АКУСТИЧЕСКИЕ СИГНАЛЫ, ГЕНЕРИРУЕМЫЕ РАКОМ-ЩЕЛКУНОМ В б. ВИТЯЗЬ

Рутенко А.Н.*, Ущиповский В.Г., Радаев И.Р.

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН E-mail: *rutenko@poi.dvo.ru

Аннотация

Приводятся результаты натурных и модельных исследований распространения импульсных высокочастотных акустических сигналов, генерируемых раком-щелкуном на шельфе Японского моря в бухте Витязь. Пространственные акустические измерения проводились с помощью 4-х гидрофонов, устанавливаемых в море глубиной 3 м с помощью металлической конструкции – рама высотой 3 м. Модельные исследования, проведенные с помощью лучевой теории, показали, что из-за интерференции прямого акустического сигнала, распространяющегося в водном слое, и сигнала, отраженного от поверхности дна, рак-щелкун эквивалентен не точечному источнику, а диполю, и поэтому в водном слое на расстоянии 6 м от рака формируется вертикальная интерференционная картина, подобная экспериментальной с минимальной энергией у дна. В акустическом поле, формируемом импульсом, отраженным от поверхности моря, из-за запаздывания подобной интерференции нет. Показано, что рак-щелкун в качестве коммуникационного сигнала применяет тройки акустических импульсов, следующих с периодом 0,45 с.

Ключевые слова: акустический импульс рака-щелкуна, распространение высокочастотного акустического импульса в прибрежной зоне.

ACOUSTIC SIGNALS GENERATED BY SNAPPING SHRIMP IN VITYAZ BAY

Rutenko A.N.*, Ushchipovskii V.G., Radaev I.R.

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences E-mail: *rutenko@poi.dvo.ru

Abstract

Here are the results of real and model studies of the propagation of pulsed high-frequency acoustic signals generated by the snapping shrimp on the shelf of the Sea of Japan in the Vityaz Bay. Spatial acoustic measurements were carried out using 4 hydrophones installed in the sea 3 m deep using a metal structure – a 3 m long frame. Model researches carried out using the radiation theory showed that due to the interference of the direct acoustic signal propagating in the water layer and the signal reflected from the bottom surface, the snapping shrimp is equivalent not to a point source, but to a dipole, and therefore in the water layer at a distance of 6 m from the shrimp, a vertical interference pattern is formed similar to the experimental one with minimal energy at the bottom. In an acoustic field formed by a pulse reflected from the sa surface due to the delay, there is no such interference. It has been shown that the snapping shrimp uses three acoustic pulses of the next with a period of 0.45 s as a communication signal.

Keywords: acoustic impulse of a snapping shrimp, propagation of a high-frequency acoustic impulse in the coastal zone.

Введение

Семейство раков-щелкунов (Decapoda: Alpheidae), включающее более 600 видов, относится к отряду ракообразных [6, 7]. Большинство видов раков-щелкунов обитает в тропических и субтропических морях на мелководье, однако некоторые виды живут в прохладных водах. В работах [2, 3] представлен анализ акустических сигналов рака-щелкуна, измеренных в Черном море на шельфе Абхазии. Характерной особенностью раков-щелкунов является малоподвижный образ жизни и довольно редкие перемещения, но главной особенностью данного семейства является способность к ультрабыстрому закрытию аномально большой клешни, в результате чего происходит формирование кавитационной высокоскоростной струи воды, которая используется для охоты, обороны, выкапывания норок и коммуникации [11]. Практически мгновенное закрытие большой клешни вызывает образование мощного щелчка, который сопровождается формированием кавитационного пузыря и испусканием света [10]. За счет замедления границы пузырька при его разрушении происходит локализованное увеличение температур до 5000 К, что является эффективным способом генерации ударных волн, способных повредить даже минеральные скелеты других организмов [1]. Визуализация момента смыкания клешни свидетельствует о формировании вихревых структур вблизи клешни, имеющих радиус ядра порядка 4 мм и перепад давления в ядре порядка 200 Па.

