

Об особенностях количественной оценки запасов байкальского омуля гидроакустическим методом

Д-р техн. наук В.И. Кудрявцев – ВНИРО
А.И. Дегтев – СевНИИРХ
А.В. Соколов – ФГУП «ВостСибрыбцентр»



В 2000 – 2004 гг. ФГУП «ВостСибрыбцентр» проводились регулярные гидроакустические съемки по количественной оценке запасов байкальского омуля с использованием комплекса АСКОР-2 (Дегтев А.И., Ивантер Д.Э. Автоматизированная система количественной оценки рыбных запасов гидроакустическим методом АСКОР-2. «РХ», 2002, № 4). В использованной при проведении съемок конфигурации комплекса источником эхо-сигналов служил эхолот Furuno FCV-291 с рабочей частотой 200 кГц, электрической мощностью в импульсе 1 кВт, длительностью τ -зондирующих импульсов 0,6–0,8 мс, частотой их следования 2–0,5 Гц и акустической антенной Furuno 200В-8 $\Theta_{0,7} = 5,9^\circ$. Максимальная глубина анализа эхо-сигнала по дальности – 250 м, с 2004 г. – 300 м. Гидроакустическая антенна устанавливалась на заборном устройстве штангового типа. Использовалось судно ПТС «Д. Норенко» ФГУП «ВостСибрыбцентр» с бортовой схемой траления, позволяющей выполнять контрольные траления до глубины 100 м при скорости 4 уз. Поэтому для оценки размерно-видового состава облавливаемых скоплений также применялись сети ячеей 12–50 мм общей длиной 300 м.

Из-за ограниченности ресурсов съемки ограничивались наиболее значимыми районами оз. Байкал: Селенгинским мелководьем, Северным Байкалом, зал. Малое Море, Баргузинский и Чивыркуйский площадью 1,5 тыс. км². Тем не менее, они стали обязательным инструментом получения ихтиологической информации при оценке состояния запасов омуля. В то же время остается ряд аспектов, решение которых должно способствовать повышению качества и достоверности результатов съемок: видовая идентификация разнохарактерных гидроакустических регистраций рассеивателей биологической природы; зависимость размер – отражательная способность байкальского омуля; тактика проведения акустических съемок; интерпретация полученных гидроакустическим методом значений численности и биомассы омуля на всю акваторию оз. Байкал.

Гидроакустический метод оценки водных биомасс является вариантом обратной задачи рассеяния. Общая теория обратной задачи рассеяния описывает эхо-сигнал как результат отражательной способности цели, ее нахождения в пространстве и потерь звука на распространение. Один и тот же эхо-сигнал может быть образован разными составами рассеивателей, в том числе и разными плотностями. Определение плотности зарегистрированных объектов как решение обратной задачи рассеяния в гидроакустическом методе количественной оценки водных биомасс требует дополнительной информации о рассеивателях. Базовое положение метода, заключающееся в линейной зависимости энергии эхо-сигнала и плотности рассеивателей, его образовав-

ших, аналитически описывается уравнением интегрирования (MacLenan D.N., Simmonds E.J. Fisheries Acoustics. London, Chapman & Hall, 1992):

$$\bar{\rho} = \frac{C \bar{\delta} \bar{E}}{\Psi \bar{\sigma}}, \quad (1)$$

где:

- $\bar{\rho}$ – средняя плотность рассеивателей в интервале накопления;
- C – сквозная постоянная применяемой акустической системы;
- $\bar{\delta}$ – ошибка компенсации потерь интенсивности звука при его распространении;
- \bar{E} – средняя энергия эхо-сигнала в интервале накопления;
- Ψ – интегральный фактор направленности антенны, идеализированное представление характеристики направленности в виде телесного угла, в пределах которого интегрирование эхо-сигнала даст тот же результат, что и в пределах реальной пространственной характеристики направленности R_{θ} , при условии случайного распределения рассеивателей в озвученном объеме;
- $\bar{\sigma}$ – среднее значение сечения обратного рассеяния объектов, образующих интегрируемый сигнал в интервале накопления.

