

Об особенностях количественной оценки состояния запасов байкальского омуля гидроакустическим методом.

Кудрявцев В.И.
Дегтев А.И.
Соколов А.В.

В 2000 – 2004 годах федеральным государственным унитарным предприятием «ВостСибрыбцентр» проводились ежегодные регулярные гидроакустические съемки по количественной оценке состояния запасов байкальского омуля с использованием комплекса (далее – комплекс, система) АСКОР-2 [1]. В использованной, при проведении съемок, конфигурации комплекса источником эхосигналов служил эхолот Furuno FCV-291 с рабочей частотой 200 кГц, электрической мощностью в импульсе 1 кВт, длительность 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 эхосигнала по дальности была – 250 м, с 2004 года – 300 м. Гидроакустическая антенна устанавливалась на забортном устройстве штангового типа. Использовалось судно ПТС «Д. Норенко» ФГУП «ВостСибрыбцентр» с бортовой схемой траления, позволяющей выполнять контрольные траления лишь до глубины 100 м при скорости до 4 узлов. Поэтому, для оценки размерно-видового состава облавливаемых скоплений, также применялся набор разноячейных сетей (ячеей от 12 до 50 мм) общей длиной около 300 м. Из-за ограниченности ресурсов съемки не охватывали всю акваторию озера Байкал (~ 30 тысяч км²), а ограничивались несколькими наиболее значимыми (в т.ч. для промысла) районами: Селенгинское мелководье, Северный Байкал, заливы Малое Море, Баргузинский и Чивыркуйский. Суммарная площадь акваторий, охваченных ежегодными съемками не превышала 1.5 тысяч км² (~ 5 % площади акватории озера). Тем не менее, гидроакустические съемки байкальского омуля стали обязательным рабочим инструментом для получения существенной ихтиологической информации при оценке состояния его запасов. В то же время, остается ряд не до конца исследованных аспектов, решение которых должно способствовать повышению качества и достоверности результатов съемок. К ним относятся:

- видовая идентификация разнохарактерных гидроакустических регистраций рассеивателей биологической природы;
- зависимость размер – отражательная способность байкальского омуля;
- тактика проведения акустических съемок байкальского омуля;
- интерпретация полученных гидроакустическим методом на обследованной акватории значений численности и биомассы омуля в целом на всю акваторию озера Байкал.

Рассмотрению этих вопросов, а также перспективам развития и применения системы АСКОР-2 и посвящена данная публикация.

Гидроакустический метод оценки водных биомасс является вариантом обратной задачи рассеяния. Общая теория обратной задачи рассеяния описывает эхосигнал исключительно как совместный результат отражательной способности цели, её нахождения в пространстве и потерь звука на распространение. Один и тот же эхосигнал 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 эхосигнала и плотности

рассеивателей, его образовавших, аналитически описывается известным уравнением интегрирования [8]:

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

$\bar{\rho}$ - 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 эхосигнала в интервале накопления (накопление интегратора);

Ψ - интегральный фактор направленности антенны, идеализированное представление характеристики направленности в виде телесного угла, в пределах которого, интегрирование эхосигнала даст тот же результат, что и в пределах реальной пространственной характеристики направленности R_α при условии случайного распределения рассеивателей в озвученном объеме [4];

$\bar{\sigma}$ - среднее значение сечения обратного рассеяния объектов, образующих интегрируемый сигнал в интервале накопления.

Из формулы 1 видно, что, при прочих равных условиях, результат оценки плотности зависит только от значения $\bar{\sigma}$. В промысловой гидроакустике различают одиночные и множественные регистрации рыб: если в единичном объеме, определенном выражением:

$$\frac{c \tau \Psi R^2}{2}, \text{ где } c - \text{ скорость звука, } R - \text{ дистанция от антенны до цели, находится не более}$$

одной рыбы имеет место одиночная регистрация (рассеянное, разрешаемое скопление), если наоборот – множественная регистрация (неразрешаемое скопление). В случае разрешаемой регистрации значение сечения $\bar{\sigma}$ объектов, составляющих скопление, может быть получено из восстановленного прямым (расщепленный, двойной луч) или косвенным (вероятностным) методом распределения силы цели [3], в противном случае требуется внешняя информация о составе рассеивателей и их отражательной способности.

