крабы (*Paralithodes camtchaticus*) массой до 7 кг и размахом ног до 1.5 м, передвигающиеся по дну стадами в несколько сотен особей.

Судоходство в районе наиболее интенсивно в теплый сезон и представлено, в основном, малыми и средними рыболовными траулерами.

Измерения подводных шумов проводились сеансами через интервалы времени от 3 до 12 часов. В каждом сеансе шумы записывались на магнитную ленту и измерялись их уровни, а также скорость ветра в месте расположения лаборатории. При воспроизведении записей проводился спектральный анализ шумов в стандартных полосах фильтров второго класса – третьоктавных в диапазоне частот 1.9–120 Гц со временем усреднения по огибающей $T = 90$ с и полуоктавных в диапазоне 120–11000 Гц при $T = 3$ с. Результаты пересчитывались к полосе 1 Гц и выражались в дБ, отсчитываемых от уровня 1 мкПа/Гц$^{1/2}$. Полученные значения частотного спектра приписывались к частотам максимальных значений сквозных частотных характеристик системы электронный тракт – фильтр. Некоторые записи анализировались в полосах 6 Гц и 1 Гц с использованием анализатора спектров и ЭВМ.

Дополнительно измерялись подводные шумы прибоя на расстояниях 50–600 м от береговой черты [4], [14], а также гидродинамические шумы, воспринимаемые гидрофоном при обтекании его потоком воды, и снижение их уровня обтекателем [5], [6].

В данной работе используется система СИ и шкала силы ветра Бофорта, принятая в России и представленная в табл. 1. При использовании работ зарубежных авторов их данные пересчитывались в систему СИ и российскую шкалу Бофорта.

Наблюдавшиеся подводные шумы можно разделить на регулярные, образующие непрерывный шумовой фон, и редкие, опознаваемые на слух в ограниченные интервалы времени. К редким шумам относились корабельные шумы, прослушиваемые при прохождении судна вблизи системы ПС (в отличие от регулярного шума судоходства множества отдаленных судов), сейсмические шумы – импульсы от землетрясений, метеорологические шумы атмосферных осадков – дождя, и возможно, снегопада, а также биологические шумы, издаваемые океанической фауной. Частотные спектры редких подводных шумов, принимавшихся системой ПС, показаны на рис. 1.

Наиболе интенсивными биологическими звуками были голоса горбатых китов (*Megaptera novaeanglie Borovski*) и “свисты” дельфинов. Они прослушивались в диапазоне частот 50–11000 Гц и, вероятно, простирались за пределы звукового диапазона. “Свисты” дельфинов варьируются в широких пределах по частоте, амплитуде и длительности. Голоса горбатых китов можно разделить на четыре группы: “крики”, “рычание”, “скуление” и “шипение”. Наиболее интересны “крики” – мелодичные звучания, обогащенные обертонами. “Крики” обычно начинались с частоты 2 кГц и постепенно захватывали область частот до 200 Гц. Длительность “крика” не превышала 2 с, они следовали через 2–3 минуты [7]. Иногда были слышны “крики” нескольких животных, ближних и дальних. Подобные звуки издаются и другими китообразными [8]. Из других биологических звуков, более слабых и редких, можно отметить звучания, похожие на автомобильные гудки и редкую барабанную дробь, видимо, издававшиеся рыбами. Временами прослушивались интенсивные шорохи и скрипы, вероятно, производимые крабами, перемещавшимися по дну вблизи системы ПС или даже по поверхно-

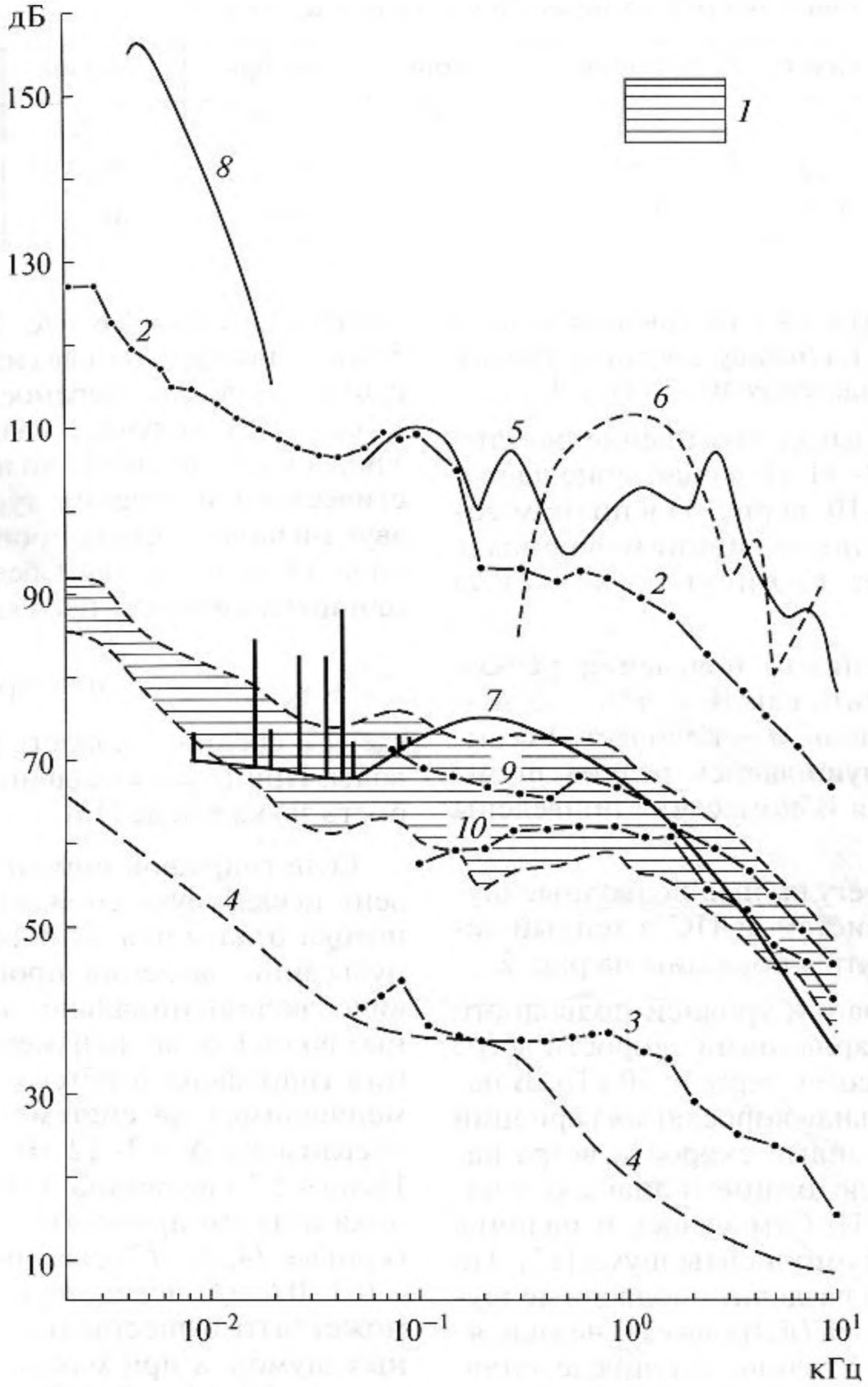

Рис. 1. Частотные спектры редких подводных шумов, принимавшихся системой ПС в теплый сезон года: *1* – область усредненных спектров регулярных подводных шумов; *2*, *3* – максимальные и минимальные спектральные уровни регулярных подводных шумов по всем наблюдениям; *4* – частотный спектр электронных шумов системы ПС, приведенный ко входу гидрофона; *5* – верхняя граница спектральных уровней "свистов" дельфинов; *6* – верхняя граница спектральных уровней "криков" горбатых китов; *7* – образец спектра корабельного шума; расстояния до источников сигналов со спектрами *5*–*7* неизвестны; *8* – спектр гидроакустического импульса землетрясения, принятого системой ПС; *9* – спектр подводного шума сильного ливня при скорости ветра 2 м/с; *10* – спектр подводного шума через 6 часов после ливня при скорости ветра 3 м/с.

