АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXIV 1978 Вып. 6

УДК 534.88

АКУСТИЧЕСКИЕ СИГНАЛЫ НАРВАЛОВ

В. В. Богородский, Г. А. Лебедев

Рассматриваются акустические коммуникационные и локационные сигналы нарвалов. Приведены результаты экспериментального изучения синхронного излучения нарвалами локационных сигналов в звуковом и инфразвуковом диапазонах частот. Обсуждаются возможные механизмы звукообразования у нарвалов.

Слух и совершенный гидролокационный аппарат играют в жизни китообразных существеннейшую роль. Эти акустико-физиологические особенности выдвигают китов по уровню развития на первое место среди животных Мирового океана.

В настоящее время об акустических сигналах, излучаемых китообразными, известно довольно много; результаты соответственных исследований опубликованы в большом числе работ [1—6]. Однако ни в одной из них не приводится данных, характеризующих сигналы нарвалов (Monodon monoceros); дается только их качественная характеристика. Так, автор работы [7] отмечает, что слышал, как нарвалы «испускали из горла необыкновенный звук, как от полоскания оного водою». Подобную характеристику сигналов нарвалов можно найти и в работе [8], где сказано, что нарвал «издает по временам глухие стоны довольно низкого тона, напоминающие стоны гагары, усиленные во много раз, громкое бульканье, ревущее гудение». Этим и ограничиваются данные об особенностях акустических сигналов нарвалов.

Как уже сообщалось в работе [9], при проведении экспериментальных радиогидроакустических исследований динамики ледяного покрова в районе Земли Франца-Иосифа нами были зарегистрированы акустические сигналы нарвалов, неоднократно показывавшихся в разводье на расстоянии около 1 *км* от места погружения звукоприемника под лед. Регистрация сигналов осуществлялась в полосе частот 0—5000 *гц* на магнитофоне, анализ проводился с помощью многоканального узкополосного анализатора спектра низких частот.

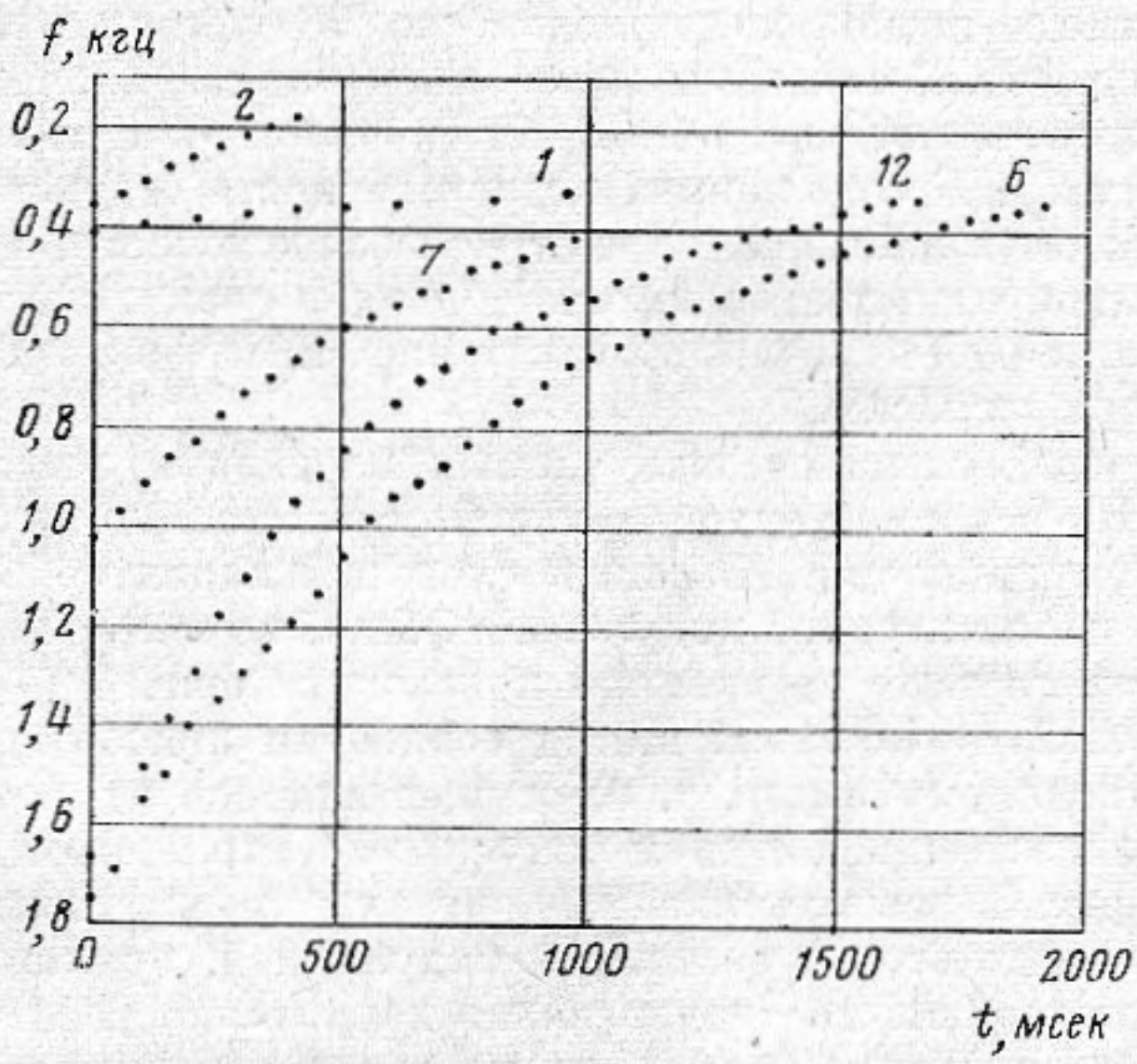
Метод обработки сигналов нарвалов, характеризующихся сложными законами частотной и амплитудной модуляции, состоял в анализе текущих спектров входных процессов в фиксированные моменты времени, отстоящие друг от друга на 10÷200 *мсек*.