На рисунке 1 представлена эхограмма с характерной регистрацией рассеивателей биологической природы на Селенгинском мелководье в диапазоне глубин от 60 до 200 метров, выше 60 метров никаких регистраций нет. На эхограмме хорошо видны два типа скоплений – разрешаемые и неразрешаемые. В ходе выполнения гидроакустических съемок менее плотные (разрешаемые) скопления достаточно надежно идентифицировались контрольными обловами тралом и специально изготовленным разноячейным порядком сетей, как, в основном, омулевые, чего нельзя сказать о локальных, небольшого объема, но весьма плотных (неразрешаемых) концентрациях. Регистрация таких неразрешаемых скоплений отмечалась во всех проведенных съемках, начиная с 2000 года, на акваториях Селенгинского мелководья и Северного Байкала. В 2002 году, на Селенгинском мелководье, судном «Д.Норенко» была предпринята попытка обловить тралом такое скопление, находившееся в тот момент в доступных для трала условиях. Судно с тралом прошло над таким скоплением, облавливаемое скопление было акустически зарегистрировано под килем судна, заход рыбы в трал не регистрировался из-за отсутствия тралового зонда. Никакого улова омуля в трале не было, кроме объячеивавшихся в дели крыльев и кутка единичных экземпляров молоди желтокрылки (определяли ихтиологи ВостСибрыбцентра). Судя по косвенному признаку – активному нырянию чаек в кильватерный след выбираемого трала, был сделан вывод о вымывании из трала значимого количества молоди желтокрылки и, как следствие, о том, что видовой состав обловленного скопления – не омуль. Но следует отметить, что имеются и другие мнения. На рисунке 2 представлен тот же фрагмент регистрации рассеивателей

биологической природы на Селенгинском мелководье, но в диапазоне глубин от 95 до 200 метров, то есть, пространственно небольшие плотные неразрешаемые скопления на рисунке 1 оставлены вне слоя анализа, а идентифицированные обловом омулевые скопления оставлены в рассмотрении. Следует обратить внимание на поведение линии накопления на обеих эхограммах. Линия накопления является графическим представлением структуры накопления интеграла внутри интервала усреднения, крутизна её падения на определенном участке пропорциональна энергии эхосигнала на этом же участке эхограммы, и, в соответствии с формулой 1, пропорциональна плотности рассеивателей на то же участке эхограммы. Скачкообразное поведение линии накопления на рисунке 1 кардинально отличается от плавного её поведения на рисунке 2, где из рассмотрения исключены неразрешаемые локальные скопления. Легко заметить, что скачки линии накопления на рисунке 1 происходят в тех посылках эхолота, где регистрируются неразрешаемые локальные скопления, и, что большая часть интеграла (как меры энергии эхосигнала) в пределах эхограммы на рисунке 1 накоплена как раз на таких скоплениях. Это прямое свидетельство высокой отражательной способности пространственно небольших неразрешаемых скоплений. Известно, что формула 1 может быть представлена в виде:

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

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

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

Результаты измерений средней в интервале усреднения силы поверхностного обратного рассеяния для скоплений на рисунках 1 и 2 показывают, что они отличаются на 8.8 дБ (для скоплений по рисунку 1 в 7.6 раза больше, чем для рисунка 2). Если допустить, что состав рассеивателей локальных неразрешаемых скоплений на рисунке 1 эквивалентен составу рассеивателей разрешаемых скоплений на рисунке 2 по средней силе цели (то есть считать, что это то же омуль), то оценки значений плотности рыбных скоплений для рассмотренных фрагментов разойдутся в 7.6 раза в большую сторону для ситуации на рисунке 1. Конечно, оценки абсолютной численности рыб на обследованной акватории не разойдутся так драматически, в зависимости от того, включать в рассмотрение локальные плотные неразрешаемые скопления неизвестной биологической природы или нет, как можно было бы ожидать по результатам рассмотренного фрагмента. Эти скопления распределены на меньшей акватории, чем разрешаемые скопления, идентифицированные обловом как омулевые. Но, в случае включения их в рассмотрение, следует ожидать значительного увеличения значения абсолютной численности (биомассы) рыб на обследованной акватории в сравнении с оценками, даваемыми по идентифицированным скоплениям.

В общем, отличия гидроакустических регистраций рассмотренных разрешаемых и неразрешаемых скоплений гидробионтов на озере Байкал, могут быть сформулированы следующим образом:

- средние глубины регистраций очень плотных скоплений неидентифицированной природы и менее плотных, идентифицированных обловом, скоплений омуля отличаются на 30–60 метров;
- вертикальные протяженности слоев, в которых заключены указанные скопления, весьма отличаются друг от друга;
- общий характер гидроакустической регистрации двух типов скоплений, их «образы», существенно различны;

- интенсивность эхосигнала от неразрешаемых скоплений на рисунке 1 очень велика, что позволяет предположить их плотное заполнение мелкими объектами с высокой индивидуальной отражательной способностью.

В связи с отсутствием достоверных данных о видовом составе плотные, малого объема неразрешаемые скопления, аналогичные приведенным на рис.1, не включались в рассмотрение при обработке материалов съемок и их вклад в оценку общей численности (биомассы) омуля не учитывался. При получении более достоверных данных о составе рассеивателей, образующих такие скопления, результаты предыдущих съемок могут быть скорректированы, т.к. система АСКОР-2 обеспечивает возможность хранения первичных файлов данных в неизменном виде для повторного доступа.

Зависимость длина – отражательная способность одиночной рыбы обычно определяется в виде линейно-логарифмической зависимости [6,8]:

$$TS = A * Lg(L) + B, \text{ где:} \quad (3)$$

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, их обсуждение выходит за рамки статьи, наиболее представительным (и наиболее трудоемким) считается создание искусственных контролируемых скоплений в садках, чего для байкальского омуля не делалось. В конце восьмидесятых годов НТК «Эхо» проводил гидроакустические оценки запаса омуля с использованием комплекса ЕК400/ES400 (Simrad) с расщепленным лучом и рабочей частотой 38 кГц и траловым контрольным обловом. В работе [6] приведены две зависимости длина – сила цели для омуля (формулы 4 и 5, графики 1 и 2 на рисунке 3), причем для использования рекомендована формула 4 (график 1 на рисунке 3):

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

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

В 2001 году 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 были сделаны ряд эхозаписей в дрейфе или на малом ходу хорошо разреженных придонных скоплений рыб (по типу рисунка 2), эти скопления облавливались с использованием специально изготовленного разноячеистого порядка сетей. Результаты распределения значений сечения обратного рассеяния и размерного распределения в зарегистрированных и обловленных одних и тех же скоплениях представлены в таблице 1. По данным таблицы 1 получена линейно-логарифмическая регрессия длина – сила цели для байкальского омуля на частоте 200 кГц (график 3 на рисунке 3):

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

Сравнивая зависимости 4 и 6, можно сказать, что при их использовании для восстановления размерного распределения рыб по распределению силы цели зарегистрированных одиночных рыб, обе зависимости дадут достаточно близкие результаты в области старших размерных групп, дающих основной вклад в оценку биомассы. В то же время в области младших размерных групп формула 6 даст большую оценку численности в сравнении с формулой 4. 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 [3]:

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

f_1, f_2 - различные рабочие частоты эхолота, 200 и 38 кГц в нашем случае.

