

**ОТЧЕТ ПЕРВОГО СОВЕЩАНИЯ ПОДГРУППЫ ПО АКУСТИЧЕСКОЙ
СЪЕМКЕ И МЕТОДАМ АНАЛИЗА (SG-ASAM)**
(Ла-Хойя, США, 31 мая – 2 июня 2005 г.)

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ИСХОДНАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ПОДГРУППЕ	577
Введение	577
Общая информация о модели TS криля, в настоящее время принятой АНТКОМом	577
Разработка физически обоснованной модели силы цели криля: DWBA и SDWBA	579
Информация о методе классификации S_v , который в настоящее время принят в АНТКОМе	580
ИНФОРМАЦИЯ, ОБОБЩЕННАЯ ПОДГРУППОЙ	580
Модели TS для криля	580
Алгоритмы классификации S_v для криля	582
РЕКОМЕНДАЦИИ ПОДГРУППЫ	583
Выполнение SDWBA для общего пользования	583
Определение характеристик параметров и использование упрощенной SDWBA	583
Алгоритмы классификации S_v	585
Рекомендации для проведения дальнейших исследований по моделям TS и классификации S_v	585
ВЫВОДЫ	585
ЛИТЕРАТУРА	586
Таблицы	590
Рисунки	591
Дополнение	595

ОТЧЕТ ПЕРВОГО СОВЕЩАНИЯ ПОДГРУППЫ ПО АКУСТИЧЕСКОЙ СЪЕМКЕ И МЕТОДАМ АНАЛИЗА (SG-ASAM)

(Ла-Хойя, США, 31 мая – 2 июня 2005 г.)

ИСХОДНАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ПОДГРУППЕ

Введение

В соответствии с рекомендациями WG-EMM (SC-CAMLR-XXIII, Приложение 4, пп. 4.89–4.93), WG-FSA (SC-CAMLR-XXIII, Приложение 5, п. 10.8) и НК-АНТКОМ (SC-CAMLR-XXIII, п. 13.5) Подгруппа по акустической съемке и методам анализа (SG-ASAM) провела совещание в Юго-западном центре рыбохозяйственных исследований в г. Ла-Хойя (США) 31 мая – 2 июня 2005 г.

2. В задачи совещания входило рассмотрение только двух вопросов, имеющих отношение к гидроакустическим съемкам *Euphausia superba* (антарктический криль, далее просто «криль»), а именно:

- (i) моделей силы цели криля (TS);
- (ii) классификации силы обратного объемного рассеяния (S_v).

3. Созывающим совещания был Р. Хьюитт (США). В совещании принимали участие Д. Демер (США), Т. Джарвис (Австралия), С. Касаткина (Россия), С. Конти (США), Р. Корнелиуссен (Норвегия), И. Такао (Япония) и Дж. Уоткинс (СК).

4. Подгруппа отметила рецензируемые публикации и рабочие документы АНТКОМа, подготовленные Д. Демером и С. Конти, которые легли в основу этого совещания; в своем докладе в начале совещания Д. Демер рассказал об этой работе.

Общая информация о модели TS криля, в настоящее время принятой АНТКОМом

5. Оценки предэксплуатационной биомассы (B_0) криля в заданном районе получены по гидроакустическим съемкам, проводившимся после FIBEX в 1981 г. (Trathan et al., 1992).

6. АНТКОМ использует оценку B_0 для установления предохранительного ограничения на вылов в ходе крилевого промысла при помощи модели вылова; в настоящее время используется GY-модель (Constable and de la Mare, 1996), представляющая собой доработанную KY-модель, впервые описанную в 1991 г. (Butterworth et al., 1991, 1994).

7. Сила цели (TS, измеряемая в дБ на 1 м^2) является показателем, используемым для приведения гидроакустических данных (средняя сила обратного объемного рассеяния, S_v , измеренного в дБ на 1 м^2) к биомассе (поверхностная плотность биомассы, ρ , измеряемая в г м^{-2}). Среди различных составляющих факторов оценки B_0 по гидроакустическим данным считаются наиболее чувствительными к используемой модели TS (Demer, 2004).

8. Принятая в настоящее время АНТКОМом модель TS криля это – модель Грина и др. (Greene et al., 1991), которая представляет собой эмпирическую модель линейной регрессии, соотносящую TS с логарифмом длины ($\log_{10}L$). Регрессия основана на эмпирических измерениях TS при 420 кГц, проведенных на 43 особях «репрезентативных зоопланктонных и микронектонных таксонов» (не включая *E. superba*) в замкнутом пространстве объемом 30 м³ (Wiebe et al., 1990). Соотношение акустических волновых чисел ($10\log_{10}k_f / k_{420\text{кГц}}$, где $k = 2\pi f/c$) используется для преобразования модели к другой частоте (f) при заданной скорости звука (c).

9. Хотя эта модель подкрепляется эмпирическими данными (Foote et al., 1990; Hewitt and Demer, 1991a, 1991b; Pauly and Penrose, 1997, 1998) и была принята потому, что она лучше предыдущей модели BIOMASS TS (SC-CAMLR-X, п. 3.34 и Приложение 5, п. 4.30(i)), с самого начала отмечалось, что существуют 4 основные проблемы при применении модели Грина и др. (1991) к крилю:

- (i) Как отмечали сами авторы (Greene et al., 1991), эта модель не может применяться к режиму рассеяния Рэля, что означает, что она является точной только для криля, размер которого больше длины волны акустического импульса (например, $\lambda_{120\text{кГц}} = 12.5$ мм).
- (ii) Она не учитывает изменения морфологии, физиологии и ориентации цели, которые, как было доказано, оказывают значительное влияние на TS (Demer and Martin 1994, 1995).
- (iii) На самом деле она была получена не по измерениям *E. superba* при 120 кГц, а по измерениям «репрезентативных зоопланктонных и микронектонных таксонов» при 420 кГц (Wiebe et al., 1990); наиболее близким измеренным видом был *E. pacifica*.
- (iv) Она прогнозирует, что TS ракообразного зоопланктона зависит от объема особей, хотя в действительности считается, что она зависит от площади (Demer and Martin, 1994, 1995).

10. Когда НК-АНТКОМ принял исходную модель Грина и др. (1991), он также принял рекомендации группы WG-Krill в отношении будущей работы (SC-CAMLR-X, п. 3.35, и Приложение 5, п. 4.30(ii)), а именно:

- (i) измерения TS отдельной особи на месте при помощи эхолотов с двойным или расщепленным лучом;
- (ii) непосредственные и экспериментальные измерения TS скоплений по диапазону частот, длин особей и физиологического состояния;
- (iii) по возможности, измерение морфологии, ориентации и физического состояния криля;
- (iv) теоретическое моделирование для прогнозирования распределения на месте отдельных TS, параметризованных по имеющимся эмпирическим данным.

Разработка физически обоснованной модели
силы цели криля: DWBA и SDWBA

11. Согласно п. 10(iv), была разработана физически обоснованная модель TS (DWBA: Morse and Ingard, 1968; Stanton et al., 1993, 1998; Chu et al., 1993a, 1993b; McGehee et al., 1998, 1999), которая лучше модели Грина и др. (1991), поскольку учитывает не только размер, но и все другие параметры, влияющие на TS (рис. 1), а именно:

- (i) размер, представляющий собой общую длину (L мм = от переднего края глаза до кончика тельсона, Morris et al., 1988);
- (ii) форма, представленная как ряд (n) связанных цилиндров радиуса (r мм) и длины (l мм);
- (iii) свойства материалов, выраженные как разность в плотности (g) и разность в скорости звука (h) между тканями животного и окружающей морской водой;
- (iv) угол падения акустической волны по отношению к продольной оси криля, далее именуемый как «ориентация» (θ , измеряемый в градусах) и выполняемый в качестве гауссового (нормального) распределения ориентаций ($\theta = N[\bar{\theta} = x^\circ, \text{s.d.} = y^\circ]$).

