АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2011, том 57, № 5, с. 623–632

АКУСТИКА ОКЕАНА. ГИДРОАКУСТИКА

УДК 551.463

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ЗВУКОВОГО ПОЛЯ ТОЧЕЧНОГО ИСТОЧНИКА В ЧЕРНОМОРСКОМ ПОДВОДНОМ ЗВУКОВОМ КАНАЛЕ

© 2011 г. Р. А. Вадов

Акустический институт им. Н.Н. Андреева

117036 Москва, ул. Шверника 4

E-mail: vadov@akin.ru

Поступила в редакцию 10.11.10 г.

Рассматриваются уникальные (свойственные только Черному морю) особенности подводного звукового канала (ПЗК). Изменения скорости звука на глубинах 50–250 м, формирующие нижнюю границу Черноморского ПЗК, принципиально отличаются от соответствующих участков профиля $c(z)$ в других регионах Мирового океана. При заглублении с 40–50 м (на 5–10 м ниже горизонта расположения оси канала) до 200–250 м градиент скорости звука монотонно уменьшается с 0.08–0.22 1/с до 0.02 1/с (а не увеличивается, как в большинстве регионов Мирового океана). Оконечная часть взрывного сигнала, принятого в Черноморском ПЗК на расстоянии 200 и более км от источника, представляет собой квазигармонический сигнал с плавно меняющейся частотой. Более того, оконечная часть сигнала имеет явно блочную структуру, хорошо согласующуюся с блочной структурой спектра элементарного взрывного сигнала. На усеченной "$\tau-R$"-диаграмме отсутствует характерный для большинства регионов Мирового океана резкий излом. При сравнительно небольших глубинах Черного моря наблюдается довольно быстрый рост полной длительности многолучевого сигнала с расстоянием. Проводится сравнительный анализ экспериментальных материалов, полученных с разницей в семь лет практически на одной и той же трассе дальнего распространения взрывных сигналов. Выясняются основные причины межгодичной изменчивости условий канального распространения звука в Черном море.

Ключевые слова: Черное море, подводный звуковой канал, профиль изменения скорости звука с глубиной, взрывной сигнал, оконечная часть сигнала, усеченная $\tau(R)$-диаграмма, геометрическая дисперсия, спектро-анализирующие свойства ПЗК, частотно-временнáя характеристика широкополосного сигнала, межгодичная изменчивость.

Исследования дальнего распространения звука в глубоководной части Черного моря проводились Акустическим институтом, начиная с пятидесятых и вплоть до девяностых годов прошлого столетия. Основное направление этих исследований – измерение коэффициента низкочастотного затухания звука в морской среде при пониженной солености морской воды (отличительная особенность Черного моря). Методикой измерений было предусмотрено размещение источника и приемника у оси подводного звукового канала (ПЗК). В этом случае спад уровня звукового поля с расстоянием происходит по цилиндрическому закону, затухание звука в среде приводит к частотно-зависимому отклонению закона спадания от цилиндрического. Естественно, при этом не оставалась без внимания структура звукового поля в ПЗК, что и привело к выявлению уникальных (свойственных только Черному морю) особенностей ее формирования, на которые не всегда обращают внимание гидроакустики. Опыты по дальнему (до 600 км) распространению взрывных сигналов в глубоководной части Черном моря проводились неоднократно, что позволяет оценить степень устойчивости выявленных особенностей Черноморского ПЗК.

Гидрологическая характеристика черноморских вод

Представляя собой классическую (с акустической точки зрения) модель глубокого океана (летом – ПЗК с осью, расположенной на глубине 40–60 м, зимой – приповерхностный канал), Черное море по своим гидрологическим характеристикам заметно отличается от других районов Мирового океана [1–3]. 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 изменяется от 22‰ (на глубинах 150–200 м и более) до 16–18‰ (у поверхности). В Черном море различаются два вида водной массы: поверхностная черноморская вода с пониженной соленостью (16–18‰)

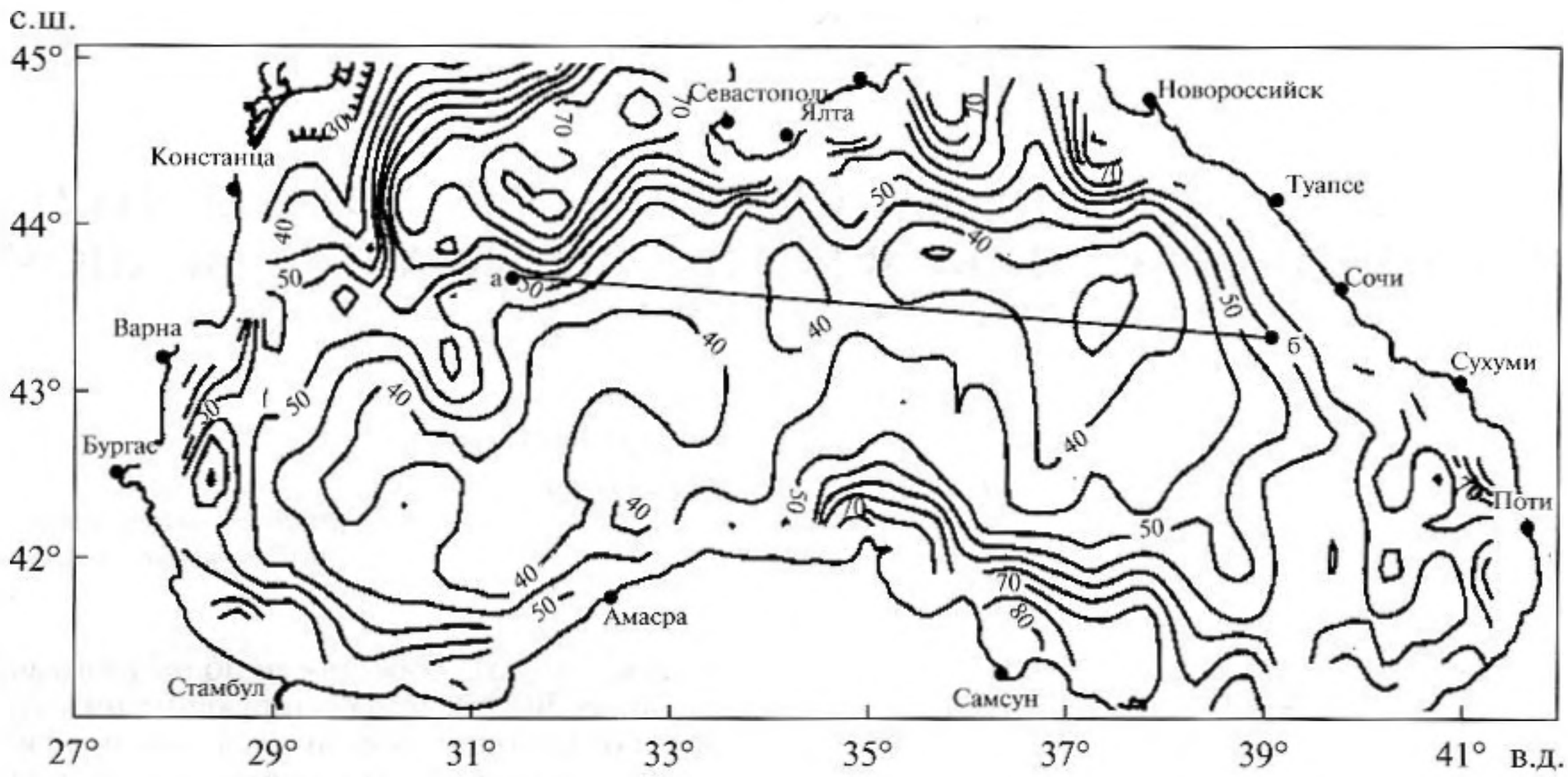

Рис. 1. Топография минимальной температуры вод Черного моря (июль 1992 г.) по работе [4]. "а–б" – трасса проведенных экспериментальных исследований.

