

Исследование акустической силы цели японской скумбрии в северо-западной части Тихого океана *in situ*

М.Ю. Кузнецов,
В.И. Поляничко,
Е.В. Сыроваткин,
И.А. Убарчук

Тихоокеанский филиал ФГБНУ «ВНИРО»
(ТИНРО), г. Владивосток

E-mail: mikhael.kuznetsov@tinro-center.ru

В 2014 г. в северо-западной части Тихого океана (СЗТО) были обнаружены значительные скопления японской скумбрии (*Scomber japonicus*), совершающей в летне-осенний период нагульные миграции в прикурильские воды. Начат её массовый промысел. В связи с этим регулярно проводятся поисковые работы и тралово-акустические съёмки масштабов распространения и обилия сардины и скумбрии в СЗТО. Однако, отражательные способности японской скумбрии, необходимые для эхоинтеграционной оценки численности этих рыб в регистрируемых акустическими приборами скоплениях, изучены недостаточно. Используя материалы гидроакустических и биологических измерений, накопленных в периоды съёмок в СЗТО в 2015–2017 гг., в работе исследуются зависимости силы цели одиночных особей японской скумбрии от их зоологической длины в естественных условиях обитания (*in situ*). Для сбора гидроакустических данных использовался калиброванный научный эхолот EK-60 Simrad с двумя антеннами с расщеплённым лучом 38 и 120 кГц. Измерения силы цели японской скумбрии производились на участках контрольных тралений в слое, равном вертикальному раскрытию трала. Показан процесс отбора эхограмм и фильтрации одиночных целей японской скумбрии, который реализован в программном комплексе «SALTSE» (ТИНРО). Получены эмпирические зависимости между средней силой цели (TS) и средней длиной (L) рыб, пойманных на выбранных фрагментах эхограмм. Нормированные к 20 $\log(L)$ уравнения регрессии имеют вид: $TS = 20 \log(L) - 72,8$ (дБ) на частоте 38 кГц, $TS = 20 \log(L) - 73,6$ (дБ) на частоте 120 кГц. Проводится сравнение полученной силы обратного рассеяния японской скумбрии в СЗТО с другими исследованиями отражательных свойств данного вида скумбриевых.

Ключевые слова: оценка запаса, эхограмма, сила цели, сечение обратного рассеяния, одиночные цели, длина рыб, регрессионное уравнение.

ВВЕДЕНИЕ

Гидроакустический эхоинтеграционный метод оценки биоресурсов получил широкое распространение в рыбохозяйственных исследованиях благодаря дистанционности акустического зондирования водной толщи и возможности оперативного получения с высоким разрешением информации о характеристиках пространственного распределения и плотности находящихся там биологических объектов [Кузнецов, 2013]. Научные гидроакустические комплексы регулярно калибруются, что позволяет сопоставлять полученные данные с результатами работ других исследователей, использующих аналогичную аппаратуру.

Однако, имея такие важные преимущества, точность гидроакустического метода в значительной степени определяет корректное измерение отражающих (звукорассеивающих) свойств

морских животных и их зависимости от размеров составляющих скопление особей, оцениваемых, в основном, экспериментальным путём.

Проблеме изучения отражательных свойств промысловых объектов посвящено множество публикаций. В нашей стране исследования в этой области связаны с именами советских и российских ученых: К.И. Юданова, В.Д. Теслера, И.Б. Андреевой, В.А. Ермольчева, В.С. Мамылова и др. Начиная с 60-х годов прошлого века ими выполнено большое количество работ по изучению рассеяния звука различными морскими организмами [Андреева, 1964; Шишкова, 1977; Андреева, Самоволькин, 1986; Юданов, 1992; Мамылов, 1999; Ермольчев, 2006; Гончаров и др., 2008]. За рубежом наиболее полно эта проблема отражена в работах [Ona, 1999; Simmonds, MacLennan, 2005].

Отражательные свойства одиночных объектов и их скоплений количественно оцениваются акустическим сечением обратного рассеяния (s) и силой цели (TS). В классическом определении, сечение обратного рассеяния характеризует способность тела возвращать звук в направлении его приёмника, который расположен в том же месте, что и излучатель [Урик, 1978]. В эхолокации, применяемой при биоресурсных исследованиях, акустическое сечение — это условная площадь, дающая такое же отражение во все стороны (сферическое), что и реальный объект в данном направлении [Юданов, 1992]:

$$\sigma_{sp} = \frac{4\pi r_0^2 I_p}{I_n}, \text{ м}^2,$$

где I_p — интенсивность рассеиваемой (возвращаемой) объектом звуковой волны в точке приёма; I_n — интенсивность падающей на цель звуковой волны; r_0 — расстояние между объектом и точкой приёма.

Сила цели представляет собой логарифмическую форму выражения отражательной способности объектов:

$$TS = 10 \log \frac{\sigma_{sp}}{4\pi}, \text{ дБ.}$$

TS обычно представляется как функция длины рыбы (L , см):

$$TS = a \log(L) + b,$$

где a — наклон; b — уровень сигнала, отражённого от рыбы длиной $L = 1$ см.

Сила цели непосредственно влияет на оценку запаса гидроакустическим методом, поскольку в алгоритме расчёта численности используется зависимость силы цели одиночных рыб в скоплении от их зоологической длины [Кузнецов, 2013]. Существенным является то, что ошибка в измерении TS на 2–3 дБ ведёт к смещению оценки запаса в 1,5–2 раза. Достоверность её определения зависит от применяемых методик выделения эхосигналов от одиночных целей, взятия биологических проб (видовой и размерной идентификации целей) и множества других факторов (поведение, биологическое состояние объекта, суточные миграции), не всегда поддающихся измерениям или учёту в существующих теоретических моделях. Поэтому получение адекватных зависимостей $TS(L)$ и их регулярное уточнение с использованием калиброванных измерительных систем является важнейшим направлением работ по совершенствованию тех-

нологии выполнения акустических биоресурсных съёмок.

В принципе, можно вычислить силу цели из акустической теории и знания отражающей способности плавательного пузыря и других частей тела рыбы, которые формируют эхосигнал [Clay, Heist, 1984; Foote, 1985; Furusawa, 1988; Clay, Horne, 1994]. Согласно [Foote 1997], на низких частотах плавательный пузырь создаёт 90% или более рассеиваемой энергии зондирующего сигнала. Однако исследуемые объекты могут отличаться формой и размером плавательного пузыря. Сила эха может существенно различаться с изменениями физиологического состояния рыб, присущих рыбам, например, в периоды нереста или нагула и влияющих на размер и форму плавательного пузыря [Ona, 1990; Jorgensen, 2003]. Увеличение размеров гонад или степени наполнения желудка вызывает уменьшение объёма плавательного пузыря и, соответственно, отражающую способность особей. Существенное влияние имеет наклон рыбы (и плавательного пузыря) относительно горизонтальной плоскости [Blaxter, Batty, 1990]. Степень вариации угла наклона зависит от размера (возраста) рыбы и аспектов её поведения, таких как питание, суточные вертикальные миграции, реакция избегания шумов судна и др. [Simmonds, MacLennan, 2005]. Поэтому получение точного значения силы цели объектов биоресурсных исследований только из теоретических соображений, слишком сложно и вряд ли достижимо.

Для решения практических задач оценки запасов гидробионтов акустическим методом s и TS обычно измеряют экспериментально. Экспериментальные исследования характеристик акустического рассеяния (силы цели) осуществляются тремя методами. Они отличаются в основном состоянием исследуемых целей и подразделяются на измерения подвешенных анестезированных или умерщвлённых гидробионтов, эксперименты при ограниченной подвижности объекта в клетках и садках и исследования свободно плавающих рыб в месте их обитания (*in situ* технология) [Midttun, 1984].

В своём естественном поведении рыбы время от времени меняют ориентацию тела относительно акустического луча. Эксперименты с обездвиженной рыбой полезны, в основном, для изучения влияния угла наклона [Foote, 1980; Mukai et al., 1993; Lee, Shin, 2005]. Изменение силы цели рыб в зависимости от угла наклона доста-

точно велико. Результаты экспериментов демонстрируют, что максимальная сила цели достигается, когда рыба наклонена на несколько градусов вниз головой относительно дорсального положения [Nakken, Olsen, 1977].

