

**III. Опыт разработки и серийного изготовления**

УДК: 534.6

**ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ГИДРОФОНЫ ЗАРУБЕЖНЫХ ФИРМ****А.М. Еняков***ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.  
enyakov@vniiftri.ru*

*Приведен анализ конструкций и характеристик около 150 типов измерительных гидрофонов, выпускаемых 15 известными зарубежными фирмами. Рассмотрены тенденции развития рынка гидроакустической продукции этого назначения.*

*The analysis of designs and characteristics of about 150 types of measuring hydrophones produced by 15 well-known foreign firms is given. The tendencies of development of hydroacoustic product market of this purpose are considered.*

*Ключевые слова: измерительные гидрофоны, акустические характеристики*

**Введение**

В [1] приведен анализ 50-летнего опыта создания (разработок и серийного изготовления) во ВНИИФТРИ измерительных гидрофонов различного назначения, рассмотрены конструктивные особенности, технологические решения и метрологические характеристики созданных гидрофонов. Так сложилось, что серийный (или мелкосерийный) выпуск измерительных гидрофонов у нас в стране практически ограничен только ФГУП «ВНИИФТРИ» и ОАО «Концерн «Океанприбор» [2]. Некоторые предприятия разрабатывают и выпускают гидрофоны только для собственных нужд. Так, Институт, прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, разработал и выпустил партию цифровых гидрофонов ЦГП-3 на диапазон частот от 5 Гц до 10 кГц, особенностью которых является то, что в их конструкцию входят не только пьезокерамический чувствительный элемент с предварительным усилителем, но и аналого-цифровой преобразователь с микропроцессорным модулем, загружаемым программной памятью. Это позволяет получать на выходе гидрофона цифровой сигнал после предварительной обработки по загружаемому алгоритму. ЗАО "Электронные технологии и метрологические системы" (ЭТМС), г. Москва, разработало, выпускает и активно рекламирует несколько модификаций измерительных гидрофонов (BC 311, BC 313, BC 314-M) широкого применения [3]. Однако акустические характеристики этих гидрофонов оставляют желать лучшего, гидрофоны имеют относительно большую погрешность ( $\pm 3$  дБ).

За рубежом дело обстоит несколько иначе. Например, только в США гидрофоны выпускают множество фирм: Underwater Sound Reference Division – USRD, International Transducer Corp., Engineering Acoustics, Inc., Benthos, Inc., Massa Products Corporation, High Tech, Inc., Wilcoxon Research, Inc., Sensor Technology Limited, Cetacean Research Technology, Gearing-Watson Electronics Ltd. и др. Многие из фирм, как в США, так и в других странах, производят свою продукцию в ограниченном количестве (как по номенкла-

туре, так и по общему объему выпуска), для специальных целей (например, для изучения поведения морской фауны) или только для собственных нужд. Есть, однако, фирмы, давно присутствующие на рынке гидроакустической продукции и выпускающие достаточно качественные гидрофоны и излучатели широкой номенклатуры. На изделиях этих фирм имеет смысл остановиться более подробно.

### **Гидрофоны USRD**

Ведущей в США организацией по калибровке и испытаниям гидроакустических средств измерений является отделение USRD (The Underwater Sound Reference Division), имеющейся частью департамента приемных и гидролокационных систем (the Sensors and Sonar Systems Department) Военно-морского центра подводного оружия (the Naval Undersea Warfare Center) и осуществляющее метрологическую деятельность как национальный метрологический институт в области гидроакустических измерений. Помимо обширной метрологической базы (гидроакустические бассейны, испытательные лаборатории в открытых водоемах, камеры высокого давления и пр.) USRD в течение более 50 лет разрабатывает и выпускает гидрофоны и обратимые преобразователи для метрологических работ. В табл. 1 перечислены только некоторые из них.

Таблица 1

Мо- дель	Назначе- ние	Параметры преобразователей USRD [4]		Модель	Назначе- ние	Параметры преобразователей USRD [4]	
		Диапа- зон ча- стот, кГц	Макс. глубина, м			Диапа- зон ча- стот, кГц	Макс. глуби- на, м
A48	гидрофон	0,1 – 200	0	H56	гидрофон	0,01 - 65	690
E27	обратимый	80 - 700	17	F42A	гидрофон	1 - 40	690
E37	обратимый	80 - 2000	2109	F42B	излучатель	1 - 50	1030
F36	гидрофон	0,1 - 20	0	F42C	излучатель	1 - 90	3500
F37	излучатель	1 - 20	0	F42D	гидрофон	1 - 150	3500
F37	излучатель	0,01 - 37	75		излучатель		
F40	гидрофон	1 - 37	75		гидрофон	1 - 150	3500
F40	излучатель	1 - 20	90	F50	гидрофон	0,001 - 70	690
H52	гидрофон	0,02 - 150	60		излучатель	10 - 70	

Отличительными особенностями гидрофонов USRD являются:

- использование маслозаполненных резиновых оболочек с установленными внутри пьезоэлементами;

- при использовании цилиндрических пьезоэлементов в USRD не стараются выровнять диаграммы направленности (ДН) в вертикальной плоскости, а зачастую наоборот: делают эти ДН возможно более неравномерными, увеличивая тем самым коэффициент концентрации и снижая воздействие внешней помехи;

- сферические гидрофоны всегда заливают резиноподобным компаундом для лучшего согласования акустических импедансов пьезоэлемента и воды.

### **Гидрофоны фирмы RESON**

Фирма Teledyne RESON A/S занимается разработкой гидрофонов более 35 лет и создала большую линейку эталонных и высокоточных гидрофонов и излучателей на частотный диапазон от 0,1 Гц до 1 МГц. На рис. 1 представлены фото некоторых гидрофонов RESON, выпускаемых в настоящее время, а в таблице 2 – их основные параметры [5].

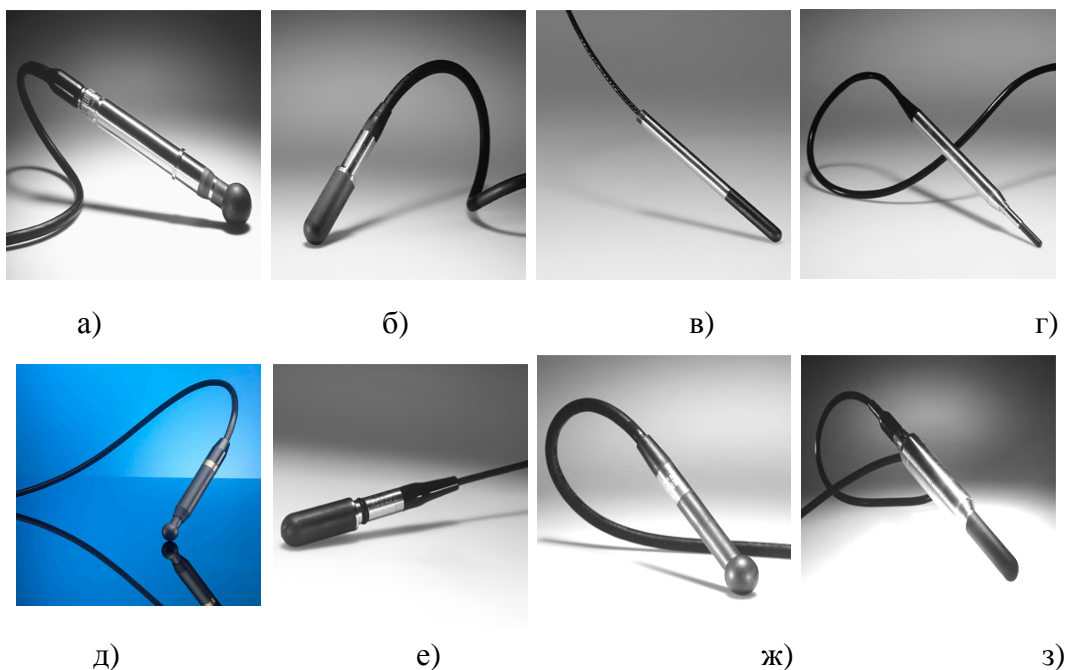


Рис. 1. Гидрофоны фирмы Teledyne RESON:  
а – TC4042; б – TC4040; в – TC4038; г – TC4034; д – TC4056; е – TC4013;  
ж – TC4033; з – TC4032

Таблица 2

Основные параметры гидрофонов RESON				
Модель	Диапазон частот, кГц	Чувствительность, дБ отн. 1 В/мкПа	Наличие ПУС	Макс. глубина, м
ТС4042	0,005 - 85	- 167	да	1000
ТС4040	0,001 - 120	- 206	нет	400
ТС4038	0,05 - 800	- 228	нет	20
ТС4037	0,001 - 100	- 193	нет	2000
ТС4035	0,01 - 800	- 214	да	300
ТС4034	0,001 - 470	- 218	нет	900
ТС4033	0,001 - 160	- 203	нет	900
ТС4032	0,005 - 120	- 164	да	600
ТС4014	0,015 - 480	- 180	да	900
ТС4013	0,001 - 180	-211	нет	700
ТС4047	1 - 170	-191	да	700
ТС4056	0,005 - 140	-178 и -188	да	900

### *Гидрофоны фирмы Брюль и Кьер*



Рис. 2. Гидрофоны фирмы Брюль и Кьер

Гидрофоны фирмы Брюль и Кьер [6] представляют собой индивидуально калиброванные измерительные преобразователи звуков, распространяющихся в воде, имеющие плоскую частотную характеристику на прием и ее круговую направленность в широком частотном диапазоне. Гидрофоны водонепроницаемы и имеют высокую коррозионную стойкость. Все гидрофоны Брюль и Кьер герметизированы с использованием бессвинцовой нитрил-бутадиеновой резины (см. рис. 2).

В настоящее время фирма выпускает четыре типа гидрофонов (см. слева направо на рис. 2), характеризующиеся следующими особенностями:

- **Модель 8103** – гидрофон для высокочастотного лабораторного и промышленного использования, особенно для акустических исследований морских животных или для кавитационных измерений;
- **Модель 8104** является гидрофоном общего назначения, а также для целей калибровки. Он является аналогом выпускавшегося ранее гидрофона модели 8100;
- **Модель 8105** является надежным сферическим гидрофоном, применимым до глубины 1000 м в океане с отличными характеристиками направленности;
- **Модель 8106**, аналог выпускавшейся ранее модели 8100, имеет встроенный усилитель, дающий сигнал, удобный для передачи по длинным кабелям. Он применим до глубины 1000 м в океане.

