

Особенности звуков раков–щелкунов в Черном море

Н. Г. Бибиков*

АО «Акустический институт имени академика Н. Н. Андреева»

Россия 117036, Москва, ул. Шверника, д. 4

(Статья поступила 23.06.2017; Подписана в печать 26.06.2017)

В октябре–ноябре 2015–2016 гг. при регистрации гидроакустических биошумов на мелководье восточного побережья Черного моря с помощью широкополосной аппаратуры (верхняя частотная граница — несколько сотен килогерц) были выявлены весьма интенсивные импульсные звуки, генерируемые раками–щелкунами. При размещении гидрофона в 30–40 см над донной поверхностью на глубинах от 5 до 10 м сигнал содержал фоновый шум, создаваемый этими объектами, расположенными на расстояниях более метра. Наряду с этим обнаруживались и сравнительно редкие (обычно несколько раз в минуту), но весьма интенсивные (до нескольких сотен паскалей) щелчки. Они излучались одиночными объектами, локализованными в близости от гидрофона. Такие условия позволили осуществить временной анализ одиночных сигналов раков щелкунов в естественных условиях их обитания. Показано, что они состоят из следующих участков: короткий всплеск–предшественник, генерируемый струей жидкости, вылетающей при схлопывании клешни, мощный импульс, возникающий при схлопывании кавитационного пузырька, многочисленные отражения этого сигнала от близлежащих элементов донной поверхности (галька, раковины мидий). Время нарастания основного импульса может составлять 7–10 мкс при общей длительности сигнала, которая варьируется вследствие специфики отражений от 0.1 до 0.4 мс. Наряду с исходным импульсом можно обнаружить также и задержанные эхосигналы от локальных искусственных подводных объектов и от поверхности. Обсуждаются возможные практические приложения полученных данных.

PACS: 43.30; 43.80

УДК: 534-143

Ключевые слова: биошумы, раки–щелкуны, акустические импульсы, шельф, гидроакустика.

ВВЕДЕНИЕ

В некоторых шельфовых зонах океана доминирующим источником гидроакустических сигналов являются биошумы. Известно, что наиболее интенсивные биошумы в тропической и субтропической зонах мирового океана имеют характер хаотической последовательности коротких импульсов (щелчков) и генерируются небольшими (несколько сантиметров) роющими раками [1, 2]. Эти донные раки живут либо на поверхности дна, обычно в небольших укрытиях, либо прячутся в норах. В англоязычной литературе указанные животные, относящиеся к одному из трех семейств (*Alpheus*, *Synalpheus*, *Penaeus*), имеют название snapping shrimps, а в русском языке именуется раками–щелкунами. Всего, насчитывается более сотни видов раков–щелкунов, отличающихся как по морфологии, так и по тонким особенностям излучаемых звуков. Уровень единичного щелчка этих животных на расстоянии один метра может превысить несколько тысяч Паскалей.

Биомеханические аспекты излучения этого сигнала исследовались в ряде работ. Некоторое время тому назад было экспериментально показано, что столь мощные звуки возникают за счет образования кавитационного пузырька, возникающего вследствие выстреливания струи воды специализированной клешней этих

животных [3, 4]. Последующее схлопывание пузырька сопровождается резким подъемом температуры (до нескольких тысяч градусов) и даже сонолюминисценцией. Именно в этот момент генерируется мощнейший короткий звуковой сигнал.

Расчет указанного процесса, выполняемый на основе уравнения Релея–Плессета, вполне соответствует эксперименту при условии начальной скорости потока в несколько десятков метров в секунду. При регистрации акустического события непосредственно перед основным импульсом, как правило, возникает меньший по амплитуде и более низкочастотный сигнал, соответствующий моменту выстреливания струи. При этом даже в лабораторных условиях интервал между предшественником и самим импульсом у разных видов, разных особей одного вида, а также для разных ареалов обитания одних и тех же животных может варьировать по крайней мере на порядок. Эти различия определяются скоростью струи и стабильностью образовавшегося пузырька.

