

## НАТУРНЫЕ И МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ РАКОМ-ЩЕЛКУНОМ В Б. ВИТЯЗЬ ЯПОНСКОГО МОРЯ

© 2021 г. **А. Н. Рутенко<sup>а</sup>**, **В. Г. Ущиповский<sup>а</sup>**, **Д. С. Манульчев<sup>а</sup>**, **И. Р. Радаев<sup>а</sup>**, **Д. А. Сизов<sup>а</sup>**, **М. Ю. Фершалов<sup>а, \*</sup>**

<sup>а</sup>Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, ул. Балтийская 43, Владивосток, 690041 Россия

\*e-mail: mfershalov@gmail.com

Поступила в редакцию 24.06.2020 г.

После доработки 08.06.2021 г.

Принята к публикации 03.08.2021 г.

Приводятся результаты натуральных 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 гидрофонов, устанавливаемых в море глубиной 3 м с помощью металлических конструкций – пирамиды и рамы длиной 3 м. Численное моделирование проводилось с помощью лучевого метода мнимых источников и модового параболического уравнения. Результаты моделирования согласуются с натурными измерениями.

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

DOI: 10.31857/S0320791921060083

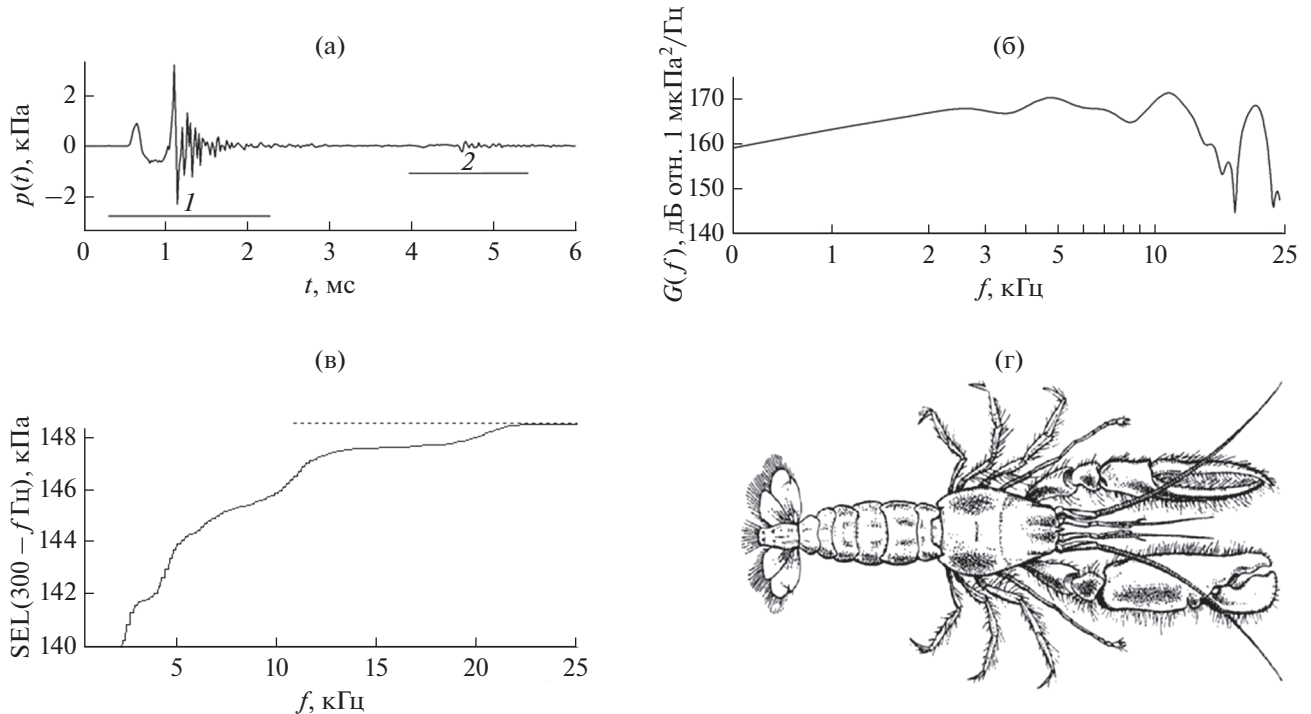
### ВВЕДЕНИЕ

Семейство раков-щелкунов (*Alpheidae*), включающее более 600 видов, относится к отряду ракообразных [1, 2]. Большинство видов раков-щелкунов обитает в тропических и субтропических морях на мелководье, однако некоторые виды живут в прохладных водах. В работах [3–5] представлен анализ акустических сигналов рака-щелкуна, измеренных в Японском море и Черном море на шельфе Абхазии. В работе [6] показано, что спектр отдельного щелчка простирается до 50–70 кГц при пиковой интенсивности, измеренной на расстоянии около 1 м, более 200 Па. Характерной особенностью раков-щелкунов является малоподвижный образ жизни и довольно редкие перемещения, но главным отличием 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 норки и коммуникации [6]. Практически мгновенное закрытие большой клешни вызывает образование мощного щелчка, который сопровождается формированием кавитационного пузыря и испусканием света [7]. За счет замедления границы пузырька, при его разрушении происхо-

дит локализованное увеличение температур до 5000 К, что является эффективным способом генерации ударных волн, способных повредить даже минеральные скелеты других организмов [8]. 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.

Натурные измерения акустических импульсов, генерируемых раком-щелкуном, представленные в работе [9], проведены с помощью 3-х гидрофонов, расположенных вертикально на горизонтах 8, 10 и 40 м. В измеренных сигналах наблюдаются 2 импульсных пика, временной интервал между которыми составляет 0.1 мс. Источником первого малого пика является смыкание верхней и нижней частей клешни, а основной пик соответствует разрушению кавитационного пузыря. Значение доминирующей частоты было зафиксировано ниже 20 кГц. Уровни пиковых значений вариации акустического давления в измеренных импульсах лежали в диапазоне 170–82 дБ отн. 1 мкПа на 1 м.

В работах [10, 11] с помощью высокочастотной аппаратуры в реальной среде были исследованы спектральные характеристики сигналов рака-щелкуна (щелчка), генерируемых при схлопыва-



**Рис. 1.** (а) – Прямой (интервал 1) и отраженный от поверхности моря (интервал 2) акустические импульсы, излученные раком-щелкуном и (б) – спектр “прямого” сигнала. (в) – Зависимость значения уровня  $SEL_{imp}(300 - f_2)$  от верхней частоты интегрирования  $f_2$ . (г) – Рисунок рака-щелкуна *Alpheidae* [1].

