

УДК 681.883.072

DOI: 10.15853/2072-8212.2015.36.72-78

ИЗМЕРЕНИЕ СИЛЫ ЦЕЛИ МИНТАЯ (*THERAGRA CHALCOGRAMMA*) АВАЧИНСКОГО ЗАЛИВА НА ЧАСТОТАХ 38 И 120 КГц

М.И. Малин*, И.В. Рой**, О.М. Лапшин



*Н. с., Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанова РАН
152742 Ярославская область, Некоузский р-н, п. Борок, 109
Тел.: (48547) 24-526

E-mail: mishuk.ibiw@gmail.com

**Мл. н. с., Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии
107140 Москва, Верхняя Красносельская, 17

Тел.: (499) 264-93-10

E-mail: iv_roy@vniro.ru

Директор, Камчатский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии
683000 Петропавловск-Камчатский, Набережная, 18

Тел.: (4152) 41-27-01

E-mail: lapshin@kamniro.ru

ГИДРОАКУСТИЧЕСКАЯ СЪЕМКА, СИЛА ЦЕЛИ, МИНТАЙ, ТИХООКЕАНСКАЯ ТРЕСКА, АВАЧИНСКИЙ ЗАЛИВ

Представлены результаты измерений силы цели (TS) минтая *in situ* двумя эхолотами с расщепленным лучом и рабочими частотами 38 и 120 кГц. Сила цели, измеренная на 120 кГц, в среднем на 2,3 дБ ниже, чем на 38 кГц. Предложено уравнение силы цели минтая Авачинского залива — $TS = 20 \cdot \log_{10}(FL) - 62$ — для 38 и 120 кГц.

TARGET STRENGTH MEASUREMENTS OF WALLEYE POLLOCK (*THERAGRA CHALCOGRAMMA*) IN AVACHA GULF AT 38 AND 120 KHZ

M.I. Malin*, I.V. Roy**, O.M. Lapshin

*Researcher, I.D. Papanin Institute for Biology of Inland Waters Russian Academy of Sciences
152742 Yaroslavl'skaya oblast', Nekouzskiy r-n, Borok, 109
Tel.: (48547) 24-526

E-mail: mishuk.ibiw@gmail.com

**Researcher, Russia Research Institute of Fisheries and Oceanography
107140 Moscow, Verkhnyaya Krasnoselskaya, 17

Tel.: (499) 264-93-10

E-mail: iv_roy@vniro.ru

Director, Kamchatka Research Institute of Fisheries and Oceanography
683000 Petropavlovsk-Kamchatsky, Naberedzhnaya, 18

Tel., fax: (4152) 41-27-01

E-mail: lapshin@kamniro.ru

HYDRO-ACOUSTIC SURVEY, TARGET STRENGTH, WALLEYE POLLOCK, PACIFIC COD, AVACHINSKY GULF

Target strength (TS) measurements *in situ* of walleye pollock have been made using 38 and 120 kHz split beam echosounders. The target strength measured at 120 kHz is around 2.3 dB lower than at 38 kHz. The TS to fork length (FL) relationship for walleye pollock in the Avacha Gulf $TS = 20 \cdot \log_{10}(FL) - 62$ is proposed for both 38 and 120 kHz equipment.

Количественная оценка водных биоресурсов гидроакустическим методом требует знания их акустических свойств, в первую очередь акустического сечения обратного рассеяния объектов, составляющих обследуемое скопление. Сила цели (TS) — логарифмическое представление этой величины. Определению взаимосвязи TS и размера рыб посвящено внушительное количество исследований, поскольку точность результатов акустических оценок во многом определяется адекватностью применяемого уравнения силы цели.

Известное уравнение $TS = 20 \cdot \log_{10}(FL) - 66$, связывающее силу цели и размер (длину до конца средних лучей хвостового плавника (AC)) минтая, важнейшего объекта промысла в северной части Тихого океана, разработано Аляскинским центром рыбохозяйственных исследований (AFSC, NOAA) и подтверждено многими исследователями (Foote, Traunor, 1988; Traunor, 1996; Sawada et al., 1999). Уравнение разработано для частоты 38 кГц гидроакустической аппаратуры, используемой для оценки запасов минтая на глубоководных акваториях

Берингова моря и залива Аляска (Romain et al., 2012; Honkalehto et al., 2013). Применение гидроакустической аппаратуры с более высокой частотой и коротким импульсом имеет ряд ограничений: меньшая дальность действия, большая чувствительность к помехам, в первую очередь звукорассеивающим слоям (ЗРС) биологической природы, и т. д. Однако при соблюдении ряда условий такая аппаратура позволяет получить записи с высоким разрешением, подходящие для решения ряда научных и прикладных задач, таких как дистанционное определение размерного состава рыб в скоплении.

