

УДК 594.582.2/.8:551.46.062.3

М.Ю. Кузнецов, В.Н. Вологдин*

Тихоокеанский научно-исследовательский рыбохозяйственный центр,
690091, г. Владивосток, пер. Шевченко, 4

ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ СИЛЫ ЦЕЛИ ТИХООКЕАНСКОГО КАЛЬМАРА (*TODARODES PACIFICUS*)

Произведены измерения сил целей тихоокеанского кальмара *Todarodes pacificus* в одном из районов его обитания — в зал. Петра Великого. В указанном районе планируются акустические съемки этого вида. Такое совмещение измерений сил целей и акустической съемки более корректно, чем только режим *ex situ*, при котором места поимки и измерения сил целей объекта могут различаться по физическим и биологическим условиям. С помощью методики привязывания особей на поводках экспериментально получены регрессионные зависимости дорсальной отражательной способности (силы цели) тихоокеанского кальмара от длины тела на частотах 70 и 120 кГц. Длины мантии кальмара были в диапазоне 19,5–27,2 см. Использование уравнений регрессии для сил целей типа $20 \log(ML) + b$ приводит к значительным погрешностям в оценке сил целей кальмара как слева, так и справа от средней (на краях диапазона длин мантий этого вида). Приведены различные физические и биологические факторы, влияющие на измерения силы цели кальмара. Использование зависимости силы цели *T. pacificus* от средних углов наклона плавания в полученных нами соотношениях для дорсального аспекта позволяет уточнить ориентировочно на 6 дБ силу цели кальмара для его естественного поведения в среде обитания (исключая его броски за жертвой во время кормления). Показано, что сила цели этого вида существенно зависит от частоты звука (для указанных частот) и это изменение не монотонно, так как, уменьшаясь на меньших частотах, в частотном интервале от 96,2 до 200,0 кГц сила цели возрастает на 0,4 дБ.

Ключевые слова: тихоокеанский кальмар, гидроакустические измерения, антенна с расщепленным лучом, сила цели, углы наклона кальмара, дорсальный аспект, регрессионное уравнение, длина мантии кальмара.

Kuznetsov M.Y., Vologdin V.N. Studies of the japanese common squid (*Todarodes pacificus*) acoustic target strength // Izv. TINRO. — 2010. — Vol. 161. — P. 120–134.

Acoustic targets strength is measured for japanese common squid (*Todarodes pacificus*) in one of the main its habitats — Peter the Great Bay (Japan Sea) were acoustic surveys of this species stock are planned. The measurement of target strength in actual areas of survey enhances the correctness of the survey in compare with *ex situ* operating mode when the object target strength could be measured in physical and biological conditions different from those in the surveyed area. Technique of the

* Кузнецов Михаил Юрьевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, e-mail: kuznetsovmt@tinro.ru; Вологдин Владимир Николаевич, кандидат технических наук, научный сотрудник, e-mail: vvologdin@mail.ru.

squid individuals attachment by lead is used that allows to determine experimentally the empirical dependence of the dorsal reflectivity (target strength) of the squid TS on its mantle length ML (for ML 19–27 cm) for the frequencies 70 and 120 kHz: $TS_{70} = 85.54 \lg ML - 161.5$ ($r = 0.90$) and $TS_{120} = 96.55 \lg ML - 173.3$ ($r = 0.95$). The standard equation of form $TS = 20 \lg ML + b$ causes considerable errors, in particular for relatively small and relatively large specimens. Physical and biological factors influencing on measurements of the squid target strength are analyzed. The target strength could be corrected for natural behaviour of squid using its dependence on average angle of swimming (Kang et al., 2005): it differs from the target strength measured for dorsal view in 6 dB, on average (except the squid rush to prey); correspondingly, estimations of the squid abundance and biomass should be corrected. Besides, the target strength of squid depends essentially on frequency of acoustic signal: it decreases for lower frequencies and increases in 0.4 dB for the frequency 96–200 kHz.

Key words: japanese common squid, acoustic survey, split-beam transducer; target strength, squid behaviour, dorsal view, squid mantle length.

Введение

Одной из наиболее важных и непростых задач в акустических методиках оценки численности и биомассы рыб и других морских животных являются измерения рассеивающих свойств морских животных. Впервые такая задача была поставлена около 40 лет назад (Midttun, Hoff, 1963; Love, 1971), однако более полно эта проблема отражена в работе Она с соавторами (1995).

Сила цели (TS) определяется следующим образом (Uric, 1983):

$$TS = 10 \log\left(\frac{\sigma_n}{4\pi}\right), \quad (1)$$

где σ_n — полное акустическое сечение рассеяния цели. Сила цели определяется только в районе действия уравнения гидролокации, т.е. вне ближнего поля антенны и вне ближнего поля цели.

Так как точность прямой оценки биомассы неравномерно распределенных объектов по уловам напрямую зависит от плотности контрольных точек и связанных с этим трудностей при частых попытках облова на обширной площади, то оценки с помощью гидроакустических съемок приобретают большое значение особенно с учетом высокой скорости и непрерывности таких съемок, а также возможности оперативного их повторения. Но для таких съемок необходимо знать TS объекта и учитывать ее зависимость от угла наклона.

Важность точного определения TS гидробионтов иллюстрирует тот факт, что ошибка в измерении TS на 2–3 дБ ведет к значительному смещению оценки запаса (MacLennan, Simmonds, 1992). Кроме этого, такие виды, как кальмар (в сравнении с другими видами гидробионтов), с точки зрения их способности отражать звук в различных физических и биологических условиях до сих пор еще недостаточно исследованы (Kang et al., 2005). Это, видимо, связано в числе прочих причин еще и с трудностями измерений, в частности с тем, что у кальмаров нет плавательного пузыря, а состоят они из мягкой ткани (Mukai et al., 2000).

Сила цели изменяется с изменением трех типов характеристик:

— внутренних к гидробионту — размер (Love, 1971; Kang, Hwang, 2003), морфология (Jech et al., 1995), онтогенез (Horne, 2003), физиология (Olsen et al., 1983a, b);

— внешних к гидробионту — угол наклона (Самоволькин, 1974; MacLennan et al., 1990; Kang et al., 2005), глубина (Francis, Foote, 2003), частота озвучивания (Самоволькин, 1974; Uric, 1983; Foote, 1985);

— поведения гидробионта (на которое влияют как внутренние, так и внешние характеристики).

Наибольший потенциальный источник изменчивости акустической TS — ориентация гидробионта. Множество аспектов поведения, таких как питание, степень концентрации, суточные миграции и реакция убегания от судна, могут повлиять на ориентацию объекта (Olsen et al., 1983a, b). Наряду с этим степень изменчивости TS зависит также от размера гидробионта и используемой частоты.

Кроме этого, несколько основных факторов среды могут влиять на TS через изменения в поведении гидробионтов: температура, соленость, скорость течения, уровень освещенности, сезон и глубина.

