

УДК 534.2:594.582.2/.8

М.Ю. Кузнецов*

Тихоокеанский научно-исследовательский рыбохозяйственный центр,
690091, г. Владивосток, пер. Шевченко, 4

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКИХ СТИМУЛОВ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПОВЕДЕНИЕ ТИХООКЕАНСКОГО КАЛЬМАРА И ТЕХНОЛОГИИ ЕГО ЛОВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗВУКА

Исследованы спектральные, временные и энергетические характеристики акустических сигналов японского анчоуса *Engraulis japonicus*, являющегося объектом охоты тихоокеанского кальмара *Todarodes pacificus* в среде обитания. Выявлены закономерности формирования и структура сигналов анчоуса. Получены обобщенные спектральные характеристики наиболее часто встречающихся звуков. Спектр сигналов анчоуса, как и других открытопузырных рыб, сосредоточен в двух определенных поддиапазонах (интервалах) частот соответственно данному виду рыб: 500–700 Гц и 1800–2400 Гц (106 ± 8 дБ/1 мкПа/1 м). Показано участие плавательного пузыря в звукообразовании у исследуемых рыб. Область максимальной слуховой чувствительности головоногих совпадает с частотой собственных резонансных колебаний плавательного пузыря анчоуса (около 600 Гц). Это указывает на то, что кальмары способны отчетливо воспринимать звуковые колебания первого частотного поддиапазона обобщенного спектра сигналов анчоуса и реагировать на эти сигналы. Стереотипность и повторяемость звуков рыб, излучаемых с помощью плавательного пузыря, а также то, что слуховая система головоногих адаптирована к их восприятию и анализу, предполагает участие сигналов анчоуса в отношениях “хищник—жертва” как адекватного стимула, оказывающего привлекающее воздействие на стайных головоногих моллюсков. Приведены спектрально-энергетические и временные параметры акустических стимулов, которые могут быть использованы для привлечения и повышения трофической активности тихоокеанских кальмаров в процессе их лова. Эксперименты показали, что звуковые сигналы с заданными параметрами, имитирующие присутствие мелких открытопузырных рыб, дополнительно (помимо света) приманивают кальмаров и усиливают их пищевой рефлекс, что повышает темп клева на джиггеры. Производительность джиггерного лова тихоокеанского кальмара вертикальными ярусами при акустическом стимулировании увеличилась на 56 %. Полученные данные создают благоприятную перспективу практического использования акустических полей на кальмароловных судах, в том числе при траловом лове кальмара с использованием судна-подсветчика, оснащенного излучателями звука.

Ключевые слова: японский анчоус, акустический сигнал, сонограмма, диапазон частот, тихоокеанский кальмар, слуховая чувствительность, параметры стимулов, поведение.

* Кузнецов Михаил Юрьевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, e-mail: kuznetsov@tinro.ru.

Kuznetsov M.Yu. Substantiation of acoustic stimulus parameters for remote impact on the pacific squid behaviour and technologies of its fishery using acoustic stimulation // Izv. TINRO. — 2010. — Vol. 161. — P. 278–291.

Spectral, temporal and power characteristics of acoustic signals produced by japanese anchovy *Engraulis japonicus* are investigated. This species is one of the main objects of the pacific squid *Todarodes pacificus* preying. Regularities of these signals formation and their structure are defined and generalized spectral-energy parameters of the most frequent sounds are determined. The sound is produced with aid of the anchovy swimming bladder. The spectrum of anchovy signals, as well as the signals of other physostomous fishes, lies mainly in two certain frequency subranges: 500–700 and 1800–2400 Hz for anchovy (the spectral maximum deviated slightly from the beginning to the end of a pulse); the sound intensity is 106 ± 8 dB, duration of the pulses 0.25–3.05 sec. (1.0 ± 0.5 sec.). Distribution of the signal energy is similar to other sounds of anchovy, as well as other physostomous fishes. From the other hand, frequency of the maximal acoustical sensitivity of cephalopods coincides with the frequency of the anchovy bladder resonant oscillations (about 600 Hz). So, the squids have their hearing system adapted to perception and analysis of sound vibrations of the first frequency subrange of anchovy signals and react to these signals, and the signals emitted by means of swimming bladder of physostomous fishes, including anchovy, are used in relations «predator-victim» as the adequate stimulus for attraction of predators. The spectral-energy and temporal parameters of these signals attractive to squids are determined. In the experiments, the artificial sound signals with the same parameters were generated, that simulated presence of small-sized physostomous fish. In addition to light, these signals allured squids and strengthened their feeding reflex that enhanced the jigging CPUE on 56 %. This result could be a basement for practical application of acoustic fields on squid-fishing boats. This principle could be used for a group trawl catching of squid with a specially equipped vessel for lightening and sound signals emitting.

Key words: japanese anchovy, acoustic signal, sonogram, sound spectrum, pacific squid, auditory sensitivity, stimulus, behaviour.

Введение

Тихоокеанский кальмар *Todarodes pacificus* является важнейшим объектом промысла Японии, Республики Корея и других стран. Во время нагульных миграций его значительные запасы концентрируются и в российской экономической зоне, однако практически не осваиваются отечественным флотом.

T. pacificus относится к семейству Ommastrephidae, которое характеризуется эврибатностью и совершает вертикальные миграции, поднимаясь ночью к поверхности. Как и у большинства других мигрирующих морских животных, подъем и опускание кальмара совпадают с заходом и восходом солнца. Объектами питания для него в приповерхностном слое служат мелкие рыбы (японский анчоус, сардина, корюшка, сайра и др.), макропланктонные ракообразные (в основном эвфаузииды и бокоплавы) и мелкие кальмары. По относительной массе головной мозг этого семейства равен или превосходит мозг рыб, но уступает мозгу птиц и млекопитающих (Несис, 1982).

Считается, что основной дистантный рецептор у кальмаров — зрение. Соответственно этой физиологической особенности основным способом промысла тихоокеанских кальмаров является лов вертикальными ярусами на свет в темное время суток (Полутов, 1985). Теория и расчет основных параметров светового поля для создания привлекающего в зону облова воздействия и зрительных рецепторов кальмара хорошо изучены (Гирса, 1981; Сидельников, 1981; Полутов, 1985). Однако использование для привлечения и концентрации кальмара только световых полей не обеспечивает в настоящее время достаточную производительность лова кальмара на джиггеры в течение ограниченного периода промысла (ночи). Реакция привлечения кальмаров на свет зависит от соотношения интенсивности искусственного и естественного освещения и значительно ослабляется в лунные ночи (Сидельников, 1981). Увеличение мощности световой гирлянды

не дает сопоставимого с ростом затрат увеличения площади привлечения кальмаров в зону облова и интенсивности поклевки (Кручинин и др., 2006). Кроме этого, интенсивность поклевки уже привлеченных светом судна кальмаров в течение ночи тоже существенно варьирует.