Эксперименты с ограниченной подвижностью животных с большей вероятностью повторяют их естественное поведение и распределение. Суть этого метода сводится к инструментальному измерению TS одиночных рыб известных размеров путём помещения их в специально оборудованную клетку или садок [Гончаров и др., 2008]. Управляемые эксперименты, как правило, дают больше информации об акустических свойствах рыб [Love, 1971]. Однако, учитывая сложную эмпирическую зависимость силы цели от ориентации (угла наклона) рыб и других факторов, трудно экстраполировать результаты управляемых экспериментов на их естественную среду обитания.

Применительно к акустическим съёмкам наилучшие результаты дают измерения силы цели рыб в их естественной среде обитания (метод *in situ*), поскольку при регистрации будет учтён поведенческий эффект, зависимость от глубины и любые возможные сезонные изменения TS [Ona, 1990; Ona, 2001; Simmonds, MacLennan, 2005]. Однако этот подход накладывает определённые ограничения на условия проведения эксперимента, в частности, необходима достаточно низкая плотность распределения скопления, имеется проблема выделения одиночных целей программными алгоритмами и получения репрезентативной выборки размерного состава гидробионтов.

В 2014 г. в ходе комплексной съёмки в северо-западной части Тихого океана (СЗТО) судами ТИПРО, оснащёнными научными эхолотами, были обнаружены значительные скопления японской скумбрии и дальневосточной сардины. Исследования в 2015–2018 гг. показали дальнейший рост численности сардины и скумбрии в СЗТО, что инициировало возобновление их массового промысла российскими рыбаками. В связи с этим регулярный мониторинг масштабов распространения нагульных скоплений сардины и скумбрии и их численности в российской экономической зоне становится особенно актуальным, а использование для этих целей прецизионной гидроакустической аппаратуры (с учётом высокой скорости и непрерывности выполняемых с её помощью измерений, а также возможности оперативного их повторения) — наиболее перспективным.

Однако, отражательные способности японской скумбрии, необходимые для количественной оценки этих рыб эхоинтеграционным методом, изучены недостаточно. Об этом свидетельствует то, что публикаций, посвящённых измерениям силы цели японской скумбрии, немного, а полученные результаты имеют весьма существенный разброс. Так, например, контролируемые эксперименты с подвешенными особями японской скумбрии, пойманными в Восточно-Китайском море, дали следующие зависимости силы цели от длины: $TS = 20 \log(L) - 64,1$ на частоте 25 кГц и $TS = 20 \log(L) - 65,5$ на частоте 100 кГц [Mukai et al., 1993]. Близкие результаты на обездвиженной рыбе (*ex situ*) получили корейские учёные: $TS = 20 \log(L) - 67,2$ (50 кГц) и $TS = 20 \log(L) - 66,9$ (120 кГц) [Lee, Shin, 2005].

Исследования *in situ* у побережья Перу показали, что сила цели японской скумбрии на 3–4 дБ ниже и почти одинакова для высоких и низких частот:

$TS = 20 \log(L) - 70,95$ на частоте 38 кГц и $TS = 20 \log(L) - 70,8$ на частоте 120 кГц [Gutierrez, MacLennan, 1998]. Измеренная к северо-востоку от Тайваня TS скумбрии на частоте 38 кГц была ещё ниже: $TS = 29,5 \log(L) - 90$ [Liu et al., 2005]. В работе об измерениях силы цели японской скумбрии *in situ* в марокканских водах зависимость $TS(L)$ имеет вид: $TS = 20 \log(L) - 77,6$ (38 кГц) и $TS = 20 \log(L) - 79,8$ (120 кГц) [Charouki, Svellingen, 2008]. Это уравнение даёт силы цели одиночных особей скумбрии заметно ниже, чем применяемое для акустической оценки её численности в этом регионе: $TS = 20 \log(L) - 72$, первоначально полученное для сельдевых (*Clupeoidae*) [Foote, 1987]. Если применить эту зависимость $TS(L)$ для оценки запасов, то биомасса скумбрии при той же плотности скоплений увеличится более чем в три раза. Поэтому, как сообщают сами авторы статьи, для использования полученных результатов необходимы дальнейшие исследования.

Имеются также модельные оценки силы цели японской скумбрии, полученные теми же авторами для 38 кГц: $TS = 20 \log(L) - 73,8$ [Svellingen et al., 2008].

Цель работы — используя материалы гидроакустических и биологических измерений, накопленных в периоды съёмок в СЗТО, и алгоритмы фильтрации одиночных целей, исследовать отражательные свойства японской скумбрии (*Scomber japonicus* (Houttuyn, 1782)) в естественных условиях обитания (*in situ*).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе использованы данные гидроакустического зондирования и биологических проб (траловых уловов), полученные при проведении тралово-акустических съёмок ТИНРО в СЗТО в 2015–2017 гг. Для сбора акустических данных использовался цифровой научный эхолот ЕК-60 Simrad, имеющий две антенны с расщеплённым лучом 38 и 120 кГц на киле судна. В эхолоте были установлены: длительность импульса — 1,024 мс, интервал между посылками — 1 с.

Перед измерениями выполнялась калибровка параметров приемопередающего тракта и характеристик антенн эхолота методом сравнения с использованием стандартной (эталонной) цели [Demer et al., 2015]. В качестве эталонных целей использовались сферы из чистой электролитической меди диаметром 60 мм для частоты 38 кГц, 23 мм — для частоты 120 кГц. В процессе калибровки измеряли силу цели и коэффициент обратного рассеяния эталонной сферы и сравнивали их с известными значениями. Затем измеряли величины продольного и поперечного смещения акустической оси и характеристику направленности антенны, влияющие на точность компенсации значений силы цели в горизонтальной проекции луча.

Для взятия биологических проб и определения размерно-видового состава скоплений

в процессе съёмок выполнялись контрольные траления. Чтобы измерения зависимости силы цели от длины рыб были более корректны, места поимки объекта и отбора акустических проб должны быть максимально близки. Поэтому детектирование эхотрасс и измерения *TS* производилось в слое, вертикальной протяжённостью равной вертикальному раскрытию трала, а горизонтальной — продолжительности траления по лагу. Траления выполнялись разноглубинным канатным тралом 80/396 м с мелкочейной вставкой в кутце. Горизонт хода трала (глубина верхней подборы) и вертикальное раскрытие трала фиксировались с помощью тралового зонда FS20/25 или FS70 Simrad и записывались в файл. При обработке протраленная область отображалась на эхограмме (рис. 1). Учитывалась поправка на отставание трала от судна на эхограмме — корень квадратный из разности квадратов длины ваеров и глубины верхней подборы (к длине ваеров добавлялась длина кабелей от досок до устья трала).