Кроме того следует учитывать, что регистрация активности раков щелкунов обычно осуществляется не в строгих лабораторных условиях, а в местах природного обитания этих животных. Совершенно очевидно, что в такой ситуации охарактеризовать форму волны, возникающую в месте регистрации щелчка измерительным гидрофоном, чрезвычайно сложно. Особенности трудности возникают в тех случаях, когда, как это бывает обычно при записи сигналов в тропических ареалах обитания этих животных, щелчки отдельных особей перекрывают друг друга.

*E-mail: nbibikov1@yandex.ru

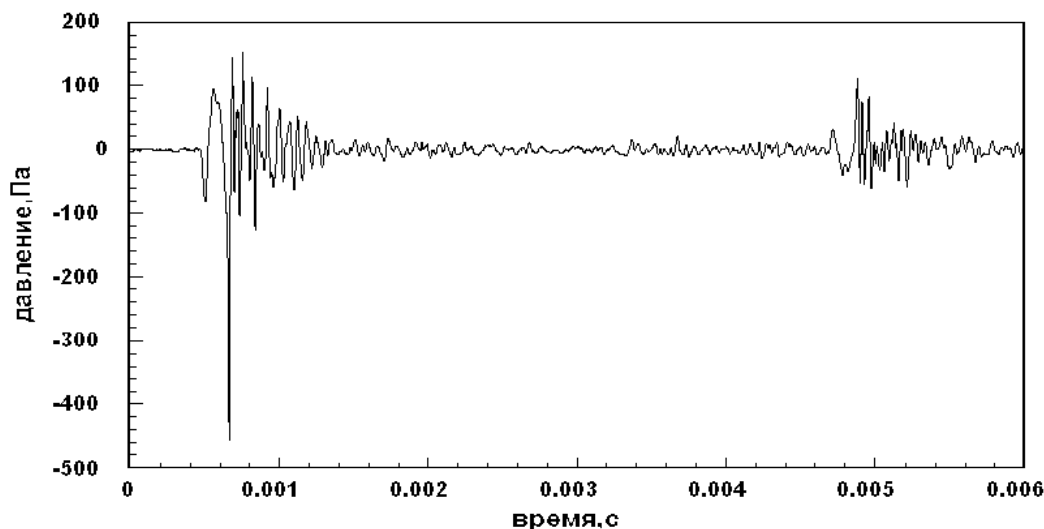


Рис. 1: Пример интенсивного сигнала рака-щелкуна. На оси абсцисс — относительное время в с, на оси ординат — звуковое давление в Па

До последнего времени общепринятым было мнение о распространении раков-щелкунов только в тропических и субтропических зонах с широтами до 40°. Однако, сотрудниками Акустического института еще в конце прошлого столетия было обнаружено присутствие этих животных вне общепризнанного ареала в Дальневосточном регионе России (бухта Славянка, залив Петра Великого) [5, 6]. В последующем они были описаны в теплых водах Гольфстрима на южном побережье Ирландии. Наконец в 2015 и в 2016 гг. звуки раков-щелкунов были зарегистрированы на базе Гидрофизического института Академии наук Абхазии, расположенной на восточном побережье Черного моря [7]. Весьма вероятно, что в течение последних десятилетий в связи с общим потеплением климата эти животные интродуцируются в более умеренные воды северного полушария.

Интересной спецификой этих вновь обнаруженных ареалов обитания рассматриваемых объектов, видимо, является меньшая плотность популяции по сравнению с тропиками. Это позволяет достаточно четко выделить из непрерывного шума некоторые особенно интенсивные щелчки, генерируемые только одним животным или несколькими особями, и рассмотреть особенности единичных сигналов в реальных условиях. Целью настоящей работы является анализ структуры отдельных импульсов и временного распределения наиболее интенсивных щелчков раков-щелкунов, зарегистрированных на шельфе Сухумской бухты.

1. МЕТОДИКА

Регистрация осуществлялась комплексом, включающим гидрофон 8100 с усилителем 2650 (фирма Брюль

и Кьяр), откалиброванный вместе с герметичным кабелем длиной 14 м, аналого-цифровой преобразователь USB-3000 и персональный компьютер. Гидрофон крепился к прямоугольной металлической раме, укрепленной на дне в стационарной точке при средней глубине 8 м, причем гидрофон был расположен примерно в 40 см над поверхностью. Вблизи от места расположения гидрофона имелись бетонные сваи прямоугольного сечения, на которых находилась платформа с экспериментальным оборудованием и исследователями. Расстояние от береговой линии составляло около 30 м.