Правомерность использования указанного выше уравнения силы цели минтая на частотах, отличных от 38 кГц, в настоящий момент остается под вопросом. Ряд исследователей указывают на различия акустических свойств минтая на частотах 38 и 120 кГц (Gauthier, Horne, 2004; Hazen, Horne, 2004). Уточнение уравнения силы цели минтая для частоты 120 кГц является целью данного исследования.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Материал для проведения исследования получен в 2013 г. в Авачинском заливе Петропавловск-Командорской подзоны во время работ по определению коэффициента уловистости учетного снюрревода датского типа с укороченными крыльями 40,3/39,3 м и урезами длиной 1500 м. Для изменения характеристик селективности в целях охвата всех размерных групп рыб в мешке снюрревода применялась мелкая вставка. Порядок проведения гидроакустических съемок и промысловых операций описан нами ранее (Рой и др., 2014).

Гидроакустические съемки выполнены двумя научными эхолотами с расщепленным лучом: Biosonics DT-X и SIMRAD EY500 (табл. 1). Антенны эхолотов попеременно устанавливались на штангу, закрепленную в центральной части борта научно-исследовательского судна (НИС) «Инженер Мартынов». Процедура сквозной калибровки гидроакустической аппаратуры проводилась по эталонным металлическим сферам в соответствии с рекомендациями производителей оборудования. Значения температуры и солености воды, необходимые для корректного определения дистанции и затухания эхосигнала, измерялись гидрологическим зондом RBR XR-620. Среднее значение температуры по водному столбу составило $-0,6$ °С, солености — 32,7‰.

Гидроакустические съемки проводились в светлое время суток, что исключает вариabельность измеряемых значений силы цели, обусловленную суточными изменениями физиологического состояния и распределения объекта исследования (Gauthier, Horne, 2004). Глубина в местах проведения съемок колебалась от 74 до 112 м (рис. 1) и не превышала указанный производителем аппа-



Рис. 1. Схема расположения мест проведения исследования. Пунктирной линией нанесены изобаты. 1, 2 — съемки эхолотом с частотой 120 кГц; 8, 9 — съемки эхолотом с частотой 38 кГц

Таблица 1. Технические характеристики аппаратуры и параметры среды

	Biosonics DT-X	SIMRAD EY500
Частота, кГц	38	120
Модель антенны	T38P016	ES120-7C
Диаграмма направленности антенны	круговая, 10°	круговая, 7°
Заглубление антенны, м	2,2	2,1
Длительность импульса, мс	0,8	0,3
Калибровочная сфера (диаметр; TS)	ТС36 (36 мм; -42,8 дБ)	CU23 (23 мм; -40,4 дБ)
Расчетная скорость звука в воде, м/с	1445	1445
Коэффициент затухания эхосигнала, дБ/м	0,0097	0,0246

ратуры с рабочей частотой 120 кГц предел регистрации объектов с силой цели –50 дБ, равный 140 м. Для анализа выбирали подходящие участки эхограмм, где зарегистрированы разреженные скопления и сигналы от отдельных рыб не перекрываются (Simmonds, MacLennan, 2005). Анализировали слой воды от 30 м до дна, в котором наблюдались одиночные объекты. Эхограммы обоих эхолотов обрабатывали методом обнаружения одиночных эхосигналов с одинаковыми настройками: пороговое значение TS сигнала –50 дБ; уровень определения длительности сигнала 6 дБ; длительность сигнала — от 0,4 до 1,2 нормализованной длительности импульса. Обнаружение одиночных эхосигналов на каждой частоте проводили в трех вариантах с различными значениями максимальной компенсации TS, равными 1, 4 и 10 дБ. Одиночные эхосигналы, принадлежащие одному объекту, объединяли в треки, после чего определяли среднее значение TS каждого трека. Иными словами, для каждого зарегистрированного объекта (рыбы) на основе нескольких измерений силы цели определено среднее значение TS.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Уловы снюрревода в местах проведения исследования представлены демерсальными видами рыб, ведущими донный образ жизни (бычки, камбаловые, скаты) или обитающими в придонных и средних слоях воды (минтай, тихоокеанская треска (*Gadus macrocephalus*), терпуговые). Потенциальными объектами, регистрируемыми гидроакустической аппаратурой, являются минтай и треска, поскольку терпуговые не имеют плавательного пузыря, а донные рыбы находятся в нижней мертвой зоне приборов. Таким образом, проанализированные скопления состоят на 92% из минтая и на 8% из тихоокеанской трески (табл. 2).

