

УДК 534.23; 534.4; 551.463.284

## АКУСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КВАЗИСТАЦИОНАРНЫХ ТРАСС Часть 2 ОЦЕНКА ФИЗИЧЕСКОЙ АДЕКВАТНОСТИ АКУСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

© Л.Н. Замаренова, М.И. Скипа, 2009

Отделение гидроакустики Морского гидрофизического института НАН Украины, г. Одесса

З точки зору концептуального підходу до досліджень звукового поля на шельфі північно-західної частини Чорного моря запропонована акустична модель квазістаціонарних трас. В першій частині роботи, що опублікована в Гідроакустичному журналі №6'2009, розглянуті методика вимірювань і складові акустичної моделі – гідролого-акустична і геоакустична модель, теоретичний опис звукового поля. В другій частині роботи розглянуті питання адекватності акустичної моделі квазістаціонарних трас реальним умовам поширення звуку.

С точки зору концептуального підходу к исследованиям звукового поля на шельфе северо-западной части Черного моря предложена акустическая модель квазистационарных трасс. В первой части работы, опубликованной в Гидроакустическом журнале №6'2009, рассмотрены методика измерений и составляющие акустической модели – гидролого-акустическая и геоакустическая модель, теоретическое описание звукового поля. Во второй части рассмотрены вопросы адекватности акустической модели квазистационарных трасс реальным условиям распространения звука.

In the viewpoint of conceptual method to sound field researches in the Black Sea North-West shelf the quasi-stationary lines acoustic model is proposed. The measurement method and the acoustic model components – hydro-acoustic, geo-acoustic model, theoretic sound field description – are considered in the first part of the work published in Hydroacoustical zhurnal #6'2009. Adequacy problems of the quasi-stationary lines acoustic model to real sound propagation conditions are considered in the second part of the work.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА, АКУСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ, ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ, АНТЕННА, СТРАТИФИКАЦИЯ

### 3. ОЦЕНКА ФИЗИЧЕСКОЙ АДЕКВАТНОСТИ АКУСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТРАСС

Адекватность акустической модели гидроакустических трасс условиям распространения звука оценивается степенью соответствия экспериментальных данных результатам численного моделирования. Численное моделирование звукового поля реализовано в серии расчетов по теории нормальных волн (см. часть 1) при различных величинах  $c_l$ ,  $\delta_l$  и  $m$ . Значения скорости продольных волн в жидком однородном поглощающем полупространстве принимались равными,  $c_l=1540-1720$  м·с<sup>-1</sup>; тангенса угла потерь,  $\delta_l=0.005-0.02$ ; отношения плотностей нижнего полупространства и водного слоя,  $m=1.45-1.98$ . Обеспеченность экспериментальными данными достигнута за счет измерений по двум методикам (см. часть 1). Измерения по методике стационарной установки приемной антенны и излучателя в фиксированных точках проводились на квазистационарной трассе № 2 с плоскопараллельными границами. Однако небольшое число фиксированных точек дает возможность сравнения только амплитудных характеристик звукового поля, рассчитанных и измеренных. Для оценки же пространственной структуры привлечены измерения по методике сканирования квазистационарных трасс. Глубина нахождения гидрофонов приемной антенны уточнялась в каждой серии измерений.

Рассмотрим физическую адекватность акустической модели трасс отдельно для двух случаев вертикального распределения скорости звука – приповерхностного звукового канала и квазиоднородного слоя, а также придонного звукового канала.

### 3.1 Условия положительной рефракции и квазиоднородного слоя

При типичной зависимости скорости звука от глубины в конце осеннего и начале зимнего гидрологического сезона, рис. 3.1, распространение звука происходит в приповерхностном звуковом канале или квазиоднородном слое и сопровождается отражениями от поверхности моря. Измерения по методике стационарной установки излучателя проводились в конце ноября – начале декабря 1982 г. при зыби юго-восточных направлений с высотой волн ~15 дм, по методике сканирования трассы – в конце декабря 1983 г. при волнении восточных направлений с высотой волн 12.5–15 дм.

Обратимся к результатам численного моделирования. Все нормальные волны (НВ) имеют комплексные волновые числа, т.е. звуковое поле создается затухающими НВ. При одном и том же вертикальном распределении скорости звука коэффициенты затухания НВ

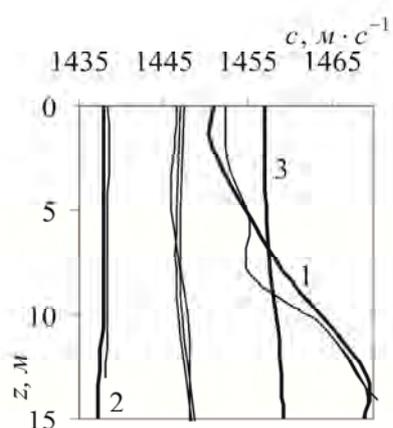


Рис. 3.1 – Зависимость скорости звука от глубины в ноябре–декабре

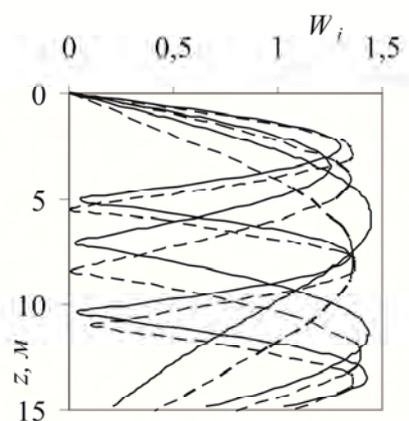


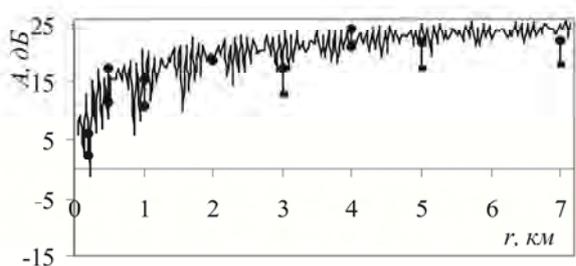
Рис. 3.2 – Зависимость СФ от глубины для ВРСЗ-1 и ВРСЗ-3

соответствующих номеров могут отличаться в несколько раз, увеличиваясь с ростом, как  $c_l$ , так и  $\delta_l$ . Наибольшее влияние на звуковое поле оказывает скорость продольных волн, второй по значимости фактор – коэффициент поглощения и третий – плотность. Наилучшее соответствие расчетных и экспериментальных данных (ноябрь–декабрь 1982 г.) было достигнуто при следующих характеристиках нижнего полупространства:  $c_l=1688$  и  $1700 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ ,  $\delta_l=0.007$ ,  $m=1.6$ . Эти параметры нижнего полупространства и являются базовыми для акустической модели квазистационарных трасс.

