АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 1998, том 44, № 6, с. 749–756

УДК 551.463

СТРУКТУРА ЗВУКОВОГО ПОЛЯ ТОЧЕЧНОГО ИСТОЧНИКА В ПОДВОДНОМ ЗВУКОВОМ КАНАЛЕ ЧЕРНОГО МОРЯ

© 1998 г. Р. А. Вадов

Акустический институт им. Н.Н. Андреева РАН
117036 Москва, ул. Шверника, 4
E-mail: bvp.@acoins. msc.ru

Поступила в редакцию 01.09.97 г.

По материалам одного из опытов, проведенных в летних условиях, анализируется временная структура звукового поля в черноморском подводном звуковом канале. На основе полученного экспериментального материала строится усеченная "*t*—*R*"-кривая, находится аппроксимирующая ее зависимость *t*(*R*). Отмечается заметное различие "*t*–*R*"-кривых, полученных для различных регионов Мирового океана. Особое внимание обращается на блочную структуру оконечной части многолучевого сигнала с квазигармоническим заполнением, проявляющуюся в черноморском канале на достаточно большом расстоянии от источника, на ее прямую связь со спектром зондирующего взрывного сигнала. На примере сигналов, принятых на горизонтах 60, 250 и 500 м, иллюстрируется характер изменений временной структуры сигнала при удалении точки приема от оси подводного звукового канала. Отмечается неплохое согласие экспериментальных материалов с результатами проведенных расчетов.

Черное море по своим гидрологическим характеристикам заметно отличается от других районов Мирового океана [1]. Своеобразный профиль изменения скорости звука с глубиной формируется как за счет зимнего охлаждения приповерхностных вод – ядро холодных вод летом находится на глубине 40–60 м, – так и за счет сильного их опреснения – соленость вод меняется от 17–18‰ (у поверхности) до 22‰ (на глубинах 150–200 м и более). Соленость черноморских вод в 1.5–2 раза ниже солености океанских вод. На своеобразие профиля $C(z)$ и связанные с этим некоторые особенности формирования энергетики и временной структуры звуковых полей в подводном звуковом канале Черного моря неоднократно обращалось внимание и ранее [2–4].

Несмотря на то, что Черное море является внутренним, его геометрические размеры позволяют проводить исследования дальнего (до 650 км) распространения звука. В центральной части Черного моря на протяжении последних 20–25 лет был проведен ряд экспериментов с целью определения затухания звука, изучения структуры звукового поля в подводном звуковом канале. Ниже пойдет речь о некоторых результатах анализа материалов одного из опытов, проведенных в летних условиях (август) в конце 80-х годов с применением взрывных источников звука, в качестве которых использовались малые заряды ВВ – детонаторы гидростатического действия. Мощность таких источников достаточна для уверенного приема сигналов на достаточно протяженных трассах, эти взрывные источники обладают высокой стабильностью как по энергетическим характеристикам, так и по глубине подрыва. Использование в качестве зарядов ВВ взрывателей гидростатического действия приводит к существенной экономии времени, необходимого для проведения эксперимента (дает возможность их сброса и подрыва на полном ходу "излучающего" судна).

Опыт проводился с участием двух судов. "Приемное" судно лежало в дрейфе в 180–190 км к юго-западу от Севастополя при глубине моря около 1800 м, "излучающее" судно двигалось к нему из дальней точки трассы курсом 270°–280°.

Протяженность обследуемой трассы в этом опыте составила около 550 км. Глубина моря на большей части трассы превышала 2100 м. Донные отложения в глубоководной центральной части Черного моря представлены известковым илом и серой глиной [5].

Профили изменения скорости звука с глубиной по результатам измерений, выполненных в разных точках трассы перед и после проведения опыта, представлены на рис. 1. К августу полностью сформировался подводный звуковой канал с осью, расположенной на глубине около 50 м. Перепад в значениях скорости звука на оси и у поверхности составил 55 м/с, на оси и у дна 45–50 м/с. Ниже оси канала наблюдалось характерное для Черного моря довольно плавное уменьшение с глубиной градиента скорости звука, обусловленное своеобразными изменениями с глубиной температуры и солености. В середине трассы глубина расположения оси канала несколько уменьшалась (до 35–45 м). Глубина расположения слоя температурного скач-