Анализ зарегистрированных сигналов нарвалов показал, что они могут быть подразделены на коммуникационные и локационные. Сигналы первого вида отличаются большим разнообразием характеристик, повторяемость сходных сигналов позволила предполагать, что они служат для передачи конкретных сообщений, координирующих взаимоотношения отдельных особей в стаде и организующих поведение стада в целом. Коммуникационные сигналы представляют собой импульсы с частотной модуляцией, причем их длительность T_c, девиация частоты ΔF_c, начальные час-

тоты излучения $f_в$ (или $f_н$) и скорость изменения частоты изменяются в довольно широких пределах: $T_с=400\div3700$ *мсек*; $\Delta F_с=75\div2600$ *гц*; $f_в=355\div4230$ *гц*. Характеристики импульсных сигналов данного вида представлены в табл. 1. Здесь $f_в$ — верхняя граничная частота сигнала, $f_н$ — нижняя граничная частота, $D=\Delta F_с T_с$ — коэффициент сложности, ΔT — временной интервал анализа текущих спектров. Для подавляющего большинства сигналов частота монотонно понижается с течением времени от $f_в$ до $f_н$; лишь для сигнала 10 имело место обратное. Характер изменения во времени частоты сигналов показан на фиг. 1.

Пары сигналов 5 и 6, а также 7 и 13 демонстрируют аналогичность параметров и характера изменения частоты во времени.

Можно предполагать, что различные виды зарегистрированных сигналов несут информацию о различных ситуациях, в которых находится из-



Фиг. 1. Частотно-временные характеристики коммуникационных сигналов нарвалов

лучающая их особь. К сожалению, мы не располагаем данными о том, какому поведению животных соответствуют те или иные сигналы, в какой ситуации они издаются и какие вызывают ответные действия у сородичей. Эти вопросы могут быть с успехом решены только при проведении целенаправленных исследований в условиях специализированных акустических океанариумов. В этой связи можно только предполагать, что сигнал 10 с обращенной модуляцией частоты соответствует нестандартной ситуации и может быть сигналом опасности или агрессии.

Для получения выражений, которые можно было бы использовать при моделировании коммуникационных сигналов нарвалов в различного рода математических моделях и в технических устройствах, имитирующих эти сигналы, нами была предпринята попытка их аппроксимации. Аппроксимирующие функции подбирались в соответствии с условием минимизации отклонения значений аппроксимирующей кривой от истинных значений сигнала. Критерием отклонения являлась ширина текущего спектра сигнала на уровне 0,7, составляющая 50—100 *гц*. Аналитические выражения коммуникационных сигналов нарвалов могут быть представлены следующим образом:

1. $f_t=f_0e^{-0,2(t+0,15)}+0,03f_0e^{-20t}+0,5\cdot10^{-12}f_0^5t^4$,
2. $f_t=f_0e^{-1,75(t-0,02)}-0,035f_0e^{-60t}$
3. $f_t=0,95f_0e^{-t}+0,05f_0e^{-6t}-10^{-12}f_0^4t^3$