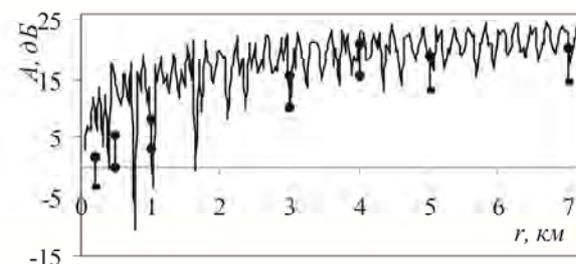
На рис. 3.2 показана зависимость распределения модулей нормированных собственных функций (СФ) от глубины,  $W_i(z)$ , для двух случаев вертикального распределения скорости звука – ВРСЗ-1 и ВРСЗ-3, отмеченных цифрами 1 и 3 на рис. 3.1, и параметров нижнего полупространства  $c_l=1700 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ ,  $\delta_l=0.007$ ,  $m=1.6$ . Сплошными линиями на рис. 3.2 показаны собственные функции для ВРСЗ-1, пунктирными – для ВРСЗ-3. Число пучностей СФ соответствует ее номеру. Как свидетельствуют расчеты, различие СФ проявляется в большей степени в смещении пучностей по глубине, чем в изменении их амплитуд. Наибольшие различия характерны для первых СФ, разница глубин нахождения пучностей которых, составляет 1.65 м.

Анализ условий эксперимента в период измерений,

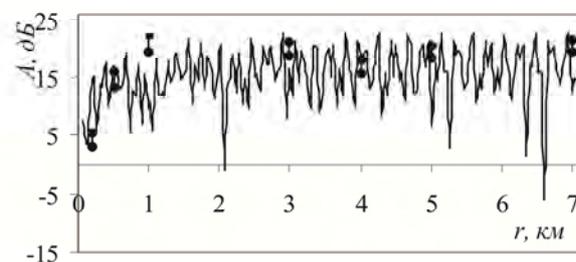
гидролого-акустических и гидрометеорологических, привел к выводу о возможности рассмотрения данных, полученных в разных сериях измерений, безотносительно к вертикальному распределению скорости звука. Рис. 3.3 и 3.4 иллюстрируют степень соответствия результатов эксперимента и численного моделирования – аномалии распространения звука от расстояния  $A(r)$  – при глубине приема  $z_r = 6.4$  м (а), 9.3 м (б), 12.2 м (в) и глубине излучения  $z_s = 8.1$  м и 12.7 м, соответственно. Исходные данные для численного моделирования следующие – ВРСЗ-1,  $c_l = 1700$  м·с<sup>-1</sup>,  $\delta_l = 0.007$ ,  $m = 1.6$  (вариант I), результаты расчетов показаны сплошной линией. Экспериментальные данные обозначены вертикальным отрезком, объединяющим диапазон их изменения при многократных измерениях вдоль трассы, знаком «•» отмечены данные измерений, которые демонстрирует наилучшую степень соответствия расчету для варианта I.



а)

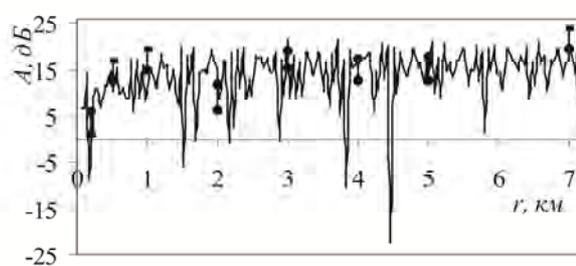


б)

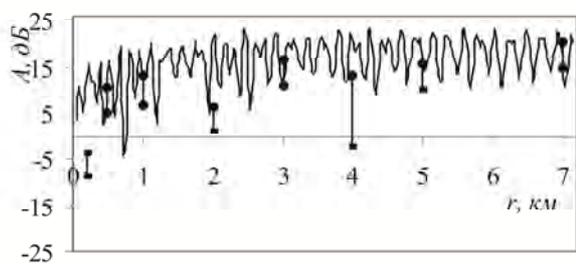


в)

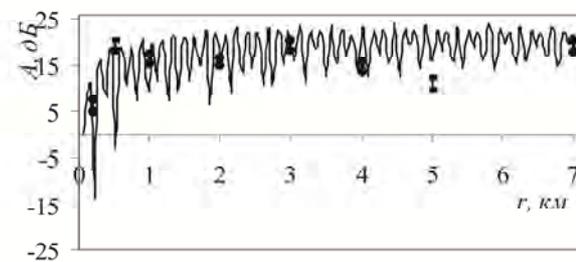
Рис. 3.3 – Зависимость аномалии распространения от расстояния в ноябре–декабре, рассчитанная (вариант I) и измеренная:  $z_s = 8.1$  м;  $z_r = 6.4$  м (а), 9.3 м (б), 12.2 м (в)



а)



б)



в)

Рис. 3.4 – Зависимость аномалии распространения от расстояния в ноябре–декабре, рассчитанная (вариант I) и измеренная:  $z_s = 12.7$  м;  $z_r = 6.4$  м (а), 9.3 м (б), 12.2 м (в)

Фазовые скорости  $c_{phi i}$  и коэффициенты затухания  $\beta_{NW i}$  НВ, их амплитуды  $|A_{NW i}|$  в зависимости от глубины излучателя  $z_s$  и приемника  $z_r$  приведены в табл. 3.1 для варианта I и варианта II данных (ВРСЗ-3,  $c_l=1688 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ ,  $\delta_l=0.007$ ,  $m=1.6$ ). Фазовая скорость всех НВ превышает скорость звука в водном слое, а шестой – скорость продольных волн в жидком полупространстве.

Структура звукового поля обусловлена интерференцией нормальных волн. Данные измерений, полученные для каждой фиксированной точки, значительно отличаются по амплитуде в зависимости от глубины излучения и приема (см. рис. 3.3–3.4). Интерференционная картина звукового поля в мелком море является основной особенностью его структуры. Период интерференции нормальных волн –

$$\Lambda_{i,j} = 2\pi/(k_i - k_j), \quad (3.1)$$

где  $k_i, k_j$  – волновые числа НВ с номерами  $i$  и  $j$ .

В табл. 3.2 приведены периоды интерференции НВ для варианта данных I и II, значения которых, так же, как и значения амплитуд НВ, будут использованы в дальнейшем для интерпретации экспериментальных данных, полученных при сканировании трассы. Анализ рассчитанной пространственной структуры звукового поля показывает, что выделяются и другие периоды, не связанные с интерференцией НВ, имеющие больший пространственный размер, зависящие от глубины, как излучения, так и приема. Пространственный период изменения звукового поля, наблюдаемый, например, на рис. 3.3 а, превышает период интерференции первой и третьей НВ в 7–8 раз, его структуру можно сравнить с биениями основного периода интерференции.