нии кавитационного пузырька, и продемонстрировано, что спектр щелчка простирается до 200–500 кГц. Однако преобладающие по амплитуде частотные составляющие сигнала сосредоточены в диапазоне частот 1–25 кГц, пиковые значения спектральной плотности мощности которого на 5–15 дБ превышают значения спектральной плотности в диапазоне 25–500 кГц.

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 можно оценить по разности прихода прямого и отраженного от поверхности моря импульсов, и оно равно примерно 0.7 м. Согласно работам Л.Г. Виноградова [1] источником таких сигналов мог быть рак-щелкун (*Alpheidae*), проживающий в Японском море. На рис. 1а видно, что амплитуда положительной полуволны в измеренном акустическом импульсе достигла примерно 3.2 кПа, что 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.

На рис. 1в показана зависимость уровня значения энергии

$$SEL_{imp}(300 - f_2) = 10 \lg \left( \frac{\Delta t \int_{300 \text{ Гц}}^{f_2} G(f) df}{t_0 p_0^2} \right)$$

акустического импульса, изображенного на рис. 1а, в зависимости от значения верхней частоты  $f_2$  интегрирования оценки спектра  $G(f)$ , показанной на рис. 1б (здесь  $\Delta t = 3$  мс,  $p_0 = 1$  мкПа,  $t_0 = 1$  с). Значения  $SEL$ , рассчитанное во временной области, равно 148.57 дБ и 99% от него составляет 148.53 дБ, что соответствует энергии сигнала в полосе частот 300 Гц–22.6 кГц. Приводимые далее результаты исследований акустических полей, формируемых раками-щелкунами, обитающими в б. Витязь Японского моря, выполнены для диапазона частот 20–24000 Гц.

Подобные акустические сигналы представлены в экспериментальных работах [3–5, 10–13]. В данной работе приводятся результаты специальных пространственных акустических измерений, которые проведены с помощью двух металлических конструкций (показаны на рис. 2 и 3), позволивших установить в море глубиной 3 м четыре однотипных гидрофона внутри тетраэдра, а также в виде горизонтальной и вертикальной эквидистантной антенны с апертурой, равной 240 см.



Рис. 2. Металлическая пирамида с установленными 4-мя измерительными гидрофонами.

Результаты измерений обобщены и расширены с помощью численного моделирования, результаты которого согласуются с натурными данными.

### 1. АППАРАТУРНЫЙ КОМПЛЕКС И ПРОГРАМНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

На рис. 2 показано, как с помощью металлической пирамиды из четырех измерительных гидро-

фонов был сформирован измерительный тетраэдр с ребром равным 1 м. Этот измерительный комплекс устанавливался на дне в море глубиной 3 м, в котором поверхностный прилив достигает 15–20 см.

Четыре гидрофона типа ГИ-50 [15] 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-х 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 *DrawData* (автор В.А. Гриценко) обеспечила синхронную визуализацию измеренных с помощью 4-х 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. Поскольку максимальная частота дискретизации для синхронного ввода в ЭВМ четырех аналоговых акустических сигналов была равна 48 кГц, то во временной области без

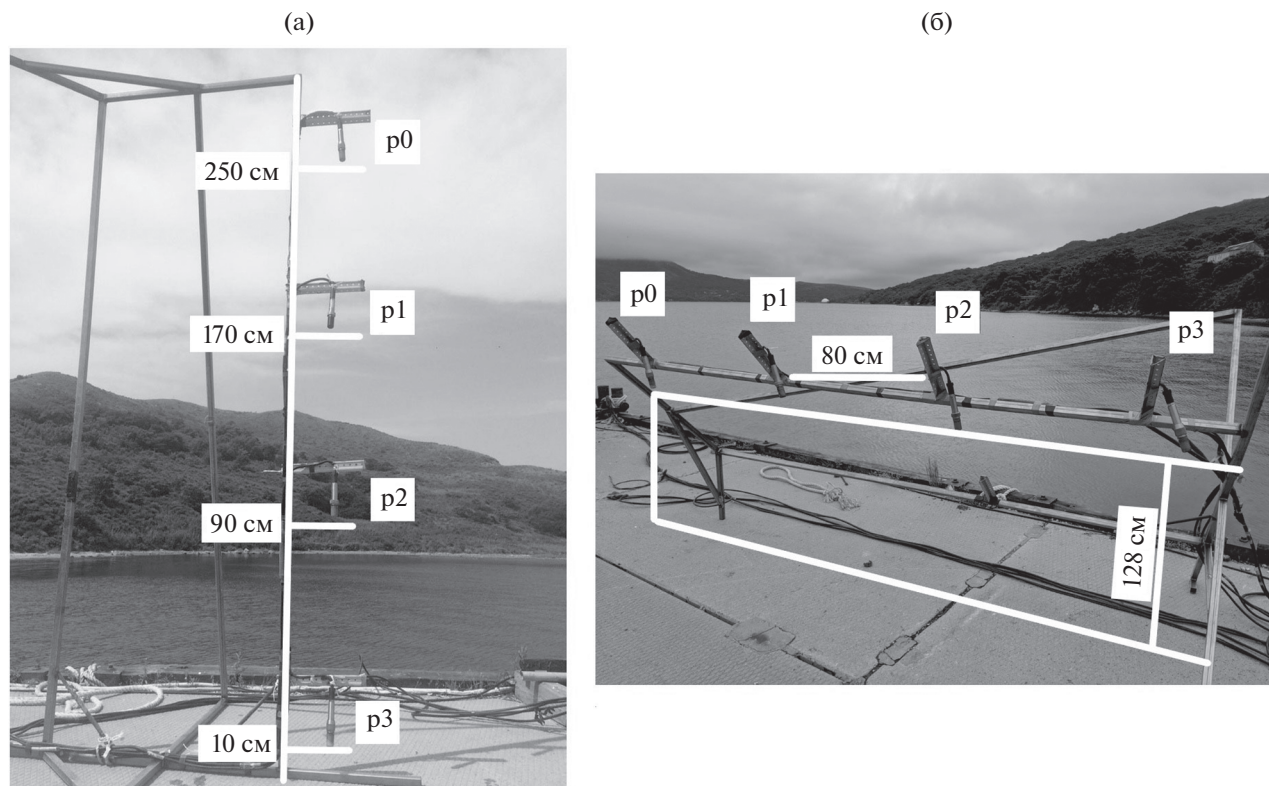


Рис. 3. Металлическая конструкция для проведения синхронных акустических измерений в (а) – вертикальной и (б) – горизонтальной плоскостях с помощью 4 гидрофонов.