### *Гидрофоны фирмы ИТС*

Фирма ИТС (International Transducer Corporation) выпускает широкий спектр гидрофонов, как с встроенными предварительными усилителями (рис. 3), так и без них [7]. В этом случае гидрофоны являются обратимыми преобразователями и их можно использовать в качестве излучателей. Обратимые преобразователи фирмы ИТС, в основном, являются сферическими (рис. 4).

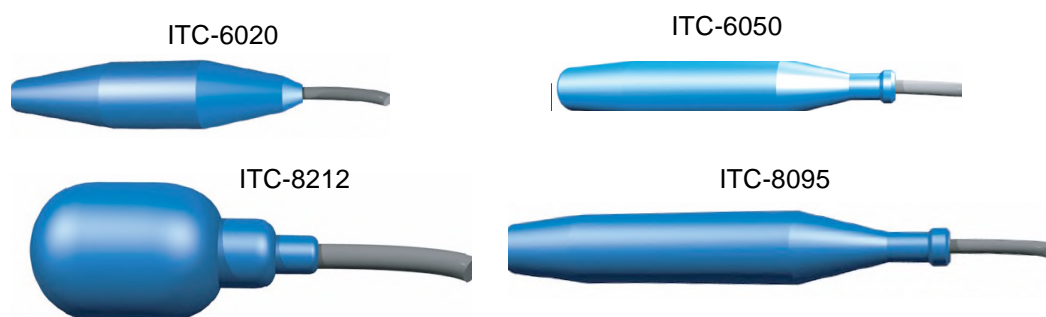


Рис. 3. Гидрофоны ИТС с встроенным предварительным усилителем

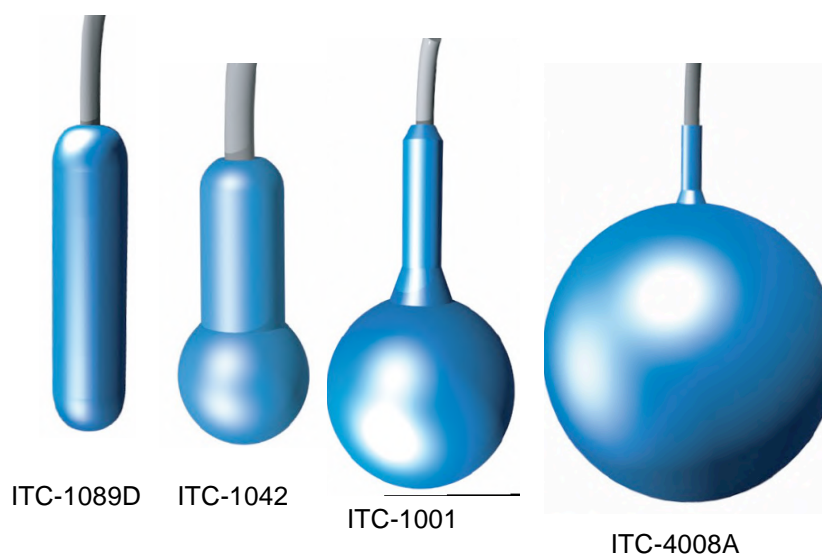


Рис. 4. Ненаправленные сферические обратимые гидрофоны ИТС

Все модели гидрофонов фирмы ИТС полностью покрыты полиуретановым компаундом так, что никаких контактирующих с водой металлических частей нет. Имея собственное пьезокерамическое производство, фирма умело варьирует типо-размерами пьезоэлементов (сферы, полусферы, мозаичные структуры, цилиндры, диски и пр.) и марками пьезокерамики, создавая преобразователи широкой номенклатуры с резонансной частотой от 400 Гц до 300 кГц. Гидрофоны и излучатели со сферическими элементами мало изменяют свои характеристики под воздействием высокого гидростатического давления (т.к. планарные сжимающие силы в стенках сферы перпендикулярны направлению поляризации и не вызывают поэтому «рассыпания» доменной структуры, т.е. располяризации пьезоматериала). Поэтому максимальная рабочая глубина погружения сферических гидрофонов ИТС лежит, как правило, в диапазоне от 900 до 2000 м. При этом фирма не декларирует их как глубоководные. Для таких давлений фирмой, по-видимому, решена проблема надежности кабельного ввода в сферическую оболочку, что обеспечивается удлиненным хвостовиком, имеющемся даже в простых конструкциях без встроенного предварительного усилителя.

Основные параметры, характеризующие назначение того или преобразователя ИТС, сведены в табл. 3.

Таблица 3

## Параметры, характеризующие назначение преобразователей ИТС

Мо- дель ИТС	Внешний диаметр, мм	Резонан- сная ча- стота, кГц	Диапазон частот, кГц	Средняя чув- ствительность, дБ отн. 1 В/мкПа	Глуби- на, м	Мощ- ность излуче- ния, Вт	Нали- чие ПУС
1094A	17	169	0,01 - 100	- 210	2000	17	нет
4008A	300	5,5	0,3 - 6	- 177	180	2000	нет
1032	69	33	0,1 - 50	- 195	1250	400	нет
1001	108	16,5	0,01 - 25	-192	1250	1000	нет
1042	35	79	0,01 - 100	- 202	1250	50	нет
1007	165	11,5	0,01 - 20	- 185	1250	5000	нет
1089D	13	280	0,01 - 300	- 215	2000	10	нет
6020	50		0,03 - 100	- 169	900	-	да
6050C	51	50	0,3 - 70	- 157	900	-	да
8201		50	0,01 - 65	-158	900	-	да
8095		300	0,02 - 300	-193	1500	-	да
6030			0,01 - 100	- 192	900	-	да
6080C			0,015 - 55	- 154	900	-	да
8212			0,001 - 30	- 175	900	-	да

**Гидрофоны фирмы Benthowave Instrument Inc.**

Канадская фирма Benthowave Instrument Inc. [8] известна на международном рынке гидроакустической продукции как разработчик и изготовитель широкого спектра гидроакустических преобразователей для работы в диапазоне частот от 0,1 Гц до 10 МГц. В каталогах фирмы представлены около 50 моделей гидрофонов различного назначения – от обратимых сферических с круговыми диаграммами направленности до высокочувствительных гидрофонов с маломощными усилителями. Основные характеристики сферических гидрофонов этой фирмы (без предварительного усилителя) приведены в табл. 4, а гидрофонов с предварительным усилителем – в табл. 5. Частотная характеристика чувствительности одного из гидрофонов (ВП-7003) приведена на рис. 5.

Таблица 4

Параметры обратимых сферических гидрофонов фирмы Benthowave Instrument Inc.

Модель	Чувствительность, дБ отн.1 В/мкПа	Диапазон частот, кГц	Емкость, нФ	Макс. глубина, м	Диаметр, мм
ВII-7001	- 199,2	0,0001 - 180	10,5	500	24,5
ВII-7002	- 204,0	0,0001 – 200	4,6	2500	24,5
ВII-7003	- 213,0	0,0001 – 460	2,0	950	8
ВII-7004	- 208,5	0,0001 – 350	2,6	500	13,8
ВII-7005	- 210,5	0,0001 - 400	2,4	2000	13,8

Таблица 5

Параметры некоторых гидрофонов с предварительным усилителем фирмы Benthowave Instrument Inc.

Модель	Чувствительность, дБ отн.1 В/мкПа	Коэффициент усиления ПУС, К, дБ -опции	Диапазон частот, кГц	ЭШД*, дБ отн.1 мкПа·Гц-1/2	Диаметр × длина, мм	Макс. Глубина, м
ВII-7006	-199,2+К	0/26/40/60	0,001-180	42,8	∅24,5×72	500
ВII-7007	-203,5+К	0/26/40/60	0,001-200	41,5	∅24,5×72	950
ВII-7008	-213,0+К	0/26/40	0,001-460	51,5	∅9×20; ∅24×45	500
ВII-7009	-208,5+К	0/26/40	0,001-350	46,0	∅13,8×20; ∅24×45	500

\* - ЭШД – эквивалентное шумовое давление на входе гидрофона



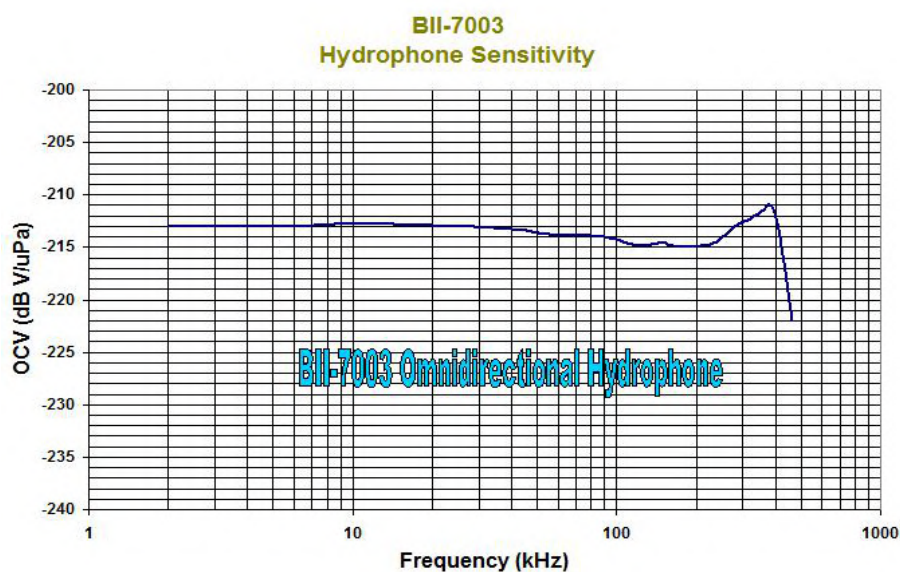


Рис. 5. Частотная характеристика чувствительности гидрофона ВП-7003

### ***Гидрофоны фирмы GeoSpectrum Technologies Inc.***

Созданная около 20 лет назад канадская фирма GeoSpectrum Technologies Inc. [9] стремительно осваивает рынок гидроакустической продукции – от гидрофонов и излучателей (см. рис. 6) до гидролокационных комплексов и различных систем калибровки гидроакустических преобразователей в лабораторных и полевых условиях. Фирма рекламирует свои производственные возможности – до 1000 гидрофонов в день (!), не информируя, однако, кто поставляет им пьезоэлементы. Параметры наиболее популярных гидрофонов этой фирмы представлены в табл. 6.