Обработку записанной на компьютер информации вели по окончании экспериментов с использованием нескольких программ.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В 2016 г. регистрация акустической активности раков щелкунов осуществлялась с 19 по 26 сентября. Непрерывный мониторинг бишумов осуществлялся с частотой дискретизации 10 или 20 кГц. В таком режиме легко было наблюдать отдельные щелчки разной амплитуды и анализировать динамику исследуемого точечного процесса. Мы осуществляли анализ временного распределения отдельных импульсов раков-щелкунов, выделяемых амплитудным дискриминатором на разных уровнях. Отметим, что предложенный нами подход к анализу биоакустической активности раков-щелкунов [5, 6] как точечного временного процесса недавно начал применяться и другими авторами [8].

Наряду с таким мониторингом в течение сравнительно непродолжительных участков времени бишумы

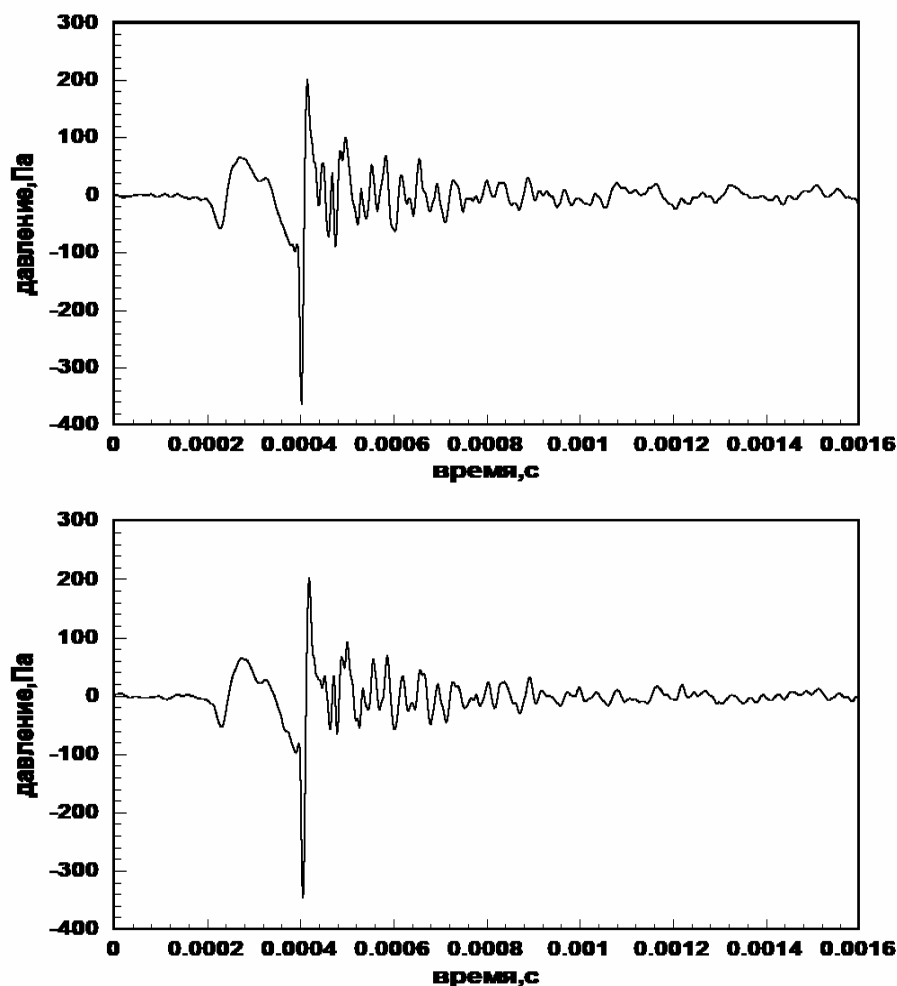


Рис. 2: Два сигнала рака-щелкуна, предположительно излученных одним животным и при одном и том же его расположении. Обозначения, как на рис. 1

регистрировались с частотой дискретизации 500 кГц или даже 1 МГц. Такой режим регистрации позволял без аппаратных искажений анализировать временную форму наиболее мощных щелчков с амплитудой, превышающей сотню паскаль. Обычно такие щелчки возникали с интервалами от одной секунды до нескольких минут.