Влияние размера и наклона тела свободно плавающих гидробионтов на TS не может быть выделено акустически по зарегистрированной TS. В связи с этим измерения TS на живых кальмарах в садках также имеют определенные трудности. Это возможности случайного наклона кальмара в садке и влияние стенок садка на отраженный сигнал (Kang et al., 2005). Тем не менее данные по исследованию зависимости TS кальмара от его угла наклона представляют существенное практическое значение (при анализе результатов гидроакустических съемок). В работе Kang с соавторами (2005) приводятся результаты измерений углов свободно плавающего кальмара, исследований связи между TS и углом наклона живого кальмара и более точно — анестезированного кальмара *ex situ* у берегов Японии. Найден эмпирическая связь между TS и длиной мантии кальмара, а также средние TS. Более высокие средние TS живого кальмара по сравнению с анестезированным объяснены влиянием низкого угла наклона во время измерений. Приведенные в работе результаты могут быть использованы для интерпретации TS-данных *in situ* для оценки численности и биомассы этого вида гидробионтов.

В работе Kawabata (2005) по измерениям сил целей горизонтально подвешенных живых кальмаров *Todarodes pacificus* и применению средних от этих измерений в оценках плотностей скоплений этого моллюска эхоинтеграционным методом использовалась антенна с расщепленным лучом на частоте 38 кГц. Длина мантии нормализовалась квадратом. Было получено уравнение

$$TS = 20 \log(ML) - 73,1. \quad (2)$$

Вопросы сбора представительных выборок в рыболовстве хорошо описаны Wardle (1983). Кошельковый невод позволяет облавливать только один косяк за замет. Пелагические сети покрывают большие площади, но они обладают ярко выраженной селективностью и облавливают косяки с определенным размерным, возрастным и видовым составом гидробионтов. Существует проблема селективирующего влияния шумового поля судна и орудия лова на траловые оценки размерного ряда гидробионтов, обладающих различными слуховыми способностями (Кузнецов, Вологдин, 2009). Более чем вероятно, что гидробионты неодинаковых размеров будут по-разному облавливаться, и поэтому траловый улов может быть довольно нерепрезентативным относительно истинного размерного (возрастного) и видового распределения. Существует также проблема различия между размерным распределением гидробионтов, пойманных донным и пелагическим орудиями лова, и выбора орудия лова, наиболее репрезентативного для популяции. Полученные в результате обловов размерные распределения могут не соответствовать той генеральной совокупности, по которой было получено распределение сил целей, поэтому может быть не найдена адекватная зависимость TS от размера гидробионтов, а главное, возможно существенное смещение оценки численности гидробионтов.

Таким образом, экспериментальное исследование TS гидробионтов подразделяется на измерения этой характеристики живых свободно плавающих гидробионтов *in situ* или в садках и измерения на подвешенных анестезированных или умерщвленных гидробионтах. В случае измерения TS живых свободно плаваю-

щих гидробионтов *in situ* возникают вопросы выделения одиночных целей алгоритмами эхолотирующей аппаратуры, получения репрезентативной выборки размерного состава гидробионтов и учета угла наклона кальмара от его дорсального аспекта. Нами производились измерения на подвешенных горизонтально свежепойманных снулых кальмарах, хотя и в этом случае имеются определенные проблемы (например, возможность образования воздушных пузырьков в теле кальмара при его даже кратковременном попадании в воздушную среду).

Цель исследований — оценки сил целей тихоокеанского кальмара *T. pacificus* различной длины, обитающего у побережья Приморья, на частотах 70 и 120 кГц для их дальнейшего использования при оценках пространственного распределения, численности и биомассы этого вида гидроакустическим методом.

Материалы и методы

Технические и программные средства

Наиболее подходящими для поиска, съемок и исследования кальмара некоторыми исследователями (Arnold, 1979) считаются частоты 75–200 кГц, однако нами в представляемой работе вполне успешно применена частота 70 кГц, а японскими учеными (Iida et al., 2004; Kawabata, 2005) — еще более низкая частота 38 кГц.

В качестве гидроакустической измерительной системы использовались рыбопоисковый эхолот Simrad ES-60 (120 кГц) и научный эхолот Simrad EY-60 (70 кГц). Для вторичной обработки акустических данных применялось программное обеспечение FAMAS (ТИНРО-центр). Навигационное сопровождение акустического комплекса осуществлялось с использованием системы спутникового позиционирования GPS.

GPT-приемопередатчики эхолотов 70 и 120 кГц, антенна GPS-приемника спутниковой навигации и портативные компьютеры (ноутбуки) с программами накопления и постпроцессинговой обработки акустических данных на двух частотах были установлены на борту судна. Антенны эхолотов, соединенные кабелем с GPT, крепились вертикально с левого борта судна на глубине около 1 м. В эхолотах использована длительность импульса $\tau = 0,256$ мс. Такой размер импульса превышал поперечный размер кальмара, поэтому эхосигнал представлял характеристику всего животного, а не отдельных его частей. Частота посылки — 1 с. Порог по TS составлял -60 дБ (максимальная TS = -20 дБ).

Технология измерений сил целей

Лов тихоокеанского кальмара производился джиггерной снастью с борта судна РБ-036 в зал. Петра Великого в районе с центральными координатами $42^{\circ}58' N$ и $131^{\circ}56' E$. Измерения TS выполняли у побережья о. Русского в районе с координатами $43^{\circ}02' N$ и $131^{\circ}55' E$. Глубина дна во время измерений TS кальмара была около 16 м.

Свежепойманные экземпляры тихоокеанского кальмара (16 шт.) с размерами в интервале 195–272 мм по очереди выводили на ось каждой антенны эхолота. Система крепления включала резиновые поводцы, на которых кальмар подвешивался между оттягивающих лесок с грузом на конце. Схема работ показана на рис. 1. С помощью оттягивающих лесок кальмар в нормальном дорсальном аспекте выводился в центр звукового луча на расстоянии от антенны 3,8 м, а от груза — 1,5 м. При этом все манипуляции с животным производились в воде для предотвращения попадания воздушных пузырьков внутрь и на поверхность кальмара при подвешивании. Глубины места и цели в период измерений отслеживались на мониторах эхолотов. Определение TS производилось по известной методике (SIMRAD ..., 2004).