Серия M15, M36,

Рис. 6. Гидроакустические преобразователи фирмы GeoSpectrum Technologies

Таблица 6

### Параметры гидрофонов фирмы GeoSpectrum Technologies

Модель	Чувствительность, дБ отн. 1 В/мкПа	Резонансная частота, кГц	хЕм-кость, нФ	Глубина погружения, м	Диаметр, мм	Усиление ПУС, дБ
Сферические обратимые преобразователи						
M18C-1.0	- 200	90	9	3500	5	нет
M18C-1.5	- 197	55	8	2500	44	нет
M18C-2.5	- 192	35	32	2500	67	нет
M18C-4.0	- 187	20	55	2500	108	нет
Гидрофоны с предварительным усилителем						
M15-360	- 190*	30	-	1000	Ø25×200	0 - 35
M15-900	- 190*	30	-	900	Ø25×200	0 - 35
M36-100	- 200*	150	-	2500	Ø25×200	0 - 35
M36-600	- 201*	200	-	6000	Ø25×200	0 - 35
M38-200	- 207*	300	-	1000	Ø25×200	0 - 35
Гидрофон без предварительного усилителя						
M38-100	- 207	300	0,4	1000	Ø25×200	нет

\* Чувствительность приведена при коэффициенте усиления 0 дБ

### **Гидрофоны фирмы Sensor Technology Ltd**

Образованная в 1983 г. канадская фирма Sensor Technology Ltd. [10] разработала **более сотни моделей** гидроакустических преобразователей и за время своего существования изготовила **более миллиона** гидрофонов как гражданского (рыболовство, картографирование морского дна, исследование морской среды и фауны, сейсмические исследования, гидрография и батиметрия), так и оборонного (поиск морских мин) назначения. Имея собственное хорошо развитое пьезокерамическое производство, фирма выпускает гидрофоны различных типов, пьезоэлементы в которых могут быть в форме сферических и полусферических оболочек, радиально- и тангенциально-поляризованных цилиндров, дисков, призм и пр. Предельные размеры этих пьезоэлементов показаны в табл. 7.

Таблица 7

Размеры пьезоэлементов (в мм), выпускаемых фирмой  
Sensor Technology Ltd.

Форма	Размер	Максимальный	Минимальный
Цилиндр	Внешний диаметр	110	2
	Высота	> 50	0,15
	Длина	178	0,15
Пластина	Ширина	97	0,15
	Высота	32	0,15
Диск	Внешний диаметр	152	2
	Толщина	32	0,15
Полусфера	Внешний диаметр	102	4,3

Фирма экспериментирует и с составами пьезокерамики. Кроме обычных сортов (сегнетожесткая и сегнетомягкая) керамики (всего их 6), фирма разработала модифицированный состав титаната свинца VM300 с большим коэффициентом чувствительности по напряжению при всестороннем сжатию  $gh$ . Как известно, при всестороннем (гидростатическом) сжатию кубического образца пьезокерамики давлением  $p$  возникающее на его электродах электрическое напряжение  $U$  равно

$$U = (g_{33} + g_{31} + g_{32}) \cdot p = gh \cdot p.$$

Для обычной сегнетомягкой керамики (например, ЦТС-19)  $g_{33} \approx -2,05g_{31} \approx -2,05g_{32}$ , так что  $gh \approx 0$ , и такой образец будет нечувствителен к гидроакустическому давлению. Для керамики VM300  $g_{33} \approx -17g_{31} \approx -17g_{32}$ , что приводит к существенному росту  $gh$ , а значит, дает возможность проектировать глубоководные преобразователи, чувствительные к всестороннему сжатию на пьезоэлементах простых форм. К сведению, подобных материалов отечественные пьезокерамические фирмы не выпускают. Например, в каталоге продукции ОАО «НИИ ЭЛПА» есть только один состав анизотропной пьезокерамики - ТКС-21 с  $g_{33} \approx -(5 - 6)g_{31}$ .

В линейке выпускаемых фирмой гидрофонов, выпускаемых фирмой Sensor Technology Ltd., есть обратимые преобразователи сферического типа, гидрофоны с предварительным усилителем и гидрофоны специального назначения. Фото некоторых типов гидрофонов представлены на рис. 7.

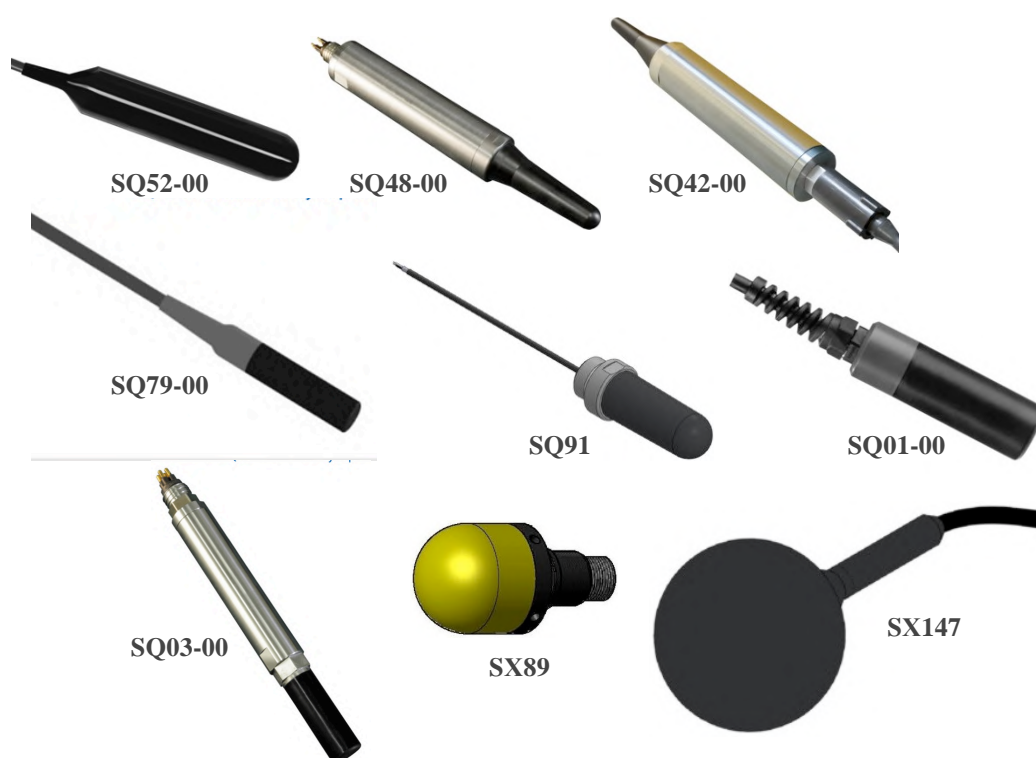


Рис. 7. Некоторые модели гидрофонов, выпускаемых фирмой Sensor Technology Ltd

Среди предварительных усилителей, специально разработанных для интегрирования в корпус гидрофонов, можно выделить универсальный ПУС модели SA03-05-002 с усилением 40 дБ, работающий в частотном диапазоне от 15 Гц до 2 МГц. Его характеристики таковы:

- Напряжение питания  $\pm 12$  В;
- Максимальное входное напряжение 100 мВ (pick-to-pick);
- Максимальное выходное напряжение 10 В (pick-to-pick);
- Входной импеданс 10 МОм;
- Выходной импеданс 100 Ом;
- Нелинейные искажения 0,01 %;
- Собственные шумы на входе 25 нВ·Гц<sup>-1/2</sup>
- Ток 20 мА;
- Размеры платы: 39,8 (длина)×13,4 (ширина)×6,8 (толщина) мм.

Параметры некоторых гидрофонов, выпускаемых фирмой Sensor Technology Ltd., приведены в табл. 8.

Таблица 8

Параметры гидрофонов фирмы Sensor Technology Ltd							
Модель	Тип	Чувствительность, дБ отн. 1 В/мкПа	Диапазон частот, кГц	Емкость, нФ	Глубина, м	∅, мм	УС, дБ
SQ79-00	Широкополосный	-228	0,001-800	0,7	20	7	нет
SQ03-00		-164	10 - 65	23	650	20	40
SQ01-00		-194	0,001 - 5	36	1000	30,5	нет
SQ91	Сфера	-192,5	- 63	3,5	3000	30,5	нет
SQ48-00	Сфера	-210	0,001-100	2,8	3500	23	нет
SQ48-00	Сфера	-170	0,001-100	2,8	3500	23	40
SQ52-00	Сфера	-216	0,001-400	1,8	3500	13	нет
SQ42-00	Сфера	-215	0,001-400	1,8	3500	10	нет
SQ42-00	Сфера	-175	0,001-400	1,8	3500	10	40
SX147	Сфера	-190	,001 - 25		1250	108	нет
SX149	Сфера	-194	0,001 - 35	30	1250	69	нет

#### ***Гидрофоны фирмы High Tech, Inc.***

Американская фирма High Tech, Inc. [11] была создана в 1989 г. для снабжения высококачественными гидрофонами Военно-морского флота и организаций по морским сейсмическим исследованиям. С тех пор фирмой было произведено более 200 тысяч экземпляров гидроакустических преобразователей различного назначения, и рынок сбыта ее продукции существенно расширился.

Как правило, конструкция гидрофонов этой фирмы состоит из радиально-поляризованного пьезокерамического цилиндра, закрытого торцевыми крышками, внутри которого может быть размещен предварительный усилитель (ПУС). Ток питания ПУС не превышает 4 мА при питании постоянным напряжением 12 В. Пьезокерамический цилиндр полностью залит полиуретановым компаундом. Фирма выпускает и сферические гидрофоны. Некоторые модели гидрофонов этой фирмы представлены на рис. 8.



Рис. 8. Гидрофоны фирмы High Tech, Inc.

Параметры некоторых гидрофонов, выпускаемых фирмой High Tech, Inc., приведены в табл. 9.

