

**ОЦЕНКА ОТРАЖАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ  
ПОДВОДНЫХ ЧАСТЕЙ АЙСБЕРГОВ  
В ЗАДАЧАХ ДАЛЬНЕЙ ГИДРОЛОКАЦИИ  
ОПАСНЫХ ЛЕДЯНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ**

д-р техн. наук А.В.БОГОРОДСКИЙ<sup>1</sup>, д-р физ.-мат. наук Г.А.ЛЕБЕДЕВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОАО «Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург, mail@oceanpribor.ru

<sup>2</sup>ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, lebedev@aari.nw.ru

*Выполнена теоретическая оценка возможных значений и свойств сечения обратного рассеяния подводных частей баренцевоморских айсбергов на низкой частоте при их аппроксимации шероховатыми (гофрированными) цилиндрами конечных размеров. Показано, что отражающая способность подводных частей айсбергов, определяемая в соответствии с принятой моделью, позволяет отнести последние к крупным гидролокационным целям, являющимся объектами дальней гидролокации.*

*Ключевые слова:* гидролокация, гидроакустические средства, айсберги, гидротехнические сооружения, безопасность, обнаружение, сечение рассеяния, сила цели, модель.

В целях обеспечения безопасности морских гидротехнических сооружений в шельфовой зоне замерзающих морей, целесообразно комплексно использовать вместе с уже традиционными (авиационными, спутниковыми) каналами получения информации о таком виде опасных ледовых образованиях (ОЛО), как айсберги, также и гидроакустический [2].

При этом предполагается, что гидроакустические средства, входящие в состав гидроакустического канала получения информации об ОЛО, должны обеспечивать решение следующих основных задач:

- поиск из-под воды айсбергов, стамух и дрейфующих паковых льдов на возможно больших дистанциях от точки наблюдения;
- оценка морфометрических характеристик (осадки и протяженности) подводных частей дрейфующих айсбергов;
- оценка морфометрических характеристик (осадки, толщины и рельефа нижней границы) дрейфующих паковых льдов.

Исходя из этого, эффективность гидроакустического канала получения информации об ОЛО в основном будет определяться характеристиками того гидроакустического средства (или системы), которое обеспечивает решение первичной и, видимо, приоритетной задачи канала – обнаружение из-под воды дрейфующих айсбергов на возможно больших дистанциях от точки наблюдения.

Под «возможно большими» будем понимать дистанции, находящиеся в диапазоне от 3 до 100 км, т.е. не превышающие минимального значения радиуса зоны безопасности гидротехнического сооружения, которое определено в работе [9].

Как показано в работе [2], дальность действия существующих высокочастотных гидроакустических средств поиска и обнаружения ОЛО (в частности, вперёдсмотрящих 3D-гидролокаторов), разработанных для обитаемых подводных

носителей типа подводной лодки, не превышает 3,0 км, что не обеспечивает минимально необходимый радиус зоны безопасности.

Попытки оценить возможности существующих активных низкочастотных гидроакустических средств обнаружения подводных объектов применительно к задаче дальнего обнаружения айсбергов, равно как и попытки разработать технический облик специализированной гидролокационной системы, решающей подобную задачу, наталкиваются на принципиальный и до настоящего времени не решенный вопрос об отражающей способности (силе цели, эффективной поверхности обратного рассеяния) таких гидролокационных целей и методах ее расчета.

Следует отметить, что акустические свойства подводных частей айсбергов изучены весьма мало. В настоящее время большинство исследователей сходятся лишь во мнении, что айсберг, даже относительно небольшой, представляет собой крупную гидролокационную цель. Однако количественных данных о частотных и угловых зависимостях силы рассеяния акустических колебаний подводными частями айсбергов в научной литературе практически нет. Известно также, что рельеф поверхности и конфигурация подводных частей айсбергов обладают значительным многообразием и временной изменчивостью, что не может не влиять на их способность отражать и рассеивать акустическую энергию, однако каких-либо общепринятых физической и геометрической моделей подводных частей айсбергов нами не найдено.