Таблица 3.1 – Характеристики нормальных волн в ноябре–декабре, вариант I и II

i	Вариант I								Вариант II				
	$c_{phi i}$ , м·с <sup>-1</sup>	$\beta_{NW i}$ , дБ·км <sup>-1</sup>	$ A_{NW i} $						$c_{phi i}$ , м·с <sup>-1</sup>	$\beta_{NW i}$ , дБ·км <sup>-1</sup>	$ A_{NW i} $		
			$z_s=8.1 \text{ м}$			$z_s=12.7 \text{ м}$					$z_s=12.1 \text{ м}$		
			$z_r, \text{ м}$			$z_r, \text{ м}$					$z_r, \text{ м}$		
6.4	9.3	12.2	6.4	9.3	12.2	6.4	9.3	12.2					
1	1465	0.06	1.8	1.4	0.8	0.7	0.6	0.3	1463	0.21	1.3	1.2	0.8
2	1483	0.71	0.2	0.6	0.8	0.4	1.4	1.8	1480	0.93	1.0	1.0	1.9
3	1513	1.89	1.3	1.0	1.5	1.3	1.1	1.6	1510	2.01	0.8	0.9	1.0
4	1557	3.46	0.3	0.3	0.1	0.8	0.8	0.1	1555	3.58	0.1	0.1	0.0
5	1622	6.28	0.1	0.5	1.1	0.2	0.1	0.2	1619	6.66	0.2	0.3	0.8
6	1709	40.48	0.1	0.1	0.1	1.5	1.5	1.6	1705	53.46	1.8	1.9	1.9

Таблиця 3.2 – Періоди інтерференції НВ для варіанта вихідних даних I і II в листопаді–грудні

i	$\Lambda_{i,j}$ , м (I)			$\Lambda_{i,j}$ , м (II)		
	j			j		
	2	3	4	2	3	4
1	223	89	48	249	92	40
2	–	149	61	–	147	48
3	–	–	102	–	–	71

В случае варианта I при глубине излучателя 8.1 м наибольший коэффициент возбуждения имеет первая и третья нормальные волны (см. рис. 3.2, сплошные линии). Экспериментально измеренные значения аномалии распространения при горизонте излучателя  $z_s=8.1$  м для всех горизонтов приема  $z_r$  (6.4, 9.3 и 12.2 м) довольно хорошо согласуются с теоретической зависимостью аномалии распространения от расстояния (см. рис. 3.3). Интерференционная структура звукового поля, рассчитанная теоретически, характерна для всех горизонтов приема, и сглаживается с расстоянием

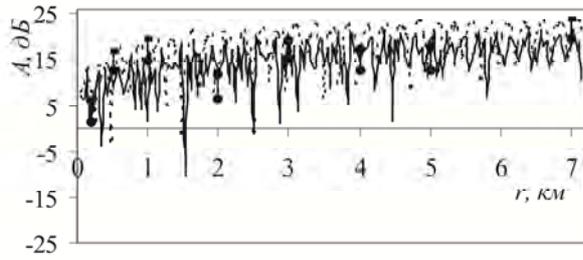
при глубине приема 6.4 и 9.3 м. Для интерпретации интерференционной картины обратимся к характеристикам нормальных волн: их амплитудам  $|A_{NWi}|$  и коэффициентам затухания  $\beta_{NWi}$ . При глубине излучателя 8.1 м и приемника 6.4 м интерференция обусловлена взаимодействием 1 и 3 НВ, при глубине приемника 9.3 м и 12.2 м – 1, 2 и 3 НВ. Доминирующим в интерференционной картине для всех глубин приема является период интерференции 1 и 3 НВ. С повышением глубины приема пространственная структура звукового поля усложняется. Появляются глубокие минимумы зависимости аномалии распространения от расстояния, число которых возрастает при увеличении глубины приема. Значения аномалии переходят в отрицательную область при  $z_r=9.3$  м в диапазоне расстояний (0.7–1) км, а при  $z_r=12.2$  м – в диапазоне (2–6.6) км. Значительная глубина минимумов (наибольшая разница между рассчитанными соседними локальными максимумами и минимумами) наблюдается при  $z_r$  9.3 и 12.2 м на отдельных участках трассы. Глубина минимумов достигает  $|28|$  дБ.

При повышении глубины излучения до 12.7 м (см. рис. 3.4) экспериментально измеренные значения также довольно хорошо согласуются с теоретической зависимостью  $A(r)$ . Сложная интерференционная структура звукового поля характерна для всех горизонтов приема и несколько сглаживается с расстоянием. Как показывают зависимости модуля нормированных СФ от глубины (см. рис. 3.2, сплошные линии), при глубине излучателя 12.7 м лучше всего возбуждаются вторая и третья НВ. По данным об амплитудах НВ (см. табл. 3.1) при глубине приемника 6.4 м в интерференции участвуют 1, 3 и отчасти 2 НВ, при глубине приемника 9.3 м и 12.2 м – 2, 3 и отчасти 1 НВ. Самая большая степень изрезанности зависимости аномалии распространения от расстояния наблюдается при положении приемника на глубине 6.4 м – на всем протяжении трассы, с глубокими минимумами, с переходом величины аномалии в отрицательную область, до  $\sim|30|$  дБ. При других глубинах приема минимумы с переходом аномалии в отрицательную область наблюдаются только в начале трассы – с понижением глубины приема их глубина уменьшается до  $|11-23|$  дБ.

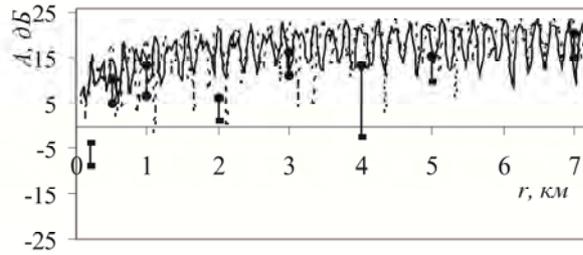
Как показывают рис. 3.3 и 3.4, экспериментальные данные довольно хорошо отслеживают пространственную структуру звукового поля, в том числе глубокие минимумы и отрицательные значения аномалии. Сравнение данных расчета и эксперимента показывает достаточно хорошее их соответствие в пределах методической погрешности измерений, либо полное, либо с ошибкой порядка (1–5) дБ. Отличия в (1–5) дБ при глубине излучения  $z_s=8.1$  м зафиксированы в следующих точках трассы: 0.2 км ( $z_r=9.3$  м); 1 км ( $z_r=12.2$  м); 3 км ( $z_r=6.4$  м); 5 км ( $z_r=6.4, 9.3$  м) и 7 км ( $z_r=6.4$  м, 9.3 м). При глубине излучения  $z_s=12.7$  м такие отличия наблюдаются в точках трассы: 0.5 км ( $z_r=6.4$  м, 12.2 м); 1 км ( $z_r=6.4$  м); 2 км ( $z_r=6.4, 9.3$  м); 5 км ( $z_r=9.3$  м, 12.2 м) и 7 км ( $z_r=6.4$  м). Ошибки величиной 5–9 дБ – на расстоянии 0.2 км ( $z_s=12.7$  м,  $z_r=9.3$  м) и 14 дБ – на расстоянии 4 км ( $z_s=12.7$  м,  $z_r=9.3$  м). В остальных случаях данные эксперимента вписываются в теоретическую зависимость  $A(r)$ .

