

СТРУКТУРА ЗВУКОВОГО ПОЛЯ НА ШЕЛЬФЕ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ: ЭКСПЕРИМЕНТ

Л. Н. ЗАМАРЕНОВА, М. И. СКИПА

*Отделение гидроакустики
Морского гидрофизического института НАН Украины. Одесса*

Original experimental results of sound field spatial structure researches along quasi-stationary lines positioned in the Black Sea North-West shelf in negative and positive refraction conditions in versus of radiation frequency and receiver depth are considered.

Исследования распространения звука на шельфе получили новый импульс развития в связи с преимуществами акустических методов для решения широкого круга задач – от освоения углеводородных ресурсов до использования рекреационных возможностей шельфа. К актуальным проблемам акустики шельфа относятся создание систем акустического зондирования для поиска метановых газовыделений [1], акустического мониторинга состояния водной среды, разработка гидроакустического телеметрического канала связи систем подводной GPS навигации. Распространение звука в мелководных районах имеет региональную специфику, обусловленную особенностями акустических свойств нижней границы волновода и условий формирования стратификации вод, в силу чего ни одна прикладная проблема акустики шельфа не может быть решена без экспериментальных акустических исследований в конкретной акватории. Учитывая, что проблемам акустики украинского шельфа Черного моря посвящено мало публикаций, примером которых являются работы [2–5], актуальность анализа результатов экспериментальных исследований звукового поля, проводимых Отделением гидроакустики МГИ НАНУ на шельфе северо-западной части Черного моря в течение ряда лет, новизна и значение их для акустики шельфа и решения прикладных задач очевидны. Целью работы является исследование зависимости структуры звукового поля от типа рефракции, частоты излучаемого сигнала и глубины приема, которое основано на результатах натурных измерений на квазистационарных трассах.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования звукового поля проводились на шельфе северо-западной части Черного моря (СЗЧМ) на квазистационарных гидроакустических трассах по методике сканирования трассы (буксировки излучателя) в условиях отрицательной и положительной рефракции и квазиоднородного слоя. Источник тональных сигналов частотой 516 и 1550 Гц буксировался на глубине $z_s \approx 6$ м со скоростью ~ 2 м·с⁻¹. Стационарно установленной вертикально ориентированной антенной с эквидистантно расположенными сферическими гидрофонами осуществлялся прием сигналов, которые по кабелю передавались в береговую лабораторию. Глубина водного слоя вдоль гидроакустических трасс составляла ~ 15 м; проводился мониторинг вертикального распределения скорости звука и гидрометеорологических условий. Измеренное звуковое давление усреднялось, $\bar{p}(r)$, нормировалось на величину $p_0 = 10^{-6}$ Па и представлялось в виде зависимости от расстояния $p(r) = 20 \lg(\bar{p}(r)/p_0)$.

Для інтерпретації експериментальних даних проводилося численне моделювання звукового поля точечного тонального джерела звуку по теорії нормальних хвиль для моделі хвилювача постійної товщини, лежачого на жидкому однорідному поглинаючому напівпространстві. Характеристикам дна вздовж трас відповідали наступні параметри нижнього напівпространства: швидкість продольних хвиль $1700 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, тангенс кута втрат 0.007 , відношення густини нижнього напівпространства до густини води 1.6 .

З метою прогностичної оцінки втрат при поширенні звуку незалежності від механізму їх виникнення, в тому числі закону розширення фронту хвилі, виділявся тренд експериментальної залежності, апроксимований функцією –

$$\bar{p}(r) = K \cdot e^{-\alpha r}, \quad (1)$$

де K – деяка постійна;

α – ефективний коефіцієнт затухання при поширенні звуку в хвилювачі.

Припущення про експоненціальний характер тренда стосується до всього інтервалу відстаней, але в межах окремих відрізків інтервалу параметри апроксимуючої функції K і α мають локальні властивості.