Опыт проведенных в течение пяти лет работ свидетельствует в пользу проведения гидроакустических съемок на Байкале в максимально короткие сроки сразу после схода льда, до начала нагульных миграций омуля, этот аспект отмечен и в работе [6]. В этот период большая часть омуля находится в удобном для гидроакустической регистрации и контрольного облова состоянии. В съемках применялась зигзагообразная схема галсов [7] с направлением галсов от берега в море и обратно и углом раствора $\sim 30^\circ$. Точки поворотов галсов определялись глубиной места: у берега 30 – 50 метров, где заканчивалась регистрация рыбы, и 300 – 400 метров в озере, где плотность регистрируемых рыб резко падала. Такое распределение рыбы на указанных выше обследованных акваториях хорошо иллюстрируется эхограммой на рисунке 4. Здесь представлена сильно сжатая по горизонтали эхограмма, сделанная на акватории Северного Байкала, общее время записи ~ 90 минут, пройденное расстояние ~ 15 км, в левом нижнем углу помещен планшет фактического движения судна (по данным системы GPS) зигзагообразным галсом от берега в озеро и обратно, где желтым цветом указана береговая линия. Для Селенгинского мелководья такое распределение омуля так же характерно, но носит более сглаженный характер в соответствии с более спокойным рельефом дна. Наибольшую тактическую трудность представляют съемки на акватории залива Малое Море. Опыт работ 2000 – 2004 годов показал настолько высокую подвижность омуля в заливе, что не удалось собрать достаточно представительный материал для оценки количества рыбы в заливе на момент проведения съемок. Высокая подвижность омуля подтверждается и наблюдениями за динамикой промысла. Так в течение трех дней июня 2003 года, суточный улов береговых бригад, осуществлявших сетной промысел омуля на акватории залива, менялся от 10 до 1 тонны, без видимых изменений гидрометеорологических условий.

По результатам проведенных в 2000 - 2003 годах гидроакустических съемок межгодовые колебания численности омуля на обследованных акваториях составляли от 183 до 448 экз/га, биомассы - 26-99 кг/га или в пересчете на всю обследованную акваторию - 2,9 – 13,3 тыс. т. Средняя за 2000-2003 г.г. биомасса омуля на обследованной акватории составила 7,4 тыс.т. Можно с достаточной 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 ФГУП «Востсибрыбцентр» средняя биомасса омуля, рассчитанная традиционными ихтиологическими методами (анализ интенсивности промысла, учет численности производителей омуля, заходящих на нерест в реки и скатывающихся личинок), за эти же годы была равной 23-25 тыс.т. При условии достаточной объективности традиционного метода оценки состояния запасов, гидроакустическим методом ежегодно оценивалось около 30 % от имеющейся биомассы омуля в Байкале. Соотношение обследованной площади (~ 5 % акватории Байкала) и величины относительной биомассы омуля на ней (~ 30 % от биомассы омуля в Байкале) свидетельствует о достаточно высокой эффективности проведенных гидроакустических работ. Вместе с тем, возникает вопрос о целесообразности проведения гидроакустической съемки в целом всего Байкала как в связи с резко возрастающими при этом ресурсными затратами, техническими трудностями, так и наблюдаемой разреженностью и очень высокой изменчивостью значений плотности скоплений омуля в прочих районах и пелагиали Байкала. Возможны два взаимодополняемых пути решения проблемы. Во-первых - отработка вопросов тактики проведения съемок в прочих районах и пелагиали Байкала. Во-вторых - разработка комплексной методики оценки запасов байкальского омуля, включающей как гидроакустическую съемку, так и традиционные расчетные ихтиологические методы. При этом возможна объективная интерпретация полученных гидроакустическим методом материалов по численности омуля на обследованных акваториях в целом для всего Байкала.