Для объяснения причин несоответствия данных расчета и эксперимента оценим влияние вертикального распределения скорости звука, скорости продольных волн нижнего полупространства и глубины размещения излучателя. Влияние вертикального распределения скорости звука и скорости продольных волн полупространства на зависимость  $A(r)$  иллюстрирует рис. 3.5. Сплошные линии соответствуют исходным данным варианта I, пунктирные – данным варианта II,  $z_s=12.1$  м. Все измеренные значения вписываются в расчетные зависимости, за исключением горизонта приема 9.3 м, для которого ошибка на расстоянии 200 м и 4 км для варианта II сохраняется. Различия пространственной структуры для двух вариантов данных проявляются в смещении локальных максимумов и минимумов аномалии и в глубине минимумов аномалии, что служит одним из объяснений несоответствия расчетных и экспериментальных данных. Существенное влияние может оказать и погрешность определения глубины размещения приемо-передающих систем. В качестве иллюстрации влияния этого фактора на рис. 3.6 приведена зависимость аномалии от расстояния для варианта данных I при глубине излучения 12.7 м (сплошная линия), 12.1 м (пунктирная) и 11.3 м (штрихпунктирная). Особенно заметно изменение амплитуд локальных экстремумов и их смещение по расстоянию при глубине приема 6.4 м и 9.3 м. Остается еще один фактор, который влияет на степень соответствия данных расчета и эксперимента – методическая погрешность определения расстояния. Вероятно и совместное влияние перечисленных выше факторов.

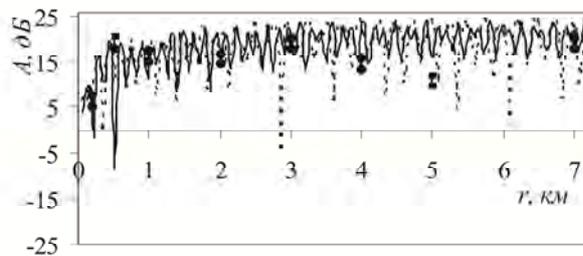
Таким образом, с точки зрения амплитудных характеристик наблюдается достаточно хорошее соответствие экспериментально полученных значений аномалии распространения по методике стационарной установки излучателя ее теоретической зависимости от расстояния. Исключение составляют данные, соответствующие глубине излучения 12.7 м и приема 9.3 м на расстоянии 4 км.



а)

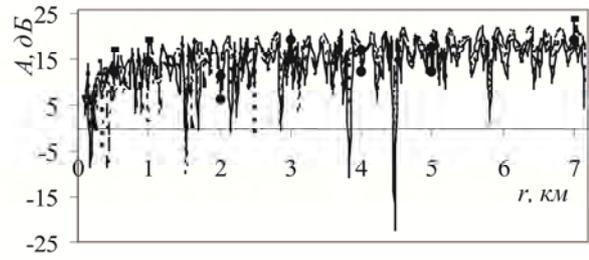


б)

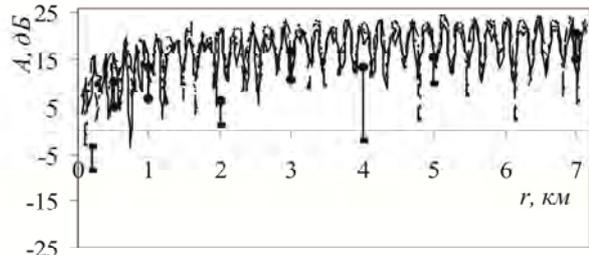


в)

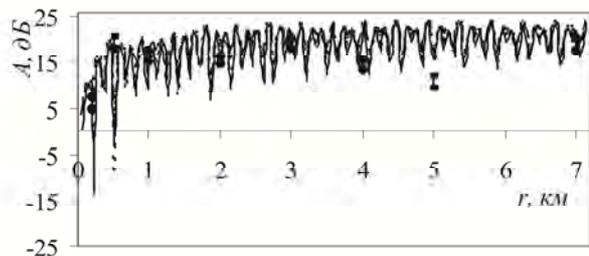
Рис. 3.5 – Зависимость аномалии распространения от расстояния, измеренная и рассчитанная для варианта исходных данных I и II и  $z_s = 12.1$  м при  $z_r = 6.4$  м (а), 9.3 м (б), 12.2 м (в)



а)



б)

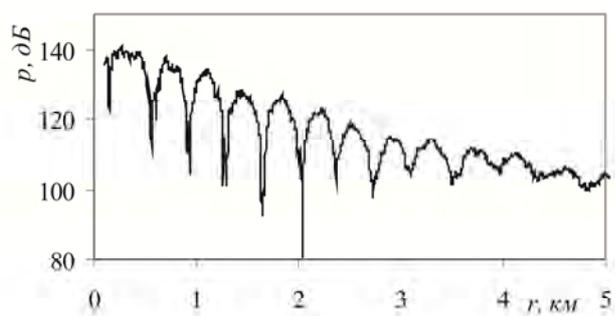


в)

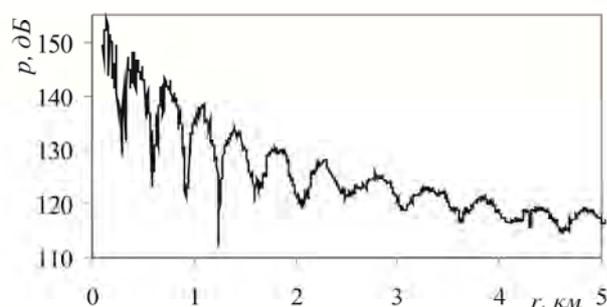
Рис. 3.6 – Зависимость аномалии распространения от расстояния, измеренная и рассчитанная для варианта данных I и  $z_s = 12.7$  м, 12.1 м и 11.3 м при  $z_r = 6.4$  м (а), 9.3 м (б), 12.2 м (в)

Обратимся к результатам измерений звукового поля, выполненным по методике сканирования трассы и воспользуемся приведенным выше анализом интерференционной структуры звукового поля, полученной численным методом. Глубина буксировки излучателя составляла  $z_s \sim 6$  м. Измерения в конце декабря 1983 г. проводились на той же трассе № 2, что и измерения по методике стационарной установки приемо-передающих систем. Вблизи приемной антенны скорость звука в зависимости от глубины была практически неизменной, соответствующей условиям квазиоднородности (см. рис. 3.1, кривая 2). На рис. 3.7 показана зависимость нормированного звукового давления от расстояния  $p(r)$  (см. часть 1) при глубине приема  $z_r = 4.85$  м (а), 6.3 м (б) и 9.2 м (в), соответственно (для лучшего отражения пространственной структуры расстояние ограничено 5 км).