12. МакГи и др. (McGehee et al., 1998, 1999) эмпирически проверили модель DWBA, проведя измерения TS 14 живых особей криля, помещенных в просторный охлажденный резервуар, при 120 кГц. Они получили данные по ряду ориентаций, обнаружив хорошее соответствие¹ между эмпирическими измерениями и прогнозами модели DWBA при отражении звука от поверхности спины, живота или бока животного (что авторы называют углом падения 90°), но плохое соответствие при ориентации, отличной от 90° , когда прогнозируемое рассеяние было намного меньше измеренного.

13. Демер и Конти (Demer and Conti, 2002a, 2003a, 2004a) теоретически объяснили плохое соответствие между прогнозами DWBA и эмпирическими измерениями при ориентации, отличной от 90° , используя видоизмененную модель DWBA (т.н. «стохастическую DWBA» или SDWBA), которая дополнительно учитывает три стохастических параметра: (i) рассеяние в зашумленной среде; (ii) сложную форму криля; (iii) изгибание тела, когда оно плавает.

14. Демер и Конти (Demer and Conti, 2002, 2003b, 2004b) далее подтвердили теоретическую модель SDWBA эмпирическими измерениями общей TS криля (TTS). Эти измерения были получены с использованием нового метода (De Rosny and Roux, 2001), который обеспечивает большую аккуратность и точность измерений (Demer et al., 2003) и который не зависит ни от ориентации, ни от калибровки оборудования. Значения TTS были получены для широкого диапазона частот (36–202 кГц) и широкого интервала L (17–58 мм), и модель SDWBA была решена для «формы» криля, типичной для экспериментальных особей. Эмпирические измерения близко соответствовали прогнозам модели SDWBA в диапазоне частот 60–202 кГц («лучше чем примерно

¹ Примечание: Авторы сообщили, что точность эмпирических измерений ориентации составляла $\pm 15^\circ$, чем, возможно, объясняется разброс эмпирических точек вокруг пиков 90° .

1 дБ»); эмпирические измерения при более низких частотах (36–60 кГц) немного превышали теоретические расчеты и расхождения были отнесены за счет шума.

15. На завершающей стадии Демер и Конти (Demer and Conti, 2004с, 2005) применили SDWBA к данным съемки АНТКОМ-2000 (Watkins et al., 2004) с целью выяснить, как их новая модель TS повлияет на общую оценку B_0 . В зависимости от используемого распределения ориентации первоначальная оценка B_0 44.3 млн. т (CV 11.4%) увеличилась вплоть до 192.4 млн. т (CV 11.7%).

Информация о методе классификации S_v , который в настоящее время принят в АНТКОМе

16. Что касается гидроакустических исследований в целом, то ранние попытки классифицировать гидроакустические данные по таксонам как правило опирались на субъективный визуальный анализ эхограмм в сочетании с информацией, полученной по сетным пробам, если таковая имелась (напр. Yudanov, 1971; Forbes and Nakken, 1972; Jefferts et al., 1987; Rose and Legget, 1988; Richards et al., 1991). Аналогичным образом, в ходе первой официальной гидроакустической съемки АНТКОМа по оценке B_0 криля (BROKE: Pauly et al., 2000) для фильтрации используемых данных применялась «интерпретация с помощью данных об уловах направленных тралений».

17. Предмет классификации S_v был дополнительно изучен для второй крилевой съемки АНТКОМа (Съемка АНТКОМ-2000: Hewitt et al., 2004). На проводившемся после съемки семинаре по анализу данных (Семинар по B_0) было отмечено, что «[метод визуального анализа] очень зависит от умения и опыта оператора и поэтому подвержен значительным индивидуальным вариациям... Семинар решил, что лучше использовать какой-либо алгоритм обработки, дающий формализованный и объективный метод анализа данных» (SC-CAMLR-XIX, Приложение 4, Дополнение G, п. 3.22). Принятый метод основывается на методе разницы дБ ($\Delta S_{v120-38kHz}$) на двух частотах, описанном Мадурейра и др. (Madureira et al., 1993a, 1993b) и позднее проверенном и уточненном Уоткинсом и Брайерли (Watkins and Brierley, 2002). Это – эмпирический метод, полученный на основе полевых наблюдений.

18. Несмотря на то, что были проведены дополнительные разработки, имеющие отношение к съемкам АНТКОМа, такие как использование трехчастотных алгоритмов для дальнейшего уменьшения возможности неправильной классификации (напр., Azzali et al., 2000; Hewitt et al., 2003), протокол классификации ΔS_v съемки АНТКОМ-2000 по-прежнему является методом, используемым в настоящее время АНТКОМом.

ИНФОРМАЦИЯ, ОБОБЩЕННАЯ ПОДГРУППОЙ

Модели TS для криля

19. Подгруппа признала, что имеется ряд параметров, которые влияют на TS (рис. 1), и что не все они были включены в модель Грина и др. (1991).

20. В соответствии с п. 19 и решением о том, что теоретические модели могут включать все необходимые параметры, связанные с TS, подгруппа одобрила переход от

использования только эмпирической модели TS (напр., Greene et al., 1991) к использованию теоретически обоснованных и эмпирически проверенных моделей.

21. Подгруппа обсудила, какой тип теоретической модели TS является наиболее подходящим для криля:

- (i) Модель с использованием луча Кирхгоффа (KRM) используется для количественной оценки отраженных от рыбы и зоопланктона сигналов как функции частоты, размера (длины) и ориентации (напр., Clay, 1992; Clay and Horne, 1994; Horne and Clay, 1998). Однако считается, что эта модель подходит для целей с сильной неоднородностью плотности; следовательно, она подходит для рыбы с плавательным пузырем, но не для организмов, наполненных жидкостью, таких как криль. Кроме того, она не работает в режиме Рэлея или при больших углах ориентации.
- (ii) Подгруппа отметила, что на сегодня наиболее полное руководство относительно того, какой вид теоретической модели следует использовать, содержится в обзорном документе Стэнтона и Чу (Stanton and Chu, 2000). В нем рекомендуется для криля использовать DWBA, однако он предшествует разработке SDWBA.
- (iii) На основе имеющейся у нее в это время информации подгруппа решила, что наиболее подходящей теоретической моделью для TS криля является в настоящее время SDWBA; однако, подгруппа также решила, что использование SDWBA требует приведенных ниже пояснений (п. 22).

22. Пояснения по вопросу использования SDWBA:

- (i) SDWBA использует несколько параметров (рис. 1). Поскольку диапазон значений, связанных с каждым параметром, не очень хорошо описан, подгруппа решила, что выяснение распределения этих параметров должно считаться первоочередной задачей.
- (ii) Подгруппа подчеркнула необходимость получить распределение ориентаций криля, отражающее распределение под судном во время съемки.
- (iii) Распределение ориентации ($\theta = N[\bar{\theta} = 15^\circ, \text{s.d.} = 5^\circ]$), используемое в опубликованном описании применения SDWBA (Demer and Conti, 2005), было получено по данным съемки АНТКОМ-2000 и может уточняться. Другое решение ($\theta = N[\bar{\theta} = 11^\circ, \text{s.d.} = 4^\circ]$) дает результат, который может являться улучшенной аппроксимацией данных съемки АНТКОМ-2000 по методу наименьших квадратов (Демер и Конти, личн. комм.), но может означать занижение оценки мелкого криля при низкой плотности (рис. 3). С другой стороны, этот вывод может быть случайным результатом анализа. Этот момент требует дополнительного изучения.
- (iv) Показатель фазовой изменчивости SDWBA (ϕ) учитывает шум, сложность формы и изгиб тела (Demer and Conti, 2003a). Хотя в идеале эти условия должны быть индивидуально определены и использованы в DWBA, в настоящее время это не представляется целесообразным и SDWBA предлагает прагматическое решение.

Алгоритмы классификации S_v для криля

23. Подгруппа отметила, что при использовании метода ΔS_v для классификации криля могут иметь место два основных вида неправильной классификации: (i) цели, не являющиеся крилем, определяются как криль (далее – «акустический прилов»); и (ii) цели, являющиеся крилем, не определяются как криль (далее – «акустическая потеря»). Результатом «акустического прилова» будет завышенная оценка биомассы криля, а результатом «акустической потери» – ее недооценка. Эти два явления не обязательно являются взаимоисключающими.