Вместе с тем разработчиками промыслового оборудования до сих пор не принимаются во внимание технически очевидные преимущества использования для воздействия на кальмара и повышения эффективности его лова акустического канала. Это прежде всего его дистантные возможности и энергозатраты. Акустические колебания в воде затухают гораздо слабее и распространяются на большие расстояния, чем в воздухе (особенно на низких частотах). Световые поля, наоборот, имеют в воде гораздо меньшие дистантные возможности. Кроме этого, акустические свойства водной среды таковы, что для генерации в воде определенного звукового давления требуются гораздо меньшие затраты энергии, чем в воздухе.

Долгое время было неясно, воспринимают ли головоногие звук, а если воспринимают, то каким органом. Известно, что головоногие моллюски имеют систему рецепторов, подобную боковой линии у рыб и амфибий. Аналогом невромастов (рецепторных органов боковой линии рыб) у головоногих являются поляризованные эпидермальные волосковые клетки, образующие линии на голове и щупальцах этих моллюсков (Budelmann, Bleckmann, 1988). С помощью этих структур головоногие способны обнаруживать гидродинамические возмущения и низкочастотные вибрации (колебания частиц воды), распространяющиеся в ближнем акустическом поле, частотой от 3,5 до 200,0 Гц (Budelmann, Bleckmann, 1988). Позже (Kotak et al., 2005) диапазон воспринимаемых с помощью механорецепторов локальных колебаний воды был расширен до 600 Гц, а эксперименты подтвердили, что головоногие, в частности каракатицы, могут воспринимать локальные движения воды различных частот и способны к обобщению этой информации в поведенческих реакциях.

Однако все многочисленные попытки исследователей вызвать у кальмаров и осьминогов поведенческие реакции или выработать условный рефлекс на звуковые частоты в дальнем акустическом поле, указывающие на существование слуха у головоногих, были безуспешными (Несис, 1986). Тем не менее акустическое стимулирование кальмаров, как показали эксперименты, оказалось вполне успешным.

Еще в 70-е гг. прошлого века Y. Maniwa (1976) убедительно продемонстрировал, что кальмар *Todarodes pacificus* привлекается тональным звуковым сигналом частотой 600 Гц, излучаемым кальмароловным судном. Это поведенческая реакция успешно используется для увеличения уловов кальмара в Японии (Hanlon, Budelmann, 1987).

Специалистами Хоккайдского университета, Токийского института промысловства и научно-исследовательской лаборатории фирмы "Хакодате Суйсан" был проведен ряд экспериментов по интенсификации джиггерного лова кальмаров с помощью звуковых сигналов (Воловова, 1977). В результате этих экспериментов был выявлен ряд звуков, привлекательных для кальмаров. Была установлена эффективность набора звуковых сигналов, применяемых в отдельности и в различных комбинациях: звук при включении заднего хода судна; серии импульсов с частотой 600 Гц, длительностью 5 с, интервалом 5 с; аналогичные импульсы с меняющейся частотой заполнения в пределах длительности; звуки питания лакедры-желтохвоста; звуки ударов дождевых капель по поверхности моря (так называемые "ливневые звуки"). Относительный прирост улова кальмара за счет применения звуковых сигналов был оценен в 30–60 %.

В 1984 г. в Японском море сотрудниками ВНИРО были проведены экспериментальные исследования по оценке промыслового эффекта акустического стимулирования на ярусном лове кальмаров (Шабалин, Беднарский, 1989). В качестве акустических стимулов использовали различные биозвуки, в том числе звуки пи-

тания кальмаров, и сигналы технического происхождения. Проведенные исследования показали, что акустическое стимулирование повышает суммарный улов контрольных лебедек. Например, при использовании в качестве стимула шума винта при включении заднего хода судна или широкополосных биосигналов сложного спектра, создаваемых при плавании и питании кальмаров (Шабалин, 1983), дозированных по длительности и интенсивности, производительность ярусного лова тихоокеанских кальмаров повышалась в среднем на 20 % с вероятностью не менее 0,95. Сигналы технического происхождения, в отличие от биозвуков, не оказывают локального, направленно привлекающего действия на кальмаров, а лишь повышают их двигательную активность вблизи судна в целом, приводя тем самым к учащению встречаемости джиггеров на пути их перемещений. Следует отметить важный вывод, сделанный в результате визуальных наблюдений за поведением сопутствующих кормовых объектов в световом поле (Шабалин, Беднарский, 1989). Акустическое стимулирование активизирует у рыб мобилизационно-панические и ориентировочно-исследовательские реакции (в зависимости от информационного содержания сигнала), дестабилизирующие структуру и динамику их стай, что, в свою очередь, воздействует на пищевую и двигательную активность кальмаров, приводя к учащению их перемещений и нападений на рыбу и джиггеры.

Несмотря на положительные результаты описанных выше экспериментов, звуковое восприятие у головоногих было спорно до настоящего времени и только в последние годы, с развитием методов научных исследований, были выполнены эксперименты, результаты которых подтвердили способности головоногих слышать и реагировать на звук.

Во-первых, установлен рецептор, воспринимающий движение частиц у головоногих в дальнем акустическом поле (Kaifu et al., 2008). Для этой цели служат статоцисты, которые обнаруживают кинетические компоненты звуковой волны. Эти рецепторы равновесия головоногих состоят из комплекса статолит-макула, помещенного в эндолимфу, заполняющую полость (камеру) статоциста по аналогии с отолитовыми органами рыб (Young, 1989). Неповрежденные (интактные) животные ясно реагировали на движение частиц частотой 141 Гц. При удалении статолитов пороги восприятия ускорения частиц выросли в среднем на 16 дБ (примерно в 6,5 раза). Результаты исследований подтвердили, что статоцисты ответственны за восприятие звука и играют ту же роль в рецепции головоногих, что и система внутреннего уха у рыб (Young, 1989).

Во-вторых, определен частотный диапазон воспринимаемых этими животными звуков. Наличие афферентных нервов, контактирующих с волосковыми клетками макулы статоциста и связанных с мозгом беспозвоночных, указывает на возможность применения электрофизиологического метода для определения слуховых порогов головоногих в дальнем акустическом поле. Регистрация акустически вызванных потенциалов, генерируемых корой головного мозга, осуществлялась с помощью ABR (auditory brainstem response) технологии (Hu et al., 2009). По крайней мере две разновидности головоногих: овальный кальмар *Sepioteuthis lessoniana* и осьминог *Octopus vulgaris* — способны обнаруживать волны давления. Диапазон воспринимаемых частот *S. lessoniana* составляет от 400 до 1500 Гц, *O. vulgaris* — от 400 до 1000 Гц, причем пороги слухового восприятия у первого упомянутого вида ниже, а диапазон воспринимаемых частот шире, чем у второго. В работе утверждается, что основным дистантным рецептором подводного звука у головоногих являются статоцисты. Однако роль эпидермальных волосковых клеток на частотах ниже 400 Гц тоже окончательно не отрицается (Hu et al., 2009).