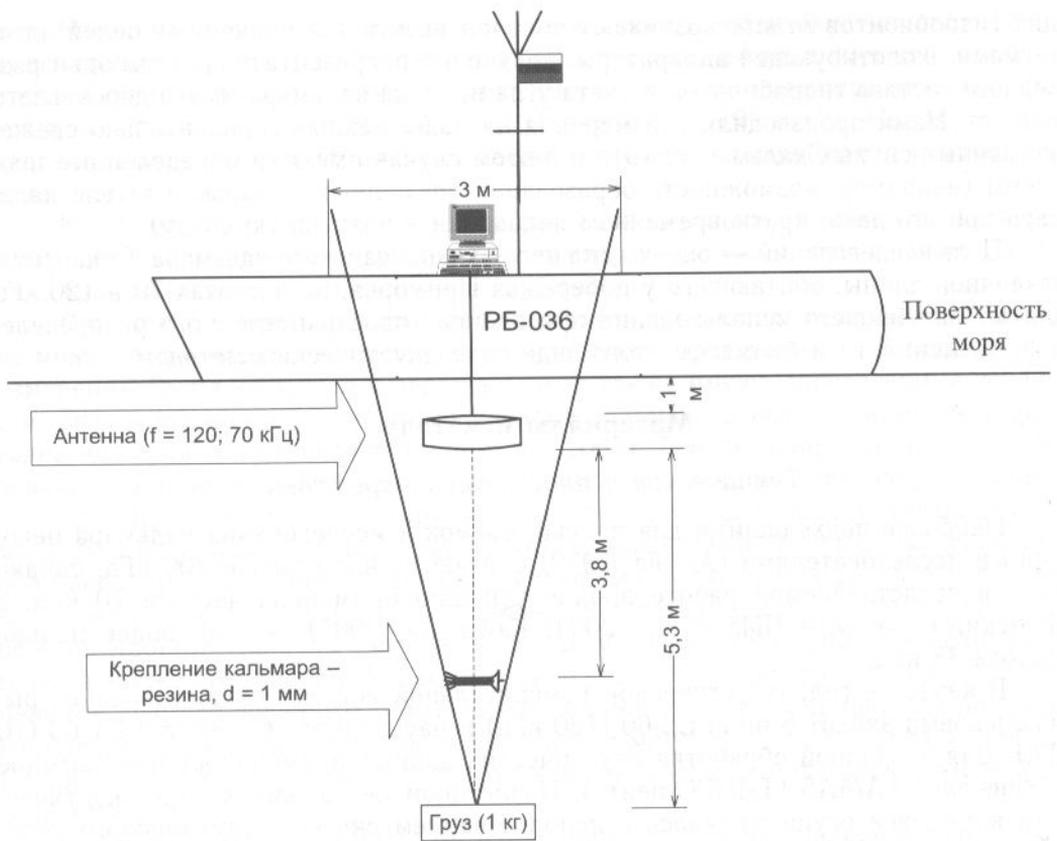


Рис. 1. Схема измерений сил целей тихоокеанского кальмара в дорсальном аспекте летом 2009 г., зал. Петра Великого (Японское море)

Fig. 1. Scheme of the target strength measurements for japanese common squid in dorsal view in summer 2009, the Japan Sea

Построение линий регрессии

Для обработки данных и построения линий регрессии применялся метод наименьших квадратов в программе Statistica v.7.0 (integer mode).

В нашем случае точное определение регрессии невозможно, так как отсутствует информация о форме совместного распределения вероятностей (ввиду недостаточного количества данных). Следовательно, возникает задача приближенного определения регрессии (Кендалл, Стюарт, 1973). При этом выбирается такая функция, которая наилучшим образом представляет величину Y в случае минимизации математического ожидания $E(Y - g(X))^2$. Исходя из опыта и визуального наблюдения разбросов данных, ищем регрессию в виде линейной средней квадратической регрессии. Найдем наилучшую линейную аппроксимацию величины Y по величине X , тогда математическое ожидание $E(Y - g(X))^2$ примет наименьшее возможное значение. Эта задача имеет единственное решение (Кендалл, Стюарт, 1973; Крамер, 1975; Вероятность ..., 1999), и вычисление приближенной линии регрессии приводит к тому же результату, что и для точной линейной регрессии (когда двумерное распределение величин X и Y нормально).

Статистическая обработка результатов измерений

Для корректной статистической обработки данных измерений значения TS в децибелах были переведены в линейные единицы, т.е. в сечения рассеяния σ в квадратных метрах. Далее находили среднюю квадратичную погреш-

ность и доверительные интервалы, как это рекомендуется в литературе по обработке данных измерений (напр.: Клюкин, Колесников, 1968; Гихман и др., 1988), в виде

$$S = \sqrt{\frac{\sum_i (\sigma_i - \bar{\sigma})^2}{n(n-1)}}, \quad (3)$$

где σ_i — результаты отдельных измерений сечений рассеяния кальмара; n — число измерений.

Среднее арифметическое измерений и средняя квадратичная погрешность определялись после устранения грубых ошибок измерений и промахов. При нормальном распределении погрешностей эти измерения определяются с помощью правила “трех сигма”, т.е. с учетом того, что с вероятностью 0,997 измерения, для которых погрешности превышают утроенную среднеквадратичную погрешность s $\sigma_i - \bar{\sigma} \geq 3s$, не входят в доверительный интервал и, следовательно, должны быть выброшены.

Далее определялись среднее арифметическое измерений сечений рассеяния кальмаров и средняя квадратичная погрешность с записью в виде

$$\sigma = \bar{\sigma} \pm S. \quad (4)$$

Для определения результата в децибелах находим относительную среднюю квадратичную погрешность δ :

$$\delta = \pm \frac{S}{\bar{\sigma}}. \quad (5)$$

В нашем случае понимаем под x сечение рассеяния в обратном направлении кальмара. После простых преобразований выражения $\sigma = \sigma(1 \pm \delta)$ получаем:

$$TS = \overline{TS} + 10 \log(1 \pm \delta). \quad (6)$$

При небольшой разнице в измерениях (2–5 дБ) можно использовать как наиболее вероятное значение среднеарифметическое отдельных измерений, взятых в децибелах (Клюкин, Колесников, 1968).

Так как у нас имеется сравнительно небольшое число замеров (16), будем определять доверительные интервалы на основе распределения Стьюдента. Доверительную вероятность (надежность) P выберем такую, чтобы получить достаточно короткие доверительные интервалы ($P = 0,999$).

Результат записываем в виде:

$$\bar{\sigma} - t \frac{s}{\sqrt{n}} < \sigma_k < \bar{\sigma} + t \frac{s}{n}, \quad (7)$$

где $\bar{\sigma}$ — среднее арифметическое данных измерений; s — средняя квадратичная погрешность ряда измерений; n — число измерений; σ_k — искомое вероятнейшее значение измеряемой величины.

Для такого представления результатов задача сводится к нахождению по заданному P параметра t при числе измерений нашего эксперимента по таблицам зависимости параметра t от заданного значения P и числа измерений (Бродский, Канн, 1962; Гихман и др., 1988).

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 показана эхограмма, полученная в ходе измерений TS кальмаров, подвешенных на резиновых поводках, с использованием вертикально ориентиро-

ванного преобразователя эхолота на 120 кГц. Рассчитанная с помощью программы Statistica 7.0 линия регрессии для частоты 120 кГц представлена на рис. 3, а для частоты 70 кГц — на рис. 4.