24. Подгруппа отметила, что при попытке классифицировать S_v (рис. 2) можно использовать разную информацию и протоколы обработки. Их можно использовать либо изолированно, либо в сочетании друг с другом (см. Ногге, 2000 для рецензирования). Подгруппа также отметила, что комбинированные методы могут привести к сокращению и акустического прилова, и акустической потери. Было предложено провести дополнительную работу по разработке этих методов, чтобы сделать их пригодными для принятия в качестве стандартных методов АНТКОМа.

25. Подгруппа указала, что при использовании в АНТКОМе классификация обычно проводится с применением программного обеспечения SonarData Echoview. Однако было также отмечено, что существует несколько других программных пакетов, в которых выполняется классификация обратного объемного рассеяния. Два таких пакета, описанных во время совещания Корнелиуссеном, приводятся ниже:

- (i) Корнелиуссен и Она (Korneliussen and Ona, 2002, 2003, 2004a, 2004b) описали метод классификации S_v , используемый в программе Bergen Echo Integrator (BEI). Акустический сигнал, отраженный от морских организмов, подразделяется на один или сочетание из трех основных классов рассеяния: (i) «жидкоподобный», (ii) «резонансный» и (iii) «твердый». Каждый из этих классов рассеяния описывается относительной частотной характеристикой $r(f) = s_v(f)/s_v(38 \text{ кГц})$. $r(f)$, измеренная по всем имеющимся акустическим частотам, является основной акустической характеристикой, используемой BEI, когда устанавливается акустический компонент разделительного алгоритма; другие характеристики, такие как глубина, время и место, также используются, если акустическая категория идентична одному виду. Сглаженные, с поправкой на шум, геометрически выверенные многочастотные экспериментальные точки используются как данные, вводимые в систему категоризации для различения акустических категорий. На Стадии 1 системы категоризации BEI многочастотная экспериментальная точка должна удовлетворять жестким модельным или эмпирическим требованиям с тем, чтобы поместить соответствующий сегмент объема (пиксель) в одну из конкретных категорий акустической цели. Акустические требования в отношении экспериментальных точек ослабляются на каждой стадии категоризации, однако требование о принадлежности к той же категории, что и ближайшие соседи (найденные на предыдущей стадии), усиливается.
- (ii) В работах Lebourges-Dhaussy (1996), Lebourges-Dhaussy and Ballé-Béganton (2004) и Lebourges-Dhaussy et al. (2004) описывается многочастотный многомодельный метод, выполняемый в программном обеспечении Matlab и MOVIES, которое способно классифицировать S_v по видам и размеру. Этот метод основан на алгоритме, описанном Холлидеем и Пайпером (Holliday and Pieper, 1995) для классификации мелкого зоопланктона с

использованием высоких частот. Использование более низких частот позволяет классифицировать более крупные организмы. Используемые данные – значения S_v на каждой имеющейся частоте. В основе этого метода лежит алгоритм инверсии NNLS, применяемый к системе уравнений, где количество уравнений равно количеству измеренных частот. Для описания веслоногих, эвфаузид и газонаполненных организмов используется набор моделей обратного рассеяния. Для классификации организмов, представленных в выборке, алгоритм ищет оптимальную популяцию (тип, размеры и численность), которая минимизирует остаточную ошибку между измеренным S_v и S_v , рассчитанным на основе соответствующей модели обратного рассеяния. Успех применения этого алгоритма снижается, когда сокращается количество частот. Было обнаружено, что важным параметром является диапазон размерного вектора, который задает алгоритму начальные значения размеров, фактически имеющихся в популяции.

26. Подгруппа признала, что с принятием физически обоснованной модели TS можно также получить теоретические спектры обратного рассеяния, которые могут использоваться для улучшения классификации криля, получаемой в настоящее время по эмпирическим наблюдениям.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПОДГРУППЫ

Выполнение SDWBA для общего пользования

27. Подгруппа рекомендовала использовать SDWBA для оценки TS криля (см. пп. 20 и 21(iii)).

28. Подгруппа рекомендовала с целью выработки «базовой» оценки B_0 для акустических съемок криля АНТКОМом использовать «упрощенную SDWBA» с ограниченными параметрами.

29. Подгруппа также рекомендовала сделать доступной полную SDWBA и призвала исследователей продолжать работу в направлении как совершенствования модели и определения характеристик параметров, так и оценки последствий для определения B_0 . Д. Демер и С. Конти согласились сотрудничать с Секретариатом с тем, чтобы сделать исходную программу доступной для всех стран-членов.

Определение характеристик параметров и использование упрощенной SDWBA

30. Подгруппа рекомендовала, чтобы параметры данной модели (рис. 1) рассматривались как вероятностные в отличие от детерминированных. То есть, следует характеризовать их как функцию плотности вероятностей (PDF), а не как единичное значение (напр., среднее).

31. Подгруппа отметила, что использование вероятностной модели предполагает наличие неопределенности, связанной с входными параметрами, и что эта неопределенность должна учитываться в оценках TS, а значит, и B_0 .

32. Подгруппа рассмотрела пути применения вероятностного подхода в данной модели:

- (i) Было решено, что наиболее комплексным подходом будет использование полной PDF для каждого параметра в целях оценки TS и ее изменчивости; это можно осуществить путем применения или анализа по методу бутстрап, или моделирования по методу Монте Карло.
- (ii) Однако было также отмечено, что комплексный подход требует обширных вычислений, и к тому же в настоящее время не имеется достаточно эмпирической информации, чтобы охарактеризовать PDF любого из параметров с какой-либо степенью уверенности.
- (iii) Поэтому в качестве компромисса было решено рассматривать каждый параметр как его среднее значение ± 1 стандартного отклонения.

33. Конечные значения, выбранные для параметризации упрощенной SDWBA, приводятся в табл. 1. Информация о выполнении упрощенной SDWBA с использованием этих параметров приводится в дополнении. Ниже последовательно рассматриваются причины выбора этих значений:

- (i) Ориентация (θ): подгруппа считает, что это наиболее объективная информация, имеющаяся в настоящее время (см. п. 22(iii) и рис. 3).
- (ii) Разность плотности (g) и разность скорости звука (h): оба эти значения взяты из работы Фуа (Foote, 1990), поскольку они уже использовались в компьютерном коде SDWBA (Demer and Conti, 2003a, вслед за McGehee et al., 1998) и поскольку время не позволило рассмотреть другие измерения (напр., Chu and Wiebe, 2005; Такао, личн. комм.).
- (iii) Форма («коэффициент упитанности»): подгруппа решила, что истощенный криль, описанный в работе McGehee et al. (1998), представляет собой хорошую аппроксимацию минимального значения «упитанности». Максимальное значение было получено во время совещания эмпирическим путем по фотографии икрной самки (Демер, личн. комм.). Подгруппа решила, что как величина, лежащая между этими выбранными минимальным и максимальным значениями, описанная Демером и Конти (Demer and Conti, 2005) форма «на 40% толще» представляет собой хорошую аппроксимацию среднего значения.
- (iv) Скорость звука в воде (c): взвешенное гармоническое среднее, рассчитанное Демером (Demer, 2004) для съемки АНТКОМ-2000, охватывает весь спектр сред, с которыми криль может столкнуться в Южном океане; в этой связи подгруппа решила, что это значение подходит для использования.

34. Результаты согласованного подгруппой прогона упрощенной SDWBA с наложенными ограничениями, использующей вышеуказанные значения параметров, графически показаны на рис. 4 (TS криля как функция L при 38, 70, 120 и 200 кГц), рис. 5 (TS криля как функция θ при 38, 70, 120 и 200 кГц) и рис. 6 (ΔS_v криля как функция L для трех двухчастотных сценариев).

35. Судя по рис. 4, диапазон неопределенности TS (а значит, и B_0) большой и зависит как от частоты, так и от длины. Это можно проиллюстрировать при $f = 120$ кГц для двух различных значений L : (i) где $L = 25$ мм, рассчитанная по SDWBA TS криля колеблется от -88 до -73 дБ (диапазон = 15 дБ); (ii) где $L = 50$ мм, рассчитанная по SDWBA TS колеблется от -77 до -71 дБ (диапазон = 6 дБ). Подгруппа рекомендовала включить эту неопределенность в оценки TS, а значит, и B_0 криля.

