



Аквакультура

Технология учёта численности рыб в садках рыбоводческих хозяйств с использованием гидроакустических и программных средств

М.Ю. Кузнецов, И.А. Убарчук, В.И. Поляничко, В.И. Шевцов

Тихоокеанский филиал ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО» («ТИНРО»), пер. Шевченко, 4, г. Владивосток, 690091

E-mail: mikhail.kuznetsov@tinro.vniro.ru

SPIN-код: М.Ю. Кузнецов 7994–5900, И.А. Убарчук 1761–5470, В.И. Поляничко 8141–6336, В.И. Шевцов 2361–3536

Цель работы: совершенствование методов учёта численности рыб в выростных садках и водоёмах рыбоводческих хозяйств с использованием гидроакустических средств и информационных технологий.

Используемые методы: решение задачи бесконтактного (неинвазивного) определения численности рыб в выростных садках с использованием гидроакустического эхоинтеграционного метода. Исследование отражательных свойств рыб с использованием калиброванного научного эхолота с расщеплённым лучом. Проведение измерений с различным количеством рыб в садке. Выявление и анализ факторов, влияющих на точность эхоинтеграционной оценки численности рыб в садке.

Новизна: элементами новизны являются использование научного эхолота с вертикально-ориентированной антенной и расщеплённым лучом для оценки численности рыб в садках, алгоритм расчёта численности рыб в садках эхоинтеграционным методом, результаты исследования отражательных свойств амурского сазана, а также выявленные оптимальные условия проведения измерений, позволяющие производить гидроакустические оценки численности с максимальной точностью.

Результаты: получены зависимости сил цели от линейного размера одного из объектов садкового выращивания – амурского сазана. Разработана алгоритмическая схема расчёта численности рыб в садках гидроакустическим эхоинтеграционным методом. Проведены эксперименты с различным количеством рыб в садке. Установлено, что основными факторами, влияющими на точность оценки численности, являются плотность и суточное распределение рыб. Измерения в тёмное время суток и при концентрациях выше пороговой (50 шт./м²) позволяют существенно сблизить расчётную и истинную численности рыб в садке и уменьшить вариабельность оценки плотности.

Практическая значимость: решение задачи дистанционного измерения численности рыб в выростных садках позволит фермерам оптимизировать потребности в кормах, что, в свою очередь, обеспечит быстрый рост рыбы, не перекармливая её и не загрязняя водоём.

Ключевые слова: гидроакустический метод, научный эхолот, эхограмма, сила цели, эхоинтегрирование, распределение, численность рыб.

Technology of the fish abundance accounting in fish farming cages using hydroacoustic and software tools

Mikhail Yu. Kuznetsov, Igor A. Ubarchuk, Vladimir I. Polyanichko, Vasilij I. Shevtsov

Pacific branch of VNIRO («ТИНРО»), 4, per. Shevchenko, Vladivostok, 690091, Russia

The purpose of the work: improvement of methods of fish number accounting in growing cages and reservoirs of fish farms using hydroacoustic tools and information technologies.

Methods used: solving the problem of non-contact (non-invasive) measurement of the number of fish in cages using the hydroacoustic echo integration method. Investigation of the reflective properties of fish using a calibrated scientific echo sounder with a split beam. Carrying out measurements with different numbers of fish in cage. Identification and analysis of factors affecting the accuracy of the echo integration estimation of the number of fishes in cage.

Novelty: the elements of novelty are the use of a scientific echo sounder with vertically oriented antenna and split beam to estimate the number of fishes in cages, the algorithm for calculating the number of fishes in cages by the echo integration method, the results of the study of reflective properties of Amur carp and identified optimal measurement conditions that allow hydroacoustic estimates of number with maximum accuracy.

Results: the dependences of target strength on the linear size of Amur carp are obtained. An algorithmic scheme for calculating the number of fishes in cages by the hydroacoustic echo integration method has been developed. Experiments were carried out with different numbers of fish in the cage. It is established that the main factors affecting the accuracy of the population estimate are the number of individuals in the cage and the daily distribution of fish. Measurements at night and at concentrations above the threshold (50 pcs./m²) can significantly bring the estimated and true numbers of fish in the cage closer and reduce the variability of density estimates.

Practical significance: solving the problem of remote measurement of the fish number in growing cages will allow farmers to optimize feed needs, which, in turn, will ensure rapid growth of fish without overfilling it and not polluting the reservoir.

Keywords: hydroacoustic method, scientific echo sounder, echogram, target strength, echo integration, distribution, fish abundance.

ВВЕДЕНИЕ

С развитием гидроакустической техники и технологий цифровой обработки эхосигналов, расширяется список объектов и сфер их применения в рыбном хозяйстве. Например, для решения задачи бесконтактного (неинвазивного) определения и контроля численности рыб в выростных садках и водоёмах рыбоводческих хозяйств.

Чтобы обеспечить быстрый рост рыбы, одновременно не перекармливая её и не загрязняя водоём, для фермеров крайне важно оптимизировать потребности в кормах, что, в свою очередь, определяет численность объектов выращивания. Численность рыб в садке и требуемый объём корма обычно оцениваются на основе периодического ручного отбора проб, который является трудоёмким и весьма приближенным. Кроме того, традиционный метод вызывает физические повреждения и сильный стресс у рыб, что может снизить их рост и повысить смертность [Conti et al., 2006]. Поскольку рыбы постоянно перемещаются, необходим контроль их состояния и распределения в течение длительных временных интервалов с использованием регистрирующих систем, работающих автономно, без присутствия оператора.

Для этого предлагаются различные методы и технические средства. Среди них: оптические, индукционные, методы машинного зрения, ДНК-методы, а также средства пассивной и активной гидроакустической локализации [Daoliang et al., 2020]. Имеющиеся аппаратные реализации могут определять параметры отдельных рыб, но имеют существенные ограничения при высокой плотности гидробионтов и низкой видимости.

Акустические технологии, в отличие от других, работают в любых средах обитания рыб, в т. ч. в полной темноте. Звуковые волны в воде затухают гораздо слабее, чем электромагнитные и распространяются на более значительные расстояния. Исследование одновременно всей толщи воды является ещё одним неоспоримым преимуществом данного метода.

Целью данной работы является совершенствование методов учёта численности рыб в выростных садках и водоёмах рыбоводческих хозяйств с использованием гидроакустических средств и информационных технологий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Количественная интерпретация измеряемых эхолокационным методом гидроакустических данных производится двумя способами — эхосчётом и эхоинтегрированием [Simmonds, MacLennan, 2005]. Эхосчёт применим для оценки разреженных агрегаций в усло-

виях, так называемой, разрешаемой регистрации отдельных рыб. Выделенные эхотреки одиночных рыб поддаются эхосчёту с неподвижного регистратора. Но в большинстве рыбоводческих хозяйств расстояния между объектами в садках соизмеримы или меньше длины звуковой волны (множественные цели). Такая гидроакустическая регистрация является неразрешаемой и, в этом случае, наиболее приемлемо интегрирование эхосигналов [Юданов и др., 1984].