Учитывая изложенное, задача оценки отражающей способности подводных частей айсбергов вообще и айсбергов Баренцева моря в частности представляется весьма актуальной. Рассмотрим один из вариантов решения этой задачи, базирующийся на методах расчета отражения и рассеяния акустических полей на шероховатых телах конечных размеров, каковыми, по нашему мнению, можно представить подводные части айсбергов.

Предлагаемая нами приближенная геометрическая модель подводной части айсбергов Баренцева моря разработана на основе данных, приведенных в работах [10, 11].

В работе [10] показано, что при моделировании процесса стационарной буксировки айсбергов различных размеров вертикальные поперечные сечения их подводных частей могут быть корректно представлены как прямоугольники, а сами подводные части как соответствующие прямые круговые цилиндры, изображенные на рис. 1. Автор выделяет 5 типоразмеров вертикального поперечного сечения, которые характерны для айсбергов Баренцева моря. Из этого ряда мы будем рассматривать два крайних типоразмера – малый айсберг, характерная площадь вертикального поперечного сечения  $S_1 = 300 \text{ м}^2$ , и крупный айсберг, с характерным значением площади вертикального поперечного сечения  $S_2 = 5000 \text{ м}^2$  (рис. 1).

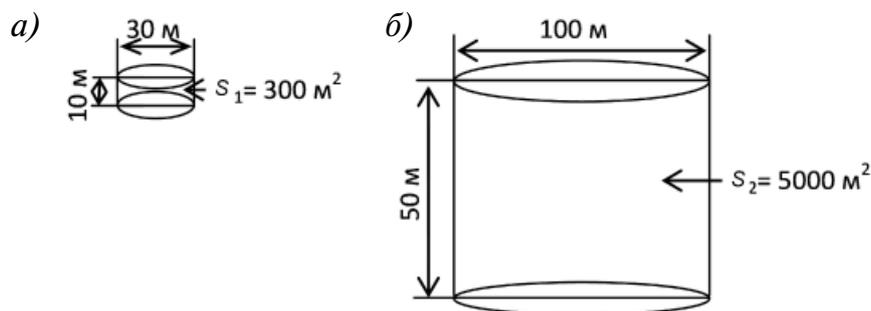


Рис. 1. Модель формы и размеров подводных частей айсбергов Баренцева моря: а – малый айсберг; б – крупный айсберг;  $S_i$  – площадь вертикального поперечного сечения

Следует отметить, что размеры цилиндров, моделирующих подводные части малого и крупного айсбергов (осадка, плановые размеры), приведенные на рис. 1, по порядку величины совпадают со статистическими оценками этих параметров, полученными по результатам анализа визуальных наблюдений надводных частей айсбергов Баренцева моря [7]. При этом размерения крупного айсберга (по терминологии работы [10]) близки к размерениям среднестатистического айсберга, приведенным в работе [7].

Поверхность подводной части айсберга, а значит, и поверхность аппроксимирующего цилиндра нельзя считать гладкой. Судя по данным работы [11], поверхность подводной части айсберга имеет сравнительно крупные неровности с характерными размерами в несколько метров в виде чередующихся выпуклостей и впадин, опоясывающих цилиндр по его высоте, и малые неровности в виде неглубоких борозд (глубиной 0,15...0,2 м) с пологими краями, ориентированными вдоль образующей цилиндра. Первые из них, видимо, вызваны действием течений, омывающих подводную часть айсберга, вторые – потоками талой воды, стекающей с надводной части айсберга при ее таянии. В результате уточненную модель подводной части айсберга можно представить в виде шероховатого (в нашем случае гофрированного) цилиндра конечной длины  $L$ , с радиусом гладкой поверхности  $a$ , с крупными случайными неровностями (гофрами)  $\zeta(x)$ , меняющимися только по образующей цилиндра (координата  $x$ ), и малыми неровностями, меняющимися только по направляющей цилиндра (рис. 2).

Предположим, что подобный цилиндр находится в однородной безграничной среде и облучается моностатическим импульсным низкочастотным гидролокатором, который затем принимает рассеянные цилиндром эхосигналы. Размеры разрешаемого гидролокатором объема (по курсовому углу и по дальности) больше соответствующих размеров цилиндра, а длина акустической волны  $\lambda$ , его облучающей, равна  $\sim 1$  м. При этом размеры цилиндра таковы, что  $L \gg \lambda \ll a$ .