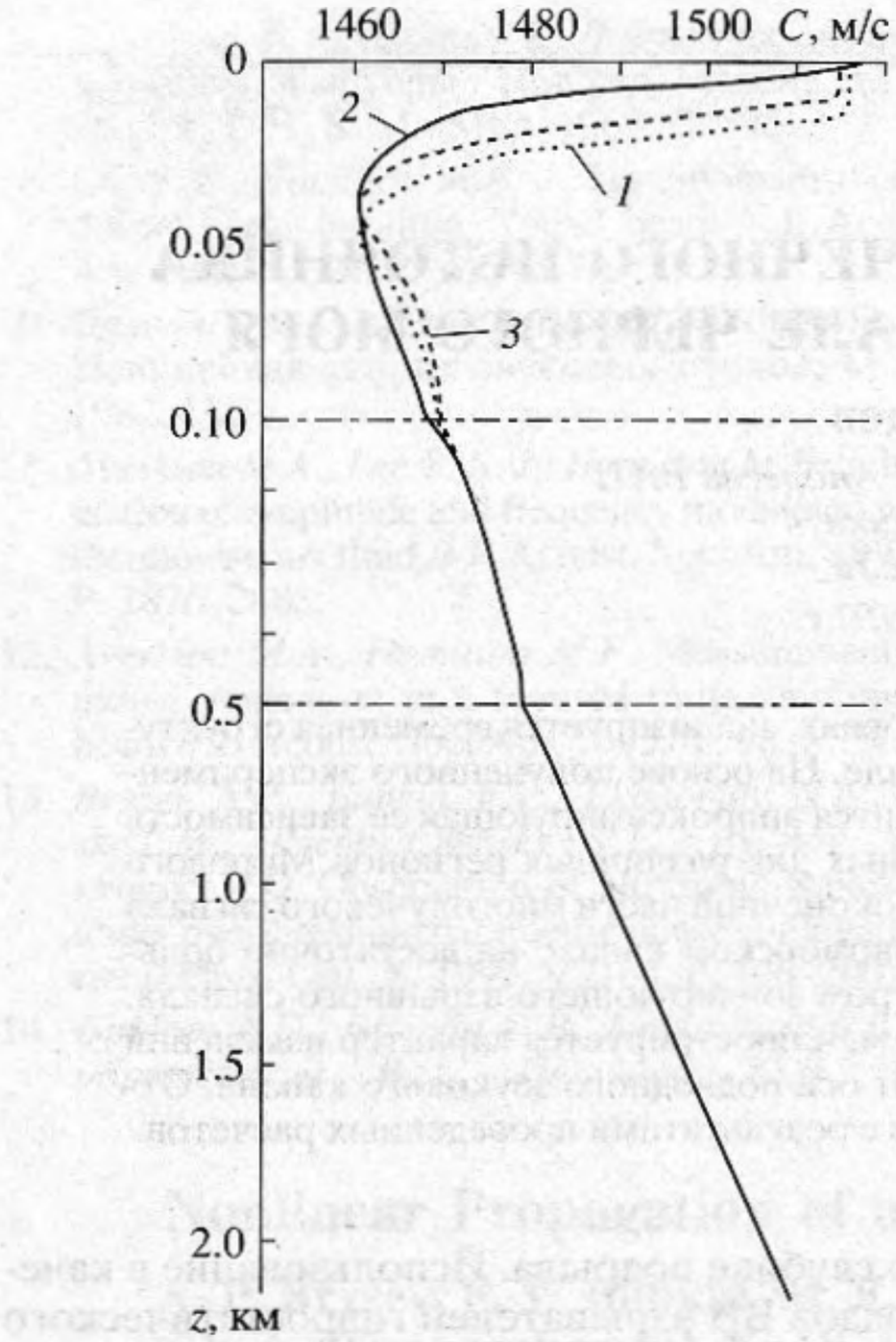

Рис. 1. Профили $C(z)$, зарегистрированные во время проведения опыта у "приемного" судна (кривая *1*), на расстоянии 130 км (кривая *2*) и 550 км (кривая *3*) от него.

ка по мере удаления от точки приема уменьшалась с 15–20 до 5–15 м.

Во время опыта скорость дрейфа "приемного" судна составляла 0.6–0.7 узла (в юго-западном направлении). При скорости ветра 4–6 м/с волнение поверхности моря не превышало 2–3 баллов.

Заряды ВВ с двигающегося по трассе со скоростью 10–11 узлов "излучающего" судна сбрасывались и подрывались на глубине 60 м. Всего в этом опыте на трассе было подорвано 60 зарядов. Расстояние между судами на момент сброса каждого заряда определялось по времени распространения акустического сигнала и уточнялось по результатам обсерваций, периодически выполняемых на обоих судах с помощью спутниковой навигационной системы. Прием взрывных сигналов производился на ненаправленные приемные системы, расположенные на горизонтах 60, 250 и 500 м. Принятые взрывные сигналы регистрировались на магнитную пленку (для этой цели использовался магнитофон "НО-67"). В лабораторных условиях сигналы воспроизводились и после предварительной фильтрации (фильтр низких частот имел частоту среза 2.5 кГц) преобразовывались из аналоговой формы в цифровую с частотой квантования 10 кГц. Для этой цели использовался 12-разрядный преобразователь аналог-код. В цифровой форме все принятые в опыте сигналы сохранялись в памяти ЭВМ для последующей обработки и анализа, а также как составная часть создаваемого автором на базе персональной ЭВМ банка экспериментальных данных "Распространение звука в океане" (в настоящее время в банке данных сосредоточены материалы более 60 подобных опытов, проведенных в 25 районах Мирового океана).

В условиях сформированного подводного звукового канала при размещении источника и приемника на его оси или в непосредственной близости от нее удается получить наиболее полную информацию о временной структуре звукового поля в канале [6], об особенностях ее формирования в обследуемом регионе Мирового океана.

На рис. 2 представлена временная структура сигналов, принятых на глубине 60 м (у оси канала) на расстоянии от 10 до 92 км от источника (с шагом по дистанции около 10 км). На этом и на следующих аналогичных рисунках все сигналы нормированы к их максимальному значению.

На расстоянии от источника вплоть до 60–70 км хорошо просматривается раздвоенность наиболее мощной оконечной части принятых сигналов, обусловленная двухимпульсностью взрывного сигнала (первый – импульс ударной волны, второй – импульс пульсации газового пузыря); разнесение их по времени соответствует периоду пульсации T_0, равному 40 мс при глубине подрыва 60 м). Для спектра взрывного сигнала характерна сильная его интерференционная изрезанность. На рис. 3 представлен спектр одного из зарегистрированных в опыте сигналов. Положение первого максимума (f_0) в спектре, а также расстояние между соседними интерференционными минимумами (Δf) связаны с периодом пульсации пузыря соотношением:

$$f_0 T_0 = \Delta f T_0 = 1.$$

С увеличением дистанции раздвоенность оконечной части исчезает, однако изрезанность спектра сохраняется.

С расстояния 12–15 км наблюдается отделение классических четверок [7], опережающих основную часть принятого сигнала. В отличие от Японского моря [8], в Черном море амплитуда импульсов в четверках примерно в 5 раз меньше максимальных амплитуд оконечной части сигнала, а четверки импульсов ударной волны разделены во времени от четверок импульсов пульсации газового пузыря.