В целом, озеро Байкал и байкальский омуль представляются удобными объектами для проведения быстрых и эффективных количественных оценок запаса гидроакустическим методом. Для достижения большей их эффективности требуется выполнение следующих условий:

- необходимо проведение специальных работ по видовой идентификации разнохарактерных гидроакустических регистраций скоплений рассеивателей различной биологической природы. Эти работы должны предусматривать надежный контролируемый облов, в том числе за счет совершенствования траловой системы применяемого судна и, возможно, применение средств подводного видеонаблюдения;
- байкальский омуль, как рыбохозяйственный объект, заслуживает проведения более корректных экспериментальных исследований по определению регрессионной зависимости длина – отражательная способность;
- необходимо продолжить отработку вопросов тактики проведения съемок, особенно на акваториях заливов Малое Море и Баргузинский, а также центральной части озера, с высокой динамичностью распределения рыбных скоплений;
- требуется проведение методических работ по определению модели и параметров экстраполяции полученных в съемках пространственно распределенных значений плотности рыбных скоплений в узлы регулярной решетки для восстановления численности (биомассы) рыб на обследованной акватории методами численного интегрирования.

Результаты практического использования системы АСКОР-2 на озере Байкал показали, что она может успешно применяться ихтиологами при оценке запасов рыб и их состояния не только во внутренних водоемах, но и в морских районах на судах, не оборудованных специализированными научно-исследовательскими гидроакустическими эхолотами. Это относится не только к гидроакустическим съемкам, но также и к акустико-траловым и тралово-акустическим (при в несколько раз более низкой стоимости). Благодаря тому, что система позволяет отдельно осуществлять интегрирование, накопление, запоминание и хранение данных в любом выбранном слое или нескольких слоях (по вертикали), в том числе в слое, соответствующем вертикальному раскрытию трала, она может эффективно использоваться при проведении акустико – траловых (тралово-акустических) съемок с «тарировкой» акустических данных по уловам трала, методологически подобно тому, как это, к примеру, осуществлялось В.В. Кузнецовым [5]. При оценке состояния запасов минтая им выполнялось большее количество акустических и существенно меньшее (в несколько раз) тралово-акустических галсов при визуальном анализе и оценке «многоцветных» эхограмм – изображений (своего рода «зрительное» интегрирование), 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 практически в автоматическом режиме при эпизодическом участии оператора в процессе получения первичной информации. До некоторой степени отдельным представляется вопрос обработки собранной акустической информации, комплексированной с данными спутниковой радионавигационной системы, накопления банка данных. Вероятнее всего это целесообразно выполнять в береговых центрах. При дополнении системы программами автоматического определения вертикальных и горизонтальных протяженностей стай, косяков оценка состояния запасов с ее помощью может производиться одновременно тремя методами: гидроакустическим, акустико –траловым и предложенным Ю.В. Кадыльниковым по плотности заселения стай и косяков рыб [2], что несомненно, будет способствовать повышению достоверности получаемых конечных результатов оценки запасов.

Литература

1. Дегтев А.И., Ивантер Д.Э. Автоматизированная система количественной оценки рыбных запасов гидроакустическим методом АСКОР-2. «Рыбное хозяйство», № 4, 2002
2. Кадильников Ю.В. Вероятностно-статистическая теория рыболовных систем и технической доступности для них водных биологических ресурсов. Калининград, АтланНИРО, 2001, 275с.
3. Красильников С.Н., Топилин А.В. Справочная информация и рекомендации по проведению гидроакустических съемок. Обзорная информация. Серия: Промысловая радиоэлектронная аппаратура. – М.: ЦНИИТЭИРХ, 1990
4. Кудрявцев В.И. Промысловая гидроакустика и рыболокация. - М.: Пищевая промышленность, 1978
5. Кузнецов В.В. Запас минтая у Западной Камчатки: современное состояние и перспективы. М. Рыбное хозяйство, 2001, №1, с.21-24
6. Пушкин С.В., Мамылов В.С. Оценка биоресурсов озера Байкал. Отчет НТК «ЭХО», Петрозаводск, 1989, -15с.
7. Юданов К.И., Калихман И.Л., Теслер В.Д. Руководство по проведению гидроакустических съемок. - М. ВНИРО, 1984.
8. MacLenan D.N., Simmonds E.J. Fisheries Acoustics. London, Chapman & Hall, 1992

Рисунок 1.