В 2017 г. в бухте Витязь Японского моря у берега м. Шульца были измерены редкие высокочастотные 200-24000 Гц акустические импульсы, в которых амплитуда вариаций акустического давления p(t) (см. рис. 1) превысила 3000 Па. Расстояние от гидрофона до рака с учетом разности прихода прямого и отраженного от поверхности моря импульсов примерно равно 0,7 м. Согласно работам Виноградова Л.Г. [6], источником таких сигналов мог быть рак-щелкун (Alpheidae), обитающий (проживающий) в Японском море. На рис. 1а видно, что амплитуда положительной полуволны в измеренном акустическом импульсе достигла примерно 3,2 кПа, это эквивалентно значению уровня 190,1 дБ отн. 1 мкПа. На этом рисунке во временной области мы видим прямой импульсный сигнал (интервал 1) и сдвинутый по фазе на 180° сигнал, пришедший в точку приема после отражения от поверхности моря (интервал 2). Толщина водного слоя H = 3 м.

В данной работе приводятся результаты специальных пространственных акустических измерений, проведенных с помощью металлической конструкции, показанной на рис. 2, позволившей установить в море глубиной 3 м четыре однотипных гидрофона в виде вертикальной эквидистантной антенны с апертурой, равной 240 см.



Рис. 1. Акустические импульсы, излученные раком-щелкуном: а) прямой (интервал 1) и отраженный от поверхности моря (интервал 2); б) спектр «прямого» сигнала; в) фотография рака-щелкуна Alpheidae [6]

Измерительно-регистрационный комплекс

Синхронные пространственные (p0,..., p3) измерения акустического поля, формируемого импульсным сигналом рака-щелкуна, проводились с помощью металлической конструкции, показанной на рис. 2. Четыре цифровых гидрофона типа ГИ-50 [8] и измерительно-

регистрационный комплекс обеспечили синхронные измерения вариаций акустического давления - p(t)в частотном диапазоне 2-24000 Гц. Синхронность проведения акустических измерений и соответствующие преобразования аналогового напряжения в 24-разрядный цифровой код обеспечило 4-канальное АЦП NI 9239 компании National Instruments (NI), работающее с частотой дискретизации равной 48 кГц. Этот код через крейт DAQ 9184 (NI) вводился в ЭВМ с помощью программы DAQEnterSP. Программа



Рис. 2. Металлическая конструкция для проведения акустических измерений в вертикальной плоскости с помощью 4-х гидрофонов

DrawData (автор В.А. Гриценко) обеспечила синхронную визуализацию измеренных с помощью гидрофонов акустических сигналов, их архивирование, автоматический поиск импульсных сигналов и расчет оценок их параметров и спектров. Регистрация, поиск и анализ параметров импульсов проводились в лабораторном помещении, расположенном на берегу.

Результаты натурных измерений

Клешню рака-щелкуна можно представить «точечным» излучателем сферических волн, но из-за близости дна получается вертикальный диполь, и поэтому, согласно работе [5], акустический импульс, формируемый раком-щелкуном, имеет диаграмму направленности. Представленные ниже графики иллюстрируют ее проявление. Согласно рис. За максимальные амплитуды вариаций p(t), соответствующие прямому и отраженному от поверхности моря импульсам, измерены гидрофоном p1 на расстоянии 170 см от дна.

Отметим, что амплитуда прямого сигнала может быть меньше амплитуды сигнала, отраженного от поверхности моря, и это особенно хорошо видно в сигнале, измеренном у дна гидрофоном p3. На рис. Зб показана геометрическая схема, позволяющая по относительным временным задержкам, представленным на рис. За, определить радиус г окружности с вертикальной антенной в центре, на котором находился рак, излучивший акустический импульс, показанный на



Рис. 3. а) прямые и отраженные от морской поверхности акустические импульсы рака-щелкуна, измеренные вертикальной цепочкой из 4-х гидрофонов (см. рис. 2); б) геометрическая схема для оценки радиуса г, на котором мог находиться рак-щелкун, излучивший акустический импульс, показанный на рис. За

146

рис. За. Расчеты выполнены для однородного водного слоя толщиной З м и значением скорости звука в воде C_w , равным 1450 м/с. На рис. За видно, что в 3-метровом водном слое к вертикальной измерительной цепочке подошел водный импульс с практически вертикальным фронтом, причем его амплитуда минимальна у дна, поскольку формируемый раком-щелкуном в водном слое акустический импульс имеет диаграмму направленности в вертикальной плоскости. В импульсах, отраженных от поверхности моря, четко выражена противофаза, но нет эффекта от диаграммы направленности. Расчеты показали, что в данном случае рак-щелкун мог находится на дистанции r = 5,6 м от вертикальной приемной системы (см. рис. 3б).