В работе [3] для проведения сопоставительного анализа временной структуры звукового поля в различных регионах было предложено использовать усеченную "*t–R*"-диаграмму, представляющую собой одну кривую, отражающую "*t/N–R/N*" – соотношение для лучей, описавших в пространст-

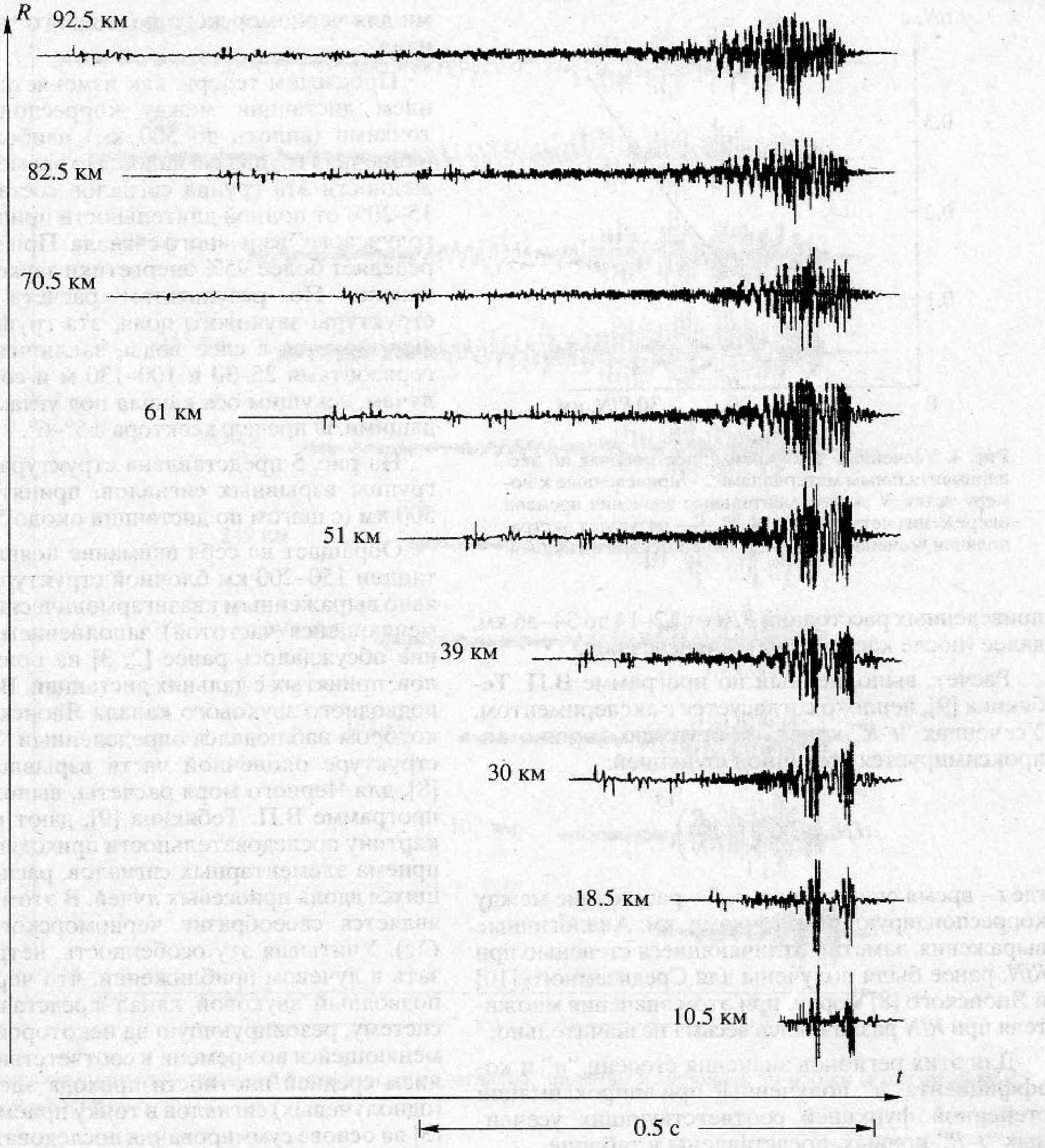

Рис. 2. Временная структура взрывных сигналов, принятых на расстоянии $R < 100$ км, $Z_{ист} = 60$ м, $Z_{пр} = 60$ м.

ве целое число N полных циклов (t – опережение во времени распространения сигнала по отдельным лучам относительно сигнала, распространяющегося вдоль оси канала, на дистанции R). Для средних сигналов второй ($N = 2$) ветви четверок, которые прошли два полных цикла, по экспериментальным данным для черноморского подводного звукового канала были определены времена опережения t относительно окончания принятого "многолучевого" сигнала. На рис. 4 представлена усеченная "t–R"-кривая. Разделяющиеся между собой четверки N-й ветви наблюдаются в диапазоне

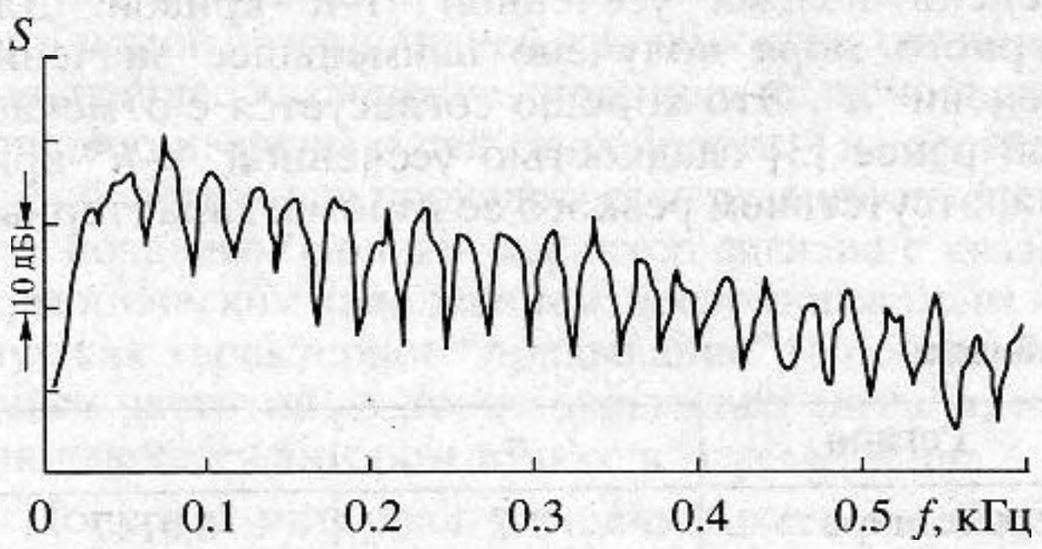

Рис. 3. Спектр одного из зарегистрированных в опыте сигналов.