Таблица 9

## Гидрофоны фирмы High Tech, Inc.

Модель	Чувствительность, дБ отн. 1 В/мкПа	Диапазон частот, кГц	Емкость, нФ	ЭШД, дБ отн. 1 мкПа-Гц- 1/2	Глубина, м	Размеры, мм
Широкополосные гидрофоны						
HTI-96-MIN	-240 (-165)*	0,002 - 30		10 Гц: 54 100 Гц: 42 1000 Гц: 42	3000	Ø19×64
HTI-90-U	-240 (-155)*	0,002 - 20		10 Гц: 54 100 Гц: 35 1000 Гц: 26	6100	Ø38×102
HTI-04- PCA/ULF	-194	0,01 - 8	45		000	Ø51×173
HTI-15-Min	-201	0,002 - 30	10		6000	Ø19×76
HTI-94-SSQ	-240 (-165)*	0,002 - 30		10 Гц: 54 100 Гц: 40 1000 Гц: 38	6100	Ø32×38
HTI-97-DA	-240 (-157)*	0,001 - 20			600	Ø25×73
HTI-92-WB	-155	0,002 - 50		100 Гц: 43 1000 Гц: 27 10 кГц: 15 20 кГц: 12 50 кГц: 10	1000	Ø38×100
Высокочастотные гидрофоны						
HTI-99-HF	-204 (-160)*	0,002 - 125			2000	Ø25×76
HTI-99-UHF	-210 (-166)*	0,002 - 250	3,6		2000	Ø25×76
(…)* - с ПУС						

### ***Гидрофоны фирмы Chelsea Technologies Group Ltd.***

Английская фирма Chelsea Technologies Group Ltd. [12] более 40 лет занимается разработкой гидроакустических преобразователей для военного и гражданского применения. Она широко использует сферические преобразователи из сегнетомягкой и сегнетожесткой пьезокерамики для создания как гидрофонов, так и излучателей с резонансными частотами от 12 до 150 кГц. Точность их калибровки позволяет рекомендовать эти преобразователи для использования в качестве эталонных в метрологических применениях. Фирма также разрабатывает и изготавливает изгибные дисковые преобразователи с резонансными частотами в диапазоне единиц килогерц.

Одной из особенностей преобразователей фирмы Chelsea Technologies Group Ltd является применение встроенной в конструкцию преобразователя корректирующей цепочки, выравнивающей частотную характеристику их чувствительности как в режиме излучения, так и в режиме приема. Это особенно важно для расширения частотного диапазона работы гидрофона или излучателя в области резонанса. Поэтому фирма, в качестве одной из важнейших характеристик излучателя, указывает его добротность (Q-factor), эффективно снижая этот параметр до 2,7 – 3.

Внешний вид некоторых разработанных фирмой преобразователей представлен на рис. 9.



Рис. 9. Гидрофоны фирмы Chelsea Technologies Group Ltd

**Гидрофоны фирмы Cetacean Research Technology (CRT)**

Основанная в 1994 году американская фирма Cetacean Research Technology (CRT) [13] специализируется на поставке гидрофонов и другого гидроакустического оборудования для научных исследований в области изучения подводных сигналов и шумов окружающей среды и морской фауны. Фирма декларирует, что ее оборудование применяют различные научные организации в 65 странах мира. Как правило, гидрофоны фирмы представляют из себя пьезокерамические преобразователи различной формы и размеров, залитые полиуретановым компаундом и работающие на глубинах до 250 – 460 м (см. рис. 10).

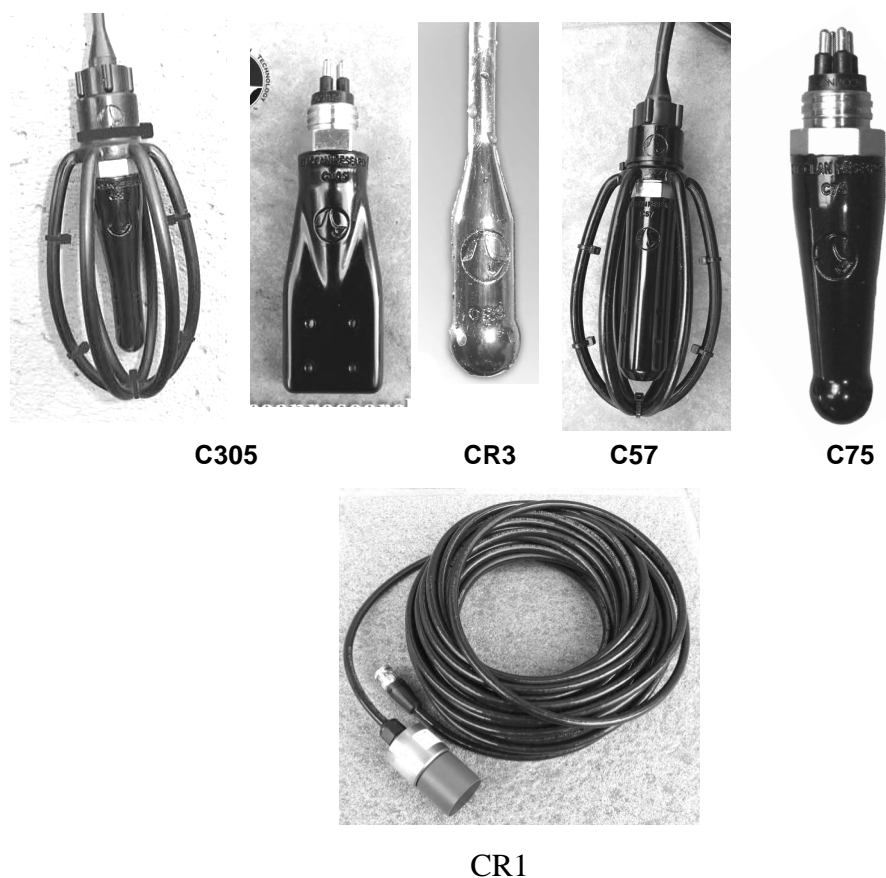


Рис. 10. Гидрофоны фирмы CRT

**Гидрофоны фирмы Aquarian Audio & Scientific**

Американская фирма Aquarian Audio & Scientific образована в 1998 г. [14] и производит относительно недорогие (200 – 400 долларов США) прочные и



чувствительные гидрофоны для научных исследований, экологического туризма (например, прослушивание звуков морской фауны) и промышленного применения (например, поиска мест утечек в подводных трубопроводах). Ее присутствие на рынке отличается крайне быстрым (в течение 2-х рабочих дней) выполнением заказа. Поставляемые гидрофоны, как с предварительным усилителем, так и без него (см. рис. 11) характеризуются вполне достаточной (для решаемых задач) чувствительностью, большим динамическим диапазоном и низкими собственными шумами.



Рис. 11. Гидрофоны фирмы Aquarian Audio & Scientific

Как правило, гидрофоны этой фирмы не являются измерительными (за исключением гидрофона AS-1), но их характеристики соответствуют их назначению. Материал корпуса – нержавеющая сталь, покрытие – полиуретановый компаунд. Сигнальный кабель – внешним диаметром 4,5 мм, в полиуретановой оболочке. Как видно на фото гидрофонов H3 и AS-1 на рис. 11, такая оболочка позволяет использовать простую конструкцию для надежной герметизации кабельного вывода – с использованием термоусадочной трубки с клеевым подслоем.

Некоторые параметры этих гидрофонов представлены в табл. 10.

Таблица 10

Параметры гидрофонов фирмы Aquarian Audio & Scientific						
Модель	Чувствительность, дБ отн. 1 В/мкПа	Диапазон частот, кГц	Усиление ПУС, дБ	Емкость, нФ	Глубина, м	Размеры, мм
H1a	-190	0,001 - 100	-	25	80	Ø25×46
H1c	-190	0,001 - 100	-	25	80	Ø25×58
H2a-XLR	-180	0,01 - 100	10		80	Ø25×46
H3	-192	0,01 - 100	-	15	100	Ø17×32
AS-1	-208	0,001 - 100	-	5,4	200	Ø12×40

Частотная характеристика чувствительности измерительного гидрофона AS-1 и его диаграмма направленности в вертикальной плоскости на частоте 100 кГц, измеренные в USRD, США (своих возможностей для калибровки фирма не имеет), показаны на рис. 12.

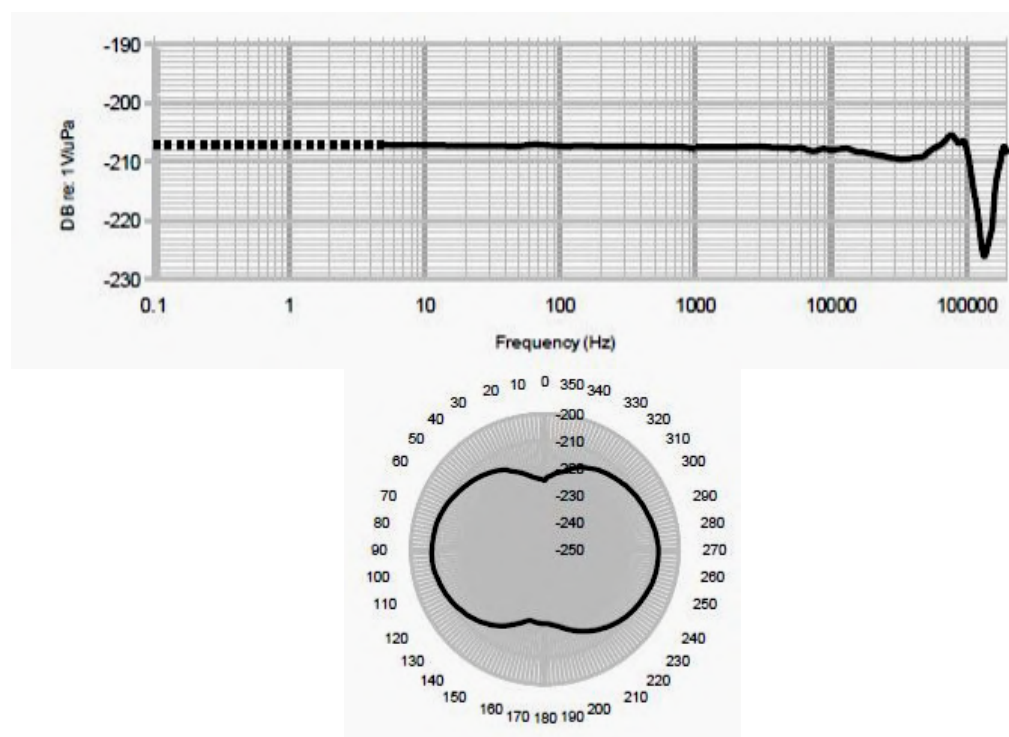


Рис. 12. Частотная характеристика чувствительности и диаграмма направленности (вертикальная, 100 кГц) гидрофона AS-1

### **Гидрофоны фирмы Ocean Sonics**

Канадская компания Ocean Sonics [15] была организована в 2012 г. и поставила своей целью разработку и производство цифровых гидрофонов с продвинутым программным обеспечением, назвав их «смарт-гидрофонами». Применение таких гидрофонов предполагается во всех приложениях, связанных с гидроакустическими измерениями: научных исследованиях звуков морской фауны и воздействий на нее подводного шума антропогенного происхождения, измерениях шума при производственной деятельности на шельфе (при забивке свай в морское дно, при работе морских ветровых электростанций, при прокладке трубопроводов по дну, разведке ископаемых и пр.), шумов судоходства и др. Преимущества применения смарт-технологий заключаются в возможности выбора режима работы гидрофона по заранее установленной программе (например, записи только определенных событий – подводных взрывов, ударов копра, близкого прохождения судна) и/или дистанционного управления режимами сбора, обработки и сохранения результатов измерений, что особенно важно при работе автономных приемных систем (т.н. рекордеров).