Небольшие расхождения между экспериментальными и расчетными значениями временных интервалов, по-видимому, обусловлены влиянием прилива 15–20 см и дневным прогревом приповерхностного слоя солнечной радиацией, т.е. в приповерхностном 0,5–1 м слое воды значение C_w , могло быть больше 1450 м/с.

Результаты численного моделирования

Для импульса, показанного на рис. 3, численное моделирование распространения высокочастотного импульса удобно провести с помощью лучевого метода мнимых источников [4]. Модельный волновод в этом случае состоит из водного слоя постоянной глубины H = 3 м, лежащего на «жидком» полупространстве, а акустические свойства сред слагающих волновод можно считать однородными. Полагаем, что источник акустического импульса расположен на горизонте 2,99 м. Импульсное акустическое поле формируется сферически расширяющимися волнами, генерируемыми источником и испытывающими отражение на границах раздела сред. Каждое отражение представляется в виде луча, исходящего из мнимого источника, а коэффициент отражения определяется соотношением акустических характеристик граничащих сред. В результате интерференции этих лучей в водном слое формируется неоднородное акустическое поле, в котором, согласно экспериментальным данным, представленным на рис. 3, наименьшие значения амплитуды прямого сигнала измерены нижним гидрофоном рЗ возле дна. Здесь следует отметить, что амплитуда акустического

импульса, отраженного от поверхности моря, значительно превышает амплитуду «прямого» сигнала, по-видимому, это обусловлено интерференцией прямого импульсного сигнала с сигналом, отраженным от поверхности дна. Покажем это с помощью численного моделирования, проведенного согласно схеме, представленной на рис. 4.

Следуя работе [4], граница «вода – воздух» может считаться абсолютно мягкой, т.е. амплитуда звукового давления на ней равна 0, а коэффициент отражения акустической волны равен –1, но при этом фаза колебаний звукового давления отраженной волны изменяется на 180°. Граница «вода – дно» имеет импедансный характер, и коэффициент отражения на ней определяется соотношением скоростей звука $n = C_0 / C_1$ в воде C_0 и в грунте C_1 , соотношением плотностей m = ρ_1 / ρ_0 воды ρ_0 и грунта ρ_1 и углом падения волны на границу раздела θ :

$$V_1 = \frac{m \cdot \cos(\theta) - \sqrt{n^2 - \sin^2(\theta)}}{m \cdot \cos(\theta) + \sqrt{n^2 - \sin^2(\theta)}}$$

При углах падения волны на границу больших, чем критическое значение $\theta_{\rm C}$ = arcsin (C_0 / C_1), коэффициент отражения становится



Рис. 4. Схема, иллюстрирующая метод мнимых источников. V0 – коэффициент отражения на границе «воздух – вода». V1 – коэффициент отражения на границе «вода – дно». Н – глубина водного слоя. S – действительный источник, S0, S1 – мнимые источники

комплексным: по модулю равным 1, что соответствует полному отражению, но при этом фаза отраженного сигнала плавно изменяется от 0 до -180° с увеличением угла падения, и существует диапазон углов падения, при которых падающий сигнал отражается практически в противофазе. В нашем случае этот угол $\theta_c = 58,5^{\circ}$.

Для численного моделирования, с помощью специальной программы была построена эквивалентная раку точечная функция источника, для которой были проведены расчеты формируемого в данном волноводе поля значений уровня энергии импульсного акустического поля – $SEL_{imp}(z, r)$, в вертикальной плоскости (см. рис. 5) и вариаций акустического давления – p(t) (см. рис. 6а) в точках, в которых были проведены натурные измерения, представленные на рис. 6б.



На этих рисунках видно, что результаты моделирования хорошо согласуются с натурными измерениями как во временной области, так

Рис. 5. Поле значений уровня энергии $SEL_{imp}(z, r)$ распространяющегося акустического импульса, иллюстрирующее интерференцию прямых водных лучей с отраженными от дна и поверхности моря. Эквивалентный раку точечный источник расположен в r = 0, z = 2,99 м. Угол между осью z и проявляющейся линией соответствует критическому углу падения $\theta_c = 58.5^{\circ}$

	SEL, dB, эксперимент	SEL, dB, модель
p0	119,5	122,1
p1	121,1	122,0
p2	119	119,8
p3	116,9	115,5

Таблица 1. Значения SEL, рассчитанные по временным рядам, представленным на рис. 6, величиной 6 мс



Рис. 6. Сравнение временных рядов, рассчитанных методом мнимых источников и измеренных экспериментально, для четырех гидрофонов р0,..., р3 вертикальной антенной решетки

и по суммарным значениям SEL (см. табл. 1), рассчитанным на временных интервалах, показанных на рис. 6 и равных 6 мс.