Работы проводились на научно-исследовательской рыбоводной станции (НИРС) Тихоокеанского филиала ФГБНУ «ВНИРО» («ТИНРО») в пос. Лучегорск (Приморский край). Садки НИРС общей длиной около 130 м установлены на водоподводящем канале Приморской ГРЭС. Глубина места — до 4,5 м, скорость течения — до 0,4 м/с.

В качестве объекта исследований в работе выбран амурский сазан (*Cyprinus rubrofasciatus* La Cepede, 1803), являющийся целью массового культивирования в пресноводных водоёмах и садках рыбоводческих хозяйств. При выборе принималось также во внимание то, что исследуемый вид должен иметь стайное поведение и хорошую отражательную способность отдельных особей (наличие плавательного пузыря).

Для проведения экспериментальных работ и отсадки гидробионтов был изготовлен садок размером 2,5×2,5×5,0 м (ячей 10 мм). Для сохранения формы в виде параллелепипеда на дно садка была помещена жёсткая стальная рама из труб, углы которой фиксировались на дне водоёма четырьмя грузами по 50 кг.

Экспериментальный садок был установлен рядом со стандартным рыбоводным, из которого пересаживали необходимое для измерений количество рыб. Глубина водоёма в месте установки садка — около 3,5 м. Перед проведением измерений отсаженные объекты предварительно выдерживали в садке в течение 1–2 часов для адаптации.

В качестве основной гидроакустической измерительной системы использовался мобильный научный эхолот Simrad EK60. Эхолот представляет собой комплект GPT-приёмопередатчиков и антенн 70, 200 и 333 кГц с расщеплённым лучом и ноутбук с установленным на нём программным обеспечением Simrad ER60. Данное оборудование позволяет выполнять регистрацию акустических данных в файлах известного формата Simrad RAW или HAC [McQuinn et al., 2005], поддерживая, таким образом, возможность их накопления и последующей постпроцессорной обработки. Место проведения работ было оборудовано стационарным брызгозащищённым боксом с аппаратурой регистрации данных и источником автономного питания.

Перед экспериментами была выполнена калибровка параметров приёмопередающего тракта и антенн эхолота с использованием стандартной (эталонной) цели [Demer et al., 2015].

Антенну эхолота устанавливали с помощью плотика и оттяжек в центре садка (рис. 1). В эхолоте были установлены: длительность импульса – 0,128 мс; интервал между посылками – максимальный (10 пингов/с). Питание устройств производилось автономно от аккумулятора 12 В. Сбор и накопление гидроакустических данных производились непрерывно на частоте 70 кГц с использованием программы Simrad ER60. Для визуализации и анализа акустических изображений (эхограмм) с различным масштабированием и выделением слоёв использовался программный комплекс «SALTSE» [Кузнецов и др., 2021 а].

Оценка отражательной способности рыб. Отражательные способности рыб количественно оцениваются акустическим сечением обратного рассеяния (σ) и силой цели (TS). Сила цели представляет собой

логарифмическую форму выражения отражательной способности объектов и обычно представляется как функция их длины:

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

где: L – абсолютная или зоологическая длина рыбы (см); a – наклон; b – уровень сигнала, отражённого от рыбы длиной $L=1$ см.

Важным условием при измерении отражающих свойств рыб является наличие на эхограммах одиночных целей, разрешаемых индивидуально. В плотных скоплениях за одиночные цели могут быть ошибочно восприняты эхосигналы от нескольких рыб, находящихся в непосредственной близости друг от друга, что может привести к смещённым оценкам TS [Conti et al., 2005]. Другим неперенным условием для измерения сил целей является одномерный размерный состав исследуемых рыб.

Для этого по результатам массового промера в рыбоводном садке, из которого производилась отсадка рыб в экспериментальный садок, были выделены три доминирующие размерные группы амурского сазана: мелкие особи 23–26 см ($L_{cp} = 24,6$ см), средние особи 29–32 см ($L_{cp} = 30,4$ см), крупные особи 34–38 см ($L_{cp} = 35,8$ см).

Затем, в экспериментальный садок последовательно отсаживали по 20 особей каждой размерной группы рыб. При такой плотности рыб в садке обеспечивалась разрешаемая регистрация, т. е. большинство особей сазана детектировались как одиночные цели. Производились непрерывные гидроакустические измерения в центре садка на частоте 70 кГц.

Процесс фильтрации одиночных целей на эхограммах реализован в программном комплексе «SALTSE» [Кузнецов и др., 2021]. В его основе лежит алгоритм пошагового выделения и измерения одиночных целей по технологии расщеплённого луча [Ona, 1999]. Для исключения в расчётах TS слабых рассеивателей звука, например, мелких рыб, пузырьков воздуха, остатков пищи и других объектов, которые присутствовали на эхозаписях вместе с амурскими сазанами, использовался минимальный порог обнаружения целей ($TS \text{ threshold}$) – 45 дБ. Объекты, имеющие силу цели ниже этого порога, не детектировались как одиночные цели.

По мере накопления необходимого объёма данных (выделенных одиночных целей), рыб удаляли из садка и подсаживали особей следующей размерной группы. Фрагменты акустических изображений отсаженных в садок и разрешаемых индивидуально целей (эхотреков) различных размерных групп рыб представлены на рис. 2.

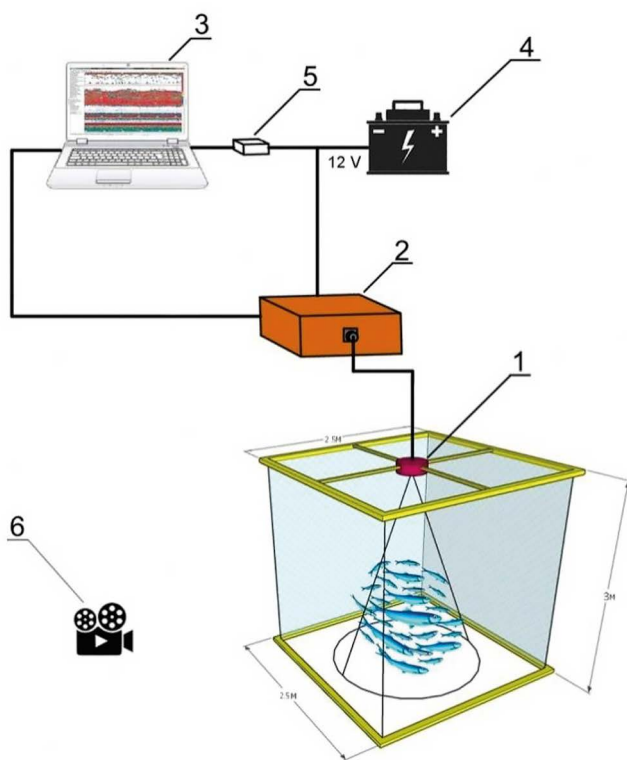


Рис. 1. Схема проведения измерений: 1 – антенна эхолота 70 кГц, 2 – приёмопередатчик (GPT), 3 – компьютер с программным обеспечением (ER60, SALTSE), 4 – аккумулятор 12 В, 5 – адаптер 12 В, 6 – фото-видеокамера