Отбор акустических изображений для измерений *TS* выполняли с использованием программы «FAMAS-DB», которая позволяет осуществлять выборку из базы данных соответствующих заданным условиям фрагментов эхограмм [Кузнецов, Убарчук, 2013]. В данном случае, критериями отбора были минимальная весовая доля объ-

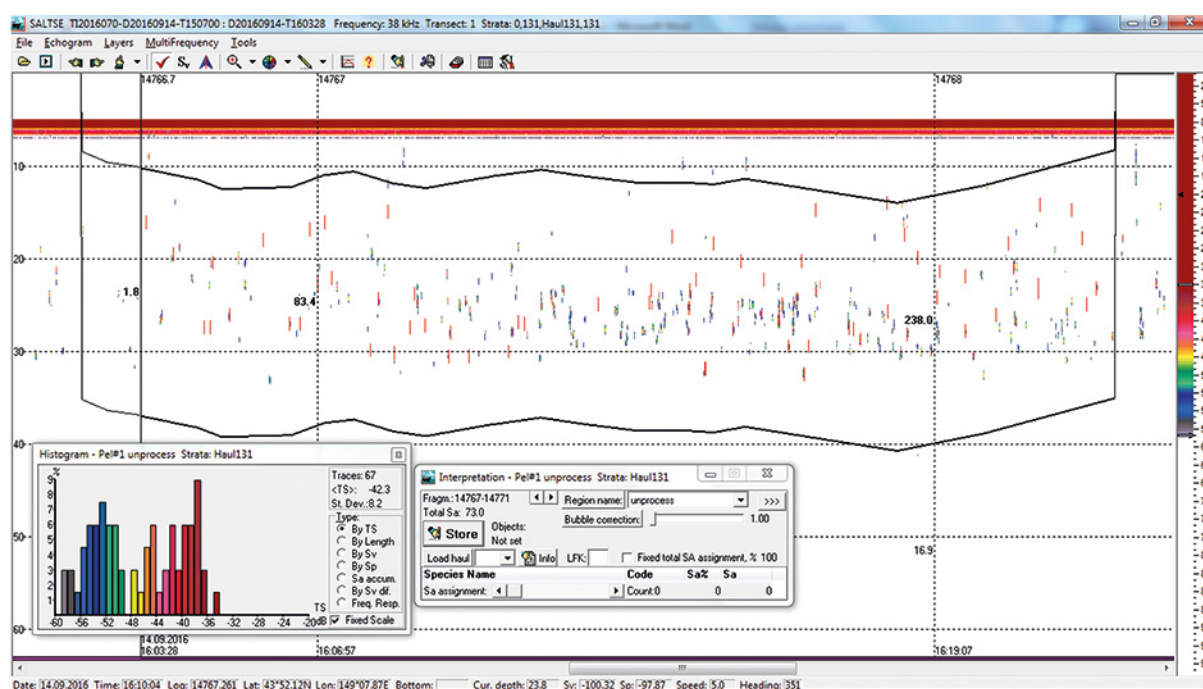


Рис. 1. Эхограмма с загруженным слоем траления по данным с тралового зонда FS20/25

екта в уловах контрольных тралений и время суток (день, ночь). Для получения зависимостей силы цели от длины рыб использовались эхограммы с высоким содержанием скумбрии (весовая доля в улове не менее 95 %, рис. 2).

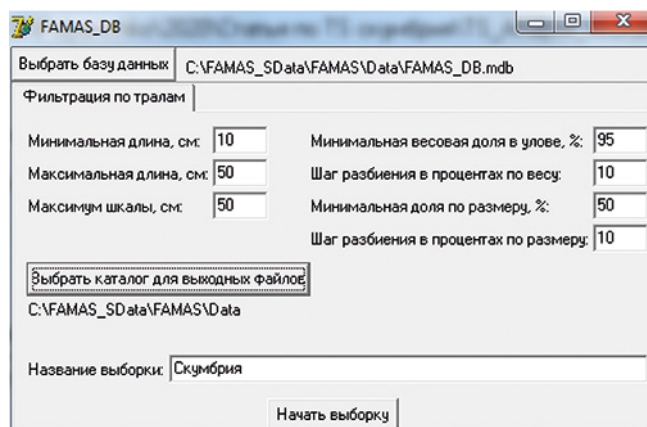


Рис. 2. Окно программы FAMAS-DB

Другим важным моментом является наличие на отобранных эхограммах одиночных целей, разрешаемых индивидуально. В процентном соотношении они должны превышать множественные цели (косяки рыб). Идеальная рыбная концентрация для исследования сил целей представляется как однородное разреженное скопление, состоящее из рыб одного вида с однородным размерным распределением. В плотных скоплениях за одиночные цели могут быть ошибочно восприняты эхосигналы от нескольких

рыб, находящиеся в непосредственной близости друг от друга [Soule et al., 1995; Demer et al., 1999; Conti et al., 2005], что может привести к смещённым оценкам TS . Исходя из этого, для измерений отбирались разреженные агрегации рыб, которые наблюдались преимущественно в ночное время суток. Для некоторых эхограмм, где скумбрия образует плотные скопления, измерения проводились близко к границе скопления в областях с более низкой плотностью, но все же внутри того, что считается общей агрегацией (рис. 3). Предполагалось, что одиночные цели за пределами скопления такие же, что и в их совокупности.

Процесс фильтрации одиночных целей на эхограммах реализован в программном комплексе «SALTSE» [Кузнецов и др., 2020]. В его основе лежит алгоритм пошагового выделения одиночных целей по технологии расщепленного луча, согласно ICES Cooperative Research Report № 235 [Ona, 1999]. Для этого на вкладке «Echotrace» программы постпроцессорной обработки SALTSE (рис. 4) устанавливались параметры, используемые в алгоритме детектирования одиночных целей, а именно:

$TS_{threshold}$ – нижний порог детектирования в дБ. Для исключения в расчетах TS слабых рассеивателей звука, например, крупной фракции зоопланктона, миктофид и других объектов, которые перемещаются к поверхности в темное время суток и присутствуют на эхозаписях вместе со скумбрией, использовался минимальный порог

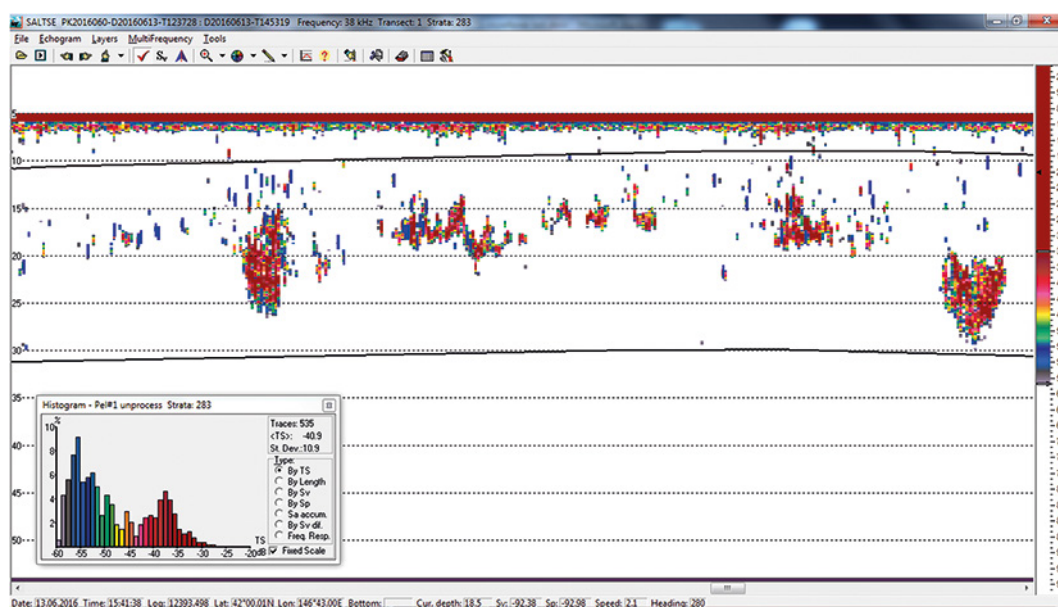


Рис. 3. Пример выделения одиночных целей на эхограмме с косяками рыб

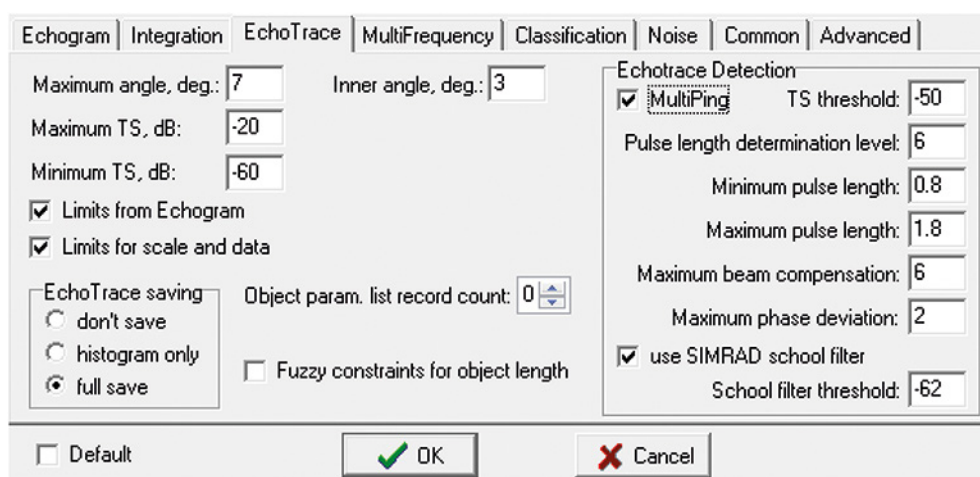


Рис. 4. Окно настроек программы SALTSE с функцией выделения одиночных целей

обнаружения целей (*TS threshold*): от –55 дБ до –50 дБ на частоте 38 кГц и от –60 дБ до –55 дБ на частоте 120 кГц. Пороги выбраны на основе экспертного анализа эхограмм на двух частотах и уловов тралений. Объекты, имеющие силу цели ниже этого порога, не детектируются и не отображаются на эхограмме;