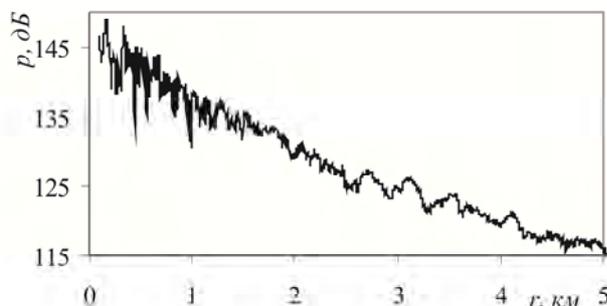
Как показывают результаты численного моделирования, в случае глубины излучения  $z_s \sim 6.0$  м наилучшим образом возбуждается первая и вторая НВ, в меньшей степени – третья. По результатам эксперимента можно говорить о формировании звукового



а)



б)



в)

Рис. 3.7 – Залежність звукового тиску від відстані в декабрі (експеримент) при  $z_s \sim 6.0$  м і  $z_r = 4.85$  м (а), 6.3 м (б), 9.2 м (в)

поля чотирьма НВ, взаємодією яких визначаються і просторові періоди його зміни. На всіх горизонтах прийому виділяється період зміни аномалії, що складається з 300–350 м, який не пов'язаний з періодом інтерференції НВ. З збільшенням відстані структура звукового поля згладжується. При  $z_r = 4.85$  м, рис. 3.7 а, визначаються періоди, близькі до 50 м, що відповідають інтерференції 1 і 4 або 2 і 4 НВ. При  $z_r = 6.3$  м, рис. 3.7 б, визначаються періоди 40–66 м (інтерференція 1 і 4, 2 і 4 НВ), ~80 м (1 і 3 НВ) і ~200 м (1 і 2 НВ), що відповідає розрахованим періодам інтерференції. При глибині прийому  $z_r = 9.2$  м просторові періоди зміни звукового поля складають близько 213 м (інтерференція 1 і 2 НВ), 111–170 м (2 і 3, 3 і 4 НВ), 72–80 м (1 і 3 НВ). Таким чином, експериментальні дані, отримані при скануванні траси, також адекватно відображають інтерференційну картину звукового поля, очікувану теоретично.

Підводячи ітог результатів аналізу структури звукового поля, спостережуваної експериментально і отриманої теоретичним шляхом, ми приходимо до наступного висновку – акустична модель квазістационарної траси адекватно відображає умови поширення звуку на шельфі північно-західної частини Чорного моря в умовах приповерхневого звукового каналу і квазіоднорідного водного шару.

### 3.2 Умови отрицательной рефракции

Наблюдающаяся в начале сентября стратификация вод определяет наименее благоприятные условия для распространения звука, и величина потерь энергии звуковых волн близка к наибольшим внутрigoдовым значениям. Адекватность акустической модели

квазистационарной трассы № 2 условиям распространения звука в приповерхностном звуковом канале и квазиоднородном слое, полученная при следующих параметрах жидкого однородного поглощающего полупространства –  $c_l=1700 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ ,  $\delta_l=0.007$ ,  $m=1.6$ , определяет использование этих же параметров для моделирования звукового поля в придонном звуковом канале. Экспериментальные исследования по обеим методикам проводились в одинаковых гидрометеорологических условиях, в течение трех суток, при волнении моря с высотой волн  $\sim 3$  дм. Излучатель находился на глубине  $\sim 6$  м, прием сигналов осуществлялся одновременно парами гидрофонов на глубинах 4.85 м и 12.1 м; 7.75 м и 9.2 м. Измерения проводились по первой методике – на трассе № 2, по второй – на двух трассах. Число фиксированных точек было выбрано больше, чем в зимний период.

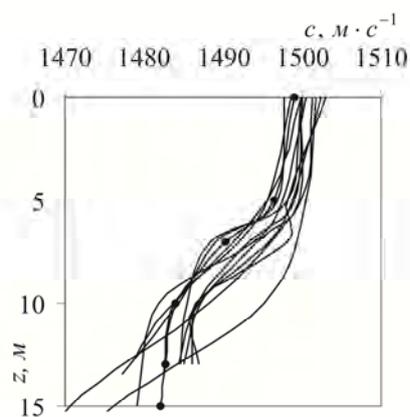


Рис. 3.8 – Зависимость скорости звука от глубины в сентябре

Ансамбль реализаций вертикального распределения скорости звука в период исследований звукового поля приведен на рис. 3.8. Моделирование звукового поля осуществлялось для зависимости скорости звука от глубины, отмеченной на рисунке знаком «\*», в среднем отражающей характер изменения скорости звука.

Зависимости модуля нормированных собственных функций от глубины  $W_i(z)$  показаны на рис. 3.9. В табл. 3.3 приведены характеристики НВ при соответствующих значениях глубины излучателя  $z_s$  и приемника  $z_r$ . Все нормальные волны имеют комплексные волновые числа, последовательность коэффициентов затухания НВ монотонно возрастает. При глубине источника звука  $\sim 6$  м

наибольший коэффициент возбуждения имеют НВ с номерами 1, 2, 4 и 5, пучности собственных функций которых находятся на глубине, близкой к глубине излучателя (см. рис. 3.9). Только третья СФ на этой глубине имеет минимум. Таким образом, в формировании звукового поля принимает участие не менее четырех-пяти НВ. В придонном звуковом канале основную долю акустической энергии на большие расстояния переносит нормальная волна, имеющая фазовую скорость, близкую к скорости звука на верхней границе волновода [35] (ссылки на литературу здесь и далее см. часть 1), – это первая НВ. Остальные нормальные волны имеют значения фазовой скорости, превышающие наибольшее значение скорости звука в водном слое. Только первые пять НВ имеют фазовую скорость, меньшую скорости звука на нижней границе волновода. Фазовая скорость шестой НВ уже превышает скорость продольных волн в жидком поглощающем полупространстве, затухание ее почти на порядок больше, чем пятой НВ. Рассчитанные периоды интерференции нормальных волн,  $\Lambda_{i,j}$ , приведены в табл. 3.4. В дальнейшем воспользуемся ими и данными об амплитудах и затухании НВ для интерпретации пространственной структуры звукового поля, полученной при сканировании трасс.