Fig. 1. Measurement scheme: 1 – echo sounder antenna 70 kHz, 2 – transceiver (GPT), 3 – computer with software (ER-60, SALTSE), 4 – 12V battery, 5 – 12V adapter, 6 – photo-video camera

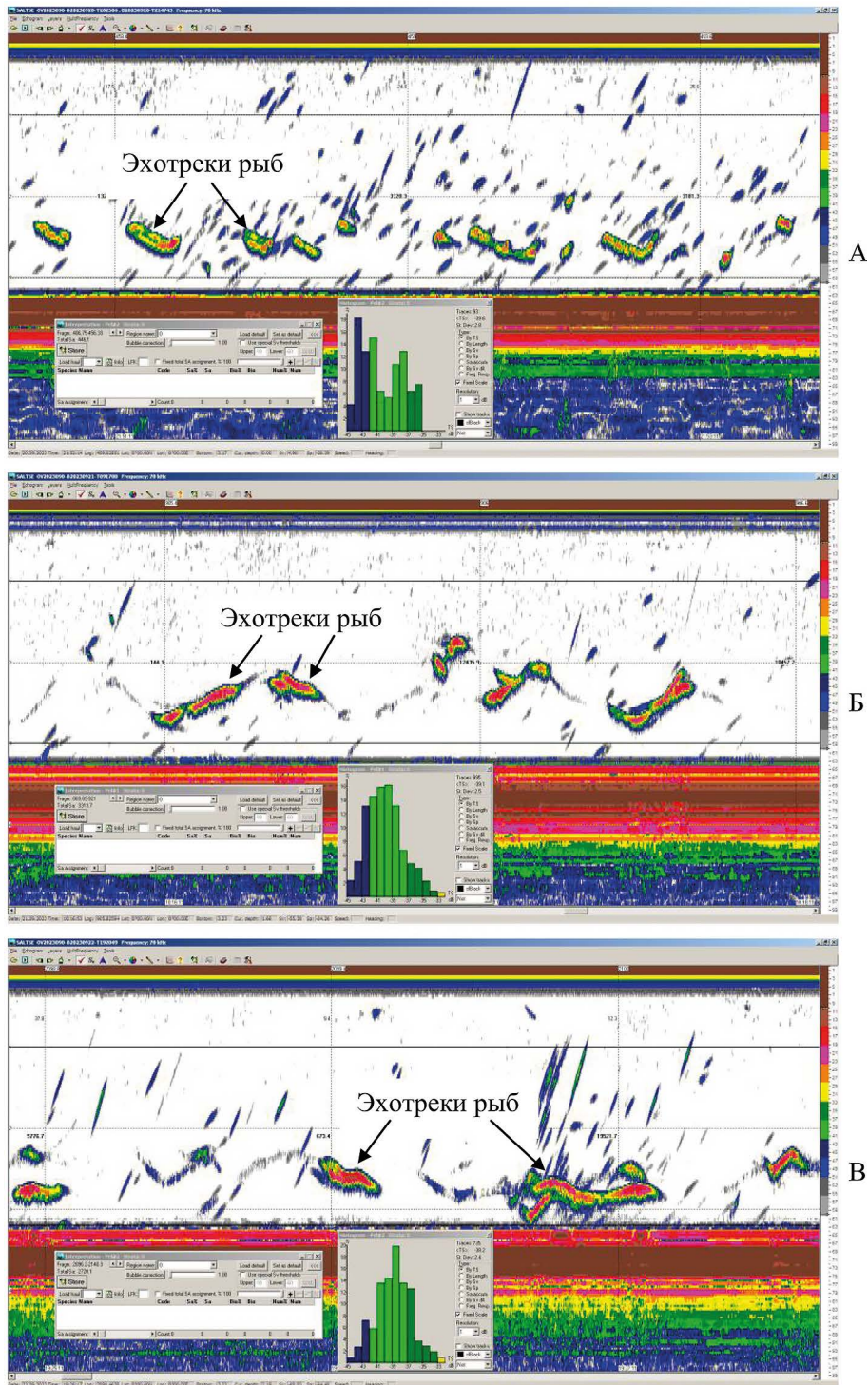


Рис. 2. Окно программы «SALTSE» с одиночными целями рыб размерной группы: 23–26 см (А), 29–32 см (Б), 34–38 см (В)
Fig. 2. The window of the “SALTSE” program with single fish targets of the size group: 23–26 cm (A), 29–32 cm (Б), 34–38 cm (B)

Эксперименты с различным количеством рыб в садке. Алгоритм расчёта численности амурского сазана в садке (рис. 3) в настоящее время реализован в программе электронных таблиц «Excel» (© Microsoft) и в дальнейшем будет встроен в виде дополнительного программного модуля в «SALTSE».

На нынешнем уровне реализации «SALTSE» читает файлы RAW, записанные эхолотом, рассчитывает значения обратного объёмного рассеяния s_v , и отображает их в виде эхограммы. На эхограмме задаются верхняя и нижняя границы распределения рыбы. В пределах этого слоя программа производит инте-

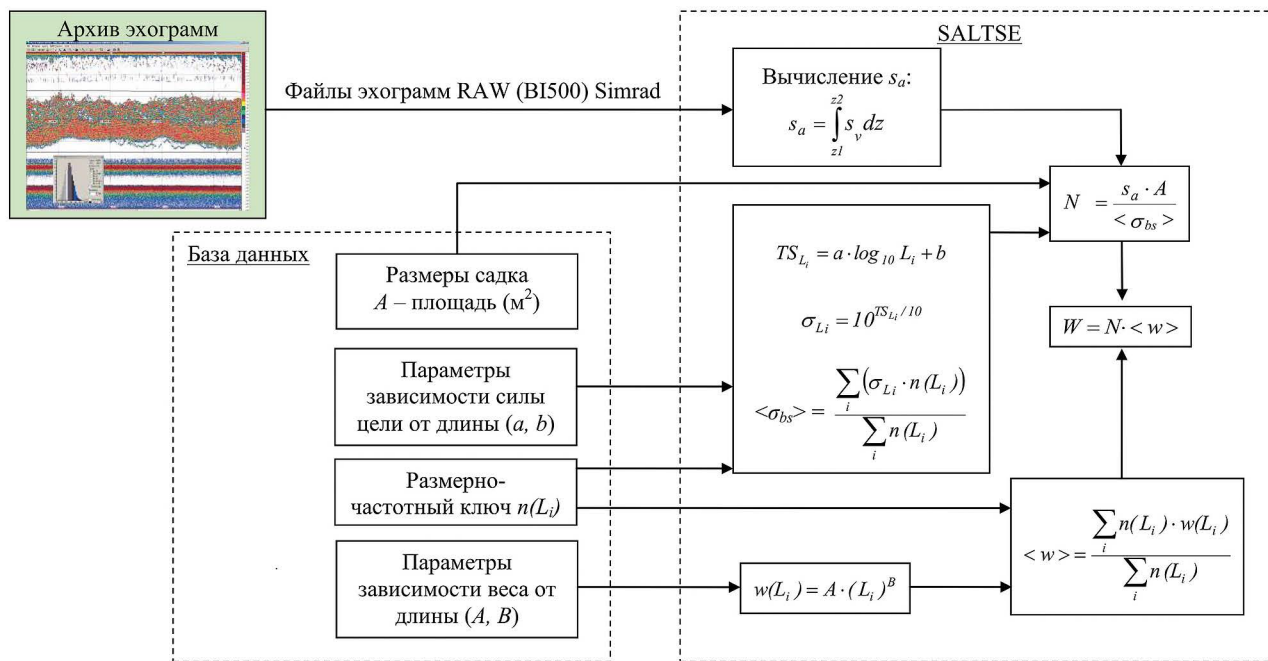


Рис. 3. Алгоритмическая схема расчёта численности рыб в садках:

i – индекс длины объекта; s_a – коэффициент обратного поверхностного рассеяния на квадратный метр (м²/м²) [MacLennan et al., 2002]; s_v – объёмный коэффициент обратного рассеяния (м⁻¹); z_1 и z_2 – верхняя и нижняя границы слоя интегрирования; L_i – зоологическая длина объекта (см); TS_{L_i} – значение силы цели объекта (дБ); a, b – коэффициенты для расчёта силы цели $TS(L_i)$; $n(L_i)$ – количество особей i -й длины в промере (экз.); A, B – коэффициенты для расчёта веса объекта $w(L_i)$; $\langle w \rangle$ – средний вес объекта в садке; σ_{L_i} – поперечное сечение обратного рассеяния (м²); $\langle \sigma_{bs} \rangle$ – ожидаемое среднее значение поперечного сечения обратного рассеяния единичного объекта (м²); N, W – численность и биомасса рыб в садке (экз., кг)

Fig. 3. Algorithmic scheme for calculating the number of fish in cages:

i – is the index of the length of the object; s_a is the inverse surface scattering coefficient per square meter (m²/m²) [MacLennan et al., 2002]; s_v is the volumetric backscattering coefficient (m⁻¹); z_1 and z_2 are the upper and lower boundaries of the integration layer; L_i is the zoological length of the object (cm); TS_{L_i} – the value of the target strength of the object (dB); a, b – coefficients for calculating the target strength $TS(L_i)$; $n(L_i)$ – the number of individuals of the i -th length in the measurement (pcs.); A, B – coefficients for calculating the weight of the object $w(L_i)$; $\langle w \rangle$ – the average weight of the object in the cage; σ_{L_i} – the cross-section of the backscattering (m²); $\langle \sigma_{bs} \rangle$ – the expected average value of the cross – section of the backscattering of a single object (m²); N, W – the number and biomass of fish in the cage (pcs., kg)

гирование и вычисляет среднее значение коэффициента обратного поверхностного рассеяния s_a (м²миля⁻²), которое пересчитывается в s_a (м²м⁻²). При этом автоматически производится компенсация самозатенения, возникающего при большой плотности скопления объекта [Simmonds, MacLennan, 2005].

Сначала вычислялся s_a пустого садка (фон садка) (рис. 4). Затем в экспериментальный садок последовательно отсаживали особей амурского сазана нарастающей численностью 10, 20, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450 и 500 экз. Интервал между подсадками составлял от 4 до 12-ти часов при численности 10–50 экз. и от 6 до 24-х часов при численности 100 экз. и выше. Запись гидроакустических данных производилась непрерывно. Из полученных значений s_a вычитался фон садка $s_{aфон}$. Фрагменты постпроцессинговой обработки акустических изображений (эхограмм) при различном количестве отсаженных рыб, представлены на рис. 4.

В таблицы заносился промер длины рыб в рыбо-водном садке $n(L_i)$ (размерно-частотный ключ) (рис. 5), размеры садка и параметры зависимости силы цели $TS(L_i)$ a и b . Согласно уравнениям на рис. 3 вычислялось среднее значение поперечного сечения обратного рассеяния единичного объекта $\langle \sigma_{bs} \rangle$. Предполагается, что рыбы распределены равномерно внутри слоя высотой z в форме параллелепипеда. Разделив s_a на $\langle \sigma_{bs} \rangle$ и умножив на площадь садка, получали оценку численности N рыб в садке. Весовые характеристики рыб в данной работе не рассматривались.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сила цели непосредственно влияет на оценки численности рыб гидроакустическим методом. Поэтому получение адекватных зависимостей $TS(L)$ с использованием калиброванных измерительных систем является важнейшим этапом организации гидроакустического мониторинга рыб в выростных садках.

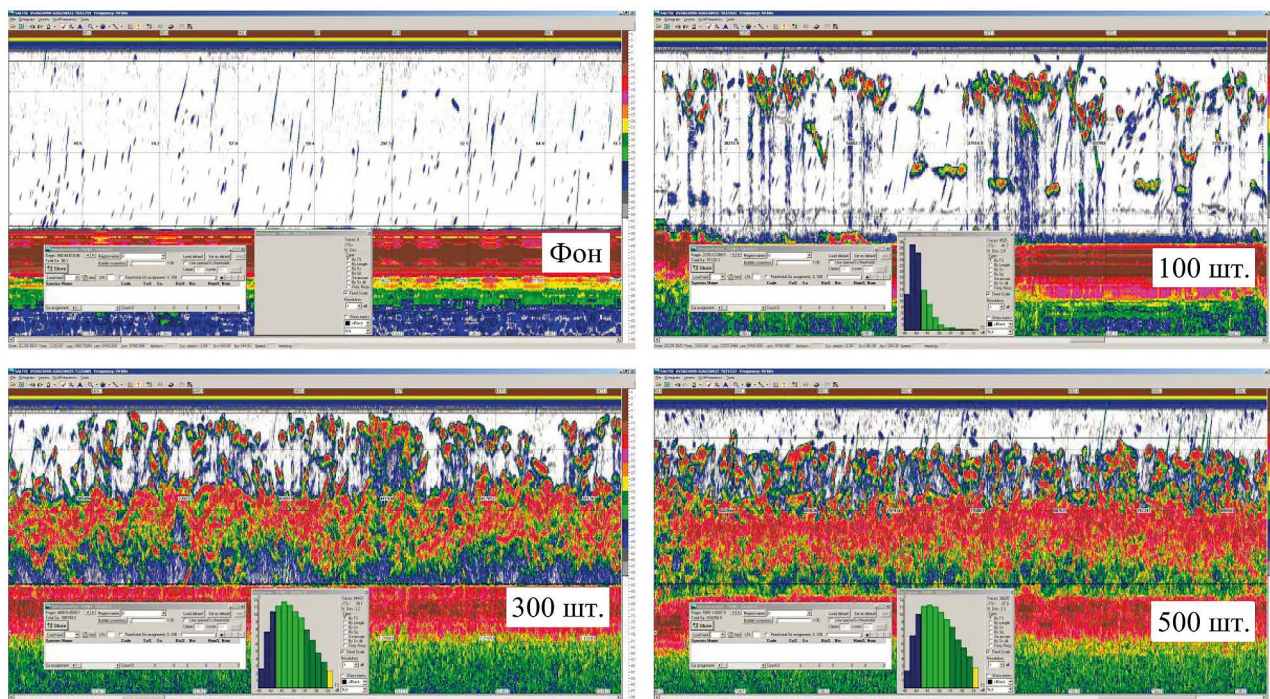


Рис. 4. Окно программы «SALTSE» при различном количестве рыб в садке
 Fig. 4. The window of the “SALTSE” program with different number of fish in the cage