Отсутствие газозаполненных структур, которые усиливают колебания звукового давления и расширяют диапазон воспринимаемых частот в дальнем акустическом поле источника, естественно, повышает слуховые пороги головоногих относительно большинства пузырных рыб, у которых плавательный пузырь непосредственно или косвенно контактирует с приемниками звука. Слуховые спо-

способности головоногих из-за отсутствия воздушных полостей сопоставимы со слуховыми способностями рыб, не имеющих связи плавательного пузыря с внутренним ухом, например лососями, японской скумбрией, тунцом и др. (Popper et al., 2003; Кузнецов, Кузнецов, 2007).

В числе других объектами питания кальмаров, как было отмечено выше, являются мелкие открытопузырные рыбы (анчоус, корюшка, сардина) — типично стайные пелагические объекты, имеющие воздушные протоки и упругие сфинктерные образования для сообщения плавательного пузыря с кишечником (*ductus pneumaticus*) или непосредственно с внешней средой (*ostium genitale*). Посредством этих структур исследованные нами открытопузырные рыбы (лососи, сельди и сардины) создают сигналы достаточно высокой амплитуды и определенного спектрального состава, зависящих от размеров (вида) рыб (Кузнецов, 2007). Исследованные акустические сигналы и процессы, сопровождающие их производство, являются видовыми свойствами стайных открытопузырных рыб и обеспечивают, помимо газорегуляции, выполнение не менее важных биологических функций — ориентации и поддержания стайного и межстайного контакта рыб, — усиливающихся при уменьшении зрительного восприятия между ними. Очевидно, что сигналы этих рыб одновременно служат приманкой для многочисленных хищников (хищных рыб, кальмаров и морских млекопитающих).

Целью данной работы является исследование акустических сигналов японского анчоуса — объекта охоты кальмаров — и возможности их использования для дистанционного воздействия на поведение тихоокеанского кальмара в технологиях его лова.

Материалы и методы

В качестве объекта исследований был выбран японский анчоус *Engraulis japonicus* — традиционный объект охоты и питания тихоокеанских кальмаров.

Исследования по регистрации звуков анчоуса проводили в садке ставного невода размером 20,0 x 8,0 x 7,0 м, установленного в зал. Петра Великого в районе мыса Ахлестышева о. Русского при глубине моря 7 м. Предварительно из ловушки невода в садок было пересажено около 500 особей рыб. Линейные размеры анчоуса в промере 50 шт. составили 120–160 мм (минимальные—максимальные).

Регистрация биосигналов осуществлялась калиброванным акустическим трактом, состоящим из гидрофона ГИ-6 и цифрового регистратора VУ-Н350. Чувствительность гидрофона на частоте 1000 Гц составляет 170 мкВ/Па. В таком исполнении тракт позволяет производить запись гидроакустических сигналов в диапазоне частот 100–10000 Гц (рис. 1).

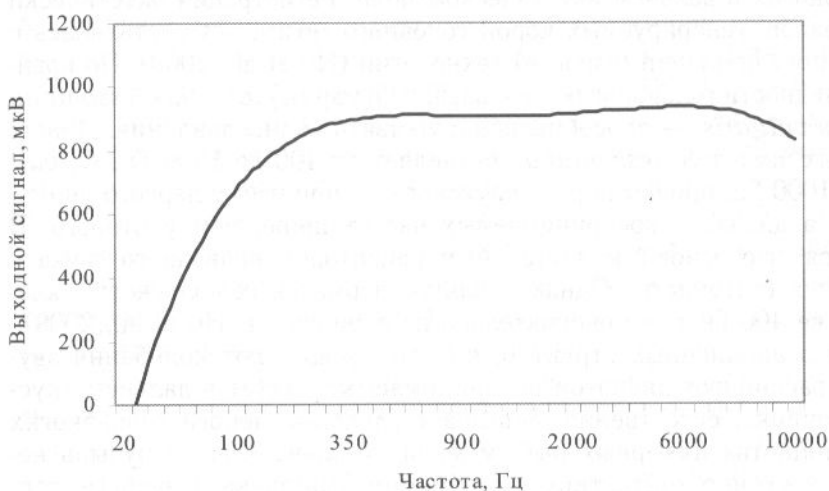


Рис. 1. Частотная характеристика тракта регистрации сигналов
Fig. 1. The frequency characteristic of sound registration channel

Гидрофон устанавливали посередине садка, к внешней стороне которого привязывали шлюпку с источником автономного питания и аппаратурой звукозаписи. Регистрация сигналов производилась непрерывно в течение суток.

Для определения обобщенных параметров было отобрано 20 наиболее часто встречающихся звуков анчоуса с высоким соотношением сигнал/шум.

Для анализа фонограмм использовали IBM PC и программу постпроцессорной обработки сигналов SpectraLab (Sound Technology Inc.). Введенные в PC записи синхронно прослушивались и просматривались в аналоговом виде. Отобранные участки с исследуемым биосигналом воспроизводили в аналоговом виде и по программам быстрого преобразования Фурье (Фурье-анализ) получали сонограммы и спектрограммы сигналов в графическом виде.

Аналоговые выводы сигналов и их частотно-энергетические спектры имеют следующую размерность: амплитуда аналоговых сигналов в абсолютных единицах звукового давления — паскалях, а время в секундах; для спектров по оси абсцисс отложена частота в герцах, по оси ординат — уровни звукового давления исследуемых сигналов в паскалях или в децибелах относительно 1 мкПа, приведенные к 1 м. С целью выявления изменчивости частотных составляющих биосигналов во времени построены динамические спектры с шагом 100 мс.

У сигналов измерялись следующие характеристики: длительность, частота спектрального максимума, уровень звукового давления на доминирующей частоте, амплитудная и частотная модуляция. Описательная статистика сигналов анчоуса производилась в пакете Statistica 7.0 (StatSoft, Inc.). Находили среднее арифметическое, стандартное отклонение, минимальное и максимальное значения параметров биосигналов.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 приведены спектрально-временные характеристики одиночного сигнала анчоуса, измеренного в садке невода.