Алгоритмы классификации S_v

36. Подгруппа решила, что в настоящее время метод ΔS_v по-прежнему является наиболее объективным и практичным методом классификации S_v по таксонам.

37. Подгруппа решила, что при использовании метода ΔS_v акустические прилов и потеря должны быть сведены до минимума путем ограничения окон ΔS_v диапазоном размеров криля, измеренных в районе съемки. Чтобы облегчить эту задачу, подгруппа рассчитала минимальные и максимальные значения ΔS_v для разных размерных диапазонов криля по упрощенной модели SDWBA с наложенными ограничениями (табл. 3).

Рекомендации для проведения дальнейших исследований по моделям TS и классификации S_v

38. Подгруппа подчеркнула важность понимания распределения ориентации, разности скорости звука, разности плотности и формы особей криля под съемочным судном. Подгруппа призвала к продолжению работы по этим темам в качестве первоочередной задачи.

39. Подгруппа отметила, что использование 70-герцевых передатчиков улучшит обнаружение криля, классификацию и оценку B_0 (Furusawa et al., 1994; Корнелиуссен, личн. комм.; Демер, личн. комм.), и рекомендовала по возможности использовать их во время съемок криля.

ВЫВОДЫ

40. В отношении рассматривавшихся на этом совещании вопросов (п. 2) подгруппа рекомендовала, чтобы в ходе проводимых АНТКОМом гидроакустических съемок B_0 криля:

- (i) упрощенная модель SDWBA (уравнение 10 дополнения; табл. 2) с ограниченными параметрами (табл. 1) использовалась для определения TS криля как функции L при заданном f (рис. 4);
- (ii) минимальные и максимальные значения TS, показанные на рис. 4, должны использоваться как первая оценка ошибки, связанной с TS криля;
- (iii) для того, чтобы отфильтровать некрилевые цели, следует провести классификацию S_v на основе метода ΔS_v при ограничении окон ΔS_v диапазоном соответствующих размеров криля, как указывается в табл. 3.

ЛИТЕРАТУРА

- Azzali, M., J. Kalinowski and G. Lanciani. 2000. A multiple-frequency method for identifying and assessing the Antarctic krill stock in the Ross Sea (1989/90, 1997/98 and 1999/2000). Document *WG-EMM-00/37*. CCAMLR, Hobart, Australia: 35 pp.
- Butterworth, D.S., A.E. Punt and M. Basson. 1991. A simple approach for calculating the potential yield of krill from biomass survey results. In: *Selected Scientific Papers, 1991 (SC-CAMLR-SSP/8)*. CCAMLR, Hobart, Australia: 207–217.
- Butterworth, D.S., G.R. Gluckman, R.B. Thomson, S. Chalis, K. Hiramatsu and D.J. Agnew. 1994. Further computations of the consequences of setting the annual krill catch limit to a fixed fraction of the estimate of krill biomass from a survey. *CCAMLR Science*, 1: 81–106.
- Chu, D. and P.H. Wiebe. 2005. Measurements of sound-speed and density contrasts of zooplankton in Antarctic waters. *ICES J. Mar. Sci.*, 62: 818–831.
- Chu, D., K.G. Foote and T.K. Stanton. 1993a. Further analysis of target-strength measurements of Antarctic krill at 38 and 120 kHz: comparison with deformed-cylinder model and inference of orientation distribution. *J. Acoust. Soc. Am.*, 93: 2985–2988.
- Chu, D., K.G. Foote and T.K. Stanton. 1993b. Further analysis of target strength measurements of Antarctic krill at 38 and 120 kHz: comparison with deformed cylinder model and inference of orientation distribution. Document *WG-Krill-93/6*. CCAMLR, Hobart, Australia.
- Clay, C.S. 1992. Composite ray-mode approximations for backscattered sound from gas-filled cylinders and swimbladders. *J. Acoust. Soc. Am.*, 92: 2173–2180.
- Clay, C.S. and J.K. Horne. 1994. Acoustic models of fish: the Atlantic cod (*Gadhus morua*). *J. Acoust. Soc. Am.*, 96: 1661–1668.
- Constable, A. and W.K. de la Mare. 1996. A generalised model for evaluating yield and the long-term status of fish stocks under conditions of uncertainty. *CCAMLR Science*, 3: 31–54.
- De Rosny, J. and P. Roux. 2001. Multiple scattering in a reflecting cavity: Application to fish counting in a tank. *J. Acoust. Soc. Am.*, 109: 2587–2597.
- Demer, D.A. 2004. An estimate of error for CCAMLR 2000 estimate of krill biomass. *Deep-Sea Res., II*, 51: 1237–1251.
- Demer, D.A. and L.V. Martin. 1994. Zooplankton target strength: volumetric or areal dependence? Document *WG-Krill-94/13*. CCAMLR, Hobart, Australia: 21 pp.
- Demer, D.A. and L.V. Martin. 1995. Zooplankton target strength: volumetric or areal dependence? *J. Acoust. Soc. Am.*, 98: 1111–1118.
- Demer, D.A. and S.G. Conti. 2002a. Reconciling theoretical versus empirical target strengths of krill: effects of phase variability on the distorted-wave Born approximation. Document *WG-EMM-02/50*. CCAMLR, Hobart, Australia: 19 pp.

- Demer, D.A. and S.G. Conti. 2002b. Broadbandwidth total target strength measurements of Antarctic krill (*Euphausia superba*) from reverberation in a cavity. Document *WG-EMM-02/49*. CCAMLR, Hobart, Australia: 37 pp.
- Demer, D.A. and S.G. Conti. 2003a. Reconciling theoretical versus empirical target strengths of krill: effects of phase variability on the distorted-wave Born approximation. *ICES J. Mar. Sci.*, 60: 429–434.
- Demer, D.A. and S.G. Conti. 2003b. Validation of the stochastic distorted-wave Born approximation model with broad bandwidth total target strength measurements of Antarctic krill. *ICES J. Mar. Sci.*, 60: 625–635.
- Demer, D.A. and S.G. Conti. 2004a. Erratum – Reconciling theoretical versus empirical target strengths of krill: effects of phase variability on the distorted-wave Born approximation. *ICES J. Mar. Sci.*, 61: 157–158.
- Demer, D.A. and S.G. Conti. 2004b. Erratum – Validation of the stochastic distorted-wave Born approximation model with broad bandwidth total target strength measurements of Antarctic krill. *ICES J. Mar. Sci.*, 61: 155–156.
- Demer, D.A. and S.G. Conti. 2004c. Sounds like more krill. Document *WG-EMM-04/41*. CCAMLR, Hobart, Australia: 17 pp.
- Demer, D.A. and S.G. Conti. 2005. New target-strength model indicates more krill in the Southern Ocean. *ICES J. Mar. Sci.*, 62: 25–32.
- Demer, D.A., S.G. Conti, J. De Rosny and P. Roux. 2003. Absolute measurements of total target strength from reverberation in a cavity. *J. Acoust. Soc. Am.*, 113: 1387–1394.
- Foote, K.G. 1990. Speed of sound in *Euphausia superba*. *J. Acoust. Soc. Am.*, 87: 1405–1408.
- Foote, K.G., I. Everson, J.L. Watkins and D.G. Bone. 1990. Target strengths of Antarctic krill (*Euphausia superba*) at 38 and 120 kHz. *J. Acoust. Soc. Am.*, 87 (1): 16–24.
- Forbes, S. and O. Nakken. 1972. Manual of methods for fisheries resource survey and appraisal. Part 2. The use of acoustic instruments for fish detection and abundance estimation. FAO: 138 pp.
- Furusuwa, M., Y. Miyanoana, M. Ariji and Y. Sawada. 1994. Prediction of krill target strength by liquid prolate spheroid model. *Fish. Sci.*, 60: 261–265.
- Greene, C.H., P.H. Wiebe, S. McClatchie and T.K. Stanton. 1991. Acoustic estimates of Antarctic krill. *Nature*, 349: 110 pp.
- Hewitt, R.P. and D.A. Demer. 1991a. Target strength of Antarctic krill. Document *WG-Krill-91/13*. CCAMLR, Hobart, Australia.
- Hewitt, R.P. and D.A. Demer. 1991b. Krill abundance. *Nature*, 353: p. 310.
- Hewitt, R.P., D.A. Demer and J.H. Emery. 2003. An eight-year cycle in krill biomass density inferred from acoustic surveys conducted in the vicinity of the South Shetland Island during the austral summers of 1991/92 through 2001/02. *Aquat. Living Resour.*, 16 (3): 205–213.