Анализ импульсных сигналов, излученных раком-щелкуном во временной области

Известно, что рак-щелкун может излучать акустические импульсы с временным интервалом 0,5 с. Нам тоже удалось измерить таких три акустических импульса, следующих с периодом 0,42 с. На рис. 7 а, б видно, что параметры этих импульсов подобны во временной области, поэтому мы считаем, что их излучил один и тот же рак-щелкун.

Согласно графикам p(t) представленным на рис. 86, первым в «точку» приема пришел водный импульс, а примерно через 2 мс пришел импульс, отраженный морской поверхностью.

Для чего рак-щелкун применяет тройки импульсов, следующих через временной интервал Dt = 0,42 с. На рис. 8 видно, что эти тройки могут быть объединены в посылку из 12 импульсов, причем временной интервал между тройками DT = 1 с. Вряд ли он связан с эхолокацией, как мы уже это видели у белого кита – белухи [9], тогда остается 150



Рис. 7. а) три акустических импульса, измеренные гидрофоном p2; б) первый импульс, показанный более подробно; в) последний импульс и импульс другого рака-щелкуна; г) импульс другого рака, показанный более подробно

предположить, что это коммуникационные сигналы между разными раками-щелкунами. На рис. 7 а, в видно, что после третьего импульса первого рака-щелкуна, гидрофоны записали импульс от другого ракащелкуна. Этот сигнал показан более подробно на рис. 4 г.

В заключение отметим, что рак-щелкун является уникальным природным источником очень мощных – 190,1 дБ отн. 1 мкПа и широкополосных, в нашем случае – до 24 кГц, акустических



троек

импульсов. Поскольку раки ведут малоподвижный образ жизни, то формируемые ими на шельфе акустические поля могут быть применены при решении практических задач, связанных с мониторингом параметров среды, охраной подводных объектов, обнаружением подводных пловцов и т.п. Для решения подобных задач надо научиться контролировать их естественное обитание и вызывать генерацию коммуникационных импульсов (см. рис. 7 и рис. 8), например, с помощью излучения пачек импульсов, возбуждающих у раков ответную реакцию.

Благодарность. Авторы выражают благодарность сотрудникам ТОИ ДВО РАН Борисову С.И., Медведеву И.В. и студенту Травкину В.С. за активное участие в натурных экспериментах.

Литература

- Alam P., Sanka I., Alam L.P., Wijaya S., Sintya E., Handayani N.S.N., Rivero-Möller A. The snapping shrimp dactyl plunger: a thermomechanical damage-tolerant sandwich composite // Zoology. 2018. V. 126. P. 1–10.
- Бибиков Н.Г. Биошумы шельфа южных морских рубежей России и Абхазии // Докл. XV школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских / Акустика океана. М. ГЕОС. 2016. С. 162–165.
- Бибиков Н.Г., Макушевич И.В. Статистические характеристики высокочастотных биошумов шельфовой зоны Черного моря // Докл. XVI школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских / Акустика океана. М. ГЕОС. 2018. С. 169–172.
- 4. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах // Наука. Москва. 1973. С. 343.
- Versluis M., Schmitz B., Anna von der Heydt, Lohse D. How Snapping Shrimp Snap: Through Cavitating Bubbles // Science. 2000. V. 289. P. 2114–2117.
- Виноградов Л.Г. Определитель креветок, раков и крабов Дальнего Востока // Известия Тихоокеанского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии. Владивосток. 1950. Т. 33. С. 179–356.
- Kaji T., Anker A., Wirkner Christian S., Palmer A.R. Parallel Saltational Evolution of Ultrafast Movements in Snapping Shrimp Claws // Current Biology. 2018. V. 28. P. 106–113.
- 8. Рутенко А.Н., Борисов С.В., Ковзель Д.Г., Гриценко В.А. Радиогидроакустическая станция для мониторинга параметров антропогенных импульсных и шумовых сигналов на шельфе // Акуст. журн. 2015. Т. 61. № 4. С. 500–511. DOI: http://doi. org/10.7868/S0320791915040097.
- 9. Рутенко А.Н., Вишняков А.А. Временные последовательности гидроакустических сигналов, генерируемых белухой при поиске и лоцировании подводных объектов // Акуст. журн. 2006. Т. 52. № 3. С. 375–384. DOI: https://doi.org/10.1134/ S1063771006030122.