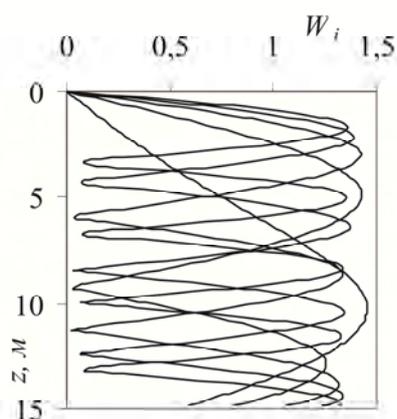


Рис. 3.9 – Зависимость пяти СФ от глубины в сентябре

Таким образом, согласно акустической модели квазистационарных трасс, в придонном звуковом канале в сентябре следует ожидать сложную пространственную структуру звукового поля, обусловленную интерференцией первых пяти нормальных волн. Существенно, что пучность первой СФ находится вблизи дна, на глубине ~10 м, поэтому велико и взаимодействие первой НВ с дном. С увеличением номера СФ возрастает и ее амплитуда на нижней границе волновода, так что НВ более высоких номеров испытывают еще большее влияние дна. Зависимости СФ от глубины в ноябре–декабре и сентябре четко указывают на особенности формирования звукового поля в эти периоды (см. рис. 3.2 и 3.9). Прежде всего, это

положение пучности и амплитуда у дна первой СФ. В приповерхностном звуковом канале и квазиоднородном слое энергия первой СФ сосредоточена в некоторой области, близкой к середине глубины волновода, в области глубин 5–10 м находятся и минимумы СФ высоких номеров. Для придонного звукового канала характерно равномерное распределение минимумов СФ высоких номеров по всей толщине волновода.

Таблица 3.3 – Характеристики нормальных волн в сентябре

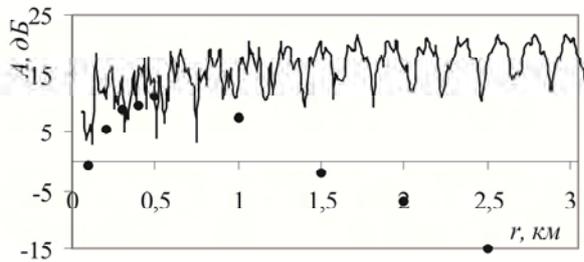
i	$c_{phi i},$ м·с <sup>-1</sup>	$\beta_{NW i},$ дБ·км <sup>-1</sup>	$ A_{NW i} $			
			$z_s = 6.0$ м			
			$z_r, \text{ м}$			
			4.8	7.7	9.0	12.0
1	1493	0.6	0.7	1.1	1.3	1.2
2	1514	1.2	1.9	1.0	0.2	1.6
3	1544	2.4	0.1	0.1	0.1	0.0
4	1592	4.3	0.7	1.0	0.8	0.5
5	1660	9.2	1.1	0.9	0.9	1.0
6	1757	74.	0.8	0.6	0.7	0.9
7	1910	193.0	0.3	1.7	0.8	1.1

Таблица 3.4 – Периоды интерференции НВ в сентябре

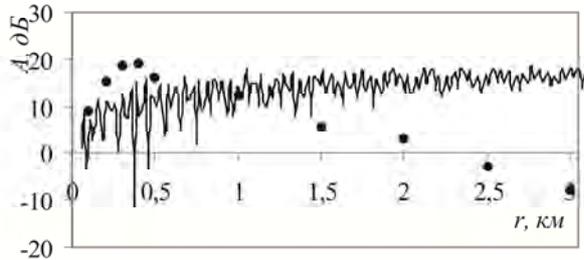
i	$\Lambda_{i,j}, \text{ м}$							
	j							
	2	3	4	5	6	7	8	9
1	214	87	47	29	19	13	10	7
2	–	147	60	33	21	14	10	7
3	–	–	100	43	25	16	11	7
4	–	–	–	75	33	19	12	8
5	–	–	–	–	59	25	14	9
6	–	–	–	–	–	43	19	11
7	–	–	–	–	–	–	33	14

Ожидаемые в сентябре согласно теоретической модели особенности формирования звукового поля, а также эффекты взаимодействия нормальных волн с нижним полупространством подтверждаются результатами экспериментальных исследований, выполненных по методике измерений со стационарной установкой излучателя и приемной антенны. Анализ результатов измерений и расчетов аномалии распространения показал, что они находятся в относительном соответствии только на начальном участке трассы, протяженностью приблизительно от 1 до 2 км. Рис. 3.10 демонстрирует степень соответствия результатов численного моделирования, показанных сплошными линиями, и экспериментально полученных значений аномалии распространения,  $A(r)$ , показанных

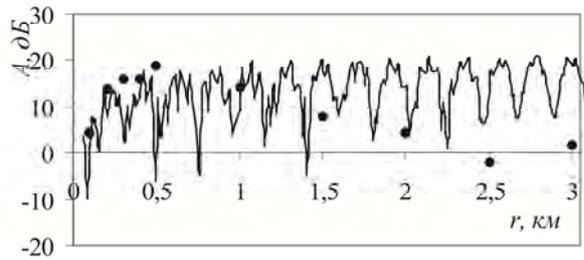
знаком «\*», на первых трех километрах трассы для одной, характерной, серии измерений. Принимая во внимание погрешность определения расстояния, отличие данных можно оценить величиной от ~2 до ~4.5 дБ при всех глубинах приема на первых 0.5 км трассы, или отсутствием различий. Такая же картина характерна при увеличении расстояния до 1–2 км. При  $z_r=4.85$  м различие данных расчета и измерений составляет ~4 дБ на расстоянии 1 км и



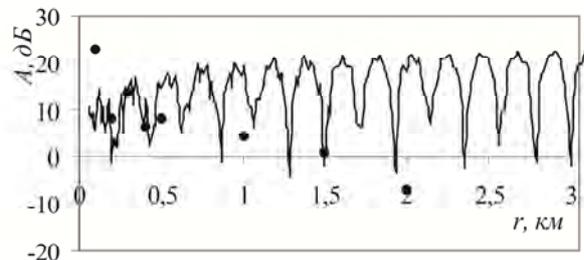
а)



б)



в)



з)

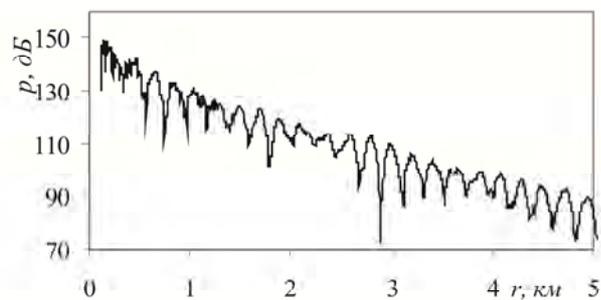
Рис. 3.10 – Зависимость аномалии распространения от расстояния в сентябре, измеренная и рассчитанная:  $z_s=6.0$  м;  $z_r=4.85$  м (а), 7.75 м (б), 9.2 м (в), 12.1 м (з)