- Hewitt, R.P., J. Watkins, M. Naganobu, V. Sushin, A.S. Brierley, D. Demer, S. Kasatkina, Y. Takao, C. Goss, A. Malyshko, M. Brandon, S. Kawaguchi, V. Siegel, P. Trathan, J. Emery, I. Everson and D. Miller. 2004. Biomass of Antarctic krill in the Scotia Sea in January/February 2000 and its use in revising an estimate of precautionary yield. *Deep-Sea Res., II*, 51: 1215–1236.
- Holliday, D.V. and R.E. Pieper. 1995. Bioacoustical oceanography at high frequencies. *ICES J. Mar. Sci.*, 52: 279–296.
- Horne, J.K. 2000. Acoustic approaches to remote species identification: a review. *Fish. Oceanogr.*, 9: 356–371.
- Horne, J.K. and C.S. Clay. 1998. Sonar systems and aquatic organisms: matching equipment and model parameters. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 55: 1296–1306.
- Jefferts, K., J. Burczynski and W.G. Pearcy. 1987. Acoustical assessment of squid (*Loligo opalescens*) off the central Oregon coast. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 44: 1261–1267.
- Korneliussen, R.J. and E. Ona. 2002. An operational system for processing and visualizing multi-frequency acoustic data. *ICES J. Mar. Sci.*, 59: 291–313.
- Korneliussen, R.J. and E. Ona. 2003. Synthetic echograms generated from the relative frequency response. *ICES J. Mar. Sci.*, 60: 636–640.
- Korneliussen, R.J. and E. Ona. 2004a. Validated acoustic identification of Atlantic Mackerel. *ICES CM 2004/R:20*. ICES, Copenhagen, Denmark.
- Korneliussen, R.J. and E. Ona. 2004b. Combined algorithms for detection of acoustic categories. *ICES CM 2004/R:38*. ICES, Copenhagen, Denmark.
- Lebourges-Dhaussy, A. 1996. Caractérisation des populations planctoniques par acoustique multifréquence. *Océanis*, 22: 71–92.
- Lebourges-Dhaussy, A. and J. Ballé-Béganton. 2004. Multifrequency multimodel zooplankton classification. *ICES CM 2004/R:22*. ICES, Copenhagen, Denmark.
- Lebourges-Dhaussy, A., T. Knutsen and R.J. Korneliussen. 2004. Acoustic backscatter from zooplankton and fish explored through an optimized model framework. *ICES CM 2004/R:39*. ICES, Copenhagen, Denmark.
- McGehee, D.E., R.L. O'Driscoll and L.V.M. Traykovski. 1998. Effects of orientation on acoustic scattering from Antarctic krill at 120 kHz. *Deep-Sea Res., II*, 45: 1273–1294.
- McGehee, D.E., R.L. O'Driscoll and L.V. Martin-Traykovski. 1999. Effects of orientation on acoustic scattering from Antarctic krill at 120 kHz. Document *WG-EMM-99/42*. CCAMLR, Hobart, Australia.
- Madureira, L.S.P., P. Ward and A. Atkinson. 1993a. Differences in backscattering strength determined at 120 and 38 kHz for three species of Antarctic macroplankton. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 93 (1–2): 17–24.
- Madureira, L.S.P., I. Everson and E.J. Murphy. 1993b. Interpretation of acoustic data at two frequencies to discriminate between Antarctic krill and other scatterers. *J. Plankton. Res.*, 15 (7): 787–802.

- Morris, D.J., J.L. Watkins, C. Ricketts, F. Bucholz and J. Priddle. 1988. An assessment of the merits of length and weight measurements of Antarctic krill *Euphausia superba*. *Brit. Ant. Surv. Bull.*, 79: 27–50.
- Morse, P.M. and K.U. Ingard. 1968. *Theoretical Acoustics*. Princeton University Press, Princeton, NJ: 927 pp.
- Pauly, T. and J.D. Penrose. 1997. Laboratory target strength measurements of free-swimming Antarctic krill. Document *WG-EMM-97/75*. CCAMLR, Hobart, Australia: 40 pp.
- Pauly, T. and J.D. Penrose. 1998. Laboratory target strength measurements of free-swimming Antarctic krill (*Euphausia superba*). *J. Acoust. Soc. Am.*, 103: 3268–3280.
- Pauly, T., S. Nicol, I. Higginbottom, G. Hosie and J. Kitchener. 2000. Distribution and abundance of Antarctic krill (*Euphausia superba*) off East Antarctica (80–150°E) during the Austral summer of 1995/96. *Deep-Sea Res., II: Topical Studies in Oceanography*, 47 (12–13): 2465–2488.
- Richards, L.J., R. Kieser, T.J. Mulligan and J.R. Candy. 1991. Classification of fish assemblages based on echo-integration surveys. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 48: 1264–1272.
- Rose, G.A. and W.C. Legget. 1988. Hydroacoustic signal classification of fish schools by species. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 45: 597–604.
- Stanton, T.K. and D. Chu. 2000. Review and recommendations for the modelling of acoustic scattering by fluid-like elongated zooplankton: euphausiids and copepods. *ICES J. Mar. Sci.*, 57 (4): 793–807.
- Stanton, T.K., D. Chu, P.H. Wiebe and C.S. Clay. 1993. Average echoes from randomly oriented random-length finite cylinders: Zooplankton models. *J. Acoust. Soc. Am.*, 94: 3463–3472.
- Stanton, T.K., D. Chu and P.H. Wiebe. 1998. Sound scattering by several zooplankton groups. II. Scattering models. *J. Acoust. Soc. Am.*, 103: 236–253.
- Trathan, P.N., D.J. Agnew, D.G.M. Miller, J.L. Watkins, I. Everson, M.R. Thorley, E.J. Murphy, A.W.A. Murray and C. Goss. 1992. Krill biomass in Area 48 and Area 58: recalculation of FIBEX data. In: *Selected Scientific Papers, 1992 (SC-CAMLR-SSP/9)*. CCAMLR, Hobart, Australia: 157–181.
- Watkins, J.I. and A. Brierley. 2002. Verification of acoustic techniques used to identify and size Antarctic krill. *ICES J. Mar. Sci.*, 59: 1326–1336.
- Watkins, J.L., R. Hewitt, M. Naganobu and V. Sushin. 2004. The CCAMLR-2000 Survey: a multinational, multi-ship biological oceanography survey of the Atlantic sector of the Southern Ocean. *Deep-Sea Res., II*, 51: 1205–1213.
- Wiebe, P.H., C.H. Greene, T.K. Stanton and J. Burczynski. 1990. Sound scattering by live zooplankton and micronekton: empirical studies with a dual-beam acoustical system. *J. Acoust. Soc. Am.*, 88: 2346–2360.
- Yudanov, K.J. 1971. Interpretation of echograms of hydroacoustic fish finding instruments. Israel Program for Scientific Translations, Kyriat Moshe, Jerusalem, Israel.

Табл. 1: Диапазон значений параметров, используемых в ограниченной, упрощенной модели SDWBA для расчета ошибки в прогнозах TS криля, где частота (f_0) = 120 кГц, количество цилиндров (n_0) = 14, длина криля (L_0) = 38.35 мм и фазовая изменчивость (ϕ_0) = $\sqrt{2}/2$.