4. $f_t=0{,}9f_0e^{-t}+0{,}1f_0e^{-150t^3}$
5. $f_t=f_0e^{-1{,}3t}+2{,}8\cdot10^{-5}f_0^2t$
7. $f_t=f_0e^{-1{,}06t}+3{,}5\cdot10^{-14}f_0^5t^4$
9. $f_t=0{,}97f_0e^{-2t}+3{,}37\cdot10^{-5}f_0^2t+0{,}03f_0e^{-20t}$
10. $f_t=f_0e^{0{,}24t}+0{,}75\cdot10^{-25}f_0^8t^7$
11. $f_t=f_0e^{-1{,}1t}+1{,}68\cdot10^{-5}f_0^2t+10^{-3}f_0^2te^{-20t}$
12. $f_t=f_0e^{-1{,}43t}+4\cdot10^{-5}f_0^2t+2\cdot10^{-3}f_0^2te^{-25t}$

Здесь частота дана в *гц*, время — в *сек*.

Что касается амплитудной модуляции рассматриваемых сигналов, то можно отметить лишь общие закономерности. Кривые $p=f(t)$, где p — звуковое давление, t — время, в большинстве случаев для $T_c<1$ *с* имеют двугорбый характер с неустойчивым положением максимумов во времени. Для сигналов большей длительности более характерно наличие одного максимума характеристики. Сигналы же длительностью несколько секунд (8 в табл. 1) имеют несколько периодов «подмодуляции» амплитуды. Для иллюстрации на фиг. 2 показаны экспериментальные значения изменения во времени акустического давления для сигналов двух типов: $T_c=1050$ и 2050 *мсек* (13 и 3). К сожалению, недостаточность статистического материала не позволяет в настоящее время дать более исчерпывающие характеристики рассматриваемых зависимостей. Однако сравнение законов амплитудной модуляции для отмеченных выше пар сигналов 5 и 6 и 7 и 13 говорит о их хорошем согласии.

Второй группой сигналов, излучаемых нарвалами, являются сигналы локационные. Их основной отличительной особенностью является большая длительность, достигающая 60 *сек*, и сложный характер внутриимпульсной частотной и амплитудной модуляций. Общий характер изменения частоты сигналов такого типа во времени показан на фиг. 3 ($T_c=18{,}3$; 21 *сек* и часть сигнала $T_c=61{,}6$ *сек*). Метод обработки подобных сигналов был аналогичен описанному выше, т. е. осуществлялась их временная селекция с последующим определением текущих спектральных характеристик. Как видно из фиг. 3, рассматриваемые сигналы представляют собой непрерывные серии импульсов с частотной модуляцией, причем, как правило, для каждого последующего «подсигнала» характерно увеличение его длительности и коэффициента сложности по сравнению с предыдущим, а частота и амплитуда изменяются во времени пилообразно с нелинейным законом модуляции. Для иллюстрации сказанного в табл. 2 представлены данные об изменении длительности, девиации частоты и коэффициента сложности «подсигналов» для четырех зарегистрированных сигналов с длительностями 18,3, 21, 43,4 и 61,6 *сек*. Следует заметить, что в таблицу