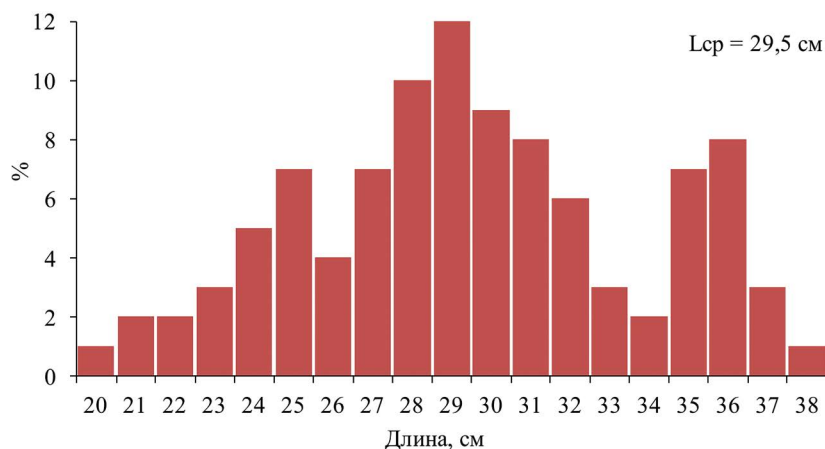


Рис. 5. Размерно-частотная композиция рыб в садке (промер 100 шт.)
 Fig. 5. Size-frequency composition of fish in a cage (sample size 100 pcs.)

В результате программной обработки эхограмм, включающей процедуры фильтрации и устранения экстремальных выбросов [Кузнецов и др., 2021 б], получали файлы со значениями сил цели выделенных эхотреков на частоте 70 кГц в формате электронных таблиц «Excel» (© Microsoft). Поскольку на краях луча погрешность измерения TS выше, цели на углах больше 3° 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]:

$$TS = 10\log(\sigma_{bs} / A_0), \text{ где } A_0 = 1 \text{ м}^2.$$

Гистограммы размерной композиции рыб в выделенных размерных группах и соответствующие оценки силы цели этих рыб представлены на рис. 6.

Полученные пары значений средней силы цели (TS), измеренных на выбранных фрагментах эхограмм, и средней длины (L) рыб каждой размерной группы,

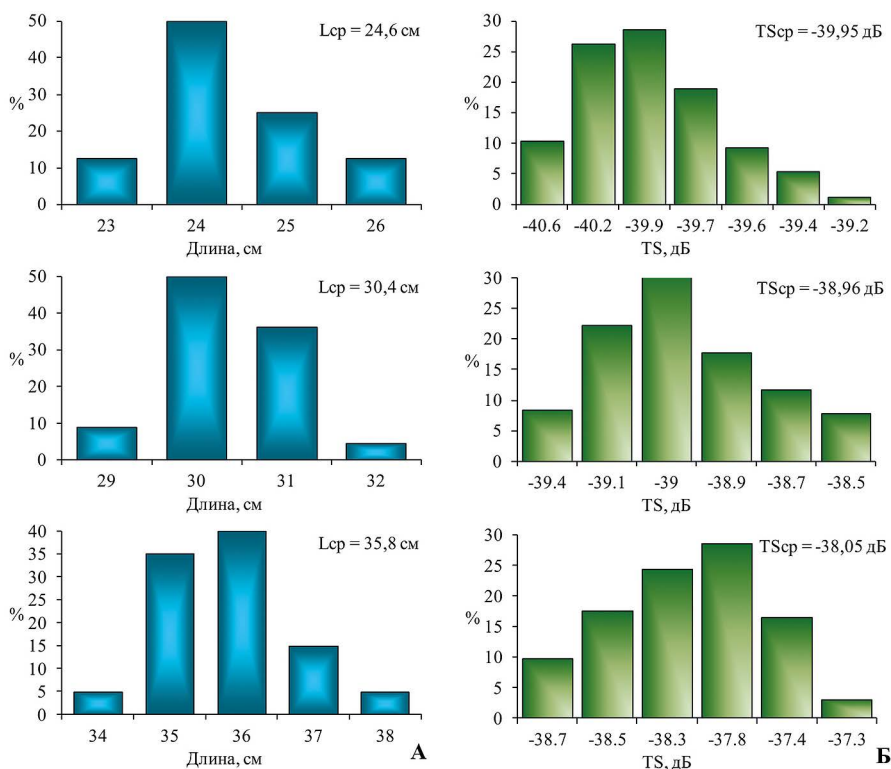


Рис. 6. Выделенные размерные группы амурского сазана (А) и оценки силы цели особей (Б)
Fig. 6. The selected size groups of Amur carp (A) and the estimates of the target strength of individuals (B)

подвергались регрессионному анализу [Ricker, 1973]. Уравнение регрессии: $TS = 11,6 \log(L) - 56,1$. Нормированная к $20 \log(L)$ регрессия: $TS = 20 \log(L) - 68,5$. Эмпирические регрессионные кривые для амурского сазана на частоте 70 кГц представлены на рис. 7.

Параметры зависимости $TS(L)$ a и b использовались в алгоритме расчёта численности (см. рис. 3) при

проведении экспериментов с различным количеством рыб в садке.

Рис. 8 демонстрирует отношения численности рыб в садке, рассчитанной эхоинтеграционным методом – $N_{расч}$, и ручного счёта (истинная численность) – $N_{ист}$ в зависимости от количества отсаживаемых особей. Расчётная численность рыб при их количестве в сад-

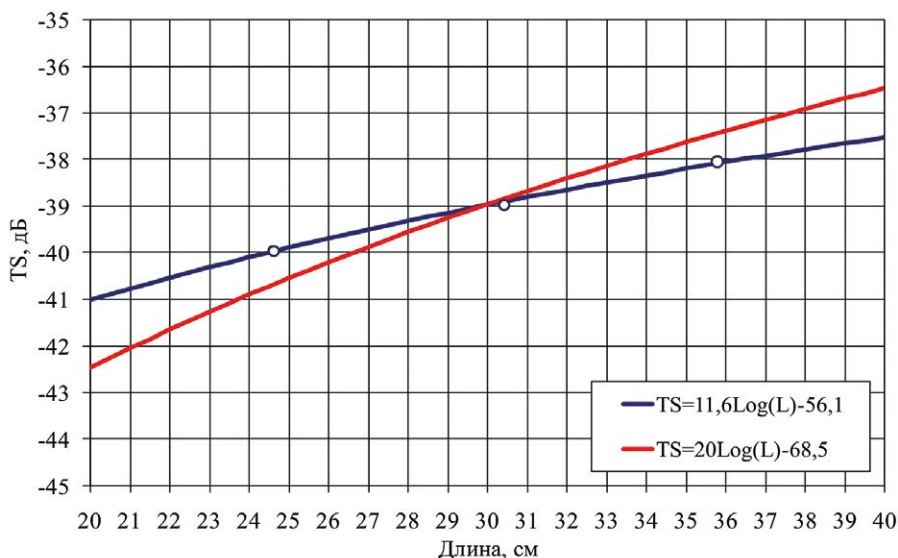


Рис. 7. Зависимости силы цели амурского сазана от длины на частоте 70 кГц (длительность импульса 0,128 мс)
Fig. 7. Target strength dependencies of Amur carp from the length at a frequency of 70 kHz (pulse duration 0,128 ms)