Експериментальні залежності $p(r)$ розглянемо для двох глибин розміщення приймачів, $z_r \approx 4.8 \text{ м}$ і $z_r \approx 9.0 \text{ м}$, результати розрахунків – для від'ємної рефракції, при якій поле формується найбільшим числом нормальних хвиль (НХ), а їх характеристики суттєво залежать від величини градієнтів швидкості звуку, акустичних властивостей дна, взаємного положення джерела і приймача звуку (частота випромінювання $f = 516 \text{ Гц}$).

УСЛОВИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ РЕФРАКЦИИ

Стратифікація вод в вересні відповідає характерним для шельфа СЗЧМ умовам від'ємної рефракції – від'ємні значення вертикальних градієнтів швидкості звуку близькі до максимальних за модулем значень, а умови поширення звуку найменш сприятливі. На рис. 1 показано ансамбль реалізацій вертикального розподілу швидкості звуку в період вимірювань.

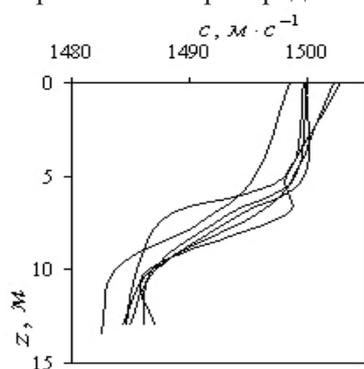


Рис. 1

Обратимся к результатам численного моделирования звукового поля, создаваемого источником звука частотой 516 Гц. В таблице 1 приведены значения фазовой скорости $c_{i,ph}$, коэффициента затухания β_i первых шести нормальных волн, их амплитуды $|A_{NW i}|$ в точке приема z_r и период интерференции нормальных волн с номерами i и j

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

где k_i, k_j – волновые числа нормальных волн.

Слой термогалоклина располагался между горизонтами ~ 5 и ~ 10 м, в пределах которого находился излучатель и приемник при глубине $z_r \approx 9.0 \text{ м}$, а в случае глубины приемника $z_r \approx 4.8 \text{ м}$ прием осуществлялся при меньших по модулю вертикальных

градиентах скорости звука. Согласно расчетам, все НВ являются затухающими, пять из них имеют фазовую скорость, меньшую скорости звука на нижней границе волновода. Затухание первых трех НВ невелико, а коэффициент затухания шестой НВ почти на порядок превышает коэффициент затухания пятой. Формирование звукового поля пятью НВ должно приводить к его сложной пространственной структуре. Приведенные на рис. 2 зависимости модулей пяти собственных функций от глубины, $|W_i|(z)$, отмеченные цифрами 1...5, показывают, что при размещении излучателя на глубине $z_s \approx 6$ м наилучшим образом возбуждаются НВ с номерами 1, 2, 4 и 5.

Табл. 1

i	$c_{i\text{ ph}},$ $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$	$\beta_i,$ $\text{дБ} \cdot \text{км}^{-1}$	$\Lambda_{i,j}, \text{ м}$					$ A_{NW i} $	
			j					$z_r, \text{ м}$	
			2	3	4	5	6	4.8	9.0
1	1493.2	0.059	214.0	87.2	46.5	28.7	19.3	0.66	1.30
2	1513.6	1.193	–	147.1	59.5	33.2	21.2	1.90	0.18
3	1544.4	2.409	–	–	99.9	42.8	24.8	0.06	0.09
4	1592.2	4.310	–	–	–	75.0	33.0	0.69	0.78
5	1660.0	9.162	–	–	–	–	58.8	1.11	0.89
6	1756.5	74.410	–	–	–	–	–	0.75	0.70

