

## ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ОЦЕНКЕ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКА ЗВУКА НА ШЕЛЬФЕ ЧЕРНОГО МОРЯ

© 2015 г. А. Л. Вировлянский\*,\*\*\*, А. Ю. Казарова\*, Г. В. Кенигсбергер\*\*,  
О. В. Колодиев\*\*\*\*, П. И. Коротин\*, Л. Я. Любавин\*, В. И. Моисеенков\*\*,  
Д. А. Орлов\*, О. А. Потапов\*, В. И. Турчин\*

\* *Институт прикладной физики Российской Академии наук*  
603950 Н. Новгород, ул. Ульянова 46  
E-mail: viro@hydro.appl.sci-npov.ru

\*\* *Гидрофизический институт Академии наук Абхазии*  
Сухум, Республика Абхазия, ул. Красномаякская 55  
E-mail: kenigsbergger@mail.ru

\*\*\* *Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского*  
603950 Н. Новгород, пр. Гагарина 23

\*\*\*\* *ООО НТЦ "Мониторинг"*  
603950 Н. Новгород, ул. Ульянова 46  
E-mail: olegkolodiev@yandex.ru

Поступила в редакцию 22.05.2014 г.

Представлены результаты выполненного в Сухумской бухте эксперимента по оценке глубины широкополосного источника и его расстояния до вертикальной приемной антенной решетки, установленной вблизи берега. Координаты источника восстанавливались по данным акустических измерений. Решение поставленной задачи усложнялось отсутствием надежной информации о рельефе дна и параметрах грунта. Показано, что даже в таких условиях для оценки координат источника могут быть применены согласованные со средой методы обработки сигналов. Для этого при решении обратной задачи в качестве входных параметров использовались компоненты сигналов, распространяющихся без отражений от дна.

*Ключевые слова:* подводный звуковой канал, мелкое море, оценка координат источника звука, обратная задача, вертикальная антенна, лучи.

DOI: 10.7868/S0320791915010153

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Обработка гидроакустических сигналов, согласованная со средой<sup>1</sup>, обычно рассматривается как способ оценки глубины источника и расстояния до него; для этого используются вертикально развитые приемные антенные решетки и данные о трассе распространения, позволяющие рассчитать модельную пространственную форму сигнала (см., например, [1]). В последнее время все больше внимания уделяется также использованию широкой полосы частот (см., например, [2–4]), что позволяет, в частности, снизить требования к вертикальному размеру антенных решеток [2]; в этом случае рассчитывается уже пространственно-частотная форма сигнала. Существенным фактором, ограничивающим возможности обработки, согласованной со средой, является неточность модели звукового кана-

ла [5, 6]. Особенно остро проблема стоит в шельфовых областях, где для построения точной модели, как правило, не хватает надежной информации о рельефе дна и параметрах грунта. Акустические свойства грунта определяются множеством факторов, и построение адекватной модели дна представляет собой весьма сложную задачу [7, 8]. Однако для не слишком больших дистанций обработка, согласованная со средой, может быть реализована, если при формировании математической модели сигнала учитываются только его компоненты, формируемые волнами, пришедшими на приемную антенну без отражений от дна.

Для демонстрации такой возможности сотрудниками Института прикладной физики РАН и Гидрофизического института Академии наук Абхазии в октябре 2013 г. был проведен совместный эксперимент в Сухумской бухте. Его задачей был анализ возможностей согласованной со средой обработки сигналов в условиях сложного (и, к

<sup>1</sup> В англоязычной литературе – matched field processing (MFP).

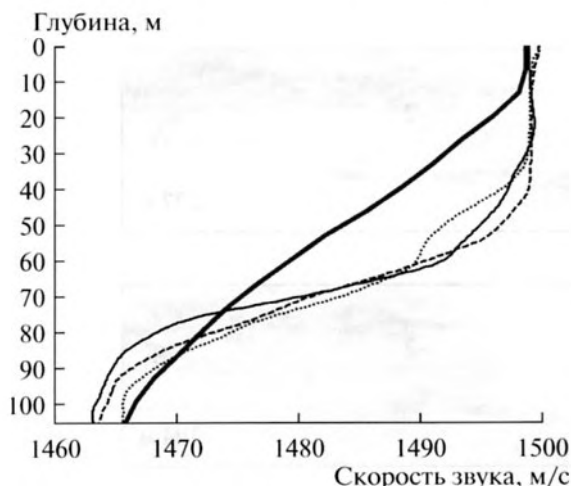


Рис. 1. Профили скорости звука, измеренные в районе проведения эксперимента.

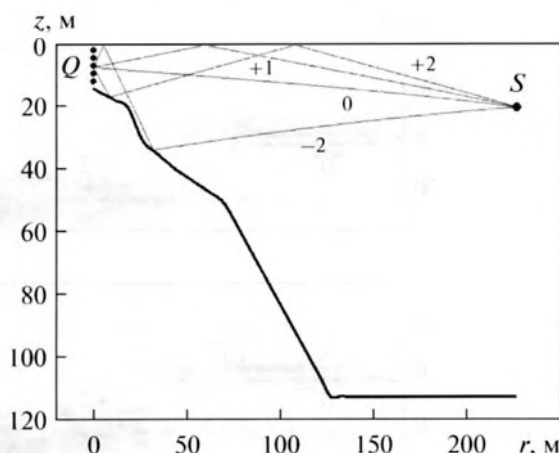


Рис. 2. Профиль дна, использованный в численных расчетах, и примеры лучевых траекторий, соединяющих источник, расположенный в точке с координатами  $r = 227.5$  м и  $z = 20$  м, и центр приемной антенны. Около каждой траектории указан ее идентификатор.

тому же, плохо известного) рельефа дна и практически неизвестных параметров грунта.