и глубинные воды, представляющие собой смесь черноморской и средиземноморской воды и отличающиеся более высокой соленостью (22‰). Сильно опресненный поверхностный слой лежит на более плотном соленом нижнем слое. Наличие двух слоев постоянно поддерживается выносом пресных вод из рек и опресненных вод Азовского моря, а также пополнением глубинных вод солеными Средиземноморскими водами через Босфор. Обмен вод между этими слоями чрезвычайно слабый. Поверхностные и глубинные воды разделены переходным слоем (на глубинах 50–150 м) с большим градиентом солености.

Температура воды в открытом море претерпевает существенные изменения лишь в приповерхностном слое на глубинах от 0 до 75–150 метров. На глубине 40–80 метров расположен слой минимальной температуры (6–7°С), формирование которого обусловлено осенне-зимним охлаждением приповерхностных вод, а также переносом холодных вод, образующихся зимой в северо-западной части Черного моря.

На рис. 1 представлен фрагмент карты изменений глубины расположения минимальной температуры по акватории Черного моря по результатам исследований, проведенных в 1990 г. [4]. Изменения местоположения минимума температуры полностью определяют изменения глубины расположения оси ПЗК. Как правило, в центральной глубоководной части Черного моря ось канала располагается на глубине 35–50 м. На периферии (в зоне действия основного черноморского течения и прибрежных антициклонических вихрей) ось ПЗК опускается до 70–90 м. На этом же рисунке нанесена трасса "а–б", вдоль которой нами в разные годы проводились исследования дальнего распространения взрывных сигналов. Глубина расположения оси ПЗК вдоль этой трассы претерпевает плавные изменения в пределах 35–50 м. С увеличением глубины с 200 м до дна температура воды медленно возрастает от 8.6 до 9.1°С. На этих глубинах температура воды отличается исключительным постоянством (как во времени, так и по акватории моря). Таким образом, межсезонным и межгодичным изменениям подвержен лишь верхний 150–200-метровый слой воды – слой, в котором располагается ось ПЗК и формируется приосевая часть профиля изменения скорости звука с глубиной. Тем более интересен сравнительный анализ экспериментальных материалов, полученных нами в опытах, проведенных в разные годы.

Характерный для центральной глубоководной части Черного моря летний профиль изменения скорости звука с глубиной $c(z)$ представлен на рис. 2. Если в начале лета значение скорости звука у дна (при глубине 2.0–2.2 км) превышает ее значения у поверхности на 10–15 м/с, то в конце августа их различие исчезает за счет прогрева приповерхностных слоев воды. Верхняя граница ПЗК совпадает со слоем температурного скачка, расположенным на глубинах, не превышающих 20–30 м. Отрицательный градиент скорости звука в нем достигает по абсолютной величине 1.5–2.5 1/с и более. Нижняя граница ПЗК формируется как за счет гидростатического давления, так и за счет изменений температуры и солености воды.

Особое внимание обращают на себя изменения скорости звука на глубинах 50–250 м, формирующие нижнюю границу приосевой части Черноморского ПЗК, принципиально отличающуюся от со-

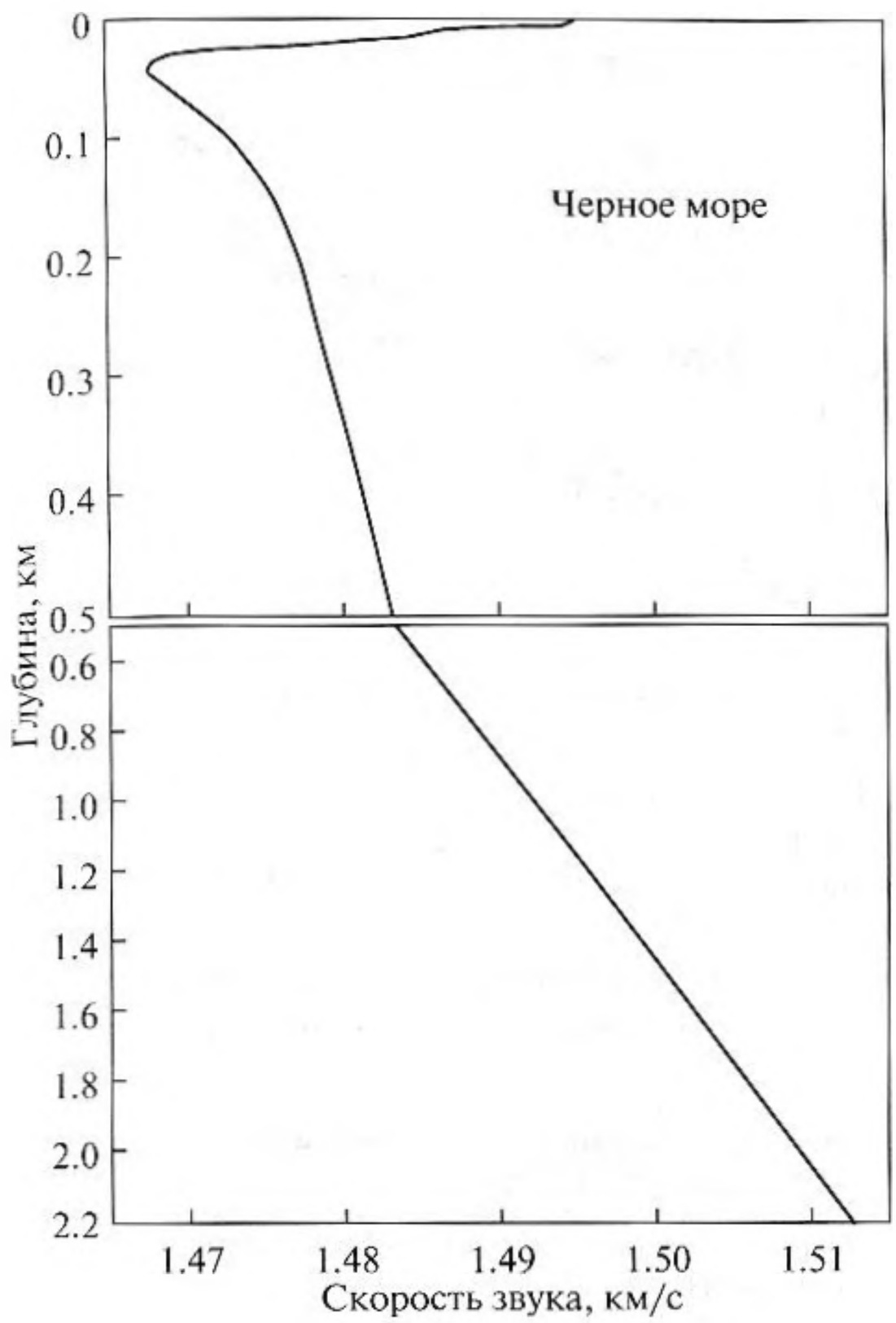

Рис. 2. Профиль изменения скорости звука с глубиной, характерный для центральной части Черного моря.

