

УДК 534.873

## ОЦЕНКА ГЛУБИНЫ ПОДВОДНОГО ВЗРЫВА МЕТОДОМ МОДИФИЦИРОВАННОГО КЕПСТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА МОРСКОЙ РЕВЕРБЕРАЦИИ, ОБУСЛОВЛЕННОЙ ЭТИМ ВЗРЫВОМ

© 2002 г. О. С. Громашева, В. А. Захаров

Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН 690041 Владивосток, ул. Балтийская 43

E-mail: gromasheva@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 02.02.2000 г.

С использованием математической модели сигнала подводного взрыва получена зависимость глубины взрыва от аргумента  $T_k$ , при котором кепстр сигнала максимален. Обоснован алгоритм оценки параметра  $T_k$ , основанный на кепстральном анализе реверберации. Приведены результаты экспериментальной проверки предложенной методики оценки глубины взрыва, свидетельствующие о ее высокой точности.

При обработке экспериментальных данных, полученных с использованием в качестве источников звука сосредоточенных зарядов взрывчатого вещества, зачастую необходимо знать спектр сигнала подводного взрыва. Сигнал взрыва редко удается зарегистрировать в чистом виде из-за многолучевого распространения звука. В связи с этим для получения спектра привлекают математические модели сигнала взрыва. В математических моделях исходными данными являются расстояние от точки наблюдения до точки взрыва заряда, масса заряда и глубина его взрыва [1]. Глубину взрыва можно однозначно оценить, если мы имеем дело с прямыми сигналами, пришедшими с больших расстояний по подводному звуковому каналу или по приповерхностному каналу, то есть когда в точку приема приходит большое количество лучей. В этом случае по автокорреляционной функции прямого сигнала находят период первой пульсации  $T_1$  в сигнале взрыва [2] и оценивают глубину взрыва по формуле [3]

$$T_1 = 2.08 W^{1/3} / (z + 10.07)^{5/6}, \quad (1)$$

где  $z$  – глубина взрыва в м;  $W$  – масса заряда в кг;  $T_1$  – период первой пульсации в с.

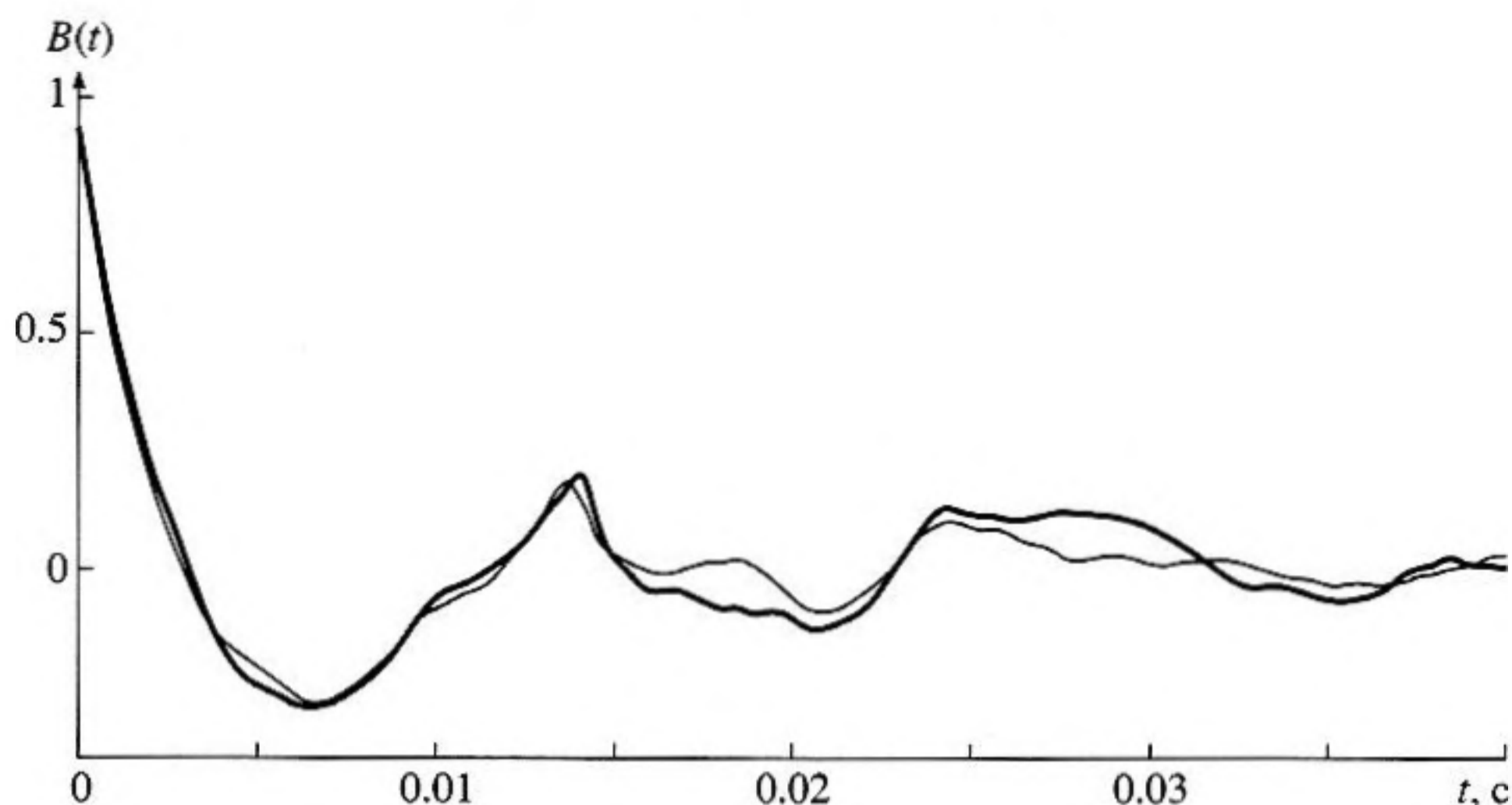
При малом числе лучей автокорреляционная функция будет содержать несколько максимумов, взаимное расположение которых на оси временных сдвигов определяется задержками во времени сигналов, пришедших по разным лучам. Это может привести при определенных временных задержках к неоднозначности в оценке глубины взрыва даже тогда, когда ориентировочное значение глубины взрыва заранее известно. Однако иногда, например, при экспериментальном исследовании отражательных свойств подводных объектов или при исследовании звукорассеивающих