Из формулы 1 видно, что при прочих равных условиях оценка плотности зависит только от $\bar{\sigma}$. В промысловой гидроакустике различают одиночные и множественные регистрации рыб: если

в единичном объеме, определенном выражением $\frac{c \tau \Psi R^2}{2}$ (где c

– скорость звука; R – дистанция от антенны до цели), находится не более одной рыбы, имеет место одиночная регистрация (рассеянное, разрешаемое скопление), если наоборот – множественная регистрация (неразрешаемое скопление). В случаях разрешаемой регистрации значение сечения $\bar{\sigma}$ объектов, составляющих скопление, может быть получено из восстановленного прямым (расщепленный, двойной луч) или косвенным (вероятностным) методами распределения силы цели (Красильников С.Н., Топилин А.В. Справочная информация и рекомендации по проведению гидроакустических съемок. Обзорная информация. Серия: Промысловая радиоэлектронная аппаратура. М.: ЦНИИТЭИРХ, 1990); в противном случае требуется внешняя информация о составе рассеивателей и их отражательной способности.

На рис. 1 представлена эхограмма с характерной регистрацией рассеивателей биологической природы на Селенгинском мелководье на глубинах 60–200 м, хорошо видны два типа скоплений – разрешаемые и неразрешаемые. В ходе выполнения гидроакустических съемок менее плотные скопления надежно

идентифицировались контрольными обловами тралом и разно-
 ячейным порядком сетей как в основном омулевые, чего нельзя
 сказать о локальных, небольшого объема, но весьма плотных
 (неразрешаемых) концентрациях. Регистрация неразрешаемых
 скоплений отмечалась во всех съемках начиная с 2000 г. на Се-
 ленгинском мелководье и Северном Байкале. В 2002 г. на Се-
 ленгинском мелководье судном «Д. Норенко» была предприня-
 та попытка обловить тралом такое скопление. Облавливаемое
 скопление было акустически зарегистрировано под килем суд-
 на, заход рыбы в трал не регистрировался из-за отсутствия тра-
 лового зонда. Улова омуля в трале не было, кроме объеживав-
 шихся в дели крыльев и кутка единичных экземпляров молоди
 желтокрылки (определяли ихтиологи ВостСибрыбцентра). Судя
 по косвенному признаку – активному нырянию чаек в кильва-
 терный след выбираемого трала, был сделан вывод о вымыва-
 нии из трала молоди желтокрылки и, как следствие, о том, что
 видовой состав обловленного скопления – не омуль. Однако
 имеются и другие мнения.

На рис. 2 представлен тот же фрагмент регистрации рассеива-
 телей биологической природы на Селенгинском мелководье,
 но на глубинах 95–200 м, т.е. небольшие неразрешаемые скоп-
 ления на рис. 1 оставлены вне слоя анализа, а рассмотрены иден-
 тифицированные обловом омулевые скопления. Следует обра-
 тить внимание на линию накопления на обеих эхограммах. Она
 является графическим представлением структуры накопления
 интеграла внутри интервала усреднения; крутизна ее падения
 на определенном участке пропорциональна энергии эхо-сигнала
 и в соответствии с формулой 1 – плотности рассеивателей на
 том же участке эхограммы. Скачкообразная линия накопления
 на рис. 1 кардинально отличается от плавной на рис. 2, где из
 рассмотрения исключены неразрешаемые локальные скопления.
 Легко заметить, что скачки на рис. 1 происходят в тех посылках
 эхолота, где регистрируются неразрешаемые локальные скоп-
 ления, и что большая часть интеграла (как меры энергии эхо-
 сигнала) в пределах эхограммы (см. рис. 1) накоплена на таких
 скоплениях. Это свидетельство высокой отражательной способ-
 ности пространственно небольших неразрешаемых скоплений.
 Известно, что формула 1 может быть представлена в виде:

$$10 \lg(\bar{\rho}) = \overline{SA} - \overline{TS}, \quad (2)$$

где:

\overline{SA} – средняя в интервале усреднения сила поверхностного обрат-
 ного рассеяния, дБ;

\overline{TS} – средняя в интервале усреднения сила цели объектов, со-
 ставляющих интегрируемое скопление, $\overline{TS} = 10 \lg \frac{\sigma}{4\pi}$, дБ.