Далее предположим, что плоскость падения  $\{z, x\}$  (в которой лежат волновые векторы  $\mathbf{k}$  и  $\mathbf{k}$ ) акустической волны на шероховатый цилиндр параллельна оси цилиндра, а точка наблюдения рассеянного цилиндром акустического поля находится в дальней зоне, т.е. выполняется условие

$$2\pi L^2/\lambda \ll r_{1,2}, \quad (1)$$

где  $r_{1,2}$  – дистанции от точек излучения (1) и наблюдения (2) до цилиндра.

Тогда, если распределение производных  $w(\gamma)$  случайной функции  $\zeta(x)$  подчиняется нормальному закону

$$w(\gamma) = \frac{1}{\gamma_0 \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\gamma^2}{2\gamma_0^2}\right), \quad (2)$$

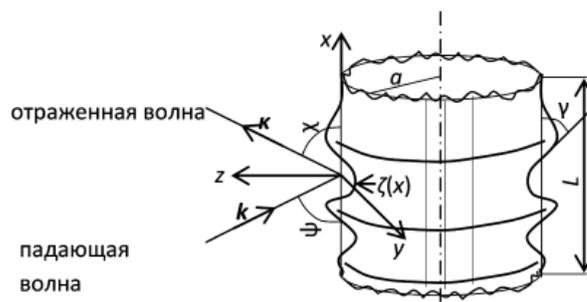


Рис. 2. Уточненная модель подводной части айсберга

где  $\gamma_0$  – характерный тангенс угла наклона неровностей относительно невозмущенной поверхности;  $\gamma_0^2 \equiv \overline{\gamma^2} = \overline{(d\zeta/dx)^2}$  – дисперсия производной тангенсов углов наклона, то сечение рассеяния  $S$  шероховатого цилиндра имеет следующий вид [1]:

$$S = S(\psi, \chi) = \frac{aL|V(\psi)|^2}{\gamma_0\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{[1 - \cos(\psi - \chi)]^2}{(\sin \psi + \sin \chi)^4} \exp \left[ -\frac{1}{2\gamma_0^2} \left( \frac{\cos \chi - \cos \psi}{\sin \psi + \sin \chi} \right)^2 \right], \quad (3)$$

где  $V(\psi) = |V_0(\psi)| \exp(-2k^2\sigma^2 \sin^2 \psi)$  – коэффициент отражения от шероховатой поверхности;  $V_0(\psi)$  – коэффициент отражения когерентной составляющей поля от плоской границы раздела;  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число;  $\sigma$  – среднеквадратическая высота неровностей шероховатой поверхности.

В зеркальном направлении ( $\psi = \chi$ ) сечение рассеяния от шероховатого цилиндра (3) приобретает вид

$$S(\psi, \psi) \approx \frac{aL|V(\psi)|^2}{\gamma_0\sqrt{2\pi}}, \quad (4)$$

в то время, как для гладкого цилиндра оно определяется выражением [1]

$$S_0(\psi, \psi) = \frac{akL^2|V(\psi)|^2 \sin \psi}{4\pi}. \quad (5)$$

Сравнивая (4) и (5) можно видеть, что сечение рассеяния на шероховатом цилиндре в зеркальном направлении (и, в частности, в обратном направлении) оказывается в  $k\gamma L \sin \psi$  раз меньше, чем для гладкого цилиндра. Это уменьшение связано с перераспределением интенсивности поля, рассеянного шероховатым цилиндром в более широком секторе углов, чем у гладкого цилиндра, где сечение рассеяния отлично от нуля только в малой окрестности  $\Delta\chi$  углов, близких к зеркальным, – в пределах первого дифракционного лепестка [1].

Следует отметить, что выражения (3) и (4) оказываются справедливыми не только для гофрированного цилиндра, но и в общем случае трехмерных шероховатостей, если характерные углы наклона  $\arctg \gamma_0$  в направлении, перпендикулярном к образующей, достаточно малы:  $\overline{\gamma_y^2} \ll 1$  (см. рис 2).