Потенциальных потребителей своей продукции фирма видит, прежде всего, в лице нефтяных и газовых компаний на восточном побережье Канады и США, а также компаний, занимающихся сооружением морских ветровых и приливных электростанций на шельфе Канады, США, Европы и Китая.

Фирма производит не только смарт-гидрофоны с необходимым программным обеспечением, но и разнообразные аксессуары к ним, необходимые для позиционирования гидрофонов в море, передачи сигналов по радиоканалу.

Гидрофоны (см. рис. 13) используются для работы на глубинах до 3500 м в частотном диапазоне от 1 (или 10) Гц до 200 кГц. Встроенные батареи обеспечивают непрерывную работу гидрофонов в течение 10 ч.



Рис. 13. Цифровые гидрофоны фирмы Ocean Sonics

Особенности этих гидрофонов заключаются также в следующем:

- разрядность – 24 бит;
- частотный диапазон 1(10) Гц – 200 кГц;
- частота выборки – 512 кГц;
- наличие синхронизации по GPS, PPS;
- питание 12 – 24 В;
- внутренняя память – 34 ГБ;
- динамический диапазон 120 дБ;
- запись волновой формы, БПФ;
- компактные размеры (Ø45×220 мм);
- обработка собранных данных в самом гидрофоне;
- обнаружение и запись только ожидаемых событий;
- большой динамический диапазон устраняет необходимость в переключении усиления;
- сбор и передача данных по кабелю, радиоканалу, GPS или через спутник.

Фирма имеет собственную базу для калибровок гидрофонов в заливе, малозумном горном озере и в бассейне. Низкочастотные калибровки осуществляются на воздухе.

#### ***Гидрофоны компании Neptune Sonar Ltd.***

Образованная в 1990 г. фирма Neptune Sonar Ltd. является ведущей компанией Великобритании, производящей гидрофоны как военного, так и гражданского применения. Фирма обладает большим исследовательским потенциалом в разработке высококачественных гидроакустических преобразователей, подкрепленным достаточно внушительной метрологической базой для всесторонних испытаний изделий (преобразователей и гидролокаторов) как собственной разработки, так и изделий сторонних организаций, включающей:

- автоматизированные установки для измерения комплексных значений импеданса и проводимости, диаграмм направленности и чувствительности преобразователей как в режиме приема, так и излучения;
- установки для фазовых измерений датчиков и систем на их основе;
- установки для измерений чувствительности гидрофонов при повышенных гидростатических давлениях (до 6,5 МПа);
- установку, расположенную на понтоне площадью 17×10 м с окном 4,9×2,3 м на озере глубиной 10 м для калибровки приемников и излучателей в диапазоне частот от 1 кГц до 1 МГц.

Фирма производит более 20 типов гидрофонов как с предварительными усилителями, так и без них. Основные параметры гидрофонов представлены в табл. 11 [16]. Гидрофоны снабжены малошумящим коаксиальным или в

виде витой пары кабелем с двойным экраном в полиуретановой оболочке.

Таблица 11

Гидрофоны фирмы Neptune Sonar Ltd.						
Мо- дель	Чувствитель- ность, дБ отн. 1 В/мкПа	Диапазон частот (или резонансная частота), кГц	Усиление ПУС, дБ	Ем- кость, нФ	Глуби- на, м	Тип и внешний диаметр, мм
D/140	- 210	150	-	3,5	1500	Сфера, Ø20
D/26	- 192	26	-	42	2000	Сфера, Ø70
D/60	- 200	60	-	9,8	1500	Сфера, Ø42
D/140/ H	- 180 (с ПУС 20 дБ)	0,01 – 190 (150)	20, 30 или 40 дБ	-	500	Сфера, Ø23
B/200	- 212	270	-	3,8	700	Цилиндр, Ø9
D/17	- 188	17	-	60	2000	Сфера, Ø110
D/70	- 200	70	-	9,3	1500	Сфера, Ø34
D/300	- 217	300	-	2,8	00	Цилиндр, Ø9
D/11	- 188	11	-	8,6	2000	Сфера, Ø165
D/17/B B	- 190	1 - 26	-	-	2000	Сфера, Ø110
D/45	- 196	45	-	22	2000	Сфера, Ø50
D/70/H	- 173 (с ПУС 20 дБ)	0,005 – 120 (70)	0, 30 или 40 дБ	-	1500	Сфера, Ø34
ТII	0,07 пК/кПа	Динамический диапазон 0 – 275 МПа				Кристалл турмалина 4×9

Фото некоторых типов гидрофонов фирмы Neptune Sonar Ltd показаны на рис. 14.

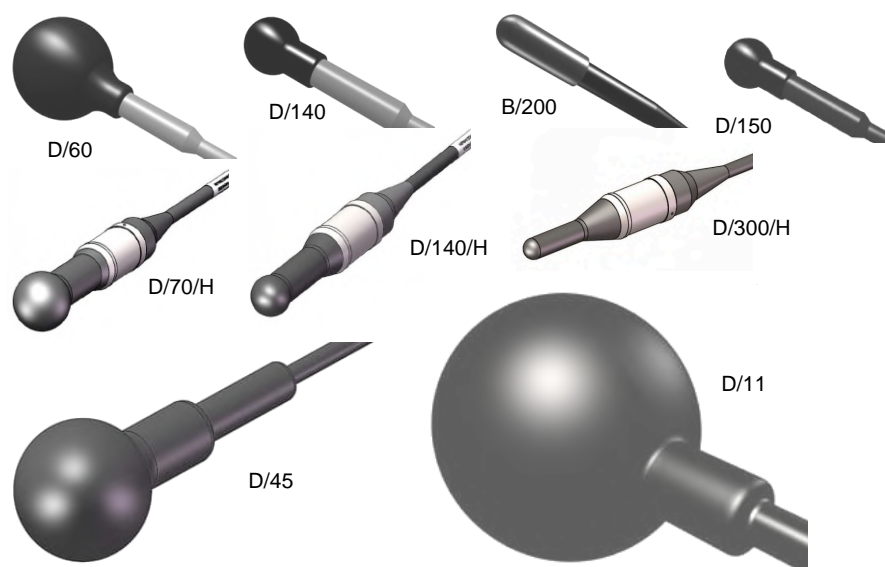


Рис.14. Гидрофоны фирмы Neptune Sonar Ltd

Заметим, что в своих разработках фирма уделяет большое внимание обеспечению надежности кабельного вывода, что важно для преобразователей, работающих на глубинах до 1500 – 2000 м. Так, например, в преобразователях большого размера используют двухступенчатое снижение диаметра полиуретанового покрытия к размерам кабеля, что показано на габаритном чертеже гидрофона D/11 (см. рис. 15).

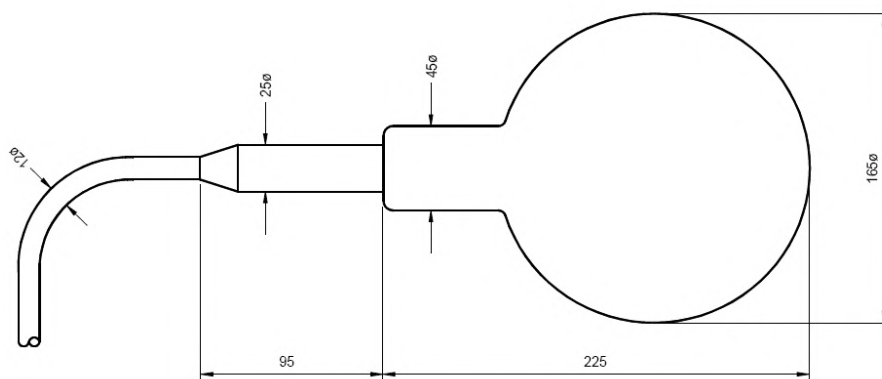


Рис.15. Внешние размеры гидрофона D/11 (диаметр сферы 165 мм)

Среди оригинальных разработок фирмы можно найти и гидрофон ТП на основе монокристалла турмалина (гидроакустики про него уже давно забы-

ли) с верхним пределом динамического диапазона до 275 МПа (!), который широко используется для измерений импульсных давлений при испытаниях подводных взрывов (см. рис.16).



Рис.16. Гидрофон ТII с чувствительным элементом из турмалина

### Гидрофоны фирмы Co.L.Mar

Образованная в 1982 г. итальянская фирма Co.L.Mar.Sri [17] разрабатывает и производит гидроакустическое оборудование широкого назначения – от измерительных гидрофонов до электронного оборудования с соответствующим программным обеспечением, работает по контрактам с такими известными нефтяными и нефтегазовыми компаниями как AGIP, SAIPEM S.p.A., British Petroleum, EXXON Mobil, правительственными и межправительственными организациями: NATO, TUBITAK (турецкая организация по научно-техническим исследованиям), ISPRA (итальянская правительственная организация по защите окружающей среды), ICRAM (Центральный институт научных и технологических морских исследований Италии) и др. На рис. 17 показаны рекламируемые фирмой гидрофоны, а в табл. 12 представлены их характеристики.