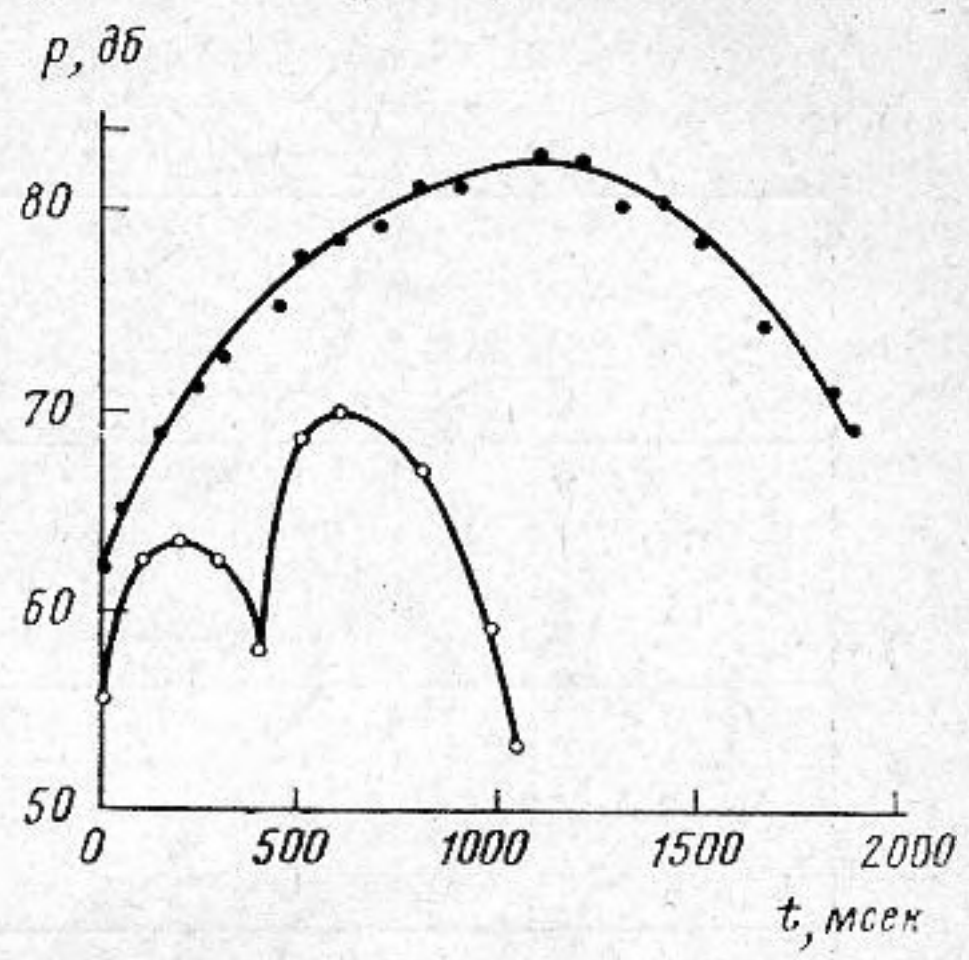
Таблица 1

Характеристики коммуникационных сигналов нарвалов

№ п/п	ΔT, *мсек*	T_c, *мсек*	$f_в$, *кгц*	$f_н$, *кгц*	ΔF_c, *кгц*	$D=\Delta F_cT_c$
1	100	950	0,408	0,333	0,075	71
2	50	400	0,355	0,180	0,175	70
3	50	2050	1,69	0,26	1,43	2931
4	50;100	1250	1,6	0,43	1,17	1462
5	50;100	1850	1,7	0,3	1,4	2590
6	50	1900	1,76	0,33	1,43	2717
7	50	1000	1,025	0,395	0,63	630
8	50	3700	1,34	0,33	1,01	3737
9	50	540	4,23	1,61	2,62	1415
10	50	1050	3,88	2,6	1,22	1281
11	50	1050	1,54	0,51	1,03	1081
12	50	1650	1,66	0,33	1,33	2194
13	100	1050	1,035	0,41	0,625	656

не вошли данные о начальных участках сигналов в силу неустойчивого их характера.

В соответствии с общей теорией сложных сигналов применение частотной модуляции позволяет получить широкий спектр излучаемого сигнала и, следовательно, малую длительность отраженного импульса после сжатия в системе оптимальной обработки информации. В результате при большой дальности локации достигается высокая точность и разрешающая способность. Поскольку ширина спектра сигнала с частотной модуляцией тем больше, чем больше его сложность D и длительность T_c, увеличение сложности сигналов нарвалов во времени приводит при постоянной дальности лоцирования объектов к увеличению разрешающей способности по дальности. Пилообразное же изменением амплитуды излучаемых «подсигналов» компенсирует потери энергии при отражении от более удаленных объектов. Характер одновременного изменения амплитуды и частоты сигналов нарвалов показан на фиг. 4 для участка сигнала 3 длительностью 25 *сек*.