свойств морской среды, прямой сигнал ограничивается в приемных трактах измерительных устройств. Для таких случаев предлагается метод оценки глубины взрыва, основанный на кепстральном анализе морской реверберации, которая всегда присутствует в подобного рода измерениях либо как помеха приему полезных сигналов, либо как объект исследования. Можно использовать любой тип реверберации, но предпочтительнее использовать донную реверберацию, как наиболее интенсивную, при этом для обработки желательно брать участок реверберационного сигнала, непосредственно следующий за донным и донно-поверхностными отражениями.

Реверберация нестационарна, но приводима к стационарному в широком смысле случайному процессу. Для более эффективного использования информации, содержащейся в реверберационном сигнале, его следует стационаризовать. Поэтому перед оценкой энергетического спектра реверберации, который используется в кепстральном анализе, выполняем предварительную обработку ее реализации  $f(t)$ , заданной последовательностью отсчетов  $f(t_i)$  в моменты времени  $t_i = i\Delta t$ ;  $i = 1, 2, \dots, N$ . Из этой реализации удаляем постоянную составляющую, которая может появиться как при регистрации сигналов на магнитном носителе, так и при вводе их в ЭВМ:

$$\hat{f}(t_i) = f(t_i) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(t_i).$$

Затем осуществляем стационаризацию реверберации, для чего находим модуль функции  $\hat{f}(t_i)$  и, используя метод наименьших квадратов, аппроксимируем его полиномом пятой степени



**Рис. 1.** Функция автокорреляции донной реверберации, вызванной  
– взрывом заряда ТНТ с массой 0.21 кг на глубине около 200 м (толстая линия);  
– почти одновременным взрывом двух таких зарядов на глубинах 198.5 м и 206 м (тонкая линия).

$F(t) = \sum_{j=0}^5 e_j t^j$ . Вычислив  $F(t_i)$ , получаем стационаризованный реверберационный сигнал  $s(t_i) = \hat{f}(t_i)/F(t_i)$ . Далее, разбиваем реализацию  $s(t_i)$  на  $M$  неперекрывающихся, примыкающих друг к другу участков, фильтруем их фильтром нижних частот и, вычислив энергетические спектры  $|G_k(f_i)|^2$  отфильтрованных участков, находим статистически усредненный спектр  $|G(f_i)|^2 = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M |G_k(f_i)|^2$ .