сти обтекателя. Источниками импульсных подводных шумов могут быть морские гребешки. Наблюдения в аквариуме показали, что они иногда резко захлопывают створки раковин, издавая звуковые импульсы. При этом из раковины выбрасывается струя воды, и реактивная сила струи отбрасывает моллюска. Так он спасается от нападения морских звезд.

Корабельные шумы судов, проходивших вблизи системы ПС, состояли из сплошного спектра с максимумом на частотах в десятки и сотни Гц и дискретных гармонических звукорядов гребных валов и винтов (рис. 1).

Гидрофоны системы ПС принимали в 2–2.5 раза больше импульсов от подводных землетрясений, чем наземные сейсмографы. Продолжительность импульсов составляла от единиц секунд до 180 с. Максимумы их частотных спектров приходились на частоты 5–8 Гц, где они превосходили уровни регулярных шумов на 60–80 дБ.

Таблица 2. Вероятность появления редких шумов по данным системы ПС

Событие	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	январь	февраль
"крики" китов	0	0.03	0.03	0.02	0.02	0	0
корабельные шумы	0.33	0.14	0.08	0.02	0.02	0	0.09
дождь	0.13	0	0.07	0.01	0	0	0

При повышении частоты их спектры спадают со скоростью около 22 дБ на октаву, достигая уровня регулярных шумов на частотах 40–70 Гц [3].

Сильный дождь вызывал повышение спектра подводных шумов на 3–11 дБ в диапазоне частот 0.1–11 кГц (кривые 9–10 на рис. 1) в полном соответствии с шумом ливня, принимавшемся в глубоком океане через 15 минут после начала ливня [9].

Частоту или вероятность появления редких шумов можно определить как $W = n/N$, где N – общее количество сеансов, n – количество сеансов, в которых прослушивались редкие шумы данного типа. Значения W помесячно приведены в табл. 2.

Далее рассмотрим регулярные подводные шумы, принимавшиеся системой ПС в теплый сезон. Их частотные спектры показаны на рис. 2.

Согласно [10], вариации уровней подводного шума коррелируют с вариациями скорости ветра в диапазоне частот от сотен герц до 20 кГц. В нашем случае положительная корреляция вариаций уровней шума с вариациями скорости ветра наблюдалась во всем обследованном диапазоне частот (1.9–11000 Гц) [11]. Отмечалось и наличие независящей от ветра компоненты шума [12]. По этому признаку можно разделить подводные шумы на зависящие от ветра (ветровые) и независящие (неветровые) [10]. Уточняя эти определения, будем называть ветровыми подводные шумы, связанные со скоростью ветра корреляционной связью, и функция корреляции вариаций уровней которых со скоростью ветра положительна, по крайней мере, при скорости ветра ниже критической (выше критической эта функция может быть и отрицательной). О критической скорости ветра говорится ниже. Неветровыми будем считать подводные шумы, для которых эта функция равна нулю или отрицательна при всех значениях скорости ветра. Так, например, корреляция уровней шумов судоходства со скоростью ветра отрицательна, если при усилении ветра суда уходят из района. Такие шумы неветровые, хотя зависимость от скорости ветра наблюдается.

На низких частотах существенным источником неветровых шумов в нашем районе являются океанические течения. По данным измерений суммарная скорость течений изменялась независимо от ветра, в основном, в пределах 0–0.6 м/с, иногда достигая 1.6 м/с. На гидрофоны воздействовали турбулентные гидродинамические пульсации давления, переносимые течением. Такое воздействие получило название псевдозвука [13]. Уровень его значительно превышает уровень акустического излучения турбулентности. Псевдозвук низкочастотный процесс. Его спектр спадает на 8–14 дБ на октаву. Средний квадрат давления, или интенсивность псевдозвука

$$\overline{p^2} = \kappa\rho^2 U^4,$$

где U – средняя скорость течения, ρ – плотность воды. При $U \ll c$ коэффициент $\kappa \ll 1$, где c – скорость звука в воде [13].

Если гидрофон помещен в обтекатель, то уровень псевдозвука снижается, поскольку граница потока отдаляется от поверхности гидрофона, и пульсации давления проникают в обтекатель в виде экспоненциально затухающих неоднородных волн. Согласно измерениям при использовании гидрофона и обтекателя, аналогичных применявшимся на системе ПС, снижение уровня псевдозвука $\Delta = 7$–12 дБ на частотах $f = 5$–30 Гц. При $f < 5$ Гц величина Δ убывает [5], [6]. На рис. 2 показаны эмпирический (кривая *16*) и расчетные (кривые *14, 15, 17*) спектры псевдозвука. При $U = 0.3$–0.6 м/с псевдозвук на частотах ниже 30 Гц может быть существенной компонентой регулярных шумов, а при максимальной скорости течения $U = 1.6$ м/с и $f < 8$ Гц он достигает максимальных уровней регулярных шумов. Корреляция уровней шумов с производной фазы прилива наблюдалась [12]. По-видимому, скорость приливных течений достигала десятков см/с.

Существенной компонентой регулярных шумов в диапазоне от единиц герц до нескольких килогерц является не ветровой шум судоходства. В теплое время года в разгар промыслового сезона судоходство значительно интенсивнее, чем в холодный сезон. С другой стороны, в холодный сезон благодаря подводному приповерхностному звуковому каналу условия распространения звука улучшаются, что способствует возрастанию шума дальнего судоходства. Частотные спектры корабельных шумов состояли из сплошного спектра с максимумом на частотах от десятков до сотен герц и дискретного спектра в диапазоне от единиц герц до 100 Гц. Образец типичного для данного района спектра шума небольшого судна, про-