## 2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

В ходе эксперимента широкополосные импульсные сигналы излучались источником, погруженным с борта дрейфующего катера на глубины 20 и 45 м. Поле регистрировалось с помощью вертикальной приемной антенной решетки длиной 12.6 м, стационарно установленной вблизи берега и почти полностью перекрывающей вертикальное сечение волновода в месте постановки. Антенна состояла из 64 элементов, расстояние между соседними элементами было 0.2 м. Глубина моря в месте приема составляла 13.8 м, нижний элемент антенны был установлен на расстоянии 0.5 м от дна. Во время измерений, результаты обработки которых приведены ниже, расстояние от дрейфующего катера до неподвижной антенны варьировалось от 130 до 300 м.

На рис. 1 изображены профили скорости звука, измеренные в нескольких точках в районе звуковой трассы.

На рис. 2 показан рельеф дна, использованный при выполнении численного моделирования, и изображены несколько лучевых траекторий, соединяющих источник  $S$  и центр антенны  $Q$ . Около каждой траектории указан ее идентификатор  $\pm M$ , где “ $\pm$ ” – знак угла выхода луча из источника, а  $M$  – количество точек поворота. Здесь показаны примеры траекторий, которые приходят в антенну либо без отражений от поглощающего дна (идентификаторы 0 и +1), либо с небольшим количеством отражений (идентификаторы  $\pm 2$ ). Именно такие лучи дают основной вклад в регистрируемое поле. Отметим, что лучи с идентификатором  $-1$  на антенну не попадают.

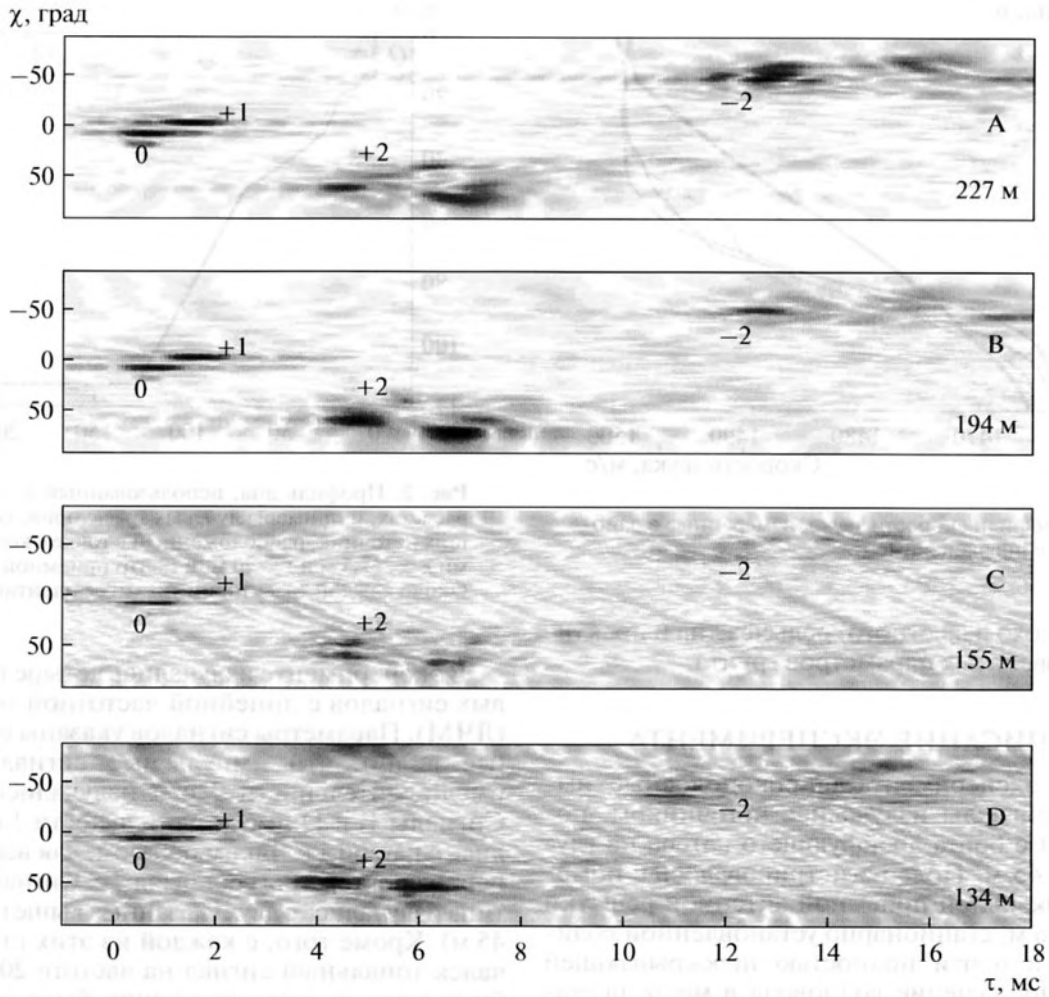
В эксперименте излучались четыре типа звуковых сигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). Параметры сигналов указаны в табл. 1. Из нее видно, что импульсные сигналы А и С имели длительности 2 с и излучались без пауз. Сигналы В и D имели длительности 1 с и излучались с паузой 1 с. Таким образом, для всех сигналов период повторения составлял 2 с. Сигналы каждого типа излучались с двух указанных выше глубин (20 и 45 м). Кроме того, с каждой из этих глубин излучался тональный сигнал на частоте 2000 Гц. Глубина моря в месте излучения была около 100–120 м.

Координаты катера отслеживались с помощью GPS. Это позволяло контролировать расстояние между источником и приемником. Однако в процессе измерений не была реализована синхронизация времени между излучением и приемом. Поэтому акустические данные не позволяют получить оценки абсолютных значений времен распространения сигналов.

