

УДК 597.553.2:534.6(282.256.341)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ИЗМЕРЕНИЮ СИЛЫ ЦЕЛИ БАЙКАЛЬСКОГО ОМУЛЯ НА ЧАСТОТЕ 200 КГц**¹Макаров М.М., ²Дегтев А.И., ¹Ханаев И.В., ¹Кучер К.М., ¹Смолин И.Н.,
¹Небесных И.А., ¹Аношко П.Н., ¹Дзюба Е.В.**¹*ФГБУН Лимнологический институт Сибирского отделения Российской академии наук,
Иркутск, e-mail: mmmsoft@hlserver.lin.irk.ru;*²*ООО «ПромГидроакустика», Петрозаводск*

Байкальский омуль – основной промысловый вид озера Байкал, учет численности и биомассы которого является задачей рационального природопользования. Достоверные оценки запасов рыб гидроакустическим методом можно получить, применяя видоспецифичное уравнение зависимости силы цели от длины рыбы, согласованное с рабочей частотой гидроакустической аппаратуры. Цель исследования – определение коэффициентов зависимости акустической отражательной способности единичного экземпляра байкальского омуля от его длины на частоте 200 кГц. Экспериментальные работы проводили в 2010 г. на озере Байкал с борта НИС «Г. Титов». Были применены двухчастотные гидроакустические комплексы с трансдьюсерами типа «один луч»: основной – на базе эхолота Furuno FCV1100 и референтный – в составе системы AsCor на базе эхолота Furuno LS6000. Живых рыб помещали в садок и проводили запись индивидуальных эхо-откликов. Для выделения сигнала от рыбы на фоне реверберационной помехи от садка применялся режим короткой длительности зондирующего импульса. Полученное видоспецифичное уравнение $TS = 20Lg(L) - 63,45$, согласованное с рабочей частотой гидроакустической аппаратуры 200 кГц может быть рекомендовано для расчетов биомассы байкальского омуля.

Ключевые слова: гидроакустический метод, сила цели, *Coregonus migratorius*, оз. Байкал**EXPERIMENTAL STUDIES FOR MEASURING THE TARGET STRENGTH OF THE BAIKALIAN OMUL AT THE FREQUENCY OF 200 KHZ****¹Makarov M.M., ¹Degtev A.I., ¹Khanaev I.V., ¹Kucher K.M., ¹Smolin I.N.,
¹Nebesnykh I.A., ¹Anoshko P.N., ¹Dzyuba E.V.**¹*Limnological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, e-mail: mmmsoft@hlserver.lin.irk.ru;*²*«PromGidroakustika», Petrozavodsk*

Baikal omul is the main commercial species of Lake Baikal. Accounting for its population and biomass is a task of rational nature management. Reliable estimates of fish stocks using a hydroacoustic method can be obtained by using a species-specific equation of dependence of fish target strength from its length, consistent with the operating frequency of hydroacoustic equipment. The aim of the study was to determine the coefficients of dependence of the single fish acoustic reflectivity from its length for 200 kHz isonification frequency. Experimental works were carried out on Lake Baikal in 2010 from the board of the RV «G. Titov». Two-frequency sonar complexes with «one beam» type transducers were used: the main one was based on the Furuno FCV1100 echosounder and the reference one – on the Furuno LS6000 (as part of the AsCor system). Alive fish were placed in a cage and individual echo responses from it was recorded. To separate the fish echosignal from the reverberation and interference of the cage, a short duration pulses were used. The obtained species-specific equation $TS = 20Lg(L) - 63.45$ can be recommended for calculating the biomass of the Baikal omul on data obtained by 200 kHz hydroacoustic equipment.

Keywords: hydroacoustic method, target strength, *Coregonus migratorius*, Lake Baikal

Гидроакустические методы (ГАМ) широко используются для оценки и мониторинга популяций рыб [1]. Задача количественной оценки численности гидробионтов ГАМ решается в два этапа: 1) измерение акустических целей и 2) интерпретация набора полученных данных в значение абсолютной численности гидробионтов на обследованной акватории. При условии возможности видовой дифференциации зарегистрированных скоплений или отдельных особей метод позволяет восстановить размерную структуру исследованного комплекса рыб и, на основе соотношения длина – масса, определить общую биомассу рыб [2].