частотной коррекции мы можем анализировать вариации акустического давления  $p(t)$ , измеренные в частотном диапазоне 20–24000 Гц, а оценка их спектра  $G(f)$ , после коррекции на сквозную передаточную функцию измерительно-регистрационного тракта, обеспечивает в этом диапазоне погрешность не более 3 дБ. Этот параметр обусловлен метрологической поверкой измерительных гидрофонов типа ГИ-50 во ВНИИФТРИ и результатами предварительной кросс-калибровки четырех измерительных трактов, проведенной в море с помощью широкополосных шумовых сигналов.

Акватория б. Витязь Японского моря, в которой проводились натурные измерения, показана на рис. 2. Глубина моря в точках акустических измерений равна примерно 3 м. Расстояние до уреза воды равно 70 м. Дно сформировано немигрирующим песком, с галькой, ракушками и травяными участками. Уклон дна в радиусе 10 метров от точки акустических измерений не более 0.02.

На рис. 1 приведен график акустического импульса рака-щелкуна, измеренного одним из четырех гидрофонов, установленных в вершинах тетраэдра, показанного на рис. 2. Этот гидрофон был ближе всех к раку, поэтому продемонстрируем оценку расстояния от него до рака, используя временной интервал между пиковым значением в прямом импульсе, отмеченным на рис. 1 интервалом 1, и пиком в отраженном от поверхности моря акустическом импульсе, отмеченным на рис. 1 интервалом 2. Полагаем, что скорость звука в воде была равна 1450 м/с, а временной интервал между прямым и отраженным от поверхности моря импульсами равен 3.5 мс (см. рис. 1). Несложные вычисления показывают, что расстояние между раком-щелкуном и гидрофоном р1 было примерно равно 0.7 м.

Для организации и проведения пространственных измерений акустического поля, формируемого импульсным сигналом рака-щелкуна, была изготовлена специальная металлическая конструкция, которая обеспечивает измерения четырьмя гидрофонами в вертикальной (см. рис. 3а) и в горизонтальной (рис. 3б) плоскостях с апертурой 240 см.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

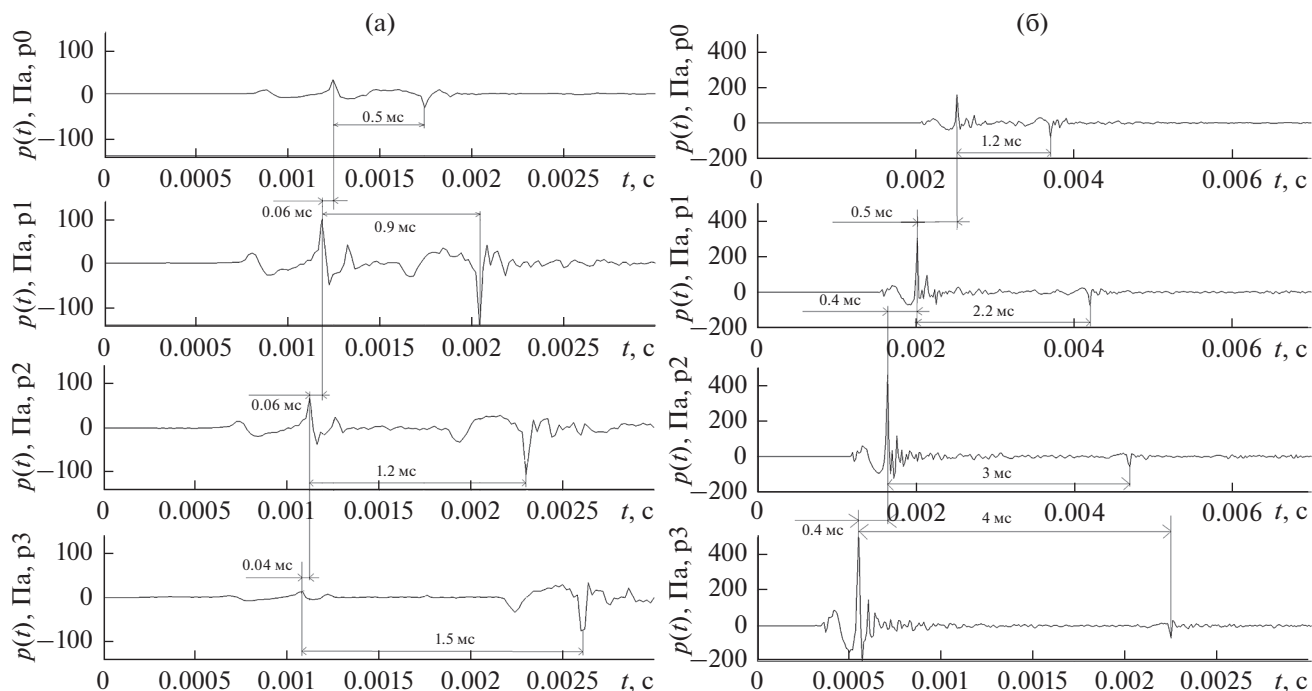
Клешню рака-щелкуна можно представить “точечным” излучателем сферических волн, но из-за близости дна получается вертикальный диполь. Поэтому, согласно работе [13], акустический импульс, формируемый раком-щелкуном, имеет диаграмму направленности. Представленные ниже графики иллюстрируют ее проявление. Согласно рис. 4а максимальные амплитуды вари-

аций  $p(t)$ , соответствующие прямому и отраженному от поверхности моря импульсам, измерены гидрофоном р1 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 р3. На рис. 5 показана геометрическая схема, позволяющая по относительным временным задержкам, представленным на рис. 4а, 4б определить радиус  $r$  окружности с вертикальной антенной в центре, на котором находился рак, излучивший акустический импульс, показанный на рис. 4а и 4б. Расчеты выполнены для однородного водного слоя толщиной 3 м и значением скорости звука в воде  $C_w$ , равным 1450 м/с. В первом случае в 3-х метровом водном слое к вертикальной измерительной цепочке подошел водный импульс с практически вертикальным фронтом, причем его амплитуда минимальна у дна. В импульсах, отраженных от поверхности моря, четко выражена противофаза, но не заметен эффект от диаграммы направленности. Расчеты показали, что рак-щелкун мог находиться на дистанции  $r = 5.6$  м от вертикальной приемной системы (см. рис. 5).

Для импульсов, показанных на рис. 4б, рассчитанное значение  $r = 0.7$  м, и поэтому пиковое значение в прямом импульсе убывает с удалением от дна (это “ближнее” поле), а в импульсе, отраженном от поверхности моря, этот эффект уже практически не выражен, но временной интервал между прямым и отраженным импульсами растет от 1.2 мс на гидрофоне р0, до 4 мс на гидрофоне р3.

Небольшие расхождения между экспериментальными и расчетными значениями временных интервалов, по-видимому, обусловлены влиянием прилива 15–20 см, поверхностным волнением 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.