Акустические измерения проводились практически в штилевых условиях. Волнение моря не превышало одного балла.

Таблица 1. Параметры излученных сигналов

	Диапазон частот, Гц	Длительность, с	Пауза, с
Сигнал А	1700–3200	2	0
Сигнал В	1700–3200	1	1
Сигнал С	3000–6000	2	0
Сигнал D	3000–6000	1	1



**Рис. 3.** Распределение амплитуд регистрируемого поля в плоскости “время прихода–угол прихода” при погружении излучателя на глубину 20 м. Каждый из четырех графиков построен по данным измерений одного из сигналов, перечисленных в табл. 1. На графике указан тип сигнала (А, В, С или D) и расстояние между источником и антенной при излучении данного сигнала. Около некоторых максимумов распределения и групп близко расположенных максимумов указаны идентификаторы лучей, формирующих данные максимумы.

### 3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АМПЛИТУД ПРИНЯТЫХ СИГНАЛОВ В ПЛОСКОСТЯХ “ВРЕМЯ ПРИХОДА–УГОЛ ПРИХОДА” И “ВРЕМЯ ПРИХОДА–ГЛУБИНА”

Для анализа пространственно-временной структуры поля на антенне выполнялось сжатие звуковых импульсов, регистрируемых отдельными элементами, путем их корреляции с репликой излученного сигнала.

На рис. 3 показаны распределения амплитуд сжатых импульсов в плоскости “время прихода–угол прихода” ( $\tau$ – $\chi$ ). Эти графики представляют функцию  $|p(\chi, \tau)|$ , где

$$p(\chi, \tau) = \sum_{n=1}^N p_n(\tau - \tau_n(\chi)),$$

$p_n(\tau)$  – сжатый сигнал на  $n$ -м элементе антенны;  $N = 64$  – количество элементов антенны,  $\tau_n(\chi) = \frac{z_n - z_c}{c} \sin \chi$  – задержка, введенная для выделения вклада волн, приходящих под углом скольжения  $\chi$ ;  $z_n$  – глубина  $n$ -го гидрофона;  $z_c$  – глубина центра антенны;  $c$  – скорость звука вблизи антенны.

Графики на рис. 3 изображают распределения амплитуд сигналов всех четырех типов из табл. 1, измеренных в опытах с погружением излучателя на глубину 20 м. Несмотря на то, что вследствие дрейфа катера сигналы разных типов излучались с немного различающихся дистанций (указанных на графиках), все четыре распределения довольно близки. Здесь и на всех последующих графиках момент времени  $\tau = 0$  отвечает началу (сжатого)

импульса, проходящего на самый глубокий гидрофон.

Отдельные максимумы или группы близко расположенных максимумов распределений амплитуды на рис. 3 формируются группами лучей, которые имеют близкие времена прихода и близкие углы прихода. Для проверки этого предположения был рассчитан веер из большого числа лучей с углами выхода из источника в диапазоне  $\pm 35^\circ$ . Более крутые лучи не учитывались: они либо отражаются назад, не дойдя до антенны, либо существенно ослабляются из-за многократных отражений от дна. На каждой дистанции профиль скорости звука (от поверхности до глубины моря в этом месте) моделировался соответствующим фрагментом профиля, который на рис. 1 изображен сплошной жирной линией. Использование других профилей на рис. 1 дает практически тот же результат. Рельеф дна в модели волновода, использованной при расчетах лучевых траекторий, показан на рис. 2.

В плоскости ( $\tau$ – $\chi$ ) приход луча, попадающего на апертуру антенны, изображается точкой, координаты которой представляют собой время и угол скольжения этого луча на дистанции наблюдения. Величина  $\tau$  отсчитывается от времени прихода первого луча (луч с идентификатором 0) в самый нижний гидрофон. При этом оказалось, что приходы лучей с идентификаторами 0 и +1, распространяющихся без отражений от дна, очень точно попадают в два самых “ранних” (отвечающие наименьшим задержкам  $\tau$ ) максимума распределений амплитуды. Это хорошо видно на рис. 4, на котором в увеличенном виде показана начальная часть верхнего графика на рис. 3, содержащая эти максимумы. Здесь же слившимися черными точками показаны приходы лучей с идентификаторами 0 и +1, рассчитанные с помощью лучевой программы. Из-за неточного знания рельефа дна аналогичное соответствие для других максимумов распределения амплитуды, формируемых отраженными от дна лучами, установить гораздо сложнее. Нам удалось лишь выяснить, что для источника на глубине 20 м в распределении амплитуды имеются две компактные группы максимумов, формируемые лучами с идентификаторами +2 и –2 (см. рис. 3).

На рис. 5 распределение амплитуды сигналов показано в плоскости “время прихода–глубина” ( $\tau$ – $z$ ). В точке с координатами  $\tau$  и  $z$  представлена амплитуда сжатого импульса, зарегистрированного гидрофоном на глубине  $z$  в момент времени  $\tau$ . Представленные распределения построены по тем же экспериментальным данным, что и распределения на рис. 3. Время прихода  $\tau$  по-прежнему отсчитывается от начала импульса, принятого самым нижним гидрофоном антенны. Несмотря на то, что сигналы разных типов излучались с несколько различающихся дистанций,