Результаты измерений средней в интервале усреднения силы
 поверхностного обратного рассеяния для скоплений на рис. 1 и 2
 показывают, что они отличаются на 8,8 дБ (для скоплений на рис.
 1 – в 7,6 раза больше, чем для на рис. 2). Если допустить, что
 состав рассеивателей неразрешаемых скоплений на рис. 1 экви-
 валентен составу рассеивателей разрешаемых скоплений на рис.
 2 по средней силе цели (т.е. если считать, что это тоже омуль), то
 оценки плотности скоплений разойдутся в 7,6 раз в большую сто-
 рону для ситуации, отображенной на рис. 1. Конечно, оценки аб-
 солютной численности рыб на обследованной акватории не разо-
 йдутся так драматически в зависимости от того, включать в
 рассмотрение локальные неразрешаемые скопления неизвест-
 ной биологической природы или нет, как можно было бы ожидать
 по результатам рассмотренного фрагмента. Эти скопления рас-

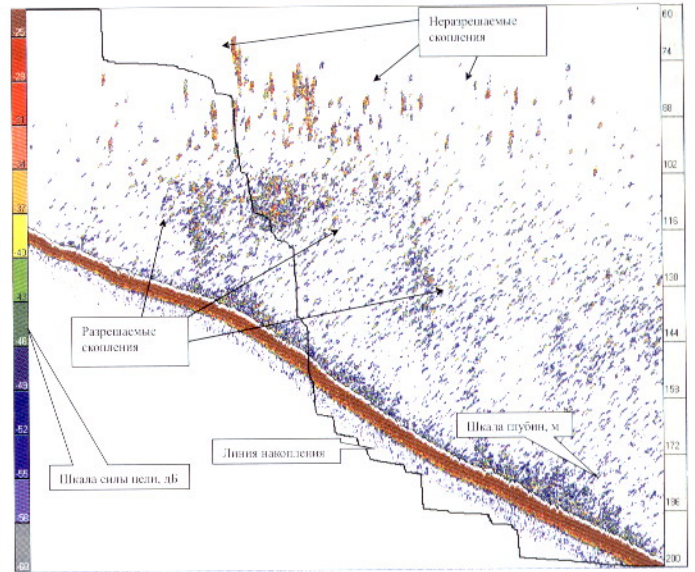


Рис. 1. Фрагмент гидроакустической регистрации рассеивателей биологической природы на Селенгинском мелководье в диапазоне глубин 60–200 м, 2 июня 2004 г.

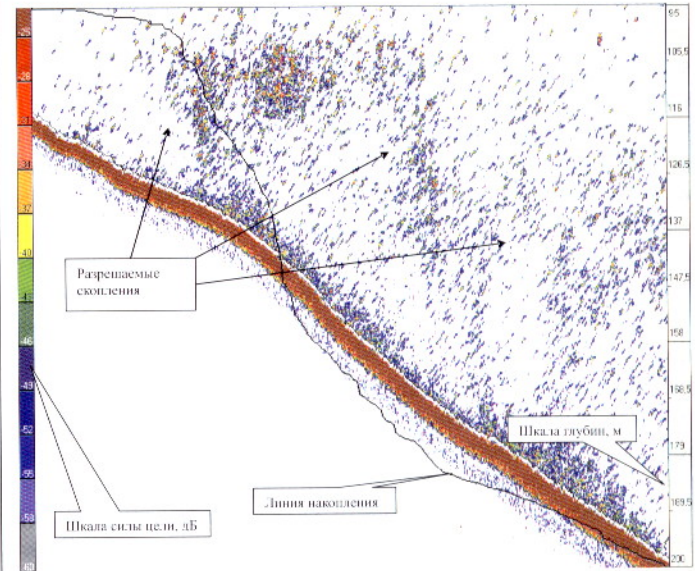


Рис. 2. Фрагмент гидроакустической регистрации идентифицированных обловом скоплений омуля на Селенгинском мелководье в диапазоне глубин 95–200 м, 2 июня 2004 г.