Фрагмент гидроакустической регистрации рассеивателей биологической природы на Селенгинском мелководье в диапазоне глубин 60 – 200 метров, 2 июня 2004 года.

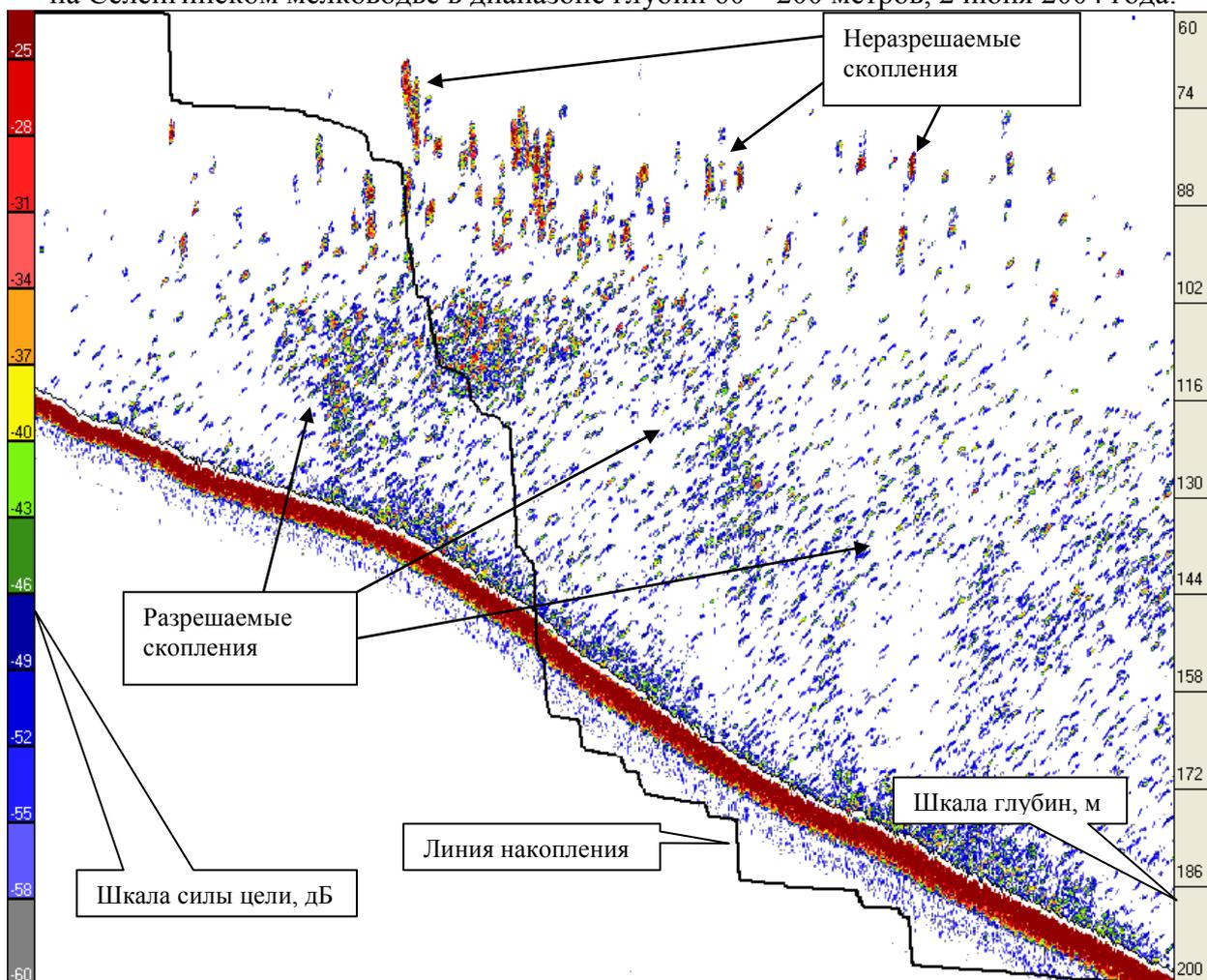


Рисунок 2.