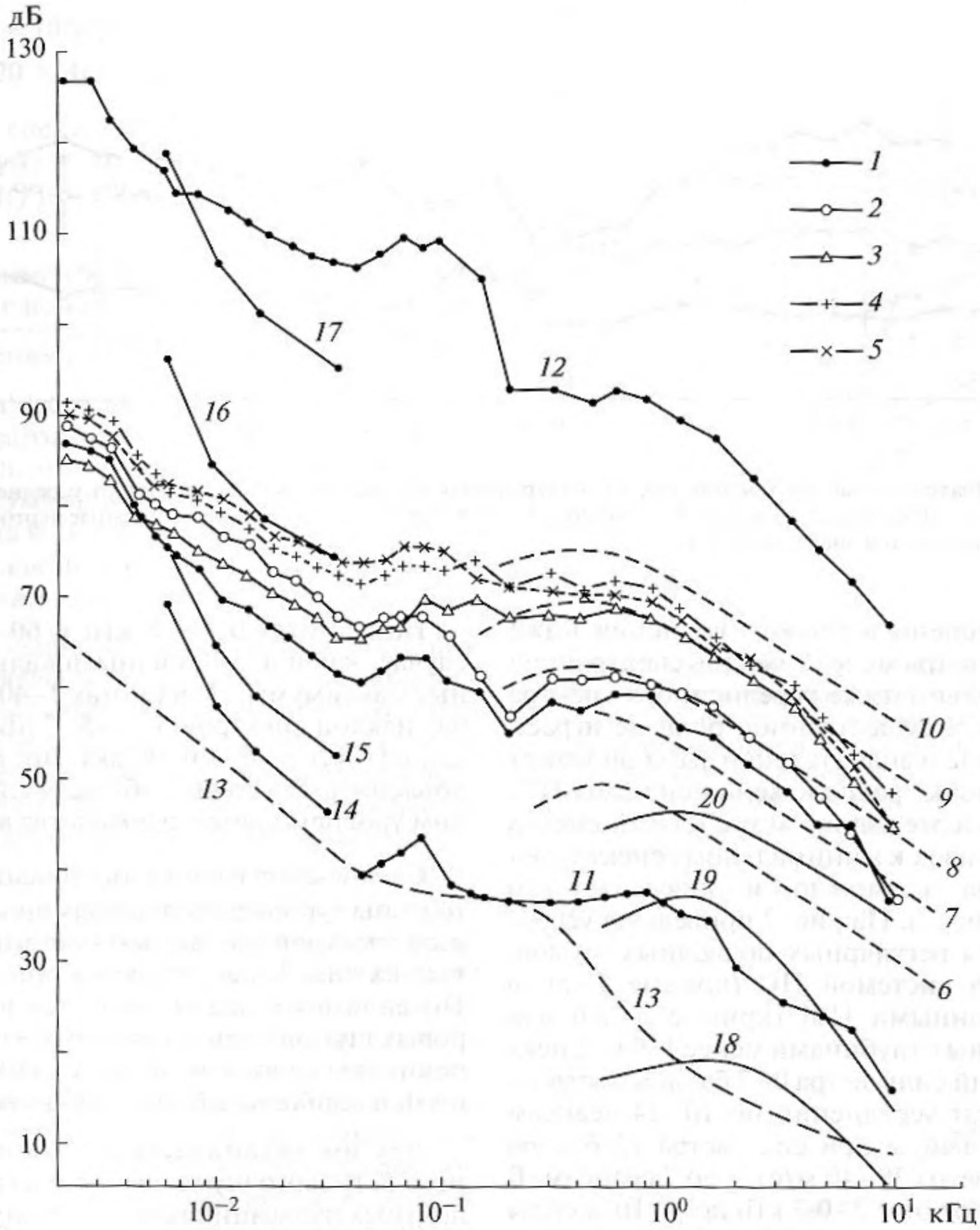

Рис. 2. Усредненные частотные спектры регулярных подводных шумов, принимавшихся системой ПС в теплый сезон года в сравнении с усредненными спектрами [10]: *1–5* – усредненные частотные спектры по данным системы ПС при силе ветра: *1* – 0 баллов, *2* – 3 балла, *3* – 5 баллов, *4* – 7 баллов, *5* – 12 баллов (скорость ветра 30–40 м/с); *6–10* – усредненные спектры для прибрежной зоны с глубинами менее 180 м [10]: *6* – 1 балл, *7* – 2 балла, *8* – 3 балла, *9* – 5–6 баллов, *10* – 9 баллов; *11–12* – минимальные и максимальные спектральные уровни регулярных подводных шумов по всем данным системы ПС; *13* – спектр собственных электронных шумов системы ПС, приведенный ко входу гидрофона; *14–17* – спектры гидродинамических псевдозвуковых шумов, принимаемых гидрофоном в обтекателе, аналогичном обтекателю системы ПС, при скорости течения: *14* – 0.1 м/с, *15* – 0.14 м/с, *16* – 0.45 м/с, *17* – 1.6 м/с, *16* – эмпирический спектр, *14, 15, 17* – расчетные спектры; *18–20* – расчетные спектры шумов прибоя в точке системы ПС при высоте волны и степени волнения: *18* – 0.12 м (1 балл), *19* – 1 м (3 балла), *20* – 2.8 м (5 баллов).

ходившего поблизости от системы ПС, показан на рис. 1 (кривая *7*).

Северо-восточное побережье о. Шикотан протяженностью около 9 км представляет собой галечный пляж у подножья скалистого обрыва, местами прерываемый скалистыми мысами. Измерения показали, что стук гальки, перемещаемой волнами, создает значительный подводный шум прибоя, убывающий при удалении от берега [4], [14]. Интенсивность шума прибоя определяется высотой волн [15]. Поскольку волнение имеет ветровую компоненту и зыбь, приходящую издалека и не связанную с локальной скоростью ветра, то и шум прибоя имеет ветровую и неветровую компоненты. С использованием данных работ [14], [15] были рассчитаны спектры подводных шумов прибоя в точке расположения системы ПС при различной высоте волны (кривые *18–20* на

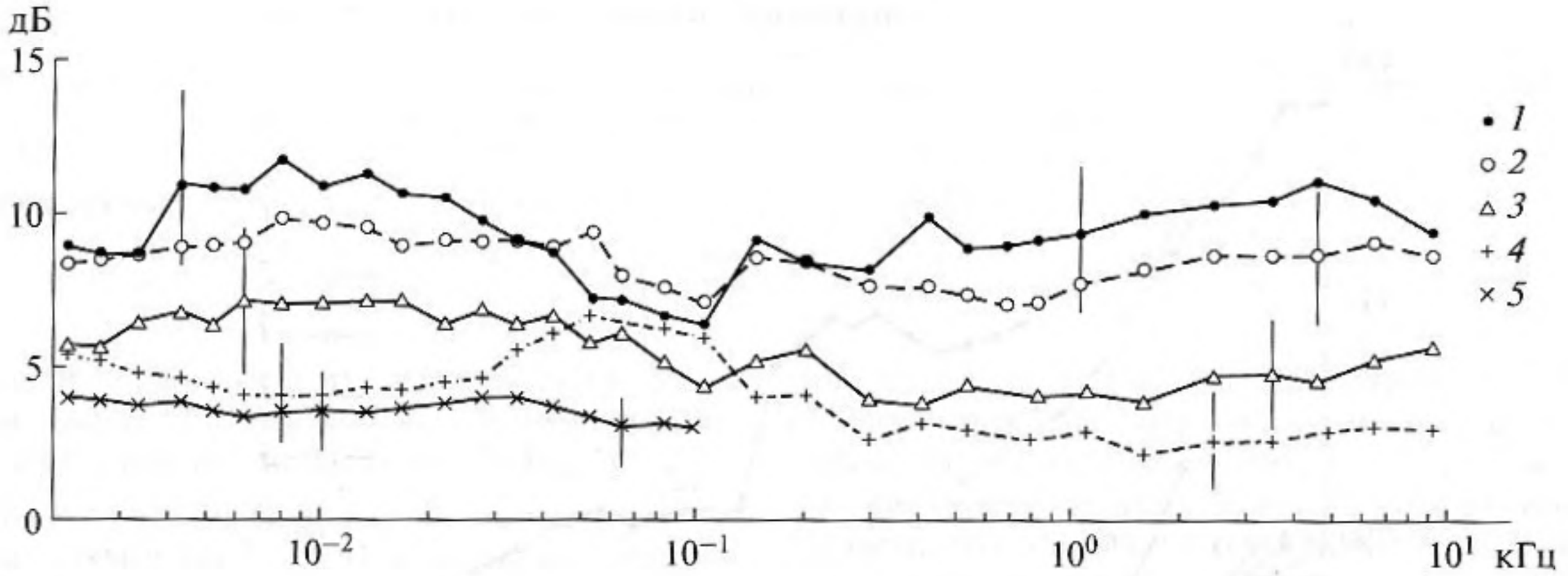

Рис. 3. Среднеквадратичные отклонения $\sigma(f, V)$ спектральных уровней подводных шумов от усредненных значений для силы ветра: *1* – 0 баллов, *2* – 3 балла, *3* – 5 баллов, *4* – 7 баллов, *5* – 12 баллов. Вертикальные черточки – стандартные ошибки определения значений $\sigma(f, V)$.