Рис. 17. Гидрофоны фирмы Co.L.Mar.Sri с предварительным усилителем

Таблица 12

		Характеристики гидрофонов фирмы Co.L.Mar.Sri				
Модель		AR0190	GP0190	GP-280	TD0720	GP1516
Тип		сферический				цилиндр
Диапазон частот, кГц		0,015 - 170	0,005 - 170	0,005 - 90	Fрез = 24,9	0,005 - 170
Чувствительность, дБ отн. 1 мкВ/Па		-175 (-169*)	-178 (-172*)	-171 (-165*)	-190	-172 (-166*)
Усиление ПУС, дБ		30 (36*)	26 (32*)	30 (36*)	30 (36*)	
ЭШД на 5 кГц, дБ отн. 1 мкВ·Гц-1/2		41	38	34		39
Макс. глубина, м		1000	1000	1000	700	500
Размеры, мм		Ø25×135	Ø32×230	Ø32×230	Ø72	Ø32×175

\* с дифференциальным выходом

На рис. 18 показан сферический ненаправленный обратимый преобразователь TD0720 диаметром 72 мм, эффективно работающий в полосе частот с центром 25 кГц как излучатель и приемник при калибровках в бассейне и в открытом море, а также как излучатель и ретранслятор для подводных работ. Гидрофон полностью покрыт полиуретановым компаундом. Большая емкость (42,4 нФ) позволяет работать с длинным кабелем без ПУС.



Рис.18. Сферический гидрофон TD0720

В качестве аксессуаров фирма предлагает простые приспособления для защиты гидрофонов от механических воздействий и демпфирования вибраций при измерениях в море (рис.19).





Рис.19. Приспособления для работы гидрофона в морских условиях

Частотные характеристики чувствительности гидрофонов фирмы Co.L.Mar.Sri представлены на рис. 20. Эти характеристики отличаются довольно большим спадом (до 8 – 10 дБ), связанным с дифракционными эффектами на частотах от 10 до 100 кГц, что существенно снижает конкурентные преимущества этих гидрофонов по сравнению с гидрофонами других фирм.

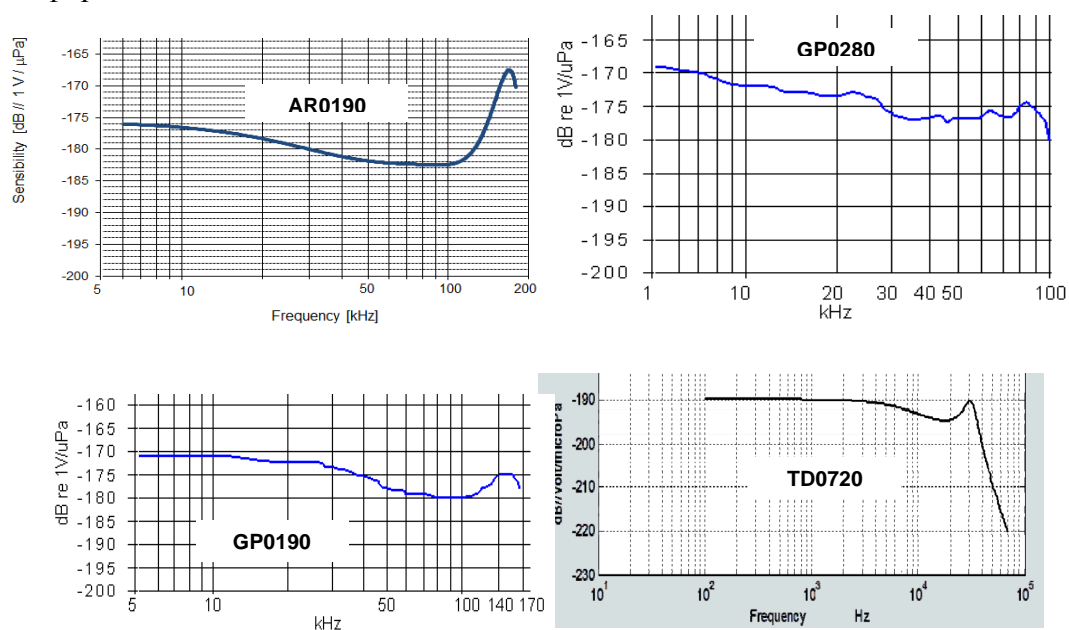


Рис. 20. Частотные характеристики чувствительности гидрофонов фирмы Co.L.Mar.Sri

## Гидрофоны фирмы SMID Technology

Итальянская фирма SMID Technology [18] базируется на использовании новых технологий приема, передачи, сохранения и обработки данных, получаемых с подводных приемных систем, и работает по контрактам с НАТО (NURC: NATO Undersea Research Centre), UPC (Испанским политехническим университетом), итальянским ВМФ и многими итальянскими НИИ и университетами. Она разрабатывает и выпускает цифровые гидрофоны широкого применения для работы как на мелководье, так и в глубоком море, отличающиеся большим динамическим диапазоном благодаря двухканальному входу предварительного усилителя (с малым и большим усилением) и низким собственным шумам. Внешний вид цифрового гидрофона этой фирмы с кабелем и приемным блоком, а также блок-схема гидрофона показаны на рис. 21. Параметры цифровых гидрофонов некоторых моделей представлены в табл. 13.

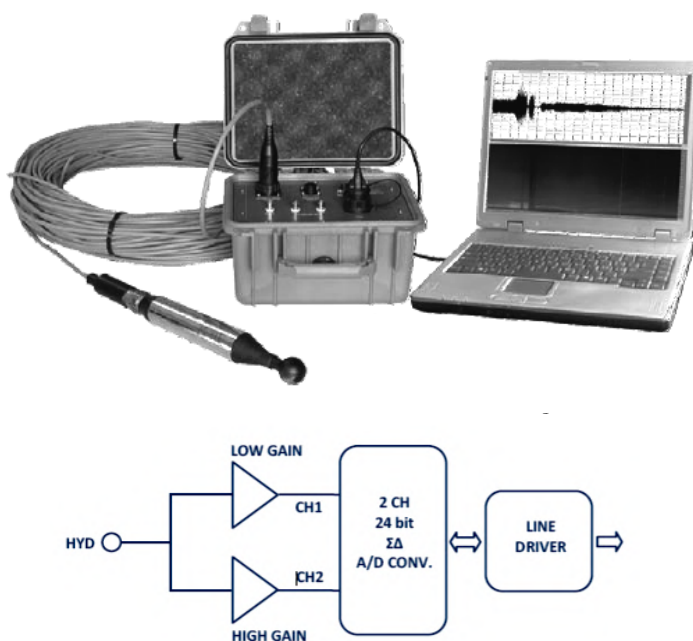


Рис. 21. Цифровой гидрофон DN800 с кабелем и блоком управления, подключенным к ПК

Таблица 13

Технические характеристики гидрофонов фирмы SMID Technology				
Модель	DN100	DN200GP	DN600	DN800
Диапазон частот, кГц	0,02 - 48	0,01 - 90	0,01 - 90	0,004 - 90
Чувствительность канала с большим усилением, дБ отн. 1 мкВ/Па	-148	-148	-148	-158
Чувствительность канала с малым усилением, дБ отн. 1 мкВ/Па	-186	-186	-186	-196
Частота выборки, кГц	96	100/200	100/200	50/100/200
ЭШД на 10 кГц, дБ отн. 1 мкВ·Гц-1/2	35	24	37	20
Макс. длина кабеля, м	200	100	100	300
Макс. глубина, м	700	1000	4000	1000
Размеры, мм	Ø30×180	Ø30×180	Ø35×180	Ø40×250

### Анализ потребностей рынка гидрофонов

Выше рассмотрены около 150 типов или моделей зарубежных гидрофонов, выпускаемыми 15 известными фирмами. Разнообразие этих моделей обусловлено прежде всего широтой задач, стоящих перед гидроакустиком и заключающихся, помимо известных применений в военной гидроакустике, в следующем:

- измерениях подводного шума в океане и исследованиях природы его происхождения;
- измерениях импульсных сигналов при забивании свай в морское дно и оценке их воздействия на морскую фауну;
- мониторинге и изучении шумов морских обитателей;
- мониторинге шумов окружающей среды;
- измерениях шумов работающих морских ветровых энергетических станций;
- измерениях шумов приливных электростанций;
- исследованиях шумов подводных землетрясений и цунами;
- наблюдениях за подводной вулканической деятельностью;
- измерениях шумов отдельных судов и судоходства в целом с целью оценки их негативного воздействия на окружающую среду и постепенного снижения уровня шумового загрязнения наиболее уязвимых акваторий;
- проведении исследований распространения звука в океане, составлении топографии подводных звуковых каналов и оценке их изменчивости в зависимости от времени года, погодных условий и пр.;
- обеспечении безопасности припортовых акваторий;
- поиске мест утечки продукта из подводных трубопроводов;
- поиске и лове рыбы;

- мониторинге ледовой обстановки в Арктике.

Эти задачи определяют различие условий применения гидрофонов (кратковременное или длительное пребывание в воде, требуемая глубина погружения, влияние агрессивного воздействия окружающей среды, возможности установки гидрофона в месте измерения, длина сигнального кабеля и пр.), а также широкий спектр требований к их характеристикам (чувствительности, направленности, динамическому диапазону измеряемых воздействий, допустимой глубине погружения, надежности конструкции, точности измерения и пр.).

Трудно оценить потребности и приоритеты мирового рынка в такой продукции. Однако рекламируемые некоторыми фирмами возможности дают основание полагать, что этот рынок не так уж и мал. Так, например, американская фирма High Tech, Inc. за последние 25 лет выпустила более 200 тысяч экземпляров гидроакустических преобразователей различного назначения [11], и рынок сбыта ее продукции существенно расширился. А образованная в 1983 г. канадская фирма Sensor Technology Ltd. за время своего существования изготовила более миллиона гидрофонов [10]. Созданная около 20 лет назад канадская фирма GeoSpectrum Technologies Inc. рекламирует свои производственные возможности – до 1000 гидрофонов в день [9], которые, наверное, кому-то нужны.

На сайтах [19, 20] размещены анонсы отчетов с анализом тенденций развития мирового рынка гидрофонов до 2021-22 г.г. В качестве основных поставщиков продукции на этот рынок перечислены фирмы, гидрофоны которых рассмотрены в настоящей статье. В [19] они разделены по конструкции на три основные группы: сферические, миниатюрные и измерительные гидрофоны, по областям применения – на используемые в научных исследованиях, в промышленности, медицине, в области обороны и других. В [20] такое разделение сделано по рабочему диапазону частот – на низко-, средне- и высокочастотные, а также по основному режиму работы – на приемники, излучатели и обратимые. Отчеты в целом недоступны, поэтому попытаемся определить тенденции развития этой области гидроакустического приборостроения на основании собственного анализа характеристик рассмотренных здесь типов или моделей гидрофонов.

