

---

**КРАТКИЕ  
СООБЩЕНИЯ**


---

УДК 551.46

**О НЕКОТОРЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ  
ВЗРЫВНОГО СИГНАЛА**

© 1994 г. Р. А. Вадов

Акустический институт им. Н.Н. Андреева РАН

117036 Москва, ул. Шверника, 4

Поступила в редакцию 30.11.93 г.

Приводятся результаты исследований спектральных, энергетических характеристик и временной структуры взрывных сигналов, принятых в условиях однолучевого распространения на расстоянии 1 - 10 км и более от источника, когда нелинейными процессами можно пренебречь.

Взрывные источники звука нашли широкое применение при исследовании дальнего распространения звука в океане, особенностей формирования звуковых полей в сложных гидрологических условиях.

Основные преимущества взрывных источников перед источниками других типов в простоте обращения с ними, в их высокой эффективности, широкополосности.

Для оценки излучаемой при взрыве акустической энергии, спектральных характеристик сигнала исследователи обычно пользуются соотношениями, полученными несколько десятилетий тому назад Коулом [1], Аронсом [2, 3], Вестоном [4]. Действительно основные систематические измерения характеристик взрывного сигнала были выполнены в 40-х годах. Измерения проводились на близких расстояниях от источника при сравнительно небольшом его заглублении. Более поздние измерения носили эпизодический характер, их результаты, как правило, сопоставлялись с полученными ранее, отмечалось их определенное взаимное согласие. Измерения были направлены на уточнение временной структуры сигнала, формы ударной волны, первой, второй пульсаций пузыря. Подбирались аналитические выражения для кусочно-непрерывного описания формы взрывного сигнала. На основании такого описания проводились оценки спектра сигнала [5], его составных частей [4] (ударной волны, первой и второй пульсаций газового пузыря).

Все основные характеристики взрывного сигнала изучались в области действия нелинейных процессов, при пиковых значениях давления в ударной волне значительно превышающих одну атмосферу. Вместе с тем в акустике океана измерения со взрывными сигналами, как правило, проводятся на достаточном удалении от источника при пиковом давлении в ударной волне, не превышающем 0.1 - 0.5 атмосферы, т.е. в той облас-

ти давлений, где нелинейными процессами можно пренебречь. Таким образом, исследования характеристик взрывных сигналов, используемых в акустике океана могут быть ограничены областью линейных их изменений, а для описания взрывных сигналов достаточно использовать их эффективные характеристики, приведенные с достаточно больших дистанций к единичному расстоянию по линейным законам акустики.

В последнее десятилетие заметное развитие получила регистрирующая и измерительная аппаратура. Создание совершенной спектральной аппаратуры на базе спецпроцессоров быстрого преобразования Фурье (БПФ) позволило в реальном масштабе времени проводить анализ акустических сигналов с большим разрешением по частоте. Отпала необходимость аналитического описания формы взрывного сигнала для изучения его спектра.

В Акустическом институте с целью исследования характеристик взрывного сигнала анализировались результаты опытов по дальнему распространению, а также материалы специально поставленных опытов, обеспечивающих отдельный прием сигналов (прямых и отраженных от границ раздела) на расстоянии от источника 1 - 10 км. Опыты, как правило, проводились с зарядами взрывного вещества (ВВ) весом 400 г.

Основные результаты проведенного анализа сводятся к следующему.

**Временная структура взрывного сигнала.** В опытах по дальнему распространению взрывных сигналов обычно наблюдались лишь ударная волна и первая пульсация пузыря (рис. 1а). В опытах, где прием осуществлялся на расстоянии до 3 - 10 км от источника наблюдались ударная волна и до 4 - 5 пульсаций газового пузыря (рис. 1б).