Рис. 3. Изменения скорости звука с глубиной в окрестности оси ПЗК (центральная глубоководная часть Черного моря), зарегистрированные в двух опытах.

ответствующих участков профилей $c(z)$ в большинстве других регионов Мирового океана. Как отмечалось в работе [5], для большинства регионов Мирового океана достаточно реалистичное описание условий распространения звука вблизи оси ПЗК дает аппроксимация профиля $c(z)$ функциями типа гиперболического косинуса (для такого профиля $c(z)$ характерно практически полное отсутствие различий в горизонтальных составляющих скорости распространения сигнала вдоль приосевых лучей). Такая аппроксимация хорошо описывает приосевую часть профиля $c(z)$ для Японского, Средиземного, Филиппинского и ряда других морей. Однако для Черноморского ПЗК она если и пригодна, то лишь в пределах изменения глубины относительно оси ПЗК, не превышающих ±5–10 м. В этом можно убедиться, ознакомившись с материалами гидрологических станций, выполненных в обеспечение проведенных нами опытов (см. рис. 3).

Для центральной части Черного моря одним из наилучших математических описаний нижней границы ПЗК (в пределах глубин 50–250 м) может служить экспоненциальный закон изменения с глубиной скорости звука относительно его значения на горизонте ~300 м.

При заглублении с 40–50 м (на 5–10 м ниже горизонта расположения оси канала) до 200–250 м градиент скорости звука монотонно уменьшается с 0.08–0.22 до 0.02 1/с. (а не увеличивается, как в большинстве регионов Мирового океана). При дальнейшем заглублении до 500–800 м градиент скорости звука снижается до близкого к гидростатическому. Такая особенность черноморского профиля $c(z)$ приводит к определенной специфике формирования временнóй структуры звукового поля взрывных источников звука в ПЗК, на которую мы неоднократно обращали внимание [6–9].

Опыты по дальнему распространению взрывных сигналов в Черном море

Два опыта с применением взрывных источников звука были проведены вдоль одной и той же трассы протяженностью около 600 км, с разницей во времени в 7 лет. Опыты были проведены с участием исследовательских судов Акустического института "Петр Лебедев" и "Сергей Вавилов" в 80-х гг. прошлого века. Первый опыт был проведен в начале лета (3–4 июня), второй – в середине лета (22–23 августа).

В качестве взрывных источников в этих опытах использовались малые заряды взрывчатого вещества (ВВ) – детонаторы гидростатического действия. Подрыв зарядов ВВ производился на глубине 60 м. Прием взрывных сигналов производился на ненаправленные системы, расположенные на разных горизонтах. Одна из них располагалась у оси ПЗК (на глубине 50 м в первом опыте и 60 м – во втором). В каждом из этих опытов равномерно по

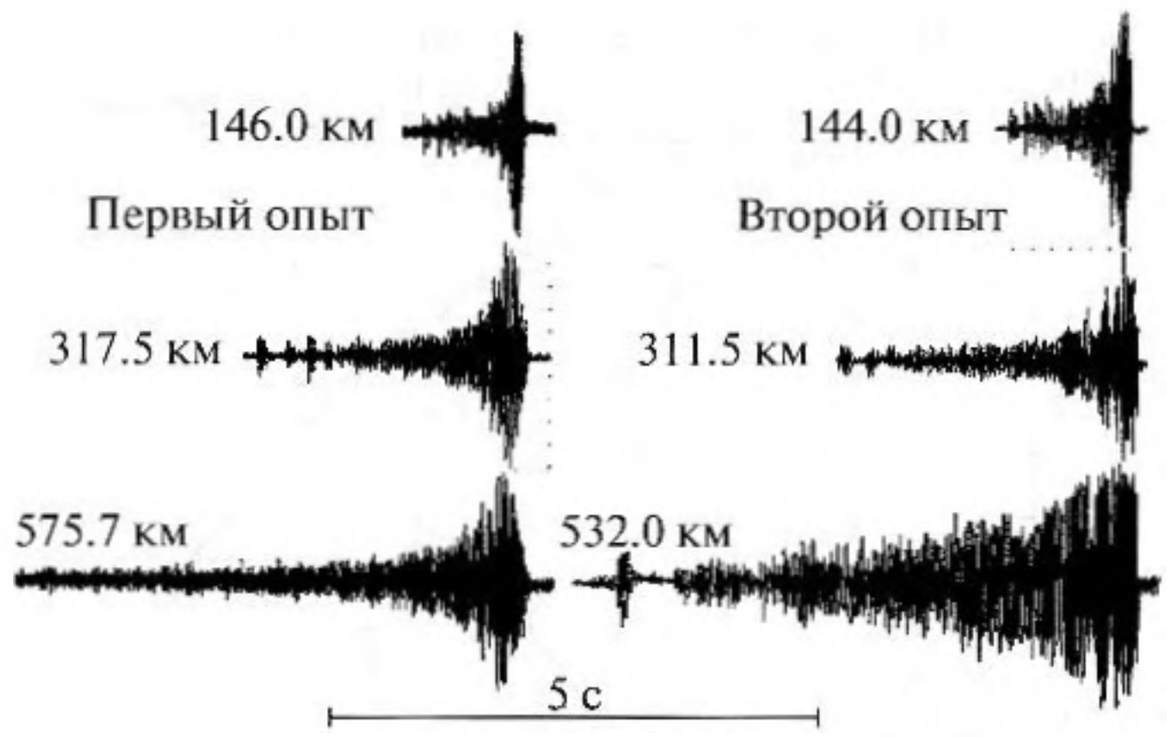

Рис. 4. Структура взрывных сигналов, принятых и зарегистрированных на разных расстояниях от источника в двух опытах, проведенных в Черном море в разные годы (с разницей в 7 лет).

трассе было подорвано по 50 зарядов. "Приемное" судно лежало в дрейфе у точки с координатами 43°40′ с.ш., 31°45′ в.д. (в 180–190 км к юго-западу от Севастополя) при глубине моря ~1800 м. "Излучающее" судно двигалось вдоль исследуемой трассы, удаляясь от "приемного" в первом опыте и приближаясь к нему во втором опыте. Трасса была ориентирована в направлении, близком к широтному. Протяженность трассы составила 540 км в первом и 600 км во втором опыте. На рис. 4 приведены зарегистрированные в двух опытах многолучевые сигналы, принятые на расстоянии от источника ~140, ~320 и ~550 км. Сигналы заметно изменяются от опыта к опыту.

При анализе материалов этих опытов был выявлен ряд особенностей структуры формируемого в ПЗК звукового поля точечного, импульсного, широкополосного (взрывной сигнал) источника, характерных только для Черного моря [6, 9, 10].