рис. 2). При степени ветрового волнения ниже 6 баллов и силе ветра менее 7 баллов спектр шума прибоя значительно ниже усредненного спектра ветрового шума и существенной роли не играет. Только при штиле и значительной зыби он может проявляться в точке расположения системы ПС. При штиле и высоте зыби 1 м расчетный спектр шума прибоя близок к минимальному спектру регулярного шума, возможно, и определяет его (кривая *19* на рис. 2). На рис. 2 приведены усредненные спектры регулярных подводных шумов, принимавшихся системой ПС (кривые *1*–*5*), в сравнении с данными [10] (кривые *6*–*10*) для прибрежной зоны с глубинами менее 180 м. Спектры для значений силы ветра 0–7 баллов построены как результат усреднения по 10–14 сеансам измерений каждый, а при силе ветра 12 баллов (при скорости ветра 30–40 м/с) – по 7 сеансам. В диапазонах частот от 0.2–0.3 кГц до 4 кГц и силы ветра 3–5 баллов данные системы ПС практически совпадают с данными [10]. В диапазоне силы ветра 7–9 баллов спектральные уровни стабилизируются, а при силе ветра более 9 баллов даже снижаются на некоторых частотах. Ранее этот эффект отмечался и получил объяснение в [16], затем в работах [17], [18]. Подробнее он рассматривается ниже.

По данным системы ПС в диапазоне частот 0.07–3 кГц минимальные значения спектральных уровней шума (кривая *11* на рис. 2) выше, чем в [10]. По данным системы ПС (кривая *1* на рис. 2) средний спектр шумов при штиле на частотах более 0.5 кГц выше усредненного спектра [10] при силе ветра 1 балл (кривая *6*). Причиной этого, вероятно, является более высокий уровень неветровых шумов в нашем случае. На частотах 2–10 Гц средние спектры шумов по данным системы ПС близки к спектрам, полученным в сходных условиях в Черном море [19].

На частотах 0.2–0.8 кГц и 60–80 Гц в нашем случае, как и в [10], видны локальные спектральные максимумы. На частотах 2–40 Гц в нашем случае наклон спектров $S = -5$–7 дБ/окт, в то время как в [10] $S = -8$–10 дБ/окт. Это различие можно объяснить действием обтекателей и более высоким уровнем шумов судоходства в нашем случае.

Среднеквадратичные отклонения $\sigma(f, V)$ спектральных уровней подводных шумов от усредненных спектров по данным системы ПС, показанные на рис. 3, уменьшаются при усилении ветра. По-видимому, это объясняется влиянием неветровых шумов, уровни которых изменяются в широких пределах, а их вклад в суммарный уровень шумов наибольший при слабом ветре.

Другим механизмом генерации низкочастотного ветрового шума является воздействие турбулентных пульсаций ветра на водную поверхность. В [23] и [24] показано, что в отсутствие шумов судоходства этот механизм соответствует экспериментальным данным на частотах 10–100 Гц. В [25]–[27] рассмотрено излучение звука в воду при взаимодействии турбулентности ветра с волнением и турбулентностью в воде. Согласно упомянутым авторам, на частотах от долей Гц до 100 Гц частотный спектр подводных шумов можно представить в виде:

$$\overline{p^2}(f,V) = \overline{p_0^2}(f) + \alpha(f)V^{\beta(f)}, \qquad (1)$$

где $\overline{p^2}(f,V)$ – средний квадрат звукового давления подводного шума в зависимости от частоты и скорости ветра, $\overline{p_0^2}(f)$ – то же для неветрового шума, $\alpha(f)$ – начальный спектр ветрового шума при $V = 1$ м/с.

В двойном логарифмическом масштабе формулу (1) можно переписать в виде:

$$J_V(f,V) = 10\lg[\overline{p^2}(f,V) - \overline{p_0^2}(f)] + \\ +120 = A(f) + B(f)\lg V, \quad (2)$$

где $J_V(f,V)$ – спектр интенсивности ветрового подводного шума в дБ, отсчитанных от уровня 1 мкПа/Гц$^{1/2}$, $A(f) = 10\lg\alpha(f) + 120$ в дБ, $B(f) = 10\beta(f)$.

При экспериментальных исследованиях подводных шумов с использованием системы ПС измерялись значения $\overline{p^2}(f,V)$, и при $V = 0$ – значения $\overline{p_0^2}(f)$. Затем на частотах $f \le 120$ Гц методом наименьших квадратов вычислялись значения $A(f)$ и $B(f)$ и строились линии регрессии для спектральных значений суммарного шума в дБ согласно (2). Результаты показаны на рис. 4 и в табл. 3, где f, f_1, f_2 – центральная и граничные частоты полос фильтров, в которых производились измерения.

На частотах выше 100 Гц преобладает звуковое излучение колеблющихся и захлопывающихся воздушных пузырьков, образующихся в воде при разрушении волн с образованием пенистых гребней [10]. Под воздействием турбулентных пульсаций давления в верхнем слое воды возбуждаются колебания пузырьков на собственных частотах $f_r \cong$ $\cong 326/r$, где r – радиус пузырька в см, f_r – в Гц. При захлопывании пузырьков генерируются короткие звуковые импульсы. В [28] исследовано распределение по размерам мелких пузырьков с радиусами $1.5 \times 10^{-3} - 3.5 \times 10^{-2}$ см в верхнем слое океана с резонансными частотами 9–220 кГц. Более крупные пузырьки методика измерений регистрировать не позволяла. Между тем, подводное фотографирование показывает наличие пузырьков с радиусами до 1 см в верхнем слое воды толщиной 1–1.5 м. Под пенистым гребнем волны возникает "облако" таких пузырьков, излучающих шум с превышением фонового уровня в диапазоне 0.2–20 кГц [29]. Таким частотам соответствуют значения радиусов пузырьков $r = 1.6–1.6 \times 10^{-2}$ см. Максимум шума приходится на частоты 0.4–0.5 кГц, излучаемые пузырьками с радиусами 0.65–0.8 см. Сходные данные были получены автором [30]. После прохождения пенистого гребня облако пузырьков некоторое время удерживается в воде. Согласно [31], скорость всплытия пузырьков с радиусами $1.6 \times 10^{-2} - 1.6$ см составляет 2–30 см/с, и время их всплытия на поверхность с глубины 1–1.5 м – 3–75 с. Всплывая, пузырьки образуют полосу пены на поверхности воды. Затухание звука в облаке пузырьков достигает 50 дБ/м [29]. В [32], используя данные о затухании звука в мелком море, рассчитано дополнительное ослабление звука "облаками" пузырьков. Можно полагать, что мощность излучения звука пузырьками пропорциональна их количеству m, а поглощение звука – пропорционально $\exp(m)$.