На рис. 6 показаны прямые и отраженные от поверхности моря акустические импульсы, излученные раком-щелкуном. Рак находился на расстоянии примерно 2 м от горизонтальной конструкции (см. рис. 3б) на траверзе между гидрофонами р2 и р3. Как и ожидалось, в этом случае все прямые и отраженные импульсы подобны, а по временным сдвигам между пиковыми значениями можно определить линию, на которой находится рак, излучивший этот сигнал. Но для определения его положения по отношению к измерительной антенне нужна еще одна точка акустических измерений слева или справа от антенны.



**Рис. 4.** Прямые и отраженные от морской поверхности акустические импульсы рака-щелкуна, измеренные вертикальной цепочкой из 4 гидрофонов (см. рис. 3а). Расстояния от рака щелкуна до цепочки гидрофонов составляли (а) – 5.6 м и (б) – 0.7 м.

### 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ РАКА-ЩЕЛКУНА

Для импульса, показанного на рис. 4а, численное моделирование его распространения удобно провести с помощью лучевого метода мнимых источников [14]. Модельный волновод показан на рис. 7. Он состоит из водного слоя постоянной глубины  $H = 3$  м, лежащего на “жидком” полупространстве, а акустические свойства слагающих его сред можно считать однородными. Полагаем, что источник акустического импульса  $S$  расположен на горизонте 2.99 м. Импульсное акустическое поле формируется сферическими 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. 4а, наименьшие значения амплитуды прямого сигнала измерены нижним гидрофоном р3 возле дна. Здесь следует отметить, что амплитуда акустического импульса, отраженного от поверхности моря, значительно превышает амплитуду “прямого” сигнала, распространяющегося в водном слое. По-видимому, это обусловлено интер-

ференцией прямого импульсного сигнала с сигналом, отраженным от поверхности дна. Покажем это с помощью численного моделирования, проведенного согласно схеме, представленной на рис. 7.

Следуя работе [14], граница “вода–воздух” может считаться абсолютно мягкой, т.е. амплитуда звукового давления на ней равна 0, а коэффициент отражения акустической волны  $V_0$  равен  $-1$ , т.е. фаза колебаний звукового давления отраженной волны изменяется на  $180^\circ$ . Граница “вода–дно” имеет импедансный характер, и коэффициент отражения на ней определяется соотношением скоростей звука  $n = C_0/C_1$ , где  $C_0$  – скорость звука в воде, а  $C_1$  – скорость продольных волн в грунте, и соотношением плотностей  $m = \frac{\rho_1}{\rho_0}$  воды  $\rho_0$  и грунта  $\rho_1$ , а также углом падения волны на границу раздела  $\theta$ :

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

При углах падения волны на границу больших, чем критическое значение  $\theta_{cr} = \arcsin(C_0/C_1)$ , коэффициент отражения становится комплексным. По модулю он равен 1, что соответствует полному отражению, но при этом фаза отраженного сигнала плавно изменяется от  $0^\circ$  до  $-180^\circ$  с увеличе-

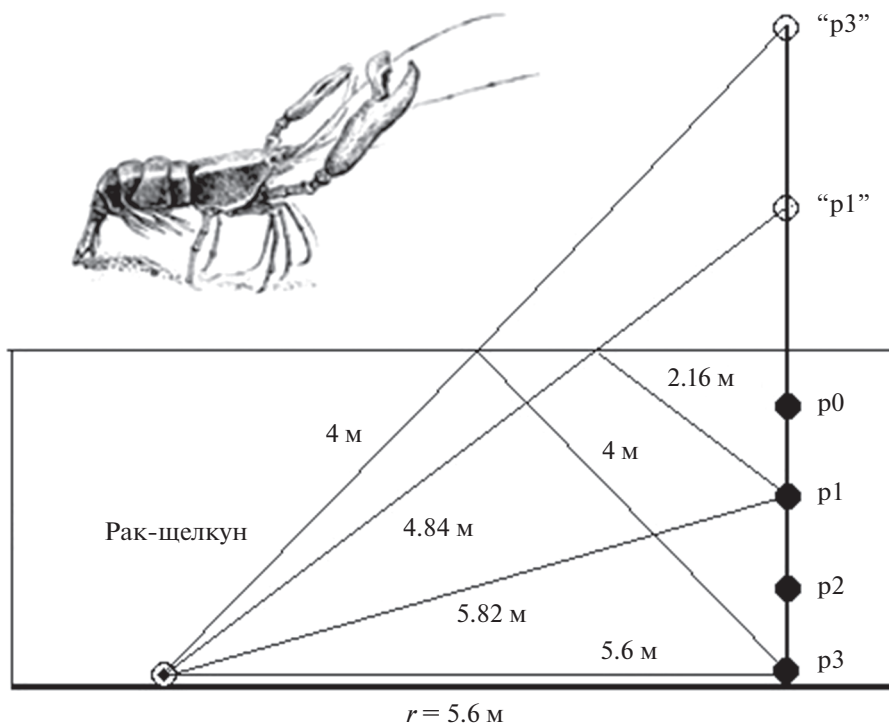


Рис. 5. Геометрическая схема для оценки радиуса  $r$ , на котором мог находиться рак-щелкун, излучивший акустический импульс, показанный на рис. 4а.