	-1 s.d. (сценарий 1)	Среднее (сценарий 2)	+1 s.d. (сценарий 3)
Радиус цилиндров (r_0 множитель: см. текст)	1.0	1.4	1.7
Контраст плотности (g: по Футу (Foote, 1990))	1.0290	1.0357	1.0424
Разность скорости звука (h: по Футу (Foote, 1990))	1.0255	1.0279	1.0303
Ориентация ($\bar{\theta}$, s.d.: Демер и Конти, личн. комм.)	N(7, 4)	N(11, 4)	N(15, 4)
Скорость звука в воде (c м с ⁻¹ : по Демеру (Demer, 2004))	1451	1456	1461

Табл. 2: Коэффициенты и контрольная длина (L_0) для упрощенной SDWBA-модели TS криля (уравнение 10 дополнения), усредненные по распределению ориентации криля ($\theta = N[\bar{\theta} = 11^\circ, \text{s.d.} = 4^\circ]$). Экспоненциальное представление ($\times 10^x$) помечено «e±x». В упрощенной модели среднеквадратичная ошибка в этом диапазоне kL составляет 0.75 дБ.

<i>A</i>	6.64558746e+000
<i>B</i>	1.27909076e-001
<i>C</i>	4.46318146e-001
<i>D</i>	-1.19209591e-011
<i>E</i>	7.42324712e-009
<i>F</i>	-1.73916236e-006
<i>G</i>	1.86327198e-004
<i>H</i>	-8.67465215e-003
<i>I</i>	1.32140873e-001
<i>J</i>	-8.09830343e+001
L_0	38.35e-003 m

Табл. 3: Рекомендуемые диапазоны (мин.–макс.) значений ΔS_v (в дБ), использующиеся для классификации различных распределений размеров криля на гидроакустических эхограммах. Значения, показанные вверху, в середине и внизу каждой клетки, представляют собой диапазоны ΔS_v соответственно для 120–38 кГц, 200–120 кГц и 200–38 кГц. Эти значения основаны на расчетах по ограниченной упрощенной модели SDWBA, выполненных для распределения ориентации ($\theta = N[\bar{\theta} = 11^\circ, \text{s.d.} = 4^\circ]$).

Мин. длина криля (мм)	Максимальная длина криля (мм)			
	30	40	50	60
10	11.1–17.7	7.7–17.7	4.6–17.7	2.5–17.7
	0.4–6.8	-0.3–6.8	-0.5–6.8	-0.5–6.8
	11.5–24.5	7.4–24.5	4.1–24.5	2–24.5
20	11.1–14.7	7.7–14.7	4.6–14.7	2.5–14.7
	0.4–2.1	-0.3–2.1	-0.5–2.1	-0.5–2.1
	11.5–16.8	7.4–16.8	4.1–16.8	2–16.8
30	-	7.7–11.1	4.6–11.1	2.5–11.1
	-	-0.3–0.4	-0.5–0.4	-0.5–0.4
	-	7.4–11.5	4.1–11.5	2–11.5
40	-	-	4.6–7.7	2.5–7.7
	-	-	-0.5– -0.3	-0.5– -0.3
	-	-	4.1–7.4	2–7.4

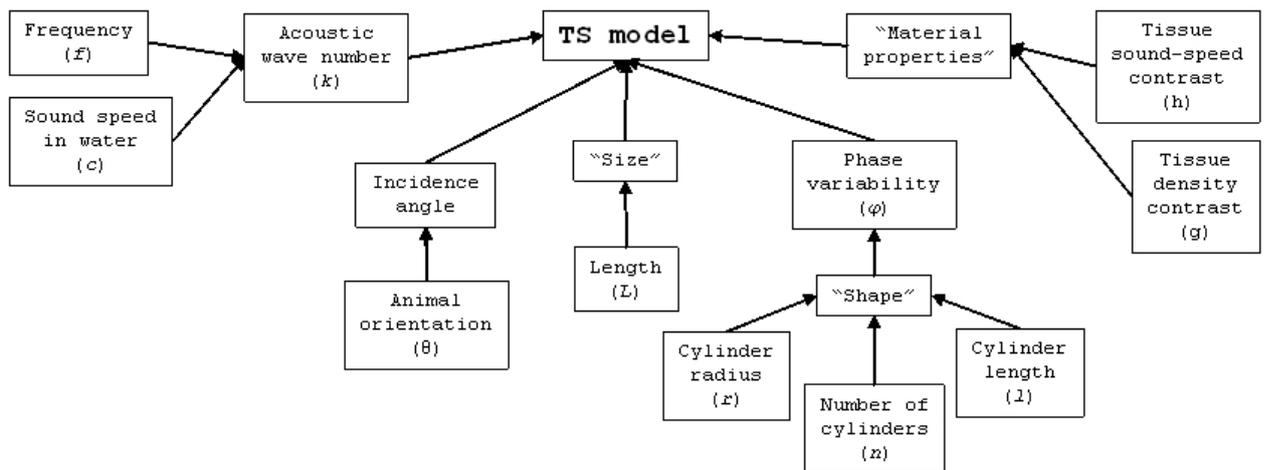


Рис. 1: Взаимосвязь параметров, от которых зависит сила цели антарктического кряля. Следует иметь в виду, что это – упрощенная аппроксимация без учета взаимозависимостей.

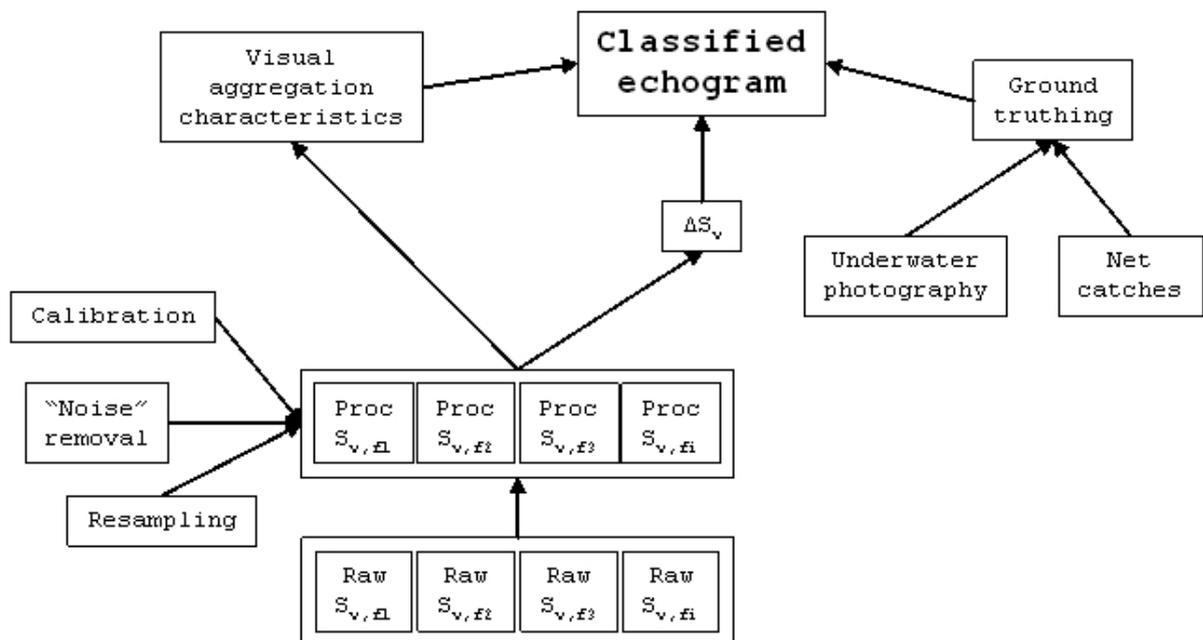


Рис. 2: Взаимосвязи между обобщенными информационными и процедурными категориями, используемыми в настоящее время для классификации данных S_v по таксонам. Proc – обработанные данные S_v .