Уравнения силы цели минтая и тихоокеанской трески для 38 кГц идентичны (Somerton et al., 2011). Вклад трески в общий размерный состав анализируемых скоплений незначителен (рис. 2). Факты сходства акустических свойств и раз-

мерного состава трески и минтая позволяют абстрагироваться от присутствия трески в анализируемых скоплениях, принимая во внимание лишь ту ее размерную группу (длина АС свыше 68 см), которая не представлена в уловах минтая. Доля таких особей трески в уловах незначительна и составляет 0,1%.

Интерпретация результатов анализа гидроакустического материала основана на предположении, что размерно-видовой состав скоплений, зарегистрированных на обеих частотах, одинаков и близок к составу уловов с учетом особенностей селективности и зоны действия орудия лова. Визуальный анализ гидроакустического материала свидетельствует в поддержку этого предположения.

Метод расщепленного луча предоставляет возможность выбрать для анализа только те объекты, которые зарегистрированы в определенной степени близости к акустической оси антенны, что достигается ограничением максимальной компенсации TS эхосигналов. Применение низкого значения максимальной компенсации TS, равного 1 дБ, позволяет анализировать объекты, зарегистрированные в непосредственной близости к акустической оси антенны эхолота. Повышение этого параметра до 10 дБ ожидаемо приводит к увеличению количества зарегистрированных объектов, а также

Таблица 2. Состав потенциальных объектов, регистрируемых гидроакустической аппаратурой, в уловах снюрревода

Вид	Доля в уловах, %	Длина до конца средних лучей хвостового плавника (АС), см		
		Минимальная	Максимальная	Средняя
<i>T. chalcogramma</i>	92	17	68	47,3
<i>G. macrocephalus</i>	8	16	87	38,5
Оба вида				47,2

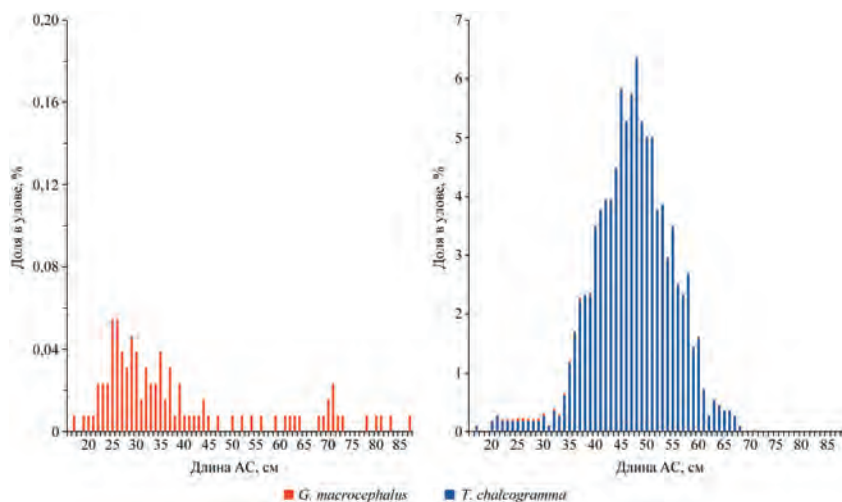


Рис. 2. Размерный состав тихоокеанской трески (слева) и ее вклад в общий состав уловов (справа)

числа измерений TS каждого из них (табл. 3), но, в то же время, увеличивает зависимость результатов от степени соответствия применяемой производителем аппаратуры модели компенсации TS для конкретного экземпляра антенны.