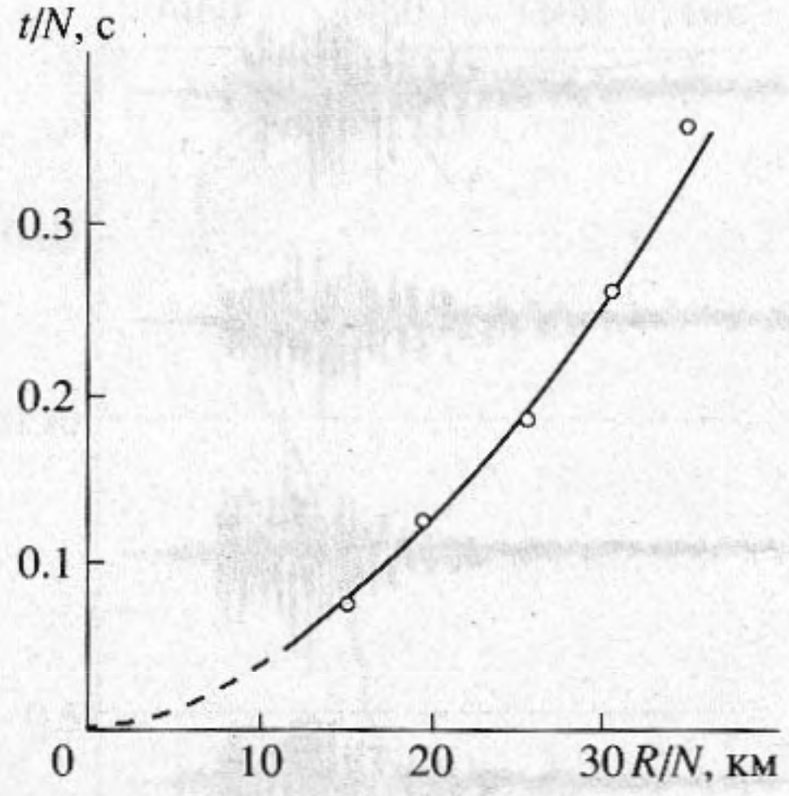

Рис. 4. Усеченная "*t–R*"-кривая, построенная по экспериментальным материалам. ○ – приведенные к номеру ветви *N* экспериментальные значения времени опережения четверок для $N = 2$, — – результат экстраполяции усеченной "*t–R*"-кривой степенной функцией.

приведенных расстояний *R/N* от 12–14 до 34–36 км, далее (после касания дна) они исчезают.

Расчет, выполненный по программе В.П. Тебякина [9], неплохо согласуется с экспериментом. Усеченная "*t–R*"-кривая достаточно хорошо аппроксимируется степенной функцией:

$$t/N = \left(0.0147\frac{R}{N}\right)^{1.7},$$

где *t* – время опережения, *c*, *R* – расстояние между корреспондирующими точками, км. Аналогичные выражения, заметно отличающиеся степенью при *R/N*, ранее были получены для Средиземного [10] и Японского [8] морей, при этом значения множителя при *R/N* различались весьма незначительно.

Для этих регионов значения степени "*n*" и коэффициента "*a*", полученные при аппроксимации степенной функцией соответствующих усеченных "*t–R*"-кривых, представлены в таблице.

Нетрудно показать, что увеличение показателя степени "*n*" (при $n > 1$) приводит к увеличению степени излома усеченной "*t–R*"-кривой. Для Черного моря получено наименьшее значение степени "*n*". Это хорошо согласуется с отмечаемой ранее [3] гладкостью усеченной "*t–R*"-кривой, отсутствием резкого ее излома, характерными для черноморского подводного звукового канала.

Таблица

Регион	*n*	*a*
Черное море	1.7	0.0147
Средиземное море	3.0	0.0150
Японское море	3.6	0.0156

Проследим теперь, как изменяется с увеличением дистанции между корреспондирующими точками (вплоть до 500 км) наиболее мощная оконечная группа сигналов. По временной протяженности эта группа сигналов составляет всего 15–20% от полной длительности принятого "многолучевого" взрывного сигнала. При этом она определяет более 95% энергетики звукового поля в канале. По результатам расчета временной структуры звукового поля, эта группа сигналов формируется в слое воды, заключенном между горизонтами 25–30 и 100–130 м и соответствует лучам, секущим ось канала под углами, не выходящими за пределы сектора ±5°–6°.

На рис. 5 представлена структура оконечной группы взрывных сигналов, принятых с 50 до 500 км (с шагом по дистанции около 50 км).

Обращает на себя внимание появление с дистанции 150–200 км блочной структуры сигнала с явно выраженным квазигармоническим (с плавно меняющейся частотой) заполнением. Это явление обсуждалось ранее [2, 3] на примере сигналов, принятых с дальних дистанций. В отличие от подводного звукового канала Японского моря, в котором наблюдался определенный "хаос" [12] в структуре оконечной части взрывного сигнала [8], для Черного моря расчеты, выполненные по программе В.П. Тебякина [9], дают регулярную картину последовательности приходящих в точку приема элементарных сигналов, распространяющихся вдоль приосевых лучей. В этом также проявляется своеобразие черноморского профиля $C(z)$. Учитывая эту особенность, нетрудно показать в лучевом приближении, что черноморский подводный звуковой канал представляет собой систему, резонирующую на некоторой частоте *F*, меняющейся во времени в соответствии с изменением средней плотности прихода элементарных (однолучевых) сигналов в точку приема. В работе [3] на основе суммирования последовательно приходящих в точку приема импульсных сигналов (с учетом формируемого при каждом касании каустики независящего от частоты сдвига по фазе на 90°) выведено соотношение описывающее частотную характеристику такой системы:

$$A(f) = \left\{\left[\sum_{j=1}^{M}\sin\left(4\pi fdt - \frac{\pi}{2}\right)j\right]^2 + \left[\sum_{j=1}^{M}\cos\left(4\pi fdt - \frac{\pi}{2}\right)j\right]^2\right\}^{0.5},$$