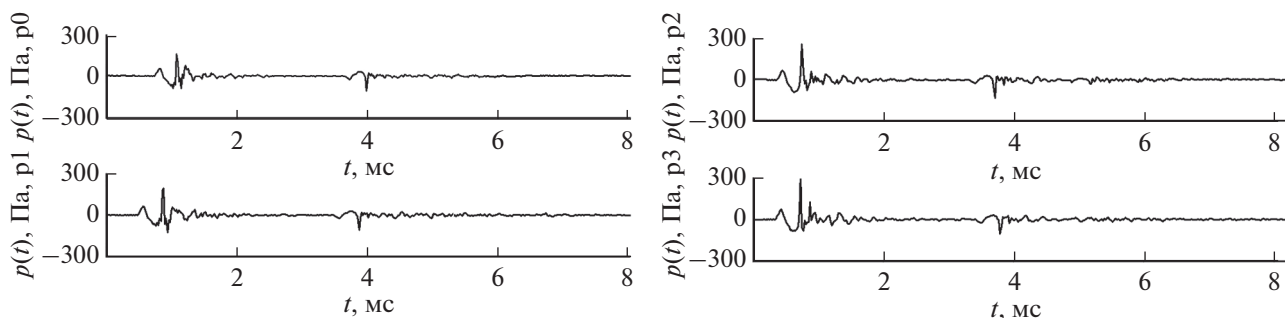


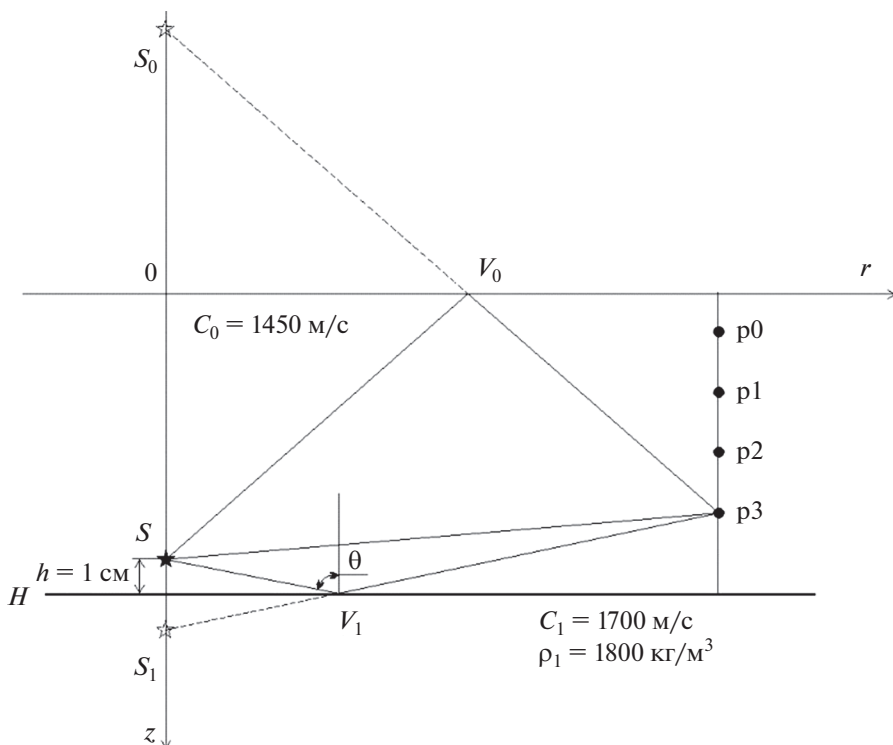
Рис. 6. Прямые и отраженные от морской поверхности акустические импульсы рака-щелкуна, измеренные 4-мя гидрофонами в горизонтальной плоскости (см. рис. 5б), излученные под небольшим углом к дну.

нием угла падения, и существует диапазон углов падения, при которых падающий сигнал отражается практически в противофазе. В нашем случае угол полного отражения  $\theta_{cr} = 58.5^\circ$ .

Для того чтобы провести численное моделирование, с помощью специальной программы по результатам измерений, представленным на рис. 4а, была построена эквивалентная раку точечная функция источника. Для этой функции были проведены расчеты формируемого в данном волноводе акустического поля и вариаций  $p(t)$  в точках расположения измерительных гидрофонов  $p_0, \dots, p_3$ , которые показаны на рис. 8.

Из сравнения графиков  $p(t)$ , представленных на рис. 4а и рис. 8, видно, что для небольших расстояний с двумя отражениями от границ результаты моделирования во временной области хорошо согласуются с натурными измерениями.

Таким образом, “прямой” импульсный сигнал, энергия которого переносится акустическими волнами в водном слое, первым достигает вертикальной приемной антенны. Однако он интерферирует с сигналом, отраженным от дна, для которого при угле полного отражения (в нашем волноводе он равен  $58.5^\circ$ ) коэффициент отражения  $V_1 = 1$ , причем, для больших углов отражения фаза сигнала начинает плавно изменяться от  $0^\circ$  до  $-180^\circ$  и поэтому при интерференции прямого им-



**Рис. 7.** Схема, иллюстрирующая метод мнимых источников.  $V_0$  – коэффициент отражения на границе воздух–вода.  $V_1$  – коэффициент отражения на границе вода–дно.  $H$  – глубина водного слоя.  $S$  – действительный источник,  $S_0, S_1$  – мнимые источники.

пульса с отраженным от дна их амплитуды вычитаются. Это объясняет, почему у дна на нижнем гидрофоне  $p_3$  амплитуда прямого сигнала меньше, чем на других горизонтах. Энергия импульса, отраженного от поверхности моря, из-за значительного запаздывания не интерферирует с прямым и отраженным от дна импульсами, поэтому она и может превышать энергию прямого сигнала (см. графики для  $p_2$  и  $p_3$  на рис. 8 и рис. 4а).

Поскольку импульсный акустический сигнал при распространении существенно трансформируется во временной области, то представляется разумным моделировать распространение переносимой им интегральной энергии. В этом случае по результатам моделирования импульсного поля по экспериментальным и модельным значениям акустического давления  $p(t)$  на временном интервале  $\Delta t$ , охватывающем все вариации  $p(t)$  рассматриваемого импульса, рассчитываются значения уровня

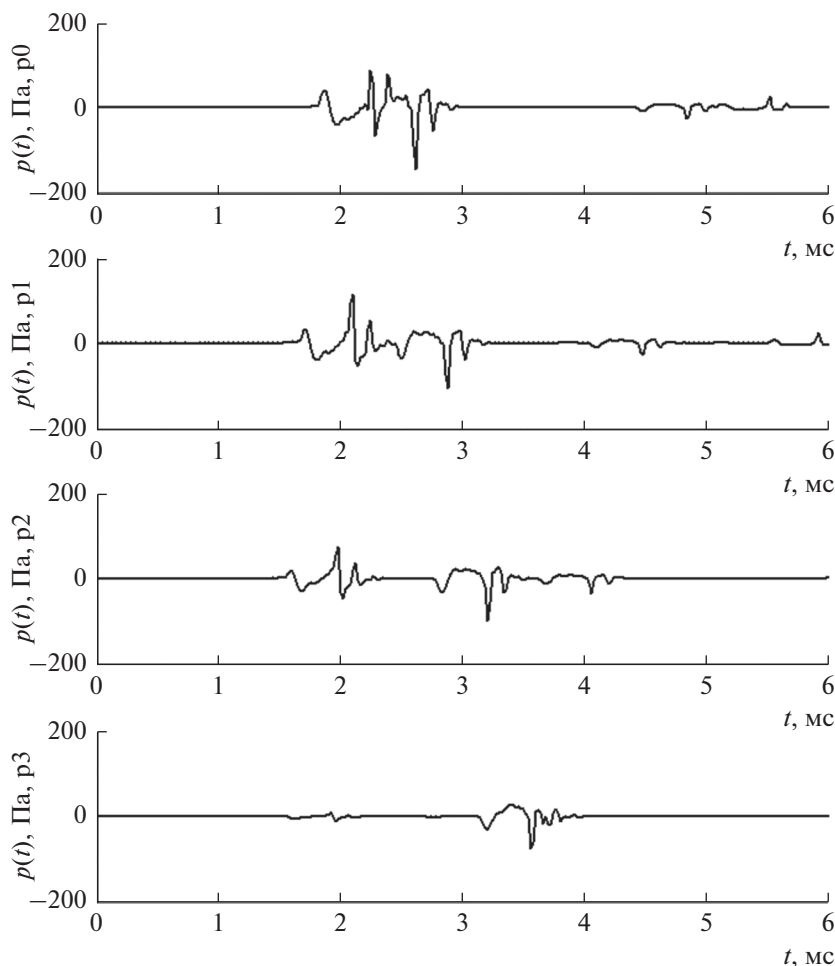
$$SEL_{\text{imp}}(x, z) = 10 \lg \left( \frac{\int_{t_1}^{t_2} p^2(x, z, t) dt}{t_0 p_0^2} \right),$$