Изменчивость интенсивности эхо-сигналов от водных организмов обусловлена не только физическими факторами, связанными с передачей звука через воду, а также их биологическими особенностями [3]. Измерение интенсивности эхо-сигналов от рыбы достаточно сложно, так как зависит от размеров, формы и анатомии их тела, а также поведения [4]. Наиболее значимым параметром является наличие или отсутствие заполненного газом плавающего пузыря [5, 6]. Интенсивность эхо-сигнала от рыбы не менее чем на 90% определяется его отражением от плавающего пузыря [7].

Существующие методы определения силы цели (от англ. – Target Strength, *TS*) рыбы недостаточно точны, поскольку не обеспечены надежными рабочими стандартами. Разработка их с помощью анализа уловов не приносит хороших результатов из-за селективности орудий лова, отсутствия данных о распределении длин и поведении рыб [5]. Размер каждой особи восстанавливается из зарегистрированного эхолотом значения *TS*. Основной проблемой пересчета значения *TS* является получение адекватной видоспецифичной зависимости с учетом используемых в ГАМ рабочих частот эхолота. В 2006 г. специалистами Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (ВНИРО) и Лимнологического института (ЛИН СО РАН) совместно были проведены экспериментальные работы по измерению *TS* байкальского омуля *Coregonus migratorius* (Georgi, 1775) в садке [8]. Измерения проводили с помощью эхолота EY500 фирмы Kongsberg Simrad (рабочая частота 70 кГц) с антенной с расщепленным лучом ES 70-11 (диаграмма направленности 11 градусов) [9]. Использование гидроакустического комплекса с частотой 200 кГц требует повторного проведения эксперимента для уточнения силы цели.

Цель исследования – определение коэффициентов регрессионной зависимости линейно-логарифмического вида отражательной способности единичного экземпляра байкальского омуля от его длины при использовании частоты 200 кГц.

Материалы и методы исследования

Мера отражательной способности одиночной цели обычно определяется как сечение обратного рассеяния из соотношения интенсивностей падающей и возвращенной звуковой волны:

$$\sigma = 4\pi R^2 \frac{I_b}{I_i}, \tag{1}$$

где σ – сечение обратного рассеяния;
R – дистанция, на которой происходят измерения;

I_b – интенсивность сигнала, измеренная в середине отраженного импульса;

I_i – интенсивность сигнала, измеренная в середине падающего импульса.

В промысловой гидроакустике используется сила цели, значение которой определяется выражением

$$TS = 10 \lg \left. \frac{I_r}{I_i} \right|_{r=1}, \tag{2}$$

где *I_r* – интенсивность отраженной волны на единичной дистанции;

I_i – интенсивность падающей волны на единичной дистанции.

В промысловой гидроакустике зависимость *TS* рыбы от её длины обычно выражается в виде

$$TS = A \text{Log}(L) - B, \tag{3}$$

где *L* – длина рыбы, см;

A и *B* – эмпирические коэффициенты, (как стандарт принято *A* = 20).

Экспериментальные работы проводились с 12 по 20 октября 2010 г. на акватории озера Байкал вблизи мыса Толстый (Южный Байкал) с борта НИС «Г. Титов». В работе использовали два гидроакустических комплекса (табл. 1), основной и референтный.

Основной комплекс выполнен на базе эхолота Furuno FCV1100 с гидроакустической антенной типа «один луч». В качестве референтного комплекса использовалась система AsCor, на базе эхолота Furuno LS6000 [8, 10]. Калибровка обоих комплексов проводилась по стандартной схеме с использованием калибровочных медных сфер [9].