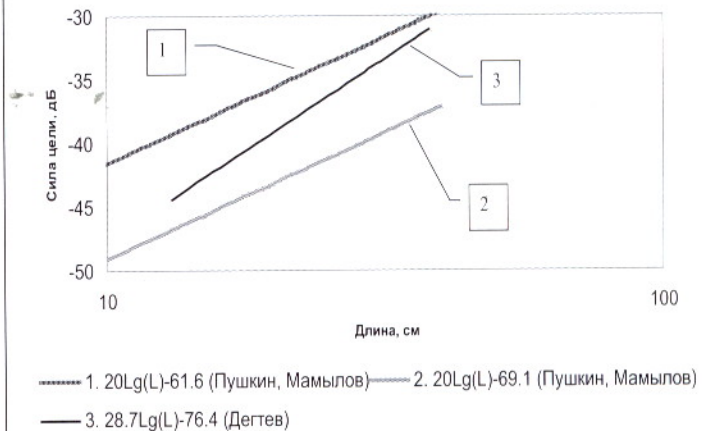


Рис. 3. Графики зависимостей длина – сила цели для байкальского омуля

пределены на меньшей акватории, чем разрешаемые, идентифицированные обловом как омулевые. Но, в случае включения их в рассмотрение, следует ожидать значительного увеличения значения абсолютной численности рыб на обследованной акватории в сравнении с оценками, даваемыми по идентифицированным скоплениям.

В общем отличия гидроакустических регистраций рассмотренных разрешаемых и неразрешаемых скоплений могут быть сформулированы следующим образом:

средние глубины регистраций очень плотных, неидентифицированных, скоплений и менее плотных, идентифицированных обловом, скоплений омуля отличаются на 30–60 м;

вертикальные протяженности слоев, в которых заключены указанные скопления, отличаются друг от друга;

общий характер гидроакустической регистрации двух типов скоплений существенно различен;

интенсивность эхо-сигнала от неразрешаемых скоплений на рис. 1 очень велика, что позволяет предположить их плотное заполнение мелкими объектами с высокой отражательной способностью.

В связи с отсутствием данных о видовом составе плотные, малого объема неразрешаемые скопления, аналогичные приведенным на рис. 1, не рассматривались при обработке материалов съемок. При получении достоверных данных о составе рассеивателей, образующих такие скопления, результаты предыдущих съемок могут быть скорректированы.

Зависимость длина – отражательная способность одиночной рыбы обычно определяется линейно-логарифмически (Пушкин С.В., Мамылов В.С. Оценка биоресурсов оз. Байкал. Отчет НТК «Эхо». Петрозаводск, 1989. 15 с.):

$$TS = A \cdot Lg(L) + B, \quad (3)$$

где:

TS – сила цели (в децибелах) рыбы длиной L (см);

A, B – экспериментальные коэффициенты регрессии (обладают видовой индивидуальностью).

Существуют разные методики определения зависимости длина – отражательная способность; наиболее представительным считается создание искусственных контролируемых скоплений в садках, чего для байкальского омуля не делалось. В конце 80-х годов НТК «Эхо» проводил гидроакустические оценки запаса омуля с использованием комплекса EK400/ES400 (Simrad) с расщепленным лучом и рабочей частотой 38 кГц и траловым контрольным обловом. С.В. Пушкиным и В.С. Мамыловым (1989) приведены две зависимости длина – сила цели для омуля (формулы 4 и 5; графики 1 и 2 на рис. 3); рекомендована формула 4 (график 1 на рис. 3):

$$TS = 20 \cdot Lg(L) - 61.6; \quad (4)$$

$$TS = 20 \cdot Lg(L) - 69.1. \quad (5)$$

В 2001 г. проведены работы по определению зависимости длина – отражательная способность омуля для рабочей частоты эхолота 200 кГц с использованием системы АСКОР-2. На акваториях Северного Байкала и Селенгинского мелководья был сделан ряд эхо-записей в дрейфе или на малом ходу хорошо разреженных придонных скоплений рыб (по типу рис. 2); эти скопления облавливались с использованием разноячейного порядка сетей. Результаты распределения значений сечения обратного рассеяния и раз-

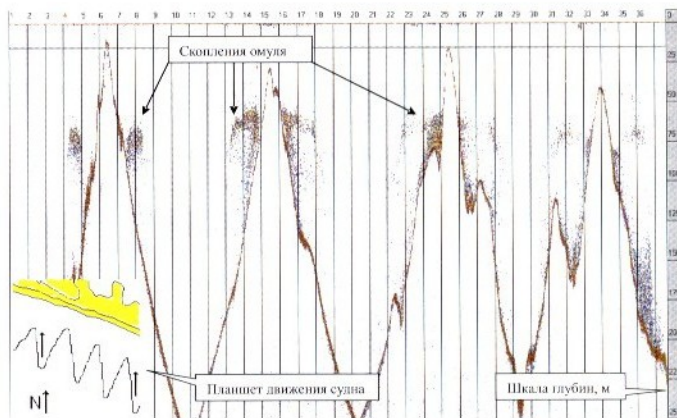


Рис. 4. Фрагмент гидроакустической регистрации скоплений омуля. Северный Байкал, 9 июня 2003 г.