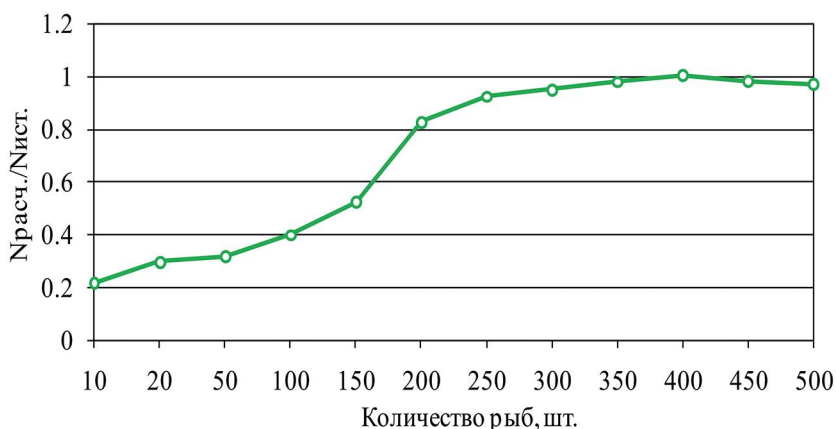


Рис. 8. Отношение расчётной к истинной численности рыб в садке в зависимости от количества отсаженных особей
Fig. 8. The ratio of the estimated and true number of fish in the cage depending on the number of transplanted individuals

ке от 10 до 150 шт. значительно ниже истинной. При дальнейшем увеличении числа рыб (начиная от 200 шт.) расчётная численность и данные ручного счёта рыб существенно сближаются.

Результаты видеосъёмки показали, что при низкой плотности (меньше 50 шт./м²) рыбы предпочитают

держаться у стенок садка, а не в его центре. Расхождение (погрешность) оценки в центре садка самая высокая. Причём, чем меньше рыб в садке, тем больше погрешность оценки их численности (рис. 8). С ростом числа особей в садке погрешность снижается. Рыбы распределяются более равномерно (более плоско) от

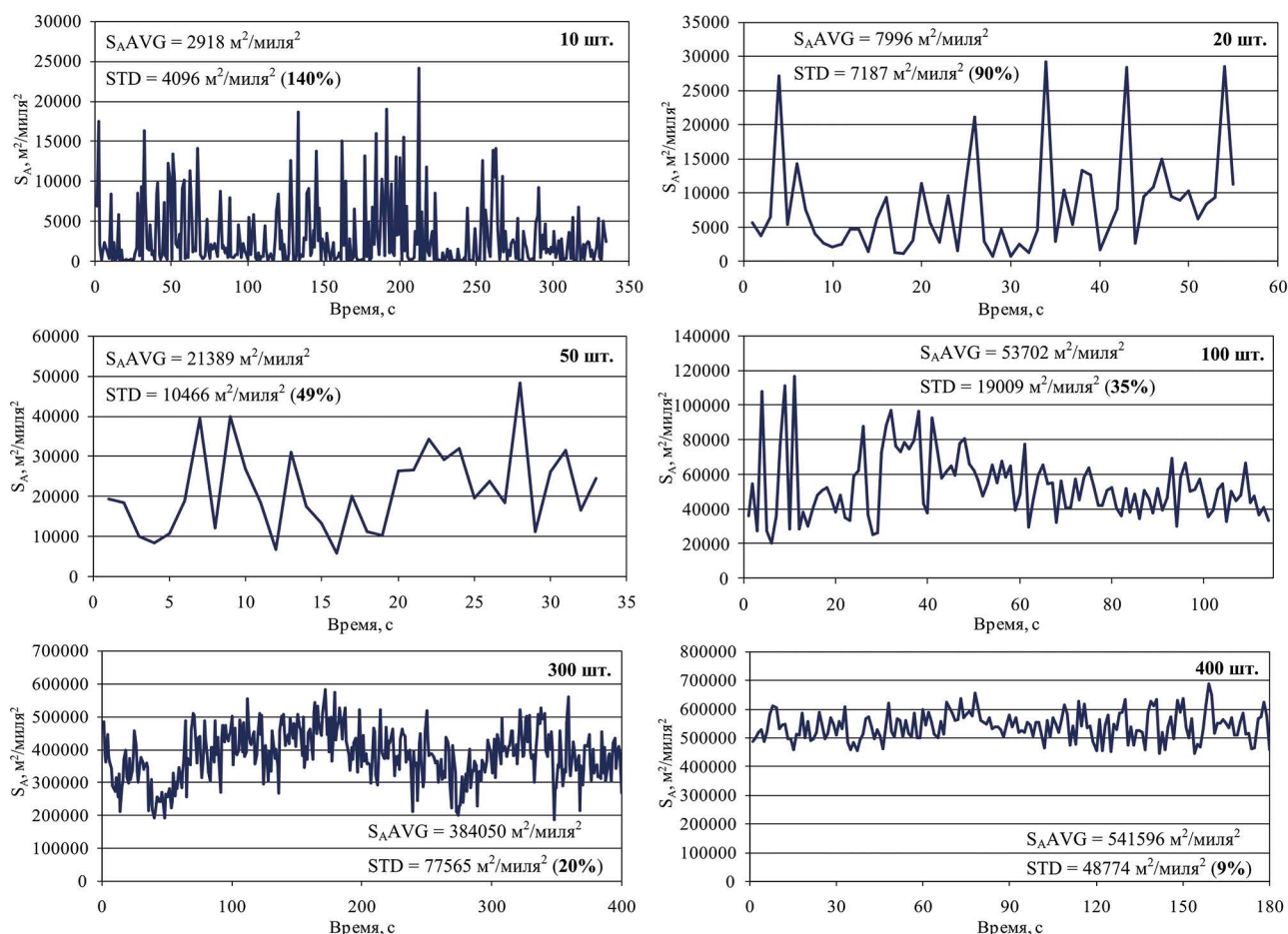


Рис. 9. Вариабельность измеряемой эхоинтеграционным методом плотности рыб в садке
Fig. 9. Variability of the fish density measured using the echo integration method in the cage

стенок садка к его центру. Увеличивается высота занимаемого ими слоя. При концентрациях выше указанного порога (в нашем случае 50 шт./м²) отношения расчётной и истинной численности рыб становятся близки к 1 (рис. 8).

Вариабельность акустической оценки плотности в садке с минимальным количеством рыб (10 шт.) самая высокая: среднеквадратичное отклонение (STD) около 140% (рис. 9). С увеличением числа рыб в садке разброс значений плотности относительно среднего значения последовательно снижается. При численности рыб в садке более 400 шт. среднеквадратичное отклонение оценки плотности не превышает 10%.