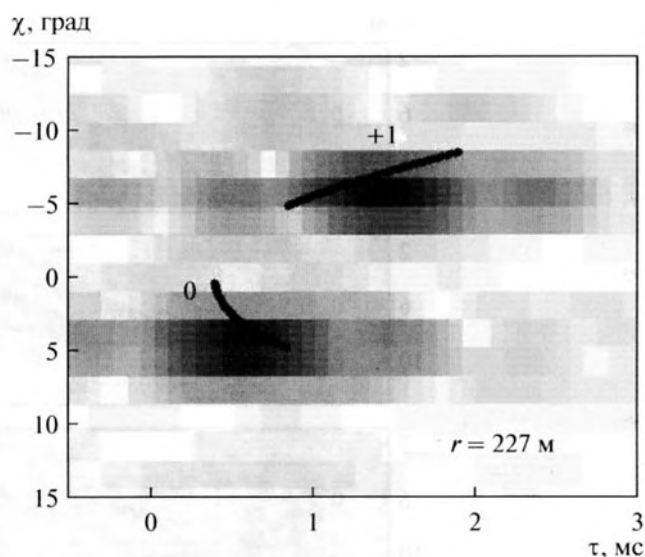


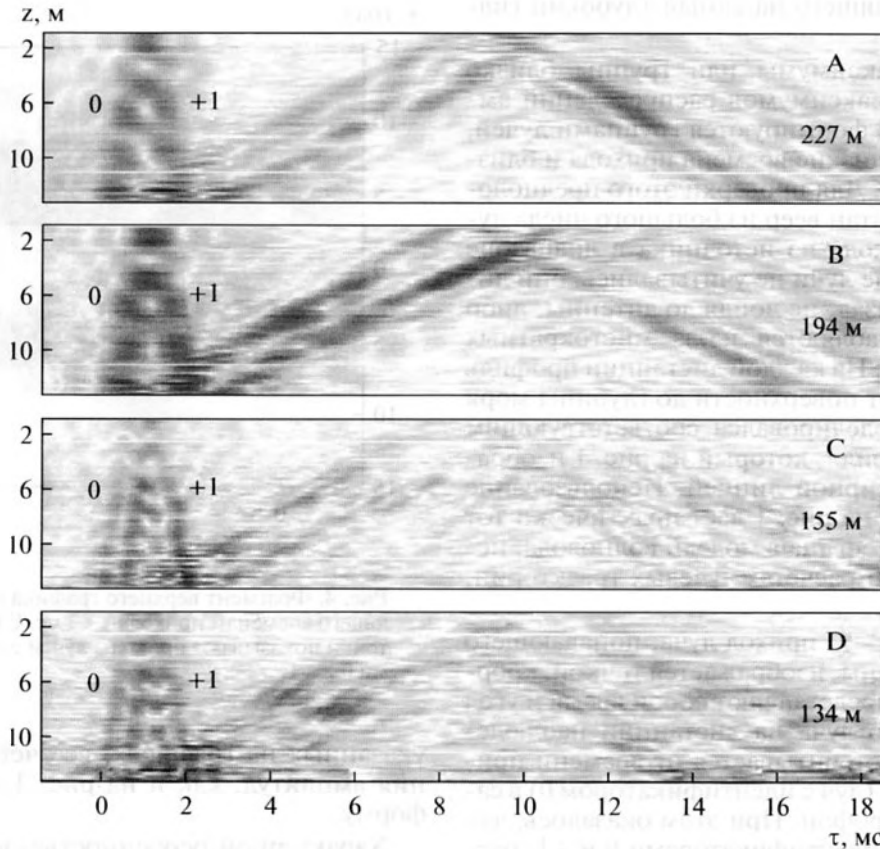
Рис. 4. Фрагмент верхнего графика на рис. 3, отвечающего временам прихода  $\tau < 3$  мс. Слившиеся черные точки показывают приходы лучей с идентификаторами 0 и +1.

указанных на графиках, все четыре распределения амплитуд, как и на рис. 3, имеют похожую форму.

Характерной особенностью всех графиков на рис. 5 является наблюдаемая при  $\tau < 3$  мс область с относительно высокой амплитудой, имеющая форму буквы Л. Она состоит из двух сегментов, формируемых вкладами лучей с идентификаторами 0 и +1, т.е. теми же лучами, которые формируют устойчивые максимумы на рис. 3 и 4. На рис. 6 показан увеличенный фрагмент верхнего графика на рис. 5, представляющий приходы сигналов А с  $\tau < 3$  мс. Черными точками показаны приходы лучей с идентификаторами 0 и +1, рассчитанные с помощью лучевой программы. Как видим, результаты расчетов хорошо совпадают с данными измерений.

Таким образом, анализ экспериментальных данных показывает, что времена и углы прихода лучей, попадающих в точку приема без отражений от дна, могут быть рассчитаны с неплохой точностью. Такая же ситуация имела место и для сигналов, принятых с глубины 45 м, результаты обработки которых здесь не показаны. В распределениях амплитуды сигнала в плоскостях ( $\tau$ – $\chi$ ) и ( $\tau$ – $z$ ) также отчетливо разрешаются приходы лучей с идентификаторами 0 и +1. Как и для источника на глубине 20 м, положения соответствующих максимумов с хорошей точностью предсказываются с помощью лучевой программы.

К сожалению, имеющаяся в нашем распоряжении информация о рельефе дна весьма ограничена. Ситуация осложняется тем, что вследствие дрейфа катера сигналы, регистрируемые в разное



**Рис. 5.** Распределение амплитуды регистрируемого поля в плоскости “время прихода–глубина” при погружении излучателя на глубину 20 м. Каждый из четырех графиков построен по данным измерений одного из сигналов, перечисленных в табл. 1. На графике указан тип сигнала (А, В, С или D) и расстояние между источником и антенной при излучении данного сигнала.