Характерными признаками звуков анчоуса, независимо от их фонетического звучания, являются:

— импульсная структура сигналов с плавным нарастанием и экспоненциальным спадом амплитуды в импульсах;

— высокая вариабельность длительности — $0,25-3,05$ с ($1,0 \pm 0,5$ с, $N = 20$);

— выраженные частотные составляющие в определенных зонах спектра — 400–700 и 1500–2500 Гц;

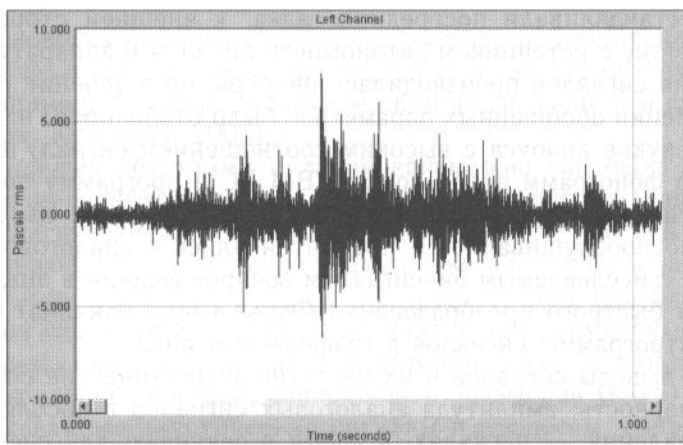
— девиация частоты спектрального максимума в соответствующих зонах спектра от начала к концу сигнала произвольно — либо от нижней границы поддиапазона к верхней, либо наоборот, либо от средней частоты поддиапазона в сторону увеличения (понижения);

— амплитудная модуляция (пульсации амплитуды сигнала) частотой 40–60 Гц, глубиной 4–6 дБ;

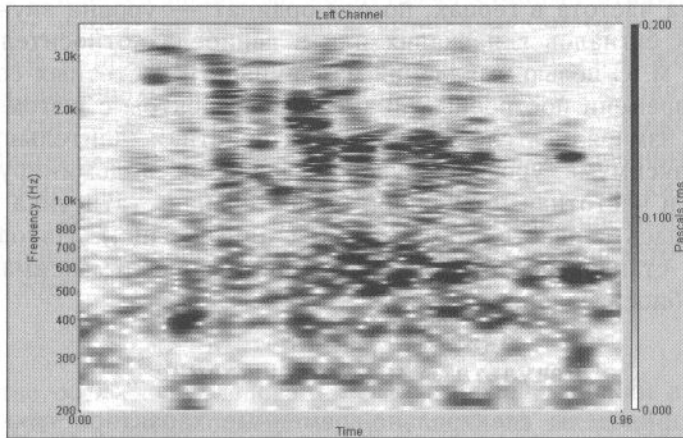
— относительно высокие уровни звукового давления на доминирующих частотах — до 0,5 Па (106 ± 8 дБ/1 мкПа/1 м, $N = 20$).

Динамический спектр сигнала анчоуса показан на рис. 3. Наблюдается смещение частотных составляющих и их интенсивности в выделенных зонах спектра 400–700 и 1500–2500 Гц от начала к концу импульса. Такое перераспределение энергии сигнала во время излучения характерно для большинства исследованных нами звуков анчоуса.

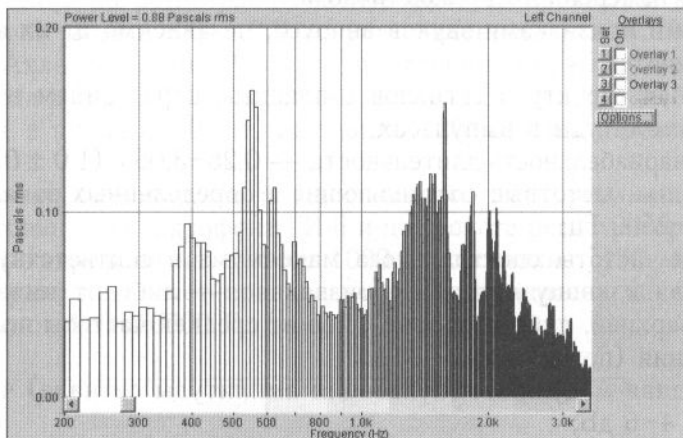
В результате анализа отобранных звуков получены обобщенные спектральные характеристики сигналов анчоуса (рис. 4). Для сравнения на рис. 4 приведены обобщенные характеристики акустических сигналов других исследованных нами открытопузырных рыб. Как видно, спектральный состав сигналов различен и зависит от видовой принадлежности звучащего объекта. Наблюдается явно



A



Б



B

Рис. 2. Характеристики акустического сигнала японского анчоуса *Engraulis japonicus*: **A** — осциллограмма; **Б** — сонограмма; **B** — усредненный спектр

Fig. 2. Characteristics of the japanese anchovy acoustic signal: **A** — oscillogram; **Б** — sonogram; **B** — average spectrum

выраженная зависимость распределения спектральной энергии и уровня излучаемых сигналов от размеров (вида) рыб: чем меньше объект, тем выше частота и ниже амплитуда сигнала. Спектр сигналов анчоуса, как и других открытопузырных рыб, сосредоточен в двух поддиапазонах (интервалах) частот: 500–700 и 1800–2400 Гц.

Такое распределение спектральной энергии сигналов связано с одновременным участием в звукообразовании плавательного пузыря и воздушного протока