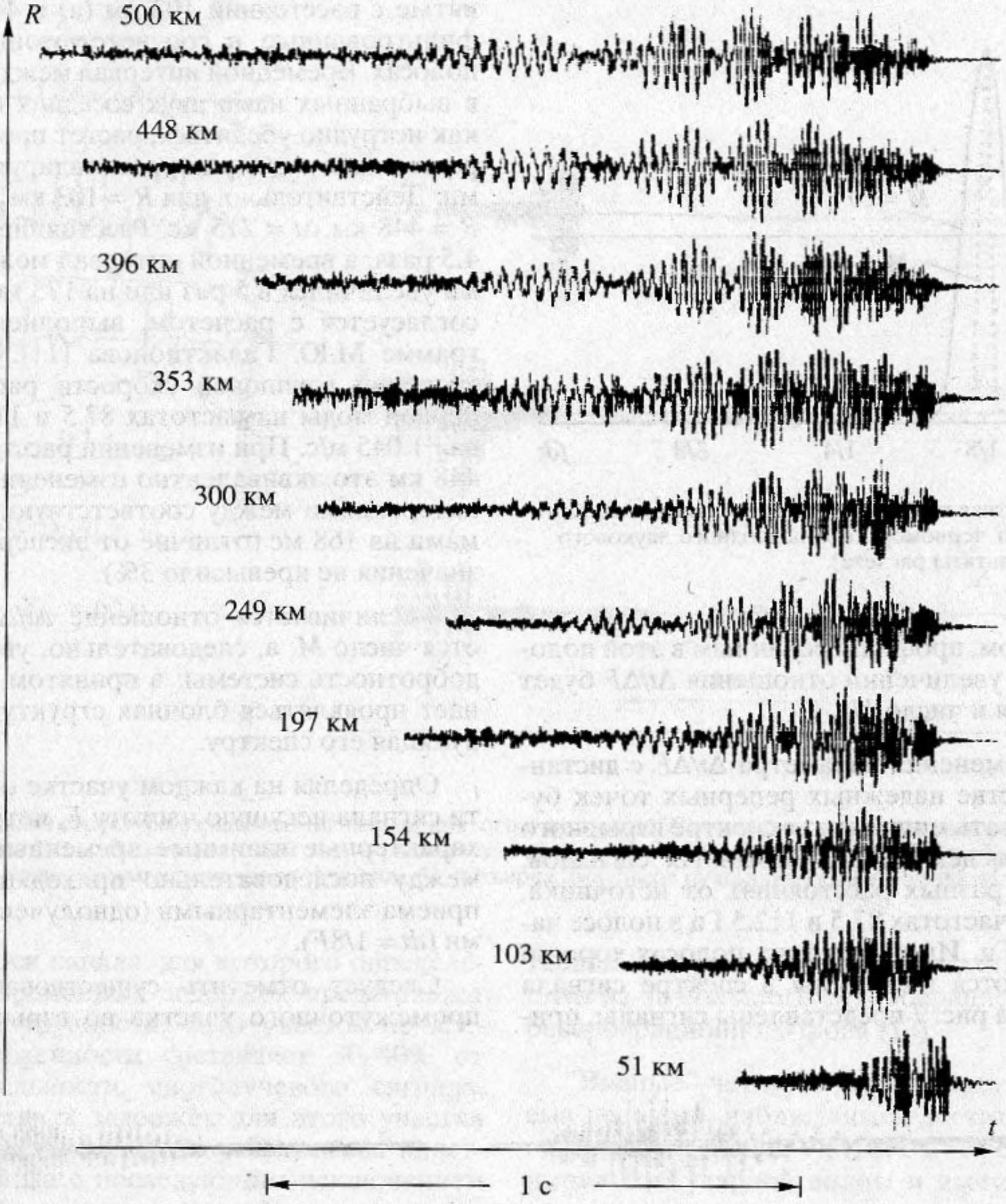

Рис. 5. Временна́я структура оконечной части взрывных сигналов, принятых с дистанций 50–450 км (с шагом 50 км). $Z_{ист} = 60$ м, $Z_{пр} = 60$ м.

где dt – средний временной интервал между отдельно приходящими сигналами, M – число таких импульсных сигналов, для которых интервал dt существенно не изменился. Такая система резонирует на частоте $F = 1/(8dt)$, добротность ее тем выше, чем больше число M. На рис. 6 представлены результаты расчета частотной характеристики такой системы для двух значений M (10 и 40).

При малых M избирательность системы мала, с увеличением M избирательность увеличивается, увеличивается разрешающая способность системы. Спектр взрывного сигнала (см. рис. 3) со всей его изрезанностью, обусловленной двухимпульсным характером сигнала, оказался отображенным во временной области.

На дистанциях до 150–200 км изрезанность спектра взрывного сигнала во временной области не проявлялась, что, по-видимому, можно объяснить малой разрешающей способностью системы. Дальнейшее увеличение дистанции привело к увеличению разрешающей способности – во временной области стала проявляться изрезанность спектра, появился блочный характер сигнала с квазигармоническим заполнением, воспринимаемым на слух как характерное “привывание” (с повышающейся частотой) в конце взрывного сигнала, наблюдавшееся автором только в Черном море.

Допуская интервал dt меняющимся в небольших пределах, соответствующих полосе частот ΔF, легко показать, что число M пропорционально отношению временного интервала Δt, занима-