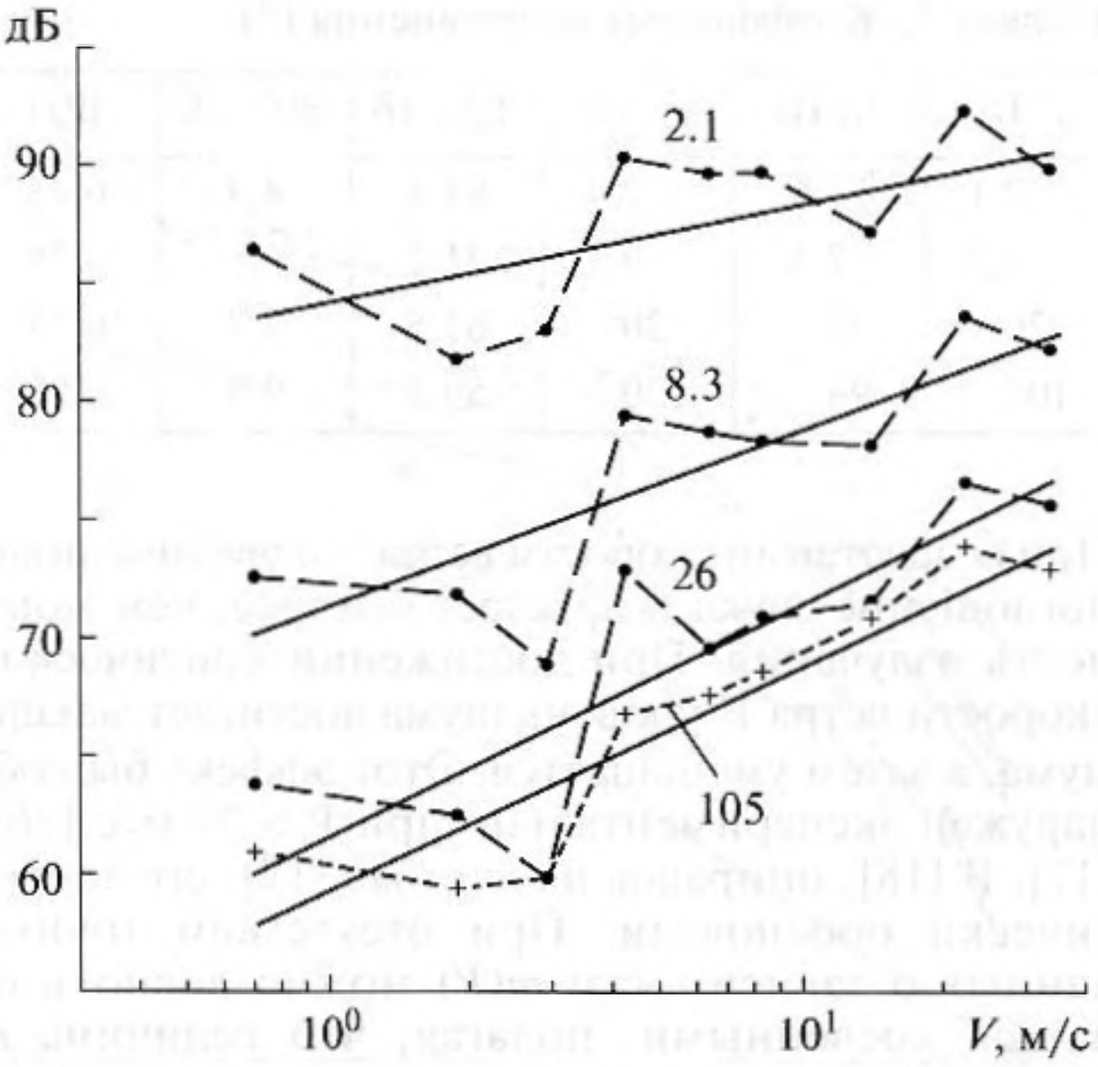

Рис. 4. Зависимость от скорости ветра вариаций спектральных уровней низкочастотных подводных шумов. Сплошные прямые – линии регрессии на частотах, указанных на графиках в герцах; точки, соединение пунктиром – эмпирические данные; точки при $V < 30$ м/с – результаты усреднения по 10–13 сеансам измерений каждая, точки при $V \ge 30$ м/с – по 7 сеансам.

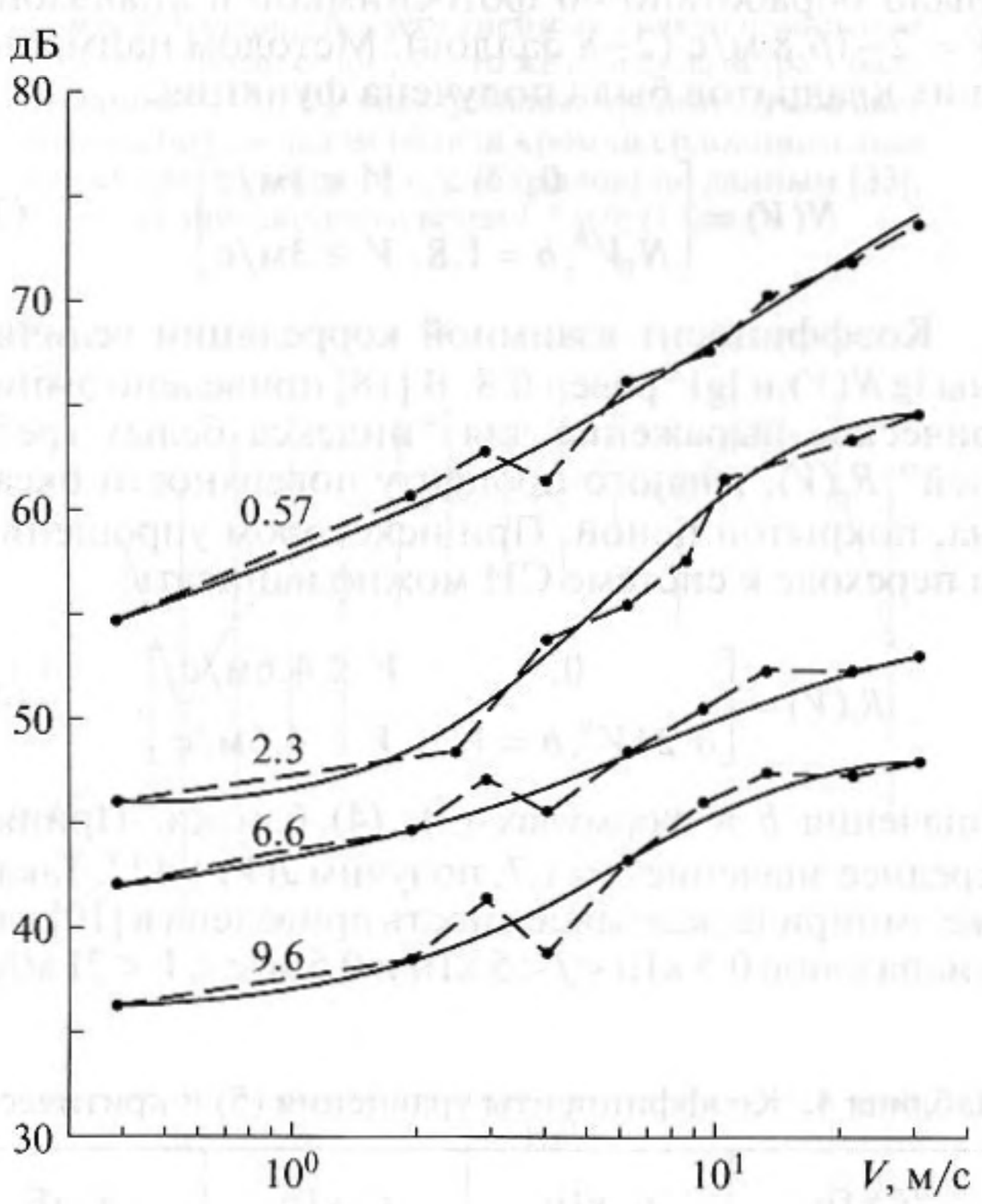

Рис. 5. Зависимость от скорости ветра вариаций спектральных уровней подводных шумов на звуковых частотах. Сплошные кривые – линии регрессии на частотах, показанных на графиках в килогерцах; точки, соединенные пунктиром – эмпирические данные; точки при $V < 30$ м/с – результаты усреднения по 14 сеансам измерений, точки при $V > 30$ м/с – по 7 сеансам.