В работе использована аналогичная эксперименту 2006 г. установка (рис. 1). Садок размером 85x85x40 см был растянут между кольцами диаметром 3 м, находящимися на расстоянии ~10 м друг от друга. Над садком подвешивалась эталонная сфера диаметром 45 мм, с уточненной [9] силой цели *TS_{sp}* = –36,2 дБ для рабочей частоты 50 кГц. Для частоты 200 кГц это значение составит $TS = TS_{sp} + 0,9 \text{Log} \left(\frac{50}{200} \right) = -36,7$ дБ. Амплитуду максимального эхосигнала от рыбы сравнивали с амплитудой эхосигнала от сферы. Для работы были взяты рыбы из ставных неводов рыбоводного пункта «Култушная» Большереченского рыбоводного завода (Восточно-Сибирский научно-производственный центр рыбного хозяйства). Живых рыб по одному экземпляру помещали в садок на акустической оси антенны и проводили измерения силы цели на частоте 200 кГц. Общее количество проведенных измерений – 99 экз. в диапазоне промысловых длин от 237 до 368 мм.

Таблица 1

Основные параметры комплексов

| Параметр | Furuno FCV1100 | Furuno LS6000 |
|--|----------------|---------------|
| Рабочая частота, кГц | 200 | 200 |
| Электрическая мощность на антенне, кВт | 3 | 0,3 |
| Используемая длительность импульса, мс | 0,2 | 0,1 |
| Тип гидроакустической антенны | Один луч | Один луч |
| Ширина диаграммы направленности антенны, град. | 5,9 | 14,2 |
| Интегральный фактор направленности антенны, дБ | –22,1 | –14,1 |