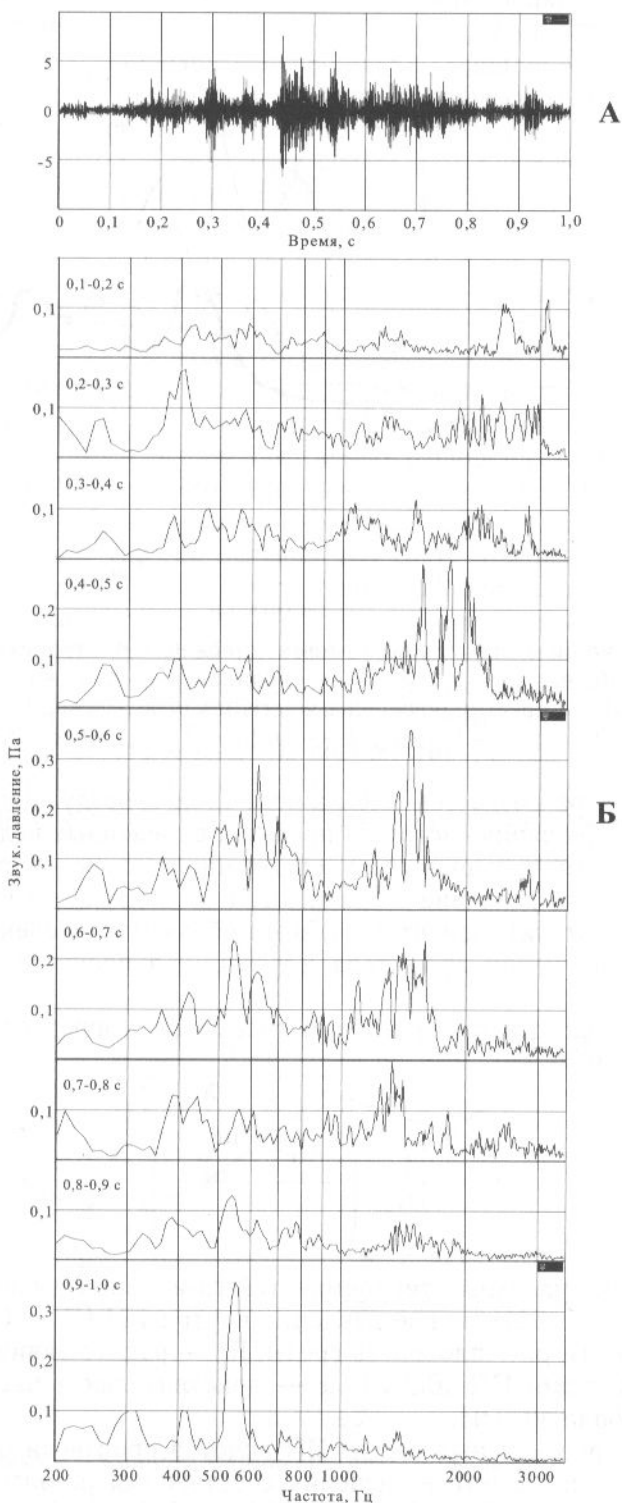


Рис. 3. Аналоговый вид (А) и динамический спектр (Б) сигнала анчоуса
 Fig. 3. Analog view (А) and dynamic spectrum (Б) of the anchovy signal

с мышечным сфинктером (Кузнецов, 2007). Увеличение уровня звукового давления в первом поддиапазоне частот вызывается эффективными пульсациями плавательного пузыря (ПП) на частоте, соответствующей его резонансным размерам и давлению воздуха в нем. Подъем уровня сигналов во втором характерном

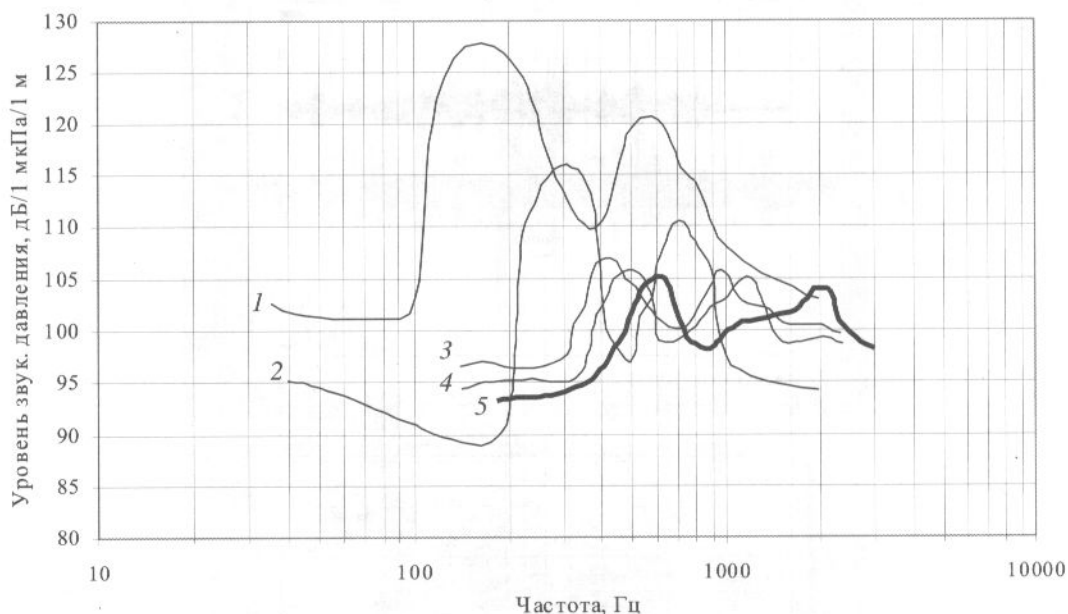


Рис. 4. Обобщенные спектрально-энергетические характеристики сигналов рыб: 1 — кета; 2 — горбуша; 3 — сельдь; 4 — сардина; 5 — японский анчоус
 Fig. 4. Generalized spectral-power characteristics of fish acoustic signals: 1 — chum salmon; 2 — pink salmon; 3 — herring; 4 — sardine; 5 — japanese anchovy

поддиапазоне спектра создается вибрациями стенок воздушного протока и мышечного клапана. Девиация частоты в пределах выделенных поддиапазонов спектра, характерная для большинства исследованных сигналов рыб (см. рис. 3), определяется тем, что давление воздуха в ПП (а следовательно, и его объем) и сечение канала (протока) зависят случайным образом от степени сжатия (ослабления) запирающих мышц сфинктера и поэтому в процессе излучения могут различаться.

Резонансная частота плавательного пузыря рыб определяется по формуле (Клей, Медвин, 1980)

$$f_p \approx \frac{1}{2\pi R_3} \cdot \left(\frac{3\gamma P_n + 12\mu t / R_3}{\rho} \right)^{1/2},$$

где γ — отношение удельных теплоемкостей газа, заполняющего ПП (для воздуха $\gamma = 1,4$); P_n — эффективное давление внутри ПП ($P_n = (1 + 0,1N)10^5$ Па, где N — глубина, м); ρ — плотность среды; R_3 — радиус эквивалентной сферы, м; t — толщина ткани ПП ($0,2R_3$); μ — действительная часть комплексного модуля сдвига оболочки ПП.

Для расчета резонансных частот ПП анчоуса произвели обмер ПП 50 особей. Рассчитанные по формуле значения собственных резонансных частот ПП анчоуса составляют ($N = 5$ м): $f_p = 550-700$ Гц (620 ± 50 Гц, $N = 5$). Границы вычисленных значений резонансных частот соответствуют максимальным и минимальным размерам ПП, измеренным у этих рыб. Данные расчета резонансных частот ПП хорошо согласуются с результатами экспериментальных исследований сигналов анчоуса. Вычисленные значения собственных колебаний ПП соответствуют первому частотному поддиапазону с максимальной энергией спектра (рис. 4), что подтверждает прямое участие плавательного пузыря в звукообразовании у исследуемых рыб (Кузнецов, 2007).