Таблица 3. Коэффициенты уравнения (2)

f, Гц	f_1, Гц	f_2, Гц	$A(f)$, дБ	$B(f)$, дБ	$\beta(f)$
2.1	1.9	2.4	84.4	4.3	0.43
8.3	7.5	9.4	71.2	7.8	0.78
26	23	30	61.5	9.7	0.97
105	94	120	59.2	9.8	0.98

При возрастании скорости ветра v и увеличении m поглощение звука возрастает быстрее, чем мощность излучения. При достижении критической скорости ветра V_c уровень шума достигает максимума, а затем уменьшается. Этот эффект был обнаружен экспериментально при $V > 20$ м/с [16], [17]. В [18], опираясь на данные [17], его теоретически обосновали. При отсутствии точных данных о зависимости $m(V)$ можно воспользоваться косвенными, полагая, что величина m пропорциональна количеству пенистых гребней $N(V)$ на поверхности океана или относительной ее площади, покрытой пеной. Автор получил данные о функции $N(V)$, фотографируя определенную площадь поверхности воды в центральной части Атлантического океана и подсчитывая количество пенистых гребней на фотоснимках. Было обработано 40 фотоснимков в диапазоне $V = 2$–16.8 м/с (2–8 баллов). Методом наименьших квадратов была получена функция:

$$N(V) = \begin{bmatrix} 0, & V < 3\text{м/с} \\ N_0 V^b, b = 1.8, & V \geq 3\text{м/с} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Коэффициент взаимной корреляции величины $\lg N(V)$ и $\lg V$ равен 0.8. В [18] приведено эмпирическое выражение для "индекса белых гребней" $R_c(V)$, равного проценту поверхности океана, покрытой пеной. При некотором упрощении и переходе к системе СИ можно написать:

$$R_c(V) = \begin{bmatrix} 0, & V \leq 4.6\text{м/с}, \\ 0.24V^b, b = 1.5, & V \geq 4.6\text{м/с} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Значения b в формулах (3), (4) близки. Приняв среднее значение $b = 1.7$, получим $J(V) \sim V^{1.7}$. Такая же эмпирическая зависимость приведена в [10] для диапазонов 0.5 кГц $< f < 5$ кГц и 0.5 м/с $< V < 21$ м/с. Данные ПС совпадают с данными [10] в диапазонах 0.3 кГц $< f < 4$ кГц и 3.4 м/с $< V < 9.8$ м/с.

При сильном ветре необходимо учитывать затухание шума в слое пузырьков, и тогда

$$J_V(f,V) = 10\lg[\overline{p^2}(f,V) - \overline{p_0^2}(f)] = \\ = A(f) + B(f)\lg V - D(f)V^b. \quad (5)$$

Критическое значение скорости ветра V_c находится из уравнения:

$$\partial J_V(f,V)/\partial V = \frac{B}{V}\lg e - bDV^{b-1} = 0.$$

При $b = 1.7$ получим:

$$V_c(f) = 0.447[B(f)/D(f)]^{0.59}, \quad (6)$$

где $V_c(f)$ – в м/с, f – в Гц. В [18] при других исходных данных получено теоретическое выражение:

$$V_c(f) = \\ = \begin{bmatrix} (2.15\cdot 10^{-7} L f^{1/2})^{-1/3}, & 300\text{ Гц} < f < 1500\text{ Гц}, \\ (5.63\cdot 10^{-9} L f)^{-1/3}, & f > 1500\text{ Гц} \end{bmatrix},$$

где L – толщина приповерхностного слоя с пузырьками. Следуя [18], положим $L = 1.2$ м. Тогда

$$V_c(f) = \begin{bmatrix} 157 f^{-1/6}, & 300\text{ Гц} < f < 1500\text{ Гц}, \\ 527 f^{-1/3}, & f > 1500\text{ Гц}. \end{bmatrix} \quad (7)$$

$V_c(f)$ – в м/с, f – в Гц.

Обработка методом наименьших квадратов данных, полученных с помощью системы ПС, позволила определить значения коэффициентов уравнения (5), приведенные в табл. 4, и построить линии регрессии для зависимости $10\lg\overline{p^2}(f,V)$, показанные на рис. 5. В табл. 4 сопоставлены результаты вычислений значений V_c по формулам (6), (7). Принимая во внимание возможные случайные ошибки, можно считать согласие расчетов по обеим формулам удовлетворительным. Во всем обследованном с помощью системы ПС диапазоне частот 1.9–11000 Гц корреляция вариаций уровней подводных шумов в дБ с $\lg V$ высокая (рис. 6) в согласии с теорией низкочастотных ветровых шумов [20]–[27]. Под влиянием неветровых шумов корреляция снижается при понижении частоты ниже 200 Гц. Высокая частотная кор-

Таблица 4. Коэффициенты уравнения (5) и критические значения скорости ветра

f, кГц	f_1, кГц	f_2, кГц	A, дБ	B, дБ	D, дБ	V_c, кГц, ф-ла (6)	V_c, кГц, ф-ла (7)
0.57	0.48	0.68	55	11.0	0	–	65
2.3	1.9	2.7	39	21.7	0.0195	28	40
6.6	5.4	7.7	38	11.9	0.0087	32	28
9.6	7.7	11.0	30.5	14.9	0.0146	27	25

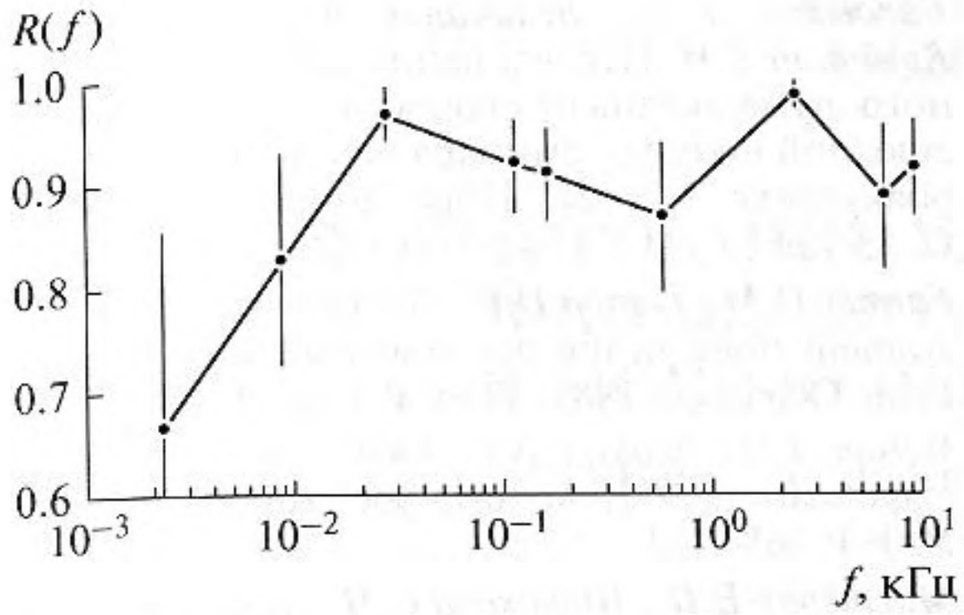

Рис. 6. Значения нормированной функции корреляций $R(f)$ вариаций спектральных уровней подводного шума в дБ на частотах f со значениями $\lg V$. Вертикальными черточками показаны стандартные ошибки оценок значений $R(f)$.

реляция вариаций уровней подводных шумов в широком диапазоне частот показывает синхронность вариаций на разных частотах.

Функция автокорреляции вариаций скорости ветра при возрастании времени задержки τ монотонно стремится к нулю, что свидетельствует в пользу гипотезы об эргодичности этого процесса. Вариации медленные, интервал автокорреляций по уровню $1/e$ составляет 14 часов, а для вариаций уровней подводных шумов – 7–15 часов. Функции автокорреляции вариаций уровней подводных шумов на звуковых частотах показывают слабую периодичность с суточным периодом, что, вероятно, связано с деятельностью промыслового флота.