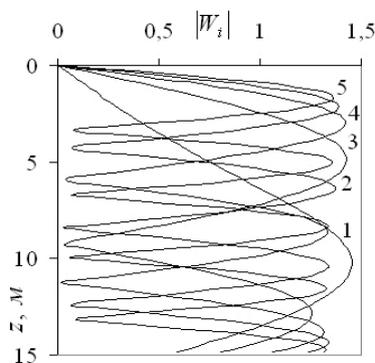


Рис. 2

В условиях отрицательной рефракции основную долю акустической энергии переносит нормальная волна с фазовой скоростью, близкой к скорости звука на верхней границе волновода – это первая НВ [6], о чем свидетельствуют периоды интерференции, связанные с первой НВ, выделяемые на рис. 3 а ($z_r \approx 4.8$ м) и рис. 3 б ($z_r \approx 9.0$ м). Наблюдается соответствие полученных экспериментально и теоретически значений периодов интерференции вдоль всей трассы и на отдельных ее участках в пределах погрешности определения расстояния. Во всем диапазоне расстояний для глубины приема $z_r \approx 4.8$ м доминирует период, близкий к периоду интерференции первой и второй НВ – $\Lambda_{1,2}$, что

объясняется небольшим затуханием и большой амплитудой этих НВ ($|A_{NW 1}|=0.66$ и $|A_{NW 2}|=1.90$). Остальные периоды связаны, в основном, с интерференцией пятой, четвертой и второй НВ. При $z_r \approx 9.0$ м на расстоянии до 3 км проявляется одинаковая степень взаимодействия первой НВ со второй, и третьей НВ с первой или четвертой ($|A_{NW 1}|=1.30$, $|A_{NW 2}|=0.18$, $|A_{NW 3}|=0.09$, $|A_{NW 4}|=0.78$). Зависимость потерь от глубины приема имеет сложный характер, спадание уровня звукового давления с расстоянием при частоте излучателя $f=516$ Гц происходит быстрее для приемника, расположенного

ближе к поверхности, поскольку вертикальное распределение скорости звука приводит к концентрации звуковой энергии вблизи дна (см. рис. 2).

Зависимость звукового давления от частоты излучаемого сигнала проявляется как в пространственных периодах его изменения, так и в уровнях амплитуды (см. рис. 3). Чем выше частота, тем больше потери энергии при распространении звука. Оценка звукового поля с точки зрения волновой теории свидетельствует о том, что с повышением частоты в формировании звукового поля участвует большее число НВ, затухание которых быстро растет с расстоянием. Динамический диапазон изменения звукового давления составляет от 86 до 98 дБ на расстоянии (4.6–5.7) км при $f=516$ Гц и от 75 до 89 дБ на расстоянии (1.9–2.4) км при $f=1550$ Гц. Периоды изменения звукового давления при частоте излучения 1550 Гц выражены несколько меньше, чем при частоте $f=516$ Гц, особенно при глубине приема $z_r \approx 9.0$ м, и составляют $\Lambda_{1,2} \approx 180$ м ($z_r \approx 4.8$ м), $\Lambda_{2,3} \approx 120$ м ($z_r \approx 4.8$ м, $z_r \approx 9.0$ м) и менее.