На рис. 1 представлен типичный пример мощного щелчка, генерированного видимо вблизи регистрирующего гидрофона. Хорошо виден сигнал-предшественник и следующий почти непосредственно вслед за ним основной сигнал с пиковой амплитудой около 500 Па. Временной интервал между положительным и отрицательным экстремумами основного колебания составляет всего 7 мкс. После этого импульса наблюдаются довольно хаотические осцилляции, продолжающиеся около 0.5 мс. Наконец с задержкой, составляющей приблизительно 4.2 мс, регистрируется инвертированный отраженный сигнал.

На рис. 2 показаны два сигнала несколько меньшей амплитуды. Общая структура импульсов совпадает с той, которая иллюстрирована рис. 1, хотя можно отметить несколько больший интервал между предшественником и основным импульсом, а также несколько иную структуру послеразряда. Обращает на себя внимание тот факт, что указанные два сигнала, которые были зарегистрированы с интервалом всего около 1 с (не проиллюстрировано), схожи между собой вплоть до мелких деталей. Можно допустить, что они были произведены одним животным из одной той же точки. В таком случае следует признать, что исследуемый объект способен к весьма частой генерации чрезвычайно интенсивных звуков.

Известно, что сам по себе импульс, излучаемый малым объемом кавитационного пузырька, крайне короток и имеет сферическую направленность. Однако, поскольку он излучается в непосредственной близости от дна, интерференция с разнообразными отражени-

ями обуславливает существенные искажения временного течения принимаемого звука. Если отражение от субстрата приходит раньше, чем заканчивается щелчок, его форма резко искажается. При этом многое зависит от угла, при котором принимается сигнал. Если угол очень небольшой, то отраженный сигнал оказывается противофазным исходному. Это обуславливает наличие хаотических колебаний принимаемого сигнала непосредственно после основного щелчка. Повидимому именно такая ситуация имеет место при наших условиях, когда расстояние приемника от донной поверхности меньше, чем от источника.

Кроме того в месте расположения гидрофона, где реально регистрировались сигналы, дно никак нельзя рассматривать как ровную отражающую поверхность. Грунт исходно является галечным, но покрыт многочисленными раковинами мертвых мидий. Поскольку размеры, как гальки, так и раковин вполне соизмеримы с длиной волны высокочастотных составляющих щелчка, расчет реально регистрируемого сигнала представляется чрезвычайно сложным.

Наряду с указанными, практически всегда присутствующими искажениями самого исходного сигнала, после большинства наиболее интенсивных щелчков часто (хотя и не во всех случаях) наблюдались отдельные задержанные эхосигналы, обычно инвертированные по фазе (рис. 1). Они могли быть обусловлены отражением, как от близлежащих препятствий, так и от поверхности воды. Задержка этих эхосигналов может быть использована как для локализации источника, так и для характеристики отражающих поверхностей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование акустической активности раков-щелкунов в настоящее время интенсивно проводится как в тропических зонах мирового океана, так и в некоторых европейских акваториях. При этом очевидно, что даже качественное рассмотрение особен-

ностей сигналов, регистрируемых в местах обитания раков-щелкунов, представляет несомненный интерес для ряда практических приложений. В частности может быть поставлена задача использования сигналов, имитирующих такие щелчки, для связи в мелководных участках океана. Другие возможные области применения знаний о характеристиках принимаемых стимулов включает освещение подводной обстановки с помощью направленных приемников излучения в пассивном режиме [9]. В Сингапуре разработана реальная система наблюдения, при которой звуки раков-щелкунов используются для звукового «освещения» акватории, позволяя в полностью пассивном режиме обнаруживать, например, подводного пловца с расстояния около 100 м [10]. Отметим, что в исследованной нами акватории условия для подобного использования этих звуков даже более благоприятны, поскольку отдельные весьма мощные щелчки возникают на сравнительно небольшом фоновом уровне. Знания структуры щелчков необходимы и для понимания механизмов маскирующего действия этих сигналов в разнообразных режимах гидролокации. С одной стороны, звуки раков щелкунов являются помехами для эффективного использования подводной связи, и только конкретное знание их характеристик может позволить отстроиться от этих сигналов в гидроакустических каналах передачи информации [11]. С другой стороны, сами эти сигналы или их эффективное моделирование может быть использовано для целей маскировки передаваемых сообщений. Несомненный интерес представляет также наблюдение за активностью раков щелкунов с точки зрения оценки экологии шельфовой зоны, в частности выявления шумового, химического и биологического загрязнений.