С повышением максимальной компенсации TS от 1 до 10 дБ на обеих частотах наблюдается увеличение силы цели объектов на значительную величину, достигающую 2 дБ (рис. 3, табл. 3), следовательно, точность результатов анализа TS напрямую зависит от корректности выбора значения рассматриваемого параметра. На первый взгляд, методически верным вариантом является анализ результатов прямых измерений TS только тех объектов, которые находятся на минимально возможном расстоянии от акустической оси. При таком подходе, использованном в некоторых предыдущих исследованиях TS минтая (Граунор, 1996), компенсация значений силы цели не про-

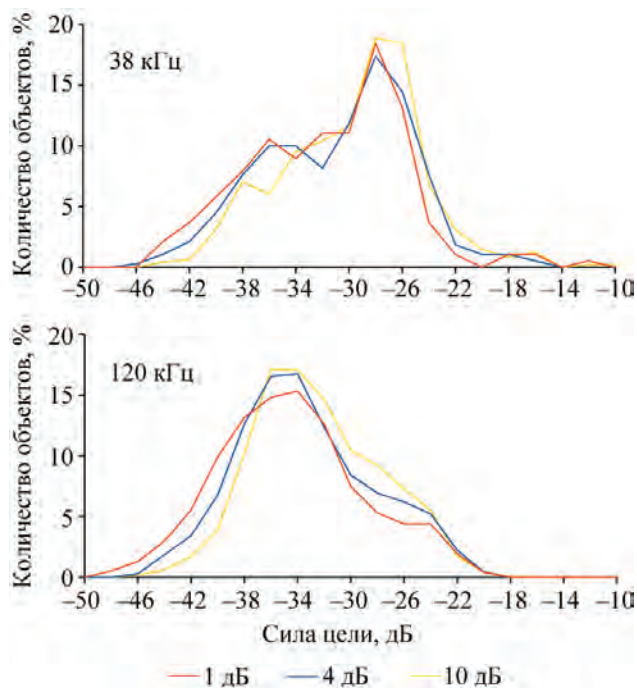


Рис. 3. Распределение величин силы цели объектов в исследованных скоплениях, определенных при различных значениях максимальной компенсации TS одиночных эхосигналов

Таблица 3. Результаты определения силы цели объектов при различных значениях максимальной компенсации TS эхосигналов

Рабочая частота эхолота	38 кГц*			120 кГц		
	1 дБ	4 дБ	10 дБ	1 дБ	4 дБ	10 дБ
Максимальная компенсация TS	1 дБ	4 дБ	10 дБ	1 дБ	4 дБ	10 дБ
Количество объектов	185	372	470	776	1402	1704
Среднее количество измерений TS объекта	3	5	9	3	5	7
Средняя TS объекта, дБ	-32,99	-32,04	-31,02	-35,47	-34,37	-33,54
Минимальная TS, дБ	-45,69	-46,78	-44,30	-49,04	-47,47	-47,24
Максимальная TS, дБ	-22,59	-20,02	-20,20	-20,65	-20,49	-20,45
Стандартное отклонение	5,25	5,28	4,82	5,44	5,15	4,72
Стандартная ошибка среднего	0,39	0,27	0,22	0,20	0,14	0,11

Примечание. * — за исключением объектов, сила цели которых превышает -20 дБ

изводится или она минимальна. Однако процесс компенсации TS является неотъемлемой частью метода расщепленного луча, и потому вносит свой вклад в результаты гидроакустических оценок в условиях реальной съемки. В результате поиска компромиссного решения значение максимальной компенсации TS, равное 4 дБ, признано оптимальным и использовано для проведения дальнейшего анализа. Указанная величина рассматриваемого параметра позволила проанализировать достаточное количество объектов и провести в среднем по 5 измерений TS каждого из них (табл. 3).

Анализ вертикального распределения объектов выявил тенденцию увеличения TS с повышением глубины (рис. 4), что согласуется с особенностями вертикального распределения минтая разных размерных групп. Ранее сообщалось, что минтай крупных размеров встречается в более глубоких слоях воды (Карп, Walters, 1994). Обращают на себя внимание придонные объекты, зарегистрированные на частоте 38 кГц, сила цели которых превышает -20 дБ. Количество таких объектов составляет 2% от общего числа зарегистрированных на данной частоте. Вероятно, что это крупные особи трески, отмеченные в уловах. Оценивать их размеры уравнением $TS = 20 \cdot \log_{10}(FL) - 66$ не представляется возможным, поскольку оно разработано для рыб, длина AC которых не превышает 60 см (Simmonds, MacLennan, 2005), на основании чего объекты с силой цели выше -20 дБ исключены из дальнейшего анализа (рис. 4).