Отношения периодов первой, второй и третьей пульсаций пузыря оставались постоянными, не зависящими от веса заряда и глубины подрыва

$$T_1 : T_2 : T_3 = 1 : 0.76 : 0.55.$$

Отклонения не превышали 5 - 10%. Это соотношение достаточно хорошо согласуется с предложенным ранее Аронсом [2]. Экспериментальные данные по зависимости периода первой пульсации пу-

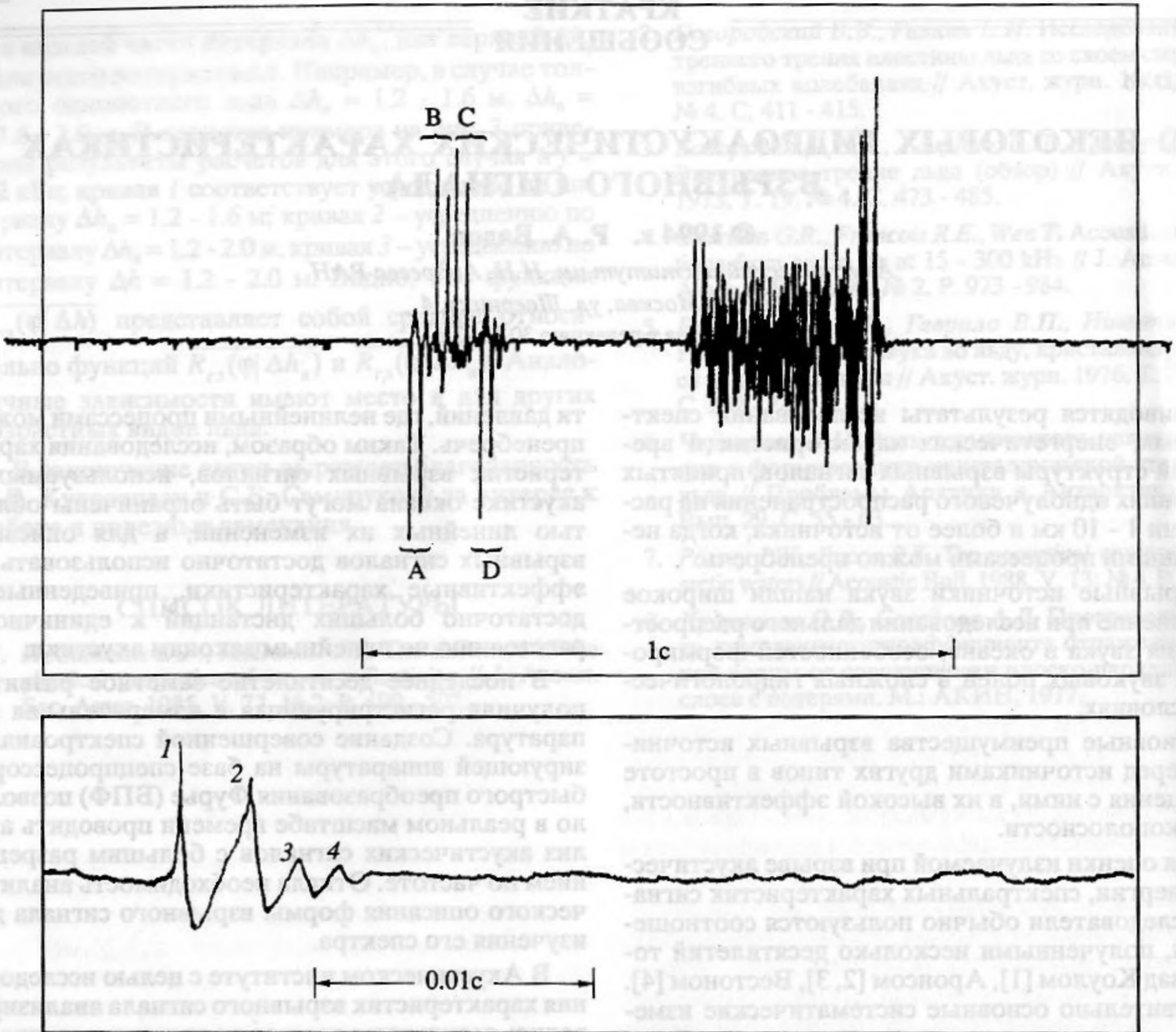


Рис. 1. Форма взрывного сигнала: а – принятого с дистанции 60 км, Тихий океан, подводный звуковой канал. А, В, С, D – разделяющиеся во времени сигналы, пришедшие в точку приема по различным лучам; б – принятого с дистанции около 2 км от источника, глубина подрыва 1500 м: 1 – импульс ударной волны; 2, 3, 4 – импульсы первой, второй, третьей пульсаций газового пузыря.