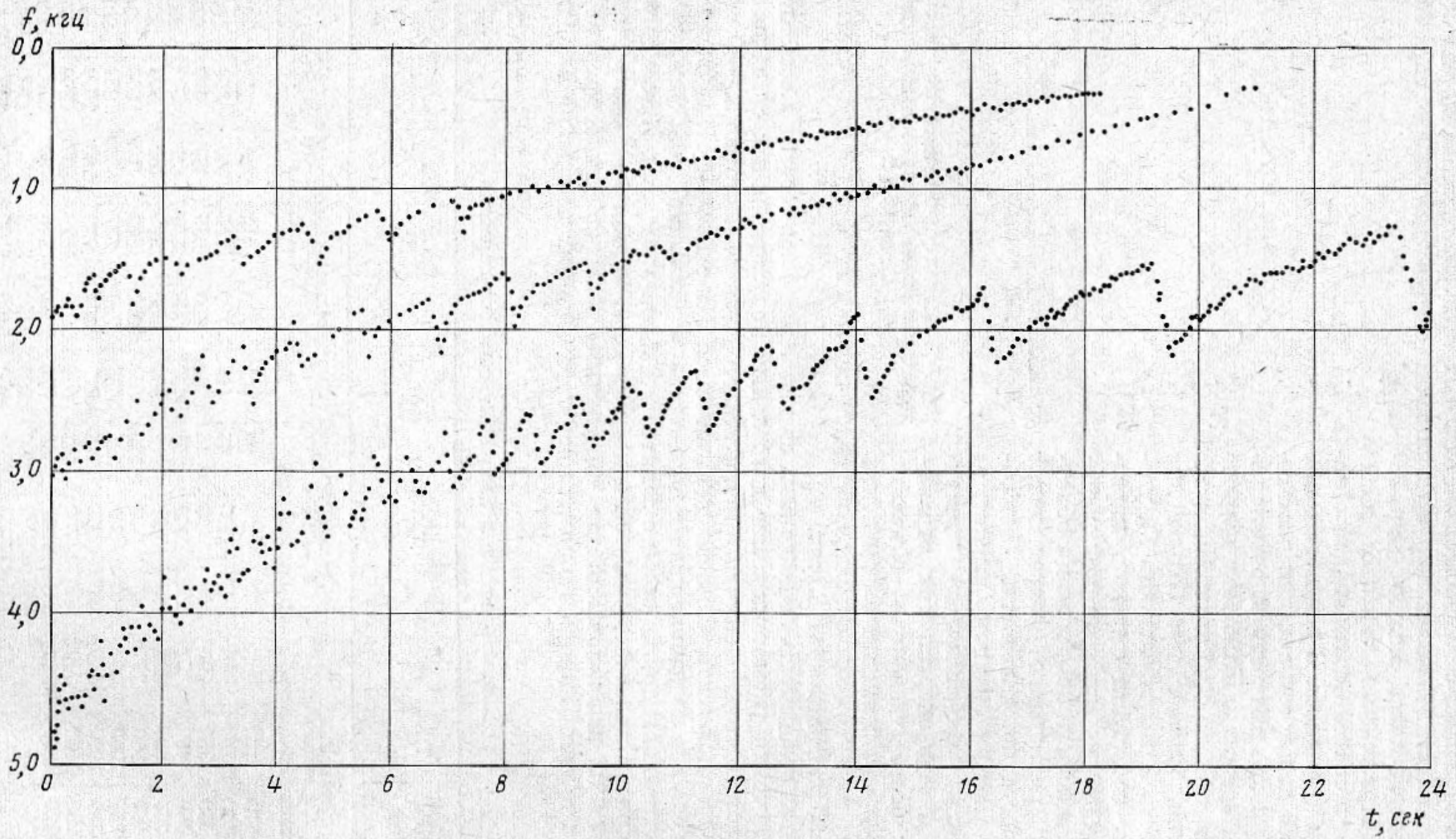
Фиг. 2. Амплитудно-временные характеристики коммуникационных сигналов 13 и 3

Другая особенность локационных сигналов нарвалов состоит в совместном излучении указанных выше длительных модулированных сигналов и низкочастотного узкополосного непрерывного сигнала частотой 25—30 *гц*. Можно предположить, что последний является или сигналом обнаружения (без уточнения координат цели и параметров ее движения), или сигналом, информирующим другие особи о занятости данной акватории. Кроме того, рассматривая низкочастотные сигналы нарвалов, нельзя исключать возможности их использования для «оглушения» низкочастотной приемной системы других хищников в целях предотвращения их нападения или для