- Tang and Staack. Shrimp claw inspires new method of underwater plasma generation // Texas A&M University. March 28 2019. https://engineering.tamu.edu/news/2019/03/ shrimp-claw-inspires-new-method-of-underwater-plasma-generation.html.
- Hess D., Christoph Brücker, Franziska Hegner, Alexander Balmert, Horst Bleckmann. Vortex Formation with a Snapping Shrimp Claw // PLOS2013. V. 8. Issue 11. e77120. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0077120.
- Chitre M., Koay Teong-Beng, Potter J.R. Origins of directionality in snapping shrimp sounds and its potential applications // OCEANS. 2003. V. 2. DOI: http://doi. org/10.1109/OCEANS.2003.178442.
- Choi B.K., Kim B-N., Hahn J., Kim B-C., Park Y., Jung S-K., Lee Y-K. Acoustic Characteristics of the Snapping Shrimp Sound Observed in the Coastal Sea of Korea // Jap. J. of App. Phys. 2011. V. 50. 07HG04. DOI: http://doi.org/10.1143/ JJAP.50.07HG04.

References

- Alam P., Sanka I., Alam L.P., Wijaya S., Sintya E., Handayani N.S.N., Rivero-Möller A. The snapping shrimp dactyl plunger: a thermomechanical damage-tolerant sandwich composite // Zoology. 2018. V. 126. P. 1–10.
- Bibikov N.G. Shelf bio-noise of the southern maritime borders of Russia and Abkhazia // Report of the XV School-Seminar. Acad. L.M. Brekhovsky / Akustika okeana. M. GEOS. 2016. P. 162–165.
- Bibikov N.G., Makushevich I.V. Statistical characteristics of high-frequency bionoise of the Black Sea shelf zone // Report of the XVI School-Seminar. Acad. L.M. Brekhovsky / Akustika okeana. M. GEOS. 2018. P. 169–172.
- 4. Brekhovsky L.M. Waves in layered environment // Nauka. Moscow. 1973. P. 343.
- Versluis M., Schmitz B., Anna von der Heydt, Lohse D. How Snapping Shrimp Snap: Through Cavitating Bubbles // Science. 2000. V. 289. P. 2114–2117.
- Vinogradov L.G. Directory of Shrimp, Crayfish and Crab Far East // Izvestiâ Tihookeanskogo naučno-issledovatel'skogo rybohozâjstvennogo centra. Vladivostok. 1950. V. 33. P. 179–356.
- Kaji T., Anker A., Wirkner Christian S., Palmer A.R. Parallel Saltational Evolution of Ultrafast Movements in Snapping Shrimp Claws // Current Biology. 2018. V. 28. P. 106–113.
- Rutenko A.N., Borisov S.V., Kovzel D.G., Gricenko V.A. A radiohydroacoustic station for monitoring the parameters of anthropogenic impulse and noise signals on the shelf // Acoustical Physics. 2015. V. 61. № 4. P. 455–465. DOI: http://doi.org/10.7868/ S0320791915040097.
- Rutenko A.N., Vishnyakov A.A. Time Sequences of Sonar Signals Generated by a Beluga Whale When Locating Underwater Objects // Acoustical Physics. 2006. V. 52. № 3. P. 375–384. DOI: https://doi.org/10.1134/S1063771006030122.

- Tang, Staack. Shrimp claw inspires new method of underwater plasma generation // Texas A&M University. March 28 2019. https://engineering.tamu.edu/news/2019/03/ shrimp-claw-inspires-new-method-of-underwater-plasma-generation.html.
- Hess D., Brücker C., Hegner F., Balmert A., Bleckmann H.. Vortex Formation with a Snapping Shrimp Claw // PLOS2013. V. 8. Iss. 11. e77120. DOI: https://doi. org/10.1371/journal.pone.0077120.
- Chitre M., Koay Teong-Beng, Potter J.R. Origins of directionality in snapping shrimp sounds and its potential applications // OCEANS. 2003. V. 2. DOI: http://doi. org/10.1109/OCEANS.2003.178442.
- Choi B.K., Kim B-N., Hahn J., Kim B-C., Park Y., Jung S-K., Lee Y-K. Acoustic Characteristics of the Snapping Shrimp Sound Observed in the Coastal Sea of Korea // Jap. J. of App. Phys. 2011. V. 50. 07HG04. DOI: http://doi.org/10.1143/ JJAP.50.07HG04.