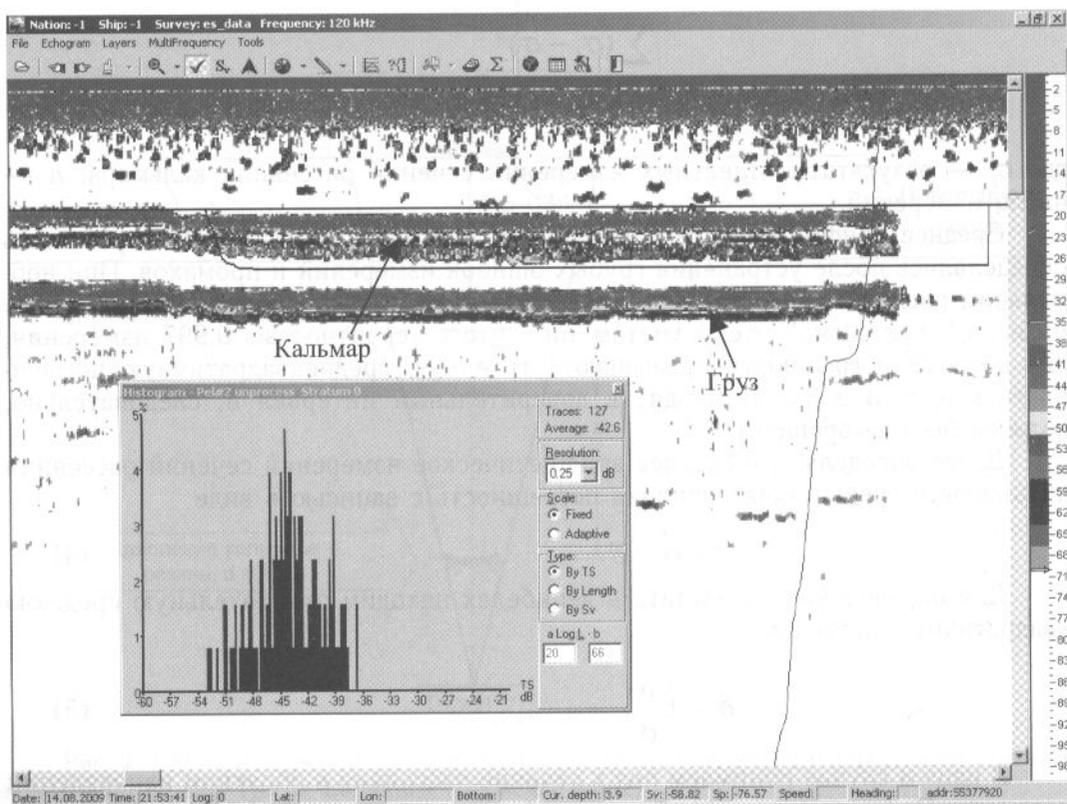


Рис. 2. Эхограмма тихоокеанского кальмара ($ML = 23,0$ см), подвешенного на поводках в дорсальном аспекте. Использована вертикально ориентированная антенна эхолота ($f = 120$ кГц)

Fig. 2. Echogram of japanese common squid ($ML = 23.0$ cm) attached by lead in dorsal view. Vertical antenna of echo sounder is used, frequency 120 kHz

На 120 кГц средняя сила цели кальмара $\overline{TS} = -42,1$ дБ (при минимальной $TS = -48,1$ дБ и максимальной $TS = -34,3$ дБ, $SE = 1,1$ дБ) превышает соответствующую силу цели на 70 кГц ($TS = -44,6$ дБ, минимальная $TS = -52,3$ дБ, максимальная $TS = -37,9$ дБ, $SE = 1,0$ дБ) при преобразовании в сечение рассеяния в обратном направлении $\sim 1,8$ раза, что обусловлено физическими процессами рассеяния звука телом беспузырного гидробионта с указанными размерами на этих частотах. Указанное соотношение несколько меньше приведенного для рыбы с плавательным пузырем (с часто встречающимся наклоном $2,5^\circ$ в сторону головы) из литературных данных (Самоволькин, 1974) и резиновых моделей рыб вследствие того, что и рыбы, и их модели в несколько раз меньше (по размерам) по отношению к длине волны, чем рассматриваемые нами кальмары, и поэтому зависимости их акустических сечений рассеяния от частоты значительно более изрезаны, чем в случае с кальмаром. Приведенные данные могут способствовать анализу оценок результатов гидроакустических съемок на различных частотах.

Существующая проблема учета зависимости отражательных свойств морских гидробионтов от их углового ракурса облучения успешно решается. Роль этой зависимости в спинном аспекте значительна (Самоволькин, 1974), пример приведен на рис. 5.

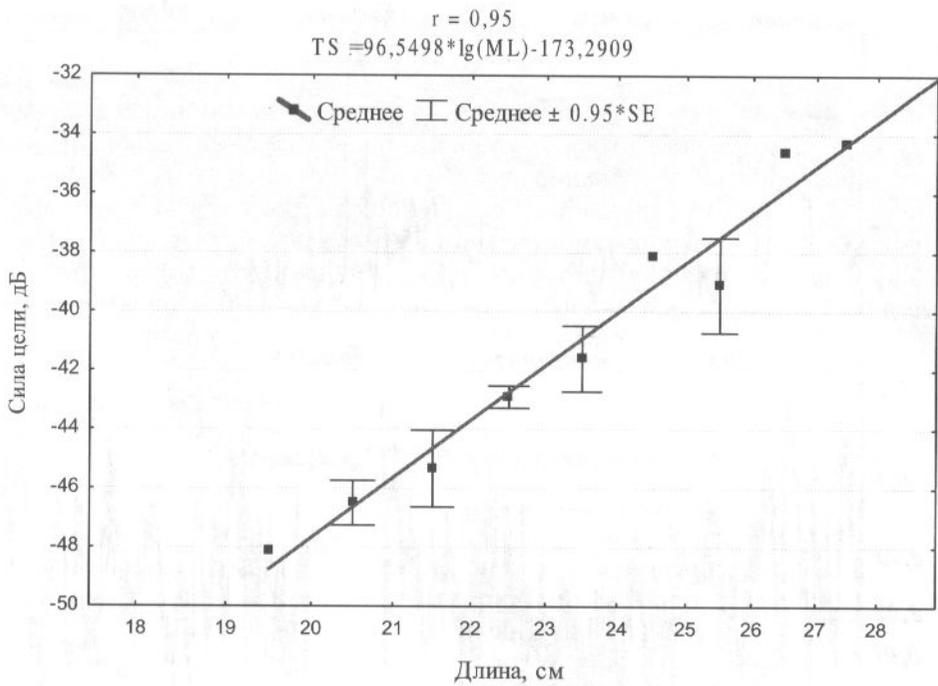


Рис. 3. Изменение средней силы цели кальмара в дорсальном аспекте в зависимости от средних размеров мантии; частота $f = 120$ кГц, $r = 0,95$ (коэффициент корреляции), SE — стандартная ошибка (SE для силы цели равна 1,1 дБ)

Fig. 3. Dependence of mean target strength of squid (dorsal view) on its mean mantle length, frequency 120 kHz ($r = 0.95$; standard error 1.1 dB)