время, фактически распространялись в волноводах с различающимися профилями дна. Сопоставление результатов численного моделирования с данными экспериментов показывает, что неполнота информации о рельефе дна не позволяет рассчитывать компоненты принимаемых сигналов, формируемые отраженными от дна волнами с точностью, достаточной для использования таких компонент в обработке, согласованной со средой. Поэтому примененный в данной работе метод оценки координат источника базируется на использовании лишь тех сигналов, которые приходят на элементы антенны по лучевым траекториям, ни разу не отразившимся от дна, и формируют устойчивые максимумы распределения амплитуды поля.

#### 4. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКА

Нашей задачей является оценка расстояния от антенны до излучателя  $r$  и глубины излучателя  $z_0$ . Совокупность этих параметров обозначим символом  $\phi = (r, z_0)$ . Наблюдаемыми величинами, по

которым осуществляется оценка данных параметров, служат спектральные компоненты принятых импульсных сигналов на дискретных частотах  $f_m$ ,  $m = 1, \dots, M$ . Они образуют набор сигнальных векторов  $x_m = (x_{1,m}, \dots, x_{N,m})^T$ , где  $x_{n,m} = x_n(f_m)$  – величина фурье-спектра импульсного сигнала, зарегистрированного  $n$ -м элементом антенны, на частоте  $f_m$ , а верхний индекс  $T$  обозначает операцию транспонирования. Символом  $e_m = (e_{1,m}, \dots, e_{N,m})^T$  обозначим вектор направленный, представляющий результат численного расчета вектора  $x_m$  для заданного  $\phi$ . Идея согласованного со средой метода оценки заключается в сопоставлении измеренных векторов  $x_m$  с векторами  $e_m$ , рассчитанными для разных  $\phi$ . В качестве оценки  $\hat{\phi}$  берется значение  $\phi$ , для которого расчетный вектор больше всего “похож” на измеренный. В данной статье мы рассматриваем два метода оценки координат источника. Один из них предполагает, что излучается детерминированный сигнал, форма которого известна. При реализации этого метода сигналы обрабатываются с учетом соотношений между фазами спектраль-

ных гармоник на разных частотах. Такую обработку мы называем когерентной. Другой метод может быть применен для оценки координат шумового источника. В этом случае спектральные компоненты излученного сигнала на разных частотах некоррелированы, и мы говорим о некогерентной обработке.

4.1. Когерентная обработка

В простейшей ситуации, когда пространственно-частотная форма излучаемого сигнала точно известна, а фоновый шум характеризуется распределенными по нормальному закону независимыми отсчетами с одинаковой дисперсией, оптимальной мерой сопоставления наблюдаемого и рассчитанного сигналов является квадрат модуля коэффициента корреляции векторов  $\mathbf{x}_m$  и  $\mathbf{e}_m(\phi)$ , который мы будем обозначать  $F_{\text{coh}}(\phi)$  [9]. За оценку  $\hat{\phi}$  принимается аргумент  $\phi$ , при котором  $F_{\text{coh}}(\phi)$  принимает максимальное значение. При использовании такого подхода мы учитывали отсутствие синхронизации излучения и приема, поэтому в набор неизвестных параметров включалась также некоторая неизвестная задержка  $\tau_0$ :  $\phi = (r, z_0, \tau_0)$ . Явное выражение для квадрата модуля коэффициента корреляции  $F_{\text{coh}}(\phi)$  имеет вид

$$F_{\text{coh}}(r, z_0, \tau_0) = \frac{\left| \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M e_{n,m} \mathbf{x}_{n,m}^* e^{-2\pi i f_m \tau_0} \right|^2}{\left( \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M |e_{n,m}|^2 \right) \left( \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M |\mathbf{x}_{n,m}|^2 \right)}. \quad (1)$$

4.2. Некогерентная обработка

Для оценки координат излучателя был также применен альтернативный подход, который не опирается на знание временной формы излученного импульса и поэтому может быть использован для шумового источника. Известно довольно много различных методов оценок параметров сигнала в случае его случайной временной формы (см., например, [3]). Для оценки  $\phi = (r, z_0)$  применялся приближенный метод максимума правдоподобия, предложенный в ряде работ (см., например, [10, 11]). Обобщая этот подход на случай широкополосного случайного сигнала, легко получить, что оценка находится из условия минимума нормы Фробениуса

$$\hat{\phi} = \arg \min_{\phi} \sum_m \text{Tr}(\delta_m^2),$$

где  $\delta_m$  – разность между эмпирической и модельной матрицами ковариации на частоте  $f_m$ ,  $\text{Tr}(\cdot)$  – след матрицы. Поскольку в эксперименте фоновый шум был значительно ниже уровня сигнала,

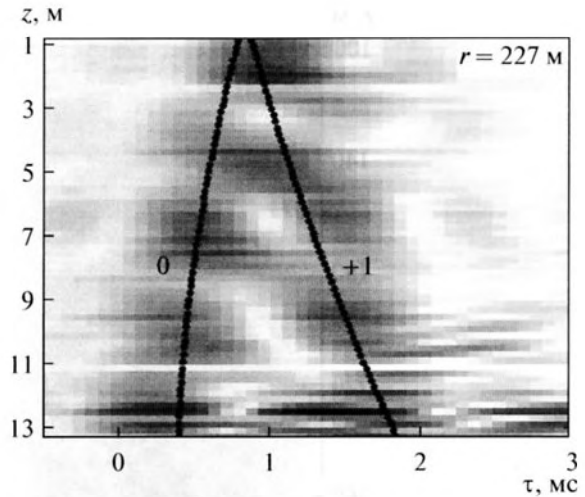


Рис. 6. Увеличенное изображение фрагмента вращенного графика на рис. 5, отвечающего задержкам  $\tau < 3$  мс. Слившиеся черные точки показывают приходы лучей с идентификаторами 0 и +1.