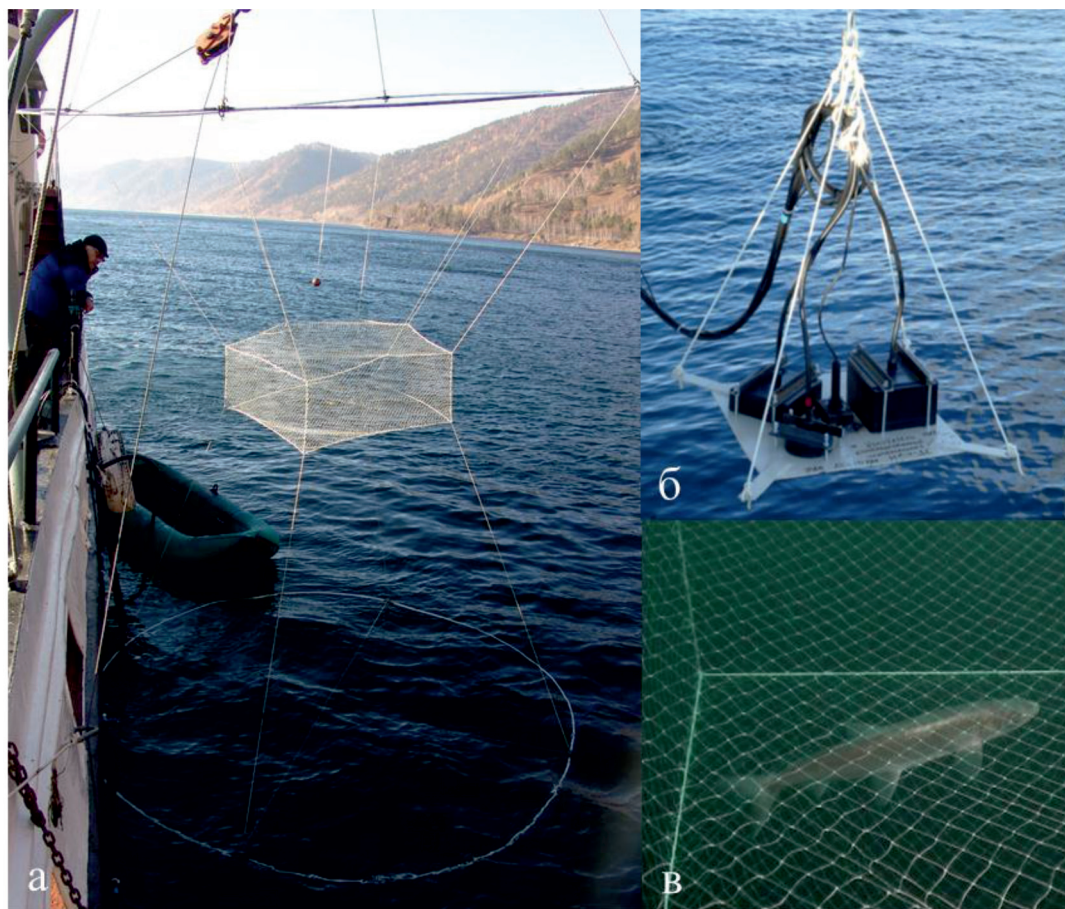


Рис. 1. Экспериментальная установка: а) садок на акустической оси антенны; б) комплекс гидроакустических антенн с рабочими частотами 28, 50 и 200 КГц; в) контрольный снимок подводной видеокамерой для подтверждения естественного положения рыбы в садке

После сеанса записи эхоотклика от рыбы проводили измерения ее промысловой длины. Камеральная обработка полученных записей проводилась в пост-процессинговой системе AsCog [10]. Для этого выделялся фрагмент эхограммы с эталонной целью в том же диапазоне посылок, что и эхосигналы от рыб. Определялась поправка Δ на отклонение положения эталонной цели от акустической оси гидроакустической антенны. Вычислялось значение силы цели рыбы с учетом поправки Δ , для всех эффективных измерений (эхосигнал от рыбы контрастен на фоне эхосигнала от садка). Это зависело от жизнеспособности особи, находящейся в садке. В таком случае рыба активно перемещалась внутри садка и за достаточно длинную серию измерений контрастно регистрировалась. Серии измерений с нежизнеспособными особями, когда эхосигнал от рыбы маскировался эхосигналом от садка, в анализ не включались.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты измерений соотношения силы цели и промысловой длины рыбы, полученные основным и референтным комплексами, представлены на рис. 2. В табл. 2

приведены выражения зависимости силы цели и промысловой длины рыбы для полученных на каждом отдельном комплексе и обобщенных данных.

Для среднего значения TS , используемых в эксперименте рыб, равного – 34 дБ, разница в оценке промысловой длины рыб, на основном и референтном комплексах, составляет не более 3,2%, что не превышает точности методики. В работах ВНИРО использовалась низкая рабочая частота эхолота – 70 кГц, в наших экспериментах – высокая, 200 кГц. Для последующего сравнения полученной нами зависимости TS от промысловой длины рыб с данными ВНИРО [8], последнее было скорректировано на величину $\Delta = 0,9 \text{Log} \left(\frac{70}{200} \right) = -0,41$ дБ. Таким образом, уравнение получило вид $TS = 20 \text{Log}(L) - 63,69$. Результат сравнения представлен на рис. 3. Полученные в ходе выполненных работ, оценки и оценка ВНИРО лежат в пределах доверительного интервала – 95%, то есть статистически значимо неразличимы.

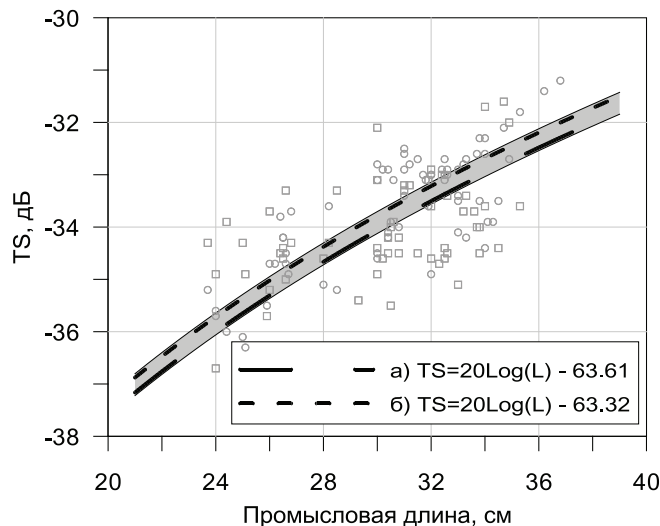


Рис. 2. Графики зависимости силы цели от промысловой длины рыбы, полученные:
а – на основном комплексе и б – на референтном