Параметры	Северный Байкал	Селенгинское мелководье
Минимальное значение сечения обратного рассеяния m^2 TS, дБ	$1,58 \cdot 10^{-4}$ -49	$1,58 \cdot 10^{-4}$ -49
Максимальное значение сечения обратного рассеяния m^2 TS, дБ	$5,0 \cdot 10^{-3}$ -34	$7,9 \cdot 10^{-3}$ -32
Минимальная длина одиночного омуля, см	13	14
Максимальная длина одиночного омуля, см	31	38

мерного распределения в зарегистрированных и обловленных скоплениях представлены в таблице. По ее данным получена линейно-логарифмическая регрессия длина – сила цели для байкальского омуля на частоте 200 кГц (график 3 на рис. 3):

$$TS = 28.7 \cdot Lg(L) - 76.4. \quad (6)$$

Сравнивая зависимости 4 и 6, можно сказать, что при их использовании для восстановления размерного распределения рыб по силе цели зарегистрированных одиночных рыб обе зависимости дадут близкие результаты по старшим размерным группам, дающим основной вклад в оценку биомассы. В то же время по младшим группам формула 6 даст большую оценку численности. Хотя зависимости 4 и 6 получены для разных рабочих частот эхолота, их сопоставимость обоснована известной оценкой различия отражательной способности одиночного объекта на разных частотах величиной:

$$\Delta = 0.9lg\left(\frac{f_1}{f_2}\right) = 0.9lg\left(\frac{200}{38}\right) = 0.6 \text{ дБ, или } 15 \%,$$

где:

f_1, f_2 – рабочие частоты эхолота (в нашем случае – 200 и 38 кГц).

Опыт свидетельствует в пользу проведения гидроакустических съемок на Байкале в максимально короткие сроки сразу после схода льда, до начала нагульных миграций омуля. В этот период большая часть омуля находится в удобном для гидроакустической регистрации и контрольного облова состоянии. В съемках применялась зигзагообразная схема галсов (Юданов К.И., Калихман И.Л., Теслер В.Д. Руководство по проведению гидроакустических съемок. М.: ВНИРО, 1984) с их направлением от берега в море и обратно и углом раствора ~ 30°. Точки поворотов галсов определялись глубиной места: у берега – 30–50 м; в озе-

ре – 300–400 м. Такое распределение рыбы хорошо иллюстрируется эхограммой, представленной на *рис. 4*. Эхограмма, выполненная на акватории Северного Байкала, сильно сжата по горизонтали; общее время записи – 90 мин., пройденное расстояние ~ 15 км; в левом нижнем углу помещен планшет движения судна зигзагообразным галсом от берега в озеро и обратно (желтым цветом отмечена береговая линия).

Для Селенгинского мелководья распределение омуля имеет более сглаженный характер в соответствии со спокойным рельефом дна. Наибольшую трудность представляют съемки в зал. Малое Море, где подвижность омуля оказалась настолько высокой, что не удалось собрать достаточного материала для оценки его численности. Высокая подвижность омуля подтверждается и наблюдениями за динамикой промысла. Так, в течение трех дней июня 2003 г. суточный улов береговых бригад, осуществлявших сетной промысел омуля в заливе, менялся от 10 до 1 т (без видимых изменений гидрометеорологических условий).

По результатам проведенных съемок межгодовые колебания численности омуля на обследованных акваториях составляли от 183 до 448 экз/га; биомассы – 26–99 кг/га (в пересчете на всю обследованную акваторию – 2,9–13,3 тыс. т). Средняя биомасса составила 7,4 тыс. т. Можно с уверенностью полагать, что полученные материалы адекватно отражают численность и распределение омуля на обследованных акваториях. В то же время очевидно, что при проведении гидроакустических съемок фиксировалась только часть стада омуля. По материалам ВостСибрыбцентра, средняя биомасса омуля, рассчитанная традиционными ихтиологическими методами (анализ интенсивности промысла; учет численности производителей, заходящих на нерест в реки, и скатывающихся личинок) за эти же годы, была равной 23–25 тыс. т. При условии объективности традиционного метода оценки запасов гидроакустическим методом ежегодно оценивалось около 30 % имеющейся в Байкале биомассы омуля. Соотношение обследованной площади (5 % акватории Байкала) и величины относительной биомассы омуля на ней (30 % от всей биомассы омуля в Байкале) свидетельствует о достаточно высокой эффективности проведенных гидроакустических работ.