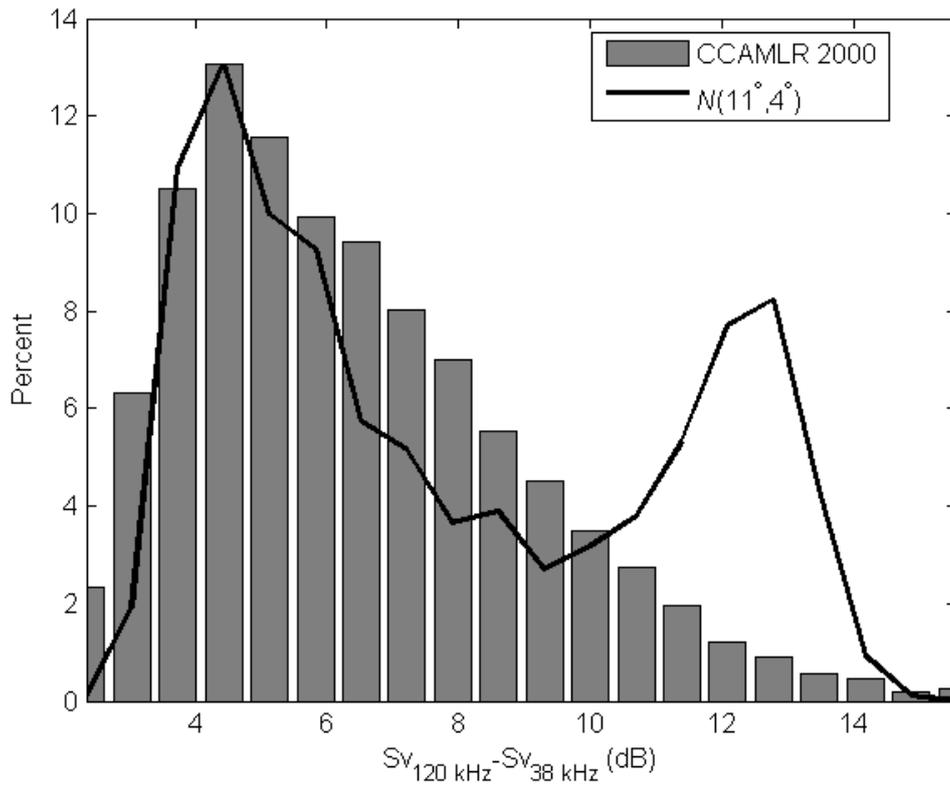


Рис. 3: Различия относимой к крилю силы обратного объемного рассеяния (ΔS_v) при 120 и 38 кГц, которая была получена НИС Южморгеология во время съемки АНТКОМ-2000 (серые прямоугольники), по сравнению с прогнозами по модели SDWBA, выполненной на основе данных съемки АНТКОМ-2000 о частотном распределении длин криля и ($\theta = N[\bar{\theta} = 11^\circ, \text{s.d.} = 4^\circ]$) распределении ориентации криля (черная линия).

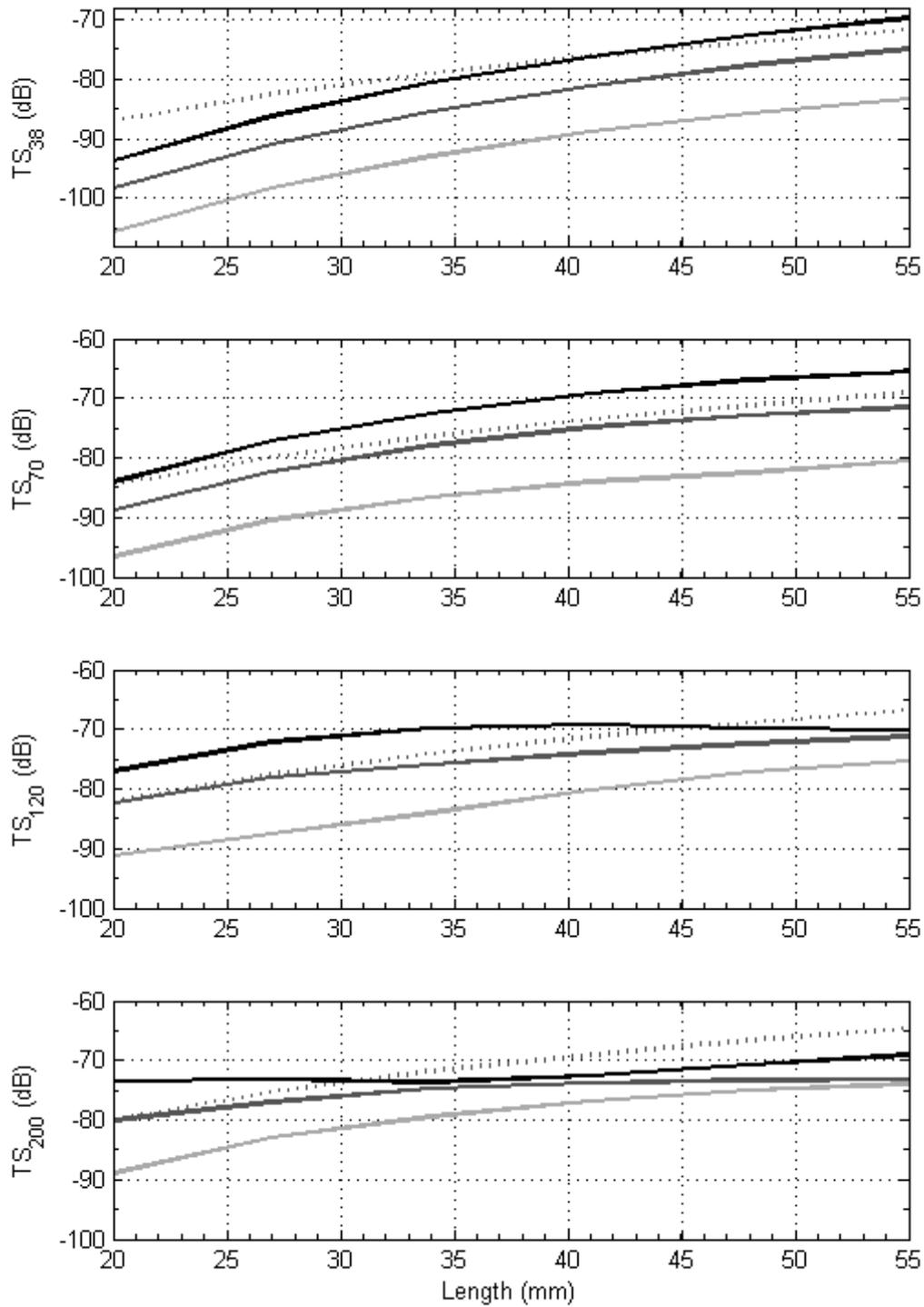


Рис. 4: TS, полученная по ограниченной упрощенной модели SDWBA, как функция L при 38, 70, 120 и 200 кГц. Параметры модели взяты из табл. 1 для сценариев 1 (сплошная светлая линия), 2 (сплошная серая) и 3 (сплошная черная). Пунктирная линия соответствует прогнозам Грина и др. (1991).

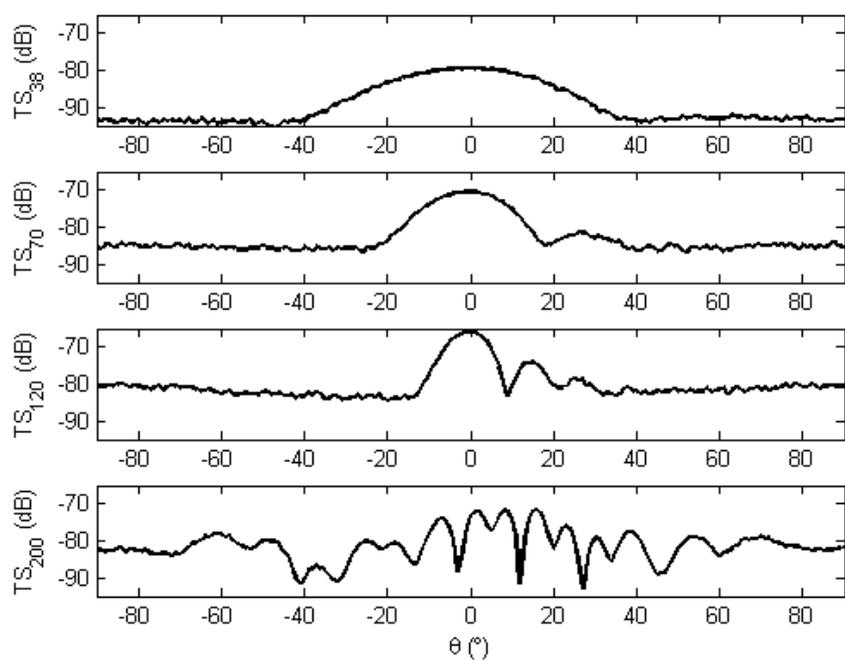


Рис. 5: TS, полученная по ограниченной, упрощенной модели SDWBA, как функция угла ориентации при 38, 70, 120 и 200 кГц. Параметры модели взяты из сценария 2 в табл.1.