$\delta_m$  бралась в виде  $\delta_m = \mathbf{x}_m \mathbf{x}_m^+ - P \mathbf{e}_m \mathbf{e}_m^+$ , где  $\mathbf{x}_m$  – сигнальный вектор на  $m$ -й частоте,  $P$  – неизвестная мощность сигнала, верхний индекс “+” означает эрмитово сопряжение (см., также [2]). Минимизируя норму Фробениуса по  $P$ , получаем процедуру обработки следующего вида:  $\hat{\phi} = \arg \max_{\phi} F(\phi)$ , где

$$F_{\text{inc}}(\phi) = \frac{\left( \sum_m |\mathbf{e}_m^+ \mathbf{x}_m|^2 \right)^2}{\sum_m (\mathbf{x}_m^+ \mathbf{x}_m)^2 \sum_m (\mathbf{e}_m^+ \mathbf{e}_m)^2}. \quad (2)$$

В выражении (2) для удобства интерпретации в знаменатель был введен не зависящий от  $\phi$  множитель  $\sum_m (\mathbf{x}_m^+ \mathbf{x}_m)^2$ . При этом (2) можно интерпретировать как обобщенный коэффициент корреляции, величина которого удовлетворяет неравенству  $F \leq 1$ . Равенство имеет место в случае, когда для всех частот  $\mathbf{x}_m = \gamma e^{i\phi_m} \mathbf{e}_m$ , где  $\gamma, \phi_m$  – произвольные числа. Заметим, что для не зависящих от частоты  $\mathbf{x}$  и  $\mathbf{e}$  обобщенный коэффициент корреляции  $F = |\rho|^4$ , где  $\rho$  – обычный коэффициент корреляции между векторами  $\mathbf{x}$  и  $\mathbf{e}$ . Численное значение  $F$  в максимуме, таким образом, показывает степень рассогласования между сигнальными векторами и их моделями.

Следует также учесть, что из-за нехватки информации о рельефе дна и параметрах грунта мы можем теоретически рассчитать лишь ту компоненту принятого сигнала, которая формируется вкладами лучей, пришедших на антенну без отражений от дна. Эту компоненту мы и возьмем в ка-

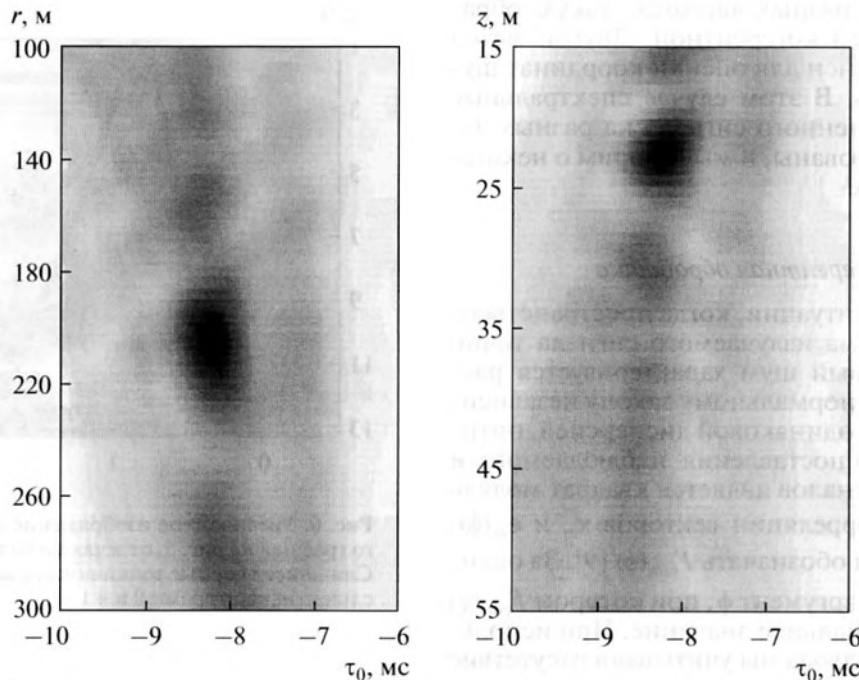


Рис. 7. Сечения функции  $F_{\text{coh}}(r, z, \tau_0)$  в плоскостях  $z = 20$  м (слева) и  $r = 227.5$  м (справа). Излучается сигнал А; источник находится в точке с координатами  $r = 227.5$  м,  $z = 20$  м.

честве вектора направлений. Компонента сигнала, формируемая вкладами других лучей, является помехой. Элементы векторов  $\mathbf{e}_m$  рассчитываются по формуле

$$e_{n,m} = (A_n e^{2\pi i \alpha_n f_m} - B_n e^{2\pi i \beta_n f_m}) e^{2\pi i f_m \tau_0} v(f_m), \quad (3)$$

где  $v(f)$  – спектр излученного импульса,  $A_n$  и  $\alpha_n$  – амплитуда и время прихода луча с идентификатором 0, пришедшего в  $n$ -й элемент антенны без отражения от дна и поверхности, а  $B_n$  и  $\beta_n$  – аналогичные параметры луча с идентификатором +1, один раз отразившегося от поверхности воды. Знак минус перед вторым слагаемым в скобках учитывает, что коэффициент отражения от свободной поверхности равен  $-1$ . Параметры лучей, которые рассчитываются с помощью лучевой программы, являются функциями горизонтальной и вертикальной координат источника звука  $r$  и  $z_0$ . Поэтому векторы  $\mathbf{e}_m$  также являются функциями данных параметров  $r$  и  $z_0$ .