Преобразование Фурье полученного энергетического спектра есть функция автокорреляции  $B(t)$  реверберации. Она показана для одной из реализаций донной реверберации на рис. 1. Ее можно использовать для оценки глубины взрыва известным методом, однако определить достаточно точно сдвиг во времени, на котором расположен корреляционный максимум, не представляется возможным из-за значительной ширины корреляционного максимума.

Предлагаемый метод свободен от этого недостатка и основан на схожести энергетического спектра реверберации с энергетическим спектром вызвавшего ее зондирующего сигнала [4]. Для обоснования метода проанализируем структуру энергетического спектра сигнала взрыва. Будем рассматривать ударную волну и первую пульсацию сигнала взрыва на интервалах времени, где они имеют положительные избыточные давления, и в системе координат, в которой они принимают пиковые значения при  $t = 0$ . Обозначим  $G_0(f)$  и  $G_1(f)$  их спектры. Тогда спектр  $G(f)$  совокупности ударной волны и первой пульсации,

разделенных во времени периодом первой пульсации  $T_1$ , будет равен

$$G(f) = G_0(f) + G_1(f) \exp(-j2\pi f T_1), \quad (2)$$

где  $j$  – мнимая единица. Он описывает основные особенности спектра сигнала взрыва почти во всем диапазоне частот, так как вклад второй и последующих пульсаций в спектр незначителен, а фазы отрицательного избыточного давления проявляются только в области низких частот. Из формулы (2) находим

$$|G(f)|^2 = |G_0(f)|^2 + |G_1(f)|^2 + 2|G_0(f)||G_1(f)| \cos[2\pi f T_1 - \Phi(f)], \quad (3)$$

где  $\Phi(f) = \arctg \frac{j[G_0(f)G_1^*(f) - G_0^*(f)G_1(f)]}{G_0(f)G_1^*(f) + G_0^*(f)G_1(f)}$ ;

$G_0^*(f)$ ,  $G_1^*(f)$  – комплексно сопряженные спектры.

Спектры  $|G_0(f)|$  и  $|G_1(f)|$  представляют собой монотонно и медленно спадающие с увеличением частоты функции. Вследствие этого, как видно из выражения (3), энергетический спектр содержит сравнительно медленно спадающую составляющую  $|G_0(f)|^2 + |G_1(f)|^2$  и синусоидальное колебание, промодулированное по амплитуде тоже сравнительно медленно спадающей функцией  $2|G_0(f)||G_1(f)|$ . Период этого колебания  $1/T_k$  немного отличается от значения  $1/T_1$  из-за небольшой добавки, вносимой фазой  $\Phi(f)$ , то есть  $T_k/T_1 = f(z) \approx 1$ . Такая структура спектра позволяет сформулировать достаточно простой алгоритм оценки величины  $T_k$ : нужно исключить тренд из энергетического спектра; устранить амплитудную модуляцию оставшегося синусоидального