Minimum / Maximum pulse length – минимальная и максимальная длительности принятого импульса от одиночной цели относительно длительности излучённого импульса эхолота. Данный параметр исключает слишком короткие / длинные импульсы;

Pulse length determenation level – величина определяющая, на каком уровне ниже пикового измеряется длительность импульса (дБ);

Maximum beam compensation – порог по максимальной компенсации силы цели, исключающий цели, находящиеся далеко от центра луча (дБ). Чем меньше значение, тем меньше целей детектируется на краях луча;

Maximum phase deviation – цель не считается одиночной, если среднее отклонение для углов превышает заданное значение (в пределах этого импульса).

В параметрах функции выделения сигналов от одиночных целей разработан дополнительный фильтр «*MultiPing*». Этот фильтр исключает ошибочное детектирование одиночных целей от мелких объектов и импульсных помех – к обработке допускаются только те цели, которые выделены минимум на двух последовательных посы-

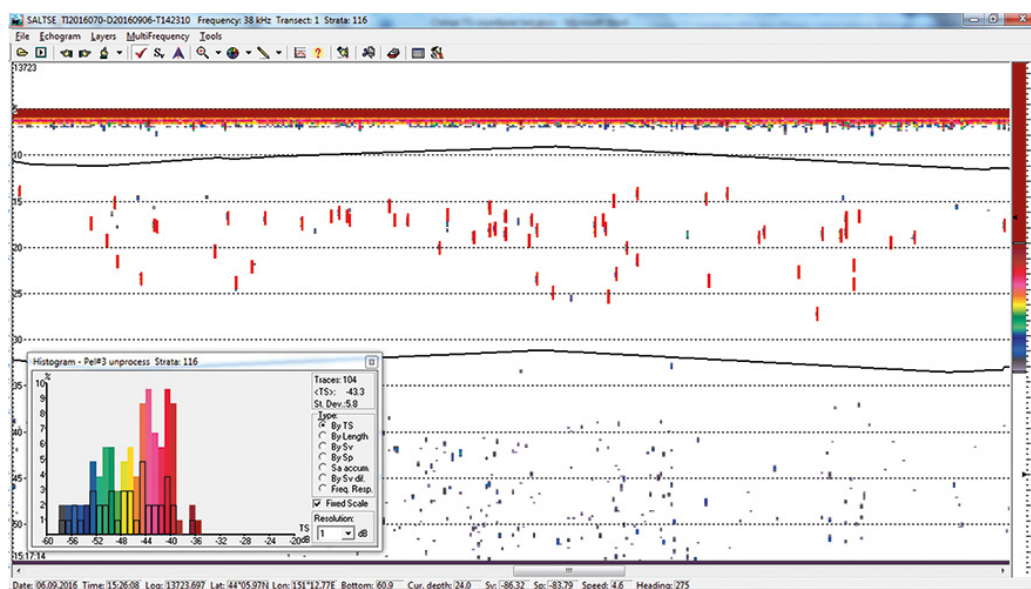


Рис. 5. Окно программы SALTSE с выделенными одиночными целями (красным цветом)

ках (пингах). В результате на эхограмме достоверно выделяются только одиночные рассеиватели и средние силы цели на гистограммах рассчитываются более корректно (рис. 5).

Кроме этого, в программе реализована функция «*School filter*», исключающая детектирование одиночных целей на косяках (участки эхограмм, где высока фоновая сила обратного объёмного рассеяния S_v). С помощью параметра «*School filter threshold*» можно изменять порог детектирования косяка. В этом случае из обработки исключаются участки эхограммы, для которых значения S_v выше порогового на достаточно длительном интервале.

Также на вкладке «*Echotrace*» настраиваются параметры для отображения гистограммы по силе цели в окне «*Histogram*»:

Maximum angle — задаётся порог по отклонению целей от оси антенны (в градусах);

Inner angle — задаётся внутренняя часть проекции луча. Этот параметр позволяет ограничить отображение целей на дополнительной гистограмме внутренним углом (например, 3°).

Maximum / Minimum TS — задаются границы диапазона значений силы целей.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Как было сказано выше, сила цели регистрируемых эхолотом объектов в естественной среде обитания сильно варьирует из-за изменений в ориентации тела и физиологического состояния. Поэтому лучше представлять силу цели как статистическую величину, имеющую среднее значение для достаточно большого количества измерений, распределённых вокруг этого среднего.

Средняя сила цели должна быть рассчитана из среднего сечения обратного рассеяния, а не по средней силе отдельных целей.

Из всей совокупности гидроакустических и биологических данных, накопленных в периоды съёмки в СЗТО в 2015–2017 гг., первоначально было отобрано из базы данных 86 удовлетворяющих заданным условиям траловых станций и соответствующих им фрагментов эхограмм с преобладанием скумбрии в уловах не менее 95 %. Из этого количества, после проверки наличия на эхограммах достаточного количества разрешаемых индивидуально одиночных целей, было отобрано для построения линий регрессии 60 фрагментов эхограмм.

В результате программной обработки эхограмм, включающей процедуры фильтрации и устранения экстремальных выбросов, получали файлы со значениями сил цели выделенных эхотреков на частоте 38 кГц и 120 кГц в формате электронных таблиц «Excel» (© Microsoft). В файлах рассчитаны следующие параметры (рис. 6):

TargetDepth — глубина от поверхности до одиночной цели в метрах;

CompTS — компенсированная сила цели (значение *TS*, приведённое к центру луча);

UncompTS — некомпенсированная сила цели (значение *TS*, измеренное по факту);

AlongShip / AthwartShip (α / β) — угловые координаты цели в луче (продольное и поперечное смещение цели от центра луча);

UncompSv — некомпенсированная сила обратного объёмного рассеяния S_v (измеренная за интервал интегрирования по факту).