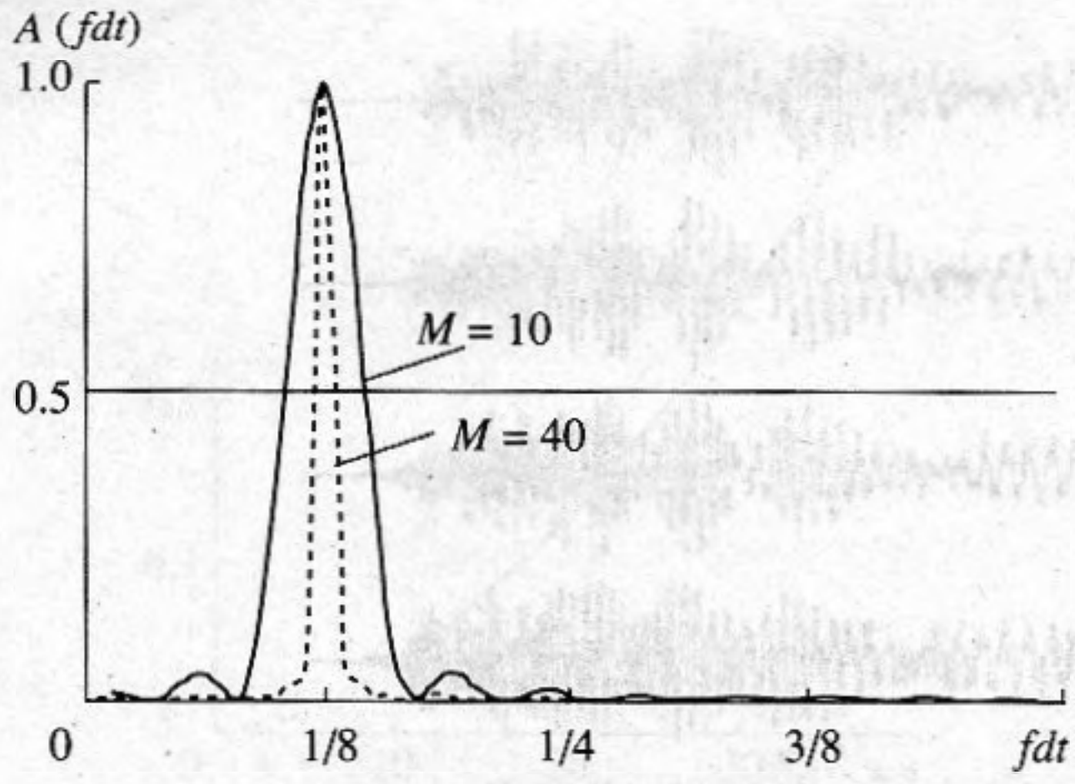

Рис. 6. Частотная характеристика резонансной системы – аналога черноморского подводного звукового канала (результаты расчета).

емого сигналом, профильтрованным в этой полосе, к ΔF. При увеличении отношения $\Delta t/\Delta F$ будет увеличиваться и число M.

Оценим изменения параметра $\Delta t/\Delta F$ с дистанцией. В качестве надежных реперных точек будем использовать минимумы в спектре взрывного сигнала. Проведем анализ взрывных сигналов, принятых на разных расстояниях от источника, например, на частотах 87.5 и 112.5 Гц в полосе частот Δf = 25 Гц. Именно в этих полосах хорошо просматриваются минимумы в спектре сигнала (см. рис. 3). На рис. 7 представлены сигналы, принятые с расстояний 103 км (а) и 448 км (б), расфильтрованные в соответствующих частотных полосах. Временной интервал между минимумами в выбранных нами двух соседних фильтрах (Δt), как нетрудно убедиться, растет пропорционально расстоянию между корреспондирующими точками. Действительно, для R = 103 км Δt = 42 мс, для R = 448 км Δt = 215 мс. Расстояние изменилось в 4.5 раза, а временной интервал между минимумами увеличился в 5 раз или на 173 мс, что неплохо согласуется с расчетом, выполненным по программе М.Ю. Галактионова [11]. Для разности значений групповой скорости распространения первой моды на частотах 87.5 и 112.5 Гц расчет дал 1.045 м/с. При изменении расстояния с 103 до 448 км это эквивалентно изменению временного интервалами между соответствующими минимумами на 168 мс (отличие от экспериментального значения не превысило 3%).

Увеличивается отношение $\Delta t/\Delta F$, увеличивается число M, а, следовательно, увеличивается и добротность системы; в принятом сигнале начинает проявляться блочная структура, соответствующая его спектру.

Определяя на каждом участке оконечной части сигнала несущую частоту F, нетрудно оценить характерные взаимные временные задержки dt между последовательно приходящими в точку приема элементарными (однолучевыми) сигналами ($dt = 1/8F$).

Следует отметить существование третьего, промежуточного участка во взрывном сигнале,