Вместе с тем возникает вопрос о целесообразности гидроакустической съемки всего Байкала, в связи как с резко возрастающими при этом ресурсными затратами, техническими трудностями, так и с наблюдаемой разреженностью и высокой изменчивостью значений плотности скоплений омуля. Возможны два пути решения проблемы. Во-первых, отработка тактики проведения съемок в прочих районах и пелагиали Байкала. Во-вторых – разработка комплексной методики оценки запасов омуля, включающей гидроакустическую съемку и традиционные расчетные ихтиологические методы. При этом возможна объективная интерпретация полученных гидроакустическим методом данных по численности омуля на обследованных акваториях для всего Байкала.

Для достижения большей эффективности количественных оценок запаса омуля гидроакустическим методом требуется выполнение следующих условий:

необходимо проведение работ по видовой идентификации гидроакустических регистраций скоплений рассеивателей различной биологической природы (должен быть предусмотрен надеж-

ный контролируемый облов, в том числе за счет совершенствования траловой системы судна и применения средств подводного видеонаблюдения);

байкальский омуль заслуживает более корректных экспериментальных исследований по определению регрессионной зависимости длина – отражательная способность;

необходимо продолжить отработку тактики проведения съемок, в первую очередь в зал. Малое Море и Баргузинский, а также в центральной части озера, где высока динамичность распределения рыбных скоплений;

требуется проведение методических работ по определению модели и параметров экстраполяции полученных пространственно распределенных значений плотности рыбных скоплений в узлы регулярной решетки для восстановления численности рыб на обследованной акватории методами численного интегрирования.

Результаты практического использования системы АСКОР-2 на оз. Байкал показали, что она может успешно применяться ихтиологами при оценке запасов рыб не только во внутренних водоемах, но и в морских районах, на судах, не оборудованных гидроакустическими эхолотами. Это относится и к акустико-траловым и тралово-акустическим съемкам. Благодаря тому что система позволяет отдельно осуществлять интегрирование, накопление, запоминание и хранение данных в любом выбранном слое, в том числе соответствующем вертикальному раскрытию трала, она может эффективно использоваться при акустико-траловых (тралово-акустических) съемках с «тарировкой» акустических данных по уловам трала, подобно тому, как это, к примеру, осуществлялось В.В. Кузнецовым (*Запас минтая у Западной Камчатки: современное состояние и перспективы*. «ПХ», 2001, № 1, с. 21–24). При оценке запасов минтая им выполнялось большее количество акустических и в несколько раз меньшее – тралово-акустических галсов при визуальном анализе и оценке «многоцветных» эхограмм-изображений, но без их накопления и сохранения для возможности дополнительного анализа и получения банка первичных данных. Это весьма трудоемкая работа, с постоянным участием оператора-ихтиолога. В случае использования системы АСКОР такие съемки могут производиться в автоматическом режиме, при эпизодическом участии оператора в процессе получения первичной информации.

Отдельным вопросом представляются обработка собранной акустической информации в комплексе с данными спутниковой радионавигационной системы, накопление банка данных. Вероятнее всего, это целесообразно осуществлять в береговых центрах. При дополнении системы программами автоматического определения вертикальных и горизонтальных протяженностей стай, косяков оценка состояния запасов может производиться одновременно тремя методами: гидроакустическим, акустико-траловым и предложенным Ю.В. Кадильниковым по плотности заселения стай и косяков рыб (*Вероятностно-статистическая теория рыболовных систем и технической доступности для них водных биологических ресурсов*. Калининград: АтлантНИРО, 2001. 275 с.), что, несомненно, будет способствовать повышению достоверности конечных результатов оценки запасов. В этих направлениях и предполагается совершенствование системы АСКОР-2.