Log	Time	Latitude	Longitude	TargetDepth	CompTS	UncompTS	AlongShip	AthwartShip	UncompSv	σ_{bs}	γ
12467.98	10:25:56	44.19	155.19	16.48	-54.25	-66.04	-3.03	-4.18	-64.28	3.76E-06	5.16
12468.51	10:29:38	44.18	155.20	21.27	-37.81	-41.22	-1.75	2.05	-42.48	0.000166	2.70
12468.54	10:29:48	44.18	155.20	18.20	-39.04	-49.04	-4.64	-0.64	-48.49	0.000125	4.68
12468.57	10:30:00	44.18	155.21	18.01	-50.34	-51.35	-1.30	-0.71	-50.68	9.26E-06	1.48
12468.61	10:30:16	44.18	155.21	18.40	-41.40	-44.96	-2.71	-0.64	-44.53	7.24E-05	2.79
12468.79	10:31:26	44.18	155.21	19.16	-51.96	-54.35	2.17	0.71	-54.41	6.36E-06	2.28
12468.82	10:31:36	44.18	155.21	13.23	-43.53	-45.65	1.08	-1.80	-40.99	4.43E-05	2.10
12469.06	10:33:06	44.17	155.21	18.20	-51.62	-53.45	1.66	1.09	-52.90	6.88E-06	1.98
12469.2	10:33:58	44.17	155.22	18.97	-45.13	-55.20	3.84	-2.89	-55.14	3.07E-05	4.80
12469.23	10:34:10	44.17	155.22	19.93	-36.87	-37.49	0.95	0.64	-38.01	0.000205	1.15
12469.23	10:34:10	44.17	155.22	20.88	-38.58	-39.31	-0.40	1.15	-40.37	0.000139	1.22
12469.28	10:34:30	44.17	155.22	19.73	-39.89	-40.79	1.27	0.58	-41.20	0.000103	1.39
12469.8	10:37:46	44.17	155.23	18.97	-54.90	-61.49	1.27	-3.47	-61.43	3.24E-06	3.69
12470.07	10:39:28	44.16	155.23	21.65	-50.59	-59.30	-1.75	-3.92	-60.77	8.74E-06	4.29
12470.25	10:40:38	44.16	155.24	16.86	-46.44	-47.58	1.53	-0.39	-46.10	2.27E-05	1.58
12470.28	10:40:46	44.16	155.24	22.41	-53.57	-55.83	2.11	-0.71	-57.69	4.4E-06	2.22
12470.36	10:41:20	44.16	155.24	20.88	-38.11	-45.78	0.37	3.92	-46.84	0.000155	3.93
12470.37	10:41:22	44.16	155.24	19.35	-52.31	-56.90	-3.16	-0.19	-57.08	5.88E-06	3.17

Рис. 6. Пример итогового файла программной обработки данных

Все значения компенсированной TS скумбрии преобразовывались в сечения обратного рассеяния σ_{bs} (м^2) по формуле:

$$\sigma_{bs} = 10^{(TS/10)}.$$

Для каждой пробы рассчитано результирующее угловое отклонение одиночной цели от оси луча:

$$\gamma = \arccos(\cos\alpha \times \cos\beta),$$

где α и β – продольное и поперечное смещения цели от центра луча.

Поскольку на краях луча погрешность измерения TS выше, цели на углах больше 3° ($\gamma > 3^\circ$) были исключены из обработки.

Для каждого эксперимента (фрагмента эхограммы) вычислены средние арифметические значения σ_{bs} . Соответствующие средние значения TS затем определяли путём повторного преобразования в логарифмическую область согласно формуле [MacLennan et al., 2002]:

$$TS = 10 \log(\sigma_{bs}/A_0),$$

где $A_0 = 1 \text{ м}^2$.

Полученные пары значений средней силы цели (TS), измеренных на выбранных фрагментах эхограмм, и средней длины (L) рыб, пойманных в выделенном слое, подвергались корреляционному и регрессионному анализу для нахождения эмпирической зависимости между ними [Ricker, 1973]. В результате анализа вычислены коэффи-

циенты регрессии для сил цели японской скумбрии в СЗТО со средними размерами от 19 до 31 см.

Зависимости между TS и длиной рыб задаются уравнениями регрессии. Уравнение прямой регрессии для японской скумбрии на частоте 38 кГц:

$$TS = 20,6 \log(L) - 73,7; r = 0,91; R^2 = 0,83.$$

Уравнение обратной регрессии:

$$TS = 24,9 \log(L) - 79,7.$$

Обобщённая регрессия:

$$TS = 22,6 \log(L) - 76,7.$$

Нормированная к $20 \log(L)$ регрессия:

$$TS = 20 \log(L) - 72,8.$$

На частоте 120 кГц уравнение прямой регрессии:

$$TS = 21 \log(L) - 75; r = 0,89; R^2 = 0,8.$$

Уравнение обратной регрессии:

$$TS = 26,2 \log(L) - 82,5.$$

Обобщённая регрессия:

$$TS = 23,5 \log(L) - 78,8.$$

Нормированная к $20 \log(L)$ регрессия:

$$TS = 20 \log(L) - 73,6.$$

Результаты вычислений и эмпирические регрессионные кривые для всего размерного ряда скумбрии в СЗТО на частотах 38 кГц и 120 кГц представлены на рис. 7 и 8.

Для сравнения на рис. 7 представлены линии регрессии $TS(L)$ на частоте 38 кГц, полученные другими исследователями. Некоторые результаты близки, а некоторые отличаются весьма суще-

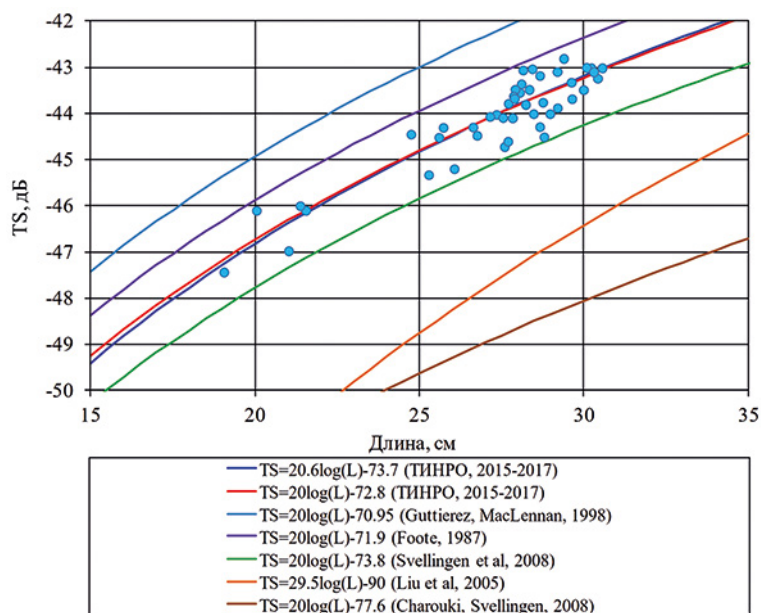


Рис. 7. Зависимости силы цели (TS) скумбрии японской от длины на частоте 38 кГц

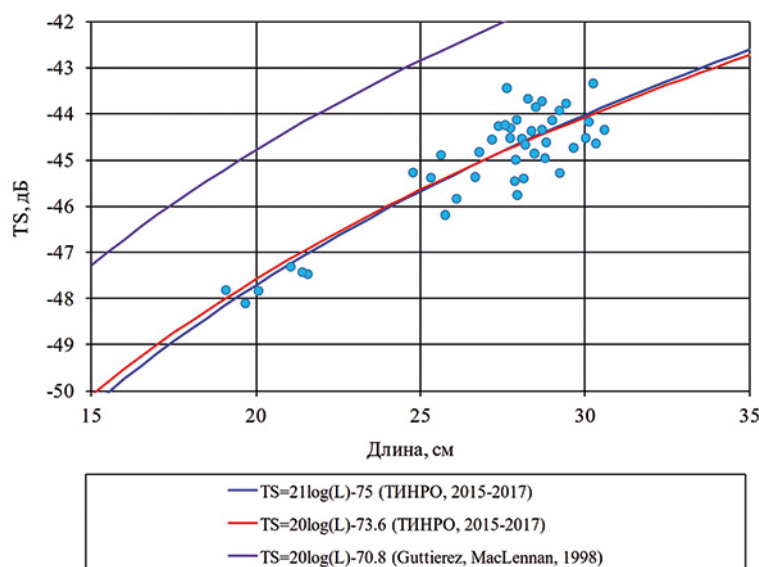


Рис. 8. Зависимости силы цели (TS) скумбрии японской от длины на частоте 120 кГц

ственно. Например, оценки силы цели одиночных особей скумбрии *in situ*, полученные Чароки и Свеллингс [Charouki, Svelling, 2008] в марокканских водах, почти на 5 дБ ниже, чем измеренные нами в СЗТО и на 5,6 дБ меньше, чем используемые этими авторами в акустических съёмках (для сельдевых). Модельные оценки сил цели японской скумбрии тех же авторов [Svelling et al., 2008] имеют разницу с нашими результатами всего в 1 дБ (рис. 7). Уравнение по [Liu et al., 2005], полученное у берегов Тайваня, даёт смещённость оценок сил цели по отношению к нашим в сторону уменьшения от 5 дБ у мелких до 3 дБ у крупных рыб. И наконец, уравнение по Гутьерез и Макленнан [Gutierrez, MacLennan, 1998.] у побережья Перу даёт силы цели скумбрии наоборот, на 2,7 дБ выше, чем полученные нами в СЗТО.