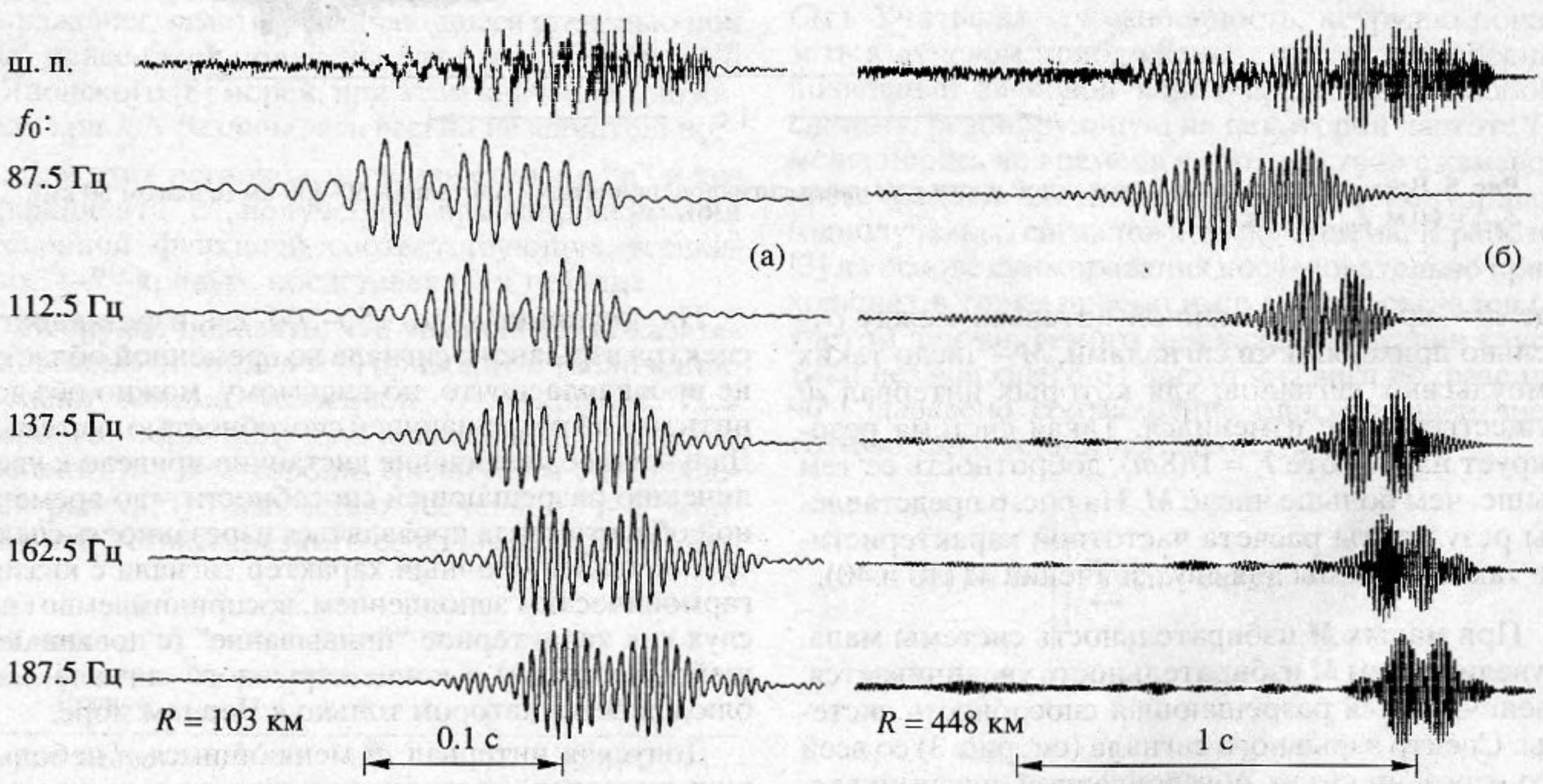

Рис. 7. Временная структура взрывных сигналов, принятых с дистанции 103 (а) и 448 (б) км и расфильтрованных в полосе 25 Гц для центральных частот 87.5, 112.5, 137.5, 162.5 и 187.5 Гц. ш. п. – структура сигнала в широкой полосе.

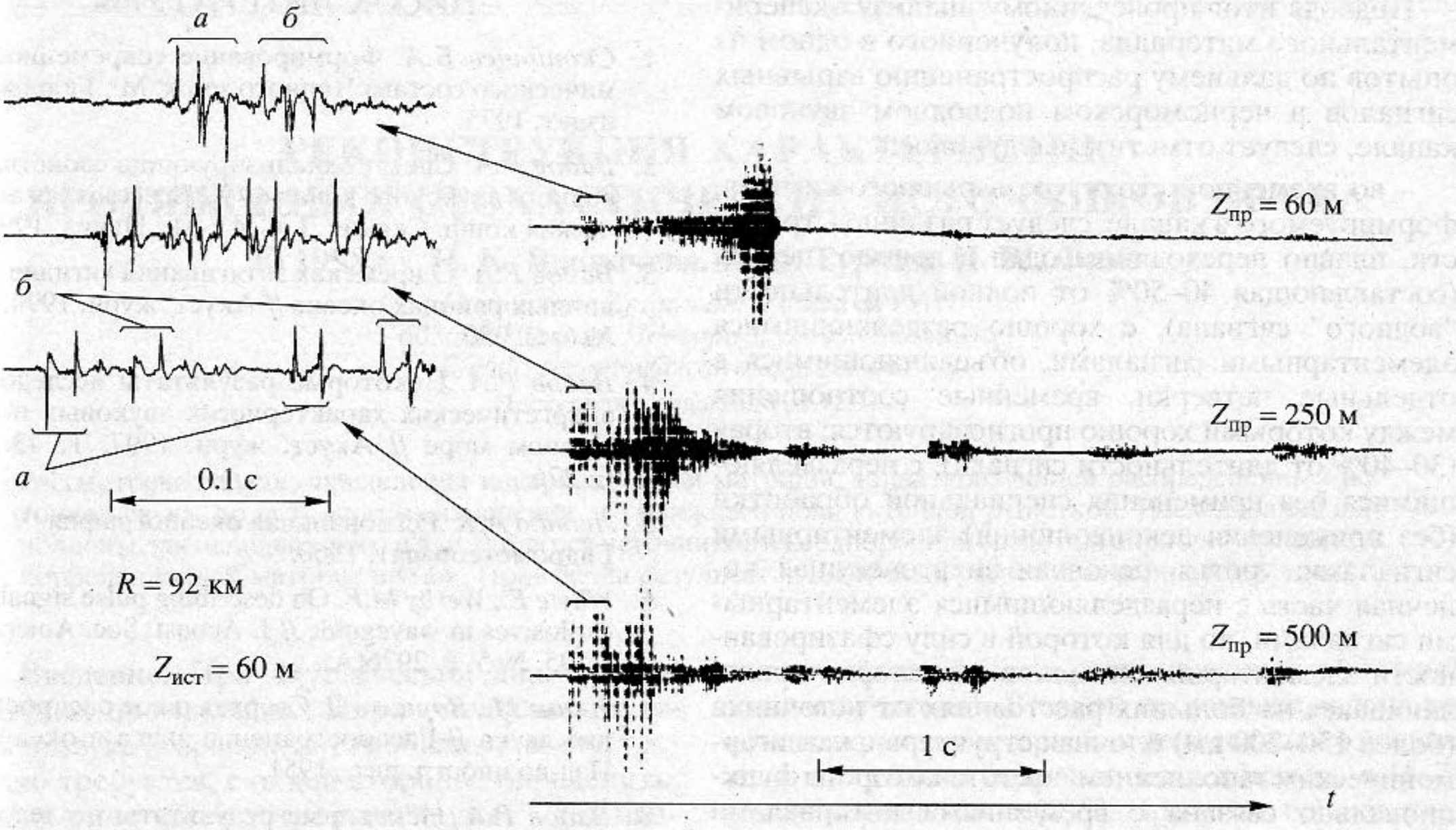

Рис. 8. Временная структура взрывного сигнала, принятого с дистанции 92 км на приемники, расположенные на глубинах 60, 250 и 500 м. В левом верхнем углу – развернутая во времени структура первой пришедшей к приемникам четверки (*а* – четверка импульсов ударной волны, *б* – четверка импульсов пульсации газового пузыря).

принятом на оси канала, для которого определение спектра временных задержек представляет определенные трудности. Этот участок по временной протяженности составляет 30–40% от полной длительности многолучевого сигнала. Спектр временных задержек для этого участка можно определить лишь по результатам кепстрального анализа с последующим исключением составляющей, соответствующей периоду пульсации газового пузыря.

Во взрывных сигналах, принятых на глубине 250 и 500 м (см. рис. 8), столь характерная для сигналов, принятых на оси канала, наиболее энергонесущая оконечная часть с ее блочной структурой и квазигармоническим заполнением отсутствует полностью, отсутствует дисперсионная картина, ярко выраженная при приеме на оси канала. Амплитуда сигнала на всем его протяжении изменяется не так сильно, как при приеме на оси канала.