где  $\Delta t = t_2 - t_1 = 6$  мс,  $p_0 = 1$  мкПа,  $t_0 = 1$  с.

На рис. 9 показано распределение значений уровня энергии импульсного акустического поля  $SEL_{\text{imp}}(x, z)$  в вертикальной плоскости.

В табл. 1 для сравнения представлены экспериментальные и модельные значения  $SEL$ , рассчитанные по временным рядам длительностью  $\Delta t = 6$  мс, представленным на рис. 4а и рис. 8. В табл. 1 видно согласие модельных значений с результатами натурных измерений. Можно отметить, что у поверхности моря в точке  $p_0$  экспериментальное значение на 2.6 дБ меньше теоретического. По-видимому, это вызвано дневным прогревом приповерхностного слоя воды и рассеянием на поверхностных волнах, не учтенных в модели.

Рассмотрим возможности моделирования формируемого импульсом акустического поля в более сложных трехмерных и протяженных волноводах с помощью модового параболического уравнения (МПУ) [16–19]. Для расчетов с помощью МПУ импульсных акустических полей, формируемых в 3D-модельных геоакустических волноводах известным источником, разработана методика построения эквивалентной точечной функции данного источника, основанная на натурных измерениях в опорной точке [18, 19]. В данном случае это прямой акустический сигнал, измеренный гидрофоном  $p_1$  и показанный на рис. 4а. Подобно лучевому методу мнимых источников будем моделировать распространение энергии, генерируемой эквивалентным раку точечным импульсным источником. В этом случае



**Рис. 8.** Модельные значения акустического давления в точках натуральных измерений, рассчитанные методом мнимых источников (см. рис. 7) для импульса, генерируемого раком-шелкуном в натуральных условиях (см. рис. 4а).

значение уровня энергии в акустическом импульсе можно оценить по формуле:

$$SEL_{imp}(\Delta f, x, y, z) = 10 \lg \left( \frac{\Delta t \int_{f_1}^{f_2} G(f, x, y, z) df}{t_0 p_0^2} \right),$$

где  $\Delta f = f_2 - f_1$ ,  $f_1 = 300$  Гц,  $f_2 = 24000$  Гц,  $\Delta t = 3$  мс,  $p_0 = 1$  мкПа,  $t_0 = 1$  с;  $\Delta t$  – временной интервал, на котором с помощью БПФ рассчитаны значения периодограммы  $G(f)$ , примерно равный

длительности акустического импульса, генерируемого раком-шелкуном.

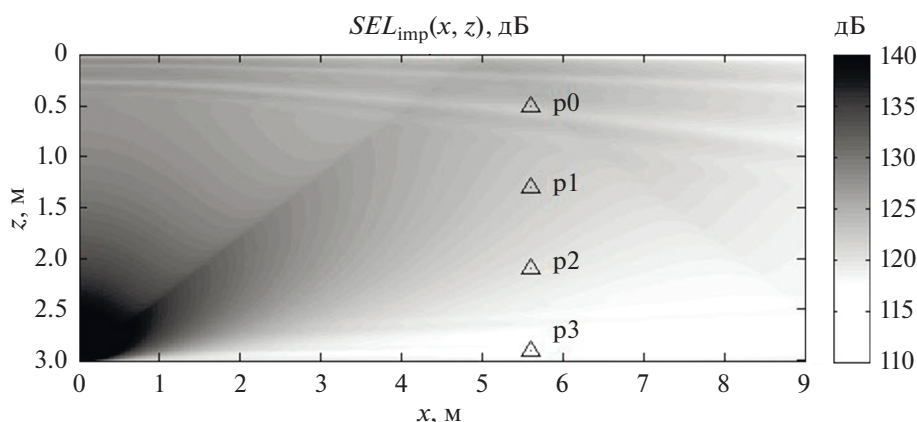
Рассмотрим особенности распространения энергии акустического импульса, показанного на рис. 1, и пространственное распределение значений  $SEL_{imp}(\Delta f, x, y, z)$ , формируемых им в водном слое и в дне акустических полей. Моделирование проведем с помощью МПУ [16, 17] в приближении первых 18 акустических нормальных адиабатических мод в вертикальной плоскости и узкоугольного параболического уравнения в горизонтальной плоскости. Физико-акустические параметры неоднородного геоакустического волновода представлены в табл. 2, а параметры вычислительной сетки приведены в табл. 3.

На рис. 10 видно хорошее озвучивание водного слоя на дистанциях до 100 м с перепадом глубины от 3 до 15 метров. По-видимому, формируемое на шельфе раком-шелкуном акустическое поле может быть использовано при решении практических задач, например, оценки акустических параметров пород, слагающих поверхностный слой дна, для обнаружения подводных объектов и т.п.

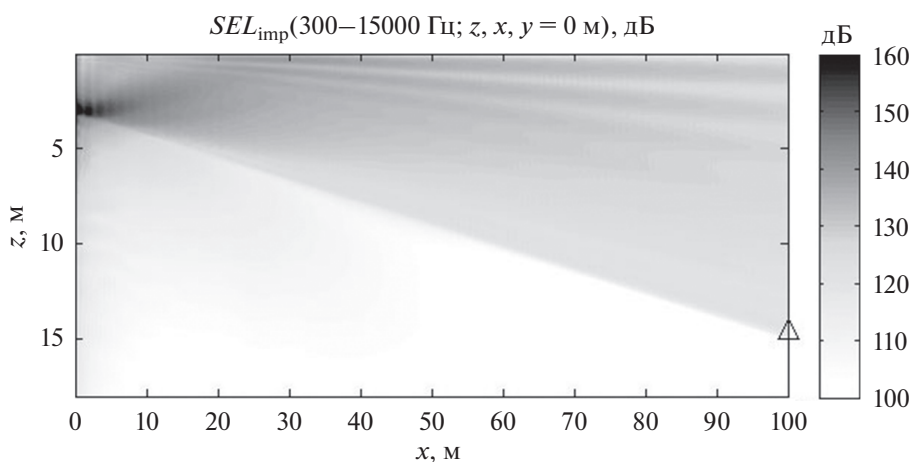
**Таблица 1.** Значения  $SEL$ , рассчитанные по временным рядам  $\Delta t = 6$  мс, представленным на рис. 8 и рис. 4а