Для практического использования выражения (4) при оценке отражающей способности подводных частей дрейфующих айсбергов необходимо знание коэффициента отражения акустической волны  $V(\psi)$  от границы раздела вода–лед. Оценим значение этой величины, используя выражение для коэффициента отражения плоской акустической волны от плоской границы раздела жидкость – твердое тело, которое имеет вид [5]

$$V = \frac{Z_{l_2} \cos^2 2\beta_2 + Z_{t_2} \sin^2 2\beta_2 - Z_1}{Z_{l_2} \cos^2 2\beta_2 + Z_{t_2} \sin^2 2\beta_2 + Z_1}, \quad (6)$$

где  $Z_{l_2} = \frac{\rho_2 c_{l_2}}{\cos \alpha_2}$ ,  $Z_{t_2} = \frac{\rho_2 c_{t_2}}{\cos \beta_2}$ ,  $Z_1 = \frac{\rho_1 c_{l_1}}{\cos \alpha_1}$  – импедансы;  $\rho_1, \rho_2$  – плотности жидкости (воды) и твердого тела (льда);  $c_{l_1}$  – скорость продольной волны в жидкости;  $c_{l_2}, c_{t_2}$  – скорость продольных и поперечных волн в твердом теле;  $\alpha_1$  – угол падения акустической волны на границу раздела жидкость – твердое тело;  $\alpha_2, \beta_2$  – углы преломления продольной и поперечной волн.

Если угол  $\alpha_1 = 0$  (нормальное падение акустической волны), то поперечная волна в твердом теле не возбуждается ( $\alpha_2, \beta_2 = 0$ ). Если принять:  $\rho_1 = \rho_b = 1023 \text{ кг/м}^3$ ,  $c_{l_1} = c_b = 1460 \text{ м/с}$ ;  $\rho_2 = \rho_n = 917 \text{ кг/м}^3$ ,  $c_{l_2} = c_n = 3850 \text{ м/с}$ , то при расчете по выражению (6) получим, что в диапазоне углов  $0^\circ \leq \alpha_1 \leq 5^\circ$ , что соответствует  $85^\circ \leq \psi \leq 90^\circ$ , значение  $V(\psi)$  меняется в пределах  $0,396 \leq V(\psi) \leq 0,407$ .

Для сравнения отметим, что среднее по диапазону частот от 1 до 16 кГц значение  $V(\psi)$  при углах скольжения  $60^\circ < \psi \leq 90^\circ$  для молодых и многолетних морских льдов лежит в пределах  $V(\psi) = 0,3$  зимой и  $V(\psi) = 0,2$  летом [3]. При нормальном падении акустической волны на границу раздела вода – лед модуль и фаза коэффициента отражения осциллируют с периодом осцилляций, определяемым соотношением длины акустической волны (средней скорости продольных волн) и толщины слоя. Если за толщину слоя принять протяженность подводной части айсберга в направлении падающей волны, то, учитывая ее значение даже для малых айсбергов ( $\sim 30$  м), вряд ли можно ожидать осцилляций  $V(\psi)|_{\psi = \text{const}}$ . Сезонные колебания коэффициента отражения морского льда связаны с изменениями его температурного режима. Температурный режим подводных частей айсбергов и его сезонные изменения изучены крайне мало. Имеются данные о вертикальном распределении температуры в двух столбчатых айсбергах Баренцева моря, полученные в сентябре 2007 г. [7], однако данные о сезонных изменениях профиля температуры отсутствуют. В то же время по данным работы [8] можно сделать вывод о том, что температурный режим подводных частей айсбергов более стабилен, чем у морского дрейфующего льда, поскольку айсберги долго сохраняют температуру материнского ледника. В этом смысле существуют «теплые» и «холодные» айсберги. Учитывая изложенное, можно предположить, что сезонные колебания  $V(\psi)$  у подводных частей айсбергов не существенны. Для дальнейших расчетов примем значение этого параметра  $V(\psi) \cong 0,4$ .