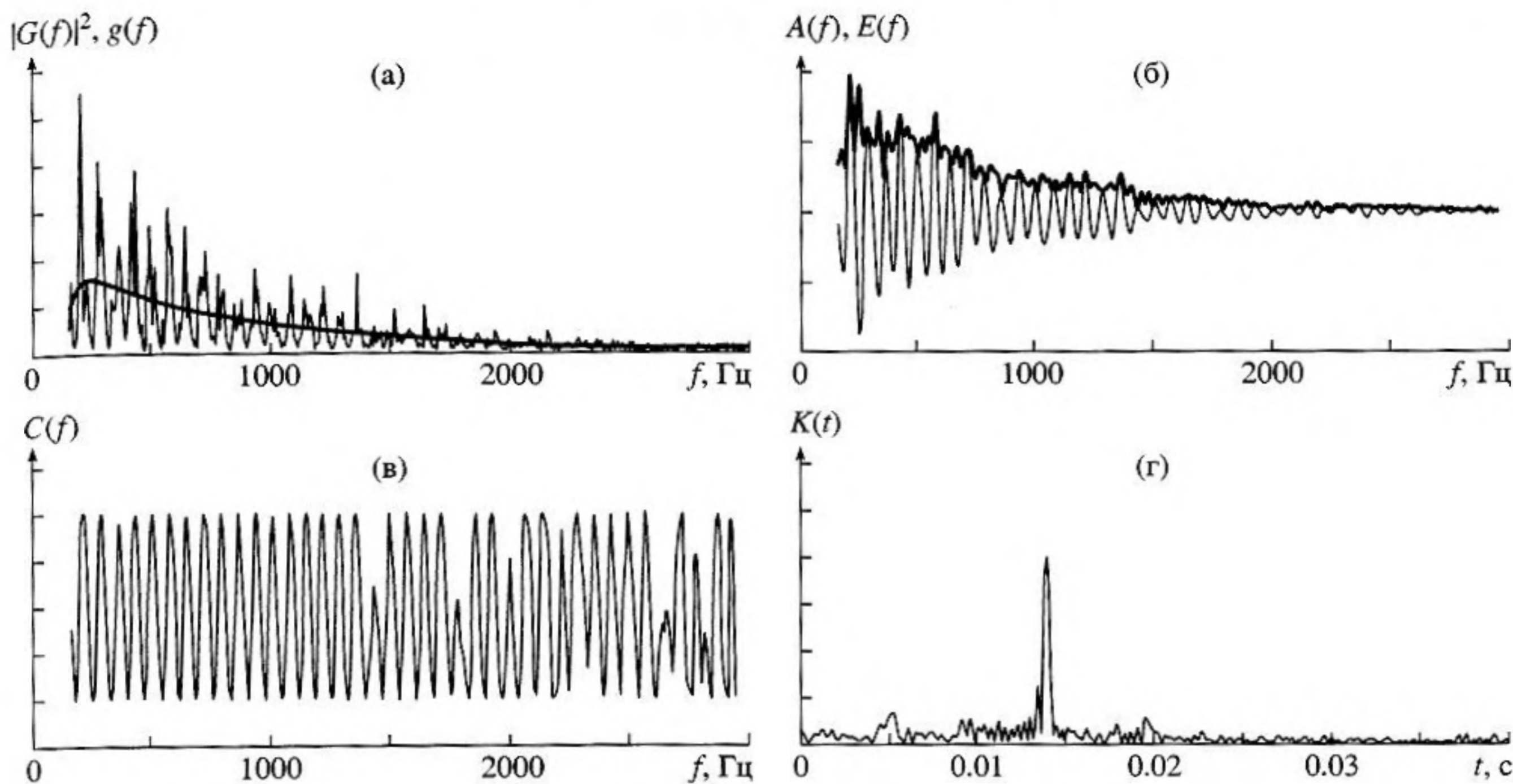


Рис. 2. Результаты кепстральной обработки реализации донной реверберации, вызванной взрывом заряда ТНТ с массой 0.21 кг на глубине 200 м.

колебания; вычислить спектр полученного отрезка синусоиды и найти положение  $T_k$  максимума этого спектра на оси абсцисс. Поэтому при обработке статистически усредненного спектра реверберации  $|G(f_i)|^2$  выполняем следующие операции:

1. С помощью метода наименьших квадратов аппроксимируем энергетический спектр в пределах полосы пропускания низкочастотного фильтра, использовавшегося при оценке спектра реверберации, дробно-рациональной функцией  $g(f) = \sum_{j=-2}^3 b_j f^j$  и устраняем тренд из энергетического спектра:  $\hat{A}(f_i) = |G(f_i)|^2 - g(f_i)$ . Энергетический спектр донной реверберации и аппроксимирующая функция показаны на рис. 2а.

2. Уровни составляющих энергетического спектра реверберации имеют большой динамический диапазон, вследствие чего функция  $g(f)$  не устраняет тренд до такой степени, чтобы его остатком можно было пренебречь. Поэтому фильтруем функцию  $\hat{A}(f_i)$  во временной области полосовым фильтром, который устраняет также и высокочастотные флуктуации функции  $\hat{A}(f_i)$ .

3. Устраняем амплитудную модуляцию полученной функции  $A(f_i)$ , для чего вычисляем с помощью преобразования Гильберта сопряженную функцию  $\tilde{A}(f_i)$ , находим огибающую  $E(f_i) = [A^2(f_i) + \tilde{A}^2(f_i)]^{1/2}$  и делим функцию  $A(f_i)$  на огибающую:  $C(f_i) =$

$A(f_i)/E(f_i)$ . Функция  $A(f)$  и ее огибающая показаны на рис. 2б, а функция  $C(f)$  – на рис. 2в.