Точки	$SEL$ , дБ, эксперимент	$SEL$ , дБ, модель
p0	119.5	122.1
p1	121.1	122.0
p2	119	119.8
p3	116.9	115.5





**Рис. 9.** Поле значений уровня энергии  $SEL_{imp}(x, z)$  распространяющегося акустического импульса, иллюстрирующее интерференцию прямых водных лучей с отраженными от дна и поверхности моря. Эквивалентный раку точечный источник расположен в точке  $x = 0$  м,  $z = 2.99$  м. Угол между осью  $z$  и проявляющейся линией соответствует критическому углу падения  $\theta_{cr} = 58.5^\circ$ .



**Рис. 10.** Пространственное распределение значений  $SEL_{imp}$  в плоскости  $XZ$ , рассчитанное для первых 18-ти распространяющихся мод. Расчет импульса проводился в частотном диапазоне 300–15000 Гц.

Таким образом, при расчетах акустического поля, формируемого излучаемым раком-щелкуном акустическим импульсом, в прибрежных волноводах протяженностью несколько десятков метров удобнее пользоваться лучевым методом, основанным на мнимых источниках, соответствующих отражениям от дна и поверхности моря. Но при более протяженных волноводах число отражений возрастает, а главное, начинается влияние неоднородного профиля дна и акустических неоднородностей в водном слое, формируемых, например, внутренними волнами, и в этом случае расчеты лучше проводить с помощью МПУ.

#### 4. 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 три акустических им-

пульса, следующих с периодом 0.42 с. На рис. 11а, 11б 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. 11б, 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  $\Delta t = 0.42$  с? На рис. 12 видно, что эти тройки могут

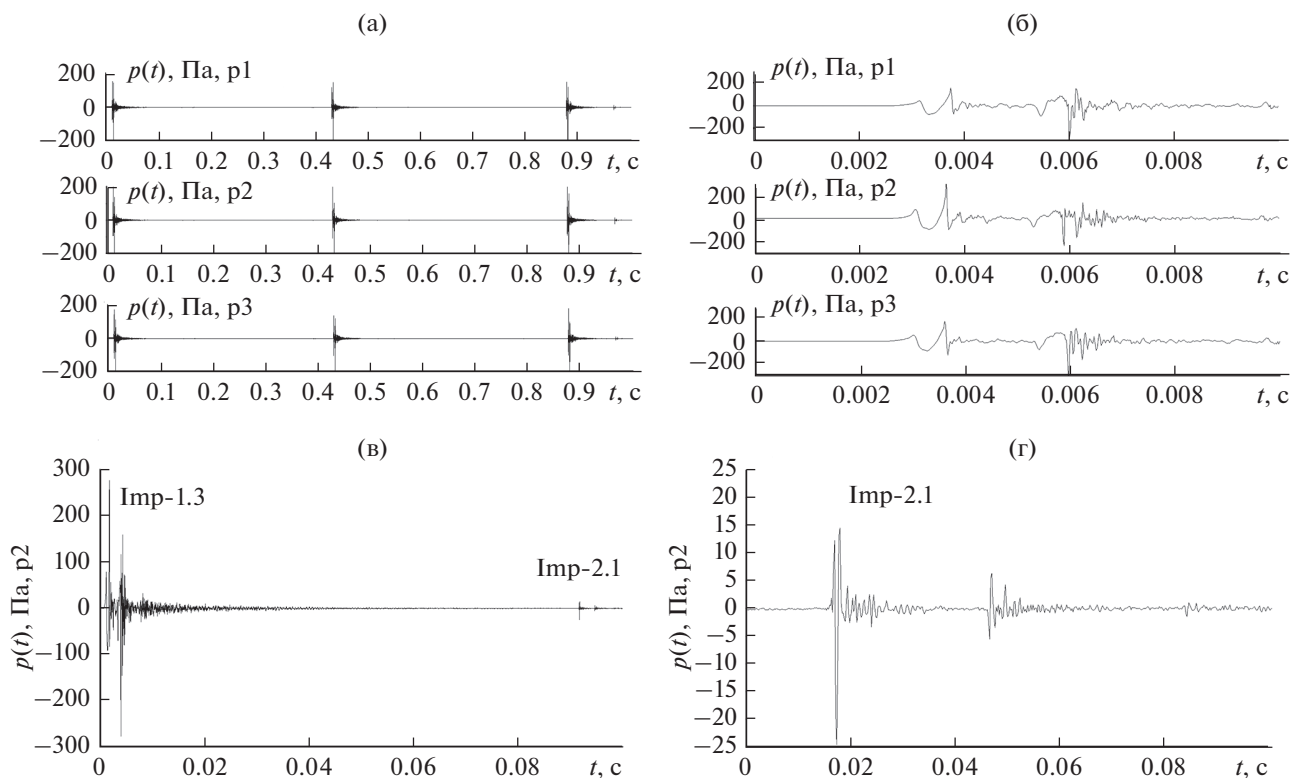
**Таблица 2.** Физико-акустические параметры дна:  $C_p$  – скорость продольной волны,  $\alpha_p$  – коэффициент затухания продольной волны,  $\rho$  – плотность осадочного слоя

$z$ , м	$C_p$ , м/с	$\alpha_p$ , дБ/λ	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
0	1500	0.25	1300
50	1700	0.1	1500