Появление дрейфующего льда в холодный сезон приводит к повышению уровней подводных шумов (рис. 7). При столкновении и трении льдин возникают подледные шумы торошения. При возрастании ветра торошение усиливается, и подледные шумы растут. При штиле движение льда происходит под воздействием течений, и шумы торошений не прекращаются. При понижении частоты спектральные уровни подледных шумов возрастают быстрее уровней обычных шумов. Сходные данные под разреженным льдом вблизи кромки сплошного ледового покрова Арктического бассейна получены в [33].

В холодный сезон функция нормированной корреляции $R(f)$ вариаций спектральных уровней подводных шумов в дБ с вариациями $\lg V$ в диапазоне 0.06–11 кГц значительна (более 0.5) (рис. 8). Следовательно, в указанном диапазоне преобладают ветровые шумы, к которым можно отнести и шумы торошения. В диапазоне 3–5 кГц функция $R(f) \approx 1$, и ее значения уменьшаются при уходе частоты в обе стороны от этого диапазона. По-видимому, корреляционная связь шумов торошения со скоростью ветра менее силь-

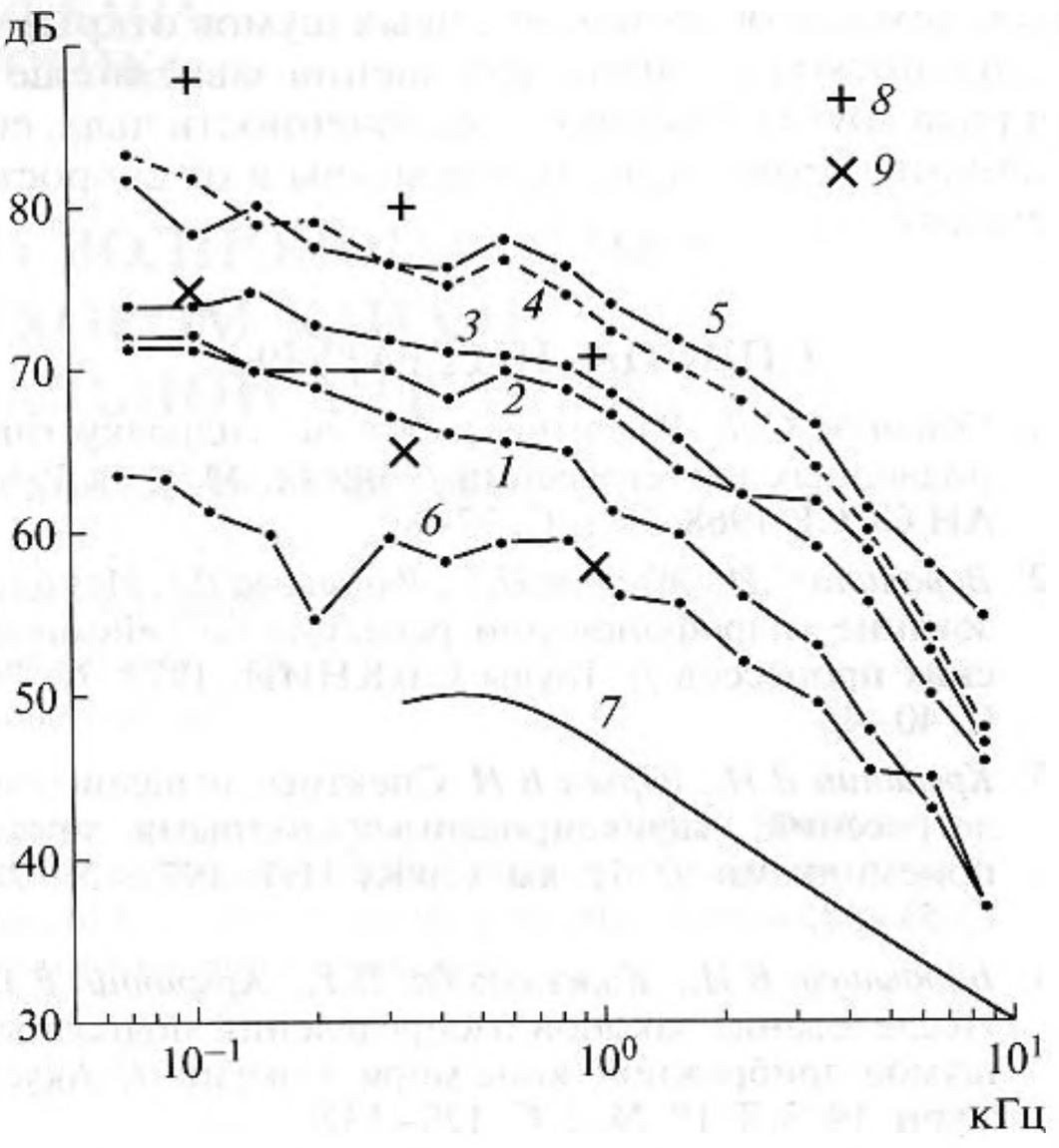

Рис. 7. Частотные спектры подводных шумов, принимавшихся системой ПС в зимний сезон при наличии дрейфующего битого льда при скорости ветра: *1* – 0 м/с (усреднение по двум сеансам), *2* – 8 м/с (5 баллов), *3* – 17 м/с (8 баллов), *4* – 29 м/с (11 баллов), *5* – 12 м/с (6 баллов); *6* – усредненный спектр шумов при штиле в теплый сезон; *7* – то же при силе ветра 1 балл по данным [10]; *8* – спектральные уровни шумов океана под битым льдом вблизи кромки сплошного льда при скорости ветра 10 м/с (6 баллов) по данным [33]; *9* – то же при скорости ветра 1.5 м/с (1 балл).