На рис. 22 показана круговая диаграмма, представляющая вклад определенных типов преобразователей (сферических, цилиндрических, биморфных и остальных) в общую совокупность из около 150 моделей, рекламируемых рассмотренными выше производителями. Из этой диаграммы видно, что наибольшее применение находят сферические гидрофоны, обладающие ненаправленными характеристиками чувствительности, более высокой прочностью и устойчивостью к воздействию гидростатического давления (по сравнению с цилиндрическими преобразователями с тем же отношением

толщины оболочки к ее диаметру), более высокими значениями резонансной частоты (по сравнению с цилиндрическими преобразователями того же радиуса).

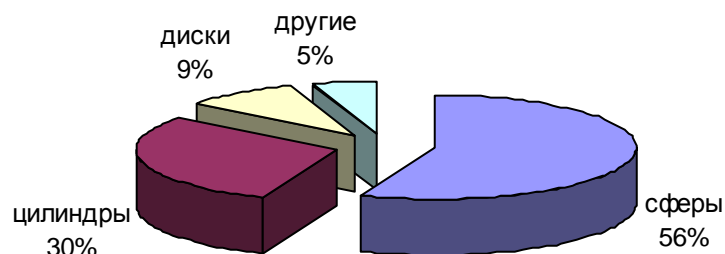


Рис. 22. Распределение количества моделей рассмотренных выше гидрофонов по форме используемых в них пьезокерамических элементов

Количественное распределение моделей по уровню чувствительности представлено на рис. 23. На этой гистограмме темные колонки представляют собой совокупности моделей, суммированных по группам с чувствительностью, отличающейся не более чем на 5 дБ, и соответствуют гидрофонам без предварительного усилителя (ПУС), а светлые колонки относятся к гидрофонам с ПУС.

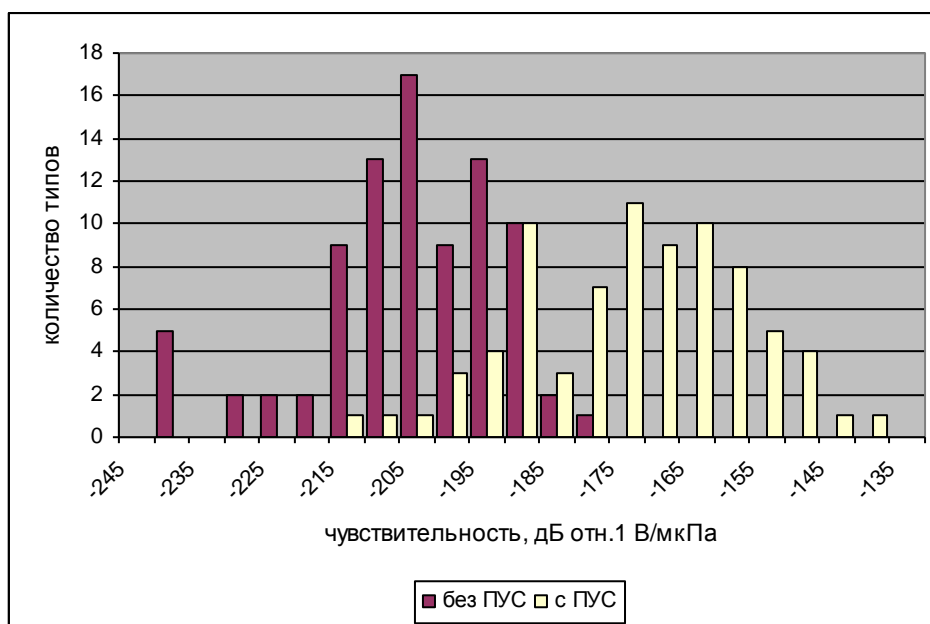


Рис.23. Распределение количества типов гидрофонов по уровню чувствительности

Из этой гистограммы видно, что наиболее типичная чувствительность гидрофонов без предварительного усилителя соответствует уровню минус 205 дБ относительно 1 В/мкПа (т.е. 56 мкВ/Па), что характерно для сферического гидрофона диаметром около 15 мм. Усиление предварительного усилителя чаще всего выбирают таким образом, чтобы чувствительность гидрофона составляла -185 дБ (около 600 мкВ/Па) или от -165 до -155 дБ (от 6 до 18 мВ/Па).

Интересно, какую нижнюю и верхнюю частоту рабочего диапазона наиболее часто выбирают изготовители гидрофонов. На рис. 24 показано количественное распределение моделей по этим параметрам. Гистограмма свидетельствует, что нижняя граница рабочего диапазона частот для более половины из рассмотренных моделей составляет или 1 или 10 Гц, а в качестве верхней наиболее часто выбирают 100 или 200 кГц.

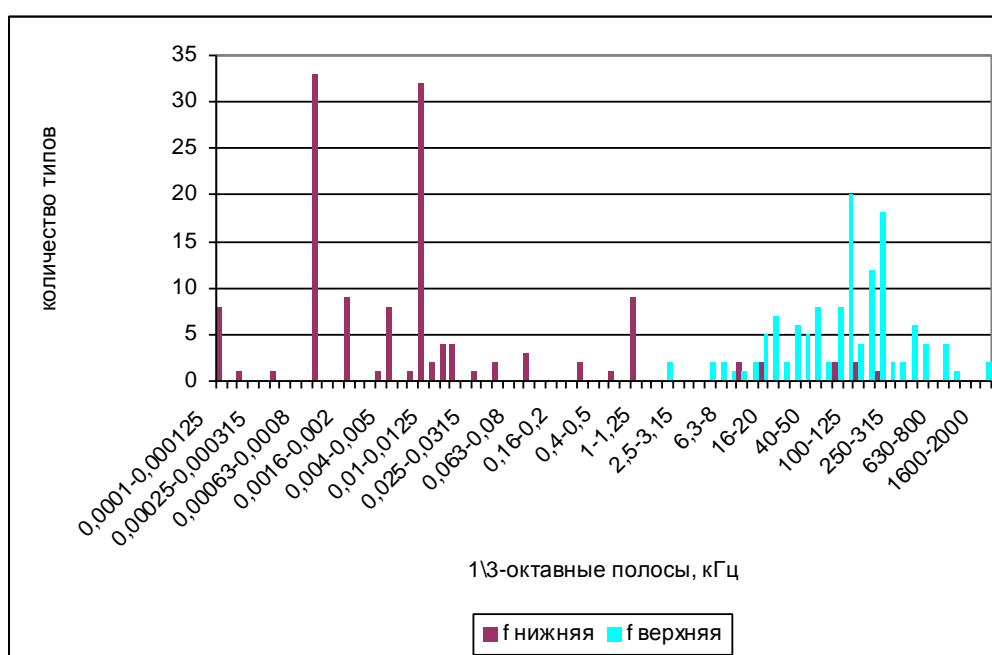


Рис. 24. Количественное распределение типов гидрофонов по крайним частотам их рабочих диапазонов

Качество измерительного гидрофона во многом характеризует ширина диапазона его рабочих частот. Чем она шире, тем больше возможностей у гидрофона при измерении сигналов с широким спектром частот, тем адекватнее соответствует его выходной сигнал волновой форме акустического воздействия. При указании частотного диапазона, в котором может быть использован измерительный гидрофон, принято оговаривать границы изменения его чувствительности в пределах этого диапазона. Как правило, в этих

*Альманах современной метрологии, 2018, № 13*

границах изменения его чувствительности не должны превышать  $\pm 3$  дБ от среднего уровня чувствительности в установленном диапазоне частот. При стремлении расширить частотный диапазон в сторону верхних частот, превышающих резонансную частоту чувствительного элемента, обычно указывают значение связанного с этим падения чувствительности (до минус 7 или минус 10 дБ), чтобы пользователь мог оценить достоверность получаемой от гидрофона информации. На рис. 25 показана гистограмма количественного распределения рассмотренных выше моделей гидрофонов по ширине их частотного диапазона, ограниченного неравномерностью  $\pm 3$  дБ. В каждой колонке сгруппированы модели гидрофонов, чьи частотные диапазоны отличаются не более чем на 0,5 декады.

Из этой гистограммы видно, что рабочий диапазон частот более 2/3 (68 %) всех моделей гидрофонов имеет ширину от 3 до 5,5 декад, а наиболее часто встречающимся является диапазон шириной 4 – 4,5 декады (21 %). Именно в этом диапазоне работают практически все модели гидрофонов фирмы Teledyne RESON A/S. Многие модели гидрофонов фирмы Sensor Technology Ltd. имеют частотный диапазон шире 5 декад, а частотный диапазон гидрофонов 8103, 8104 и 8105 фирмы Брюль и Кьер и сферических гидрофонов фирмы Benthowave Instrument Inc. превышает даже 6 декад. Такое расширение частотного диапазона гидрофона объясняется способностью его работы на инфразвуковых частотах, и это расширение возможно лишь при обеспечении надлежащего качества его конструкции.

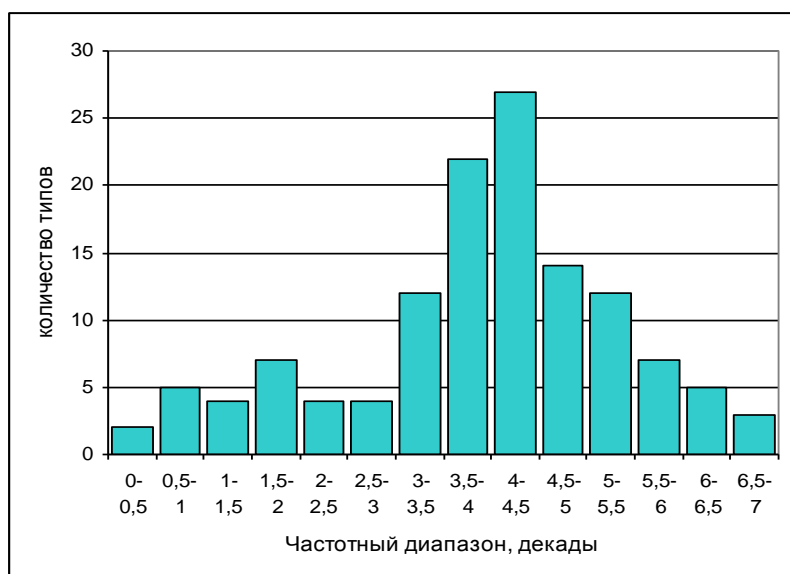


Рис. 25. Количественное распределение моделей гидрофонов по ширине их частотного диапазона

Представленные на гидрофоны данные позволяют также оценить востребованность гидрофонов с точки зрения допустимой глубины их работы в море. На рис. 26 показана гистограмма количественного распределения типов гидрофонов по максимально допустимой глубине их погружения. Типы гидрофонов сгруппированы по значениям глубины в пределах 500 м (т.е. от 1 до 500 м, от 501 до 1000 м, от 1001 до 1500 м и т.д.).