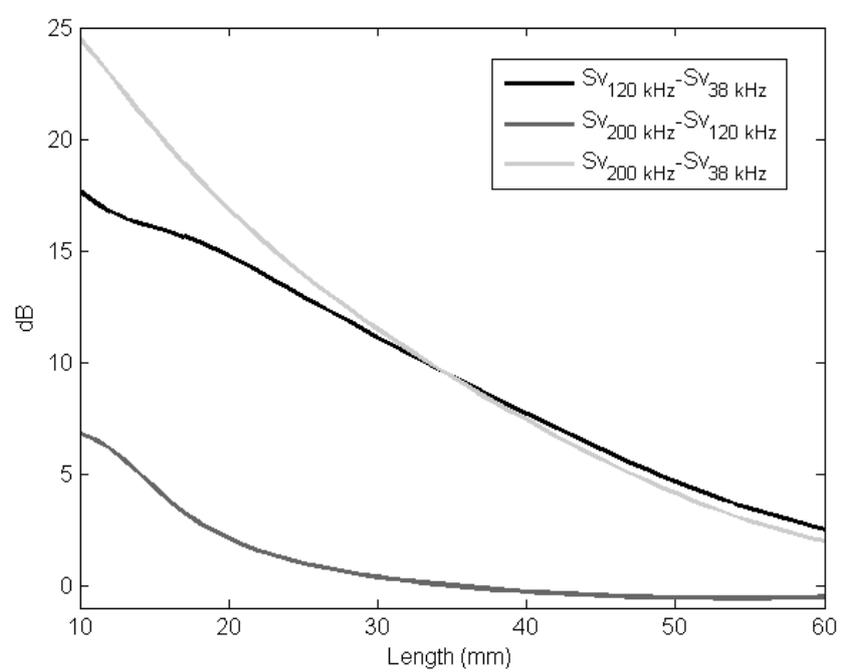


Рис. 6: Различия в S_v , полученной по ограниченной, упрощенной модели SDWBA при 200, 120 и 38 кГц, как функция L . Эти взаимосвязи могут использоваться для сокращения акустического прилова и потери (см. табл. 3).

**СТОХАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, ИСПОЛЬЗУЮЩАЯ БОРНОВСКОЕ
ПРИБЛИЖЕНИЕ ИСКАЖЕННЫХ ВОЛН (SDWBA)**

Криль аппроксимируется N дискретизированными изогнутыми цилиндрами с различным радиусом a_j . В этом случае форма функции обратного рассеяния для цилиндра j и угла падения θ выражается как:

$$f_{bs\ j}(\theta) = \frac{k_1}{4} \int [\gamma_\kappa - \gamma_\rho] \exp(-2i\vec{k}_i \vec{r}_0) \frac{a_j J_1(2k_2 a_j \cos \beta_{ilt})}{\cos \beta_{ilt}} dr_0 \quad (1)$$

где $\gamma_\kappa = (\rho_1 c_1^2 / \rho_2 c_2^2) - 1$, $\gamma_\rho = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_2$, индекс 1 обозначает окружающую морскую воду, а индекс 2 – криль. J_1 – функция Бесселя первого порядка первого рода, \vec{r}_0 –

вектор положения, $\vec{k}_i = k_1 \begin{bmatrix} \sin \theta \\ 0 \\ \cos \theta \end{bmatrix}$ – вектор падающей волны и β_{ilt} – угол между

цилиндром и центральной осью тела. Форма функции SDWBA получена путем суммирования компонент с различной случайной фазой φ_j по каждому цилиндру:

$$f_{bs}(\theta) = \sum_{j=1}^N f_{bs\ j}(\theta) \exp(i\varphi_j) \quad (2)$$

Изменение фазы φ_j получено по гауссовому распределению, центрированному на 0, со стандартным отклонением sd_φ для каждого цилиндра j вдоль тела. В заключение, эффективная площадь обратного акустического рассеяния $\sigma_{bs}(\theta)$ получена при осреднении многократных реализаций выборок фазы φ_j :

$$\sigma_{bs}(\theta) = \left\langle |f_{bs}(\theta)|^2 \right\rangle_\varphi, \quad (3)$$

и

$$TS(\theta) = 10 \log_{10}(\sigma_{bs}(\theta)). \quad (4)$$

Типичная форма криля была определена МакГи и др. (McGehee et al., 1998, стандартная длина $L_0 = 38.35$ мм). Демер и Конти (Demer and Conti, 2003a) увеличили ширину типичной формы на 40%, т.к. было обнаружено, что свежепойманные особи были толще, чем измерявшиеся МакГи и др. (McGehee et al., 1998) истощенные особи. При $f_0 = 120$ кГц и использовании $N_0 = 14$ цилиндров было оценено, что sd_{φ_0} составляет $\sqrt{2}/2$ радианов, в результате сравнения расчетов по SDWBA и экспериментальных

наблюдений. Поскольку коэффициенты N , sd_φ , f и L зависят друг от друга в плане их влияния на результаты SDWBA, $sd_\varphi(f)f$ поддерживалась постоянной,

$$sd_\varphi(f)f = sd_{\varphi_0}f_0. \quad (5)$$

Аналогичным образом, при изменении f и L также корректировалось N , с тем чтобы пространственное разрешение тела криля оставалось постоянным относительно длины волны. Таким образом, соотношение между длиной волны λ и длиной каждого отдельного цилиндра оставалось постоянным:

$$\frac{L}{N\lambda} = \frac{L_0}{N_0\lambda_0} \quad (6)$$

или

$$\frac{Lf}{N} = \frac{L_0f_0}{N_0}. \quad (7)$$

Из уравнений (5) и (7):

$$N(f, L) = N_0 \frac{fL}{f_0L_0} \quad (8)$$

и

$$sd_\varphi(f, L) = sd_{\varphi_0} \frac{N_0L}{N(f, L)L_0}. \quad (9)$$

Следовательно, sd_φ и N были подобраны к требуемым L и f . TS рассчитывалась как функция L при $f=38, 70, 120$ и 200 кГц (рис. 4) путем решения SDWBA с типичной для упитанного криля формой и корректировки N и sd_φ в соответствии с уравнениями (8) и (9). Эти параметры обобщены в табл. 1.

Прогноз TS по SDWBA в сжатой форме выражается как функция произведения волнового числа акустической волны $k=(2\pi/\lambda)$ и L . Осреднив эту функцию по нормальному распределению ($\theta = N[\bar{\theta} = x^\circ, \text{s.d.} = y^\circ]$) ориентаций криля, Демер и Конти (Demer and Conti, 2005) дали упрощенное полиномиальное представление функции $TS(kL)$:

$$TS(kL) = A \left[\frac{\log_{10}(BkL)}{BkL} \right]^C + D(kL)^6 + E(kL)^5 + F(kL)^4 + G(kL)^3 + H(kL)^2 + I(kL) + J + 20 \log_{10} \left(\frac{L}{L_0} \right). \quad (10)$$

Новые параметры этой модели были сгенерированы на основе параметров, приведенных в табл. 2, и kL , менявшегося в диапазоне от 0 до 200, для ($\theta = N[\bar{\theta} = 11^\circ, \text{s.d.} = 4^\circ]$) (табл. 1). Средняя rms-ошибка для этого диапазона kL составляет 0.75 дБ.

Распределение ориентаций ($\theta = N[\bar{\theta} = 11^\circ, \text{s.d.} = 4^\circ]$) было рассчитано по данным съемки АНТКОМ 2000. Различия S_v между 120 и 38 кГц, измеренные во время этой съемки, сравнивались с рассчитанными значениями, используя модель и измеренное во время съемки распределение длин (рис. 3). В результате оптимизации по методу наименьших квадратов со средним и стандартным отклонением ориентации соответственно в диапазонах от 0° до 25° и от 1° до 30° наилучшее соответствие было получено для ($\theta = N[\bar{\theta} = 11^\circ, \text{s.d.} = 4^\circ]$).