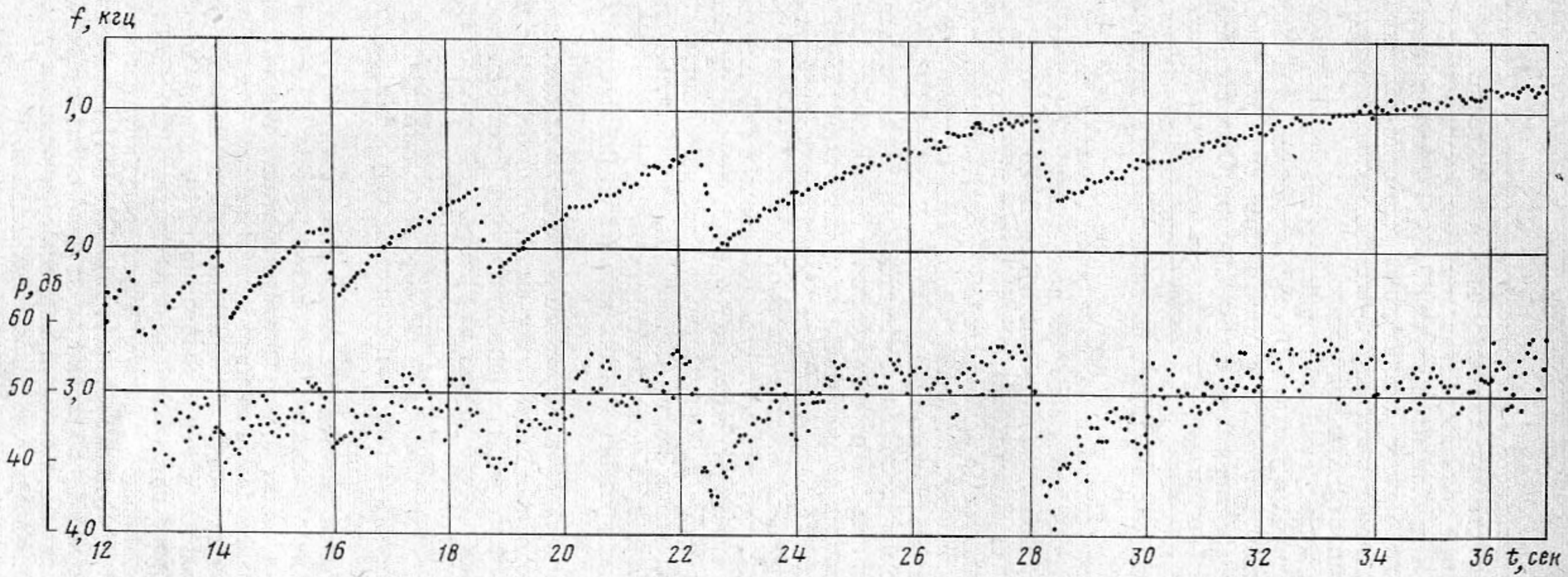
Таблица 2

Характеристика локационных сигналов нарвалов

№ подсигнала	ΔF_{ci}, *гц*	T_{ci}, *мсек*	D_i	ΔF_{ci}, *гц*	T_{ci}, *мсек*	D_i	ΔF_{ci}, *гц*	T_{ci}, *мсек*	D_i	ΔF_{ci}, *гц*	T_{ci}, *мсек*	D_i
n	сигнал № 1 T_c=18,3 *сек*			сигнал № 2 T_c=21 *сек*			сигнал № 3 T_c=49,4 *сек*			сигнал № 4 T_c=61,6 *сек*		
1	70	100	7	160	200	32	450	700	315	340	250	85
2	120	150	18	230	200	46	460	750	345	440	350	154
3	300	300	90	140	100	14	500	650	325	480	600	288
4	360	450	162	170	300	51	400	900	360	430	600	258
5	340	600	204	430	400	172	590	950	560	460	600	276
6	280	900	252	320	500	160	600	1000	600	440	600	264
7	250	1000	250	610	500	305	450	750	337	460	850	391
8	380	1000	380	390	500	345	610	1300	793	580	1000	580
9	290	1100	319	590	700	413	620	1650	1023	660	1200	792
10	1020	11000	11220	380	1000	380	770	2350	1810	760	1900	1444
11				410	1000	410	900	2450	3105	690	2700	1863
12				570	1050	599	950	5400	5130	950	3950	3753
13				460	1200	552	1280	21000	26880	1010	5800	5858
14				1600	11450	18320				940	8600	8084
15										500	22100	11050



Фиг. 3. Локационные сигналы нарвалов



Фиг. 4. Частотно-временная и амплитудно-временная характеристики локационного сигнала 3

«оглушения» косяков рыб и кальмаров, способствующего более легкому получению добычи.

На экране 1/3-октавного анализатора мгновенного спектра высокочастотные и низкочастотные сигналы появлялись всегда одновременно, причем $T_{нч}=T_{чм}$ и при наличии вблизи от звукоприемника одной излучающей особи $U_{чм}>U_{нч}$ приблизительно на 17 *дб*. Учитывая отмеченный характер соотношения между амплитудами частотно-модулированного и низкочастотного сигналов в полосе 1/3-октавы, можно говорить о том, что последний имеет амплитудную модуляцию.