4. Выполняем преобразование Фурье функции  $C(f_i)$  и, найдя его модуль получаем кепстр  $K(t_i)$  (см. рис. 2г).

5. Для повышения точности определения положения максимума кепстра на оси времени аппроксимируем вершину кепстрального пика полиномом второй степени и находим значение аргумента  $t = T_k$ , при котором полином принимает максимальное значение.

Теперь остается найти выражение, связывающее параметр  $T_k$  с глубиной взрыва.

В работе [1] показано, что при взрыве зарядов с разными массами на одинаковой глубине излучаемые ими сигналы на расстояниях, где они распространяются по законам линейной акустики, подобны по форме. На таких расстояниях отношение  $T_k/T_1$  зависит только от глубины взрыва  $z$ , т.е.

$$T_k/T_1 = f(z).$$

Учитывая (1), приведем это отношение к виду

$$(z + 10.07)/[f(z)]^{6/5} = (2.08 W^{1/3}/T_k)^{6/5}.$$

Значения функции  $f(z)$  близки к единице, поэтому глубина  $z$  связана с величиной  $x = (2.08 W^{1/3}/T_k)^{6/5}$  зависимостью, близкой к линейной. В ряде случаев, например, при исследовании отклика канала распространения звука или при оценке переходной амплитудно-фазовой характеристики отражающего объекта, когда требуется "отбелива-