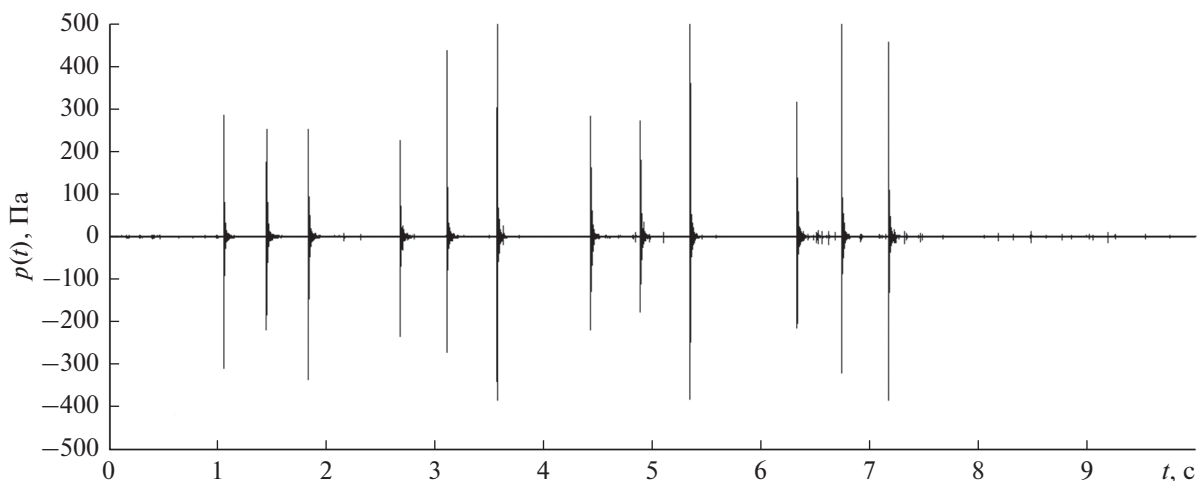
**Таблица 3.** Параметры вычислительной сетки.

Шаг вычислительной сетки	$\Delta x = 0.05$ м, $\Delta y = 0.1$ м, $\Delta z = 0.01$ м
Глубина волновода	50 м
Тип дна	“Жидкое”
Горизонт источника	2.95 м

быть объединены в посылку из 12 импульсов, причем временной интервал между тройками  $\Delta T \approx 1$  с. Вряд ли он связан с эхолокацией, как мы это видели у белого кита – белухи [20]. Тогда остается предположить, что это коммуникационные сигналы между разными раками-щелкунами. На рис. 11а, 11в видно, что после третьего импуль-



**Рис. 11.** (а) – Три акустических импульса, измеренные 3-мя гидрофонами, расположенными в основании тетраэдра и (б) – первый импульс, показанный более подробно, (в) – последний импульс и импульс другого рака-щелкуна, (г) – импульс другого рака, показанный более подробно.



**Рис. 12.** Пример групповой посылки рака-щелкуна, состоящей из четырех троек.

са первого рака-щелкуна гидрофоны записали импульс от другого рака-щелкуна. Этот сигнал показан более подробно на рис. 11г.

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 импульсов. Поскольку раки ведут малоподвижный образ жизни, то формируемые ими на шельфе акустические поля могут быть применены при решении практических задач на шельфе, 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. 11 и 12), например, с помощью излучения пачек импульсов, возбуждающих у раков ответную реакцию.

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

Работа выполнена в рамках темы госзадания ТОИ ДВО РАН “Изучение фундаментальных основ возникновения, развития, трансформации и взаимодействия гидроакустических, гидрофизических и геофизических полей Мирового океана” (0211-2021-0001).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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.
2. *Kaji T., Anker A., Wirkner C.S., Palmer A.R.* Parallel saltational evolution of ultrafast movements in snapping shrimp claws // *Current Biology*. 2018. V. 28. P. 106–113.
3. *Бибиков Н.Г., Грубник О.Н.* Мониторинг звуков, создаваемых раками-щелкунами на мелководье Дальнего Востока // Сб. “Акустический мониторинг сред” М.: АКИН, 1993. С. 83–84.
4. *Бибиков Н.Г.* Биозвук шельфа южных морских рубежей России и Абхазии // Докл. XV школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских / Акустика океана. М.: ГЕОС, 2016. С. 162–165.
5. *Бибиков Н.Г., Макушевич И.В.* Статистические характеристики высокочастотных биозвуков шельфовой зоны Черного моря // Докл. XVI школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских / Акустика океана. М.: ГЕОС, 2018. С. 169–172.
6. *Hess D., Brücker C., Hegner F., Balmert A., Bleckmann H.* Vortex formation with a snapping shrimp claw // *PLOS*. 2013. V. 8. № 11. P. e77120. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0077120>
7. *Tang X., Staack D.* 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> (дата обращения 09.08.2021 г.)
8. *Alam P., Sanka I., Alam L.P., Wijaya S., Sintya E., Handayani N.S.N., Rivero-Müller A.* The snapping shrimp dactyl plunger: a thermomechanical damage-tolerant sandwich composite // *Zoology*. 2018. V. 126. P. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.zool.2017.11.001>
9. *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. Appl. Phys.* 2011. V. 50. P. 07HG04. <https://doi.org/10.1143/JJAP.50.07HG04>
10. *Au W.W.L., Banks K.* The acoustics of snapping shrimp *Synalpheus parneomeris* in Kaneohe Bay // *J. Acoust. Soc. Am.* 1998. V. 103. № 1. P. 41–47.
11. *Bibikov N., Ovchinnikov O., Ivanov M., Serebryany A.* Snapping shrimps sounds in the Black Sea // *Proc. 23rd Int. Congress on Acoustics*. 9–13 Sept. 2019. Aachen, Germany. 2019. P. 4459–4464.
12. *Versluis M., Schmitz B., von der Heydt A., Lohse D.* How snapping shrimp snap: Through cavitating bubbles // *Science*. 2000. V. 289. P. 2114–2117.
13. *Chitre M., Koay Teong-Beng, Potter J.R.* Origins of directionality in snapping shrimp sounds and its potential applications // *OCEANS Proceedings*. 2003. V. 2. P. 889–896. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2003.178442>
14. *Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П.* Теоретические основы акустики океана. М.: Наука, 2007. 370 с.
15. *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.
16. *Petrov P.S., Trofimov M.Yu., Zakharenko A.D.* Mode parabolic equations for the modeling of three-dimensional sound propagation effects in shallow water // *Proc. the 11<sup>th</sup> European Conference on Underwater Acoustics*. 2–6 th July, Edinburgh, GB. 2012. P. 53–60.
17. *Trofimov M.Y., Kozitskiy S.B., Zakharenko A.D.* A mode parabolic equation method in the case of the resonant mode interaction // *Wave Motion*. 2015. V. 58. P. 42–52.
18. *Рутенко А.Н.* Метод модового параболического уравнения для 3-D моделирования импульсного акустического поля, формируемого на шельфе сейсморазведочным сигналом // Докл. XVI школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских “Акустика океана”. М.: ГЕОС, 2018. С. 148–151.
19. *Манульчев Д.С.* Построение функции источника для 3-D моделирования импульсного акустического поля, формируемого на шельфе излучающим комплексом сейсморазведочного судна // Доклады XV школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских “Акустика океана”. М.: ГЕОС, 2016. С. 72–75.
20. *Рутенко А.Н., Вишняков А.А.* Временные последовательности гидроакустических сигналов, генерируемых белой при поиске и лоцировании подводных объектов // *Акуст. журн.* 2006. Т. 52. № 3. С. 375–384.