К таким особенностям следует отнести:

– спектроанализирующие свойства Черноморского ПЗК;

– вид усеченной "$\tau-R$"-характеристики, на которой отсутствует характерный для большинства регионов Мирового океана резкий излом;

– чрезвычайно быстрый рост полной длительности многолучевого сигнала с расстоянием до источника (коэффициент пропорциональности ~0.009 с/км) при сравнительно небольших (по сравнению с океаном) глубинах моря.

Несомненно, сравнительный анализ экспериментальных материалов, полученных нами в опытах, проведенных в разные годы, представляет большой интерес.

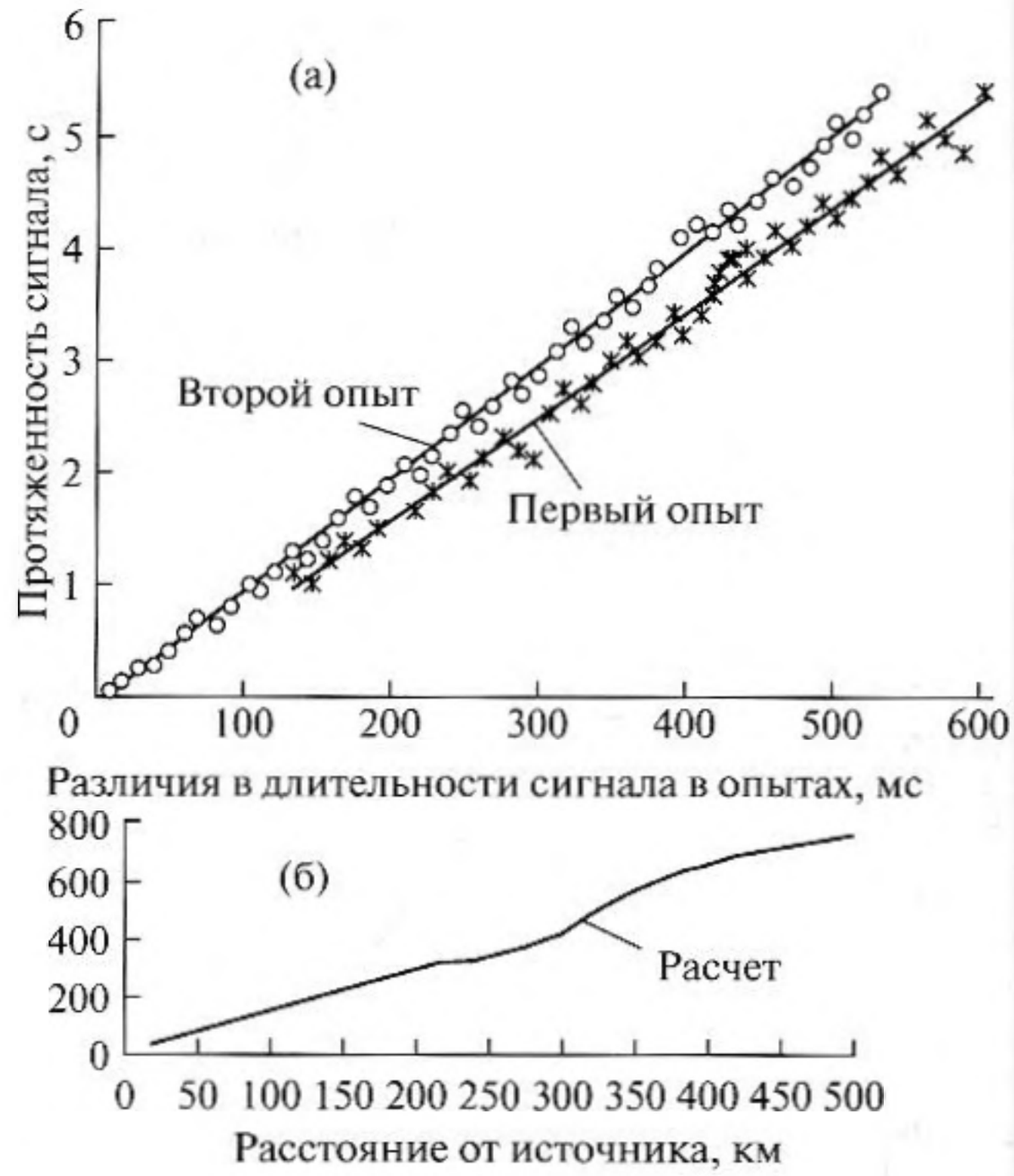

Рис. 5. а – изменение длительности взрывного сигнала, распространяющегося в черноморском ПЗК, в двух опытах; б – результаты расчета разности времен распространения приосевых сигналов в первом и втором опытах.

Длительность многолучевого сигнала в Черноморском ПЗК, ее изменение с расстоянием

Первое, что обращает на себя внимание, это полная длительность многолучевого взрывного сигнала, регистрируемого в опытах на разных расстояниях от источника. Несмотря на сравнительно небольшую глубину Черного моря (2000–2200 м), ее рост с расстоянием происходит также или даже быстрее, чем в других регионах Мирового океана при глубинах 5000 м и более. На рис. 5а представлена зависимость длительности сигнала от расстояния до источника, построенная по материалам двух опытов. Прямые на рисунке – результат линейной аппроксимации этой зависимости для того и другого опыта. Коэффициенты пропорциональности длительности сигнала расстоянию (K_0) для первого и второго опытов несколько различаются и составляют ~0.009 и ~0.01 с/км соответственно. Как нетрудно показать, основная причина такого различия – разница значений скорости звука на оси ПЗК: 1466–1467 м/с в первом опыте и 1464–1465 м/с – во втором. Это различие обусловлено разницей температуры ядра холодных вод и связано с межгодичной ее изменчивостью.

Длительность взрывного сигнала, распространяющегося в ПЗК, определяется разностью времен

распространения сигнала вдоль приосевых лучей и вдоль лучей, максимально отклоняющихся от оси ПЗК, но не касающихся дна.

Изменения скорости звука на оси ПЗК по-разному влияют на время распространения тех и других сигналов. Уменьшение скорости звука у оси ПЗК приводит к увеличению времени распространения приосевых сигналов и практически не влияют на время распространения сигналов максимально отклоняющихся от оси ПЗК. Это и приводит к увеличению длительности сигнала, принятого на некотором расстоянии от источника, расположенного у оси ПЗК.

Однако расположение источника относительно оси ПЗК также влияет на длительность распространяющегося сигнала. В первом опыте ось ПЗК располагалась на глубине 25–40 м, во втором – на глубине 45–50 м. Источник располагался на глубине 60 м (по техническим причинам осуществлять подрывы зарядов ВВ на меньшей глубине было невозможно). Разница значений скорости звука на глубине подрыва и на оси ПЗК в первом опыте (~4 м/с) заметно превосходила эту разницу во втором опыте (~2 м/с).

На рис. 5б представлены результаты расчета разности максимальных значений времен распространения приосевых сигналов в этих опытах. Расчеты выполнялись по программе А. Вагина [11] для расположения источника и приемника, соответствующего реальным условиям проведения опытов, с учетом результатов всех гидрологических станций, выполненных в их обеспечение. Для второго опыта времена распространения этих сигналов заметно превышали соответствующие значения, полученные для первого опыта. На рисунке представлены изменения разности этих значений с расстоянием от источника. Согласие между расчетом (рис. 5б) и экспериментом (рис. 5а), как нетрудно заметить, хорошее.