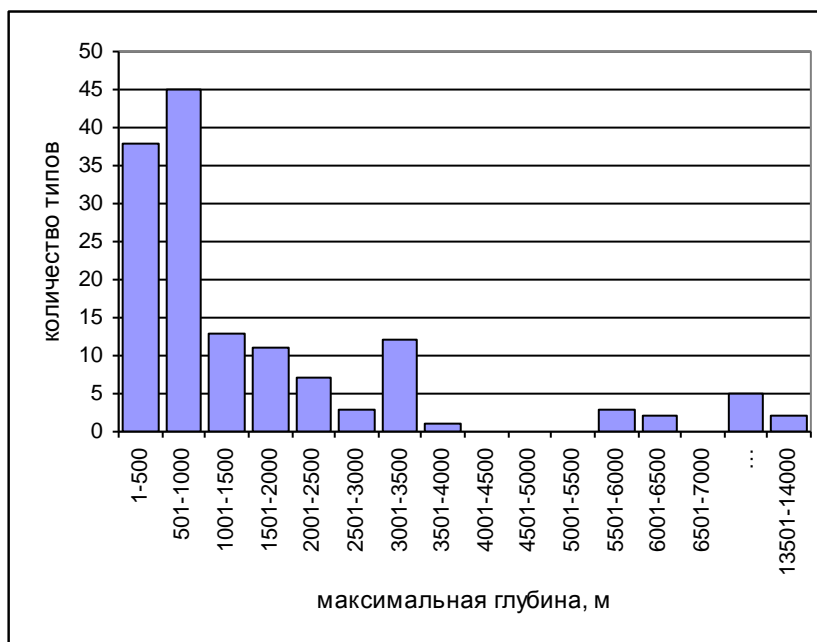


Рис.26. Количественное распределение типов гидрофонов по максимально допустимой глубине их погружения

Из этой гистограммы видно, что наиболее применяемыми являются гидрофоны, работающие на глубинах до 500 м (около 29 % из 145 рассмотренных типов) и на глубинах от 501 до 1000 м (около 35 %). Около 10 % типов гидрофонов могут работать на глубинах более 5,5 км.

Более детальное количественное распределение типов гидрофонов на глубинах до 1000 м (около 2/3 всех рассмотренных моделей) показано на рис. 27, на котором типы гидрофонов сгруппированы по значениям глубины в пределах 50 м (т.е. от 1 до 50 м, от 50 до 100 м, от 101 до 150 м и т.д.).



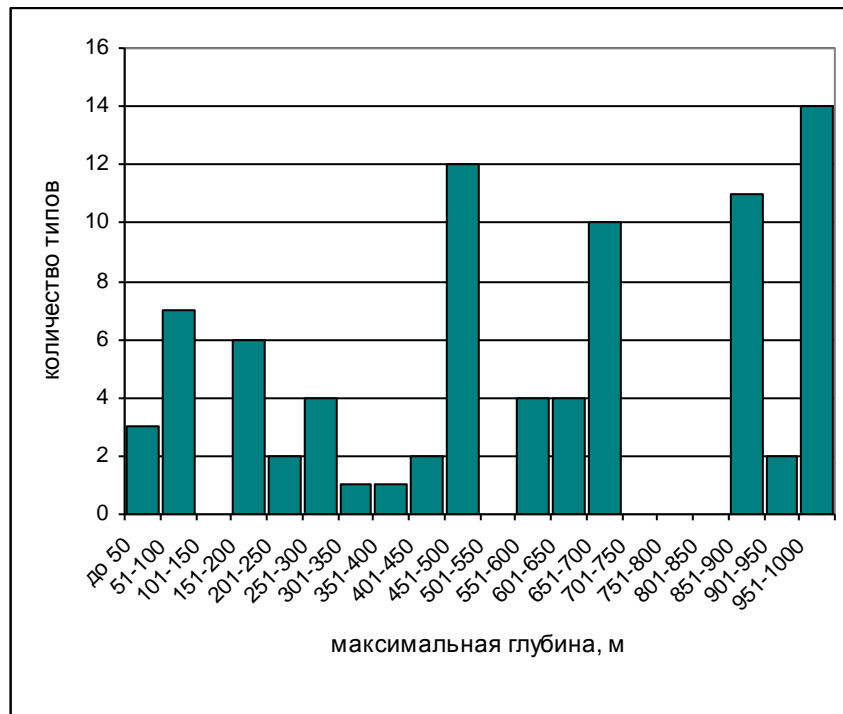


Рис.27. Количественное распределение типов гидрофонов по максимально допустимой глубине их погружения в пределах до 1000 м

Из этой гистограммы видно, что наиболее применяемыми являются гидрофоны, работающие на максимальных глубинах от 451 до 500 м (около 9 % из 145 рассмотренных типов) и на глубинах от 951 до 1000 м (около 11 %).

В настоящей статье рассмотрена продукция 15 фирм – изготовителей подводных гидроакустических преобразователей. Среди них есть фирмы с многолетним опытом работы на рынке гидроакустических услуг, но присутствуют и относительно молодые фирмы, входящие, однако, в первую десятку рейтинга топ-игроков этого рынка. В табл. 4 показаны возраст фирмы и их места в рейтинге из 10 участников рынка, составленном на основании многопараметрического анализа и представленном в отчетах [19] и [20].

Таблица 20

Рыночные возможности различных фирм в сбыте производимых ими гидроакустических преобразователей

Фирма	Время работы на рынке, лет	Место в рейтинге по отчету [19]	Место в рейтинге по отчету [20]
USRD	> 50	-	-
RESON	> 30	3	3
Брюль и Кьер	> 70	10	-
ITC	>50	-	-
Benthowave	-	-	8
GeoSpectrum	>20	-	-
Sensor Technology	34	-	7
High Tech	28	1	-
Chelsea	> 40	-	2
Cetacean Research	23	4	-
Aquarian Audio	19	2	-
Ocean Sonics	5	6	-
Neptune Sonar	27	-	6
Co.L.Mar	35	-	-
SMID Technology	-	-	-

Совместное рассмотрение результатов, показанных в табл. 20, дает основание составить собственный рейтинг рассмотренных фирм по востребованности их продукции на рынке: фирма RESON – 1-е место; фирма High Tech – 2-е место; фирмы Chelsea и Aquarian Audio разделили 3-е и 4-е места; фирма Cetacean Research – 5-е место; фирмы Ocean Sonics и Neptune Sonar разделили 6-е и 7-е места; фирма Sensor Technology – 8-е место; фирма Benthowave – 9-е место; фирма Брюль и Кьер – на 10-м месте. Остальные 5 из рассмотренных фирм в рейтинг не попали.

Автор надеется, что представленные оценки будут полезны разработчикам гидрофонов и специалистам в области гидроакустики в их ориентировке относительно потребностей рынка гидроакустической продукции.

### Литература

1. Еняков А.М. Серийные гидрофоны ВНИИФТРИ и история их создания// Альманах современной метрологии, ФГУП «ВНИИФТРИ», 2016, № 7, с. 139 – 185.
2. Электронный ресурс: <http://www.oceanpribor.ru/docs/gidrofon.pdf>
3. Электронный ресурс: <https://zetlab.com/shop/datchiki/datchiki-davleniya-vodyi-gidrofonyi/>

4. Электронный ресурс: <http://www.navsea.navy.mil/Home/Warfare-Centers/NUWC-Newport/What-We-Do/Detachments/Underwater-Sound-Reference-Division/Transducer-Standards/Transducer-Catalog/>
5. Электронный ресурс: [www.teledyn-reson.com](http://www.teledyn-reson.com)
6. Электронный ресурс: <https://asm-tm.all.biz/gidrofony-tipov-8103-8104-8105-i-8106-bruelkjaer-g4075193>
7. Электронный ресурс: [www.itc-transducers.com](http://www.itc-transducers.com)
8. Электронный ресурс: <http://www.benthowave.com>
9. Электронный ресурс: <http://geospectrum.ca/our-company/>
10. Электронный ресурс: [www.sensortech.ca](http://www.sensortech.ca)
11. Электронный ресурс:  
<http://www.hightechincusa.com/products/hydrophones/>
12. Электронный ресурс: [www.chelsea.co.uk](http://www.chelsea.co.uk)
13. Электронный ресурс: [www.cetaceanresearch.com](http://www.cetaceanresearch.com)
14. Электронный ресурс: <http://www.aquarianaudio.com/>
15. Электронный ресурс: <http://oceansonics.com/iclisten-smart-hydrophones/>
16. Электронный ресурс:  
<http://neptune-sonar.co.uk/product-category/standard-transducer-products/hydrophones/>
17. Электронный ресурс:  
[www.colmarsrl.com/underwater-acoustics/company-profile.html](http://www.colmarsrl.com/underwater-acoustics/company-profile.html)
18. Электронный ресурс: [www.smidtechnology.it](http://www.smidtechnology.it)  
Global Hydrophone Market Report 2014-2021 - Analysis, Technologies & Forecasts - Vendors: Siemens, Sensor Technology, Cetacean Research Technology - Research and Markets. Электронный ресурс:  
<http://www.businesswire.com/news/home/20161013006317/en/Global-Hydrophone-Market-Report-2014-2021---Analysis>
19. Underwater Transducer Market, By Frequency (Low Frequency, Medium Frequency, High Frequency), Application (Hydrophone, Transmitting, Others) – Global Revenue, Trends, Growth, Share, Size and Forecast To 2022. Электронный ресурс:  
<https://www.scalarmarketresearch.com/market-reports/underwater-transducer-market>