Среднее значение силы цели объектов на частоте 38 кГц на 2,3 дБ выше определенного на 120 кГц (табл. 3), что согласуется с результатами ряда исследований, посвященных различиям акустических свойств рыб на этих частотах (Gauthier, Horne, 2004; Hazen, Horne, 2004). Средняя длина рыб в скоплениях, рассчитанная по указанному выше общепринятому уравнению силы цели на 38 кГц, равна 49,9 см и превышает длину, опреде-

ленную по фактическим уловам, на 2,7 см (табл. 2). Столь незначительные различия свидетельствуют в пользу корректности применяемого уравнения и могут быть объяснены множеством способов: от действительных отличий в размерном составе зарегистрированных гидроакустической аппаратурой скоплений от рыб в уловах, до погрешностей обработки акустических данных и измерения средней длины рыб в улове. В этом случае для работы на 120 кГц следует скорректировать коэффициент b_{20} уравнения $TS = 20 \cdot \log_{10}(FL) - 66$ на наблюдаемую по средним значениям силы цели разницу в 2,3 дБ, однако частотные распределения значений TS на обеих рассматриваемых частотах требуют более подробного сравнительного анализа.

Сравнительный анализ частотного распределения TS объектов, зарегистрированных на частоте 38 кГц, и размерного состава уловов (для чего длина рыб пересчитана в значения силы цели со-

гласно уравнения $TS = 20 \cdot \log_{10}(FL) - 66$) выявил несоответствие измеренных значений TS расчетным (рис. 5). Распределение величин TS на 38 кГц можно считать бимодальным: на графике выделяются две группы значений: меньше и больше -32 дБ, которые, вероятнее всего, соответствуют двум размерным группам регистрируемых объектов. Однако распределение расчетной TS в улове унимодально, и значение моды равно -32 дБ. Аналогичные наблюдения описывались ранее и объяснялись особенностями пространственной ориентации объектов учетной съемки, что приводило к вариабельности TS в результате различий в углах облучения рыб в дорсовентральном направлении (Williamson, Traynor, 1984; Traynor, 1996). Наличие в исследуемых скоплениях двух размерных групп объектов, одна из которых не улавливается используемым орудием лова в силу его селективности, представляется более вероятным. В таком случае уравнение силы цели для