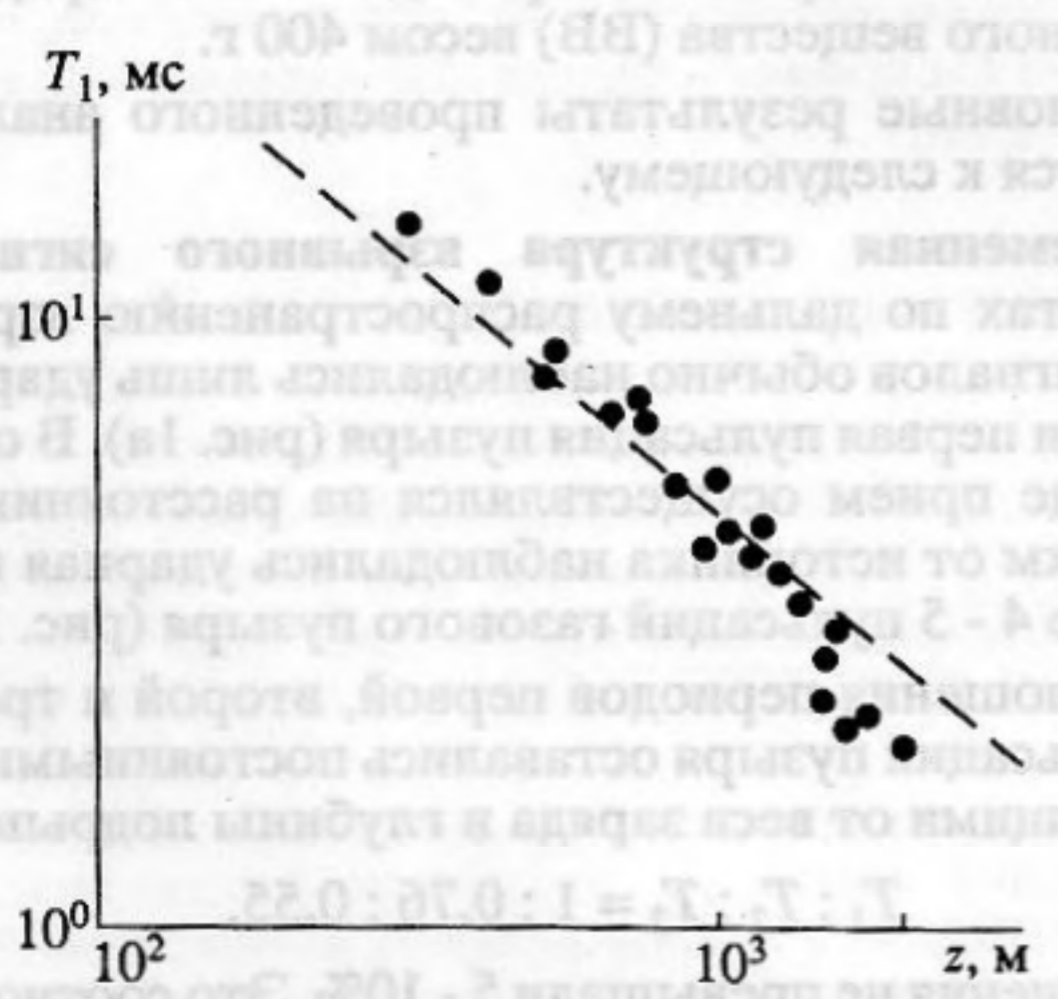


Рис. 2. Зависимость периода первой пульсации газового пузыря от глубины подрыва заряда ВВ (вес 400 г): данные работы [1].

звук от глубины подрыва (для зарядов ВВ весом 400 г) представлены на рис. 2. Глубина подрыва менялась в опытах от 300 до 2000 м. При этом период пульсации изменялся по закону  $T \sim 1/z^{1.1}$  более сильному, чем был предложен Аронсом.