Помимо количества рыб в садке, другим основным фактором, влияющим на точность эхоинтеграционной оценки численности рыб в садке, является время суток (суточное распределение рыб). Судя по динамике измеряемой эхолотом акустической плотности S_A (рис. 10), в дневное время оценки численности в центре садка снижаются. Рыба избегает прямых солнечных лучей и уходит из-под антенны в теневую зону. По материалам фото-видефиксации, рыбы собираются у выдуваемой течением наружу стенки садка. Часть рыб днём находится под выдутой вовнутрь средней сетной частью противоположной стенки садка. Поэтому оценки численности либо минимальны, либо, за счёт перемещения рыб, сильно варьируют даже при концентрациях выше порога в 50 шт./м². При попытке смещения антенны в сторону скопления растёт вероятность захвата лучом эхолота боковых стенок садка.

Перед закатом наблюдается рост численности рыб в центре садка (рис. 10). Таким образом, оптимальное

для проведения измерений – сумеречное и ночное время суток. В тёмное время оценки плотности рыб в центре садка стабильно высокие, что говорит о том, что скопление находится в луче эхолота и рыбы равномерно распределены внутри садка.

Одним из способов достижения более стабильных измерений плотности и требуемой точности в дневной период является использование тёмного покрывала, натянутого над садком. Распределение рыб по площади садка становится более равномерным. То есть распределение приближено к ночному, но не такое равномерное как ночью, поскольку свет частично проникает через боковые стенки садка. Среднеквадратичное отклонение становится существенно (на 10–50%) ниже, чем на соседних участках эхограмм (без покрывала). Степень эффективности использования тёмного покрывала в течение дня требует уточнения путём экспериментов с контролируемым уровнем освещённости в садке.

Выбор длительности импульса обуславливается достаточным разрешением по глубине и необходимостью сокращения приповерхностной мёртвой зоны. Если рыбы не заходят в «мёртвую зону» антенны эхолота (0,4 м на частоте 70 кГц при длительности 0,128 мс) и разрешение достаточно, то уменьшать длительность импульса нет необходимости. Выбор производится при визуальном анализе эхограммы.

При выборе ширины луча эхолота необходимо исходить из площади и глубины садка (скопления рыб). Сильное течение может вызвать отличное от вертикального положение (выдувание) боковых стенок садка. Увеличивая ширину луча, растёт вероятность за-

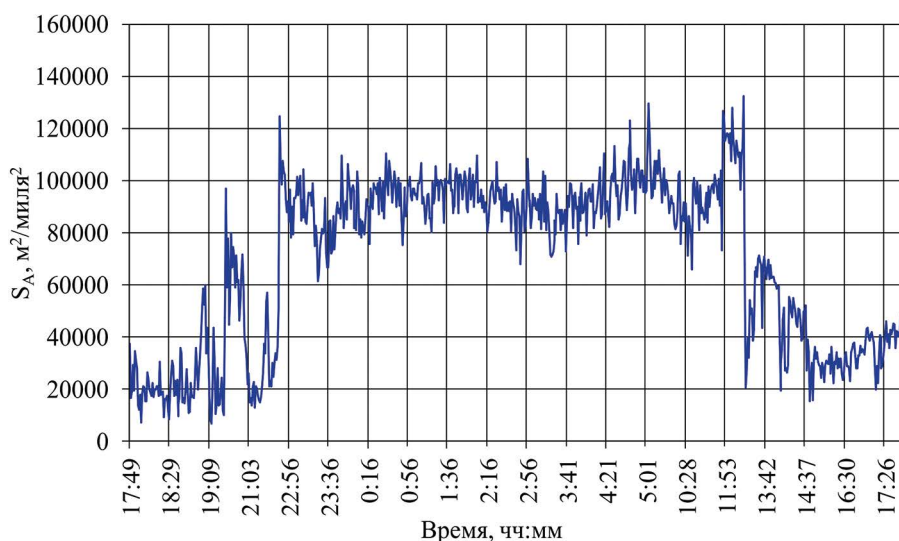


Рис. 10. Динамика акустической плотности рыб в центре садка в течение суток (100 шт.)

Fig. 10. Dynamics of acoustic density of fish in the center of the cage during the day (100 pcs.)

хвата лучом эхолота стенок садка. При ширине луча эхолота 7° стенки используемого нами экспериментального садка не захватываются лучом эхолота и не создают помеху.

Возможный захват лучом эхолота боковых стенок садка необходимо учитывать при выборе местоположения зон лоцирования антенны и изменении её пространственного положения с целью охвата всего внутреннего периметра садка. Наиболее приемлемым является измерение акустической плотности рыб узконаправленным лучом в центре садка и последующая её интерполяция по площади садка. При этом может вводиться поправка на форму распределения рыбы в садке, например, эллиптическую, сферическую, комбинированную между эллипсом и параллелепипедом или на форму садка при условии равномерного распределения рыб.

Существенное искажение распределения рыб в садке наблюдается во время кормления и в период, предшествующий кормлению. Как видно, подача корма в соседних садках вызывает перемещение рыб из центра садка в сторону кормящихся рыб, а кормление в самом экспериментальном садке – усиление двигательной активности и перемещение части рыб к поверхности (рис. 11). Не менее 15 мин. требуется для восстановления естественного распределения после кормления. Проведение эхоинтеграционных измерений численности в этот период нецелесообразно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что основными факторами, влияющими на точность оценки численности, являются количество особей сазана в садке и суточное распределение рыб. Выявлены критические (минимальные) концентрации рыб в садке, начиная с которых акустические измерения корректны. Ночью рыбы распреде-

лены более равномерно внутри садка, поэтому это время является оптимальным для проведения измерений.

Кроме того, точность оценки численности в значительной степени определяет презентабельность выборки размерного состава рыб в садке (размерно-частотного ключа) и корректные измерения силы цели. Так, при ошибке измерения размера рыб всего на 1 см, эхоинтеграционная оценка численности смещается: у рыб длиной 25 см – на 6%, 30 см – на 5%, 35 см – на 4%. При изменении силы цели на 1 дБ оценка численности смещается на 25,9%.

Отражательные свойства даже одного вида рыбы, выращенной в разных условиях, могут существенно различаться. Различие определяет в основном объём плавательного пузыря, который, как известно, зависит от степени наполнения желудка, размеров половых продуктов и других изменений внутренних органов, присущих рыбам при различном их физиологическом состоянии и условиях обитания [Она, 1990; Jorgensen, 2003]. Поэтому отражательные способности рыб должны измеряться в каждом рыбноводном хозяйстве индивидуально.

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам научно-исследовательской рыбноводной станции Тихоокеанского филиала ФГБНУ «ВНИРО» («ТИНРО») в пос. Лучегорск и лично её начальнику, к. б. н. Д.Ю. Амвросову за организацию и всестороннюю помощь при проведении экспериментальных работ. Авторы глубоко признательны к. б. н., вед. научн. сотруднику Тихоокеанского филиала ФГБНУ «ВНИРО» («ТИНРО») Е.И. Рачеку за консультации и ценные рекомендации во время полевых наблюдений и в процессе работы над рукописью.