Мы полагаем, что исследованные нами сигналы мелких открытопузырных рыб, в частности японского анчоуса, имеют информационное (сигнальное) значение для тихоокеанского кальмара в отношениях “хищник—жертва”. Звуковые волны определенной спектральной и временной структуры, распространяясь в воде, передают сведения об излучающих их объектах. Для голодных хищников присутствие стаи открытопузырных рыб, создающей характерную акустическую обстановку, стимулирует пищевой рефлекс и оказывает привлекающее воздействие. Эта поведенческая реакция кальмаров может быть использована для повышения эффективности их промысла.

Следует ожидать, что слуховая система кальмаров адаптирована к восприятию и анализу биосигналов этих рыб.

Как уже упоминалось, слуховые возможности головоногих были исследованы совсем недавно (Kaifu et al., 2008; Hu et al., 2009). Раньше существование у кальмаров свойства слуха, т.е. способности обнаруживать звуковое давление в дальнем акустическом поле, преимущественно отрицалось или предполагалось лишь гипотетически (Несис, 1986). При этом обсуждалось, что наличие слуха выгодно для головоногих в эволюционном плане, поскольку звуковые волны распространяются в воде гораздо дальше, чем свет. Предполагалось также, что слух у головоногих могла бы обеспечить пара статоцистов, которые по положению, строению и функциям сходны с внутренним ухом позвоночных. Результаты экспериментов (Hu et al., 2009) убедительно свидетельствуют о наличии у головоногих развитой слуховой системы и способности кальмара реагировать на сигналы звуковых частот, в том числе на исследованные нами сигналы анчоуса. Определены и органы, ответственные за восприятие звука — статоцисты (Kaifu et al., 2008). Аудиограммы двух видов головоногих — овального кальмара *S. lessoniana* и обыкновенного осьминога *O. vulgaris* представлены на рис. 5.

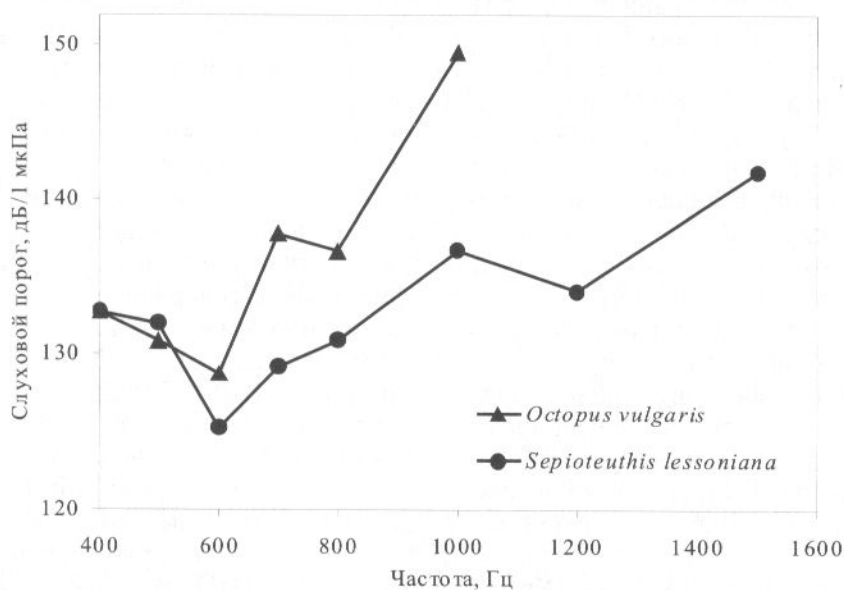


Рис. 5. Аудиограммы осьминога *Octopus vulgaris* и овального кальмара *Sepioteuthis lessoniana* (по: Hu et al., 2009)

Fig. 5. Audiograms of octopus *Octopus vulgaris* and oval squid *Sepioteuthis lessoniana* (by: Hu et al., 2009)

Различия в слуховых способностях овального кальмара и осьминога, возможно, объясняются особенностями экологии этих животных. В темное время суток кальмары — пелагические стайные организмы, имеющие ограниченные дистантные возможности обнаружения подвижных объектов питания и сокры-

тия от хищников с помощью зрительных рецепторов. Осьминоги — донные животные, обитающие в скалистых местах с очень развитыми способностями камуфляжа, питающиеся в основном малоподвижными придонными объектами. Более широкие слуховые возможности кальмаров помогают им заблаговременно обнаруживать добычу и избегать хищников в условиях открытого пространства и ограниченной видимости. У осьминогов рецепторный аппарат используется в основном для локального обнаружения производимых хищником или жертвой гидродинамических возмущений и вибраций.

Диапазон воспринимаемых частот составляет соответственно 400–1500 и 400–1000 Гц. Максимальная чувствительность у обоих видов приходится на частоту 600 Гц. Область максимальной чувствительности головоногих соответствует первому частотному поддиапазону с максимальной энергией спектра сигнала анчоуса (см. рис. 4), т.е. совпадает с частотой собственных резонансных колебаний плавательного пузыря этих рыб (550–700 Гц). Кстати, сами анчоусы, как и другие представители подотряда сельдевидных, способны отчетливо воспринимать звуковые колебания первого частотного поддиапазона, соответствующие частоте собственных колебаний плавательного пузыря, что, очевидно, связано с одновременным участием этого органа в звуковой рецепции и в звукообразовании у исследуемых пузырных рыб (Кузнецов, 2007).

Сходство первого частотного диапазона излучаемых рыбами сигналов и воспринимаемых кальмарами частот указывает на то, что слуховые рецепторы головоногих, в частности кальмаров, настроены на восприятие и распознавание звуков именно этой размерной группы открытопузырных рыб (анчоус, мелкая сардина, корюшка и др.), являющихся объектами их охоты в приповерхностном слое. Стереотипность и повторяемость звуков рыб, излучаемых с помощью плавательного пузыря, а также то, что слуховая система головоногих адаптирована к их восприятию и анализу (по крайней мере резонансных частот), предполагает участие этих сигналов в отношениях “хищник—жертва” как адекватного стимула, оказывающего привлекающее воздействие на этих стайных головоногих моллюсков.