**Спектральные характеристики взрывного сигнала.** Для спектра взрывного сигнала характерна сильная интерференционная его изрезанность (рис. 3). Положение первого максимума на шкале частот ( $f_0$ ), а также расстояние между соседними минимумами в спектре ( $\Delta f$ ) связаны с периодом первой пульсации пузыря ( $T_1$ ) соотношением:

$$f_0 \cdot T_1 = \Delta f \cdot T_1 = 1.$$

Четкая периодичность интерференционных минимумов наблюдается до 3 - 5 кГц. На более высоких частотах она пропадает. По-видимому, на частотах до 3 - 5 кГц спектральные составляющие ударной волны и первой пульсации пузыря

сопоставимы, на частотах выше 3 - 5 кГц основной энергонесущей частью взрывного сигнала остается ударная волна. В спектрах сигналов отмечается дополнительный слабовыраженный минимум, расположенный на втором интерференционном максимуме ( $\nabla$  на рис. 3). Местоположение этого минимума хорошо согласуется с периодом второй пульсации пузыря ( $T_2$ ). Поскольку вторая пульсация значительно слабее первой, глубина интерференционного провала (единственного для этой пары импульсов) незначительна.

Спад спектральной плотности энергии взрывного сигнала с частотой (по огибающей — без учета интерференционной структуры) происходит по закону близкому к  $1/f$  на частотах до 1 кГц и близкому к  $1/f^{2.5}$  на частотах выше 1 кГц.

Оценена повторяемость спектральных характеристик взрывных сигналов. Для этого на одном и том же расстоянии от точки приема в течение нескольких минут на одной и той же глубине было подорвано шесть одинаковых зарядов. Спектры принятых сигналов достаточно хорошо совпали вплоть до 3 - 4 кГц. Для частотных полос, ограниченных соседними интерференционными минимумами (в пределах диапазона 0 - 4 кГц), были оценены уровни энергии, излученной каждым из шести зарядов. Среднеквадратичный разброс этих уровней по шести зарядам для различных частот находился в пределах 0.2 - 0.9 дБ.

**Энергетические характеристики взрывных сигналов.** На фоне интерференционной изрезанности спектров взрывных сигналов наблюдается монотонное изменение спектральной плотности с частотой. При повышении частоты с 200 до 1000 Гц это уменьшение составило 10 - 12 дБ.

Оценено уменьшение приведенного к расстоянию 1 м (по сферическому закону) уровня взрывного сигнала на частоте первого интерференционного максимума спектральной характеристики ( $f_0$ ) при заглублении источника с 1000 до 2000 м. Это уменьшение составило 7 - 8 дБ. Учитывая, что период пульсации изменился при этом в 3 раза (при соответствующем изменении  $f_0$ ), уменьшение уровня на 4 - 5 дБ можно объяснить за счет монотонного снижения спектрального уровня с частотой. Дополнительное изменение на 2 - 4 дБ следует отнести на счет изменения глубины подрыва с 1000 до 2000 м. С увеличением глубины подрыва общий уровень акустического излучения падает.