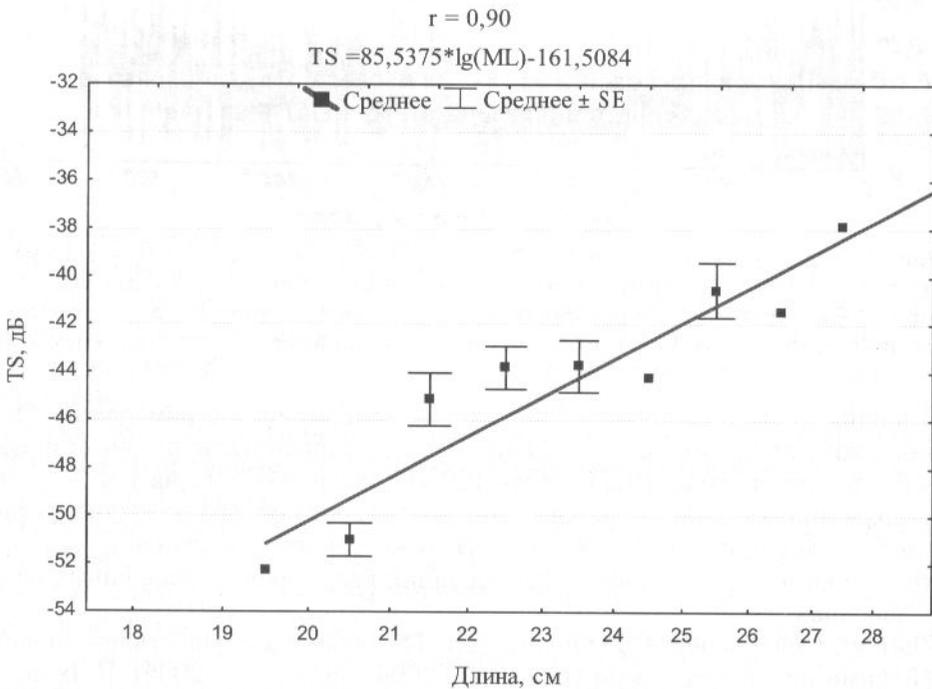


Рис. 4. Изменение средней силы цели кальмара в дорсальном аспекте в зависимости от средних размеров мантии; частота $f = 70$ кГц, $r = 0,90$ (коэффициент корреляции), SE — стандартная ошибка (SE для силы цели равна 1,0 дБ)

Fig. 4. Dependence of mean target strength of squid (dorsal view) on its mean mantle length, frequency 120 kHz ($r = 0.90$; standard error 1.0 dB)

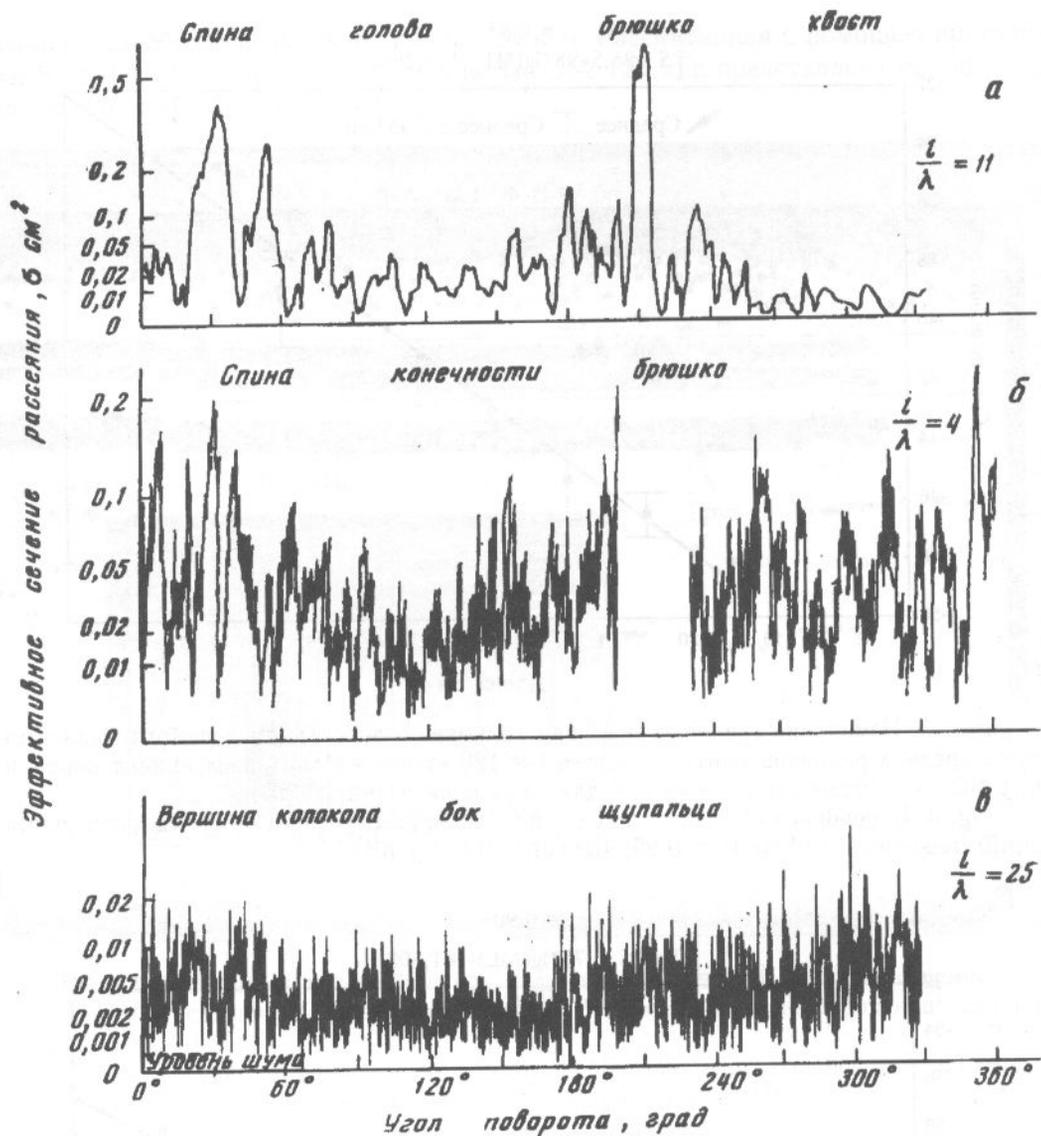


Рис. 5. Угловые зависимости обратного рассеяния: а — карася ($l = 8,4$ см); б — краба ($l = 3,0$ см); в — медузы с диаметром колокола 19 см, частота 200 кГц

Fig. 5. Backscattering angle dependencies for certain species: а — crucian (size 8.4 cm), б — crab (size 3.0 cm), в — jellyfish (bell diameter 19 cm), frequency 200 kHz

В наших исследованиях был выполнен эксперимент по измерению TS привязанного живого кальмара, помещенного в луч горизонтально ориентированного преобразователя эхолота на частоте 120 кГц, погруженного на 1 м. Акустическое изображение кальмара в режиме горизонтального обзора показано на рис. 6. Силы цели кальмаров в среднем на 4 дБ ниже таковых, полученных на той же частоте в режиме вертикального сканирования кальмаров, подвешенных на резиновых поводках.