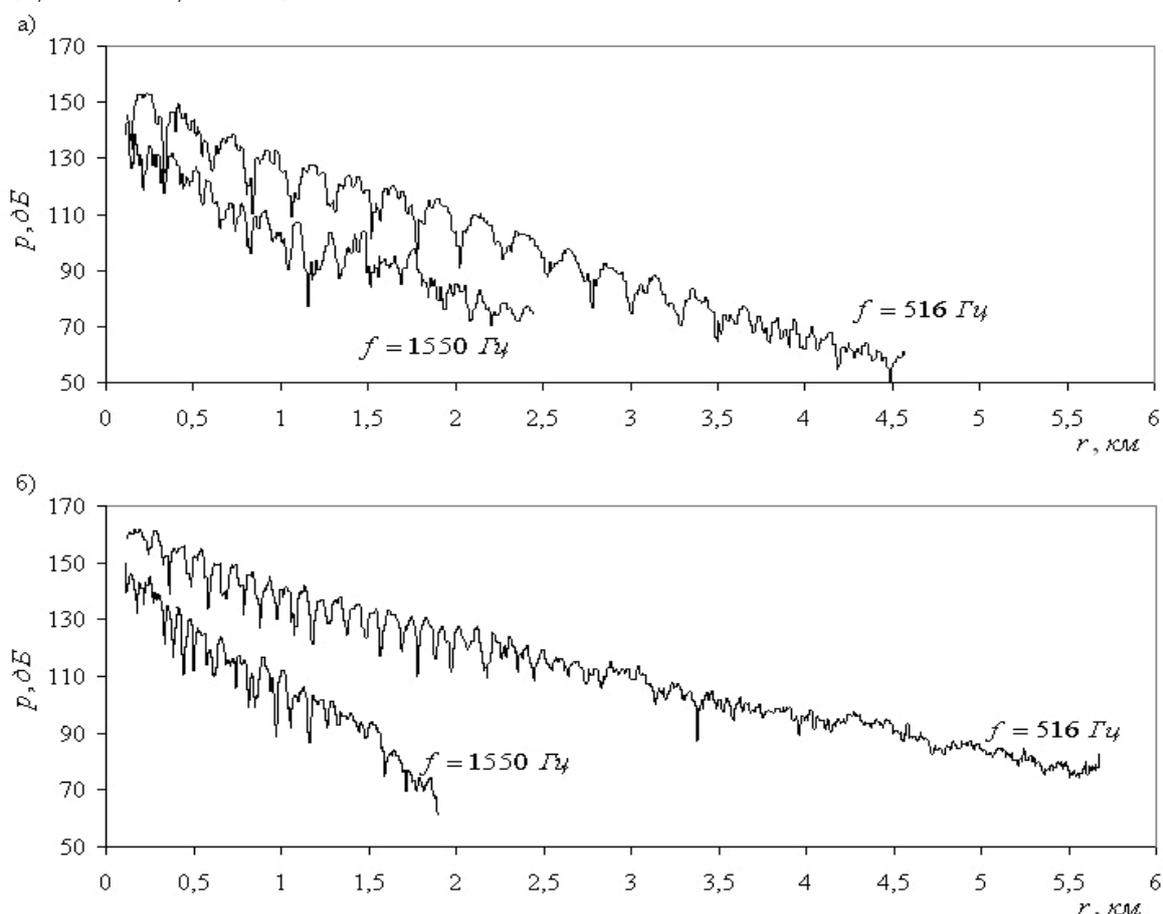


Рис. 3

Анализ экспериментально полученной пространственной структуры звукового поля в сентябре показал сопоставимость периодов ее изменения с теоретическими значениями периодов интерференции НВ, а также зависимость от частоты излучения и глубины приема при доминирующем влиянии частоты. Однако потери при

распространении звука существенно превышают ожидаемые теоретически, что можно объяснить существованием явлений, которые не учитываются принятой в расчетах моделью дна, таких как связь мод, генерация сдвиговых волн, величина скорости звука в водном слое на нижней границе, превышающая скорость звука в осадочном слое [5].

УСЛОВИЯ ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ РЕФРАКЦИИ И КВАЗИОДНОРОДНОГО СЛОЯ

На шельфе СЗЧМ условия положительной рефракции и квазиоднородного водного слоя характерны для декабря, когда наблюдаются слабые положительные или близкие к нулевым значениям вертикальные градиенты скорости звука и формируются наиболее благоприятные условия распространения звука. Ансамбль реализаций вертикального распределения скорости звука во время измерений показан на рис. 4.

Все нормальные волны являются затухающими, однако, коэффициенты их затухания в декабре значительно меньше, чем в сентябре. Как показывают результаты численного моделирования, при частоте $f = 516$ Гц в случае глубины излучения $z_s \approx 6$ м наилучшим образом возбуждается первая и вторая НВ, в меньшей степени – третья. Таким образом, в формирование звукового поля основной вклад должны вносить три НВ, взаимодействием которых определяются и пространственные периоды его изменения.