Расчеты, проведенные для расположения источника и приемника на оси ПЗК, приводят к незначительным поправкам (на расстоянии от источника 500 км, не превышающим 250 мс для первого и 30 мс для второго опыта) к зарегистрированной нами в опытах длительности многолучевого сигнала.

В опытах, проведенных в различных регионах Мирового океана, как правило, на фоне монотонного увеличения длительности суммарного сигнала с расстоянием наблюдалось ее скачкообразное изменение, связанное с периодическим пропаданием (из-за отсечки дном) отдельных, наиболее отклоняющихся (при своем распространении) от оси ПЗК четверок элементарных сигналов. В Черном море, судя по рис. 5а, изменения такого рода едва просматриваются. Периодичность их для Черного моря составила 30–35 км, перепады в уровнях составили 0.2–0.3 с (для сигнала, принятого на расстоянии 450 км от источника, – не более 2–3% от полной его длительности), тогда как, например, для Японского моря наблюдались перепады в 0.5–0.6 с (что составило около 10–12% от полной длительности сигнала на том же расстоянии от источника).

Усеченная "τ–R"-характеристика

Для детального описания временнóй структуры звукового поля в ПЗК в свое время [12] была предложена "τ–R"-диаграмма (τ – соответствующее дистанции R опережение во времени распространения сигнала по отдельным лучам относительно сигнала, распространяющегося вдоль оси канала). При расположении источника и приемника на одном и том же горизонте "τ–R"-диаграмма представляет собой множество троек кривых. Центральная кривая в каждой тройке характеризует $\tau(R)$-соотношение для лучей, описывающих в пространстве целое число полных циклов.

Для оценки региональной изменчивости временнóй структуры в 90-х годах нами была предложена более компактная, усеченная "τ–R"-диаграмма, состоящая из одной кривой, характеризующей соотношение $\tau(R)$ для лучей, описывающих один полный цикл [13]. Такая кривая не дает представления о временнýх соотношениях между сигналами в классических четверках. Тем не менее, при соответствующем выборе масштаба осей (τ/N, R/N) она характеризует любой луч, описывающий в пространстве N целых циклов, и определяет, таким образом, местоположение любой четверки во временнóй структуре многолучевого сигнала. Для описания зависимости τ/N от R/N по аналогии с работой [14] нами использовалась степенная функция:

$$\tau/N = (a\,R/N)^p \qquad (1)$$

При анализе региональной изменчивости временнóй структуры звукового поля, формирующегося в ПЗК, оказалось, что для Черного моря показатель степени "p" равен 1.7. По сравнению со всеми рассмотренными нами регионами его значение для Черного моря – минимальное, кривая $\tau(R)$ не имеет резкого излома, характерного для большинства обследованных регионов. В этом заключалось принципиальное отличие Черноморского ПЗК от ПЗК, формирующихся в других регионах. Это связано с особенностью формирования приосевой части ПЗК в Черном море, на которое обращалось внимание выше.

На рис. 6 представлены усеченные "τ–R"-характеристики, построенные по экспериментальным материалам двух опытов, проведенных в разные годы практически вдоль одной и той же трассы. Помимо экспериментальных значений τ/N, на рисунке представлены кривые – результат аппроксимации (с применением метода наименьших квадратов) зависимости τ/N от R/N степенной функцией (1). Параметры a и p этой функции изменяются в пределах 0.0152–0.0142 и 1.73–1.85 соответственно. И если значения параметра a незначительно отличаются от значений этого параметра, полученных для других

Рис. 6. Усеченные "τ–R"-диаграммы, построенные по экспериментальным материалам, полученным в двух опытах.

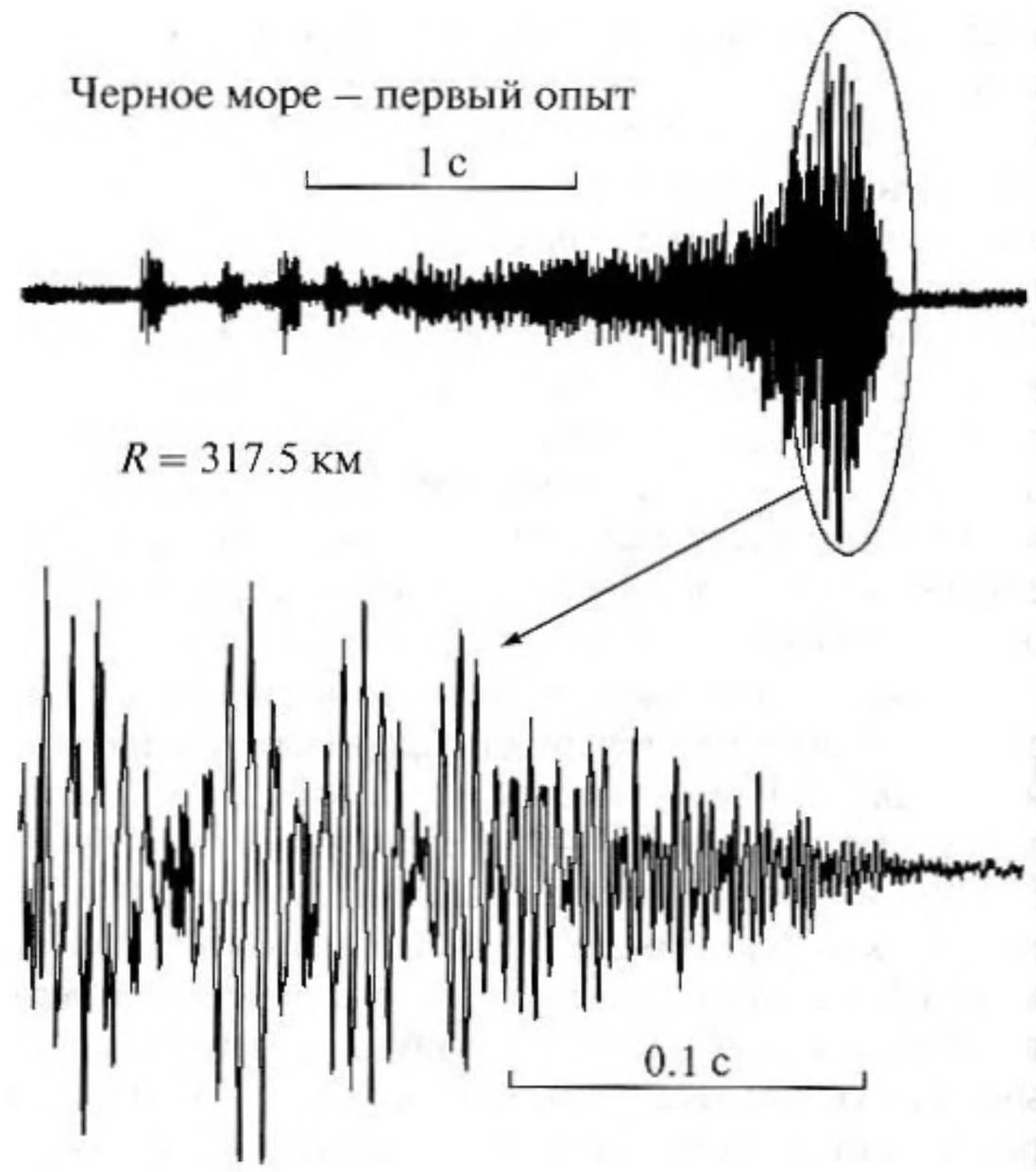

Рис. 7. Временна́я структура взрывного сигнала (вверху), принятого и зарегистрированного на расстоянии 317.5 км от источника в первом опыте, и его оконечной части (внизу), отображающей спектр взрывного сигнала.