Значительные вариации оценок TS могут быть связаны с различием физиологического состояния скумбрии в периоды акустических измерений. Даже у рыб одного вида и размера, сила цели может существенно различаться с изменением жирности, размеров половых продуктов, наполнения желудка, влияющих на размер и форму плавательного пузыря [Ona, 1990; Jorgensen, 2003]. Существенное влияние на отражательные свойства объекта имеют внешние факторы: двигательное поведение (поиск пищи, реакция рыб на шум судна) и суточное вертикальное распределение и миграции рыб. Связанная с этими факторами ориентация (угол наклона) рыб относительно луча антенны эхолота — наибольший по-

тенциальный источник вариабельности акустической силы цели [Blaxter, Batty, 1990].

Измеренные в СЗТО значения силы цели японской скумбрии заключены между модельной регрессионной кривой [Svelling et al., 2008] и зависимостью, используемой для оценки сельдевых [Foote, 1987]. По уравнениям регрессии разница между ними составляет 1 дБ (рис. 7). Японская скумбрия имеет хорошо развитый плавательный пузырь, поэтому сила обратного рассеяния у неё должна быть существенно выше по сравнению с другими видами скумбрийевых. Например, с атлантической скумбрией разница составляет по разным оценкам более 10 дБ [Scoulding et al., 2017]. При этом отношение длины рыб к длине плавательного пузыря у скумбрии несколько выше, чем у сельдевых видов рыб. Так у сардины (*Sardina pilchardus*) отношение длины плавательного пузыря к длине рыбы составляет 0,3, а у японской скумбрии — 0,2 [Svelling et al., 2008]. С другой стороны, объём плавательного пузыря по отношению к объёму тела у скумбрии чуть больше (2% против 1,5% у сардины). Поэтому полученная нами сила цели скумбрии ожидаемо ниже, чем у сельдевых того же размера, но, из-за указанных морфологических особенностей плавательного пузыря, не намного (на 1 дБ). Однако, разница между силами цели японской скумбрии и сельдевых на 5,7 дБ [Charouki, Svelling 2008], слишком высока. Если применить такую TS для эхоинтеграционной оценки сардины и скумбрии в СЗТО, это вызовет существенное увеличение обилия в их

смешанных скоплениях, а в одновидовых скоплениях численность (биомасса) скумбрии вырастет более чем в три раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Акустические измерения силы цели рыб *in situ* наиболее точны, поскольку выполняются непосредственно в периоды съёмки и с большей вероятностью повторяют их естественное поведение и распределение. Представлен процесс отбора эхограмм и фильтрации одиночных целей японской скумбрии, который реализован в программном комплексе «SALTSE». Для каждого выбранного фрагмента эхограмм вычислены пары значений средней силы целей и средней длины рыб. Получены регрессионные зависимости между ними.

Результаты проведённых исследований подтверждают, что сила цели скумбрии зависит от её длины, а также обладает значительными вариациями даже в пределах одного эксперимента (фрагмента эхограмм), вызванными, скорее всего, положением (ориентацией) рыб и плавательного пузыря относительно горизонтальной плоскости во время акустических измерений. Кроме того, наблюдаются существенные различия отражательной способности японской скумбрии в зависимости от района исследований и, соответственно, физиологического состояния и особенностей поведения и распределения объекта.

Оценки силы цели японской скумбрии в СЗТО примерно на 1 дБ ниже, чем у сельдевых видов рыб. Полученные уравнения регрессии будут использоваться в алгоритме расчёта численности японской скумбрии при проведении тралово-акустических съёмок в СЗТО. В идеале, TS следует уточнять во время каждой съёмки, выполняя необходимое количество измерений отдельных эхотреков на участках тралений *in situ*.

ЛИТЕРАТУРА

- Андреева И.Б. 1964. О рассеянии звука газовыми пузырями рыб в глубоководных звукорассеивающих слоях океана // Акустический журнал. Т. 10. № 1. С. 20–24.
- Андреева И.Б., Самоволькин В.Г. 1986. Рассеяние акустических волн на морских организмах. М.: Агропромиздат. 102 с.
- Гончаров С.М., Попов С.Б., Бондаренко В.М., Мельник Н.Г., Смирнова Н.С., Ханаев И.В. 2008. Измерение силы цели байкальского омуля для повышения точности оценки его запаса в озере Байкал // Рыбное хозяйство. № 3. С. 87–90.
- Ермольчев В.А. 2006. Результаты исследований зависимостей силы цели рыб *in situ* от длины для трески, путасу и мойвы в Баренцевом и Норвежском морях // Рыбное хозяйство. № 1. С. 92–96.
- Кузнецов М.Ю. 2013. Гидроакустические методы и средства оценки запасов рыб и их промысла. Часть 1. Гидроакустические средства и технологии их использования при проведении биоресурсных исследований ТИНРО-Центра // Известия ТИНРО. Т. 172. С. 20–51.
- Кузнецов М.Ю., Убарчук И.А. 2013. Формирование библиотек типовых акустических изображений рыб Охотского и Берингова морей (структура и процедура пополнения) // Известия ТИНРО. Т. 175. С. 182–193.
- Кузнецов М.Ю., Убарчук И.А., Поляничко В.И., Сыроваткин Е.В. 2021. Программный комплекс для визуализации, многовидовой обработки и хранения данных гидроакустических ресурсных съёмок // Труды ВНИРО. Т. 183. С. 174–190.
- Мамылов В.С. 1999. Некоторые аспекты оценки плотности рыбных скоплений тралово-акустическими методами // Развитие технических методов рыбохозяйственных исследований. Мурманск: Изд-во ПИНРО. С. 147–163.
- Урик Р.Д. 1978. Основы гидроакустики. Л.: Судостроение. 448 с. (Urlick, R.J. 1975. Principles of Underwater Sound, 2nd edn. New York: McGraw-Hill Book Company. 384 p.)
- Шишкова Е.В. 1977. Физические основы промысловой гидроакустики. М.: Пищевая промышленность. 247 с.
- Юданов К.И. 1992. Гидроакустическая разведка рыбы. СПб.: Судостроение. 186 с.
- Blaxter, J.H.S., Batty, R.S. 1990. Swimbladder behaviour and target strength // Rapp. P.-v. Reun. Cons. Int. Explor. Mer. V. 189. P. 233–244.
- Charouki N., Svellingen I.K. 2008. Acoustic target strength of chub mackerel (*Scomber japonicus*) measured in situ using split beam acoustics // Symp. on Sci. and the Challenge of Managing Small Pelagic Fisheries on Shared Stocks in Northwest Africa. Casablanca, Morocco, 11–14 March 2008. Rome: FAO fisheries and aquaculture proc. P. 295–302.
- Clay C.S., Heist B.G. 1984. Acoustic scattering by fish: acoustic models and a two-parameter fit // J. Acoustical Society of America. V. 75. P. 1077–1083.
- Clay C.S., Horne J.K. 1994. Acoustic models of fish: the Atlantic cod (*Gadus morhua*) // J. Acoustical Society of America. V. 96. P. 1661–1668.
- Conti S.G., Demer D.A., Soule M.A., Conti J.H. E. 2005. An improved multiple-frequency method for measuring in situ target strengths // ICES J. of Marine Science. V. 62. P. 1636–1646.
- Demer D.A., Soule M.A., Hewitt R.P. 1999. A multifrequency method for improved accuracy and precision of in-situ target strength measurements // J. Acoustical Society of America. V. 105. P. 2359–2376.
- Demer D.A., Berger L., Bernasconi M., Bethke E., Boswell K., Chu D., Domokos R., et al. 2015. Calibration of acoustic instruments. ICES Cooperative Research Report № . 326. P. 133.
- Foote K.G. 1980. Averaging of fish target strength functions // J. Acoustical Society of America. V. 67. P. 504–515.