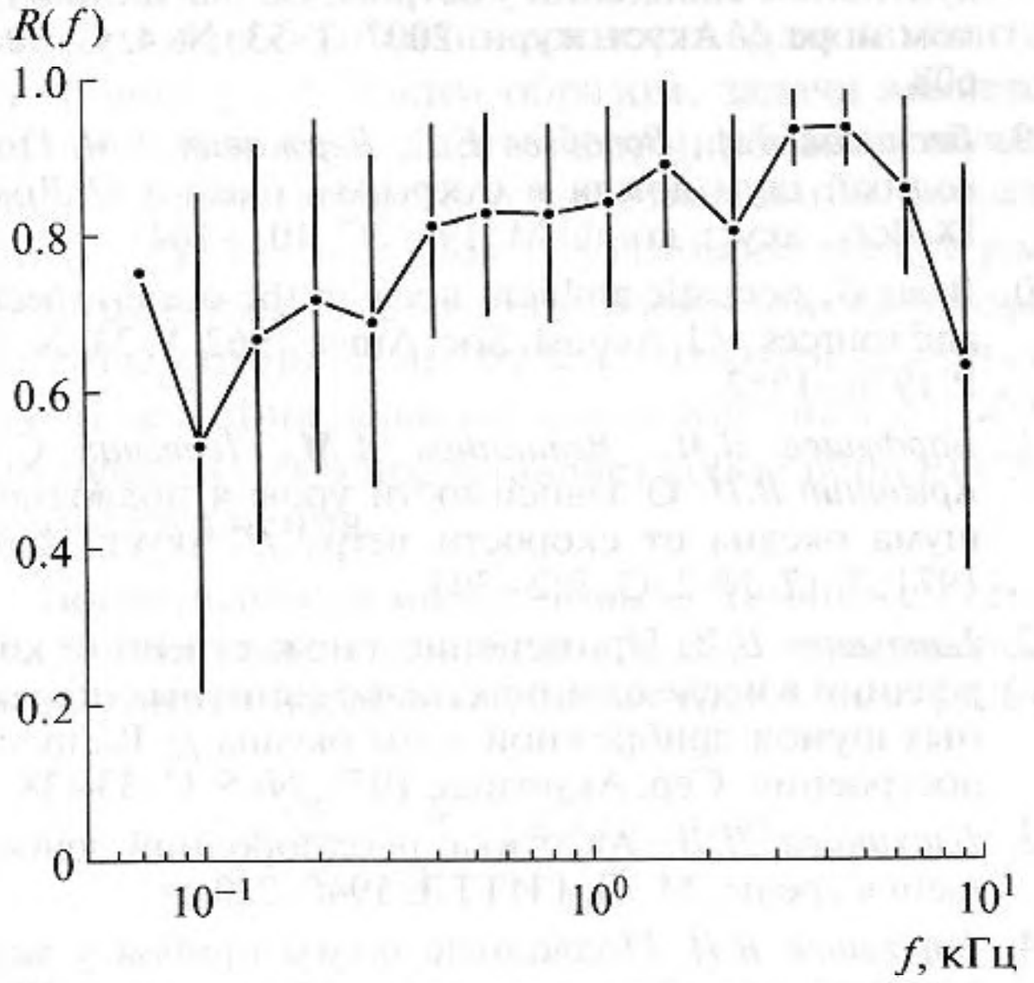

Рис. 8. Нормированная функция корреляции вариаций спектральных уровней подводных шумов в дБ с вариациями $\lg V$ по данным системы ПС в холодный сезон при наличии дрейфующего льда. Вертикальными черточками показаны стандартные ошибки оценок функции корреляции.

ная, чем для обычных ветровых шумов открытой воды, поскольку шумы торошения зависят еще и от ряда других факторов – сплоченности льда, его толщины, структуры, температуры и от скорости течений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Соловьев С.Л.* Развитие работ по гидроакустике подводных землетрясений // Вестн. АН СССР. М. АН СССР. 1968. № 1. С. 77–80.
2. *Воронина С.И., Жидков Н.Г., Ляпишева Р.Г.* Использование гидрофонов при регистрации сейсмических процессов // Труды СахКНИИ. 1972. № 28. С. 40–46.
3. *Крышний В.И., Юрьев В.И.* Спектры сигналов землетрясений, зафиксированных донными звукоприемниками // Труды СахКНИИ. 1972. № 28. С. 53–57.
4. *Бардышев В.И., Кожелупова Н.Г., Крышний В.И.* Исследование законов распределений подводных шумов прибрежной зоны моря и океана // Акуст. журн. 1973. Т. 19. № 2. С. 129–132.
5. *Бардышев В.И.* О происхождении низкочастотных подводных шумов океана // Труды АКИН. 1970. № 11. С. 156–160.
6. *Бардышев В.И., Грешилов Е.М.* О помехозащитных свойствах некоторых обтекателей // Морское приборостроение. Сер. Акустика. 1973. № 3. С. 100–107.
7. *Крышний В.И., Юрьев В.И.* Регистрация звуков морских животных в естественных условиях // Труды СахКНИИ. 1972. № 28. С. 58–60.
8. *Беликов Р.А., Белькович В.М.* Свисты белух в репродуктивном скоплении у острова Соловецкий в Белом море // Акуст. журн. 2007. Т. 53. № 4. С. 601–608.
9. *Беспалов Л.А., Воробьев Е.Г., Державин А.М.* Подводный шум дождя в открытом океане // Докл. IX Всес. акуст. конф. М. 1977. С. 101–104.
10. *Wenz G.* Acoustic ambient noise in the ocean: spectra and sources // J. Acoust. Soc. Amer. 1962. V. 34. № 12. P. 1936–1952.
11. *Бардышев В.И., Великанов А.М., Гершман С.Г., Крышний В.И.* О зависимости уровня подводного шума океана от скорости ветра // Акуст. журн. 1971. Т. 17. № 2. С. 302–303.
12. *Бардышев В.И.* Применение множественной корреляции в исследованиях низкочастотных подводных шумов прибрежной зоны океана // Вопр. судостроения. Сер. Акустика. 1975. № 5. С. 33–38.
13. *Блохинцев Д.И.* Акустика неоднородной движущейся среды. М.-Л. ГИТТЛ, 1946. 220 с.
14. *Бардышев В.И.* Подводные шумы прибоя у морских побережий разных типов // Акуст. журн. 2008. Т. 54. № 6. С. 939–948.
15. *Шорохова С.П.* Некоторые результаты измерения спектрально-энергетических характеристик шумов моря // Докл. X школы-семинара акад. Л.М. Бреховских. М.: ГЕОС. Наука, 2004.
16. *Бардышев В.И., Великанов А.Н., Гершман С.Г., Крышний В.И.* Исследование зависимости подводного шума океана от скорости ветра. Труды II Всесоюзной школы-семинара по статистической гидроакустике (СГ-2). Новосибирск: Наука, 1971. С. 53–59.
17. *Farmer D.M., Lemon D.D.* The Influence of bubbles on ambient noise in the ocean at high wind speeds // J. Phys. Oceanogr. 1984. V. 14. P. 1762–1778.
18. *Wilson J.D., Makris N.C.* Ocean acoustic hurricane classification // J. Acoust. Soc. Amer. 2006. V. 119. № 1. P. 168–181.
19. *Мастеров Е.П., Шорохова С.П.* Некоторые результаты экспериментального исследования спектрально-энергетических характеристик шумов моря // Акуст. журн. 1973. Т. 19. № 2. С. 207–211.
20. *Бреховских Л.М.* Звуковые волны под водой, обусловленные поверхностными волнами в океане // Изв. АН СССР. Физ. атм. и океана. 1966. Т. 2. № 9. С. 970–980.
21. *Nichols R.H.* Infrasonic ambient ocean noise measurements: Eleuthera // J. Acoust. Soc. Amer. 1981. V. 69. № 4. P. 974–981.
22. *Kibblewhite A.C., Ewans K.S.* Wave-wave Interactions, microseisms, and infrasonic ambient noise in the ocean // J. Acoust. Soc. Amer. 1935. V. 79. № 3. P. 981–994.
23. *Исакович М.А., Курьянов Б.Ф.* К теории низкочастотных шумов океана // Акуст. журн. 1970. Т. 16. № 1. С. 47–61.
24. *Wilson J.H.* Wind – generated noise modeling // J. Acoust. Soc. Amer. 1983. V. 73. № 1. P. 211–216.
25. *Гончаров В.В.* Генерация звука в океане при взаимодействии поверхностных волн и турбулентности // Изв. АН СССР. Физ. атм. и океана. 1970. Т. 6. № 11. С. 1189–1196.
26. *Бреховских Л.М., Гончаров В.В.* Излучение звука – пограничный слеем океан-атмосфера // Морское приборостроение. Сер. Акустика. 1972. № 1. С. 47–61.
27. *Фурдуев А.В.* Шумы океана // В кн.: Акустика океана. Под ред. Л.М. Бреховских. М.: Наука, 1974. С. 615–691.
28. *Колобаев П.А.* Исследование концентрации и статистического распределения размеров пузырьков, создаваемых ветром в приповерхностном слое океана // Океанология. 1975. Т. 15. № 6. С. 1013–1017.
29. *Dean G.B.* Acoustic hot-spots and breaking noise in the surf zone // J. Acoust. Soc. Amer. 1999. V. 105, № 6. P. 3151–3164.
30. *Бардышев В.И.* Подводные шумы в мелководных районах тропической зоны индийского океана // Акуст. журн. 2007. Т. 53. № 2. С. 201–206.
31. Физические основы подводной акустики // Пер. с англ. под ред. В.И. Мясищева. М.: Сов. радио, 1955.
32. *Weston D.E.* On the losses due to storm bubbles in oceanic sound transmission // J. Acoust. Soc. Amer. 1989. V. 89. P. 1543–1553.
33. *Diachok O.I, Winokur R.S.* Spatial variability of underwater ambient noise at Arctic ice water boundary // J. Acoust. Soc. Amer. 1974. V. 55. № 4. P. 750–753.