регионов Мирового океана (0.01–0.0169), то значения степени p остаются минимальными по сравнению с ее значениями (1.97–6.3), полученными для других регионов [14].

Также как и для полной длительности многолучевого сигнала, основной причиной наблюдаемого в наших опытах различия параметров усеченной "τ–R"-характеристики для Черного моря, как показали расчеты, является межгодичная изменчивость температуры и глубины расположения ядра холодных вод, определяющих положение оси ПЗК.

Геометрическая дисперсия и спектроанализирующие свойства Черноморского ПЗК

Уже по результатам первого опыта было подмечено, что оконечная часть взрывного сигнала, принятого в Черном море на расстоянии 200 км и более от источника, представляет собой (см. рис. 7) квазигармонический сигнал с плавно меняющейся частотой [6, 9]. Более того, оконечная часть сигнала имеет явно блочную структуру, хорошо согласующуюся с блочной структурой спектра элементарного взрывного сигнала [15].

В отличие от подводного звукового канала, формируемого в Японском, Средиземном, Филиппинском и некоторых других морях, где наблюдается определенный "хаос" в структуре оконечной части взрывного сигнала [16], для Черного моря расчеты, выполненные в лучевом приближении по программе В.П. Тебякина [17], дают регулярную картину последовательности приходящих в точку приема классических четверок элементарных сигналов, распространяющихся вдоль приосевых лучей. Плотность прихода четверок в точку приема плавно уменьшается по мере увеличения угла (относительно горизонта), под которым они выходят из источника.

Учитывая эту особенность временно́й структуры сигнала, принимая во внимание фазовый (независящий от частоты) сдвиг на 90° при каждом касании каустики и пренебрегая незначительными изменениями расстояния между соседними четверками, нетрудно показать в лучевом приближении, что Черноморский ПЗК представляет собой систему, резонирующую на некоторой частоте f_0, меняющейся во времени в соответствии с изменением средней плотности прихода элементарных (однолучевых) сигналов в точку приема [10].

О степени устойчивости таких свойств Черноморского ПЗК можно судить по изменениям текущей частоты сигнала во времени, наблюдаемым в разные годы на разных расстояниях от источника.

Для экспериментальной оценки изменений частоты оконечной части сигнала во времени мы воспользовались в качестве ориентира положением минимумов спектральных характеристик взрывного сигнала, обусловленных интерференцией между ударной волной и первой пульсацией газового пузыря. В качестве примера на рис. 8 представлены результаты частотной фильтрации сигналов, принятых на расстоянии 287.1 и 288.5 км от источника соответственно в первом и втором опытах. Фильтрация производилась в диапазоне частот 50–

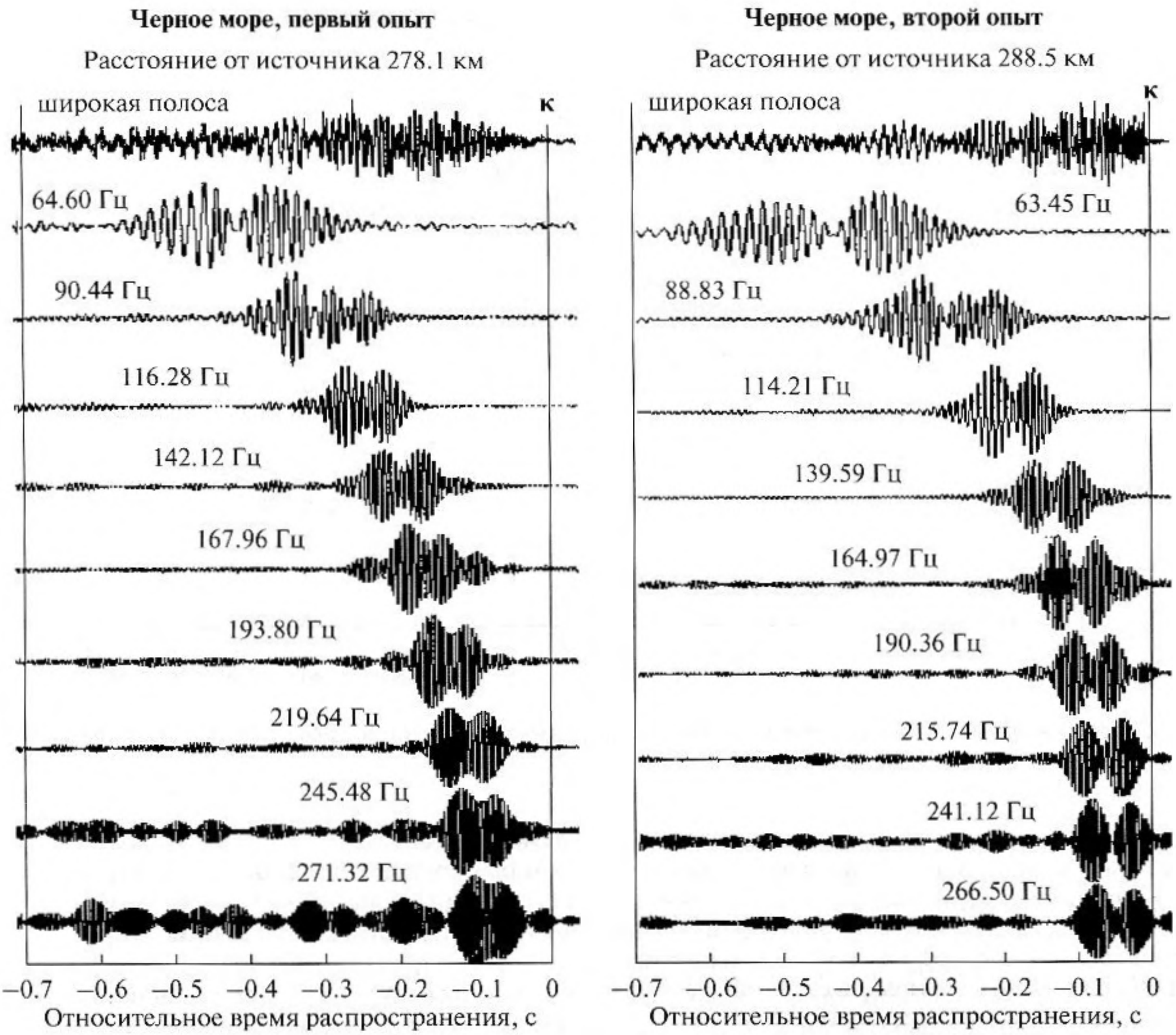

Рис. 8. Структура взрывных сигналов, принятых на расстоянии ~290 км от источника в первом и втором опытах, и результаты их спектрального анализа в полосовых фильтрах.