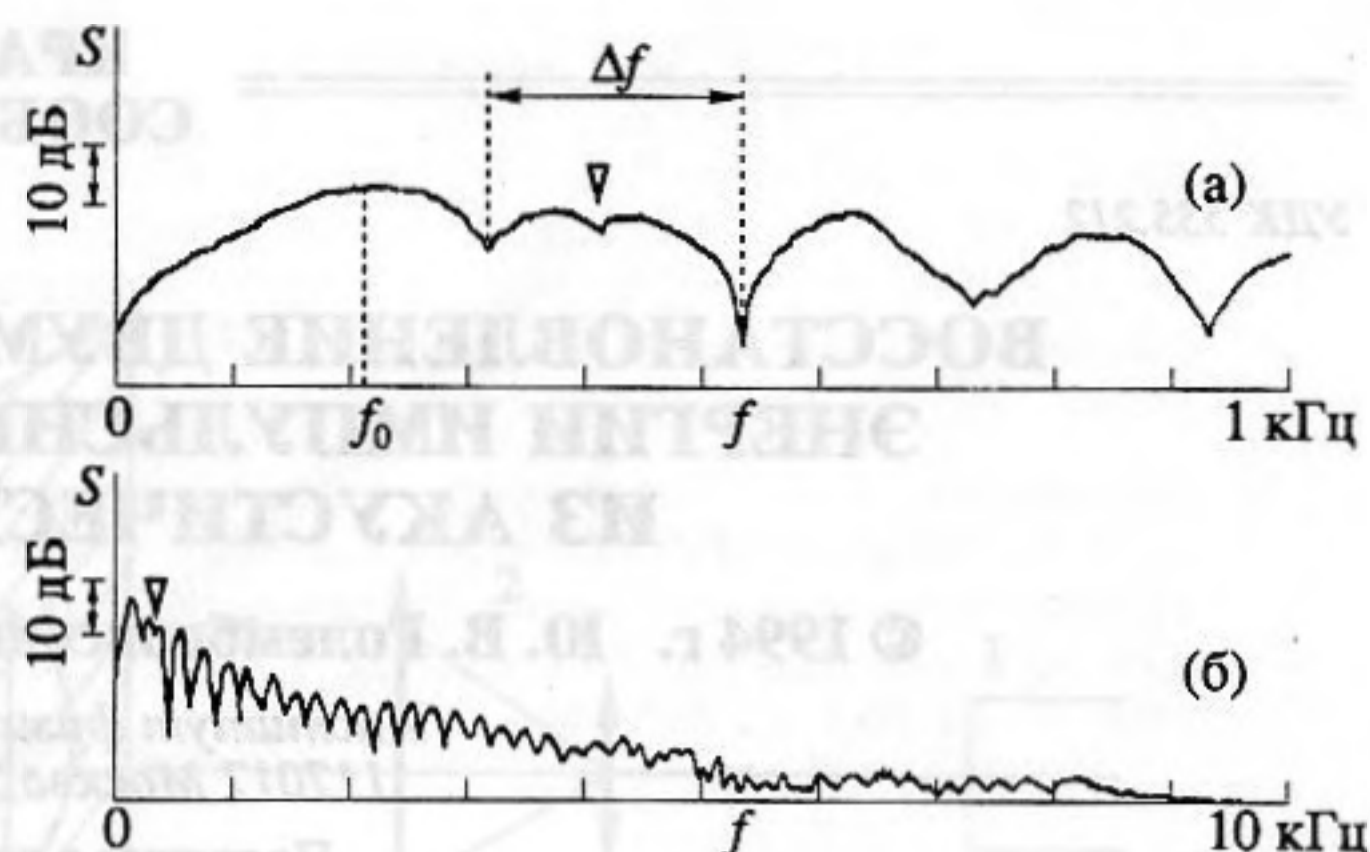


Рис. 3. Спектральные характеристики взрывного сигнала.

По экспериментальным данным оценены среднеквадратичные (по интервалу  $\Delta t = 0.4$  с) значения абсолютных уровней излучения ( $P_0$ ), приведенные к расстоянию от источника 1 м (по сферическому закону), а также излучаемая на частоте первой пульсации (в полосе 1 Гц) энергия ( $\Delta E_0$ ). Для заряда ВВ весом 400 г: при глубине подрыва 1000 м  $P_0 = 16.5$  кПа,  $\Delta E_0 = 215$  кал, при глубине подрыва 2000 м  $P_0 = 6.5$  кПа,  $\Delta E_0 = 33.5$  кал.

В заключение следует отметить, что результаты анализа взрывных сигналов, приведенные в данной статье, ни в коем случае не претендуют на полную их завершенность. Однако ознакомление с ними позволит оценить степень применимости предложенных ранее (Коул, Аронс, Вестон) соотношений для оценки характеристик взрывных сигналов в различных ситуациях, представляющих интерес для акустики океана.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коул Р. Подводные взрывы. М.: Изд-во Иностран. лит., 1950.
2. Arons A.B. Secondary pressure pulses due to gasglobe oscillations in underwater explosions // JASA. 1948. V. 20. P. 277.
3. Arons A.B. Underwater explosions shock wave parameters at large distances from the charge // JASA. 1954. V. 26. P. 343.
4. Вестон Д. Взрывные источники звука. В кн.: Подводная акустика / Пер. под ред. Бреховских Л.М. М.: Мир, 1965.
5. Акустика океана / Под ред. Бреховских Л.М. М.: Наука, 1974. С. 208.