Задолго до этого Maniwa (1976) экспериментальным путем доказал, что кальмар *T. pacificus* привлекается тональным звуковым сигналом частотой 600 Гц. Но почему положительная поведенческая реакция была вызвана именно этой частотой, оставалось неизвестно. На наш взгляд, дело здесь не только в том, что слуховая система кальмара имеет наибольшую чувствительность на этой частоте. Немаловажное значение при акустическом стимулировании кальмаров и других гидробионтов имеет информационное содержание предъявляемого сигнала, поскольку известно, что реакции водных животных на биологические (информационные) сигналы более стабильны, направлены и избирательны, чем на звуки технического происхождения (Протасов, 1978). Реакция на стимулы, не имеющие биологической природы, в том числе тональные звуковые сигналы, как правило, нестабильна и сопровождается быстрой адаптацией объектов к звуку. Такие параметры акустических стимулов, как их прерывистость, наличие амплитудной и (или) частотной модуляции низкочастотных компонент, характерные для большинства исследованных нами сигналов рыб, увеличивают силу и продолжительность реакции (Кузнецов, Кузнецов, 2007). Это предполагает более высокую эффективность привлекающего воздействия таких сигналов.

Ниже приведены основные параметры акустических стимулов, которые могут быть использованы для привлечения и повышения трофической активности тихоокеанских кальмаров в процессе их лова (см. таблицу). При установлении этих параметров мы принимали во внимание результаты экспериментальных исследований спектральных, энергетических и временных характеристик сигналов анчоуса, характеризующих структуру биосигналов мелких открытопузырных рыб и определяющих их биологическое (сигнальное) значение для стайных головоногих моллюсков. Кроме того, были учтены выполненные другими учеными

(Maniwa, 1976; Шабалин, Беднарский, 1989; Kaifu et al., 2008; Hu et al., 2009) исследования характеристик слуховой чувствительности головоногих и результаты экспериментов по их акустическому стимулированию. Второй частотный поддиапазон спектра, поскольку нет доказательства слуха кальмара в этой области, лишь поддерживает информационное содержание биосигнала, хотя в естественной среде обитания диапазон слуховой чувствительности кальмара может быть гораздо шире, учитывая ночной образ жизни этих животных, постоянно контактирующих с открытопузырными рыбами.

Параметры акустических сигналов для дистанционного воздействия на кальмаров
Parameters of acoustic stimulus for remote influence on japanese squid behaviour

Длительность сигнала, с	Диапазон частот, Гц	Интервалы частот спектрального максимума, Гц	Частотная модуляция (девиация частоты)*, Гц	Амплитудная модуляция**, Гц	Уровень звукового давления***, дБ/1 мкПа
1,0 ± 0,5	200–3000	550–700 1800–2400	150 600	50–60	120 ± 6

* Частотная модуляция означает изменение частоты спектрального максимума в пределах выделенных интервалов спектра от начала к концу сигнала.

** Амплитудная модуляция — изменение (пульсации) амплитуды сигнала глубиной 4–6 дБ.

*** В месте нахождения объекта.

Исходя из вышеизложенного нами была предложена идея увеличения уловов кальмароловного судна путем использования для привлечения объектов лова вместе с источниками света гидроакустических излучателей, формирующих в воде звуковое поле с приведенными выше параметрами. При этом создается возможность интенсификации джиггерного лова тихоокеанского кальмара звуковыми сигналами мелких открытопузырных рыб, имеющими информационное значение в отношениях “хищник—жертва” и дополнительно (помимо света) привлекающими животных к борту судна (Пат. РФ № 2352111).

Экспериментальные исследования возможности использования акустических стимулов с заданными параметрами для дистанционного воздействия на поведение тихоокеанского кальмара были проведены в зал. Петра Великого в августе-сентябре 2006–2007 гг. на джиггерном лове тихоокеанского кальмара с судна “Россиантэ”, оснащенного 4 кальмароловными лебедками и световой гирляндой мощностью 7,7 кВт.

Специально для этих целей в рамках договора о научно-техническом сотрудничестве между ФГОУ ВПО “Дальрыбвтуз” и ФГУП “ТИНРО-центр” была изготовлена экспериментальная модель пневмоакустической системы. На рис. 6 показана структурная схема системы и ее размещение на кальмароловном судне. Система включает набор последовательно соединенных излучателей — имитаторов звуков рыб, соединенных магистральным шлангом с компрессором.

Методика предусматривала сравнение уловов в течение одного часа при включении световой гирлянды и совместном использовании светового и акустического оборудования в течение такого же времени. Результаты экспериментов подробно изложены ранее (Кузнецов, Баринов, 2009). Суммируя уловы судна за время экспериментов при фоновых реализациях и в режиме стимулирования, установили, что производительность джиггерного лова кальмара с использованием пневмоакустической системы увеличилась на 56 %.

Исследования показали, что биошумовое поле, имитирующее сигналы мелких открытопузырных рыб, привлекает животных и усиливает их пищевой рефлекс, что повышает темп клева кальмара на джиггеры. При этом очевидно, что применение акустических полей увеличивает эффект привлекающего действия светового поля, поскольку создается одновременно зрительное и акустическое

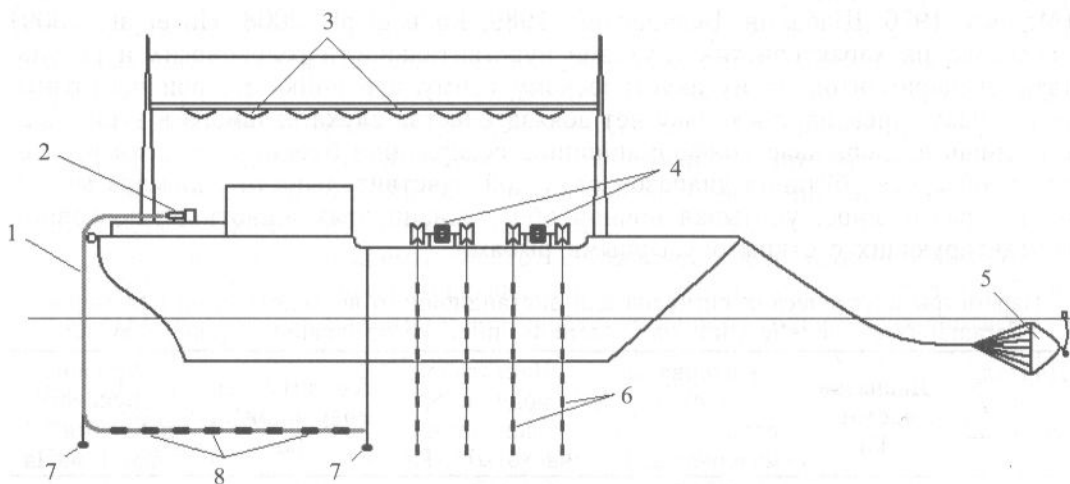


Рис. 6. Схема экспериментальной установки на судне "Россинантэ" (ТИНРО-центр): 1 — магистральный шланг; 2 — компрессор; 3 — световая гирлянда; 4 — кальмароловные лебедки; 5 — плавучий якорь; 6 — джиггеры; 7 — груз; 8 — излучатели

Fig. 6. Scheme of experimental equipment on RV Rossinante (TINRO): 1 — main hose; 2 — compressor; 3 — light garland; 4 — squid catching winches; 5 — floating anchor; 6 — jiggers; 7 — plummets; 8 — acoustic emitters

воздействие на кальмара. Как известно, комплексное воздействие раздражителей различной модальности (в данном случае света и звука) вызывает суммацию рефлексов и стимулирует у водных животных более сильную реакцию (Протасов, 1978; Степанова, 1980).