300 Гц. Полоса частотных фильтров определялась обратной величиной периода пульсации ($\Delta f = 1/T_0$), центральные частоты фильтров соответствовали последовательности интерференционных минимумов ($f_{n0} = (n + 1/2)\Delta f$) спектра взрывного сигнала. Период пульсации для этих двух взрывов различался примерно на 1.8%. Такое различие может быть обусловлено соответствующим (на 1.8%) различием в глубинах их подрыва. При средней глубине подрыва 60 м это различие составляет всего лишь ±0.55 м.

После фильтрации частотные составляющие сигнала строго согласовывались между собой по времени прихода сигнала к приемнику. На рисунке время распространения сигнала указано относительно момента окончания многолучевого взрывного сигнала (обозначенного буквой "к"). Этот момент во втором опыте фиксируется довольно четко. В первом опыте момент окончания сигнала менее определенен. Надежность фиксации минимумов этих сигналов на разных частотах также несколько различается. Практически всем минимумам, выявленным при частотной фильтрации сигналов (за исключением одного-двух на высоких частотах), находятся соответствующие минимумы в исходных (неотфильтрованных) сигналах.

По описанной методике с целью оценки степени устойчивости наблюдаемых спектроанализирующих свойств Черноморского ПЗК был проведен анализ частотно-временно́й характеристики сигналов, принятых в первом и втором опытах на расстоянии от источника ~195, ~288, ~397 и ~495 км. Зависимость текущей частоты сигнала от времени, полученная для этих сигналов по материалам проведенного спектрального анализа, представлена на рис. 9. Налицо различие в частотно-временны́х характеристиках сигналов принятых на одной и той же трассе в разные годы. В первом опыте с удалением от источника кривые $f(t)$ заметно смещаются в сторону уменьшения относительных времен рас-

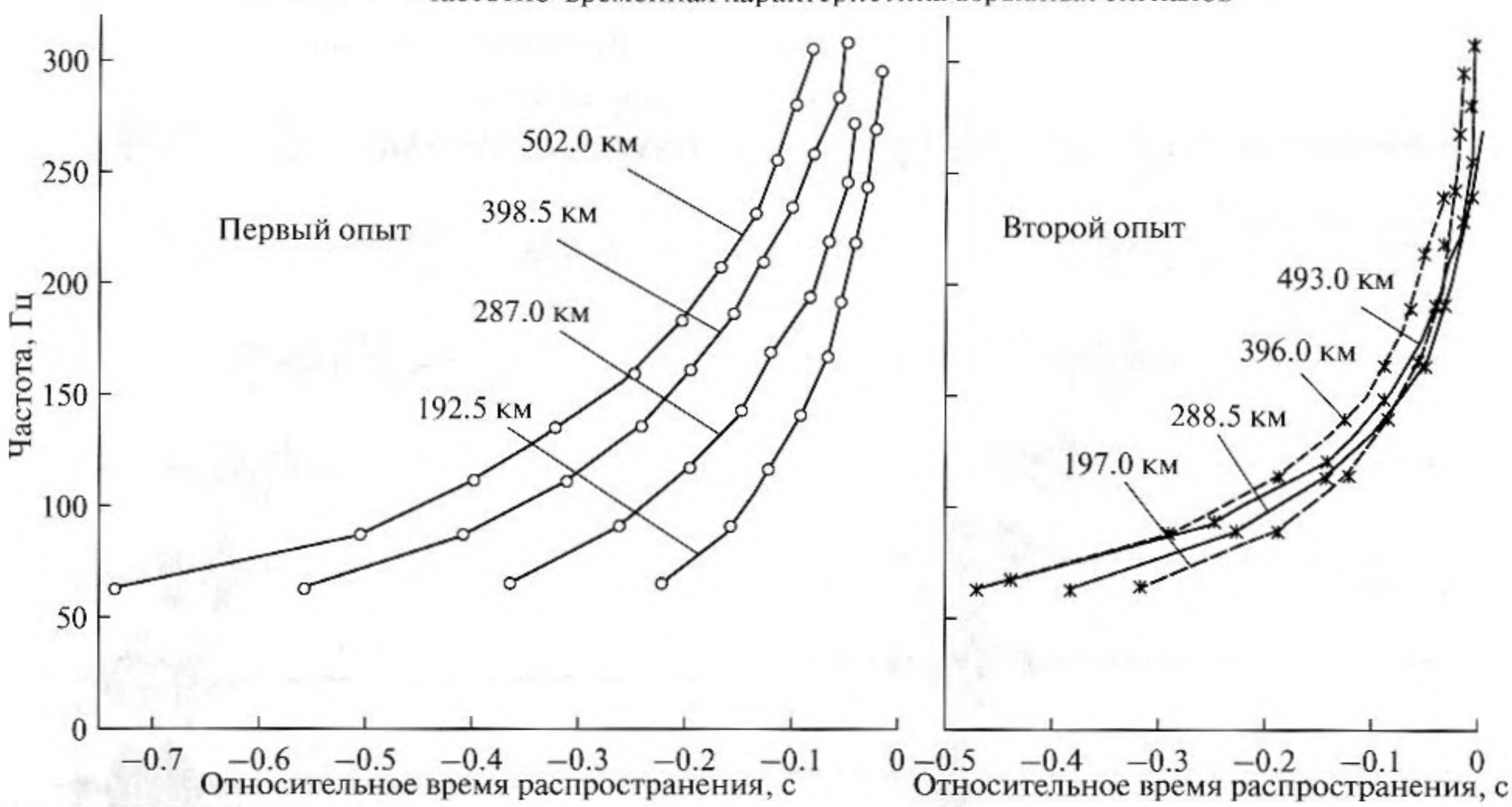

Рис. 9. Частотно-временны́е характеристики сигналов, принятых на расстоянии ~200, ~290, ~400 и ~500 км от источника в первом и втором опытах.

пространения, хорошо разделяясь между собой. Во втором опыте кривые $f(t)$ при увеличении расстояния до источника изменяются незначительно и нерегулярно (не всегда в одну и ту же сторону). При этом спектроанализирующие свойства Черноморского ПЗК в этих двух опытах (разделенных во времени на 7 лет!) проявляются достаточно ярко.

Для выяснения основных причини произошедших изменений частотно-временны́х характеристик сигналов была проведена серия расчетов структуры звукового поля, формируемой на расстоянии 290 км от источника. Расчеты выполнялись в лучевом приближении по программе Тебякина [17].

Реально с изменением угла выхода луча из источника, как показали расчеты, интервал между соседними четверками (Δt) и длительность отдельных четверок изменяются по разным законам. При значении угла выхода луча из источника ~2.5° длительность четверки оказывается равной расстоянию между центрами четверок. Последний сигнал одной четверки приходит одновременно с первым сигналом четверки, следующей за ней. При увеличении угла выхода соответствующих лучей из источника четверки полностью разделяются. При его уменьшении соседние четверки частично перекрываются.