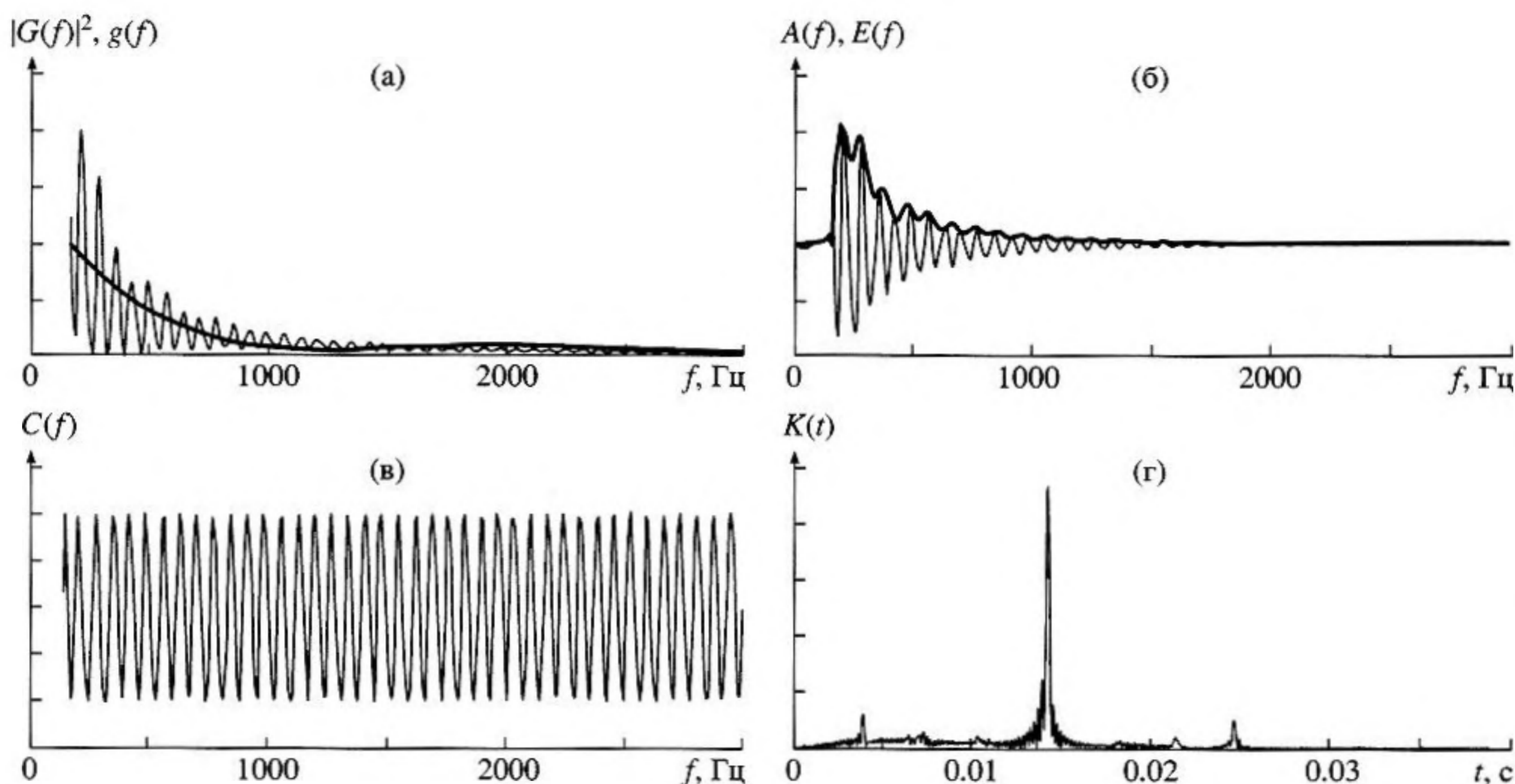


Рис. 3. Результаты кепстральной обработки сигнала, излучаемого зарядом ТНТ с массой 0.21 кг на глубине 200 м.

ние" спектра взрывного зондирующего сигнала в диапазоне частот до нескольких килогерц, глубину взрыва необходимо знать с высокой точностью. Поэтому указанную зависимость аппроксимируем полиномом пятой степени

$$z = \sum_{j=0}^5 a_j x^j. \quad (4)$$

Чтобы найти коэффициенты  $a_j$  нужно иметь ряд значений  $T_{ki}$ , соответствующих различным глубинам взрыва зарядов  $z_i$ .

Так как энергетический спектр реверберации обладает всеми характерными особенностями энергетического спектра сигнала взрыва, то для нахождения пар значений  $z_i, T_{ki}$  используем математическую модель сигнала подводного взрыва [1], при этом выполняем следующие операции: для заряда с выбранной массой и заданной глубины вычисляем сигнал взрыва, фильтруем его фильтром нижних частот и находим энергетический спектр отфильтрованного сигнала. Затем обрабатываем энергетический спектр по предложенной методике. Такие вычисления были сделаны для заряда с массой  $W = 0.21$  кг и глубин взрыва  $z_i = i \times 25$  м;  $i = 2, 3, \dots, 14$  в диапазоне частот до 3 кГц. Пример обработки сигнала взрыва по описанному алгоритму приведен на рис. 3. Пары значений  $z_i, T_{ki}$  использовались для определения коэффициентов  $a_j$  полинома (4) методом наименьших квадратов. В результате получена следу-

ющая формула, позволяющая оценивать глубину взрыва по параметру  $T_k$ :

$$z = -10.152 + 1.00289x - 3.8302 \times 10^{-5}x^2 - 3.1108 \times 10^{-8}x^3 + 6.0331 \times 10^{-10}x^4 - 9.101 \times 10^{-13}x^5;$$

$$x = (2.08W^{1/3}/T_k)^{6/5}.$$

В описанном алгоритме кепстральной обработки реверберации операция логарифмирования энергетического спектра, применяемая в кепстральном анализе, заменена операциями исключения тренда и устранения амплитудной модуляции получающегося остатка, что позволяет получить узкий кепстральный пик на фоне небольшой случайной составляющей и измерить параметр  $T_k$  с высокой точностью. Заметим, что мы не анализировали влияния частотной зависимости затухания звука и отражательной способности дна моря на форму сигнала взрыва, так как эти факторы практически не отражаются на частотном положении максимумов и минимумов в спектре сигнала взрыва и их влияние устраняется указанными операциями.

Предложенный метод оценки глубины взрыва был проверен на экспериментальных данных. Эксперименты проводились в районе Японского моря с ровным дном и глубиной около 3000 м. Сигналы принимались тремя радиогидроакустическими буями (РГБ), установленными в вершинах квадрата со стороной около 1000 м. Гидрофоны РГБ располагались на глубине 100 м. С движущегося судна, находившегося за пределами этого

квадрата, производился сброс зарядов ТНТ с массой 0.21 кг, которые взрывались с помощью гидростатических взрывательных устройств на глубине  $\approx 200$  м. Расстояния между точками взрыва зарядов и РГБ лежали в пределах 2570–4350 м.