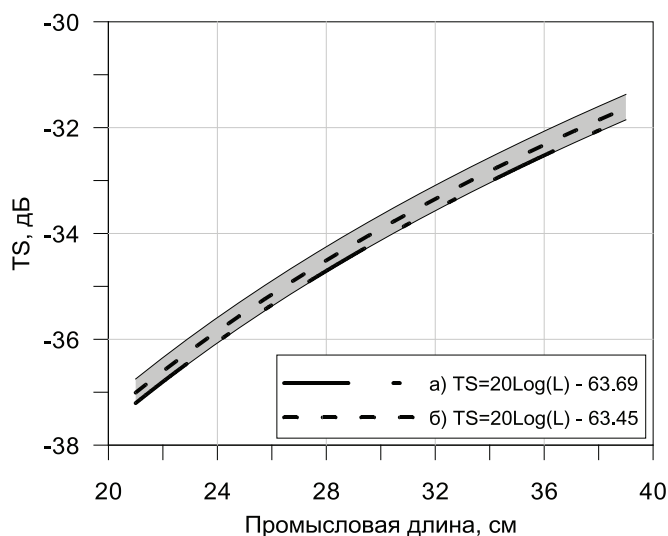


Рис. 3. Зависимости силы цели от промысловой длины рыб, полученные:
а – на основе данных ВНИРО, пересчитанные для 200 кГц [8] и б – на основе наших данных

Таблица 2

Полученные выражения зависимостей

| Комплекс | Выражение | Коэффициент корреляции |
|------------------------------|--------------------------------|------------------------|
| основной | $TS = 20\text{Log}(L) - 63,61$ | 0,47 |
| референтный | $TS = 20\text{Log}(L) - 63,32$ | 0,79 |
| по данным с обоих комплексов | $TS = 20\text{Log}(L) - 63,45$ | 0,66 |

Садок был выполнен из сетной дели, которая на частоте 200 кГц явилась достаточно хорошим отражателем. Амплитуда эхосигнала от садка не ниже, чем амплитуды сферы или рыбы. Поэтому был сделан вывод о неприменимости допущения о контрастности эхосигнала от рыбы в садке

и эхосигнала от самого садка для высокой рабочей частоты 200 кГц. На рабочей частоте нами использовался режим короткой длительности импульса (0,1 мс), что позволило разрешить эхосигнал от рыбы в садке и эхосигнал от самого садка, как реверберационную помеху. В промысловой гидроакусти-

ке принято считать, что если в озвученном объеме, определяемом по формуле (3), находится одна цель – то это одиночная цель, если больше, то говорят о множественных (групповых) целях.

$$V_s = \frac{c\tau\Psi R^2}{2}. \quad (4)$$

Критерием разрешения двух одиночных целей по дистанции может служить выражение

$$\Delta R > \frac{c\tau}{2}, \quad (5)$$

где ΔR – дистанция, на которой находятся две одиночные цели, подлежащие разрешению; c – скорость звука; τ – длительность посылки; Ψ – интегральный фактор направленности; R – дистанция.

Для референтного комплекса – $\Delta R = 7$ см, для основного – $\Delta R = 14$ см. При высоте садка ~ 40 см в диапазоне глубин между верхней и нижней его гранями оставалось достаточно места для разрешимой регистрации рыбы от садка, причем ее условия для референтного комплекса были более оптимальными, что, вероятно, обеспечило большую точность измерений и более высокое значение коэффициента корреляции.

В результате проведенных натуральных экспериментальных работ, камеральной обработки данных и их анализа получены эмпирические зависимости силы цели байкальского омуля от его промысловой длины, сходящиеся с данными других исследователей и соответствующие теоретическим ожиданиям [10]. Уравнение $TS = 20\text{Log}(L) - 63,45$ может быть рекомендовано для расчетов биомассы байкальского омуля на основе данных, полученных ГАМ с рабочей частотой гидроакустических комплексов 200 кГц. Тем не менее корректность применения стандартного коэффициента $A = 20$ (уравнение 3) может быть предметом дальнейших исследований. В многочисленных работах, в том числе по оценке запасов байкальского омуля [10], были использованы уравнения, в которых данный коэффициент значительно отличается от стандартного. Эти уравнения, получены преимущественно на основе траловых уловов рыб *in situ*. Отклонение от стандартного значения может определяться рядом факторов, например, таких, как аллометрические зависимости размеров рыбы и размеров плавательного пузыря. В условиях эксперимента, когда зависимость TS от L не обеспечена высокой корреляцией, оценить коэффициент A с достаточной точностью, с использованием регрессионной

модели, основанной на методе наименьших квадратов, не представляется возможным.