При наличии в исследуемой акватории нескольких одновременно излучающих особей разница в уровнях $U_{мч}$ и $U_{чм}$ уменьшается. При этом увеличение уровня низкочастотных составляющих спектра приблизительно соответствует их энергетическому суммированию. Отметим, что указанная особенность синхронного излучения сигналов наблюдалась только при интенсивных криках нарвалов, когда уровни сигнала на низких частотах превышали уровни фонового шума, обусловливаемого другими источниками.

Говоря об акустических сигналах нарвалов, нельзя не отметить один любопытный факт, имевший место при проведении обсуждаемых экспериментов. В процессе исследований было обнаружено как бы явление «управления» акустической активностью нарвалов в исследуемом районе низкочастотными сигналами (с периодами 4,5—5 *сек*) большой интенсивности (~1 бара). При появлении сигналов такого рода излучение акустических сигналов нарвалами полностью прекращалось. В работе [9] по этому поводу было высказано предположение, что подобные низкочастотные сигналы могли быть обусловены микросейсмическими колебаниями дна в штормовых зонах, находящихся на значительных удалениях от района измерений. Данное предположение базируется на результатах экспериментальных исследований микросейсм на дне северной части Атлантического океана [10], указывающих, что для микросейсмических колебаний такого типа характерна дискретность периодов цугов волн, причем преобладающими являются периоды 4—5 *сек*. Учитывая, что измерения выполнялись в мелководном районе севернее Земли Александры, где имелось большое число айсбергов, находящихся на мели, можно полагать, что последние являлись переизлучателями микросейсмических колебаний, распространяющихся в земной коре.

Эффект воздействия низкочастотных акустических колебаний на морских животных, подобный описанному выше, отмечается и в работе [5]. В ней автор указывает, что дельфины, например, способны воспринимать «голос шторма»: они обычно уходят из прибрежной зоны перед надвигающейся бурей.

В заключение представляется целесообразным дать краткое рассмотрение акустико-физиологических особенностей излучения звука зубатыми китами, в том числе нарвалами.

В настоящее время имеется несколько гипотез относительно процесса генерации звука китообразными. Так, автор работы [3] считает, что излучение звука происходит в результате вибрации тонкой перегородки, разделяющей правый и левый нижние мешки дыхала. Эта вибрация вызывается, по его мнению, воздухом, поступающим из легких в тот момент, когда он выталкивается наружу координируемым движением мускулатуры ноздри через более или менее закрытое дыхало. Степень натянутости перегородки, определяющей характер звука, регулируется при этом мускулатурой нижних воздушных мешков. В работе [11] высказывается мнение, что, вероятнее всего, вибрируют не нижние части перегородки между дыхательными мешками, а складки наружного клапана в результате частичного выпускания воздуха из дорсальных мешков.

Существенно отлично мнение, высказываемое в работе [12]; считается, что излучение звука происходит вследствие разности давлений воздуха в

носовых мешках и в узком носовом проходе, окруженном костями черепа, где давление мало изменяется при погружении кита. При ослаблении мышц мешка воздух, проходя через носовой проход, порождает звук. Отмечается, что «странные мешочки в носу заменили киту голосовые связки». При этом «большая часть звуков у зубатых китов рождается таким образом, лишь очень немногие — при открывании наружного клапана и удлиненными хрящами надгортанника».

По мнению Кеннета Норриса [5], излучение акустических колебаний зубатыми китами происходит вследствие перекачки воздуха из верхних мешков в средние и отсюда через соединительные проходы в нижние мешки. Дыхательный акт при этом не обязателен, так как верхние мешки могут перезаполняться воздухом из легких под давлением диафрагмы и мышц грудной клетки.

Как видно из сделанного обзора, процесс генерации звука китообразными носит весьма сложный характер, но, по мнению большинства авторов, основной механизм звукообразования связан с прокачкой воздуха через систему воздушных мешков. Резюмируя, можно представить следующий комплексный механизм звукообразования у нарвалов. При перекачке воздуха из верхних дыхательных мешков в нижние при сокращении носоглоточных мышц происходит генерация коротких модулированных импульсных сигналов коммуникационного типа. При координированной же прокачке воздуха из легких через систему дыхательных мешков и частичном выпуске воздуха из дорсальных мешков через складки наружного клапана происходит генерация длительных локационных сигналов. Излучение низкочастотных сигналов при этом имеет место вследствие изменения объема легких как пульсирующего сферического излучателя. Последнее может быть проиллюстрировано следующим качественным расчетом.