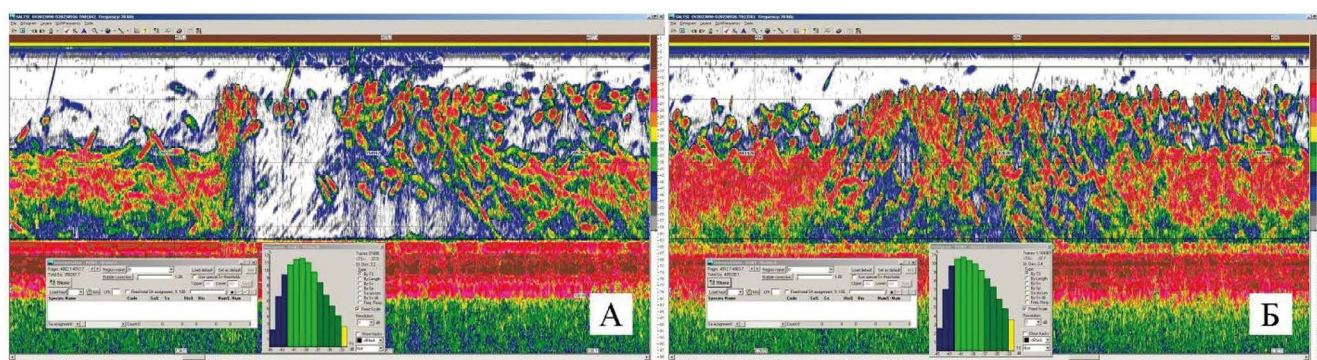


Рис. 11. Эхограммы реакции рыб (350 шт.): А – кормление в соседнем рыбноводном садке; Б – кормление в экспериментальном садке

Fig. 11. Fish reaction echograms (350 pcs.): A – feeding in a neighboring cage; B – feeding in an experimental cage

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Соблюдение этических норм

Все применимые этические нормы соблюдены.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Тихоокеанского филиала ФГБНУ «ВНИРО» («ТИНРО») № 076–00004–23–01 по теме «Разработка новых технологий добычи (вылова) водных биологических ресурсов и инструментальных методов учёта их численности» (подтема 11.6).

ЛИТЕРАТУРА

- Кузнецов М.Ю., Убарчук И.А., Поляничко В.И., Сыроваткин Е.В. 2021 а. Программный комплекс для визуализации, многовидовой обработки и хранения данных гидроакустических ресурсных съёмок // Труды ВНИРО. Т. 183. С. 174–190.
- Кузнецов М.Ю., Поляничко В.И., Сыроваткин Е.В., Убарчук И.А. 2021 б. Исследование акустической силы цели японской скумбрии в северо-западной части Тихого океана *in situ* // Труды ВНИРО. Т. 184. С. 73–86.
- Юданов К.И., Калихман И.Л., Теслер В.Д. 1984. Руководство по проведению гидроакустических съёмок. М.: Изд-во ВНИРО. 124 с.
- 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.
- Conti S.G., Roux P., Fauvel C., Maurer B.D., Demer D.A. 2006. Acoustical monitoring of fish density, behavior, and growth rate in a tank // Aquaculture. V. 251(2). P. 314–323.
- Daoliang L., Yinfeng H., Yanqing D. 2020. Noninvasive methods for biomass estimation in aquaculture with emphasis on fish: a review // Reviews in Aquaculture. V. 12. P. 1390–1411.
- 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. No. 326. 133 p.
- Jorgensen R. 2003. The effects of swimbladder size, condition and gonads on the acoustic target strength of mature capelin // ICES J. of Marine Science. V. 60. P. 1056–1062.
- Kaliba A.R., Osewe K.O., Senkondo E.M., Mnembuka B.V., Quagrainie K.K. 2006. Economic analysis of Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) production in Tanzania // Journal of the World Aquaculture Society. V. 37(4). P. 464–473.
- MacLennan D.N., Fernandes P.G., Dalen J. 2002. A consistent approach to definitions and symbols in fisheries acoustics // ICES Journal of Marine Science. V. 59. P. 365–369.

McQuinn I.H., Reid D., Berger L., Diner N., Heatley D., Higginbottom I., Andersen L.N., Langeland O., Lapierre J.P. 2005. Description of the ICES HAC Standard Data Exchange Format, Version 1.60 // ICES Cooperative Research Report. No. 278. 86 p.

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. 65 p.

Ricker W.E. 1973. Linear Regressions in Fishery Research // Journal of the Fisheries Research Board of Canada. V. 30(3). P. 409–434.

Simmonds E.J., MacLennan D.N. 2005. Fisheries acoustics: theory and practice. Oxford, UK: Blackwell Science published. 437 p.

REFERENCES

- Kuznetsov M.Yu., Ubarchuk I.A., Polyanychko V.I., Syrovatkin E.V. 2021 а. A software package for visualization, multi-view processing and data storage of hydroacoustic resource surveys // Trudy VNIRO. V. 183. P. 174–190. (in Russ.).
- Kuznetsov M.Yu., Polyanychko V.I., Syrovatkin E.V., Ubarchuk I.A. 2021 б. The study of the acoustic target strength of Chub mackerel in the northwestern Pacific Ocean *in situ* // Trudy VNIRO. V. 184. P. 73–86. (in Russ.).
- Yudanov K.I., Kalikhman I.L., Tesler V.D. 1984. Guidelines for conducting hydroacoustic surveys. Moscow: VNIRO Publish. 124 p. (in Russ.).
- 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.
- Conti S.G., Roux P., Fauvel C., Maurer B.D., Demer D.A. 2006. Acoustical monitoring of fish density, behavior, and growth rate in a tank // Aquaculture. V. 251(2). P. 314–323.
- Daoliang L., Yinfeng H., Yanqing D. 2020. Noninvasive methods for biomass estimation in aquaculture with emphasis on fish: a review // Reviews in Aquaculture. V. 12. P. 1390–1411.
- 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. No. 326. 133 p.
- Jorgensen R. 2003. The effects of swimbladder size, condition and gonads on the acoustic target strength of mature capelin // ICES J. of Marine Science. V. 60. P. 1056–1062.
- Kaliba A.R., Osewe K.O., Senkondo E.M., Mnembuka B.V., Quagrainie K.K. 2006. Economic analysis of Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) production in Tanzania // Journal of the World Aquaculture Society. V. 37(4). P. 464–473.
- MacLennan D.N., Fernandes P.G., Dalen J. 2002. A consistent approach to definitions and symbols in fisheries acoustics // ICES Journal of Marine Science. V. 59. P. 365–369.
- McQuinn I.H., Reid D., Berger L., Diner N., Heatley D., Higginbottom I., Andersen L.N., Langeland O., Lapierre J.P.

2005. Description of the ICES HAC Standard Data Exchange Format, Version 1.60 // ICES Cooperative Research Report. No. 278. 86 p.
- 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. 65 p.
- Ricker W.E.* 1973. Linear Regressions in Fishery Research // Journal of the Fisheries Research Board of Canada. V. 30(3). P. 409–434.
- Simmonds E.J., MacLennan D.N.* 2005. Fisheries acoustics: theory and practice. Oxford, UK: Blackwell Science published. 437 p.

Поступила в редакцию 14.12.2023 г.

Принята после рецензии 20.03.2024 г.