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

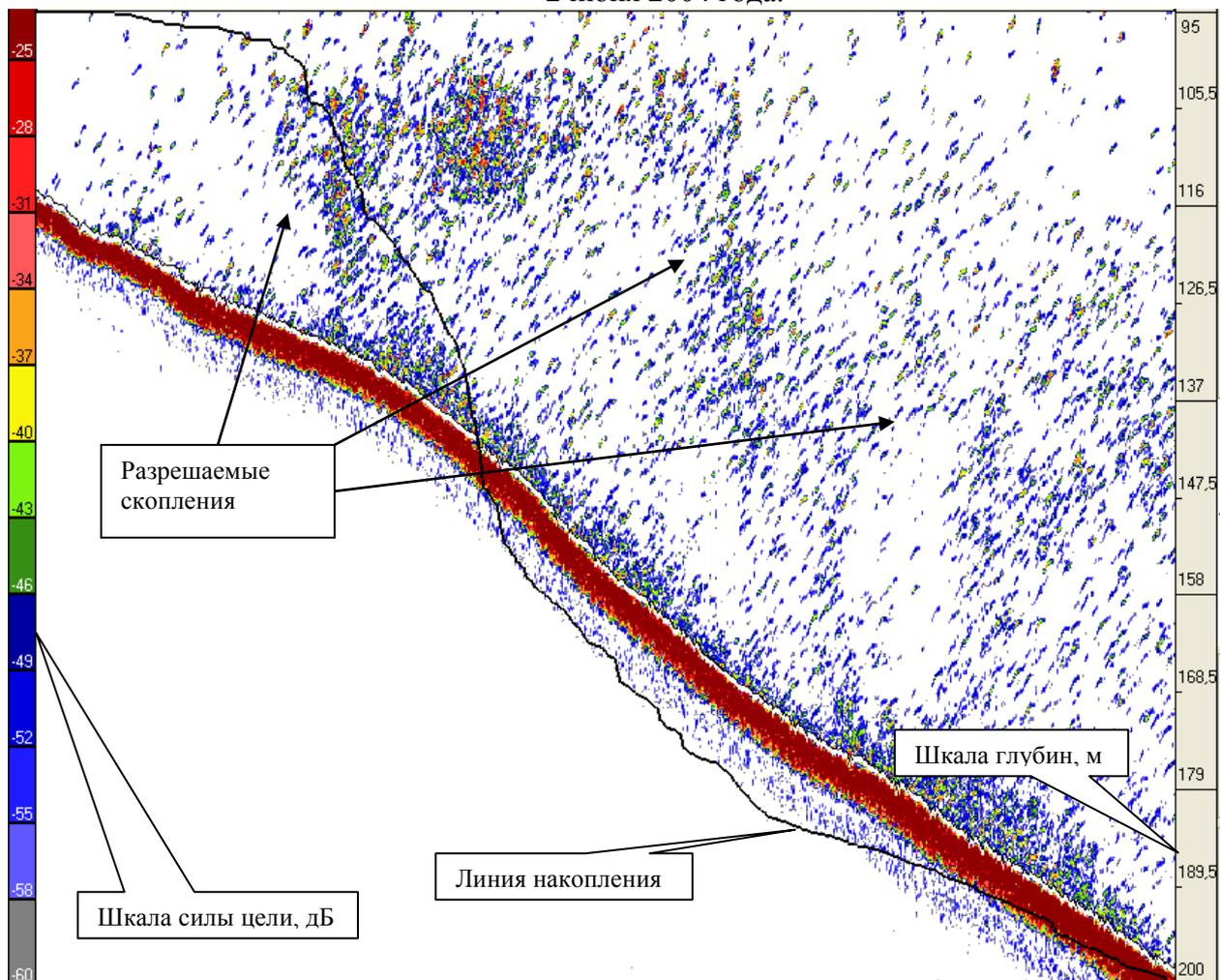
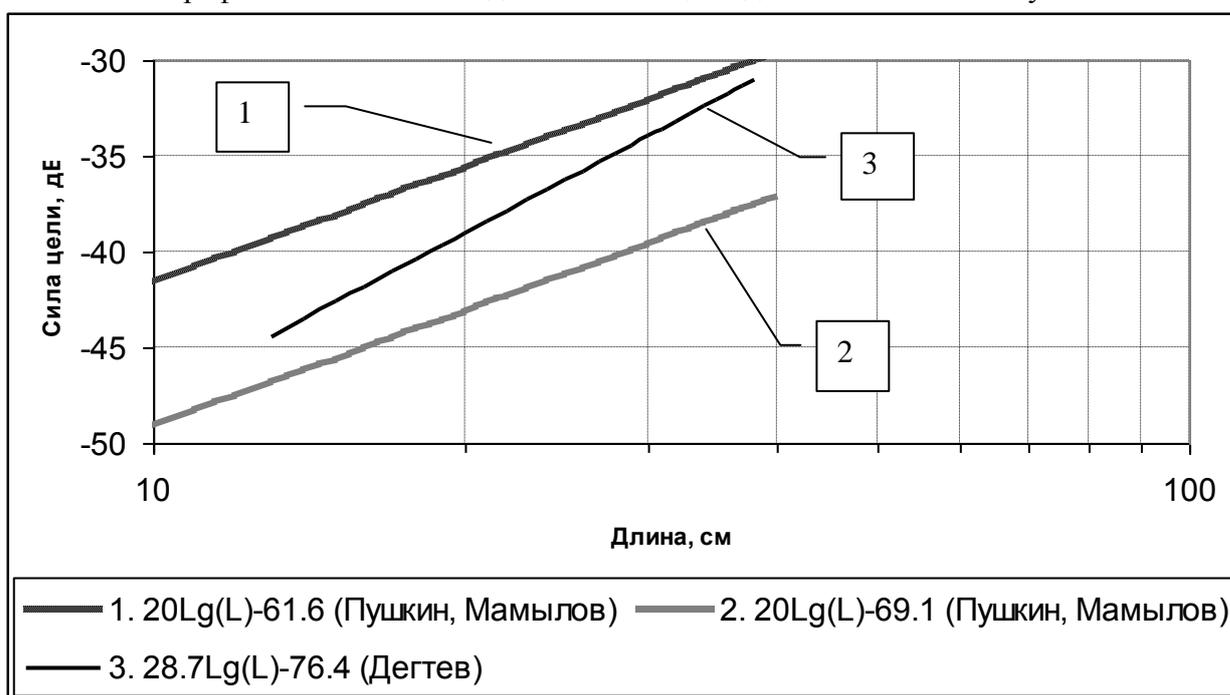


Таблица 1.

Параметр	Северный Байкал	Селенгинское мелководье
Минимальное значение сечения обратного рассеяния, м ² TS, дБ	1.58*10 ⁻⁴ -49	1.58*10 ⁻⁴ -49
Максимальное значение сечения обратного рассеяния, м ² TS, дБ	5.0*10 ⁻³ -34	7.9*10 ⁻³ -32
Минимальная длина одиночного омуля, см	13	14
Максимальная длина одиночного омуля, см	31	38

Рисунок 3.

Графики зависимостей длина – сила цели для байкальского омуля.



Фрагмент гидроакустической регистрации скоплений омуля.
Северный Байкал, 9 июня 2003 года