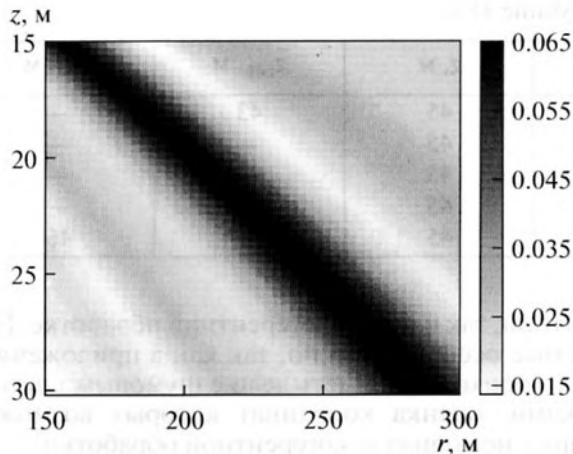
## 5. РЕЗУЛЬТАТЫ КОГЕРЕНТНОЙ И НЕКОГЕРЕНТНОЙ ОБРАБОТКИ

Описанные в предыдущем разделе методы оценки координат источника были применены к сигналам всех четырех типов, перечисленных в табл. 1. Наиболее успешными были результаты обработки сигналов А, так как в опытах с ними отношение сигнал/шум было наилучшим. Для получения искомых оценок спектры  $x_n(f)$  и  $e_n(f)$

вычислялись на сетке из  $M = 3000$  частот, равномерно заполняющих интервал 1700–3200 Гц.

### 5.1. Когерентная обработка

На рис. 7 показаны сечения функции  $F_{\text{coh}}$  в плоскостях  $z_0 = 20$  м и  $r = 227.5$  м, т.е. в плоскостях, отвечающих точным значениям глубины и дистанции. Координаты максимумов в приведенных сечениях дают оценки координат источника: дистанция  $\hat{r} = 208$  м и глубина  $\hat{z} = 23$  м. Отметим, что, как и должно быть, максимумы в обоих сечениях наблюдаются при одном и том же значении задержки  $\tau_0 = -8.2$  мс. Одновременная же оценка дистанции и глубины сопряжена с определенными трудностями. Нетрудно показать, что на достаточно большом удалении источника от антенны при постоянном значении скорости звука  $c$ , когда траектории прямого и отраженного от поверхности лучей являются прямолинейными, разность времен прихода лучей  $\Delta t$  составляет:  $\Delta t \approx 2z_n z_0 / cr$ , где  $z_n$  – глубины гидрофонов. Отсюда следует, что главный максимум функции неопределенности должен быть сильно вытянут вдоль линии  $z_0 \sim r$ . Рефракция из-за вертикального распределения скорости звука может в определенной степени снижать этот эффект, однако указанная неопределенность в той или иной степени будет сохраняться. Это иллюстрирует рис. 8,



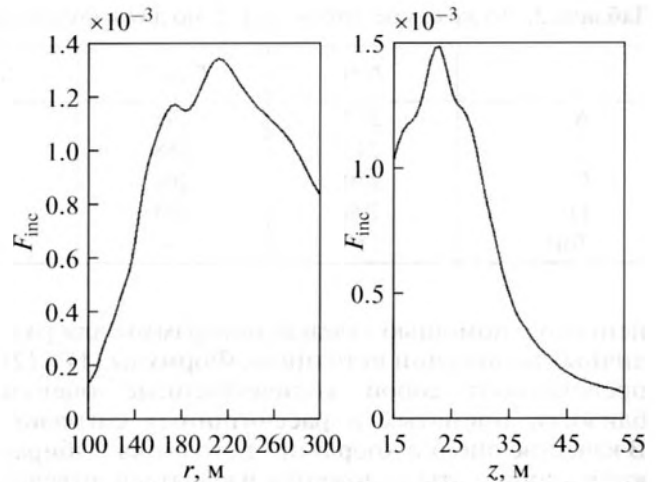
**Рис. 8.** Сечение функции  $F_{\text{coh}}(r, z, \tau_0)$  в плоскости  $\tau_0 = -8.2$  мс. Излучается сигнал А; источник находится в точке с координатами  $r = 227.5$  м,  $z = 20$  м.

где показана зависимость  $F_{\text{coh}}(r, z_0)$  при  $\tau_0 = -8.2$  мс.

### 5.2. Некогерентная обработка

На рис. 9 показаны сечения функции  $F_{\text{inc}}(r, z_0)$ , заданной соотношением (2), которые отвечают известным значениям глубины и дистанции до источника. Координаты максимумов данных графиков дают оценки координат источника  $\hat{r} = 212$  м и  $\hat{z} = 23$  м.

Отметим, что формула (2) может быть использована для оценки координат источника при работе не только с широкополосным, но и с тональным сигналом. В последнем случае некогерентно суммируются лишь несколько спектральных компонент сигнала на частотах близких к частоте излучения. Учет нескольких гармоник нужен из-



**Рис. 9.** Сечения функции  $F_{\text{inc}}(r, z)$  вдоль прямых  $z = 20$  м (слева) и  $r = 227.5$  м (справа). Излучается сигнал А; источник находится в точке с координатами  $r = 227.5$  м,  $z = 20$  м.

за возможных доплеровских смещений несущей частоты вследствие движения излучателя.

Аналогичным образом были обработаны все имеющиеся данные измерений (для импульсных сигналов всех четырех типов и тонального сигнала на частоте 2 кГц при погружении излучателя на 20 и 45 м). Полученные оценки приведены в табл. 2 и 3. В ряде опытов оценки глубины и дистанции не удалось получить из-за слишком низкого отношения сигнал/шум. В соответствующих ячейках таблиц оценки отсутствуют.