Для обработки выбирались участки гидролокационных сигналов с монотонно спадающим уровнем донной реверберации, следующие за первыми донными и донно-поверхностными отражениями. В таблице 1 приведены полученные оценки глубины взрыва зарядов, а также средние значения  $\bar{z}$  глубины взрыва, вычисленные по данным трех РГБ в каждом опыте.

Точность предложенного метода определяется разницей в оценках глубины взрыва по реверберационным сигналам, принятым в каждом конкретном опыте разными РГБ. Как видно из таблицы 1, эта разница невелика: среднеквадратичное отклонение от средних значений составляет около 0.1 м, что свидетельствует о достаточно высокой точности предложенного метода оценки глубины взрыва заряда по информации, содержащейся в таком случайном процессе, как морская реверберация. Этот метод имеет еще одно преимущество: он обладает высокой разрешающей способностью по глубине. Это подтверждает рис. 4, на котором приведен кепстр реверберации, обусловленной почти одновременным взрывом двух зарядов на глубинах 198.5 м и 206 м. Видно, что кепстральные пики, соответствующие разным глубинам, хорошо разделяются; в то же время с помощью автокорреляционной функции реверберации разрешить их не удастся (см. рис. 1).

Предложенный метод оценки глубины взрыва основан на схожести энергетических спектров реверберации и обусловившего ее сигнала взрыва и

Таблица

Номер опыта	Глубина взрыва $z$ , м			$\bar{z}$ , м
	РГБ1	РГБ2	РГБ3	
1	198.5	198.4	198.4	198.4
2	196.9	196.9	197.0	196.9
3	199.9	199.8	199.8	199.8
4	201.9	201.7	201.9	201.8
5	203.8	203.9	203.8	203.8
6	206.1	206.0	206.0	206.0
7	201.0	200.7	200.8	200.8
8	196.3	196.8	196.5	196.5
9	198.7	198.8	198.7	198.7
10	198.0	197.9	198.2	198.0

на использовании такого важного свойства спектров, как периодичность следования их максимумов. В описанном эксперименте энергетический спектр реверберации действительно повторяет в общих чертах энергетический спектр сигнала взрыва, что видно из сравнения рис. 2а и рис. 3а. Однако, в случае сильно расчлененного рельефа дна моря в рассеянном сигнале могут присутствовать достаточно интенсивные отраженные сигналы, вызывающие дополнительную периодическую "изрезанность" спектра и, как следствие, появление дополнительных пиков в кепстре, как, например, при гидроакустических измерениях в сейсмологии [5]. Здесь возникают те же проблемы, что и при оценке периода первой пульсации по автокорреляционной функции прямого сигнала в случае, когда число приходящих лучей невелико. Если аргументы дополнительных кепстральных пиков существенно отличаются от вели-