В выражении (4) остается еще один член, требующий определения, – характерный (среднеквадратический) тангенс угла наклона неровностей относительно невозмущенной поверхности  $\gamma_0 = \overline{\gamma^2}^{0,5}$ . Данные об этом параметре подводных частей айсбергов также отсутствуют. Поэтому для дальнейших расчетов мы выберем значение нижней границы среднеквадратического угла наклона, используя одно из условий, определяющих неровности подводной части айсберга как крупные, а именно:

$$k\gamma L \sin \psi \gg 1. \quad (7)$$

Пусть  $k\gamma L \sin \psi = 10$ . Тогда для выполнения условия (7) в диапазоне углов  $\psi$ , лежащих в указанных выше пределах, должно выполняться неравенство

$$\gamma \geq 0,83\lambda/L. \quad (8)$$

Из (8), в частности, следует, что при длине падающей акустической волны  $\lambda = 1$  м и длине подводной части айсберга  $L = 10$  м (малый айсберг), среднеквадратический тангенс угла наклона неровностей должен быть не менее  $\gamma = 0,183$  рад. =  $10,4^\circ$ .

Для более полного представления о параметрах неровностей необходимо оценить нижнюю границу значений среднеквадратической высоты неровностей  $\sigma$ , при которых последние могут считаться крупными, а также их среднюю протяженность или интервал корреляции неровностей  $l$ .

Для определения  $\sigma$  воспользуемся условием

$$k\sigma \sin \psi \gg 1, \quad (9)$$

и, положив, как и ранее,  $k\sigma \sin \psi = 10$ , найдем, что для длины падающей акустической волны  $\lambda = 1$  м среднеквадратическая высота неровностей должна быть не менее 1,83 м.

На основе полученных средних значений  $\sigma$  и  $\gamma$  можно оценить среднюю протяженность неровности или интервал корреляции неровностей  $l$ , используя соотношение [1]

$$\overline{\gamma^2} = 2\sigma^2/l^2. \quad (10)$$

Так, для нашего случая  $\sigma = 1,83$  м,  $\gamma = 10,4^\circ$ , интервал корреляции неровностей  $l = 14$  м, что по порядку величины совпадает с размером подводной части даже малого айсберга.

Таким образом, в чисто геометрическом смысле неровности, характеризующие такими параметрами, могут существовать на подводных частях как малых, так и крупных айсбергов, в связи с чем значения этих параметров целесообразно принять за нижнюю границу диапазона их изменения.

Собрав полученные значения параметров, определяющих сечение обратного рассеяния от гофрированного цилиндра, выражение (4) можем записать в следующем удобном для практического использования виде:

$$S(\psi, \psi) \cong 0,087aL [m^2]. \quad (11)$$

В табл. 1 приведены значения сечения обратного рассеяния, рассчитанные по выражению (11), а также соответствующие им значения радиуса эквивалентной сферы и силы цели для подводных частей айсбергов трех типоразмеров – малого (рис. 1а), среднестатистического (рис. 1б) и имеющего максимальные значения плановых размеров надводной части (по данным табл. 2 работы [7]). При этом за радиус  $a$  гладкого цилиндра, аппроксимирующего подводную часть айсберга с максимальными значениями размеров, принимался радиус круга, равновеликого по площади эллипсу, оси которого соответствуют длине и ширине планового размера надводной части айсберга (длина – 526 м, ширина – 182 м). Для сравнения в таблице (в скобках) приведены также значения соответствующих характеристик отражающей способности подводных частей айсбергов при аппроксимации последних гладкими цилиндрами. Длина падающей акустической волны  $\lambda$  во всех случаях принималась равной 1 м.

Приведенные в таблице данные показывают, что отражающая способность подводных частей айсбергов, рассчитанная на основании принятой модели гофрированного цилиндра, вполне позволяет отнести их к крупным гидролокационным целям. Так, если исходить из принятой в прикладной гидроакустике классификации, согласно которой к крупным относятся объекты, сила цели которых  $T \geq 0$  дБ ( $R_3 \geq 2$  м), то по расчету даже малые айсберги удовлетворяют этому условию. Среднестатистический айсберг и айсберг с максимальными размерами, безусловно, могут быть отнесены к крупным гидролокационным целям, которые являются объектами дальней гидролокации.