Учет углового аспекта облучения для TS кальмара осуществлен японскими и корейскими исследователями (Iida et al., 2004; Kang et al., 2005). В их исследованиях средний угол наклона головной части кальмара *T. pacificus* ниже горизонтальной оси в свободном плавании оказался равным $-17,7^\circ$ (стандартное отклонение = $\pm 12,7^\circ$). Основанная на измерениях привязанного кальмара корреляция между TS и углом наклона была высокой, а зависимость выражалась следующим образом:

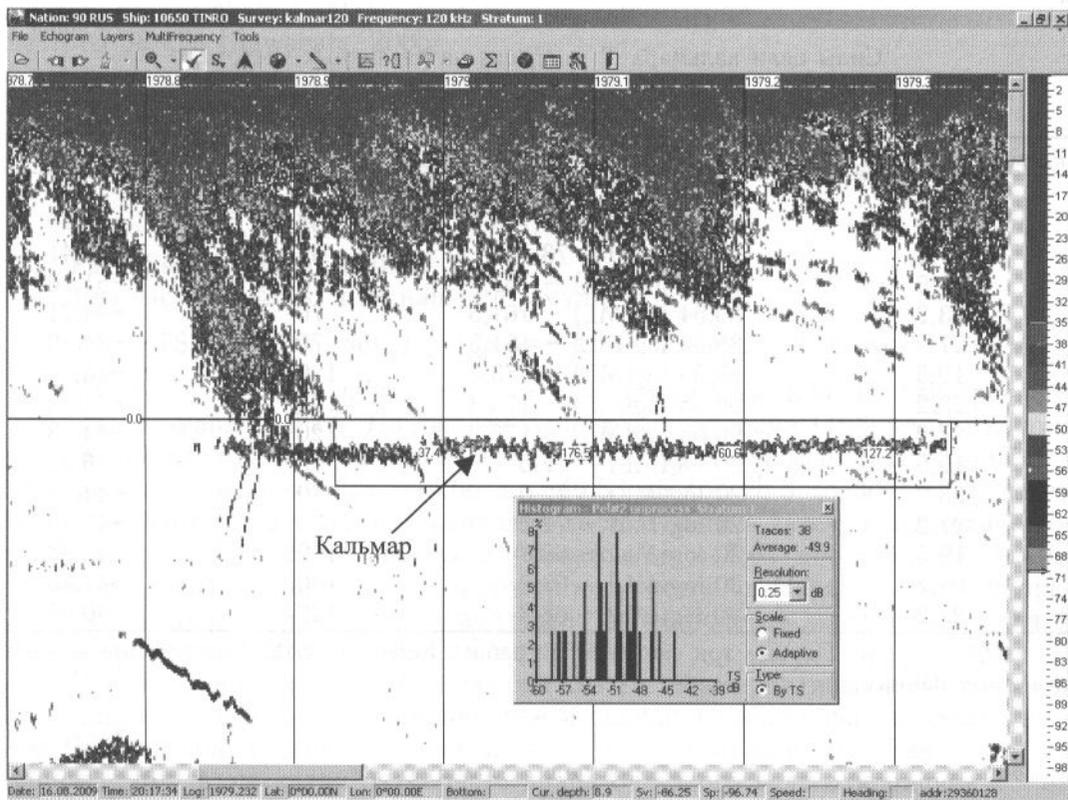


Рис. 6. Акустическое изображение привязанного живого кальмара ($ML = 22,0$ см) в луче горизонтально ориентированного преобразователя эхолота на частоте 120 кГц (расстояние до цели 8 м)

Fig. 6. Acoustical image of alive japanese common squid ($ML = 22.0$ cm) attached by lead in the horizontally oriented beam (frequency 120 kHz; distance to target 8 m)

$$b_{20} = -73,3 + 0,48x\theta + 0,0122x\theta^2 + 0,00016x\theta^3 \text{ для } 38 \text{ кГц } (\gamma = 0,96); \quad (8)$$

$$b_{20} = -72,6 + 0,53x\theta + 0,0134x\theta^2 + 0,00014x\theta^3 \text{ для } 120 \text{ кГц } (\gamma = 0,92), \quad (9)$$

где θ — отрицательный угол наклона в градусах.

Таким образом, при выясненном среднем угле наклона кальмара этого вида ($-17,7 \pm 12,7^\circ$) свободный член уравнения регрессии уменьшается, а сама линия регрессии смещается вниз на соответствующее число децибел. Например, на частоте 38 кГц (по: Kawabata, 2005) среднее уменьшение TS этого вида кальмара при указанном его среднем наклоне относительно горизонтального положения составляет 5,76 дБ (или для сечения рассеяния — в 3,8 раза). Для частоты 120 кГц (наши данные, табл. 1) это уменьшение составляет 9,76 дБ (сечения рассеяния — в 9,4 раза).

Из результатов эксперимента и данных табл. 1 и 2, а также из работ Агпауа и Сапо (1990а, б), Госс с соавторами (1998) видно, что TS живого, свободно плавающего кальмара ниже, чем умерщвленного и подвешенного под антенной для измерений, так как озвучивание свободно плавающего кальмара отличается (из-за различных углов наклона кальмара) от чисто дорсального аспекта. Поскольку в результате экспериментов с умерщвленным кальмаром мы имеем уравнения связи TS приведенного вида с его длиной, то поправку на аспект облучения во время съемки скоплений кальмара можно ввести из приведенного выше уравнения (Iida et al., 2004).

Рассмотрим изменение TS тихоокеанского кальмара с частотой. Рассчитаем TS для трех частот по среднему размеру кальмаров, участвовавших в экспери-

Таблица 1

Силы цели кальмара *T. pacificus* на различных частотах

Table 1

Target strength of japanese common squid for different frequencies

Размер кальмара, см	Формула	Частота, кГц	Сила цели, дБ
19,5	$20 \log(ML) - 73,1$	38	-47,30
23,2	$20 \log(ML) - 73,1$	38	-45,79
27,2	$20 \log(ML) - 73,1$	38	-44,41
19,5	$85,54 \log(ML) - 161,5$	70	-51,16
23,2	$85,54 \log(ML) - 161,5$	70	-44,71
27,2	$85,54 \log(ML) - 161,5$	70	-38,80
19,5	$96,55 \log(ML) - 173,3$	120	-48,74
23,2	$96,55 \log(ML) - 173,3$	120	-41,45
27,2	$96,55 \log(ML) - 173,3$	120	-34,78
19,5	$20 \log(ML) - 72,0$	70	-46,22
23,2	$20 \log(ML) - 72,0$	70	-44,71
27,2	$20 \log(ML) - 72,0$	70	-43,33
19,5	$20 \log(ML) - 68,8$	120	-42,96
23,2	$20 \log(ML) - 68,8$	120	-41,45
27,2	$20 \log(ML) - 68,8$	120	-40,07

Примечание. Первые три формулы по работе Kawabata (2005), остальные — собственные данные.

Таблица 2

Силы цели кальмаров

Table 2

Target strengths of certain squids

Вид	Длина (дорсальная длина мантии), см	Частота, кГц	TS, дБ (мин. и макс. или сред.)	Источник данных
<i>Todarodes pacificus</i>	14,8–29,2	50,0	-46,30	-32,30* Arnaya et al., 1988
<i>Ommastrephes bartrami</i> (замороженный и подвешенный)	15,2–28,1	200,0	-42,40	-30,0* Arnaya et al., 1989a
<i>Todarodes pacificus</i> (живой)	16,0	28,5 96,2	-51,35 -54,60	Arnaya et al., 1989b
<i>Todarodes pacificus</i> (живой)	23,67	28,5 50,0 96,2 200,0	-45,66 -46,53 -48,04 -47,62	Arnaya et al., 1989c
<i>Todarodes pacificus</i> (живой)	24,75	38,0 120,0	-47,50 -45,60	Kang et al., 2005
<i>Todarodes pacificus</i> (живой подвешенный)	18,0–28,4	38,0	-47,99	-45,21* Kawabata, 2005
<i>Todarodes pacificus</i> (свежепойманный и подвешенный)	23,20	120,0	-41,45*	Наши данные
<i>Todarodes pacificus</i> (свежепойманный и подвешенный)	23,20	70,0	-44,71*	"

* Получено из регрессионного уравнения.