- Footte K.G. 1985. Rather-high-frequency sound scattering by swimbladdered fish // J. Acoustical Society of America. V. 68. P. 688–700.
- Footte K.G. 1987. Fish target strength for use in echo integrator surveys // J. Acoustical Society of America V. 82. P. 981–987.
- Footte K.G. 1997. Target strength of fish. Encyclopedia of Acoustics. // Encyclopedia of acoustics. V. 1. New York: Wiley. P. 493–500.
- Furusawa M. 1988. Prolate spheroidal models for predicting general trends of fish target strength // J. Acoustical Society of Japan (E). V. 9. P. 13–24.
- Gutierrez M., MacLennan D. 1998. Preliminary results of determination of in situ target strength of main pelagic species: Cruise of RV Humboldt 9803–05 from Tumbes to Tacna // Inf. Inst. Mar. Peru. V. 135. P. 16–19.
- Jorgensen R. 2003. The effects of swimbladder size, condition and gonads on the acoustic target strength 351 of mature capelin // ICES J. of Marine Science. V. 60. P. 1056–1062.
- Lee D.J., Shin H.H. 2005. Construction of a data bank for acoustic target strength with fish species, length and acoustic frequency for measuring fish size distribution // Korean J. Fisheries and Aquatic Sciences. V. 38. № 4. P. 265–275.
- Liu J.M., Wu C.L., Chang Y. 2005. In situ target strength versus fork length relationships of *Scomber japonicus* and *Scomber australasicus* in waters off Northeastern Taiwan // J. Taiwan Fisheries Research. V. 13. № 2. P. 1–9.
- Love R.H. 1971. Dorsal-aspect target strengths of an individual fish // J. Acoustical Society of America. V. 49. P. 816–823.
- MacLennan D.N., Fernandes P.G., Dalen J. 2002. A consistent approach to definitions and symbols in fisheries acoustics // ICES J. of Marine Science. V. 59. P. 365–369.
- Midttun L. 1984. Fish and other organisms as acoustic targets // Rapp. P.-v. Reun. Cons. Int. Explor. Mer. V. 184. P. 25–33.
- Mukai T., Sano N., Iida K., Sasaki S. 1993. Studies on dorsal aspect target strength of ten species of fish collected in the East China Sea // Nippon Suisan Gakkaishi J.V. 59. P. 1515–1525.
- Nakken O., Olsen K. 1977. Target strength measurements of fish // Rapp. P.-v. Reun. Cons. Int. Explor. Mer. V. 170. P. 52–69.
- Ona E. 1990. Physiological factors causing natural variations in acoustic target strength of fish // J. Marine Biological Association of the United Kingdom. V. 70. P. 107–127.
- Ona E. 1999. Methodology for Target Strength Measurements. ICES Cooperative Research Report № 235. P. 65.
- Ona, E. 2001. Herring tilt angles, measured through target tracking. // Herring: Expectations For a New Millenium (eds F. Funk et al.). Anchorage: Alaska Sea Grant College Program. P. 509–520.
- Ricker W.E. 1973. Linear regressions in fishery research // J. Fisheries Research Board of Canada. V. 30. P. 409–434.
- Scoulding B., Gastauer S., MacLennan D.N., Fässler S.M.M., Copland P., Fernandes P.G. 2017. Effects of variable mean target strength on estimates of abundance: the case of Atlantic mackerel (*Scomber scombrus*) // ICES J. Marine Science. V. 74. № 3. P. 822–831.
- Simmonds E.J., MacLennan D.N. 2005. Fisheries acoustics: theory and practice. Oxford, UK: Blackwell Science published. 437 p.
- Soule M., Barange M., Hampton J. 1995. Evidence of bias in estimates of target strength obtained with a split-beam echosounder // ICES J. of Marine Science. V. 52. P. 139–144.
- Svellingen I.K., Charouki N., Benchrifi S. 2008. Target strength of chub mackerel (*Scomber japonicus*) in Moroccan waters measured in situ // Symp. on Sci. and the Challenge of Managing Small Pelagic Fisheries on Shared Stocks in Northwest Africa. Presentation – Casablanca, Morocco, 11–14 March 2008. P. 16.

Поступила в редакцию 26.03.2020 г.
Принята после рецензии 30.03.2020 г.

The study of the acoustic target strength of Chub mackerel in the northwestern Pacific Ocean in situ

M. Yu. Kuznetsov,
V.I. Polyanichko,
E.V. Syrovatkin,
I.A. Ubarchuk

Pacific Branch of VNIRO (TINRO), Vladivostok,
Russia

Significant concentrations of Chub mackerel (*Scomber japonicas*) were found in 2014 in the area of the Southern Kuril Islands (Northwestern Pacific Ocean (NWPO)). Commercial fishing for Chub mackerel was resumed in the NWPO in 2016. In this connection, exploratory work and acoustic-trawl surveys are carried out to identify distribution and abundance of Chub mackerel in the NWPO. Acoustic abundance estimates of the stock size of Chub mackerel is important for fishing. However, the reflectivity of Chub mackerel is not well understood. Collections of *in situ* target strength (TS) signals and corresponding fish size measurements for Chub mackerel were obtained as a result of research in the NWPO (2015–2017). The calibrated scientific echo-sounder “EK-60 Simrad” with two split-beam echo sounders of respectively 38 and 120 kHz was used to collect sonar data. Measurement of the TS of Chub mackerel was conducted at the trawl layer, which corresponds to the trawl opening per the trawling area. The echogram selection process and the filtering process of single targets of Chub mackerel are realized in the “SALTSE” software package (“TINRO”). The dependence of mean target strength (TS, dB) on mean fish length (L, cm) for was estimated as $20 \log(L) - 72,8$ dB at 38 kHz and as $20 \log(L) - 73,6$ dB at 120 kHz. The obtained values backscattering strength (Sv) of Chub mackerel in the NWPO are compared with the values Sv of other studies of the reflective properties of Scombridae.

Keywords: stock assessment, echogram, target strength, backscattering cross-section, single targets, fish length, regression equation.

REFERENCES

- Andreeva I.B. 1964. O rasseyanii zvuka gazovymi puzyryami ryb v glubokovodnykh zvukorasseivayushchikh sloyakh okeana [On the scattering of sound by gas bubbles of fish in deep-sea sound-scattering layers of the ocean] // Akusticheskij zhurnal. T. 10. № 1. S. 20–24.
- Andreeva I.B., Samovol'kin V.G. 1986. Rasseyanie akusticheskikh voln na morskikh organizmakh [Acoustic wave scattering on marine organisms]. M.: Agropromizdat. 102 s.
- Goncharov S.M., Popov S.B., Bondarenko V.M., Mel'nik N.G., Smirnova N.S., KHanaev I.V. 2008. Izmerenie sily tseli bajkal'skogo omulya dlya povysheniya tochnosti otsenki ego zapasa v ozere Bajkal [Measuring the target strength of Baikal omul to increase the accuracy of estimating its stock in Baikal Lake] // Rybnoe khozyajstvo. № 3. S. 87–90.
- Ermol'chev V.A. 2006. Rezul'taty issledovaniy zavisimostey sily tseli ryb in situ ot dliny dlya treski, putassu i mojvy v Barentsevom i Norvezhskom moryakh [The results of study of equation between target strength and length of fish in situ for cod, blue whiting, capelin in the Barents and Norwegian Seas] // Rybnoe khozyajstvo. № 1. S. 92–96.
- Kuznetsov M. Yu. 2013. Gidroakusticheskie metody i sredstva otsenki zapasov ryb i ikh promysla. Chast' 1. Gidroakusticheskie sredstva i tekhnologii ikh ispol'zovaniya pri provedenii bioresursnykh issledovaniy TINRO-Tsentra [Hydroacoustic methods and tools for fish stock assessment and fishery maintenance. Part 1. Hydroacoustic tools and technologies of their use in bioresource researches of TINRO-Center] // Izvestiya TINRO. T. 172. S. 20–51.
- Kuznetsov M. Yu., Ubarchuk I.A. 2013. Formirovanie biblioteki tipovykh akusticheskikh izobrazhenij ryb Okhotskogo i Beringova morej (struktura i protsedura popolneniya) [Formation library of the acoustic typical images of fish of Okhotsk sea and Bering sea (structure and replenishment procedure)] // Izvestiya TINRO. T. 175. S. 182–193.
- Kuznetsov M. Yu., Ubarchuk I.A., Polyanichko V.I., Syrovatkin E.V. 2021. Programmnyj kompleks dlya vizualizatsii, mnogovidovoj obrabotki i khraneniya dannykh gidroakusticheskikh resursnykh s'emok [The software complex for visualization, multiple-view processing and data storage of hydroacoustic resource surveys] // Trudy VNIRO. – T. 183. S. 174–190.
- Mamylov V.S. 1999. Nekotorye aspekty otsenki plotnosti rybnikh skoplenij tralovo-akusticheskimi metodami [Some aspects of assessing the density of fish aggregations by trawl-acoustic methods] // Razvitie