При практическом применении результатов расчета отражающей способности айсбергов следует учитывать, что они получены для случая неровностей, параметры которых соответствуют нижней границе диапазона их изменения. При более крупных неровностях сечения обратного рассеяния подводных частей айсбергов будут меньше приведенных в таблице. По мнению авторов, отражательные характеристики подводных частей айсбергов, рассчитанные на основе «шероховатой модели», значительно ближе к действительности, чем те же характеристики при «гладкой модели». Однако для оценки корректности предложенного в данной работе метода расчета отражающей способности подводных частей айсбергов необходимо проведение эксперимента в реальных или моделируемых условиях с использованием низкочастотного гидролокатора.

Таблица 1

Расчетные значения сечения обратного рассеяния айсбергов

Типоразмер айсберга	Сечения обратного рассеяния $S, m^2$ ( $S_0, m^2$ )	Радиус эквивалентной сферы $R_3$ ( $R_{30}$ ), м	Сила цели $T = 20 \lg(R_3/2)$ , ( $T_0$ ), дБ
Малый	13,05 (105,0)	2,0 (5,8)	0 (9,2)
Среднестатистический	217,5 (87,5·10 <sup>2</sup> )	8,3 (52,8)	12,3 (28,4)
С максимальными плановыми размерами надводной части	1541 (1426·10 <sup>2</sup> )	22,1 (213,0)	20,9 (36,6)

В заключение следует отметить, что согласно принятой в работе [6] классификации ледяные образования, подводные части которых имеют размерения, приведенные на рис. 1а, относятся к обломкам айсбергов, морфометрические характеристики подводных частей которых пока не поддаются систематизации. В этой связи вопрос о корректной модели подводной части обломков айсбергов, как самых распространенных в Баренцевом море ОЛО, требует дальнейшего изучения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Басс Ф.Г., Фукс И.М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М.: Наука, 1972. 424 с.
2. Богородский А.В., Лебедев Г.А. Основные принципы построения системы гидроакустического мониторинга опасных ледяных образований на шельфе замерзающих морей для обеспечения безопасной эксплуатации гидротехнических сооружений // Проблемы Арктики и Антарктики. 2009. № 1 (81). С. 69–79.
3. Богородский А.В., Островский Д.Б. Гидроакустические навигационные и поисково-обследовательские средства. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009. 242 с.
4. Богородский В.В., Гаврило В.П. Лед. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 384 с.
5. Богородский В.В., Гусев А.В., Хохлов Г.П. Физика пресноводного льда. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 226 с.
6. Бородачев В.Е., Гаврило В.П., Казанский М.М. Словарь морских ледовых терминов. СПб.: Гидрометеиздат, 1994. 232 с.
7. Кубышкин Н.В., Андреев О.М., Бородулин В.В., Глазовский А.Ф., Мачерет Ю.Я., Скутин А.А. Экспедиционные исследования айсбергов и ледников западного сектора Российской Арктики по программе Международного полярного года (2007–2008 гг.) // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н.Крылова. 2010. Вып. 51 (335). С. 169–179.
8. Кубышкин Н.В., Бузин И.В., Скутин А.А. К вопросу определения районов образования больших баренцевоморских айсбергов по распределению температуры в их толще // Проблемы Арктики и Антарктики. 2008. № 1 (78). С. 134–141.
9. Лоскутова О.А. Изучение арктического шельфа продолжается // Нефть. Газ. Промышленность. 2003. № 2. С. 6–7.
10. Марченко А.В. Устойчивость буксировки айсберга // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н.Крылова. 2010. Вып. 51 (335). С. 69–79.
11. Стругацкий В.И. По океану на айсберге. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 85 с.

A.V.BOGORODSKY, G.A.LEBEDEV

#### ASSESSMENT OF REFLECTANCE OF ICEBERGS' UNDERWATER PARTS AS APPLIED TO THE ISSUE OF REMOTE UNDERWATER ECHO SOUNDING OF DANGEROUS ICE FORMATIONS

*There has been performed theoretical assessment of possible values and properties of the backscattering cross-section of underwater parts of the Barents Sea icebergs at low frequency in the event of their approximation with rough (corrugated) cylinders of finite sizes. It is shown that reflectance of icebergs' underwater parts, determined in accordance with the accepted model, enables to refer the latter to major sonar targets, which are the objects of remote underwater echo sounding.*

*Keywords:* underwater echo sounding, hydroacoustic means, icebergs, hydrotechnical facilities, safety, detection, scattering cross-section, target strength, model.