ментах, по Kawabata (2005) и нашим измерениям (табл. 1, 2). По формуле для частоты 38 кГц (Kawabata, 2005)

$$TS_{38} = 20 \log(ML) - 73,1 = -45,79 \text{ дБ}, \quad (10)$$

где $ML = 23,2$ см — средний размер кальмара.

По нашей формуле для частоты 70 кГц (кальмар того же размера)

$$TS_{70} = 85,54 \log(23,2) - 161,5 = -44,71 \text{ дБ}. \quad (11)$$

Разница составляет 1 дБ.

Для частоты 120 кГц по нашей формуле

$$TS_{120} = 96,55 \log(L) - 173,3 = -41,45 \text{ дБ}, \quad ML = 23,2 \text{ см}. \quad (12)$$

То есть TS на 120 кГц больше, чем на 38 кГц на 4,34 дБ для среднего размера кальмара 23,2 см. По данным Агпауа с соавторами (1989а–с) и нашим измерениям для близкого среднего размера кальмара *T. pacificus* ($ML = 23,67$ см) TS сначала уменьшается от $-45,66$ до $-46,53$ дБ (от 28,5 до 50,0 кГц), далее опять уменьшается до $-48,04$ дБ (от 50,0 до 96,2 кГц), а затем, при увеличении частоты от 96,2 до 200,0 кГц, увеличивается до $-47,62$ дБ (табл. 2). Таким образом, изменение силы цели с частотой не монотонно. Наряду с этим из предыдущего видно, что оно носит значительно более пологий характер, чем для σ резиновой модели по В.Г. Самоволькину (1974).

Использование уравнений регрессии для TS , нормированных к $20 \log(ML)$, приводит к значительным погрешностям в оценке TS кальмара на обоих хвостах распределения длин: как слева, так и справа от средней. Как видно из данных табл. 1, на краях размерного диапазона этого вида отклонение TS на частоте 120 кГц составляет почти 6 дБ. На частоте 70 кГц это отклонение составляет почти 5 дБ. На погрешности при использовании уравнений с подобной нормировкой при расчетах TS трески, а именно переоценку TS мелких рыб и недооценку — крупных рыб, также справедливо указывалось В.А. Ермольчевым (1999).

Для анализа полученных результатов, где просматривается связь силы цели с частотой озвучивания, обратимся к работам по моделированию рассеивания звука телом гидробионта. В частности, отметим работу И.Б. Андреевой, В.Г. Самоволькиной (1986) по исследованию рассеивающих свойств эллипсоидальной и цилиндрической форм, представляющих собой тонкие резиновые оболочки, наполненные воздухом (имитация плавательного пузыря рыб). В рамках их модели сечение (σ) примерно пропорционально L^2 . Были приняты следующие посылки.

1. Размеры (объем) плавательного пузыря рыбы пропорциональны соответствующим размерам (объему) тела рыбы. Учитывая инвариантность уравнения (1) относительно линейных преобразований, принимаются во внимание форма и размеры собственно тела рыбы, а не ее плавательного пузыря.

2. В качестве морфологической модели использовался эллипсоид вращения.

Вопрос о соотношении дорсального сечения s , геометрического по своей сути, и акустического сечения σ , определяемого в терминах интенсивностей падающей и отраженной волны, является достаточно сложным и детально проработан только для тел простейшей формы с однородными физическими свойствами.

В известной монографии по промысловой гидроакустике (Uric, 1983) дается только общий вид взаимосвязи σ и s для однородной сферы радиуса r :

$$\sigma(\omega) = s \cdot F(\omega r / c, \rho_1 / \rho, c_1 / c, c_2 / c), \quad (13)$$

где F — так называемая функция формы, зависящей от свойств сферы (ρ_1 — плотность материала сферы, c_1 и c_2 — скорости продольной и поперечной состав-

ляющих акустической волны в материале сферы), от свойств среды (ρ — плотность среды, c — скорость распространения звука в ней) и, что существенно важно, от рабочей частоты эхолота $f = \omega/2\pi$.

Работы многих исследователей (см., напр.: Самоволькин, 1974; Андреева, Самоволькин, 1986) по акустическому моделированию рыб позволили установить ряд характеристик эхолокации рыб. Среди них: увеличение количества лепестков в диаграмме рассеивания с увеличением частоты и размера гидробионтов. Переменяемость максимумов и минимумов в диаграмме направленности рассеивания физически объясняется интерференцией звука от различных частей внутренней структуры тела гидробионтов. Форма диаграммы обратного рассеивания зависит от отношения длины гидробионта к длине волны звука и строения тела гидробионта.

Таким образом, интерференцией (сложением элементарных сигналов с различными фазами, различным для разных частот) и резонансными явлениями можно также объяснить и изменение силы цели с частотой звука. При увеличении частоты, начиная с некоторых значений, уменьшение длины волны резко уменьшает эффекты рассеяния звука на более крупных частях тела, но увеличивает отражательные способности более мелких частей тела кальмара, имеющих отличную от воды плотность. Возможно, этим (и интерференцией) можно объяснить немонотонное изменение силы цели с изменением частоты.

Выводы

Измерены силы цели тихоокеанского кальмара, обитающего в зал. Петра Великого, в зависимости от длины тела. При этом экспериментально получены регрессионные зависимости дорсальной отражательной способности (TS) тихоокеанского кальмара от длины тела на частотах 70 и 120 кГц — соответственно $TS_{70} = 85,54 \log(ML) - 161,5$ ($r = 0,90$) и $TS_{120} = 96,55 \log(ML) - 173,3$ ($r = 0,95$).

Выяснено, что представление уравнений регрессии для сил целей в виде $20 \lg(ML) + b$ приводит к значительным погрешностям при оценке TS кальмара на обоих хвостах распределения длин: как слева, так и справа от средней (особенно на краях размерного диапазона этого вида) — и является неудовлетворительным.

Совместное использование полученных в результате измерений и общепринятых данных зависимости TS тихоокеанского кальмара от средних углов наклона и плавания позволяет уточнить TS кальмара для его естественного поведения в среде обитания (исключая его броски за жертвой во время кормления).

Сила цели тихоокеанского кальмара существенно зависит от частоты звука, и это изменение не монотонно, так как, уменьшаясь на меньших частотах с ростом частоты до 96 кГц, при дальнейшем росте частоты в частотном интервале от 96 до 200 кГц сила цели возрастает на 0,4 дБ.

Рассчитанные зависимости силы цели кальмара от длины его мантии на частотах 70 и 120 кГц с учетом углов наклона дают возможность их применения в эхоинтеграционно-траловых съемках для оценок запасов кальмара *T. pacificus* в тихоокеанских водах России.

Список литературы

- Андреева И.Б., Самоволькин В.Г. Рассеивание акустических волн на морских организмах : монография. — М. : Мир, 1986. — 104 с.
- Бродский А.Д., Канн В.А. Краткий справочник по математической обработке результатов измерений. — М. : Стандартгиз, 1962.
- Вероятность и математическая статистика. Энциклопедия. — М. : Больш. Рос. энцикл., 1999. — 910 с.
- Гихман И.И., Скороход А.В., Ядренко М.И. Теория вероятностей и математическая статистика : монография. — Киев : Выща школа, 1988. — 440 с.