возрастает до ~26 дБ на расстоянии 2.5 км. Несколько меньше различия при  $z_r=9.2$  м, достигающие значения ~19 дБ на расстоянии 3 км. При  $z_r=7.75$  м до расстояния 3 км ошибки не превышают ~6 дБ. При самой большой глубине приема,  $z_r=12.1$  м, ошибки превышают ~15 дБ после 2 км трассы. Таким образом, сравнение данных теории и эксперимента показывает их удовлетворительное соответствие при  $z_r=4.85$  м до расстояния ~1 км, при  $z_r=7.75$  м до расстояния ~1.5 км, при  $z_r=9.2$  м и  $z_r=12.1$  м до расстояния ~2 км. С увеличением расстояния наблюдается устойчивая тенденция к понижению экспериментальных значений по сравнению с теоретически ожидаемыми значениями для всех глубин приема. Экспериментально измеренная аномалия распространения резко убывает, принимая отрицательные значения, что в условиях распространения звука в придонном звуковом канале можно объяснить только влиянием дна. Это указывает на то, что в случае распространения звука в придонном звуковом канале условие плоскопараллельности границ волновода и аппроксимация геоакустической модели дна жидким однородным поглощающим полупространством, по всей вероятности, являются чрезмерным упрощением. При неровностях дна, показанных на рис. 2.2 (см. часть 1), условие (2.1, см. часть 1) выполняется, что дает основания не учитывать неровности дна и связанные с

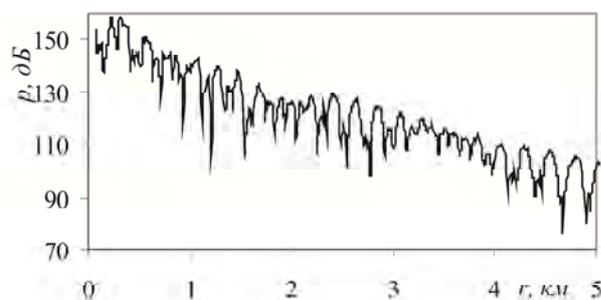
ними акустические эффекты, однако, данных о структурных элементах рельефа дна в рассматриваемом районе шельфа СЗЧМ недостаточно. Если распространить данные для других мелководных районов на шельф СЗЧМ и принять для квазистационарных трасс среднеквадратический наклон элементов рельефа порядка  $0.5^\circ$  и радиус корреляции порядка 30 м [36], то в этом случае неровностями рельефа при длине звуковой волны 2.9 м пренебрегать не следует – условие (2.1, см. часть 1) нарушается. Неровности дна приводят к связи нормальных волн, происходит перераспределение энергии между нормальными волнами в результате рассеяния на неровностях нижней границы. Связь нормальных волн оказывает существенное влияние на потери при распространении звука за счет перераспределения энергии НВ и перекачки энергии от НВ низких номеров нормальным волнам высоких номеров, имеющим большой коэффициент затухания, и наоборот. В некоторых случаях можно считать, что связь НВ имеет место на отдельных участках гидроакустической трассы, а не непрерывно с расстоянием [36]. Отметим, что перераспределение энергии между НВ может происходить и при изменении вертикального распределения скорости звука с расстоянием, что в условиях данного эксперимента не наблюдалось. Другой вероятной причиной расхождения данных расчета и эксперимента является упрощение геоакустической модели. Знание характеристик осадочных слоев – значений скорости продольных и поперечных волн, а также коэффициентов их поглощения – необходимо до глубины нескольких длин волн. В работе [37] имеются указания на глубину проникновения звуковых волн в дно, в условиях распространения звука в придонном звуковом канале эта глубина выше, чем в условиях распространения в приповерхностном звуковом канале и квазиоднородном слое. Глубина проникновения звуковых волн в дно составляет  $(0.5-2.0)\lambda$ . Если в осадочных слоях возбуждается поперечная волна со скоростью не менее  $(800-900)\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ , то ее затухание является дополнительным источником потерь звуковой энергии. Если скорость продольных волн в осадочных слоях меньше скорости звука на нижней границе водного слоя,  $c_l < c_n$ , то верхние слои дна становятся частью придонного звукового канала, что может наблюдаться на шельфе СЗЧМ [19], в этом случае потери звуковой энергии также возрастают.

С целью оценки пространственной структуры звукового поля обратимся к результатам сканирования двух трасс, №1 и №2. Изменение звукового давления с расстоянием,  $p(r)$ , показано на рис. 3.11 на трассе №2, на рис. 3.12 – на трассе №1. Для удобства расстояние ограничено 5 км, однако оценка периодов изменения звукового давления сделана до расстояний  $\sim 7$  км. Пространственные периоды изменения звукового давления, полученные при сканировании трассы №2 на всех глубинах приема, в пределах методической погрешности, совпадают с ожидаемыми теоретически периодами интерференции НВ. Доминируют периоды интерференции 1 и 2, 2 и 3 НВ, однако и в конце трассы прослеживается интерференция 1 и 3, 3 и 4, 4 и 5 НВ, а, возможно, и периоды, связанные с интерференцией шестой НВ с НВ более низких номеров. Констатируя различие положения границ и состава осадочных пород на трассе № 2 и № 1, обратим внимание на общность пространственной структуры звукового поля на них (см. рис. 3.11–3.12). По данным сканирования трассы № 1, также выделяются периоды изменения звукового давления, совпадающие в пределах методической погрешности со значениями, ожидаемыми

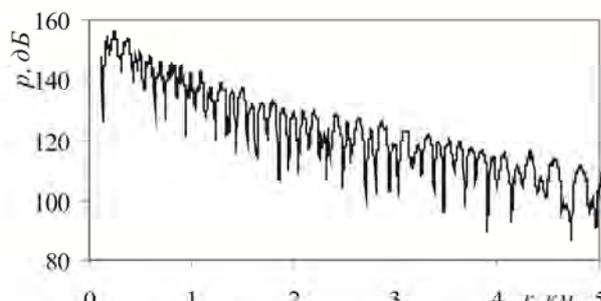
теоретически. Это позволяет сделать вывод о приемлемости использования акустической модели квазистационарных трасс, в отношении пространственной структуры звукового поля, и в условиях придонного звукового канала. Однако о полной адекватности акустической модели условиям распространения звука говорить не приходится.