- tekhnicheskikh metodov rybokhozyajstvennykh issledovaniy. Murmansk: Izd-vo PINRO. S. 147–163.
- Urik R.D. 1978. Osnovy gidroakustiki. L.: Sudostroenie. 448 s. (Urik, R.J. 1975. Principles of Underwater Sound, 2nd edn. New York: McGraw-Hill Book Company. 384 p.)
- SHishkova E.V. 1977. Fizicheskie osnovy promyslovoj gidroakustiki. M.: Pishchevaya promyshlennost' [Physical fundamentals of fisheries hydroacoustics]. 247 s.
- Yudanov K.I. 1992. Gidroakusticheskaya razvedka ryby [Hydroacoustic exploration of fish]. SPb.: Sudostroenie. 186 s.
- Blaxter, J.H.S., Batty, R.S. 1990. Swimbladder behaviour and target strength // Rapp. P.-v. Reun. Cons. Int. Explor. Mer. V. 189. P. 233–244.
- Charouki N., Svellingen I.K. 2008. Acoustic target strength of chub mackerel (*Scomber japonicus*) measured in situ using split beam acoustics // Symp. on Sci. and the Challenge of Managing Small Pelagic Fisheries on Shared Stocks in Northwest Africa. Casablanca, Morocco, 11–14 March 2008. Rome: FAO fisheries and aquaculture proc. P. 295–302.
- Clay C.S., Heist B.G. 1984. Acoustic scattering by fish: acoustic models and a two-parameter fit // J. Acoustical Society of America. V. 75. P. 1077–1083.
- Clay C.S., Horne J.K. 1994. Acoustic models of fish: the Atlantic cod (*Gadus morhua*) // J. Acoustical Society of America. V. 96. P. 1661–1668.
- Conti S.G., Demer D.A., Soule M.A., Conti J.H. E. 2005. An improved multiple-frequency method for measuring in situ target strengths // ICES J. of Marine Science. V. 62. P. 1636–1646.
- Demer D.A., Soule M.A., Hewitt R.P. 1999. A multifrequency method for improved accuracy and precision of in-situ target strength measurements // J. Acoustical Society of America. V. 105. P. 2359–2376.
- Demer D.A., Berger L., Bernasconi M., Bethke E., Boswell K., Chu D., Domokos R., et al. 2015. Calibration of acoustic instruments. ICES Cooperative Research Report № . 326. P. 133.
- Foote K.G. 1980. Averaging of fish target strength functions // J. Acoustical Society of America. V. 67. P. 504–515.
- Foote K.G. 1985. Rather-high-frequency sound scattering by swimbladder fish // J. Acoustical Society of America. V. 68. P. 688–700.
- Foote K.G. 1987. Fish target strength for use in echo integrator surveys // J. Acoustical Society of America V. 82. P. 981–987.
- Foote K.G. 1997. Target strength of fish. Encyclopedia of Acoustics. // Encyclopedia of acoustics. V. 1. New York: Wiley. P. 493–500.
- Furusawa M. 1988. Prolate spheroidal models for predicting general trends of fish target strength // J. Acoustical Society of Japan (E). V. 9. P. 13–24.
- Gutierrez M., MacLennan D. 1998. Preliminary results of determination of in situ target strength of main pelagic species: Cruise of RV Humboldt 9803–05 from Tumbes to Tacna // Inf. Inst. Mar. Peru. V. 135. P. 16–19.
- Jorgensen R. 2003. The effects of swimbladder size, condition and gonads on the acoustic target strength 351 of mature capelin // ICES J. of Marine Science. V. 60. P. 1056–1062.
- Lee D.J., Shin H.H. 2005. Construction of a data bank for acoustic target strength with fish species, length and acoustic frequency for measuring fish size distribution // Korean J. Fisheries and Aquatic Sciences. V. 38. № 4. P. 265–275.
- Liu J.M., Wu C.L., Chang Y. 2005. In situ target strength versus fork length relationships of *Scomber japonicus* and *Scomber australasicus* in waters off Northeastern Taiwan // J. Taiwan Fisheries Research. V. 13. № 2. P. 1–9.
- Love R.H. 1971. Dorsal-aspect target strengths of an individual fish // J. Acoustical Society of America. V. 49. P. 816–823.
- MacLennan D.N., Fernandes P.G., Dalen J. 2002. A consistent approach to definitions and symbols in fisheries acoustics // ICES J. of Marine Science. V. 59. P. 365–369.
- Midttun L. 1984. Fish and other organisms as acoustic targets // Rapp. P.-v. Reun. Cons. Int. Explor. Mer. V. 184. P. 25–33.
- Mukai T., Sano N., Iida K., Sasaki S. 1993. Studies on dorsal aspect target strength of ten species of fish collected in the East China Sea // Nippon Suisan Gakkaishi J.V. 59. P. 1515–1525.
- Nakken O., Olsen K. 1977. Target strength measurements of fish // Rapp. P.-v. Reun. Cons. Int. Explor. Mer. V. 170. P. 52–69.
- Ona E. 1990. Physiological factors causing natural variations in acoustic target strength of fish // J. Marine Biological Association of the United Kingdom. V. 70. P. 107–127.
- Ona E. 1999. Methodology for Target Strength Measurements. ICES Cooperative Research Report № 235. P. 65.
- Ona, E. 2001. Herring tilt angles, measured through target tracking. // Herring: Expectations For a New Millenium (eds F. Funk et al.). Anchorage: Alaska Sea Grant College Program. P. 509–520.
- Ricker W.E. 1973. Linear regressions in fishery research // J. Fisheries Research Board of Canada. V. 30. P. 409–434.
- Scoulding B., Gastauer S., MacLennan D.N., Fässler S.M.M., Copland P., Fernandes P.G. 2017. Effects of variable mean target strength on estimates of abundance: the case of Atlantic mackerel (*Scomber scombrus*) // ICES J. Marine Science. V. 74. № 3. P. 822–831.
- Simmonds E.J., MacLennan D.N. 2005. Fisheries acoustics: theory and practice. Oxford, UK: Blackwell Science published. 437 p.
- Soule M., Barange M., Hampton J. 1995. Evidence of bias in estimates of target strength obtained with a split-beam echosounder // ICES J. of Marine Science. V. 52. P. 139–144.
- Svellingen I.K., Charouki N., Benchrifi S. 2008. Target strength of chub mackerel (*Scomber japonicus*) in Moroccan waters measured in situ // Symp. on Sci. and the Challenge of Managing Small Pelagic Fisheries on Shared Stocks in Northwest Africa. Presentation – Casablanca, Morocco, 11–14 March 2008. P. 16.

FIGURE CAPTIONS

Fig. 1. Echogram with loaded trawling layer according to data from the trawl control device FS20/25

Fig. 2. Interface of the «FAMAS-DB» program

Fig. 3. Example of highlighting single targets with schools of fish on an acoustic image

Fig. 4. «SALTSE» program settings window with single target selection characteristics

Fig. 5. «SALTSE» program window with single targets highlighted (red)

Fig. 6. Sample software processing data file

Fig. 7. The dependence of target strength (TS) on Chub mackerel length at 38 kHz

Fig. 8. The dependence of target strength (TS) on Chub mackerel length at 120 kHz