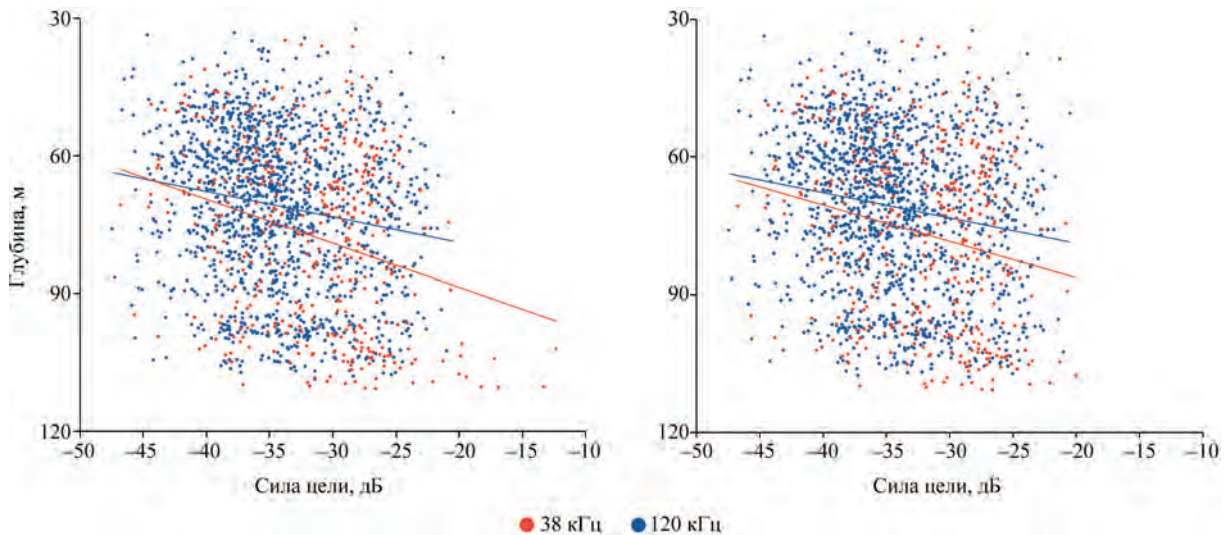


Рис. 4. Вертикальное распределение TS объектов, зарегистрированных на частотах 38 и 120 кГц. На диаграмме справа исключены объекты, зарегистрированные на частоте 38 кГц, значение силы цели которых превышает -20 дБ. Показаны линейные тренды для обеих частот

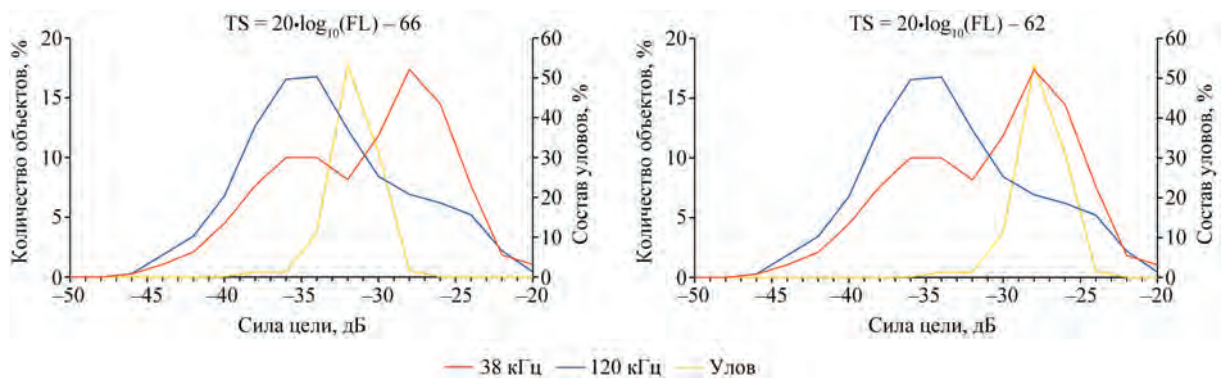


Рис. 5. Распределение TS объектов в исследованных скоплениях по результатам гидроакустических съемок (ось ординат слева) и контрольного ЛОВА (ось ординат справа). TS рыб в уловах определена по уравнениям $TS = 20 \cdot \log_{10}(FL) - 66$ (слева) и $TS = 20 \cdot \log_{10}(FL) - 62$ (справа)

38 кГц требует корректировки коэффициента и приобретает вид $TS = 20 \cdot \log_{10}(FL) - 62$ (рис. 5). Среди причин регистрации высоких, в сравнении с результатами предыдущих исследований, значений TS можно назвать сравнительно небольшие глубины в местах проведения съемок, а также особенности определения силы цели методом расщепленного луча. Известно, что сила цели рыб, среди прочих факторов, зависит от глубины и уменьшается в результате сжатия плавательного пузыря давлением, что приводит к уменьшению TS (Hazen, Horne, 2004). Уравнение $TS = 20 \cdot \log_{10}(FL) - 66$ применяется для оценки скоплений минтая на глубинах, превышающих 100 м (Romain et al., 2012; Honkalehto et al., 2013), в то время как объекты данного исследования зарегистрированы в диапазоне глубин 30–112 м.

Важным является тот факт, что уравнение $TS = 20 \cdot \log_{10}(FL) - 66$ определено методом двойного луча. Суть этого метода сводится к допущению, что объекты, зарегистрированные на узкой диаграмме направленности, находятся на акустической оси широкой, и компенсации TS, в отличие от расщепленного луча, не производится. Очевидно, средние значения TS объектов, определенные таким методом, будут несколько ниже. Перечисленные причины в совокупности могли привести к наблюдаемым различиям TS, составляющим 4 дБ.