Автор благодарит за помощь участников экспедиции Серебряного А. Н., Попова О. Е., Поддубняка В. Я., сотрудников Гидрофизического Института Абхазской Академии наук, а также О. Б. Овчинникова за существенную помощь в работе. Работа поддерживалась грантом РФФИ № 15-52-40012.

-
- [1] Johnson, M. W., Everest, F. A., Young, R. W. Biological Bulletin. 1947. **9**. P. 122.
 [2] McWilliam J. N., Hawkins A. D. J. Exp. Marine Biol. Ecol. 2013. **446**. P. 166.
 [3] Versluis M., Schmitz B., von Heydt A., Lohse D. Science. 2000. **289**. P. 2114.
 [4] Lohse D., Schmitz B., Versluis M. Nature. 2001. **413**. P. 477.
 [5] Бибииков Н. Г., Грубник О. Н. в сб. «Акустический мониторинг сред». М., 1993. P. 83.
 [6] Bibikov N. G. Proceedings of Meetings on Acoustics. — ASA. 2015. **24**, №. 1. P. 1.
 [7] Бибииков Н. Г. Доклады 15-ой школы-семинара акад.

- Л. М. Бреховских. С. 162. М.: ГЕОС, 2016.
 [8] Legg M. W., Duncan A. J., Zaknich A., Greening M. V. Proceedings of OCEANS 2007-Europe, IEEE, Aberdeen, Scotland. 2007. P. 1.
 [9] Olivieri M. P Glegg S. J. Acoust. Soc. Am. 1995. **99**, N 4. pt. 2. P. 2453.
 [10] Kuselah S. A thesis submitted for the degree of master of engineering. Nat. Univ. Singapore. 2011. 62 pp.
 [11] Guimaraes D. A., Chaves L. S., de Souza R. A. Telecommunications Symposium (ITS), 2014 International. IEEE, 2014. P. 1.

Some peculiarities of sounds generated by snapping shrimps in the Black Sea.

N. G. Bibikov

JSC N.N.Andreev Acoustical Institute. Moscow 117036, Russia

E-mail:nbibikov1@yandex.ru

During autumn period of 2015–2016 intensive bionises were recorded in shallow waters of the eastern coast of the Black Sea (Suhum bay) using broadband hydrophone (upper frequency limit — a few hundred kilohertz). When placing a hydrophone in 30–40 cm above the bottom surface at a depth of 5 to 10 m the recorded signal contained high frequency noise generated by snapping shrimps. Along with these background signal we observed relatively rare (usually several times per minute), but very intense (up to a few hundred Pa) clicks. They apparently were radiated by single shrimp localized in the vicinity of the hydrophone. Such conditions are allowed to carry out a time–frequency analysis of the signals in natural conditions of the habitat. It has been shown that they consist of the following sections: a short precursor generated by the water jet emitted during the closing of the claws, a powerful ultrasound pulse arising due to the collapse of a cavitations bubble, and multiple reflections from the surrounding elements of the bottom surface (gravel, empty shells of mussels). The rise time of the main pulse may be 7–10 microseconds with total duration of the signal from 0.1 to 0.4 ms, varying specificity due to reflections. In many cases along with the main pulse the delayed echo from local artificial underwater objects and from the surface also can be observed. The possible practical applications of the data are discussed.

PACS: 43.30; 43.80.

Keywords: biological noises, snapping shrimps, acoustic clicks, sea shelf, hydroacoustic.

Received 23 June 2017.

Сведения об авторе

Бибиков Николай Григорьевич — доктор биол. наук, канд. физ-мат. наук, ст. науч.сотрудник; тел.: (499) 115-76-81, e-mail: nbibikov1@yandex.ru.