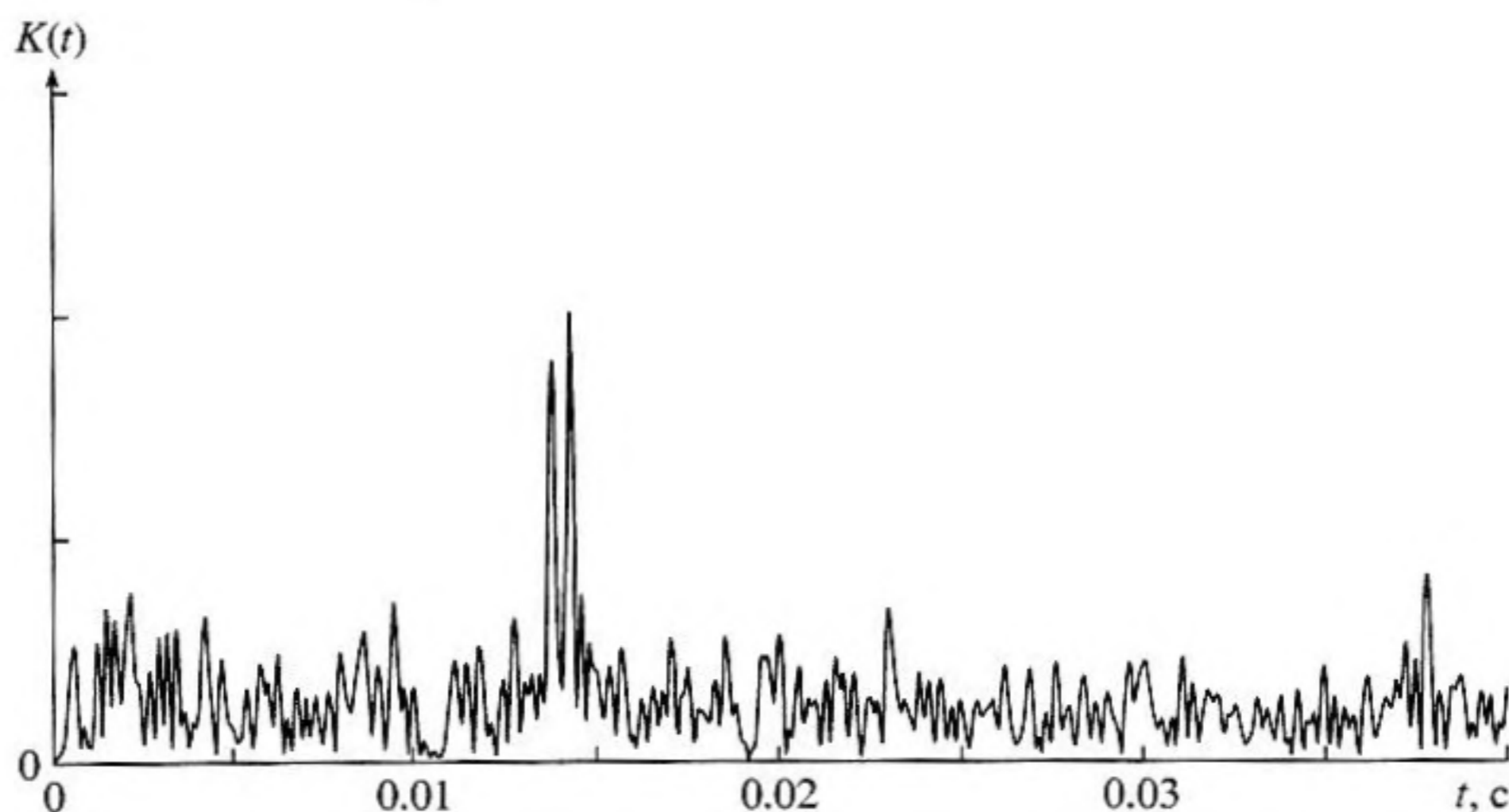


Рис. 4. Кепстр донной реверберации при почти одновременном взрыве двух зарядов ТНТ с массами 0.21 кг на глубинах 198.5 м и 206 м.

чины  $T_k$ , то нужный кепстральный пик легко определить, зная ориентировочное значение глубины взрыва заряда. В противном случае следует либо выбрать другой участок реверберации, либо исключить из ее реализации перед предварительной обработкой наиболее интенсивные отраженные сигналы.

Очевидно, что приведенный алгоритм оценки глубины взрыва может быть применен и к прямым сигналам.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Громашева О.С., Захаров В.А. Математическая модель сигнала подводного взрыва // Научн. тр.

Дальрыбвтуза (ТУ). Владивосток, 1998. Вып. 11. С. 38–46.

2. Баронкин В.М., Железняков М.В., Попов Р.Ю. Влияние изменчивости звуковых полей в океаническом волноводе на эффективность пространственно-временной обработки сигналов. Акустика в океане. М.: Наука, 1992. С. 127–135.

3. Коул Р. Подводные взрывы. М.: ИЛ, 1950. 494 с.

4. Ольшевский В.В. Статистические свойства морской реверберации. М.: Наука, 1966. 202 с.

5. Baumgardt D.R., Z. Der Identification of presumed shallow underwater chemical explosions using land-based regional arrays / Bulletin of the Seismological Society of America, 1998. V. 5. IS4. P. 89–102.

## Estimation of the Underwater Explosion Depth from the Modified Cepstral Analysis of Sea Reverberation

O. S. Gromasheva and V. A. Zakharov

*Pacific Oceanological Institute, Far East Division, Russian Academy of Sciences,  
ul. Baltiiskaya 43, Vladivostok, 690041 Russia*

*e-mail: gromasheva@poi.dvo.ru*

**Abstract**—A mathematical model of the signal produced by an underwater explosion is used to obtain the dependence of the explosion depth on the argument  $T_k$  at which the cepstrum of the signal reaches its maximum. The algorithm evaluating the parameter  $T_k$  on the basis of the cepstral analysis of reverberation is substantiated. The proposed method of estimating the explosion depth is tested by experimental data to demonstrate its high accuracy.