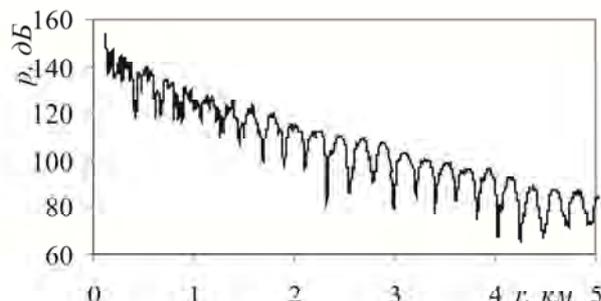
а)



б)

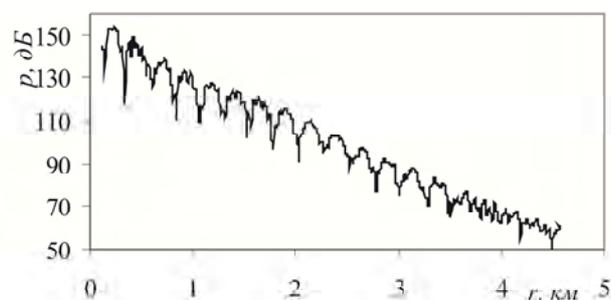


в)

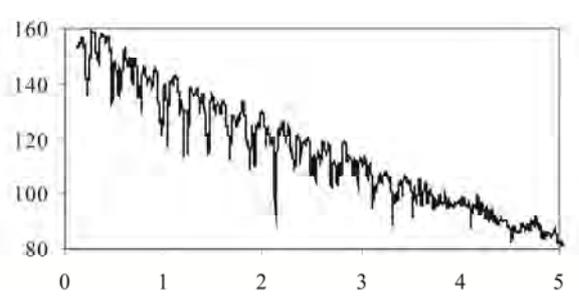


г)

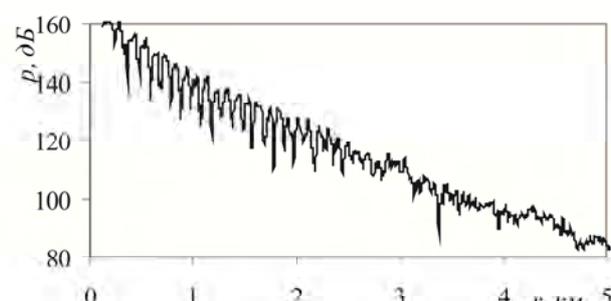
Рис. 3.11 – Зависимость звукового давления от расстояния в сентябре на трассе № 2 (эксперимент):  $z_s = 6.0$  м;  $z_r = 4.85$  м (а), 7.75 м (б), 9.2 м (в), 12.1 м (г)



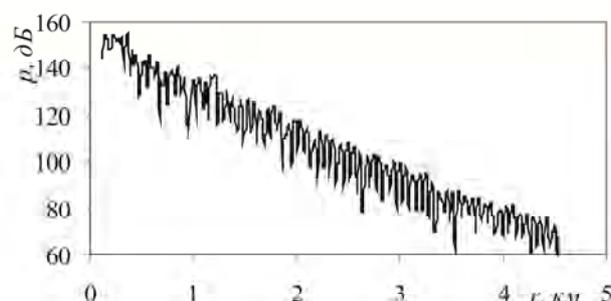
а)



б)



в)



г)

Рис. 3.12 – Зависимость звукового давления от расстояния в сентябре на трассе № 1 (эксперимент):  $z_s = 6.0$  м;  $z_r = 4.85$  м (а), 7.75 м (б), 9.2 м (в), 12.1 м (г)

Результат анализа амплитудных характеристик звукового поля и его пространственной структуры в сентябре приводит к выводу о необходимости усложнения геоакустической модели и физической модели волновода за счет учета неровностей нижней границы. Однако в отсутствие детальной информации о характеристиках дна изменение его модели в рамках данной работы не представляется возможным, поэтому мы ограничились качественным анализом эффектов, вызывающих повышенное затухание при распространении звука на шельфе СЗЧМ. Отсюда следует и нецелесообразность изменения теоретической модели звукового поля в рамках данной работы. Анализ структуры звукового поля свидетельствует о том, что акустическая модель квазиоднородных трасс адекватно отражает условия распространения звука на шельфе СЗЧМ в условиях отрицательной рефракции только на протяжении (1–2) км. Таким образом, представляют интерес дальнейшие исследования в направлении развития акустической модели шельфа СЗЧМ – геоакустической модели дна и теоретического описания звукового поля. Геоакустическая модель должна учитывать слоистость дна, скорость поперечных волн и их затухание, неровности нижней границы, теоретическая модель – связь нормальных волн.

В целом акустическая модель квазистационарных трасс отражает особенности распространения звука на шельфе СЗЧМ. В частности, распространение звука адекватно описывается в приповерхностном звуковом канале и квазиоднородном слое. В придонном звуковом канале – адекватно описывается только пространственная структура звукового поля.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Принятая концепция исследований звукового поля на шельфе СЗЧМ позволила создать акустическую модель квазистационарных трасс и получить оценку ее адекватности условиям распространения звука. На основании оценки физической адекватности акустической модели можно сделать следующие выводы:

- Распространение звука в приповерхностном звуковом канале и квазиоднородном слое адекватно описывается предложенной акустической моделью, о чем свидетельствуют количественные оценки амплитудных характеристик и пространственной структуры звукового поля.

- Распространение звука в придонном звуковом канале описывается предложенной акустической моделью частично адекватно, а именно, удовлетворительно – по амплитудным характеристикам только на расстоянии 1–2 км, по пространственной структуре – во всем интервале расстояний.

- Несоответствие теоретически ожидаемых и экспериментальных данных в условиях придонного звукового канала объясняется доминирующим влиянием свойств нижней границы волновода. В то же время наблюдаемая экспериментально интерференционная структура звукового поля свидетельствует об адекватности акустической модели трасс на качественном уровне, что позволяет нам предложить следующие возможные причины несоответствия теории и эксперимента:

- Существование связи НВ в случае неровности нижней границы, в результате чего происходит перераспределение энергии между НВ.
- Существование явления прозрачности нижней границы, когда  $c_l < c_H$ , и верхняя часть дна становится частью придонного звукового канала.
- Существование в осадочных слоях поперечных волн со скоростью более  $(800-900) \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ , приводящее к переходу энергии звукового поля в поперечные волны, затухание которых может на порядок превышать затухание продольных.

Таким образом, повышение адекватности акустической модели квазистационарных трасс на шельфе СЗЧМ может быть достигнуто за счет уменьшения априорной неопределенности геоакустической модели дна. Поэтому представляет интерес дальнейшее развитие геоакустической модели и теоретической модели звукового поля с краевыми условиями, приближающимися к реальным условиям на нижней границе волновода.

## Литература

19. Богушевич В.К., Замаренова Л.Н., Скипа М.И. Особенности влияния нижней границы волновода на угловую структуру звукового поля в шельфовых районах северо-западной части Черного моря // Морской гидрофизический журнал – 2003. – № 5. – С. 40-46.
35. Denham R.N. Asymptotic solution for the sound field in shallow water with negative gradient // J. Acoust. Soc. Am. – 1969. – 45. – №2. – P. 365-371.
36. S. T. McDaniel. Mode conversion in shallow water sound propagation // J. Acoust. Soc. Am. – 1977. – 62. – №2. – P. 320-325.
37. F.B. Jensen. The effect of the ocean bottom on sound propagation in shallow water // Sound propagation and underwater systems. Meet., London, 1978. Extend. Abstrs. – London, 1978. – 3.2/1–3.2/4.