Анализ свойств такой системы четверок показал, что она резонирует на частоте $F = 1/(2\Delta t_{\text{ср}})$, где $\Delta t_{\text{ср}}$ – усредненное значение расстояний между центрами четверок, участвующих в формировании частотного фильтра. Изменение числа таких четверок приводит к изменению числа дополнительных максимумов частотной характеристики системы, уровень которых составляет 0.2–0.3 и менее по сравнению с основным максимумом. С увеличением числа четверок N, принимающих участие в формировании частотного фильтра, его добротность растет. Однако, начиная с $N = 15$–17, резонансная кривая начинает уширяться за счет дополнительных максимумов, прилегающих непосредственно к основному. Следует также отметить, что среднее значение интервала между соседними четверками (из четверок, принимающих участие в формировании частотного фильтра) практически не отличается от значения этого интервала для средней четверки.

Рассчитав изменения интервала между четверками в зависимости от времени распространения, нетрудно оценить частотно-временну́ю характеристику Черноморского ПЗК. На рис. 10 представлены такие характеристики ПЗК для расстояния от источника 290 км. На этом же рисунке представлены экспериментальные значения частот соответствующих минимумов в спектре сигнала и положение этих минимумов на оси относительных времен (скорректированное на период пульсации газового пузыря). Рассчитанные для двух опытов частотно-временны́е характеристики сигналов заметно различаются между собой. В эксперименте наблюдаются аналогичные различия, хотя и менее существенные. Характер изменений текущей частоты во времени по результатам расчета неплохо согласуется с экспериментом.

Рис. 10. Частотно-временна́я характеристика взрывных сигналов, принятых в Черноморском ПЗК на расстоянии от источника ~290 км (расчет и экспериментальные данные).

Аналогичные расчеты, выполненные для расстояний от источника 200, 400 и 500 км, подтверждают наблюдаемые в этих опытах существенные различия в характере изменений частотно-временны́х характеристик оконечной части сигналов с расстоянием. По-видимому, основной причиной таких межгодичных изменений частотно-временны́х характеристик сигналов с расстоянием от источника следует признать изменения приосевой части профиля $c(z)$ (особенно нижней границы ПЗК), а также глубины залегания оси ПЗК и температуры холодного промежуточного слоя.

Основные результаты проведенных исследований

В заключение сформулируем основные результаты проведенного анализа экспериментальных материалов, полученных в двух опытах по дальнему распространению взрывных сигналов, проведенных в центральной части Черного моря вдоль одной и той же трассы с разницей во времени 7 лет.

Анализ гидрологических условий проведения опытов показал:

– изменения скорости звука на глубинах 50–250 м, формирующие нижнюю границу Черноморского ПЗК, принципиально отличаются от соответствующих участков профиля $c(z)$, формируемых в других регионах Мирового океана: при заглублении с 40–50 м (на 5–10 м ниже горизонта расположения оси канала) до 200–250 м градиент скорости звука монотонно уменьшается (а не увеличивается, как в большинстве регионов Мирового океана) в первом опыте с 0.08–0.12 до 0.02 1/с, во втором опыте с 0.16–0.24 до 0.02 1/с.

Сравнительный анализ временно́й структуры звукового поля, зарегистрированной в двух опытах, подтвердил устойчивость ранее выявленных особенностей Черноморского ПЗК, а именно:

– несмотря на сравнительно небольшую глубину Черного моря (2000–2200 м), рост длительности многолучевого взрывного сигнала, распространяющегося в ПЗК, с расстоянием происходит быстрее, чем в других регионах Мирового океана при сопоставимых глубинах; межгодичные изменения коэффициента пропорциональности между длительностью сигнала и расстоянием от источника определяются межгодичными изменениями температуры и глубины расположения ядра холодного промежуточного слоя, определяющего местоположение оси ПЗК;

– усеченная "τ–R"-диаграмма для структуры звукового поля, формируемого в Черноморском ПЗК, не имеет резкого излома, характерного для большинства обследованных регионов Мирового Океана, показатель степенной функции, аппроксимирующей "τ–R"-диаграмму, минимальный (1.75–1.85) по сравнению с его значениями для других регионов Мирового океана, его незначительная межгодичная изменчивость определяется межгодичными изменениями параметров ядра холодного промежуточного слоя;

– геометрическая дисперсия, проявляющаяся в спектроанализирующих свойствах Черноморского ПЗК, прекрасно наблюдалась как в первом, так и во втором опытах, хотя и претерпевала существенные межгодичные изменения; экспериментально выявленные изменения частотно-временно́й характеристики оконечной части сигналов при удалении от источника для первого и второго опытов заметно

различаются; проведенные расчеты дают основание считать основной причиной такого различия межгодичные вариации приосевой части профиля изменения скорости звука с глубиной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Суховей В.Ф.* Моря Мирового океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 288 с.
2. *Залогин Б.С., Косарев А.Н.* Моря. М.: Мысль, 1999. 400 с.
3. *Скопинцев Б.А.* Формирование современного химического состава вод Черного моря. Л.: Гидрометиздат, 1975. 336 с.
4. *Богуславский С.Г., Казаков С.И., Перов М.Г., Берестова Е.В.* Особенности температурного поля холодного промежуточного слоя Черного моря // Океанология. 2001. Т. 41. № 4. С. 493–501.
5. *Толстой И., Клей К.С.* Акустика океана. Пер. с англ. М.: Мир, 1969. 302 с.
6. *Вадов Р.А.* Спектроанализирующие свойства подводного звукового канала / XI Всесоюзная акуст. конференция, доклады, секция ДАН СССР. М., 1991. С. 47–50.
7. *Макарова О.Б., Попов О.Е.* Расчет формы импульсного сигнала в плоскослоистом волноводе / XI Всесоюзная акустическая конференция, доклады, секция ДАН СССР. М., 1991. С. 59–62.
8. *Вадов Р.А.* Региональная изменчивость временнóй структуры звукового поля в подводном звуковом канале // Океанология. 2000. Т. 40. № 2. С. 165–173.
9. *Вадов Р.А.* Региональные особенности формирования временнóй структуры звукового поля в подводном звуковом канале / В кн. Акустика океана, сб. трудов школы-семинара акад. Л.М. Бреховских. М.: ГЕОС, 1998. С. 156–160.
10. *Вадов Р.А.* Некоторые результаты исследований структуры звукового поля точечного источника в подводном звуковом канале Черного моря // Акуст. журн. 1998. Т. 44. № 6. С. 614–621.
11. *Вагин А.В.* Расчет лучевых картин, суммарного звукового поля в точке, его угловой, временнóй, фазовой и энергетической структуры в двумерно-неоднородной среде / Отчет АКИН. М., 1974. 63 с.
12. *Ewing W.M., Worzel J.L.* Long-range sound transmission // Geol. Soc. Amer. Mem. 1948. V. 27. № 3. P. 1–32.
13. *Вадов Р.А.* Региональные различия временнóй структуры звуковых полей точечного источника, формируемой в подводном звуковом канале // Акуст. журн. 2006. Т. 52. № 5. С. 624–635.
14. *Лерой К.* Распространение звука в Средиземном море / В кн. Подводная акустика. Пер. с англ. М.: Мир, 1970. С. 274–324.
15. *Вадов Р.А.* О некоторых гидроакустических характеристиках взрывного сигнала // Акуст. журн. 1994. Т. 40. № 4. С. 677–679.
16. *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.
17. *Тебякин В.П. и др.* Raymod52 – базовый комплекс программ для вычисления звуковых полей в слоисто – неоднородном океане лучевым методом / Отчет АКИН. М., 1990.