Уравнения со стандартным значением коэффициента A могут быть адекватно использованы, если они рассчитаны с наибольшей точностью для размеров рыб, дающих наибольший вклад в биомассу популяции. У омуля, как у большинства видов рыб, наибольшую биомассу дают особи в возрасте наступления массовой зрелости. У байкальского омуля возраст кульминации ихтиомассы составляет 6–8 лет, при промысловой длине особей 26–37 см [11, 12]. Однако целью ресурсных исследований обычно является не только текущая оценка запасов, но и прогнозирование их возможных изменений, для чего требуется восстановить, по возможности наиболее точно, размерную структуру популяции из значений TS .

Работа выполнена в рамках темы 0345-2016-0002 (AAAA-A16-116122110066-1) «Молекулярная экология и эволюция живых систем Центральной Азии в условиях глобальных экологических изменений». Авторы выражают благодарность за содействие в выполнении исследований директору Большереченского рыбободного завода В.Ю. Матанцеву.

Список литературы

1. Drastik V., Godlewska M., Balk H., Claburn P., Kubeca J., Morrissey E., Hateley J., Winfield I.J., Mrkvic T., Guillard J. Fish hydroacoustic survey standardization: A step forward based on comparisons of methods and systems from vertical surveys of a large deep lake // *Limnology and Oceanography: Methods*. – 2017. – vol. 15. no. 10. – P. 836–846.
2. Parsons, M., Parnum, I. and McCauley, R. Quantifying the acoustics packing density of fish schools with a multi-beam sonar // *Acoustics Australia*. – 2013, vol. 41, no. 1. – P. 107–112.
3. Horne J.K. The influence of ontogeny, physiology, and behaviour on the target strength of walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) // *ICES Journal of Marine Science*. – 2003. – vol. 60. – P. 1063–1074.
4. Furusawa M. Prolate spheroidal models for predicting general trends of fish target strength // *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*. – 1988. – vol. 9, no. 1. – P. 13–24.
5. Ermolchev V.A., Zaferman M.L. Results of experiments on the video-acoustic estimation of fish target strength *in situ* // *ICES Journal of Marine Science*. – 2003. – vol. 60. – P. 544–547.
6. Manik H.M. Quantifying fish backscattering using SONAR instrument and Kirchhoff Ray Mode (KRM) model // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2016. – vol. 739, no. 1. – P. 1–12.
7. Foote K.G. Rather-high-frequency sound scattering by swimbladdered fish // *The Journal of the Acoustical Society of America*. – 1985. – vol. 78. – P. 688–700.
8. Измерение силы цели байкальского омуля для повышения точности оценки его запаса в озере Байкал / С.М. Гончаров [и др.] // *Рыбное хозяйство*. – 2008. – № 3. – С. 87–90.
9. Simrad EK60: Reference Manual. – SIMRAD, Norway. – 2012. – 253 p.
10. Гидроакустический учет ресурсов байкальского омуля / Н.Г. Мельник, Н.С. Смирнова-Залуми, В.В. Смирнов [и др.] // под ред. В.И. Кудрявцев, Е.В. Дзюба. – Новосибирск: Наука, 2009. – 244 с.
11. Базов А.В. Селенгинская популяция байкальского омуля: прошлое, настоящее, будущее / А.В. Базов, Н.В. Базова. – Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2016. – 352 с.
12. Соколов А.В. Методические аспекты рыбохозяйственного мониторинга состояния запасов омуля озера Байкал // А.В. Соколов, В.А. Петерфельд // *Известия КГТУ*. – 2011. – № 22. – С. 182–189.