### 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе для оценки координат источника применен традиционный подход, идея которого заключается в следующем. Звуковые сигналы, зарегистрированные элементами антенной решетки, сопоставляются с результатами численного расчета поля на апертуре антенны, выпол-

**Таблица 2.** Оценки координат излучателя, полученные при обработке данных в опытах с излучателем на глубине 20 м. Используются обозначения:  $r$  – дистанция до источника по данным GPS;  $\hat{r}_{\text{coh}}$  – оценка дистанции с помощью когерентной обработки;  $\hat{r}_{\text{inc}}$  – оценка дистанции с помощью некогерентной обработки;  $z$  – длина троса, использованного для погружения излучателя;  $\hat{z}_{\text{coh}}$  – оценка глубины с помощью когерентной обработки;  $\hat{z}_{\text{inc}}$  – оценка глубины с помощью некогерентной обработки

	$r$ , м	$\hat{r}_{\text{coh}}$ , м	$\hat{r}_{\text{inc}}$ , м	$z$ , м	$\hat{z}_{\text{coh}}$ , м	$\hat{z}_{\text{inc}}$ , м
А	227	208	212	20	23	23
В	194	208	–	20	–	–
С	155	212	–	20	–	–
Д	134	212	–	20	–	–
Тон	230	–	220	20	–	21



Таблица 3. То же самое, что в табл. 2, но для излучателя на глубине 45 м

	$r$ , м	$\hat{r}_{\text{coh}}$ , м	$\hat{r}_{\text{inc}}$ , м	$z$ , м	$\hat{z}_{\text{coh}}$ , м	$\hat{z}_{\text{inc}}$ , м
A	232	246	—	45	43	—
B	242	258	—	45	—	—
C	250	266	—	45	—	—
D	298	274	—	45	—	—
Тон	153	—	230	45	—	46

ненного с помощью лучевой программы для различных положений источника. Формулы (1) и (2) представляют собой количественные оценки близости принятых и рассчитанных сигналов. В качестве оценки координат источника выбираются координаты положения излучателя, отвечающие наилучшему совпадению численного расчета и данных эксперимента.

При использовании такого подхода ключевым моментом является адекватность расчетной модели среды, т.е. соответствие этой модели и реального подводного звукового канала. Наиболее сложным обычно является построение модели дна, информация о котором, как правило, весьма ограничена. Поэтому применение согласованных со средой методов обработки особенно затруднено при работе на шельфе, где отражение от дна играет существенную роль.

Именно такая ситуация рассмотрена в данной работе. В эксперименте, о котором идет речь, сигнал регистрировался вертикальной приемной антенной, установленной вблизи берега. При этом надежный расчет параметров сигналов, отраженных от дна, практически невозможен. В нашем распоряжении не только нет информации о параметрах грунта, но даже профиль дна известен весьма приближенно.

Тем не менее, оказалось, что компоненты сигнала, формируемые волнами, распространяющимися без отражений от дна, удается предсказать с достаточно высокой точностью. Об этом свидетельствуют сопоставления распределений численно рассчитанных времен и углов прихода лучей с распределениями амплитуд принятых сигналов в плоскостях “время прихода—угол прихода” и “время прихода—глубина”, представленными на рис. 3–6. На этом основании в качестве модели вектора сигналов на элементах антенны была использована его компонента, рассчитанная по формуле (3). Она учитывает лишь вклады волн, распространяющихся без отражения от дна. Другие компоненты вектора, формируемые отраженными от дна волнами, в данном случае являются помехой.

Основной результат работы заключается в том, что такой подход оказался работоспособным и позволил получить правильные оценки дистанции до источника и его глубины, как при коге-

рентной, так и при некогерентной обработке. Последнее особенно важно, так как в приложениях часто приходится иметь дело с шумовыми источниками, оценка координат которых возможна лишь с помощью некогерентной обработки.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №№ 13-05-90307, 13-02-97082.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Baggeroer A.B., Kuperman W.A., Mikhalevsky P.N.* An overview of matched field methods in ocean acoustics // IEEE J. Ocean. Eng. 1993. V. 18. P. 401–424.
2. *Czenszak S.P., Krolík J.* Robust wideband matched-field processing with a short vertical array // J. Acoust. Soc. Am. 1997. V. 101. P. 749–759.
3. *Soares C., Jesus S.M.* Broadband matched-field processing: Coherent and incoherent approaches // J. Acoust. Soc. Am. 2003. V. 113. P. 2587–2598.
4. *Dosso S.E., Wilmut M.J.* Maximum-likelihood and other processors for incoherent and coherent matched-field localization // J. Acoust. Soc. Am. 2012. V. 132. P. 2273–2285.
5. *Gingrass D.F.* Methods for predicting the sensitivity of matched-field processors to mismatch // J. Acoust. Soc. Am. 1989. V. 86. P. 1940–1949.
6. *Feuillade C., DelBalzo D.R., Rowe M.M.* Environmental mismatch in shallow-water matched-field processing: Geoacoustic parameter variability // J. Acoust. Soc. Am. 1989. V. 85. P. 2354–2364.
7. *Ивакин А.Н.* Рассеяние звука дном океана: результаты теоретических и экспериментальных исследований последних лет // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 2. С. 222–226.
8. *Белов А.И., Кузнецов Г.Н.* Оценка акустических параметров модели дна в мелком море с использованием априорной геолого-геофизической информации и преобразования Вигнера // Акуст. журн. 2014. Т. 60. № 2. С. 190–195.
9. *Тихонов В.И., Харисов В.Н.* Статистический анализ и синтез радиотехнических систем. М.: Радио и связь, 1991. 340 с.
10. *Viberg M., Ottersten B.* Sensor array processing based on signal subspace fitting // IEEE Trans. on Signal Process. 1991. V. 39. P. 1110–1121.
11. *Paulraj A., Kailath T.* Direction of arrival estimation by eigenstructure methods with imperfect spatial coherence of wave fronts // J. Acoust. Soc. Am. 1988. V. 83. P. 1034–1040.