- Ермольчев В.А.** О проблемах и перспективах определения размерного состава рыб в скоплениях гидроакустическим методом // Развитие технических методов рыбохозяйственных исследований. — Мурманск : ПИНРО, 1999. — С. 13–41.
- Кендалл М.Дж., Стьюарт А.** Статистические выводы и связи : монография. — М. : Наука, 1973. — 900 с.
- Клюкин И.И., Колесников А.Е.** Акустические измерения в судостроении : монография. — Л. : Судостроение, 1968. — 403 с.
- Краммер Г.** Математические методы статистики : монография. — М., 1975. — 648 с.
- Кузнецов М.Ю., Вологдин В.Н.** Гидроакустические шумы промысловых и научно-исследовательских судов и их влияние на поведение и оценки запасов рыб (обзор и перспективы исследований) // Изв. ТИНРО. — 2009. — Т. 157. — С. 334–355.
- Самоволькин В.Г.** Зависимости сечения обратного рассеяния звука небольших рыб, ракообразных и медуз от их ракурса // Океанол. — 1974. — Т. 14, вып. 5. — С. 806–812.
- Arnaya I.N., Sano N.** Studies on acoustic target strength of squid. V. Effect of swimming on target strength of squid // Bull. Fac. Fish. Hokk. Univ. — 1990a. — Vol. 41(1). — P. 18–31.
- Arnaya I.N., Sano N.** Studies on acoustic target strength of squid. VI. Simulation of squid target strength by prolate spheroidal model // Bull. Fac. Fish. Hokk. Univ. — 1990b. — Vol. 41(1). — P. 32–42.
- Arnaya I.N., Sano N., Iida K.** Studies on acoustic target strength of squid. I. Intensity and energy target strength // Bull. Fac. Fish. Hokk. Univ. — 1988. — Vol. 39. — P. 187–200.
- Arnaya I.N., Sano N., Iida K.** Studies on acoustic target strength of squid. II. Effect of behaviour on averaged dorsal-aspect target strength // Bull. Fac. Fish. Hokk. Univ. — 1989a. — Vol. 40(2). — P. 83–99.
- Arnaya I.N., Sano N., Iida K.** Studies on acoustic target strength of squid. III. Measurement of the mean target strength of small, live squid // Bull. Fac. Fish. Hokk. Univ. — 1989b. — Vol. 40(2). — P. 100–115.
- Arnaya I.N., Sano N., Iida K.** Studies on acoustic target strength of squid. IV. Measurement of the mean target strength of relatively large-sized live squid // Bull. Fac. Fish. Hokk. Univ. — 1989c. — Vol. 40(3). — P. 169–181.
- Arnold G.P.** Squid — a review of their biology and fisheries. — Lowestoft : Ministry of Agriculture Fisheries and Food Directorate of Fisheries Research, 1979. — Laboratory Leaflet № 48. — 37 p.
- Foote K.G.** Rather-high-frequency sound scattering by swimbladdered fish // J. Acoust. Soc. Am. — 1985. — Vol. 78. — P. 688–700.
- Francis D., Foote K.G.** Depth-dependent target strengths of gadoids by the boundary-element method // J. Acoust. Soc. Am. — 2003. — Vol. 114. — P. 3136–3146.
- Goss C., Rodhouse P., Watkins J.L., Brierley A.S.** Attribution of acoustic echoes to squid in the South Atlantic // CCAMLR Science. — 1998. — Vol. 5. — P. 259–271.
- Horne H.J.** The influence of ontogeny, physiology and behaviour on the target strength of walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) // ICES J. Mar. Sci. — 2003. — Vol. 60. — P. 1063–1074.
- Iida D.K., Mukai K., Hwang T.D.** Acoustic target strength of Japanese common squid, *Todarodes pacificus*, and important parameters influencing its TS: swimming angle and material properties // MTTs/IEEE TECHNO-OCEAN '04. — Kobe, Japan, 2004. — Vol. 1. — P. 364–369.
- Jech J.M., Schael D.M., Clay C.S.** Application of three sound-scattering models to threadfin shad (*Dorosoma petenense*) // J. Acoust. Soc. Am. — 1995. — Vol. 98. — P. 2262–2269.
- Kang D., Hwang D.** Ex situ target strength of rockfish (*Sebastes schlegeli*) and red seabream (*Pagrus major*) in the Northwest Pacific // ICES J. Mar. Sci. — 2003. — Vol. 60. — P. 538–543.
- Kang D., Mukai T., Iida K. et al.** The influence of tilt angle on the acoustic target strength of the Japanese common squid (*Todarodes pacificus*) // ICES J. Mar. Sci. — 2005. — Vol. 62. — P. 779–789.
- Kawabata A.** Target strength measurements of suspended live ommastrephid squid, *Todarodes pacificus*, and its application in density estimations // Fisheries Science. — 2005. — Vol. 71, № 1. — P. 63–72.

- Love R.H.** Dorsal-aspect target strengths of an individual fish // J. Acoust. Soc. Am. — 1971. — Vol. 49. — P. 816–823.
- MacLennan D.N., Magurran A.E., Pitcher T.J., Hollingworth C.E.** Behavioural determinants of fish target strength // Rapp. P.-v. Reun. Cons. Int. Explor. Mer. — 1990. — Vol. 189. — P. 245–253.
- MacLennan D.N., Simmonds E.J.** Fisheries Acoustics. — L. : Chapman and Hall, 1992. — 325 p.
- Midttun L., Hoff I.** Measurements of the reflection of sound by fish // Fisk. Dir. Skr. Ser. HavUndrs (FiskeriDirectoratets Skrifter Serie HavUndersokelser). — 1963. — Vol. 13. — P. 1–18.
- Mukai T., Iida K., Sakaguchi K., Abe K.** Estimations of squid target strength using a small cage and theoretical scattering models // The Proceedings of the JSPS-DGHE International Symposium on Fisheries Science in Tropical Area. — Bogor, Indonesia, 2000. — P. 135–140.
- Olsen K., Angell J., Pettersen F., Lovik A.** Observed fish reactions to a surveying vessel with special reference herring, cod, capelin and polar cod // FAO Fish. Rep. — 1983a. — Vol. 300. — P. 131–138.
- Olsen K., Angell J., Lovik A.** Quantitative estimations of the influence of fish behavior on acoustically determined fish abundance // FAO Fish. Rep. — 1983b. — Vol. 300. — P. 139–149.
- Ona E., Traynor J., Holliday D. et al.** Report of the study group on target strength Methodology. — Int. Coun. Explor. Sea. (ICES), 1995. — C.M. 1995/B:3. — 119 p.
- SIMRAD ER60 Scientific echo sounder application. Operator manual.** — Horten, Norway, 2004. www.simrad.com.
- Uric R.J.** Principles of Underwater Sound for Engineers. — N.Y. : McGraw-Hill, 1983. — 384 p.
- Wardle C.S.** Fish reaction to towed gears // Marine Biology at Sea. — L. : Academic Press, 1983. — P. 167–195.

Поступила в редакцию 28.01.10 г.