В отдельных сигналах (на дистанциях, не превышающих 160–200 км) хорошо просматриваются четверки, формируемые при участии дна и поверхности (при приеме на оси канала они просматривались лишь на ближних дистанциях, а к 50–90 км они практически исчезали). Последовательность таких четверок приходит в точку приема после основной части сигнала, их амплитуда в 5–10 раз ниже амплитуды основной части сигнала, элементарные сигналы в этих четверках плохо разделяются из-за большого реверберационного и предреверберационного фона [13].

"Водные" четверки, приходящие в точку приема первыми, наблюдаются достаточно хорошо, однако разделения четверок, сформированных импульсом ударной волны и импульсом пульсации пузыря, в отличие от принятых на оси канала, не происходит; протяженность отдельной четверки во времени за счет разнесения корреспондирующих точек по глубине и удаления приемника от оси канала заметно увеличивается и становится сопоставимой с периодом пульсации газового пузыря (T_0 = 40 мс) или превосходящей его. Так, на расстоянии от источника 92 км (см. рис. 8) четверка, соответствующая третьей ветви "*t*–*R*"-диаграммы (N = 3), имеет протяженность 24 мс при приеме сигнала на оси канала, 77 мс при приеме на глубине 250 м и 125 мс при приеме на 500 м. Вместе с этим, интервалы между первым и вторым сигналами в четверке, а также между третьим и четвертым сигналами (различающимися на один верхний "полуцикл" относительно горизонта расположения излучателя, остающегося при этом неизменным) остаются постоянными, не зависящими от глубины приема (около 13 мс). Это хорошо согласуется с результатами расчета.

Подводя итог проведенному анализу экспериментального материала, полученного в одном из опытов по дальнему распространению взрывных сигналов в черноморском подводном звуковом канале, следует отметить следующее:

– во временной структуре взрывного сигнала, формируемого в канале, следует различать три части, плавно переходящие одна в другую: первая (составляющая 40–50% от полной длительности "водного" сигнала), с хорошо разделяющимися элементарными сигналами, объединяющимися в отдельные четверки, временные соотношения между которыми хорошо прогнозируются; вторая (30–40% от длительности сигнала), с неразделяющимися без применения специальной обработки (без применения деконволюции) элементарными сигналами; третья, основная энергонесущая конечная часть с неразделяющимися элементарными сигналами, но для которой в силу сфазированности элементарных сигналов характерна проявляющаяся на больших расстояниях от источника (более 150–200 км) блочная структура с квазигармоническим заполнением, частота которого функционально связана с временными интервалами между последовательно приходящими элементарными сигналами;

– построенная на основании временной структуры зарегистрированных в опыте сигналов усеченная "t–R"-кривая хорошо аппроксимируется степенной функцией; по сравнению с аналогичными кривыми для Средиземного и Японского морей для Черного моря отмечается более низкое (в 2 раза) значение показателя степени такой функции;

– при удалении горизонта приема от оси канала наиболее энергонесущая оконечная часть с ее блочной структурой и квазигармоническим заполнением исчезает полностью; в отдельных сигналах (на расстоянии не более 160–200 км от источника) проявляются четверки, формируемые при участии границ раздела, их амплитуда в 5–10 раз ниже амплитуды основной части сигнала, элементарные сигналы в этих четверках практически не разделяются.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Скопинцев Б.А.* Формирование современного химического состава Черного моря. М.: Гидрометеоиздат, 1975.
2. *Вадов Р.А.* Спектроанализирующие свойства подводного звукового канала // XI Всесоюзная акустическая конф. Секция Д. С. 47. М.: Наука, 1991.
3. *Вадов Р.А.* О временах затягивания сигнала в различных районах океана // Акуст. журн. 1994. Т. 40. № 6. С. 930.
4. *Вадов Р.А.* Некоторые результаты исследований энергетических характеристик звуковых полей в Черном море // Акуст. журн. 1997. Т. 43. № 2. С. 276.
5. *Леонов А.К.* Региональная океанография. Ч. 1. М.: Гидрометеоиздат, 1960.
6. *Whyte E., Werby M.F.* On describing pulse signals from explosives in waveguide // J. Acoust. Soc. Amer. 1994. V. 95. № 5. P. 2926(A).
7. *Ивинг М., Ворцель Д.* Сверхдальнее распространение звука // Распространение звука в океане. М.: Изд-во иностр. лит., 1951.
8. *Вадов Р.А.* Некоторые результаты исследований структуры звукового поля точечного источника в подводном звуковом канале Японского моря // Акуст. журн. 1998. Т. 44. № 4. С. 443–451.
9. *Тебякин В.П.* Raymod52 – базовый комплекс программ для вычисления звуковых полей в слоисто-неоднородном океане лучевым методом // Отчет АКИН. 1990.
10. *Лерой К.* Распространение звука в Средиземном море // Подводная акустика. М.: Мир, 1970.
11. *Avilov K.V., Galaktionov M.Yu., Ivanitskaya L.A.* Computer system for symulation of underwater propagation in 2D and 3D environments // Proc. of UDT-94 Conference, London, 1994.
12. *Dushaw B.D.* A review of data obtained from long-range acoustic propagation experiment in the ocean // J. Acoust. Soc. Amer., 1997. V. 101. № 5. Pt. 2. P. 3116.
13. *Студеничник Н.В.* Явление предреверберации в подводном звуковом канале // IX Всесоюзная акустическая конф. Секция Д. С. 45. М.: Наука, 1977.

Structure of the Sound Field Generated by a Point Source in the Underwater Sound Channel of the Black Sea

R. A. Vadov

Data of an experiment carried out in summer conditions are processed to obtain the time structure of the sound field in the underwater sound channel of the Black Sea. Based on the experimental data, the reduced t–R curve is plotted, and the approximating corresponding dependence $t(R)$ is determined. The difference between the t–R curves obtained in different ocean regions is pointed out. It is shown that a "block" structure with a quasi-harmonic carrier is characteristic of the terminal parts of multiray signals received in the Black-Sea sound channel at large distances from the source, ant that this structure is directly related to the spectra of explosion-generated signals. For the signals received at depths of 60, 250, and 500 m, changes in the signal time structure are presented for the point of reception offset by different distances from the channel axis. Good agreement between the experimental data and the computations is demonstrated.