Если имеется некоторое изменение в объеме легких нарвала, возникающее, например, при сокращении мышц грудной клетки и диафрагмы, то взаимодействие между силами упругости воздуха и стенок легкого, с одной стороны, и силами инерции воды и мышечных тканей, с другой стороны, будет создавать резонанс. Резонансную частоту при этом можно рассчитать, рассмотрев уравнение движения пузыря с воздухом в воде с учетом его демпфирования. В работе [13] это уравнение представлено в виде

$$F=4\pi a^3\rho\frac{d^2a}{dt^2}+R\frac{da}{dt}-4\pi a^2\frac{\partial p'}{\partial a}\Delta a,$$

где F — вынуждающая сила, a — радиус сферы, ρ — плотность воды, p' — уравновешенное давление, Δa — изменение радиуса сферы, R — член, соответствующий активному сопротивлению, включающий активное сопротивление излучения сферы и эффект теплового и вязкого демпфирования.

Анализ, выполненный в работе [14], показывает, что резонансная частота пульсирующей сферы в этом случае может быть определена следующим образом:

$$f=1/2\pi\sqrt{3bp'/\rho a^2},$$

где b — коэффициент, приблизительно равный 1.

В соответствии с данными Института морфологии животных объем легких белухи (а с некоторыми допущениями и нарвала) составляет $V=5\div6\cdot10^3$ *см*^{3}, что соответствует эквивалентному радиусу сферы $a=10{,}6\div10{,}9$ *см*. Тогда при условии приповерхностного излучения, т. е. когда $p'=1$ *атм*, имеем

$$f=1/2\cdot3{,}14\sqrt{3\cdot1\cdot10^5/10^3\cdot0{,}106^2}=26\ \text{гц}.$$

Хотя эта оценка является только качественной, полученная резонансная частота достаточно близка к фактической частоте низкочастотного сиг-

нала, излучаемого нарвалами, что в значительной степени подтверждает возможность излучения вследствие изменения объема легких.

На наш взгляд, изучение сложных акустических сигналов, излучаемых нарвалами, и установление способов их генерации является интересным при поисках путей к пониманию принципов кодирования таких сигналов. Естественно, что подобные исследования целесообразно проводить при всестороннем контроле конкретных ситуаций, в которых происходит общение нарвалов и локация ими подводных объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Шевил У.* Подводные звуки китообразных. В сб.: Морская биоакустика. Л., «Судостроение», 1969, 330.
2. *Kellogy W. N., Kohber R., Morris H. N.* Porpoise Sounds as sonar signal. Science, 1953, *141*, 5, 239–243.
3. *Томилин А. Г.* О поведении и звуковой сигнализации китообразных. Тр. Ин-та океанологии АН СССР, 1955, *18*, 24–27.
4. *Fish M. P., Mowbray W. H.* Production of Underwater sound by the white whale or Beluga, Delphinapterus leucas (Pallas), J. Marine Res., 1962, *20*, 2, 149–162.
5. *Томилин А. Г.* В мире китов и дельфинов. М., «Знание», 1974.
6. *Яблоков А. В.* Киты и дельфины. М., «Наука», 1972.
7. *Скорсби В.* Поденные записки о плавании на северный китобойный промысел. СПб., 1825.
8. *Горбунов Г. П.* Наблюдения над нарвалами. Природа, 1940, *29*, 6, 56–57.
9. *Богородский В. В., Лебедев Г. А.* Некоторые особенности акустических сигналов, излучаемых нарвалами. Акуст. ж., 1977, *23*, 4, 635–636.
10. *Монахов Ф. И.* Микросейсмы на дне Балтийского моря и северной части Атлантического океана. Изв. АН СССР. Сер. геофизич., 1962, № 7, 895–907.
11. *Клейненберг С. Е., Яблоков А. В.* О морфологии верхних дыхательных путей китообразных. Зоол. ж., 1958, *37*, вып. 7, 1091–1099.
12. *Белькович В. М., Клейненберг С. Е., Яблоков А. В.* Загадка океана. М., «Молодая гвардия», 1965.
13. *Minnaert F. M.* On musical air bubbles and the Sounds of runnig water. Phil. Mag., 1933, *16*, 3, 235–248.
14. *Харрис Г.* Физическая природа излучения звука рыбами. В сб.: Морская биоакустика. Л., «Судостроение», 1969, 262.

Арктический и антарктический
научно-исследовательский институт

Поступила
9 января 1978 г.