Изменение звукового давления с расстоянием в случае частоты $f = 516$ Гц при приеме на глубине $z_r \approx 4.8$ м, рис. 5 а, имеет выраженную периодичность вдоль всей

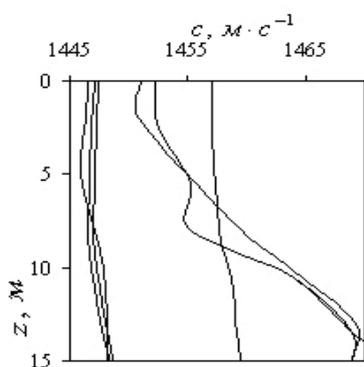


Рис. 4

трассы, близкую к периоду интерференции 1 и 2 нормальных волн, $\Lambda_{1,2} \approx 350$ м, с увеличением расстояния интерференционная картина сглаживается. Выделяется период, соответствующий периоду интерференции 1 и 3 нормальных волн, $\Lambda_{1,3} \approx 45$ м, который из-за сильного затухания третьей НВ проявляется только на начальном участке трассы. При глубине приемника $z_r \approx 9.0$ м в структуре звукового поля наблюдается интерференция первой и третьей НВ на начальном участке трассы, а первой и второй – и на больших расстояниях, рис. 5 б. Характерное отличие интерференционной картины для двух глубин приема проявляется в глубине

минимумов звукового давления, которые существенно больше при $z_r \approx 4.8$ м.

Зависимость спада уровня звукового давления с расстоянием на частоте $f = 1550$ Гц характеризуется величиной основного периода изменения звукового давления, составляющего ~ 1300 м, который прослеживается до конца трассы (см. рис. 5), и звуковое поле формируется двумя нормальными волнами для обеих глубин приема.

Зависимости звукового давления от расстояния для положительной рефракции (квазиоднородного слоя) в качестве особенностей имеют динамический диапазон изменения звукового давления, практически не зависящий от глубины размещения приемника и частоты излучаемого сигнала (41–59 дБ на расстоянии ~ 7.5 км), и глубокие интерференционные минимумы на частоте 516 Гц при $z_r \approx 4.8$ м.

Расчеты показали, что усредненные потери при распространении звука на шельфе СЗЧМ описываются экспоненциальной зависимостью (ур. 1) при величине достоверности

аппроксимации не менее 0.8. При отрицательной рефракции отмечается зависимость эффективного коэффициента затухания звука α от глубины приема и частоты излучения при ее доминирующем влиянии. Для двух глубин приема $\alpha=(13.2-19.4) \text{ дБ} \cdot \text{км}^{-1}$ при $f=516 \text{ Гц}$ и $\alpha=(25.0-42.3) \text{ дБ} \cdot \text{км}^{-1}$ при $f=1550 \text{ Гц}$. Положительная рефракция (квазиоднородный слой) характеризуется слабой зависимостью коэффициента α , как от глубины приема, так и от частоты, значения его изменяются от 5.1 до 6.5 $\text{дБ} \cdot \text{км}^{-1}$.