Частотное распределение TS объектов, зарегистрированных на 120 кГц, характеризуется максимумом в диапазоне значений от –36 до –34 дБ, который совпадает со второй модальной группой объектов, зарегистрированных на 38 кГц и, согласно выдвинутому выше предположению, не облавливаемых используемым учетным орудием лова. Улову на данной частоте, очевидно, соответствует группа объектов, TS которых лежит в пределах значений от –31 до –23 дБ (рис. 5). На частоте 120 кГц зарегистрировано в четыре раза большее количество объектов в сравнении с 38 кГц при равной протяженности съемок (табл. 3), что объясняется различиями как в рабочих частотах, так и в длительностях импульсов используемой аппаратуры. В результате чего наблюдаются различия распределений TS, определенных на разных частотах. Таким образом, скорректированное для 38 кГц уравнение силы цели $TS = 20 \cdot \log_{10}(FL) - 62$ является универсальным для обеих частот.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Универсальное уравнение силы цели минтая $TS = 20 \cdot \log_{10}(FL) - 62$ можно рекомендовать для проведения учетной гидроакустической съемки в Петропавловско-Командорской подзоне эхолотами с расщепленным лучом и рабочими частотами 38 и 120 кГц. Сила цели минтая в районе исследования оказалась выше значений, приводимых в литературе. Эта информация позволит избежать ошибок акустических оценок в сторону завышения запаса. Стоит отметить, что надежность результатов применения полученного уравнения в значительной степени зависит от соблюдения ряда условий, как во время проведения съемки, так и в процессе обработки материала. В частности, режим работы гидроакустической аппаратуры, настройки параметров анализа, а также размерный состав и глубины распределения объектов оценки должны быть сходными с теми, при которых определено уравнение силы цели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Рой И.В., Лапушин О.М., Малин М.И. 2014. Оценка коэффициента уловистости снюрревода датского типа с применением инструментальных методов // Исслед. водн. биол. ресурсов Камчатки и сев.-зап. части Тихого океана: Сб. науч. тр. Камчат. НИИ рыб. хоз-ва и океанографии. Вып. 35. С. 74–86.
- Foote K.G., Traynor J.J. 1988. A comparison of walleye pollock target strength estimates derived from *in situ* measurements and calculations based on swimbladder form // Journal of the Acoustical Society of America. V. 83 (1). P. 9–17.
- Gauthier S., Horne J.K. 2004. Acoustic characteristics of forage fish species in the Gulf of Alaska and Bering Sea based on Kirchhoff-approximation models // Can. J. Fish. Aquat. Sci. V. 61. P. 1839–1850.
- Hazen E.L., Horne J.K. 2004. Comparing the modelled and measured target-strength variability of walleye pollock, *Theragra chalcogramma* // ICES Journal of Marine Science, V. 61. P. 363–377.
- Honkalehto T., McCarthy A., Ressler P., Jones D. 2013. Results of the acoustic-trawl survey of walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) on the U.S. and Russian Bering Sea Shelf in June – August 2012 (DY1207). AFSC Processed Rep. 2013-02. 60 p.
- Karp W.A., Walters G.E. 1994. Survey assessment of semi-pelagic gadoids: the example of walleye pollock, *Theragra chalcogramma*, in the Eastern Bering Sea // Marine fisheries review. V. 56. P. 8–22.

- Romain S., Dorn M., Wespestad V. 2012. Results of cooperative research acoustic surveys of walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) in the western Gulf of Alaska from September 2007 to September 2011. U.S. Dep. Commer., NOAA Tech. Memo. NMFS-AFSC-238. 35 p.
- Sawada K., Ye Z., Kieser R., McFarlane G.A., Mitano Y., Furusawa M. 1999. Target Strength Measurements and Modeling of Walleye Pollock and Pacific Hake // Fisheries Science. V. 65 (2). P. 193–205.
- Simmonds J., MacLennan D. 2005. Fisheries Acoustics: Theory and Practice. Second edition, Blackwell Science. Fish and Aquatic Resources Series 10. 437 p.
- Somerton D.A., Williams K., von Szalay P.G., Rose C.S. 2011. Using acoustics to estimate the fish-length selectivity of trawl mesh // ICES Journal of Marine Science. V. 68 (7). P. 1558–1565.
- Traynor J.J. 1996. Target-strength measurements of walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) and Pacific whiting (*Merluccius productus*) // ICES Journal of Marine Science. V. 53. P. 253–258.
- Williamson N.J., Traynor J.J. 1984. *In situ* target-strength estimation of Pacific whiting (*Merluccius productus*) using a dual-beam transducer // Journal du Conseil International pour l'Exploration de la Mer. V. 41. P. 285–292.