Заключение

Экспериментально определены спектральные, временные и энергетические характеристики сигналов японского анчоуса, являющегося объектом охоты тихоокеанского кальмара в естественной среде обитания.

Область максимальной слуховой чувствительности головоногих совпадает с частотой собственных резонансных колебаний плавательного пузыря анчоуса (около 600 Гц). Это указывает на то, что кальмары способны отчетливо воспринимать звуковые колебания первого частотного поддиапазона обобщенного спектра и реагировать на исследованные сигналы анчоуса. Стереотипность излучаемых с помощью плавательного пузыря звуков, а также то, что слуховые рецепторы головоногих адаптированы к восприятию низкочастотных составляющих спектра, показывают очевидные преимущества использования этих сигналов и акустического канала в целом для воздействия на поведение кальмара с позиций прежде всего дистантных возможностей и энергозатрат. Получены обобщенные спектральные характеристики акустических сигналов анчоуса, характеризующие структуру биосигналов мелких открытопузырных рыб и определяющие их информационное (сигнальное) значение для стайных головоногих моллюсков в отношениях "хищник—жертва".

Эксперименты показали, что звуковые волны определенной спектральной и временной структуры, имитирующие присутствие мелких открытопузырных рыб, способны дополнительно приманивать кальмаров и усиливать их поисково-трофическую активность. При этом достигнут высокий эффект увеличения промысловой эффективности джиггерного лова тихоокеанских кальмаров. Это создает благоприятную перспективу практического использования звуковых полей на кальмароловных судах, в том числе при траловом или кошельковом лове кальмара с использованием судна-подсветчика, оснащенного акустическими излучателями.

Список литературы

- Воловова Л.А.** Применение в Японии акустических устройств для направления рыб в зону облова : ОИ / ЦНИИТЭИРХ. Пром. рыболовство. — 1977. — Вып. 5. — 27 с.
- Гирса И.И.** Освещенность и поведение рыб : монография. — М. : Наука, 1981. — 164 с.
- Клей К.С., Медвин Г.** Акустическая океанография : монография. — М. : Мир, 1980. — 580 с.
- Кручинин О.Н., Мизюркин М.А., Богатков В.Г.** Возможные способы повышения эффективности джиггерного лова тихоокеанского кальмара // Изв. ТИНРО. — 2006. — Т. 146. — С. 310–325.
- Кузнецов М.Ю.** Акустическая активность некоторых видов дальневосточных рыб и обоснование параметров акустических стимулов для дистанционного воздействия на рыб // Изв. ТИНРО. — 2007. — Т. 150. — С. 281–300.
- Кузнецов М.Ю., Баринов В.В.** Использование звуковых полей для интенсификации джиггерного лова тихоокеанского кальмара // Рыбпром. — 2009. — № 3. — С. 68–73.
- Кузнецов Ю.А., Кузнецов М.Ю.** Обоснование и разработка методов и средств промысловой биоакустики : монография. — Владивосток : Дальрыбвтуз, 2007. — 339 с.
- Несис К.Н.** Выгодно ли кальмарам быть глухими? // Природа. — 1986. — № 3. — С. 95.
- Несис К.Н.** Краткий определитель головоногих моллюсков Мирового океана. — М. : Лег. и пищ. пром-сть, 1982. — 360 с.
- Пат. РФ № 2352111** Способ управления поведением рыб / М.Ю. Кузнецов, Ю.А. Кузнецов. — Заявлено 10.09.2007; Оpubл. 20.04.2009; Бюл. № 11.
- Полутов А.И.** Промысел тихоокеанских кальмаров : монография. — М. : Агропромиздат, 1985. — 144 с.
- Протасов В.Р.** Поведение рыб : монография. — М. : Пищ. пром-сть, 1978. — 295 с.
- Сидельников И.И.** Добыча тихоокеанских рыб и кальмаров на свет : монография. — М. : Лег. и пищ. пром-сть, 1981. — 136 с.
- Степанова Н.А.** О комплексном воздействии на рыб нескольких физических раздражителей // Новое в гидробионике. — М. : Наука, 1980. — С. 22–24.
- Шабалин В.Н.** Биозвуки тихоокеанских кальмаров // Вопросы промысловой гидроакустики. — М. : ВНИРО, 1983. — С. 47–65.
- Шабалин В.Н., Беднарский А.Д.** Влияние акустических стимулов на производительность ярусного лова кальмаров // Вопросы промысловой гидроакустики. — М. : ВНИРО, 1989. — С. 115–124.
- Budelmann B.U., Bleckmann H.** A lateral line analogue in cephalopods: water waves generate microphonic potentials in the epidermal head lines of *Sepia officinalis* and *Lolliguncula brevis* // J. Comp. Physiol. — 1988. — Vol. 164, pt A. — P. 1–5.
- Hanlon R.T., Budelmann B.U.** Why cephalopods are probably not “deaf” // Am. Nat. — 1987. — № 129. — P. 312–317.
- Hu M.Y., Yan H.Y., Chung W.S. et al.** Acoustically evoked potentials in two cephalopods inferred using the auditory brainstem response (ABR) approach // J. Comp. Biochem. and Physiol. — 2009. — Vol. 153, pt A. — P. 278–283.
- Kaifu K., Akamatsu T., Segawa S.** Underwater sound detection by cephalopod statocyst // Fisheries science. — 2008. — Vol. 74. — P. 781–786.
- Komak S., Boal J.G., Dickel L., Budelmann B.U.** Behavioural responses of juvenile cuttlefish (*Sepia officinalis*) to local water movements // J. Marine and Freshwater Behaviour and Physiol. — 2005. — Vol. 38(2). — P. 117–125.
- Maniwa Y.** Attraction of bony fish, squid and crab by sound // Sound Reception in Fish. — Amsterdam, 1976. — P. 271–283.
- Popper A.N., Fay R.R., Platt C., Sand O.** Sound detection mechanisms and capabilities of teleost fishes // Sensory Processing in Aquatic Environments. — N.Y. : Springer-Verlag, 2003. — P. 3–38.
- Young J.** The angular acceleration receptor systems of diverse cephalopods // Phil. Trans. R. Soc. Lond. — 1989. — Vol. 325, pt B. — P. 189–237.

Поступила в редакцию 2.03.10 г.