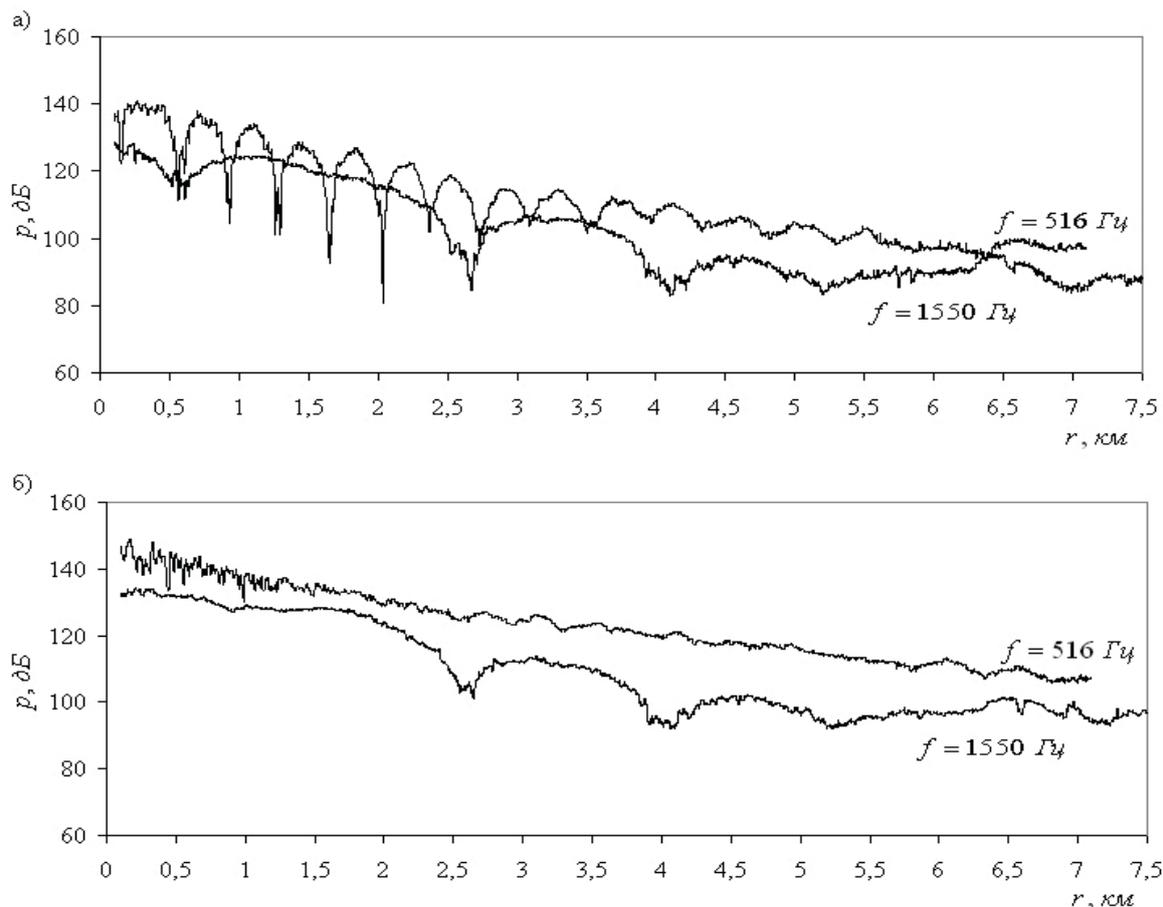


Рис. 5

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Определены особенности распространения звука на шельфе СЗЧМ: при отрицательной рефракции – большая скорость спадания уровня звукового поля с расстоянием и зависимость его от глубины приема и частоты излучения; при положительной рефракции и квазиоднородном слое – слабая зависимость звукового давления от глубины приема и частоты излучения, наличие глубоких минимумов уровня сигнала.
- Для частоты излучения $f=516 \text{ Гц}$ показано соответствие экспериментально полученных периодов изменения звукового давления и периодов интерференции

НВ, рассчитанных для выбранной модели волновода, однако потери при распространении превышают ожидаемые.

- Получены оценки эффективного коэффициента затухания при распространении звука в акватории шельфа СЗЧМ, которые могут быть использованы в качестве прогностических для выбора характеристик и глубины размещения приемопередающих систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богушевич В.К., Замаренова Л.Н., Скипа М.И. Возможности выявления и оценок метановых газовыделений на шельфе Черного моря методами акустического лучевого зондирования // КОНСОНАНС – 2007, Акустический симпозиум 25-27 сентября 2007 г., г. Киев – Сборник трудов – 2007. – С. 56–62.

2. Дивизинюк М.М. Акустические поля Черного моря – Севастополь: Госокеанариум, 1998. – 352 с.

3. Богушевич В.К., Замаренова Л.Н., Скипа М.И. О “толщине” лучей и возможностях акустического лучевого зондирования в условиях мелкого моря // КОНСОНАНС – 2007, Акустический симпозиум 25-27 сентября 2007 г., г. Киев – Сборник трудов – 2007. – С. 63–68.

4. Наумов И.В. Геоакустическая модель донных осадков Каркинитского залива (Черное море) // Вопросы судостроения. Сер. Акустика – 1980. – вып. 14. – С. 79–83.

5. 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.

6. Denham R.N. Asymptotic solution for the sound field in shallow water with negative gradient // J. Acoust. Soc. Amer. – 1969. – 45. – № 2. – P. 365–371.